



**Universidad
de La Laguna**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estimación de la estabilidad de la
inversión térmica de subsidencia en
Canarias, mediante modelización
mesoescalar de alta resolución.**

Realizado por
Raúl Canino Peña

Dirigido por
Juan Pedro Díaz González
Francisco Javier Expósito González

Grado en Física

Mayo de 2024

Abstract

The stability of the subsidence inversion strength in the Canary Islands is analyzed and characterized using observational and modeled data. A thermal inversion is a highly stable atmospheric layer in which the temperature increases with height. The start of this anomalous behavior of the temperature with altitude is called base. The end is called the top of the inversion. Inversions have numerous characteristics such as its height, thickness or strength. The strength of the inversion is defined as the potential temperature difference between its top and base. Thermal inversions limit vertical and convective air movements, thus greatly affecting the climatic conditions of the areas where they form. In the Canary Islands, given its atmospheric conditions, an inversion that separates the Marine Boundary Layer (MBL) from the free troposphere appears most of the time. The Canary Islands have a strong stratification of its atmosphere, being the main reasons for this the strength and position of the Azores anticyclone, the Gulf Stream and the cold water current of the Atlantic Ocean that shares its name with the islands. The formation of the inversion is due to the subsidence of warm air masses, while the air closer to the surface stays cooler due to the aforementioned currents. In order to study this subsidence thermal inversion, daily radiosondes launched from the meteorological stations of Güímar (from 2003 to 2019) and Puerto de la Cruz (from 2011 to 2019), both located on the island of Tenerife, are used. In addition, modeled atmospheric profiles have been adopted to study the end-of-century variation in the inversion strength. In order to calculate this parameter, it is necessary to have atmospheric sounding data with high resolution. However, this data is not always available. Therefore, the estimator parameters, which require less information, are introduced. We have made use of the EIS (Estimated Inversion Strength) and EIS_p (profile-based method of Estimated Inversion Strength). In addition, a modification of the EIS_p is proposed: the EIS_p GOTA. By using the EIS, it is found that the lower troposphere has a thermal inversion in approximately 83 % of radiosondes. This frequency increases up to 88 % in summer. By the end of the century, an increase in the number of days in which there would be a thermal inversion is detected, reaching 98 %. The strength of these inversions is calculated using EIS, EIS_p and EIS_p GOTA. A comparative analysis shows that the results obtained by EIS and EIS_p GOTA are more closely related than the ones from EIS and EIS_p . According to the EIS, the inversion strength has a seasonal dependency, reaching its maximum in summer. The climate model used correctly predicts this dependence, in addition to an increase in the EIS and a decrease in the EIS_p GOTA towards the end of the century. Therefore, it is concluded that, given its complexity, there is no parameter that is fully capable of correctly estimating the inversion strength, its seasonal variations and trends over the years. The base of the inversion sits at its maximum height in winter (1900 m a.s.l in Puerto de la Cruz and 1780 m a.s.l. in Güímar) and minimum in summer (1300 m a.s.l in Puerto de la Cruz and 1600 m a.s.l. in Güímar). The model predicts this variation, but has a bias of hundreds of meters. Also, in Güímar, it fails to

predict the season of the year with the lowest base height. By the end of the century, according to the model used, the height of the base of the inversion will decrease in Puerto de la Cruz, especially in summer (nearly 300 m). In Güímar it will remain constant, except in summer, when it will increase close to 200 m. Finally, future lines of work are proposed, including further study in the variation of other characteristics of the inversion and the use of different methods.

Keywords: Thermal inversion, Subsidence, Marine Boundary Layer, Inversion strength, EIS, EIS_p, GOTA, Canary Islands

Resumen

La estabilidad de la inversión térmica de subsidencia en Canarias es analizada y caracterizada utilizando datos observacionales y modelizados. Una inversión térmica es una capa de la atmósfera altamente estable en la que la temperatura aumenta con la altura. Se denomina base y cima respectivamente, al inicio y final de este comportamiento anómalo de la temperatura con la altura. Las inversiones tienen numerosas características como podrían ser su altura, grosor o fuerza. Se define la fuerza de la inversión como la diferencia de temperatura potencial entre su cima y base. Las inversiones térmicas limitan los movimientos de aire verticales y convectivos, por lo que afectan enormemente las condiciones climáticas de las zonas en las que se forman. En Canarias, dadas sus condiciones atmosféricas, tiene lugar, con alta frecuencia, una inversión térmica que separa la *Marine Boundary Layer* (MBL) de la troposfera libre. Las Islas Canarias cuentan con una atmósfera fuertemente estratificada, siendo la fuerza y posición del anticiclón de las Azores, la corriente del Golfo y la corriente de agua fría canaria las principales responsables. La formación de la inversión es debido a la subsidencia de masas de aire calientes, mientras que el aire más cercano a la superficie se mantiene más frío gracias a las corrientes anteriormente mencionadas. Para estudiar esta inversión térmica de subsidencia, se han utilizado radiosondeos diarios lanzados desde las estaciones meteorológicas de Güímar (2003-2019) y Puerto de la Cruz (2011-2019), ambas situadas en la isla de Tenerife. Además, se han empleado perfiles atmosféricos modelados para estudiar la variación de cara a final de siglo de la fuerza de la inversión. Para calcularla, es necesario contar con perfiles atmosféricos con alta resolución. Sin embargo, este nivel de detalle no se encuentra siempre disponible. Por este motivo aparecen los parámetros estimadores de la fuerza de la inversión, que requieren menos información. En este estudio se ha hecho uso del EIS (*Estimated Inversion Strength*) y EIS_p (*profile-based method of Estimated Inversion Strength*). Además, se propone una modificación del EIS_p : el EIS_p GOTA. Un análisis gráfico y estadístico fue realizado a los resultados obtenidos, extrayendo las siguientes conclusiones. Usando el EIS, se encuentra la inversión térmica en un 83 % de los radiosondeos. Esta frecuencia aumenta hasta el 88 % en los meses de verano. Para final de siglo, se detecta un aumento del número de días en los que habrá inversión, llegando al 98 %. La fuerza de estas inversiones es calculada usando EIS, EIS_p y EIS_p GOTA. Un análisis comparativo muestra que los resultados obtenidos por EIS y EIS_p GOTA se encuentran más relacionados que los obtenidos por EIS y EIS_p . Se observa también, únicamente según el EIS, una dependencia estacional de la fuerza de la inversión, aumentando en verano. El modelo climático utilizado predice correctamente esta dependencia, además de un aumento del EIS y una disminución del EIS_p GOTA de cara a final de siglo. Se concluye por tanto que, dada su complejidad, no existe parámetro que sea capaz de estimar correctamente la fuerza de la inversión, sus variaciones a lo largo del año y tendencias. La base de la inversión se encuentra en su máxima altura en invierno (1900 m s.n.m. en Puerto de la Cruz y 1780 m s.n.m. en Güímar) y mínima en

verano (rondando los 1300 m s.n.m en Puerto de la Cruz y los 1600 m s.n.m. en Güímar). El modelo predice esta variación, pero cuenta con un sesgo de cientos de metros. Además, en Güímar, falla a la hora de predecir la estación del año con la menor altura de la base. De cara a final de siglo, esta altura disminuirá en Puerto de la Cruz, especialmente en verano (casi 300 m). En Güímar se mantendrá constante salvo en verano que aumentará cerca de 200 m. Finalmente se proponen futuras líneas de trabajo, incluyendo un estudio de las variaciones de otras de las características de la inversión o el uso de nuevos métodos.

Palabras clave: Inversión térmica, Subsistencia, Marine Boundary Layer, Radiosondeos, Fuerza de la inversión, EIS, EIS_p, GOTA, Islas Canarias

Índice general

1	Introducción	1
1.1.	Atmósfera baja	1
1.1.1.	Descripción general	1
1.1.2.	Atmósfera baja en Canarias	2
1.2.	Inversiones térmicas	3
1.2.1.	Descripción general	3
1.2.2.	Inversiones térmicas en Canarias	4
1.2.3.	Parámetros necesarios para la caracterización de las inversiones térmicas	5
1.3.	Motivación y objetivos	5
2	Metodología	7
2.1.	Fuerza de la inversión	7
2.2.	Estimación de la fuerza de inversión	7
2.2.1.	LTS	8
2.2.2.	EIS	8
2.2.3.	EIS _p	9
2.2.4.	EIS _p GOTA	10
2.3.	Radiosondeos	11
2.4.	Predicciones numéricas	12
2.5.	Procesado de datos	12
2.5.1.	Algoritmo	12
2.5.2.	Cálculo de parámetros	13
2.6.	Análisis de datos	14
3	Discusión de resultados	16
3.1.	Días con inversión térmica	16
3.1.1.	Registro histórico	16
3.1.2.	Predicciones final de siglo	18
3.2.	Estimación fuerza de la inversión	19
3.2.1.	Registro histórico	20
3.2.2.	Predicciones final de siglo	25
3.3.	Altura de la base de la inversión térmica	27
3.3.1.	Registro histórico	27
3.3.2.	Predicciones final de siglo	30
4	Conclusiones	32
4.1.	Conclusiones	32
4.2.	Futuras líneas de trabajo	34
	Bibliografía	35

1. Introducción

Summary. This section presents a first introduction to the topic of the study. The Planet Boundary Layer (PBL) definition, its diurnal evolution and components are given. Then, the study site (the Canary Islands) and its meteorological characteristics are stated. One of its peculiarities is the strong stratification of its atmosphere, being the main reasons for this the strength and position of the Azores anticyclone, the Gulf Stream and the cold water current of the Atlantic Ocean that shares its name with the islands. Following that, the definition of a thermal inversion, its features and how it's formed is explained. Finally, how these inversions affect the vertical profiles of the atmosphere in the Canary Islands and its environmental and hydrological consequences are given. The objectives of the current study are outlined at the end of the chapter.

1.1. Atmósfera baja

1.1.1. Descripción general

La atmósfera se puede dividir de diversas formas. La división más común se realiza atendiendo a los cambios en el gradiente vertical de temperatura. Podemos dividirla así en troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. La troposfera es la capa más próxima a la superficie del planeta (atmósfera baja), conteniendo las presiones más altas. Esta abarca desde la superficie hasta los 18 km de altura como máximo, variando este límite superior con la latitud y condiciones climáticas [1]. Aunque algunas variaciones pueden ocurrir, la temperatura generalmente disminuye a medida que ascendemos en la troposfera, principalmente debido a que esta capa se calienta mediante intercambios de energía con la superficie terrestre. El entendimiento de la troposfera es de gran importancia debido a que la gran mayoría de fenómenos meteorológicos [2, 3] y de formación de nubes [4] dependen de las condiciones presentes en esta capa.

La región de la troposfera más cercana a la superficie se denomina *Planetary Boundary Layer* (PBL). Podemos definir la PBL como la parte de la troposfera directamente influenciada por la presencia de la superficie de la Tierra [5]. El grosor de esta zona es variable con el tiempo y espacio, variando desde los cientos de metros hasta unos pocos kilómetros. Las características de la PBL se ven afectadas por el ciclo diurno y orografía de la zona. Esta variación diurna no es apreciable en el resto de la troposfera, denominada troposfera libre (*free troposphere*).

La PBL cuenta con una estructura bien definida que evoluciona a lo largo del día. Los principales componentes de esta estructura son la capa de mezcla (*mixed layer*), la capa residual (*residual layer*) y la capa límite estable (*stable boundary layer*) (Fig. 1.1). La capa de mezcla (ML) es una capa turbulenta y convectiva. Las fuentes de esta convección son la transferencia de calor de la superficie hacia alturas

mayores y el enfriamiento radiativo que ocurre por encima de la capa formada por las nubes. La ML alcanza su tamaño máximo por la tarde, ya que su crecimiento depende del calentamiento de la superficie por energía solar. Al crecer, se mezcla con y también comprime el aire menos turbulento que se encuentra encima de ella. Esta mezcla con el aire seco de la troposfera libre produce una disminución en la cantidad de vapor de agua presente en el aire, siendo esta disminución tan pronunciada que permite determinar la cima de la capa de mezcla. Por otro lado, la compresión deriva en un calentamiento del aire de la troposfera libre, llegando a estar más caliente que el de la ML, produciéndose lo que se conoce como una inversión térmica.

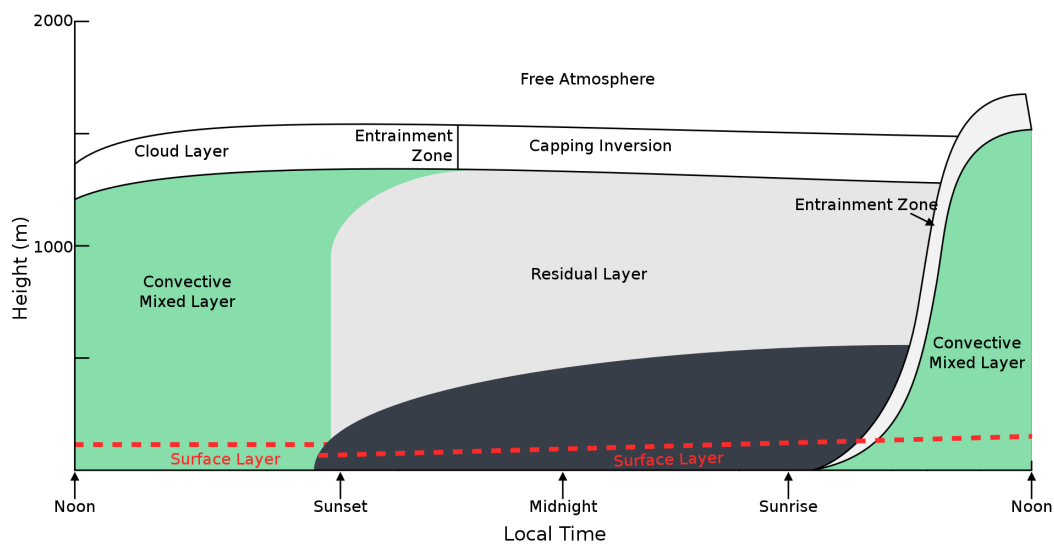


Figura 1.1: Evolución diaria de la PBL. La región negra representa la capa límite estable (nocturna). [Figura extraída de [6]]

Poco antes del atardecer, la convección deja de ocurrir, provocando un decaimiento en las turbulencias. La ML pasa ahora a conocerse como la capa residual (RL), una capa estratificada de forma neutra. Al día siguiente, cuando el sol vuelve a calentar la superficie, la convección aparece de nuevo, y por tanto la ML, cuyo crecimiento al llegar a la RL es muy rápido como podemos ver en la Figura 1.1. A medida que pasa la noche, la parte inferior de la RL se transforma debido a su contacto con el suelo en una nueva capa: la capa límite estable (SBL). Esta está caracterizada por aire estable y estático. A diferencia de la ML que tiene un límite superior bien definido, la SBL se mezcla de forma suave con la RL, que se encuentra encima. La SBL se puede formar también de día, siempre y cuando la temperatura del aire sea mayor que la de la superficie sobre la que se encuentra, ocurriendo esto en zonas costeras por ejemplo. Esta breve introducción general acerca de la PBL puede ampliarse en [5].

