

TRABAJO FIN DE GRADO

**Efecto del cambio climático
sobre la temperatura media
futura en las principales
ciudades gallegas**



Rubén Amigo Fernández
Grado en Ciencias Ambientales

Julio 2021

Departamento de Física Aplicada

Faculta_{de}Ciencias

Universida_{de}Vigo

Faculta_de Ciencias



Universida_de Vigo

Efecto del cambio climático sobre la temperatura media futura en las principales ciudades gallegas.

Trabajo de fin de grado

Grado en Ciencias Ambientales



Environmental | Physics | Laboratory

EPhysLab

Rubén Amigo Fernández

Grado en Ciencias Ambientales

Julio 2021

RESUMEN

Una de las principales consecuencias del cambio climático es el aumento de la temperatura media del aire en superficie. Por este motivo, este trabajo se centra en analizar esta variable a lo largo del siglo XXI, en las siete principales ciudades de Galicia utilizando datos del proyecto CORDEX bajo el escenario RCP 8.5. Para realizar las proyecciones se seleccionaron un total de siete simulaciones pertenecientes a tres modelos climáticos regionales diferentes alimentados por distintos modelos globales del proyecto CMIP5. Estas siete simulaciones se compararon con datos de estaciones meteorológicas de AEMET empleando un test de solapamiento y el porcentaje de error de los valores medios para verificar que reproducen de manera adecuada la realidad. Se observó que todas las simulaciones representan la realidad de manera aceptable.

En primer lugar, se estudió la variación de la temperatura superficial media del aire para el período histórico (1980-2005), tanto a escala anual como estacional. A escala anual se registró un incremento de entre 0.24-0.25°C por década, mientras que a escala estacional se observó un incremento de temperatura en todas las estaciones, siendo este aumento más acusado en otoño, alrededor de 0.4°C por década, seguido del verano, cuando el incremento es ligeramente superior a 0.3°C por década en la mayor parte de las ciudades. En invierno y primavera se registran unos incrementos de en torno a 0.15 y 0.10°C por década, respectivamente. Posteriormente, se analizó el incremento de temperatura esperado para el período futuro (2020-2099). A escala anual se detectó un incremento más acusado que el observado en el pasado, con valores de tendencia en torno a 0.5°C por década, lo que supone un incremento de unos 4°C para el año 2099 respecto a 2020. En general, se observó que el incremento es ligeramente inferior en las ciudades costeras, como Vigo, respecto a las urbes interiores como puede ser Ourense. A escala estacional se vuelve a registrar un incremento más acusado que el detectado en el pasado, siendo el verano la estación con un mayor incremento (~ 0.6°C por década), seguida del otoño, con una tendencia ligeramente superior al medio grado por década. En invierno y primavera se proyectan unos incrementos similares, de aproximadamente cuatro décimas por década.

Finalmente se calculó el incremento porcentual del período futuro respecto al histórico para todas las ciudades objeto de estudio, tanto a escala anual, donde se observa que las ciudades que van a sufrir un mayor aumento de la temperatura media anual serán Lugo y Ourense con un incremento de entre el 20 y el 25% a lo largo del siglo XXI, como a escala estacional, donde los resultados arrojan un incremento porcentual máximo durante el invierno y mínimo en verano, lo que indica futuros cambios en las estaciones.

Se puede concluir entonces que se espera que la temperatura siga en aumento hasta finales de 2099, siendo este incremento ligeramente diferente en cada ciudad y máximo en las ciudades interiores como Ourense, por lo que es necesario realizar un estudio individual de cada ciudad para implantar las medidas necesarias de adaptación contra el cambio climático.

ÍNDICE

1-INTRODUCCIÓN	3
1.1- Sistema climático y clima	3
1.2- Cambio climático	3
1.2.1- Cambio climático natural	3
1.2.2- Cambio climático antropogénico	5
1.