1.1.2. Atmósfera baja en Canarias

Cuando la PBL se encuentra por encima del mar, se la conoce como *Marine Boundary Layer* (MBL). Esta capa sigue estando influenciada mayoritariamente por

los distintos intercambios entre la atmósfera y ahora la superficie del mar. Las principales características de la MBL, como por ejemplo su altura, se encuentran ligadas a la inversión térmica que la cubre [7]. Esta será la capa que se encuentra sobre las Islas Canarias dado su condición de islas. Las características meteorológicas del archipiélago canario se encuentran gobernadas por la fuerza y posición del anticiclón de las Azores, la corriente del Golfo y la corriente de agua fría del Océano Atlántico que comparte nombre con las islas [8]. Gracias a estos fenómenos, la MBL sobre Canarias se encuentra fuertemente estratificada. Las condiciones de subsidencia casi permanentes en la troposfera libre acompañado de un flujo frecuente de vientos alisios dan lugar a una inversión térmica fuerte y estable que separa una troposfera libre seca de una MBL relativamente fresca y húmeda [9]. La MBL sobre Canarias es por tanto, una región compleja modulada por diversos factores.

1.2. Inversiones térmicas

1.2.1. Descripción general

En las distintas capas de la atmósfera, la temperatura varía de forma diferente con la altura. Además, dentro de cada capa se pueden producir comportamientos anómalos. En la troposfera, la temperatura disminuye con la altura. No obstante, existen regiones en las que ocurre lo contrario, llamadas inversiones térmicas. Una inversión térmica es por tanto, una capa con aire más cálido que el que se encuentra en la capa inferior a esta. Al nivel en el que la temperatura empieza a aumentar con la altura se le conoce como base de la inversión. Se le denomina cima al nivel en el que termina este comportamiento (Fig. 1.2). Las inversiones pueden ser caracterizadas por diferentes parámetros como su grosor (diferencia de altura entre la cima y la base), su fuerza (diferencia de temperatura potencial entre la cima y la base), el descenso de la humedad (diferencia de la humedad relativa entre la cima y la base)... Estas características determinarán su estabilidad y hermiticidad. El entendimiento de las inversiones térmicas es crucial ya que tienen gran influencia sobre el clima y la formación de nubes [10].

Las inversiones térmicas pueden explicarse atendiendo a la estructura de la PBL y también a criterios de estabilidad atmosférica. Aparecen debido a forzamientos tanto a gran escala como locales [11]. A nivel local, se pueden formar inversiones térmicas cerca de la superficie debido a enfriamientos radiativos de esta. A grandes escalas, pueden aparecer inversiones por subsidencia que actúan como límite superior de la PBL. Estas se desarrollan debido a hundimientos de masas de aire, normalmente en sistemas de altas presiones [12]. Las inversiones térmicas por subsidencia influyen drásticamente en la estructura de la atmósfera, limitando el movimiento vertical del aire y fenómenos convectivos [13, 14]. Inversiones fuertes impedirán la mezcla de aire seco, que se encuentra por encima de la inversión, con el aire húmedo de la PBL [15]. Por el contrario, inversiones débiles facilitan esta mezcla, secándose la PBL y disminuyendo la nubosidad [16].

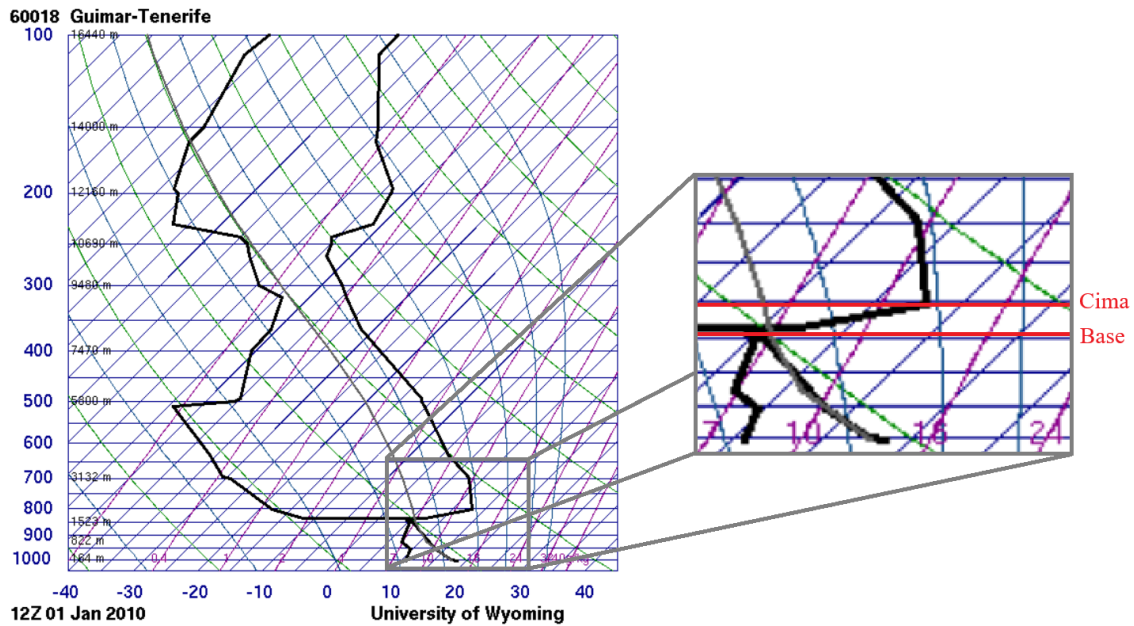


Figura 1.2: Perfil vertical de la atmósfera para las 12Z del 1 de Enero de 2010 en Güímar. Ampliación en la inversión térmica situada entre los 900 y 800 hPa con anotaciones indicando su cima y base. [Diagrama skew-T provisto por of Wyoming-Department of Atmospheric Science [17]]

1.2.2. Inversiones térmicas en Canarias

Las Islas Canarias se encuentran en una zona subtropical de altas presiones, por lo que la mayoría de las inversiones son por subsidencia, siendo el anticiclón de las Azores el principal responsable de este fenómeno. El aire proveniente del anticiclón sufre un movimiento subsidente y un calentamiento adiabático provocado por la compresión en las capas más bajas. Mientras, la masa de aire más próxima al mar se encuentra influenciada por la corriente marina fría que pasa por el archipiélago, estratificándose así el aire y dando lugar a la inversión térmica [18].

En Canarias las inversiones térmicas de subsidencia tienen una frecuencia altísima a lo largo de todo el año. A pesar de este predominio, existe una estacionalidad en la que varían altura y fuerza de la inversión. En Tenerife, distintos estudios sitúan la inversión a una media de 1600 m s.n.m. en invierno y a 1200 m s.n.m. en verano [19, 20]. La combinación de la inversión térmica junto con el flujo de los vientos alisios, que llegan a las islas cargados de humedad, dan lugar al fenómeno conocido como mar de nubes. Al llegar este aire húmedo a las islas, se ve forzado a realizar un ascenso orográfico. La base de la inversión actúa como un límite a partir del cual el aire no puede seguir ascendiendo; enfriándose y condensándose así en esa capa, generando un manto de nubes (stratocumulus, stratus y cumulus principalmente) [8, 21]. El mar de nubes tiene una gran importancia ambiental e hídrica en las islas. Un ejemplo de esto es el bosque de laurisilva, ecosistema que depende fuertemente de la presencia de este manto de nubes. Cualquier modificación en este fenómeno tendría consecuencias dañinas para este bosque con millones de años de antigüedad [22].

1.2.3. Parámetros necesarios para la caracterización de las inversiones térmicas

A continuación se definen algunos parámetros de gran importancia para el desarrollo de este estudio, ya que son necesarios para caracterizar las inversiones térmicas. Definiremos la temperatura potencial, necesaria para conocer la fuerza y por tanto la estabilidad de las inversiones; y el *Lifting Condensation Level*, nivel que dicta la evolución de las parcelas de aire y formación de nubes en la atmósfera.

- **Temperatura potencial θ .** Se define como la temperatura que tendría una parcela de aire si se expande o comprime adiabáticamente desde la presión y temperatura a la que se encuentra (p, T) hasta el nivel de presión estándar de $p_0 = 1000 \text{ hPa}$. Dado que la transformación es adiabática y suponiendo que se verifica la ecuación de los gases ideales, se puede calcular como se muestra en la Ecuación 1.1 a partir de la temperatura y presión iniciales.

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0,286} \quad (1.1)$$

- ***Lifting Condensation Level (LCL)*.** El LCL o nivel de condensación por ascenso es el nivel (altura) a la que se iguala la relación de mezcla (proporción de vapor de agua que hay en el aire) de la parcela con la relación de mezcla de saturación ($w = w_s$). La relación de mezcla de saturación, depende de la presión y temperatura de la parcela y es la relación a la que el aire se encuentra saturado. Al ascender la parcela de aire, su temperatura potencial y relación de mezcla permanecen constantes, a diferencia de la relación de mezcla de saturación que disminuye. A partir del LCL, la parcela dejará de evolucionar siguiendo una adiabática seca y lo hará por una adiabática saturada.

1.3. Motivación y objetivos

Variaciones asociadas a variables oceánicas y atmosféricas podrían causar cambios en las características de la inversión [21]. Dada la importancia de las inversiones térmicas de subsidencia a la hora de delimitar la MBL, estos cambios podrían alterar la formación de nubes y condiciones climáticas. El principal objetivo de este estudio es determinar, mediante análisis de datos observacionales y modelados, la existencia de variaciones en la fuerza de la inversión de cara a final de siglo en Canarias. Aplicando métodos novedosos se intentará replicar los resultados y tendencias detalladas en el pasado por otros autores para los datos del registro histórico. También se compararán las distintas técnicas utilizadas, con el fin de determinar la más apropiada para nuestro caso de estudio. Además, se comprobará la destreza del modelo WRF a la hora de simular los resultados para distintas características de la inversión. Se estudiará su fuerza, altura de la base y número de días en los que ocurre. Utilizando los datos modelados, se determinará

la existencia o no de variaciones en dichas características de la inversión de cara a final de siglo. Finalmente, se intentará explicar el origen y causas de los resultados obtenidos. Este estudio posiblemente permitirá mejorar el funcionamiento y habilidades predictivas del modelo WRF, así como comprender que variaciones podría provocar el cambio climático en la inversión térmica en Canarias.

2. Metodología

Summary. This section outlines the methodology employed in this study. Firstly, the inversion strength (IS) is defined. In order to calculate this parameter, it is necessary to have atmospheric sounding data with high resolution. However, this data is not always available. Therefore, other parameters that approximate the IS are introduced, which require less information. These are the LTS, EIS and EIS_p. In addition, a modification of the EIS_p is proposed: the EIS_p GOTA. Then, the data sources and samples are presented. In this study, real and modeled soundings launched from the stations of Güímar and Puerto de la Cruz in Tenerife are used. Finally, the treatment of these data to compute the aforementioned parameters and how they will be statistically analysed is depicted.

En esta sección se define la fuerza de la inversión térmica, cómo calcularla y el origen de los datos empleados. Estos incluyen radiosondeos diarios lanzados desde las estaciones meteorológicas tinerfeñas de Güímar y Puerto de la Cruz y simulaciones de estos radiosondeos usando el modelo WRF. El procesamiento de estos datos también se presenta en esta sección.

2.1. Fuerza de la inversión

La fuerza de la inversión (*Inversion Strength*) o fortaleza es una de las características más importantes de una inversión. Se define como la diferencia de temperatura potencial entre su cima (top) y base (Ec. 2.1).

$$IS = \theta_{top} - \theta_{base} \quad (2.1)$$

2.2. Estimación de la fuerza de inversión

Para conocer con exactitud la base y cima de la inversión, es necesario contar con perfiles verticales de la atmósfera en alta resolución. Sin embargo, no siempre es posible acceder a este tipo de información por lo que en muchas ocasiones se recurre a otros parámetros capaces de estimar la fuerza de la inversión. A continuación se definen los utilizados en este estudio, cuyas capacidades serán posteriormente comparadas.

2.2.1. LTS

Klein and Hartmann [23] definen el LTS (*Lower-Tropospheric Stability*) como la diferencia entre las temperaturas potenciales de la troposfera baja (700 hPa) y la superficie (Ec. 2.2). El LTS se introdujo para intentar entender los factores responsables de la distribución estacional de estratocumulos bajos. En la gran mayoría de regiones donde Klein and Hartmann [23] realizaron sus estudios, se encontró que la estación del año con mayor cantidad de estratocumulos coincidía con la estación con mayor estabilidad en la baja troposfera. Esto refleja la tendencia de los estratocumulos a formarse por debajo de inversiones térmicas. Por tanto, altos valores de LTS están también asociados con fuertes inversiones térmicas [15]. Por este motivo, el LTS es usado como una primera aproximación de la fuerza de la inversión térmica que cubre la PBL. Además, el nivel de 700 hPa es un nivel considerado estándar por lo que siempre aparece en los radiosondeos.

$$LTS = \theta_{700 \text{ hPa}} - \theta_0 \quad (2.2)$$

2.2.2. EIS

Como un refinamiento del LTS, Wood and Bretherton [15] presentan el EIS (*Estimated Inversion Strength*), siendo este parámetro un mejor predictor tanto de la fuerza de la inversión térmica que cubre la PBL como de la nubosidad baja. Se define según la Ec. 2.3, con z_{LCL} y z_{700hPa} la altura del LCL y del nivel con una presión de 700 hPa respectivamente. Además, Γ_m^{850} es el gradiente pseudoadiabático de temperatura potencial para una presión de 850 hPa y la media de las temperaturas de la superficie y del nivel con una presión de 700 hPa: $\Gamma_m^{850} = \Gamma_m([T_0 + T_{700}]/2, 850 \text{ hPa})$.

$$EIS = LTS - \Gamma_m^{850}(z_{700hPa} - z_{LCL}) \quad (2.3)$$

El gradiente pseudoadiabático de temperatura potencial se puede calcular según la Ec. 2.4 [15], donde L_v es el calor latente de vaporización, q_s la relación de mezcla de saturación, R_a y R_v las constantes de los gases para el aire seco y vapor de agua respectivamente, g la aceleración de la gravedad y c_{pa} el calor específico del aire a presión constante.

$$\Gamma_m(T, p) = \left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R_a}{c_{pa}}} \cdot \frac{g}{c_{pa}} \left(1 - \frac{1 + L_v q_s(T, p)/R_a T}{1 + L_v^2 q_s(T, p)/c_{pa} R_v T^2}\right) \quad (2.4)$$

La Figura 2.1 muestra el perfil vertical idealizado de la temp. potencial en la baja troposfera, considerado por los autores anteriores. En ella se observa que para llegar a la expresión final del EIS los autores del estudio realizaron diferentes aproximaciones (como considerar los gradientes Γ_{FT} y Γ_{DL} similares a Γ_m^{850}). A pesar de esto, Wood and Bretherton [15] comprobaron usando observaciones que el

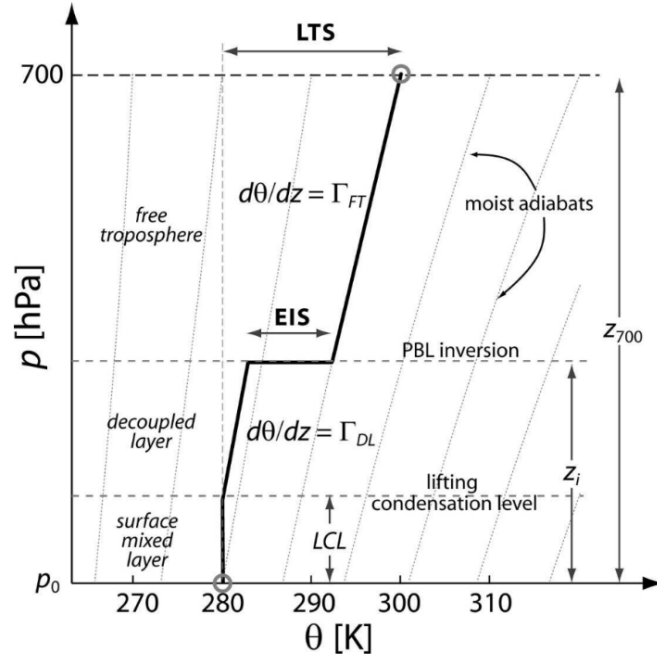


Figura 2.1: Perfil idealizado (línea gruesa negra) de la estructura de la baja troposfera. Las pseudoadiabáticas son representadas como líneas de puntos claros. [Figura extraída de [15]]

EIS es un mejor estimador que el LTS en un gran rango de temperaturas. Esto es debido a que la fuerza de la inversión no está únicamente correlacionada con el LTS, sino también con otros factores como la temperatura.

2.2.3. EIS_p

Basado en el marco de trabajo del EIS, el estudio realizado por Wang et al. [24] establece un nuevo método basado en perfiles (EIS_p) para estimar de forma más precisa la fuerza de la inversión térmica. El EIS_p presenta una correlación mayor con la fuerza de la inversión térmica que el LTS o EIS [24]. Además, este nuevo parámetro, a diferencia del EIS, nos proporciona una estimación de la altura de la base de la inversión. El EIS_p se calcula de la siguiente manera:

1. Se localiza el nivel i con mayor gradiente vertical de θ : $(d\theta/dz)_{max}$.

Se calculan todos los gradientes (Ec. 2.5) para los niveles por encima del LCL y por debajo de un límite superior (3 km en este estudio) hasta encontrarlo.

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{z_{i+1} - z_i} \quad (2.5)$$

2. Encontrar los niveles que abarcan la totalidad de la inversión térmica.

Puede ser que la inversión térmica se distribuya en otros niveles de presión y no solo en los de mayor gradiente vertical de θ . Por este motivo se consideraran

los bloques de i a $i - 1$, de i a $i - 2$ y de $i + 1$ a $i - 1$, representados con los colores rojo, azul y verde respectivamente en la Fig. 2.2.

3. Calcular el EIS_p .

El EIS_p se calcula usando la Ecuación 2.6 para los tres posibles bloques identificados en el segundo paso.

$$EIS_p = \theta_{top} - \theta_{base} - \Gamma_m(z_{top} - z_{base}) \quad (2.6)$$

Los subfijos top y $base$ representan el nivel superior e inferior respectivamente del bloque candidato. Γ_m se obtiene usando la Ec. 2.4 en el nivel de la base. El EIS_p final se determina por el mayor valor de entre los tres candidatos EIS_p 1-3 (Fig. 2.2).

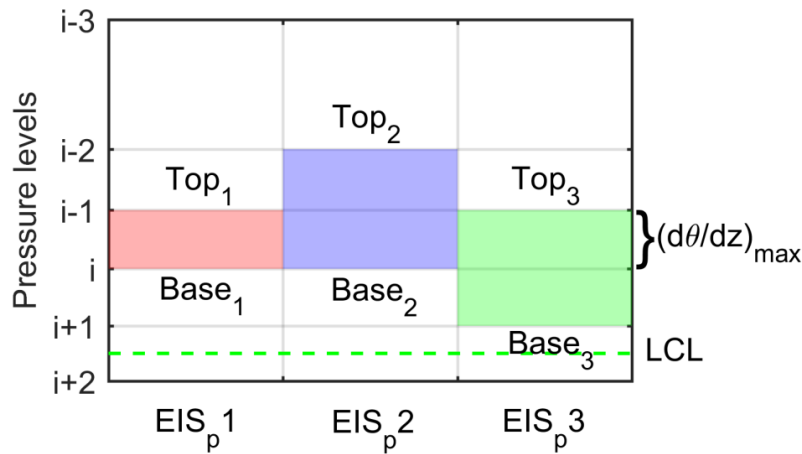


Figura 2.2: Ilustración de los tres bloques entre el LCL y los 3km sobre el nivel del mar que pueden abarcar la totalidad de la inversión térmica. El bloque rojo está formada por niveles adyacentes, a diferencia de los otros dos. [Figura extraída de [24]]

2.2.4. EIS_p GOTA

Para estar en concordancia con la definición dada en este estudio de la fuerza de la inversión (Ec. 2.1), se ha propuesto una modificación al EIS_p . Eliminando el término asociado al gradiente Γ_m en su definición (Ec. 2.6), obtenemos el nuevo parámetro EIS_p GOTA ¹ (Ec. 2.7). Para calcularlo seguiremos un procedimiento análogo al detallado en la Sección 2.2.3.

$$EIS_p \text{ GOTA} = \theta_{top} - \theta_{base} \quad (2.7)$$

¹El parámetro adquiere este nombre ya que la modificación ha sido sugerida por los tutores de este trabajo, miembros de GOTA (Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera) de la ULL

2.3. Radiosondeos

Para conocer la fuerza de la inversión térmica de subsidencia, necesitamos conocer con anterioridad parámetros atmosféricos como la temperatura o la presión a una determinada altura. Esta información puede ser obtenida gracias a radiosondeos atmosféricos. Las radiosondas son dispositivos constituidos por diversos sensores meteorológicos instalados en una pequeña barquilla. Ésta es elevada por un globo meteorológico y es capaz de comunicarse con un aparato receptor en la superficie y proporcionar características de la atmósfera para la hora y vertical de la zona de lanzamiento.

Los datos observacionales utilizados han sido obtenidos de las radiosondas lanzadas desde las estaciones meteorológicas de Güímar y Puerto de la Cruz, ambas situadas en Tenerife (Fig. 2.3, Tabla 2.1).



Figura 2.3: Imágen satelital de las Islas Canarias. Se indican las estaciones meteorológicas de Güímar y Puerto de la Cruz. [Créditos: COPERNICUS UE]

Estación	Coordenadas	Altura sobre el nivel del mar	Nº de estación
Güímar	28°19'N 16°23'W	115 m	60018
Puerto de la Cruz	28°25'N 16°32'W	114 m	60021

Tabla 2.1: Información acerca de las estaciones meteorológicas de Güímar y Puerto de la Cruz [25].

La estación de Güímar (GUI), a diferencia de la del Puerto de la Cruz (PTO), pertenece a la Red Sinóptica Básica Regional de la Asociación I de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y por lo tanto, los datos recogidos por esta se encuentran en el *Integrated Global Radiosonde Archive* (IGRA) [25]. Las medidas realizadas por las radiosondas pueden obtenerse de forma libre a través de la web del Departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Wyoming [17]. En la estación de Güímar se realizan dos radiosondeos diarios: uno a las 1200 UTC y otro a las 0000 UTC.

La estación de PTO (ubicada en el Jardín Botánico), al igual que la de GUI, pertenece a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Sin embargo, esta realiza sondeos de ozono [26]. Aunque conocer la estructura vertical del ozono en la atmósfera es el principal objetivo de estos lanzamientos, de estos podemos obtener todos los parámetros atmosféricos necesarios para el estudio de la estabilidad de la inversión térmica. En la estación de PTO se realiza un único sondeo semanal a las 1200 UTC (12Z).

El periodo de datos usados es diferente para cada estación. Para GUI, se han usado datos de 11508 radiosondeos lanzados entre los años 2003 y 2019. Para PTO, se han usado las medidas tomadas por 393 radiosondas entre los años 2011 y 2019.

2.4. Predicciones numéricas

Para poder determinar la estabilidad de la fuerza de la inversión térmica de subsidencia también se han empleado datos modelados. Para ello se ha utilizado el modelo de predicción numérica *Weather Research and Forecasting* (WRF) [27] y usado como condiciones iniciales y de contorno los datos de reanálisis ERA5 [28].

En primer lugar, se ha utilizado el modelo para determinar los datos ya obtenidos por las radiosondas mencionadas en la Sección 2.3. La comparación de estos datos modelados con los observacionales permitirá confirmar la fiabilidad del modelo. En segundo lugar, se ha hecho uso del modelo WRF para obtener predicciones futuras (entre los años 2070 y 2099). Se han calculado los datos que se obtendrían a final de siglo mediante 10956 radiosondeos lanzados en cada una de las estaciones de Güímar y Puerto de la Cruz a las 1200 UTC. Además, se ha supuesto el escenario SSP5-8.5 para final de siglo, el cual representa el extremo superior del rango de escenarios futuros. Este implica grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el siglo y una duplicación en los niveles de CO_2 en la atmósfera, provocando alteraciones en el clima y alcanzando así un forzamiento radiativo de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100 [29]. Con los datos modelados para este escenario se calculará la fuerza de la inversión térmica de subsidencia a final de siglo, pudiendo así comprender como variará con el tiempo.

2.5. Procesado de datos

2.5.1. Algoritmo

Tanto para los datos modelados como para los observacionales de ambas estaciones se generaron archivos en formato .txt. Cada archivo contiene todos los datos tomados por todos los radiosondeos en un año en una estación. Existen para un mismo año y una misma estación, dos archivos, uno con los datos reales y otro con los modelados. Dentro de cada fichero de datos, los datos correspondientes a cada radiosondeo se encuentran separados por una cabecera y un delimitador

inferior: la palabra 'Station' y a continuación una línea vacía. La cabecera contiene información acerca del radiosondeo como la hora, fecha, indicativo de la estación desde la que se realizó y los distintos parámetros medidos y sus unidades (Fig. 2.4). Para cada radiosondeo, los distintos parámetros tomados por la radiosonda se encuentran separados en columnas.

60018 Observations at 12Z 18 Mar 2003							
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot
1007.0	111	19.1	8.1	49	6.73	045	13.5
1000.0	171	17.9	5.9	45	5.81	nan	nan
953.0	575	13.1	4.1	54	5.38	nan	nan
925.0	824	10.7	3.7	62	5.38	053	1.9
850.0	1520	4.9	3.0	88	5.62	260	5.9
845.0	1570	4.2	1.5	83	5.07	nan	nan
843.0	1589	4.2	-0.4	71	4.40	nan	nan
840.0	1618	6.2	-2.7	52	3.72	nan	nan
838.0	1638	8.1	-17.9	14	1.11	nan	nan
835.0	1668	11.1	-19.9	10	0.94	nan	nan
831.0	1708	11.2	-19.7	10	0.96	nan	nan
710.0	3006	6.1	nan	nan	nan	nan	nan
700.0	3122	5.2	nan	nan	nan	284	17.5

Figura 2.4: Cabecera de los datos tomados por la radiosonda lanzada el día 18 de Marzo de 2003 a las 1200 UTC desde la estación de Güímar (número de estación 60018). Datos encontrados dentro del archivo `60018_2003`, que contiene todos los datos observacionales tomados en el año 2003 desde la estación de Güímar.

Se realizó un algoritmo en Python para poder leer todos estos archivos. La primera orden del algoritmo es abrir uno de los archivos que contienen los datos de un año. Posteriormente, gracias a la cabecera y al delimitador inferior, extrae todos los datos de un único radiosondeo y los guarda en listas. Con estas, haciendo uso de diferentes funciones, calcula la fuerza de la inversión térmica mediante los distintos parámetros mencionados anteriormente. Por tanto, la entrada del algoritmo son los datos medidos o modelados y la salida es la fuerza de la inversión. Una vez terminado todos los cálculos, pasa al siguiente radiosondeo y al terminar con todos los de un año, abre un nuevo archivo correspondiente al siguiente año. Al terminar de ejecutarse este algoritmo tendremos todos los valores calculados de la fortaleza distribuidos en distintas listas según la estación meteorológica, periodo temporal y si son datos reales o modelados. Posteriormente son analizados estadísticamente.

2.5.2. Cálculo de parámetros

Para este estudio se ha hecho uso de los datos de presión, altura, temperatura y temperatura del punto de rocío para una cierta altura de cada radiosondeo (de aquí en adelante en esta sección utilizaremos el término radiosondeo para referirnos tanto a los reales como a los modelados). Para obtener, a partir de estos, parámetros como la temperatura potencial o el LCL, se ha hecho uso de la colección de herramientas en Python de la librería Metpy [30]. Estas permiten realizar cálculos y visualizar información meteorológica con gran facilidad, al igual que trabajar con unidades.

Por otro lado, de toda la población de radiosondeos, solo se han utilizado los realizados a las 12Z ya que es la única hora en la que hay lanzamientos desde las dos estaciones. Además, para los distintos estimadores de la fuerza de la inversión se han utilizado distintos criterios para descartar valores y obtener así una muestra apropiada. Para el EIS, en primer lugar, se han eliminado los valores negativos (menos del 10%). Esto es debido a que, en la estación de Güímar, el 50% de estos valores están asociados con radiosondeos sin inversión [31]. También se han descartado los pocos radiosondeos que no contaban con el nivel de presión estándar de 700 hPa. Por último, se han eliminado los valores de la fortaleza mayores a 20 K (Kelvin) ya que son atípicos. Para el EIS_p y EIS_p GOTA se han eliminado los valores negativos (menos del 7%) ya que están asociados a perfiles atmosféricos sin inversión.

2.6. Análisis de datos

El cálculo de la fuerza de la inversión térmica ha sido realizado separando los datos de diversas formas. En primer lugar se han utilizado todos los datos para entender de forma general el fenómeno. Posteriormente, se han dividido por estaciones del año para comprender mejor la estacionalidad y variabilidad de la inversión. Finalmente, se han clasificado los datos por meses para su mejor interpretación.

Una vez calculada la fuerza de la inversión para los distintos radiosondeos se procedió a realizar un análisis de estos resultados. Los resultados han sido tratados usando diferentes herramientas estadísticas y de análisis gráfico:

Progresión temporal. Representación lineal utilizada para observar las variaciones de los parámetros (eje y) con el tiempo (eje x).

Q-Q plot. Un gráfico Q-Q (*quantile-quantile plot*) es un método gráfico usado en estadística para comparar dos distribuciones de probabilidad representando los cuantiles de una frente a los de la otra. Por tanto, un punto en el gráfico es un cuantil de la segunda distribución representado frente al mismo cuantil de la primera. Todos los puntos juntos definen una curva que nos ofrece información sobre las distribuciones. Si las distribuciones comparadas son similares, la curva se aproximará a la recta $y = x$ (Fig. 2.5). A medida que las distribuciones sean más dispares, mayor diferencia presentará la curva con la recta. Como los Q-Q plot comparan distribuciones, no es necesario que el número de datos de ambas sea el mismo. En este trabajo se ha hecho uso de los percentiles, cuantiles que dividen la distribución de probabilidad en cien partes iguales.

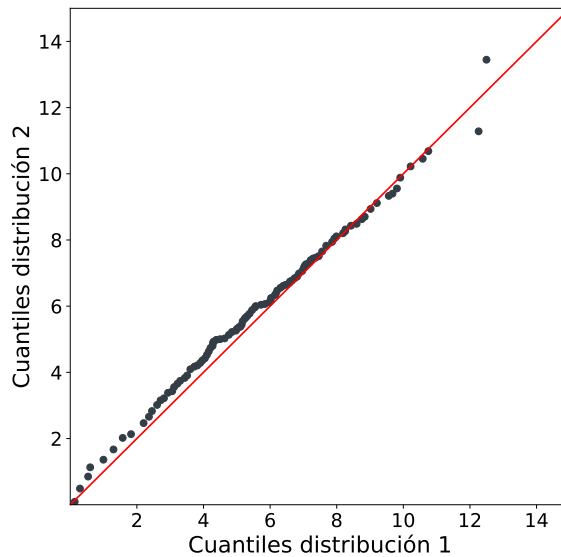


Figura 2.5: Ejemplo de Q-Q plot. En este caso vemos como los puntos (gris), se aproximan bastante bien a la recta $y = x$ (rojo) por lo que podríamos considerar a las distribuciones iguales o muy parecidas. Se representan los cuantiles de la distribución 2 frente a los de la distribución 1.

Bootstrapping. Este método de remuestreo es utilizado para conseguir información de una distribución desconocida a partir de una muestra. La técnica utilizada consiste en realizar remuestreos aleatorios con repetición de la muestra, obteniendo así nuevas muestras parecidas a la original. En cada una de estas nuevas muestras se puede calcular la estadística deseada, pudiendo obtener así un histograma de la distribución de dicha estadística. En este estudio se ha utilizado este método para comprobar la similitud de dos distribuciones. Inicialmente contamos con dos muestras, una por distribución. Comenzamos el proceso obteniendo una nueva muestra a partir de cada una de las que ya tenemos, obteniendo entonces dos nuevas. Hemos impuesto la condición que estas nuevas muestras sean del mismo tamaño para poder restarlas. Se ha calculado la media de los resultados obtenidos al restar ambas muestras elemento a elemento. Este proceso se ha repetido un total de mil veces, calculando así mil medias. Se ha obtenido finalmente la diferencia media (*average difference*) entre las distribuciones calculando la media de estas medias y su desviación estándar σ . Si para la diferencia media obtenemos un resultado menor a 2σ , no podemos asegurar que las distribuciones sean distintas al 95% de confianza. Si el resultado es mayor, podemos asegurar una diferencia entre distribuciones.

3. Discusión de resultados

Summary. The results obtained by using the previous methodology and data samples are presented in this section. By using the EIS, it is found that the lower troposphere has a thermal inversion in approximately the 83 % of radiosondes. The strength of these inversions is calculated using EIS, EIS_p and EIS_p GOTA. A comparative analysis shows that the results obtained by EIS and EIS_p GOTA are more closely related than the ones from EIS and EIS_p. Some dominant characteristics and trends of the inversion are found. The correct functioning of the model is observed, simulating the same values for the strength of the thermal inversion as the ones obtained by using the radiosondes data. Towards the end of the century, an increase in the number of days that present a thermal inversion and a rise in the strength of the inversion is detected. The modeled data from Puerto de la Cruz show a drop in the height of the inversion, specially in summer. In Güímar, the opposite behavior is found in summer.

3.1. Días con inversión térmica

Dependiendo de las condiciones atmosféricas, existen días en los que no hay inversiones térmicas. Esto puede verse claramente en los datos de los radiosondeos de esos días. Se estudiará por tanto en primera instancia el número de perfiles atmosféricos que presentan inversión. Analizaremos este número y comprobaremos si el modelo es capaz de predecir correctamente en que días habrá inversión térmica. Posteriormente se estudiará cómo variará el número de días con inversión a final de siglo.

El LTS es un parámetro siempre positivo por lo que no es útil para determinar la existencia o no de inversiones. Por otro lado, el EIS es una corrección del LTS que puede presentar valores tanto negativos como positivos. Sin embargo, los valores positivos están relacionados en un 92,5 % de los casos con días con inversión (para perfiles atmosféricos en Güímar en nuestro período temporal de estudio [31]). Este parámetro es el que usaremos para determinar los días en los que ocurre la inversión térmica de subsidencia. En todos los perfiles atmosféricos habrá un gradiente vertical positivo de θ , por lo que ni el EIS_p ni el EIS_p GOTA nos serán de utilidad, ya que siempre podremos encontrar un gradiente máximo. Usando entonces el EIS, comprobaremos el número de días en los que hay inversión, el funcionamiento del modelo WRF a la hora de predecirlos y su evolución de cara a final de siglo.

3.1.1. Registro histórico

Para todos los perfiles atmosféricos disponibles acumulados entre los años 2003 y 2019 se ha obtenido, basado en el EIS, el número de ellos que presentan

inversión térmica según los radiosondeos y según el modelo WRF. Además, se ha aplicado el método bootstrapping a ambas muestras para conocer la diferencia entre las distribuciones a las que pertenecen. Se han restado las muestras pertenecientes a la distribución de los radiosondeos a las muestras de la distribución del modelo. Una diferencia media positiva que supere a 2σ implica, con un 95 % de confianza, que ambas muestras no son iguales y que, por tanto, el modelo predice mayor número de días con inversión que los medidos por radiosondeos.

Para la estación de Puerto de la Cruz (PTO), observando la Tabla 3.1, de forma general, se puede decir que el modelo no predice correctamente los días en los que hay inversión. En la totalidad de meses ambas medias no coinciden y la diferencia media es superior a un día (bastante grande teniendo en cuenta que solo contamos con un radiosondeo a la semana en esta estación). Además, salvo para julio y agosto, la diferencia media no entra dentro del rango de 2σ , por lo que podemos afirmar que la distribución de datos modelados y la de datos reales son distintas. El modelo funciona de manera pobre en este caso. Antes de extrapolar este mal resultado hay que tener en cuenta que la muestra con la que estamos trabajando es pequeña (solo ocho años con un único radiosondeo a la semana). Por tanto, no tiene por qué reproducirse este resultado en otras muestras más grandes.

En la estación de Güímar (GUI) aparece una mayor diferencia entre los datos modelados y los reales (Tabla 3.1). Sin embargo, no se puede asegurar que este aumento en la diferencia sea debido a un crecimiento en el tamaño de la muestra. En cualquier caso, para PTO, la diferencia oscila entre un 25 % y un 45 % del tamaño de la muestra. En GUI, para todos los meses, la diferencia es menor al 25 %, por lo que se obtienen mejores resultados. En este caso existen varios días de diferencia entre las medias, siendo la mayor diferencia (casi siete días) en el mes de noviembre. Ninguna diferencia media entra en el rango de 2σ , debido a que el modelo predice más días con inversión de los que en realidad hay.

La mayoría de radiosondeos lanzados en ambas estaciones (81 %) detectan inversiones térmicas. En los datos de GUI, se observa que existe una inversión en la troposfera baja en la gran mayoría de los días del año (83 %). La aparición de este fenómeno parece guardar relación con la estación del año, ocurriendo a una altísima frecuencia (88 %) en los meses de verano (junio, julio y agosto) y a una inferior (70 %) el resto del año. Esta variación de la aparición del fenómeno con las estaciones, a pesar de ser en periodos temporales distintos y utilizando el EIS como estimador, coincide con la encontrada por otros autores [7, 18, 19]. A pesar de esta similitud, estos estudios detectan un menor porcentaje de radiosondeos con inversión, indicando quizás una peor precisión del EIS como estimador de la presencia de inversiones. Por otro lado, el modelo WRF funciona de manera pobre en ambas ubicaciones, sobreestimando el número de días que presentan inversión.

	PTO 60021				GUI 60019			
	Media n° de inversiones		Average difference	2σ	Media n° de inversiones		Average difference	2σ
	Modelo	Radiosondeos			Modelo	Radiosondeos		
Ene	4	2	1.7	1.3	30	25	5	3
Feb	3	2	1.3	0.9	26	21	5	3
Mar	4	3	1.2	1.0	30	25	4.1	1.9
Abr	4	2	1.5	0.8	29	26	3.3	1.5
May	4	2	1.2	1.0	31	29	1.7	0.7
Jun	3	2	1.2	1.1	30	28	1.9	1.2
Jul	4	3	1.0	1.4	31	29	1.6	0.9
Ago	3	2	1.0	1.3	31	28	2.7	1.3
Sep	3	2	1.2	1.0	30	26	3.7	1.9
Oct	3	2	1.3	1.2	28	22	5.9	2.3
Nov	3	2	1.1	1.0	28	21	7	3
Dic	4	2	1.8	1.1	30	24	6	3

Tabla 3.1: Comparación para el registro histórico entre el número de días, calculado según el EIS, en los que ocurre inversión según los radiosondeos y según el modelo WRF. Se muestra el número de días por mes, la diferencia media entre distribuciones y el rango de confianza (2σ). Para la estación de PTO solo se cuenta con un radiosondeo semanal (lanzados entre los años 2011 y 2019), por lo que al mes tenemos aproximadamente cuatro radiosondeos que pueden detectar inversión. En la estación de GUI se cuenta con radiosondeos diarios (lanzados entre los años 2003 y 2019), por lo que dependiendo del mes se tendrá un número total de lanzamientos u otro. En negrita y sombreado, las diferencias con significancia estadística.

3.1.2. Predicciones final de siglo

Teniendo en cuenta las diferencias entre radiosondeos y modelo, se pasará a estudiar la variación a final de siglo del número de días en los que ocurre la inversión térmica de subsidencia. Se comparará, para cada estación, el número de días que cuentan con inversión en el registro histórico con los que la presentan a final de siglo, según el modelo en ambos casos. Al utilizar datos modelados, se cuenta con perfiles verticales para todos los días del año en ambas estaciones. Nuevamente se ha aplicado el método bootstrapping a ambas muestras para conocer la diferencia entre las distribuciones a las que pertenecen. Se han restado las muestras pertenecientes a la distribución del registro histórico a las muestras de la distribución para final de siglo. Una diferencia media positiva que supere a 2σ implica, con un 95% de confianza, que ambas muestras no son iguales y que, por tanto, el número de días con inversión aumentará en el futuro según el modelo. Una diferencia media negativa que supere a 2σ implica lo contrario.

En PTO vemos como para la gran mayoría de meses no se puede afirmar, con un 95% de confianza, que el número de días con inversión vaya a cambiar (Tabla 3.2). Para estos meses en los que no cambia el número de días, no solo coinciden la media de los años estudiados, también cuentan con una diferencia media entre distribuciones cercana a cero que además entra en el rango de 2σ . El único mes en el que la diferencia media entre distribuciones no entra en el rango de confianza es octubre, siendo la diferencia media de dos días entre principio y final de siglo. Cabe destacar que muchos meses ya cuentan con inversión térmica en la totalidad de sus días, por lo que solo podría disminuir este número de días. Un caso peculiar es el

del mes de agosto. En todos los días de este mes analizados tanto para principio como para final de siglo aparece una inversión, por lo que tanto la diferencia media como la desviación estándar son cero. Teniendo en cuenta todos los meses, podemos concluir al 95 % de confianza, que no existe diferencia significativa para esta zona entre el número de inversiones que ocurren en la actualidad y en el futuro.

	PTO 60021				GUI 60018			
	Media n° de inversiones		Average difference	2 σ	Media n° de inversiones		Average difference	2 σ
	2070-2099	2011-2019			2070-2099	2003-2019		
Ene	30	30	-0.2	1.0	30	30	0.2	0.6
Feb	28	28	0.1	0.8	28	26	1.2	0.9
Mar	30	29	1.2	1.4	30	30	0.6	0.8
Abr	30	29	0.3	0.7	30	29	0.6	0.5
May	31	31	-0.06	0.16	31	31	-0.01	0.17
Jun	30	30	0.2	0.4	30	30	-0.1	0.4
Jul	31	31	0.2	0.4	30	31	-0.2	0.5
Ago	31	31	0	0	31	31	-0.1	0.3
Sep	30	29	0.6	0.8	30	30	0.4	0.5
Oct	30	28	2.4	2.3	30	28	2.1	1.2
Nov	29	27	1.8	2.2	29	28	1.4	1.3
Dic	30	30	0.5	1.2	30	30	0.7	0.9

Tabla 3.2: Comparación entre el número de días, calculado según el EIS, en los que ocurre inversión para el registro histórico y para final de siglo, según el modelo WRF. Se muestra el número de días por mes, la diferencia media entre distribuciones y el rango de 2σ . Para ambas estaciones se cuenta con radiosondeos modelados diarios, por lo que dependiendo del mes se tendrá un número total de ellos u otro. El periodo temporal de los datos para final de siglo coincide en ambas estaciones (2070-2099) pero no para el registro histórico (de 2011 a 2019 para PTO y de 2003 a 2019 para GUI). En negrita y sombreado, las diferencias con significancia estadística.

Para GUI los resultados son similares (Tabla 3.2). En los meses de febrero, abril, octubre y noviembre se obtienen diferencias de varios días entre las medias de los años estudiados y además la diferencia media se encuentra fuera del rango de 2σ . Precisamente estos meses son también los que mayor diferencia presentaban entre los valores reales y los modelados para el registro histórico (Tabla 3.1). En todos estos meses, el número de días con inversión aumentará a final de siglo. Para el resto, no habrá cambio con significancia estadística.

Aunque la vertiente de la isla y el periodo temporal de los datos en el registro histórico sea distinto para las dos estaciones, prácticamente coinciden los días con inversión. Aunque con distinta magnitud, la tendencia con significancia estadística en ambas zonas geográficas es la misma: en el futuro encontraremos mayor número de días con inversión térmica por subsidencia (98 %).

3.2. Estimación fuerza de la inversión

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a la hora de estimar la fuerza de la inversión térmica. Para esto, se han utilizado los parámetros estimadores EIS, EIS_p y EIS_p GOTA. En primer lugar, se han comparado los valores

obtenidos usando cada uno de ellos. También se ha estudiado la fidelidad del modelo a la hora de emular estos resultados. Por último, se ha calculado la evolución de la fuerza de la inversión térmica y la variación de las relaciones entre parámetros estimadores con el paso del tiempo. Mediante análisis gráfico, usando Q-Q plots, se han estudiado las similitudes entre distribuciones. También se ha aplicado el método bootstrapping a las distribuciones de datos de los distintos parámetros estimadores para cada estación del año. Se han restado las muestras pertenecientes a la distribución de los radiosondeos a las muestras de la distribución del modelo para el registro histórico. Después se han restado las muestras pertenecientes a la distribución del modelo a principio de siglo a las muestras de la distribución de los datos modelados para los años 2070 – 2099.

3.2.1. Registro histórico

En la Figura 3.1 podemos ver los valores medios anuales del EIS, EIS_p y EIS_p GOTA. En ambas regiones la diferencia entre ellos es de varios K , resultado esperable ya que en un principio estos parámetros a pesar de intentar estimar lo mismo, son correcciones sucesivas del parámetro inicial LTS . Atendiendo a la diferencia entre EIS_p y EIS_p GOTA, se tiene que el término que los diferencia ($\Gamma_m(z_{top} - z_{base})$), tiene relevancia distinta dependiendo de la zona. En PTO, tiene un valor de 1 K como máximo. En GUI, alcanza los 2 e incluso 2.5 K . Esto podría representar que la inversión térmica en GUI cuenta con un grosor mayor (considerando un gradiente Γ_m similar en ambas zonas). Para el EIS, vemos que en ambas regiones se comporta de forma similar y que se diferencia en varios K de los otros dos parámetros. Los valores medios anuales encontrados son similares al dado por Wood and Bretherton [15] (2.5 K), pudiendo explicarse presumiblemente las diferencias mediante factores topográficos y locales.

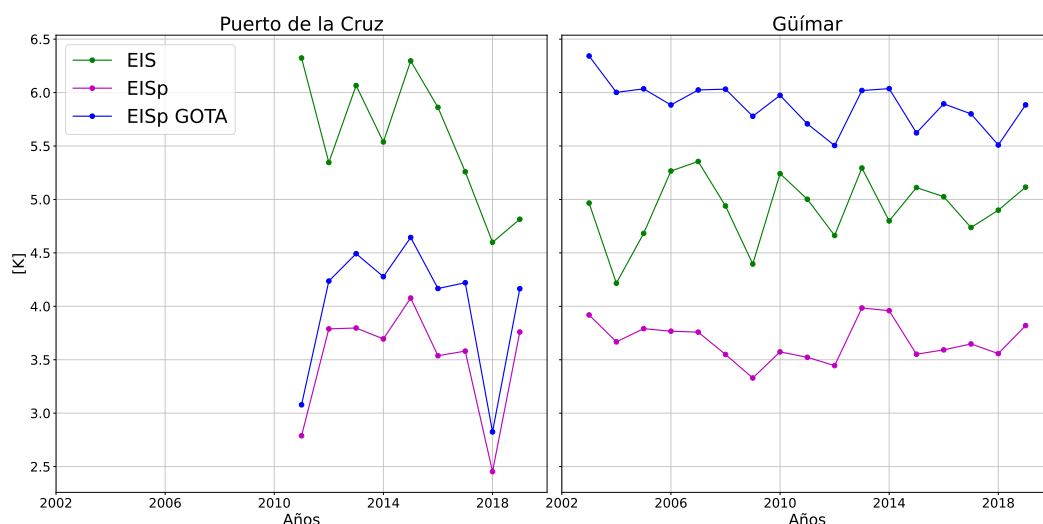


Figura 3.1: Comparación del valor medio anual de la fuerza de la inversión para los datos obtenidos mediante radiosondeos en PTO y GUI. Se representa el EIS (verde), EIS_p (violeta) y EIS_p GOTA (azul) frente al periodo temporal.

Haciendo uso de Q-Q plots (Fig 3.2), podemos ver el comportamiento del modelo a la hora de predecir estos parámetros. En PTO, el modelo simula de forma precisa los valores del EIS en todo su rango. Para GUI, los resultados son un poco peores pero se aproximan correctamente en el rango de 0 a 7 K. Para valores más altos, el modelo sobreestima la fuerza de la inversión. Atendiendo al EIS_p , en ambas regiones, encontramos como el modelo reproduce adecuadamente los valores más bajos pero empeora a medida que aumenta la fuerza. Para el EIS_p GOTA, el modelo reproduce de forma precisa los valores en GUI. En PTO, sobreestima la fuerza de la inversión. Esto puede ser explicado atendiendo a la diferencia de resolución vertical entre los datos modelados y los observacionales (Tabla 3.3). Los datos modelados para ambas regiones y los observacionales de GUI tienen aproximadamente la misma resolución. Por el contrario, los datos observacionales en PTO cuentan con una resolución mucho mayor. Para una inversión dada, a mayor resolución, menor espaciado entre niveles y como el EIS_p GOTA trabaja con tres niveles como máximo, se obtendrán valores de la fuerza inferiores. Si esos niveles englobasen toda la inversión, la resolución no afectaría. Como de forma general el grosor de las inversiones es mayor a 200 m [8], la resolución jugará un papel importante. Presumiblemente, de tener la misma resolución en datos observacionales y modelados en PTO, se obtendrían un funcionamiento del modelo similar al encontrado en GUI. Los Q-Q plots también permiten observar el rango en el que se mueven los valores de cada parámetro. Este rango es similar para los tres, encontrándose la mayoría de valores por debajo de los 10 K.

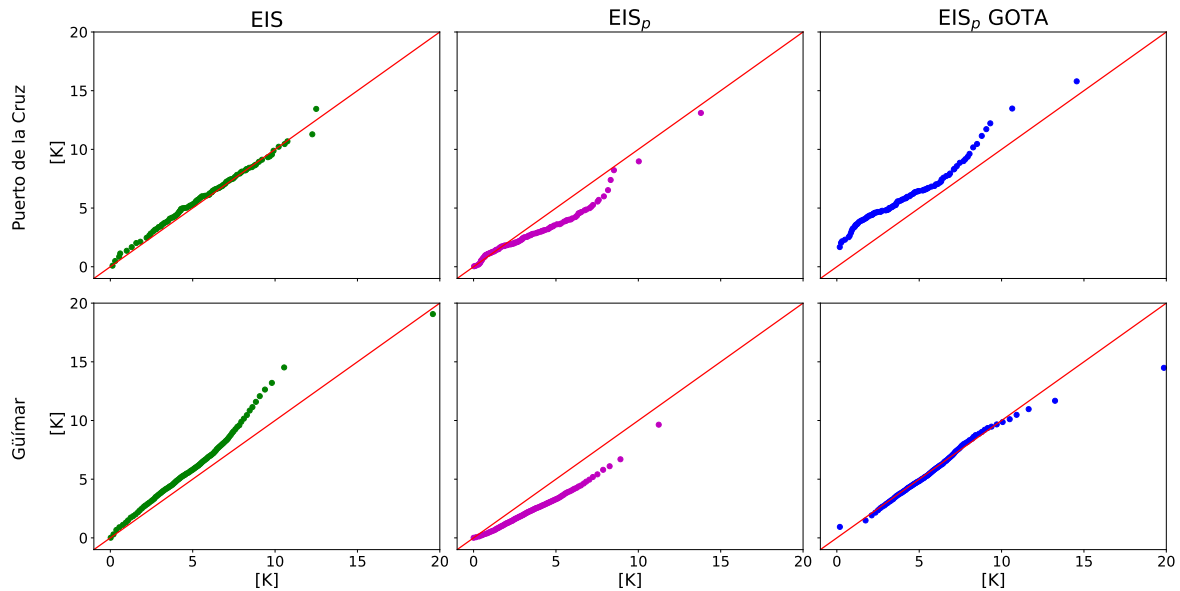


Figura 3.2: Análisis estadístico de la fuerza de la inversión térmica para el registro histórico según los parámetros EIS, EIS_p y EIS_p GOTA. Se representan los cuantiles de la muestra de datos modelados de cada parámetro frente a los de la muestra de datos obtenidos mediante radiosondeos para el mismo parámetro.

	Resolución vertical			
	N° de niveles		Espaciado (<i>m</i>)	
	Media	σ	Media	σ
Radiosondeos Puerto de la Cruz	50	16	60	20
Modelo WRF RH Puerto de la Cruz	11.8	0.4	280	230
Modelo WRF FS Puerto de la Cruz	17	0.03	200	130
Radiosondeos Güímar	11.9	2.4	300	300
Modelo WRF RH Güímar	12.1	0.3	270	210
Modelo WRF FS Güímar	17	0.07	200	130

Tabla 3.3: Resolución vertical hasta los 3 *km* de altura s. n. m. para los distintos tipos de muestras: radiosondeos, datos modelados para el registro histórico (RH) y datos modelados para final de siglo (FS). Se muestra, de todos los datos disponibles, la media y desviación estándar del número de niveles y del espaciado entre ellos.

De forma general, el EIS y el EIS_{*p*} GOTA se asemejan más que el EIS y el EIS_{*p*} (Fig. 3.3). Valores cercanos a cero son indicativos de que la MBL se encuentra mezclada con la troposfera libre (la inversión es débil o inexistente), y en este caso el EIS y EIS_{*p*} se comportan de manera similar [24]. A medida que la fuerza de la inversión aumenta, la diferencia entre ellos también lo hace, tanto para los datos observacionales como para los modelados, en ambas regiones. Para el EIS y EIS_{*p*} GOTA, los datos observacionales se encuentran a una diferencia constante con algunas fluctuaciones en todo el rango de valores. Los datos modelados se comportan igual para valores medios de la fuerza de la inversión y difieren para los casos límite.

Ante estos resultados, se entiende que EIS y EIS_{*p*} GOTA intentar estimar la fuerza de la inversión definida en la Ec. 2.1. El EIS_{*p*} estaría estimando otra magnitud similar o la fuerza de la inversión definida de forma distinta. Además, debido a la mala capacidad del modelo para reproducir los valores observacionales del EIS_{*p*}, se continuará el estudio de la fuerza de la inversión utilizando exclusivamente el EIS y EIS_{*p*} GOTA.

Estudiando la estacionalidad del fenómeno, el EIS refleja un aumento en la fuerza de la inversión en verano (Fig. 3.4), en concordancia con lo descrito por Carrillo et al. [8]. En PTO, el modelo funciona correctamente para todas las estaciones. Se comprueba como en GUI, el error descrito anteriormente del modelo a la hora de sobreestimar altos valores de la fuerza ocurre únicamente en primavera y verano. Tras un estudio de los perfiles verticales, se determina el origen del problema, radicando en la aparición de alguno de los siguientes comportamientos. En primer lugar, un error del modelo a la hora de determinar la temperatura y temperatura del punto de rocío superficiales. Esto deriva en una altura del LCL distinta a la predicha por los radiosondeos. Por otro lado, el modelo señala temperaturas incorrectas para el nivel 700 hPa o para la superficie, afectando esto al valor del LTS. Estas dos conductas del modelo, cuando aparecen, terminan afectando al valor final del EIS, produciendo esta sobreestimación. Tras aplicar el método bootstrapping, vemos como en PTO no se pueden considerar distintas las distribuciones de datos modelados y observacionales, para todo el año

salvo en invierno, donde la diferencia media entre distribuciones es inferior a 1 K (Tabla 3.4). Para GUI, ambas distribuciones son distintas para todo el año. El EIS_p GOTA no es capaz de reproducir esta estacionalidad del fenómeno, encontrándose el mismo rango de valores durante todo el año. En PTO, los valores dados por el modelo son incorrectos debido a esta diferencia de resoluciones anteriormente comentada. En GUI, el modelo funciona adecuadamente.

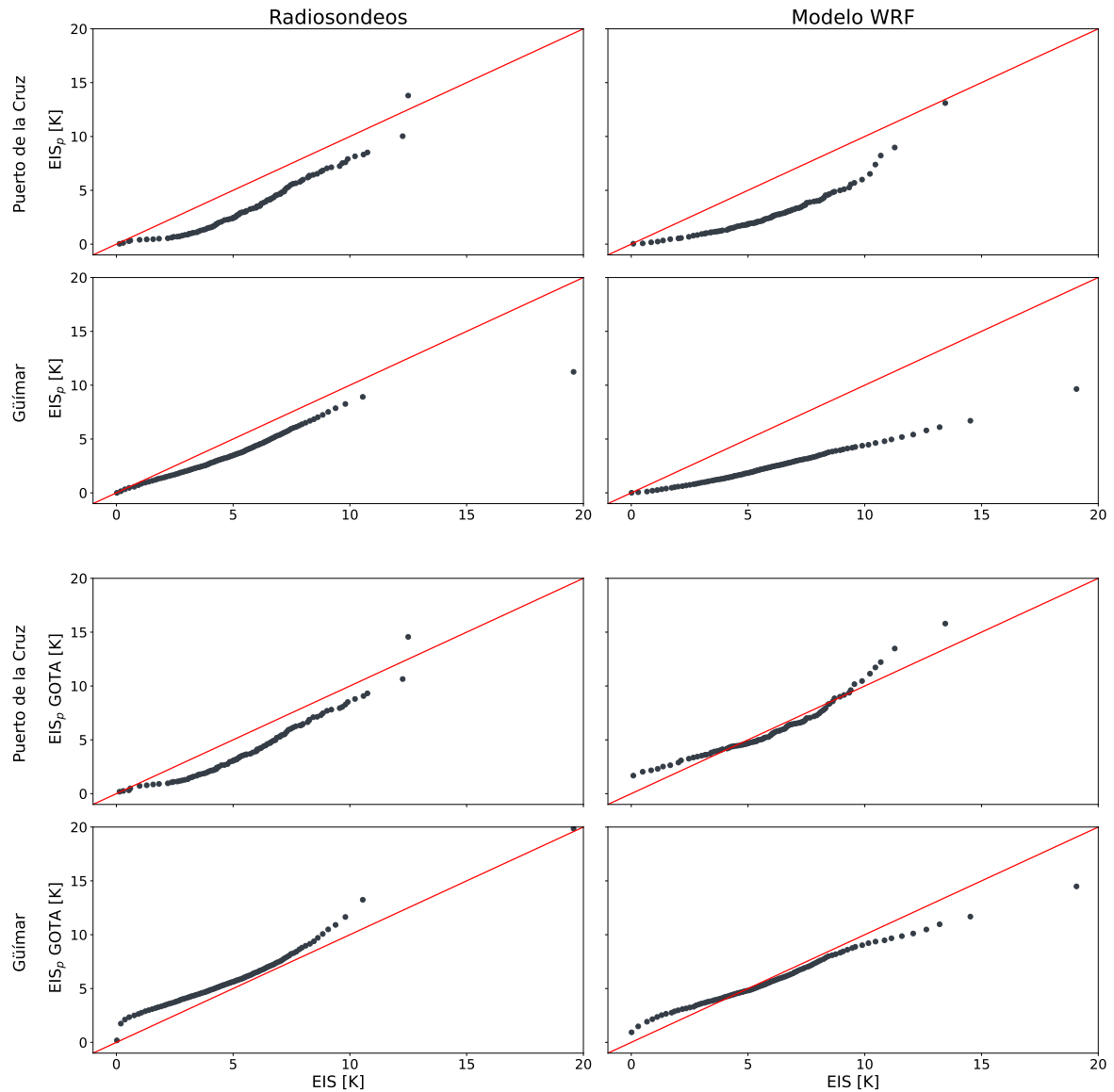


Figura 3.3: Comparación de los valores de la fuerza de la inversión térmica obtenidos usando el EIS, EIS_p y EIS_p GOTA. Se representa el EIS_p y EIS_p GOTA frente al EIS para PTO y GUI, según los datos reales y los modelados.

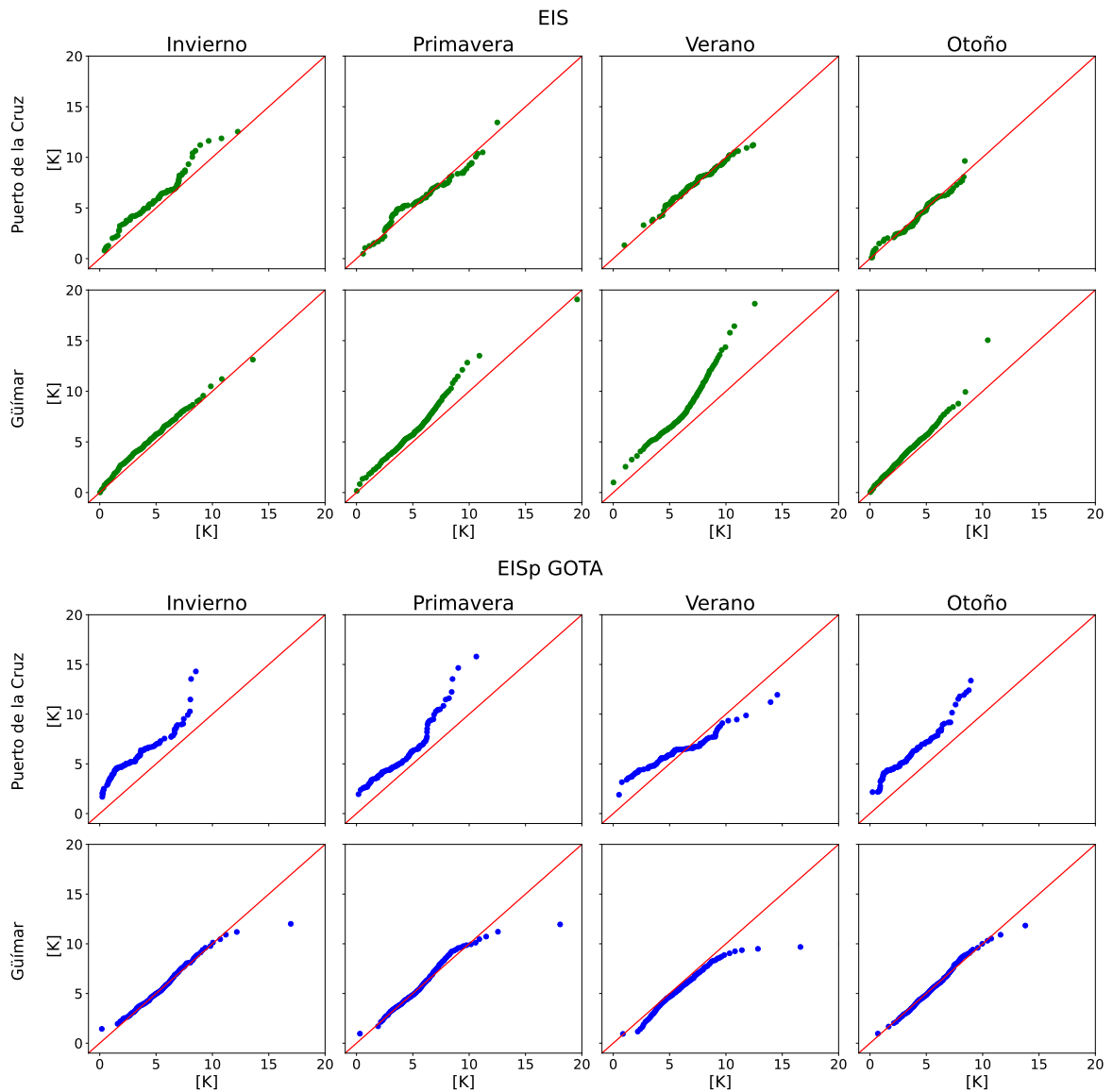


Figura 3.4: Análisis estadístico de la fuerza de la inversión térmica para el registro histórico según los parámetros EIS (verde) y EIS_p GOTA (azul) para las distintas estaciones del año. Se representan los cuantiles de la muestra de datos modelados del parámetro frente a los de la muestra de datos observacionales del mismo parámetro.

	EIS				EIS _p GOTA			
	PTO 60021		GUI 60018		PTO 60021		GUI 60018	
	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ
Invierno	0.9	0.8	0.6	0.3	2.4	0.7	0	0.3
Primavera	0.1	0.8	1.0	0.3	1.8	0.7	0	0.3
Verano	0.1	0.7	2.1	0.3	0.5	0.7	-0.8	0.3
Otoño	-0.1	0.7	0.63	0.22	2.4	0.7	-0.1	0.3

Tabla 3.4: Comparación entre los valores del EIS y EIS_p GOTA según los radiosondeos y el modelo WRF para las distintas estaciones del año, utilizando el método bootstrapping. Se muestra la diferencia media entre distribuciones y el rango de 2 σ . El periodo temporal de los datos es de 2011 a 2019 para PTO y de 2003 a 2019 para GUI. En negrita y sombreado, las diferencias con significancia estadística.

3.2.2. Predicciones final de siglo

Para el período de años comprendido entre 2070 y 2099, encontramos un aumento en los valores del EIS y una disminución en los del EIS_p GOTA (Fig. 3.5). A pesar de que a principio de siglo los parámetros tienen valores similares (Fig. 3.3), para final de siglo a medida que aumenta la fuerza de la inversión, más se distancian el uno del otro (Fig. 3.6). Centrándonos en el EIS, se observa que su variación estacional sigue existiendo, alcanzándose los valores más altos en verano. Para ambas regiones, encontramos un aumento del EIS con significancia estadística en casi la totalidad de las estaciones, siendo el más destacable en verano (Tabla 3.5). Este pequeño aumento a lo largo del siglo XXI ya había sido descrito en [32, 33, 34], utilizando distintos modelos climáticos. Las causas teorizadas de este aumento son varias, aunque todos los estudios concluyen en que más trabajo es necesario para entender el origen real de la variación. El EIS_p GOTA decrecerá en una cantidad similar a la que aumentará el EIS. Una tendencia en la disminución de la fuerza de la inversión fue también encontrada por Díaz et al. [7] en otras regiones del Atlántico Norte. En nuestro caso, tenemos que volver a tener en cuenta la diferencia de resolución vertical entre muestras de datos (Tabla 3.3). A pesar de ser la diferencia menos drástica que entre datos observacionales y modelados, tenemos mayor resolución en los datos a final de siglo. Esta diferencia podría estar escondiendo la variación real del parámetro.

	EIS				EIS _p GOTA			
	PTO 60021		GUI 60018		PTO 60021		GUI 60018	
	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ	Average difference	2 σ
Invierno	0.1	0.7	1.1	0.3	-1.2	0.7	-1.05	0.22
Primavera	1.1	0.6	1.3	0.3	-1.0	0.7	-1.24	0.24
Verano	1.8	0.5	2.1	0.3	-0.7	0.5	-0.84	0.23
Otoño	0.7	0.6	1.4	0.3	-1.2	0.7	-0.94	0.22

Tabla 3.5: Comparación entre los valores del EIS y EIS_p GOTA para principio y final de siglo, según el modelo WRF, para las distintas estaciones del año. Se ha utilizado el método bootstrapping para obtener la diferencia media entre distribuciones y el rango de 2 σ . El periodo temporal de los datos para final de siglo coincide en ambas estaciones (2070-2099) pero no para el registro histórico (de 2011 a 2019 para PTO y de 2003 a 2019 para GUI). En negrita y sombreado, las diferencias con significancia estadística.

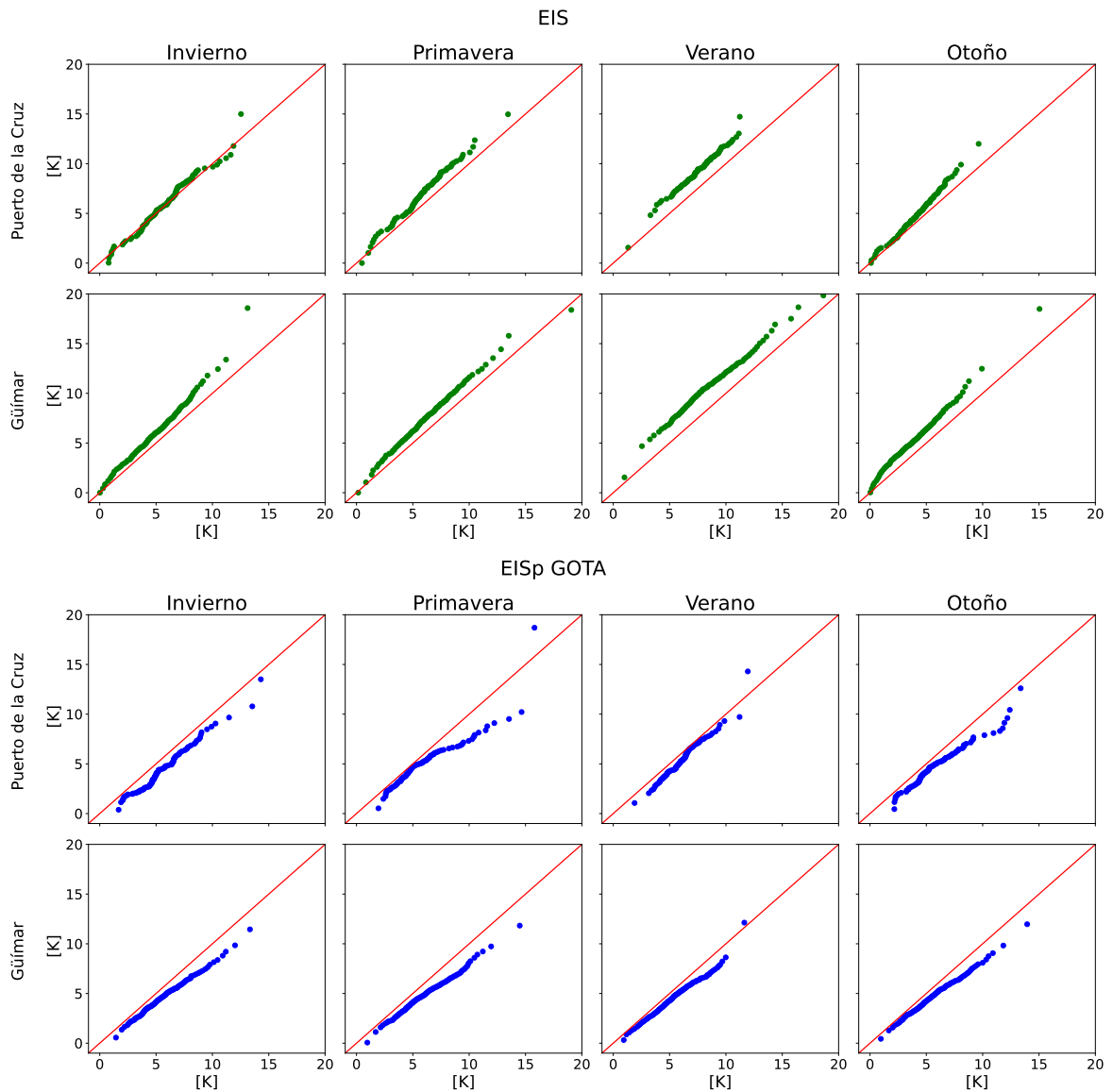


Figura 3.5: Análisis estadístico de la fuerza de la inversión térmica para final de siglo según los parámetros EIS (verde) y EIS_p GOTA (azul) para las distintas estaciones del año. Se representan los cuantiles de la muestra de datos modelados para final de siglo del parámetro frente a los de la muestra de datos modelados para principio de siglo del mismo parámetro.

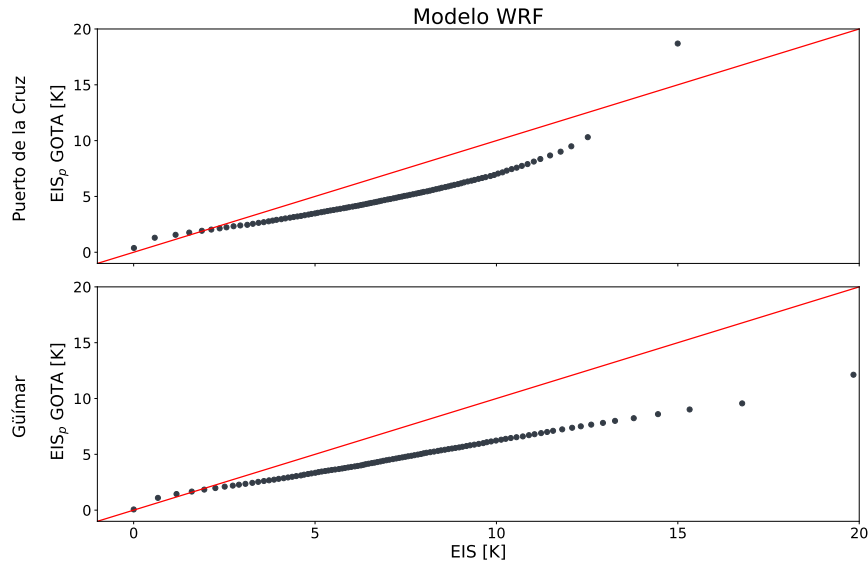


Figura 3.6: Comparación de los valores de la fuerza de la inversión térmica obtenidos usando el EIS y EIS_p GOTA. Se representa cuantiles de la distribución de EIS_p GOTA frente a los del EIS, para PTO y GUI, según los datos modelados a final de siglo.

3.3. Altura de la base de la inversión térmica

Se muestran a continuación los resultados de calcular la altura de la base de la inversión térmica usando el algoritmo del EIS_p . El nivel de máximo gradiente vertical de θ necesario para calcular el EIS_p , coincide en la gran mayoría de casos con la base de la inversión. Al ser la altura de la inversión un parámetro que varía con la estación del año, hemos estudiado su evolución temporal separando los datos disponibles por estaciones. Comprobaremos si este método es válido para determinar la altura de la base de la inversión. También estudiaremos su media y evolución temporal. Además, se ha realizado un análisis para comprobar si el modelo es capaz de reproducir correctamente estos resultados. Se ha aplicado el método bootstrapping para conocer la diferencia entre distribuciones. Se han restado las muestras pertenecientes a la distribución de los radiosondeos a las muestras de la distribución del modelo para el registro histórico. Para final de siglo se han restado las muestras pertenecientes a la distribución del modelo a principio de siglo a las muestras de la distribución de los datos modelados para los años 2070 – 2099.

3.3.1. Registro histórico

En la Fig. 3.7 podemos ver como la altura de la base varía cientos de metros a lo largo del año. En el Puerto de la Cruz es claramente visible esta variación estacional mientras que en Güímar es más reducida. Se observa como la inversión se encuentra más baja en verano (rondando los 1300 *m* s.n.m en PTO y los 1600 *m*

s.n.m. en GUI) y más alta en invierno (1900 *m* s.n.m. en PTO y 1780 *m* s.n.m. en GUI), coincidiendo con lo determinado en otros estudios [8, 19, 20]. Por tanto, el algoritmo del EIS_p funciona correctamente para establecer la base de la inversión térmica de subsidencia en Canarias.

En cuanto al modelo WRF, es notable la existencia de un sesgo: el modelo indica alturas inferiores en cientos de metros a las reales en todos los casos. A pesar de esto, es capaz de predecir correctamente las variaciones a lo largo de los años para cada estación y región. También refleja correctamente, únicamente en PTO, la variación de la altura con las estaciones en un mismo año.

En la Figura 3.8 vemos como para PTO la diferencia media entre modelo y radiosondeos es de más de 270 *m* en todas las estaciones. Esto es apreciable en los Q-Q plot: la curva de datos se encuentra por debajo de la diagonal. Además, la curva no es paralela a esta, indicativo de una gran desviación estándar. En GUI (Fig. 3.9), la diferencia media disminuye, ocurriendo la mínima en verano (68 *m*) y la máxima en otoño (294 *m*). En esta zona la desviación estándar es también considerablemente menor (decenas de metros en todas las estaciones). En ambas regiones, las diferencias medias no entran dentro del rango de 2σ , por lo que las distribuciones no pueden considerarse iguales.

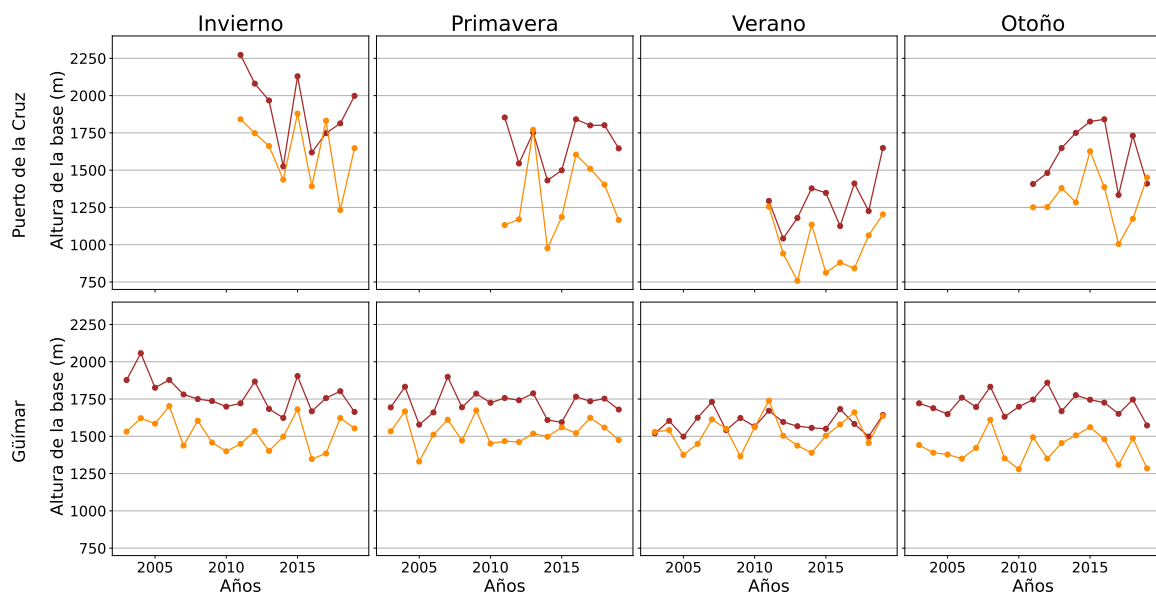


Figura 3.7: Comparación de la evolución de la altura de la base de la inversión térmica según datos reales (rojo) y modelados (naranja) entre los años 2003 y 2019. Se ha utilizado el algoritmo del EIS_p para determinar la altura. La fila superior se corresponde con la altura medida en PTO y la fila inferior con la medida en GUI. Cada columna representa una estación del año.

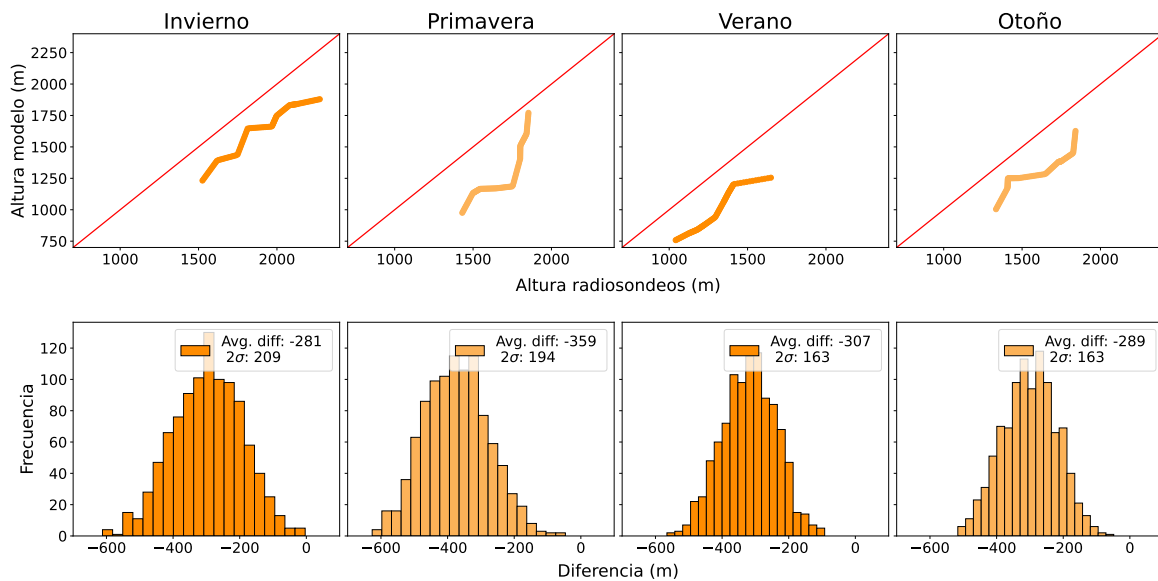


Figura 3.8: Análisis estadístico de la altura de las bases en PTO para el registro histórico. En la fila superior se encuentran los Q-Q plot y en la inferior los histogramas resultantes de utilizar el método bootstrapping, ambos comparando las mismas distribuciones. Para los Q-Q plots, se representa la altura de la base según el modelo frente a la altura según los radiosondeos. Cada columna representa una estación del año.

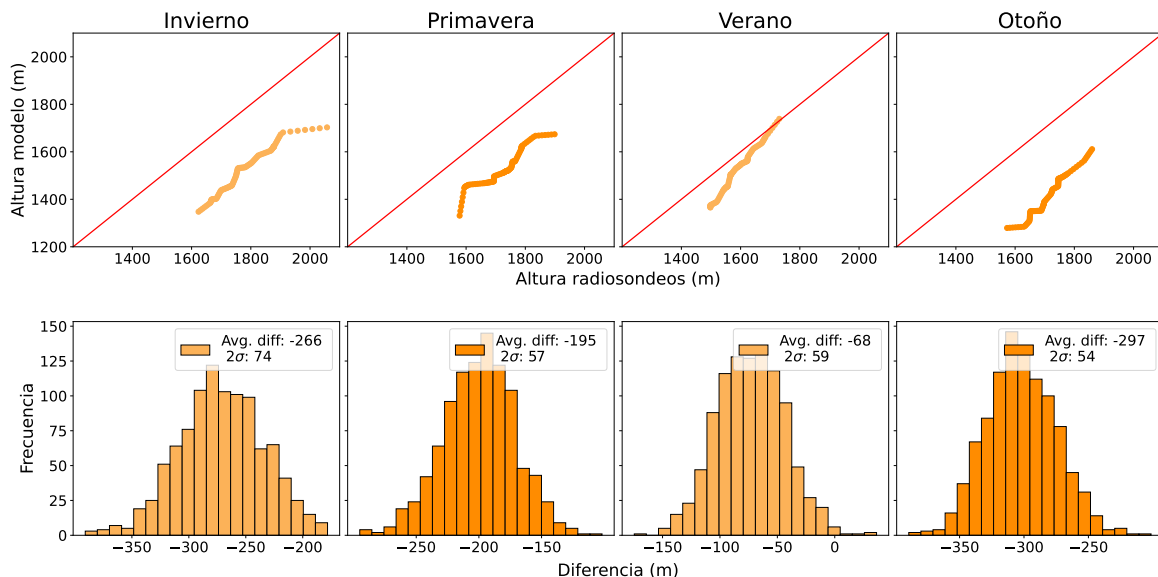


Figura 3.9: Análisis estadístico de la altura de las bases en GUI para el registro histórico. En la fila superior se encuentran los Q-Q plot y en la inferior los histogramas resultantes de utilizar el método bootstrapping, ambos comparando las mismas distribuciones. Para los Q-Q plots, se representa la altura de la base según el modelo frente a la altura según los radiosondeos. Cada columna representa una estación del año.

3.3.2. Predicciones final de siglo

De cara a final de siglo, aparecen comportamientos diferentes para cada región (Fig. 3.10): de forma general, en PTO la altura de la inversión disminuirá y en GUI se mantendrá constante salvo en verano que aumentará. Las variaciones estacionales seguirán siendo de la misma magnitud en ambas zonas.

En PTO se observa como la base se seguirá encontrando en su altura mínima en verano (700 m) y más alta en invierno (1470 m). No podemos asegurar que la base se vaya a encontrar exactamente a esas alturas, pero sí que si que apunta a una disminución. Atendiendo a la Figura 3.11, podemos afirmar que estas alturas han disminuido respecto a principio de siglo en todas las estaciones salvo en invierno (la diferencia en esta estación se encuentra dentro del rango de 2σ por lo que podemos considerar que no ha variado).

En GUI, ya vimos como para principio de siglo el modelo fallaba en determinar que estación presentaba la altura mínima de la base (los radiosondeos indicaban que era verano y el modelo otoño), repitiéndose presumiblemente el error de nuevo. El modelo indicaría que a final de siglo, la altura de la base de la inversión alcanzaría su mínimo en otoño y máximo en verano. En invierno se encontrará a unos 1600 m, en primavera a unos 1550 m y en otoño a unos 1400 m. En verano el modelo predice el único aumento estadísticamente significativo (Fig. 3.12), siendo esta variación de 115 m, colocándose a unos 1650 m. Todas las alturas dadas con anterioridad son sobre el nivel del mar.

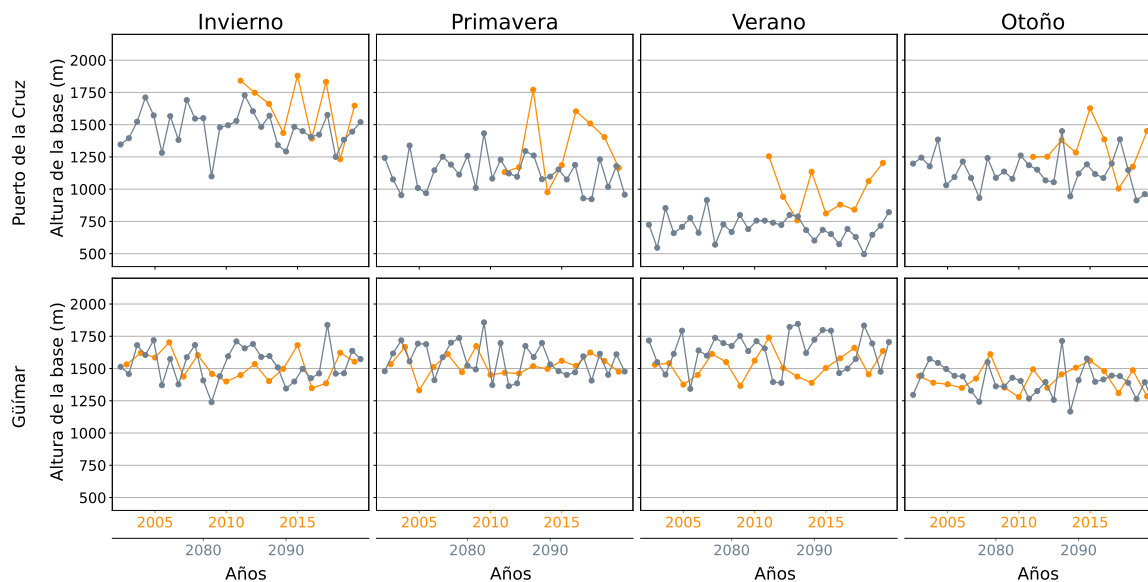


Figura 3.10: Evolución de la altura de la base de la inversión térmica según el modelo WRF. Se han utilizado dos ejes x para representar los datos a principio de siglo (naranja) y final de siglo (gris) juntos y facilitar su comparación. Se ha utilizado el algoritmo del EIS_p para determinar la altura. La fila superior se corresponde con la altura medida en PTO y la inferior con la medida en GUI. Cada columna representa una estación del año.

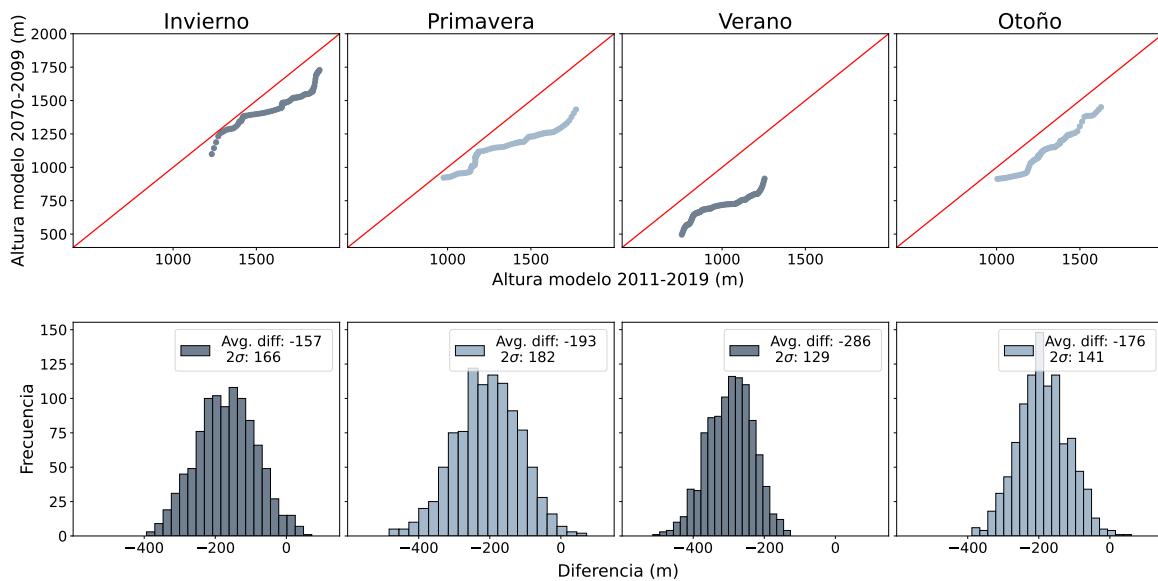


Figura 3.11: Análisis estadístico de la evolución temporal de la altura de las bases en PTO. En la fila superior se encuentran los Q-Q plot y en la inferior los histogramas resultantes de utilizar el método bootstrapping, ambos comparando las mismas distribuciones. Para los Q-Q plots, se representa la altura de la base para final de siglo frente a la altura a principio de siglo, según el modelo WRF en ambos casos. Cada columna representa una estación del año.

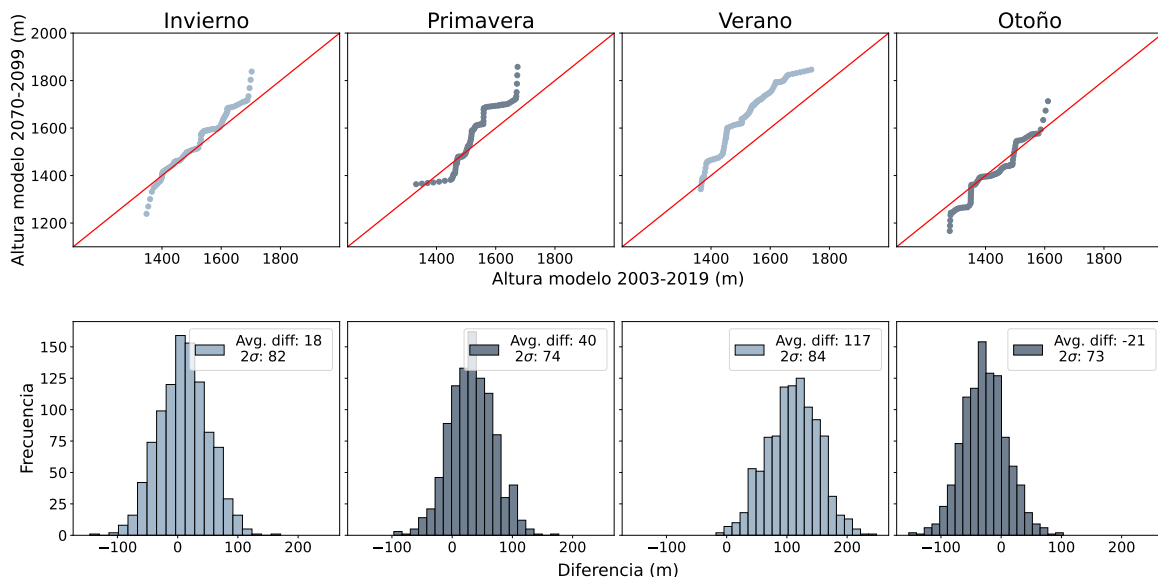


Figura 3.12: Análisis estadístico de la evolución temporal de la altura de las bases en GUI. En la fila superior se encuentran los Q-Q plot y en la inferior los histogramas resultantes de utilizar el método bootstrapping, ambos comparando las mismas distribuciones. Para los Q-Q plots, se representa la altura de la base para final de siglo frente a la altura a principio de siglo, según el modelo WRF en ambos casos. Cada columna representa una estación del año.

4. Conclusiones

Summary. In this last section the final conclusions are presented, summarizing the most relevant findings made in this study. These includes the alteration observed in the frequency and strength of the inversion. Also, it is concluded that neither EIS nor EIS_p GOTA can represent the total complexity of the thermal inversion and its changes. Finally, future lines of work are proposed, including further study in the variation of the different characteristics of the inversion and the use of different methods.

4.1. Conclusiones

Basado en el análisis realizado en este trabajo, se pueden extraer diversas conclusiones acerca de la inversión térmica de subsidencia que cubre Canarias, las habilidades del modelo WRF para determinar sus características y las capacidades y limitaciones de los distintos parámetros estimadores. Destacar que los resultados obtenidos se basan enteramente en perfiles verticales de las dos estaciones (PTO y GUI) situadas en la isla de Tenerife. Estos pueden estar influenciados por la topografía y efectos térmicos locales.

La inversión térmica se encuentra presente, según el EIS, en un 83 % de los radiosondeos lanzados entre los años 2003 y 2019. Destacar la estación de verano, en la que el fenómeno aparece en un 88 % de los perfiles verticales estudiados. Esto refleja la importancia de la inversión, considerando además que modula el tiempo y clima local [10]. A lo largo del s. XXI, la inversión proseguirá manifestandose e incluso aumentando su frecuencia, llegando a encontrarse en el 98 % de los días del año para final de siglo según el modelo. Sin embargo, al ser la diferencia entre modelo y radiosondeos (Tabla 3.1) mayor que la encontrada entre final de siglo y registro histórico (Tabla 3.2), no se puede concluir que a final de siglo exista un aumento real del número de días que presentan inversión.

Utilizando los parámetros estimadores EIS, EIS_p y EIS_p GOTA se ha determinado la fuerza de la inversión térmica de subsidencia. Una comparación entre los valores medios anuales obtenidos por cada uno muestra una gran discrepancia entre ellos. También se aprecian distinciones dependiendo de la estación de lanzamiento del radiosondeo. Estudiando la totalidad de valores posibles, encontramos una mayor afinidad entre EIS y EIS_p GOTA que EIS y EIS_p. Los primeros intentan estimar la fuerza de la inversión según la definición dada en la Ec. 2.1, mientras que el EIS_p sigue otra definición. A diferencia del EIS_p GOTA, el EIS presenta una variación estacional en sus valores, encontrándose los más altos en verano. El EIS_p GOTA es incapaz de predecir estos cambios en la fuerza de la inversión. Finalmente, de cara a final de siglo, se predice un aumento del EIS, especialmente significativo en verano (1.76 K en PTO y 2.14 K en GUI). Sin embargo, variaciones en el EIS están asociadas no solo a variaciones en la fuerza de la inversión, sino también a desviaciones, por parte de los perfiles de temperatura,

de las adiabáticas secas por debajo del LCL [24]. El EIS_p GOTA disminuiría en torno a 1 K, produciéndose así un distanciamiento entre ambos parámetros. Teniendo todo esto en consideración, se determina que, de los parámetros estudiados (EIS, EIS_p y EIS_p GOTA), ninguno es capaz de describir en su totalidad, de forma correcta, la fuerza de la inversión térmica de subsidencia.

Otro cambio con significancia estadística detectado en este estudio es el producido en la altura de la base de la inversión. En la actualidad, la inversión varía su altitud en cientos de metros a lo largo del año [8, 19, 20], hecho correctamente reproducido en este estudio por el algoritmo del EIS_p . En PTO la variación es más notable, pudiendo llegar a alcanzar los 1000 m, que en GUI, donde la variación es siempre inferior a 600 m. Identificamos verano como la estación en la que la inversión se encuentra más baja (y también más fuerte como vimos antes). En invierno alcanza su máxima altura. De cara a final de siglo, el modelo predice para PTO, una disminución en la altura de la inversión de más de 150 m en las estaciones de primavera, verano y otoño. Esto producirá un estrechamiento de la MBL, pudiendo acarrear más cambios en las condiciones climáticas de las islas. Martín et al. [35] describe que el aumento de las temperaturas en Tenerife, debido al cambio climático, es mayor por encima de la inversión térmica. Un descenso de la inversión como el predicho en PTO, aumentaría las partes de la isla afectadas por un calentamiento más severo. Además, un cambio en la base de la inversión conllevaría un cambio en la altura del mar de nubes. Esto podría generar desplazamientos de especies tanto vegetales como animales, adaptadas al microclima producido por el mar de nubes. De ser el cambio en la altura del mar de nubes suficientemente brusco, podría ocasionar la desaparición de ecosistemas enteros como el bosque de la laurisilva.

En relación al modelo climático utilizado, este necesita modificaciones para poder predecir con exactitud las distintas características de la inversión térmica de subsidencia. En este estudio se han utilizado datos observacionales para poder comprobar el funcionamiento del modelo. En primer lugar, el modelo sobreestima el número de días en los que hay inversión (Tabla 3.1), tanto para PTO como para GUI. Para la fuerza de la inversión, es capaz de reproducir con exactitud parámetros como el EIS en PTO o el EIS_p GOTA en GUI. También muestra la estacionalidad del EIS. Sin embargo, falla en otros casos como al reproducir el EIS_p o valores altos del EIS en GUI. Por último, presenta un sesgo de más de cien metros a la hora de modelar las alturas de la inversión, para ambas regiones y todas las estaciones del año. Las variaciones en las características de la inversión de cara a final de siglo han sido obtenidas utilizando datos modelados. Por tanto, están sujetos a los errores del modelo. No obstante, las tendencias obtenidas apuntan a un aumento en la frecuencia de la inversión, descenso de la altura de la base en PTO o un aumento de la fuerza estimada de la inversión (EIS) en ambas zonas estudiadas.

4.2. Futuras líneas de trabajo

Dada la importancia de la inversión, estudiar la evolución de otras de sus características como su grosor (*thickness*) o la diferencia en la relación de mezcla del aire entre su base y cima ayudaría a comprender aún más las posibles variaciones en el clima de las Islas Canarias asociadas a esta. También sería de interés estudiar las variaciones del LCC (*Low Cloud Cover*) en la región de cara a final de siglo. Además, dada la variación con el ciclo diario de la MBL, estudiar perfiles atmosféricos nocturnos y variaciones diarias de las características aportaría nuevos detalles del fenómeno.

Por otro lado, sería de gran utilidad repetir el estudio del número de días que presentan inversión, utilizando otro método diferente al EIS. En este estudio hemos obtenido un porcentaje de radiosondeos que presentan inversión mayor al encontrado por otros autores [7, 8]. Emplear técnicas convencionales como utilizar cambios en el gradiente de temperatura para detectar inversiones serviría para comprobar la naturaleza real de esta sobreestimación. En esta misma línea, ni el EIS ni el EIS_p son capaces de detectar múltiples inversiones. Carrillo et al. [8] encontraron que, en uno de cada tres radiosondeos, aparecen dos inversiones: una asociada a la parte superior de la MBL y otra asociada a los vientos alisios. El uso de otros métodos que permitan estudiar la evolución de estas dos inversiones de cara a final de siglo ayudaría a comprender en profundidad la estabilidad en la estructura de la troposfera baja en Canarias.

Por último, intentar comprender en profundidad el origen de las diferencias entre EIS y EIS_p GOTA ayudaría a lograr encontrar un nuevo parámetro que fuese capaz de reflejar las distintas tendencias, variaciones y complejidades de la inversión térmica de subsidencia en Canarias.

Bibliografía

- [1] S.K. Dhaka and Vinay Kumar. *Composition and thermal structure of the earth's atmosphere*, page 1–18. Elsevier, 2023. ISBN 9780323992626. doi: 10.1016/b978-0-323-99262-6.00023-7. URL <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-99262-6.00023-7>.
- [2] Robert Colman and Brian J. Soden. Water vapor and lapse rate feedbacks in the climate system. *Reviews of Modern Physics*, 93(4), nov 2021. ISSN 1539-0756. doi: 10.1103/revmodphys.93.045002. URL <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.93.045002>.
- [3] A. E. Dessler, Z. Zhang, and P. Yang. Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008. *Geophysical Research Letters*, 35(20), oct 2008. ISSN 1944-8007. doi: 10.1029/2008gl035333. URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035333>.
- [4] Víctor Mendoza, Marni Pazos, René Garduño, and Blanca Mendoza. Thermodynamics of climate change between cloud cover, atmospheric temperature and humidity. *Scientific Reports*, 11(1), oct 2021. ISSN 2045-2322. doi: 10.1038/s41598-021-00555-5. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-00555-5>.
- [5] Roland B. Stull. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, page 1–25. Springer Dordrecht, 1988. ISBN 978-90-277-2768-8. doi: 978-94-009-3027-8. URL <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>.
- [6] NikNaks. Diagram of the atmospheric boundary layer. https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_boundary_layer#/media/File:Atmospheric_boundary_layer.svg.
- [7] Juan P. Díaz, Francisco J. Expósito, Juan C. Pérez, Albano González, Yuqing Wang, Leopold Haimberger, and Junhong Wang. Long-term trends in marine boundary layer properties over the atlantic ocean. *Journal of Climate*, 32(10): 2991–3004, may 2019. ISSN 1520-0442. doi: 10.1175/jcli-d-18-0219.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0219.1>.
- [8] J. Carrillo, J. C. Guerra, E. Cuevas, and J. Barrancos. Characterization of the marine boundary layer and the trade-wind inversion over the sub-tropical north atlantic. *Boundary-Layer Meteorology*, 158(2):311–330, sep 2015. ISSN 1573-1472. doi: 10.1007/s10546-015-0081-1. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-015-0081-1>.
- [9] M Viana, X Querol, A Alastuey, E Cuevas, and S Rodríguez. Influence of african dust on the levels of atmospheric particulates in the canary islands air quality network. *Atmospheric Environment*, 36(38):5861–5875, dec 2002. ISSN 1352-2310. doi: 10.1016/s1352-2310(02)00463-6. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00463-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00463-6).

- [10] Bahareh Khalesi and Mohammad Reza Mansouri Daneshvar. Comprehensive temporal analysis of temperature inversions across urban atmospheric boundary layer of tehran within 2014–2018. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2):967–982, mar 2020. ISSN 2363-6211. doi: 10.1007/s40808-020-00732-x. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-020-00732-x>.
- [11] G. J. Fochesatto. Methodology for determining multilayered temperature inversions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5):2051–2060, may 2015. ISSN 1867-8548. doi: 10.5194/amt-8-2051-2015. URL <http://dx.doi.org/10.5194/amt-8-2051-2015>.
- [12] Iacobellis SF. Climate variability and california low-level temperature inversions. march 2009. URL <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2fd35b9be8b8e5a48c5807e4db55e020e37b28cb>.
- [13] Richard H. Johnson, Thomas M. Rickenbach, Steven A. Rutledge, Paul E. Ciesielski, and Wayne H. Schubert. Trimodal characteristics of tropical convection. *Journal of Climate*, 12(8):2397–2418, aug 1999. ISSN 1520-0442. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<2397:tcotc>2.0.co;2. URL [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2397:TCOTC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2397:TCOTC>2.0.CO;2).
- [14] Masato I. Nodzu, Shin-Ya Ogino, Yoshihiro Tachibana, and Manabu D. Yamanaka. Climatological description of seasonal variations in lower-tropospheric temperature inversion layers over the indochina peninsula. *Journal of Climate*, 19(13):3307–3319, jul 2006. ISSN 0894-8755. doi: 10.1175/jcli3792.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3792.1>.
- [15] Robert Wood and Christopher S. Bretherton. On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability. *Journal of Climate*, 19:6425–6432, DEC 2006. ISSN 1520-0442, 0894-8755. doi: 10.1175/jcli3988.1. URL <https://dx.doi.org/10.1175/jcli3988.1>.
- [16] Timothy A. Myers and Joel R. Norris. Observational evidence that enhanced subsidence reduces subtropical marine boundary layer cloudiness. *Journal of Climate*, 26(19):7507–7524, sep 2013. ISSN 1520-0442. doi: 10.1175/jcli-d-12-00736.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00736.1>.
- [17] University of Wyoming-Department of Atmospheric Science. Sounding Data. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- [18] Pedro Dorta Antequera. Las inversiones térmicas en canarias. *Investigaciones Geográficas*, (15):109, jun 1996. ISSN 0213-4691. doi: 10.14198/ingeo1996.15.01. URL <http://dx.doi.org/10.14198/INGE01996.15.01>.
- [19] Inocencio Font Tullot. El tiempo atmosférico en las islas canarias. 1956. URL https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/9616/1/INM_A26.pdf.
- [20] Emilio Cuevas Agulló. Estudio del comportamiento del ozono troposférico en el observatorio de izaña (tenerife) y su relación con la dinámica atmosférica.

1995. URL https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2047/1/Tesis_Cuevas.pdf.
- [21] Guangxia Cao, Thomas W. Giambelluca, Duane E. Stevens, and Thomas A. Schroeder. Inversion variability in the hawaiian trade wind regime. *Journal of Climate*, 20(7):1145–1160, apr 2007. ISSN 0894-8755. doi: 10.1175/jcli4033.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI4033.1>.
- [22] José María Fernández-Palacios et al. Una aproximación a la historia de la laurisilva macaronésica. 2013.
- [23] Stephen A. Klein and Dennis L. Hartmann. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *Journal of Climate*, 6(8):1587–1606, aug 1993. ISSN 1520-0442. doi: 10.1175/1520-0442(1993)006<1587:tscols>2.0.co;2. URL [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1587:TSCOLS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1587:TSCOLS>2.0.CO;2).
- [24] Zhenquan Wang, Jian Yuan, Robert Wood, Yifan Chen, and Tiancheng Tong. Profile-based estimated inversion strength. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23:3247–3266, MAR 2023. ISSN 1680-7324. doi: 10.5194/acp-23-3247-2023. URL <https://dx.doi.org/10.5194/acp-23-3247-2023>.
- [25] AIP ESPAÑA. Información referente a los lanzamientos de radiosondas en estaciones meteorológicas españolas. https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/ENR/LE_ENR_5_3.en.pdf.
- [26] AEMET. Sondeos de Ozono. https://www.aemet.es/documentos/es/el tiempo/observacion/radiacion/SondeosOzono_v1.pdf.
- [27] Jordan G. Powers, Joseph B. Klemp, William C. Skamarock, Christopher A. Davis, Jimmy Dudhia, et al. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8):1717–1737, aug 2017. ISSN 1520-0477. doi: 10.1175/bams-d-15-00308.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
- [28] Hans Hersbach, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, et al. The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049, jun 2020. ISSN 1477-870X. doi: 10.1002/qj.3803. URL <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3803>.
- [29] Brian C. O'Neill, Claudia Tebaldi, Detlef P. van Vuuren, Veronika Eyring, Pierre Friedlingstein, George Hurtt, Knutti, Jean-Francois Lamarque, Jason Lowe, Gerald A. Meehl, Richard Moss, Keywan Riahi, and Benjamin M. Sanderson. The scenario model intercomparison project (scenariomip) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 9(9):3461–3482, sep 2016. ISSN 1991-9603. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016. URL <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- [30] Ryan M. May, Kevin H. Goebbert, Jonathan E. Thielen, John R. Leeman, M. Drew Camron, Zachary Bruick, Eric C. Bruning, Russell P. Manser, Sean C. Arms, and Patrick T. Marsh. Metpy: A meteorological python library for data analysis and visualization. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103

- (10):E2273 – E2284, 2022. doi: 10.1175/BAMS-D-21-0125.1. URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/103/10/BAMS-D-21-0125.1.xml>.
- [31] María J. Pérez Herrera. TFG: Estudio de la Fortaleza de la Inversión Térmica en Canarias. *Universidad de La Laguna*, 2023.
- [32] Xin Qu, Alex Hall, Stephen A. Klein, and Peter M. Caldwell. On the spread of changes in marine low cloud cover in climate model simulations of the 21st century. *Climate Dynamics*, 42(9–10):2603–2626, sep 2013. ISSN 1432-0894. doi: 10.1007/s00382-013-1945-z. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1945-z>.
- [33] Mark. J. Webb and Adrian P. Lock. Coupling between subtropical cloud feedback and the local hydrological cycle in a climate model. *Climate Dynamics*, 41(7–8):1923–1939, dec 2012. ISSN 1432-0894. doi: 10.1007/s00382-012-1608-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1608-5>.
- [34] Peter M. Caldwell, Yunyan Zhang, and Stephen A. Klein. Cmp3 subtropical stratocumulus cloud feedback interpreted through a mixed-layer model. *Journal of Climate*, 26(5):1607–1625, feb 2013. ISSN 1520-0442. doi: 10.1175/jcli-d-12-00188.1. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00188.1>.
- [35] José L. Martín, José Bethencourt, and Emilio Cuevas-Agulló. Assessment of global warming on the island of tenerife, canary islands (spain). trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. *Climatic Change*, 114(2):343–355, feb 2012. ISSN 1573-1480. doi: 10.1007/s10584-012-0407-7. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0407-7>.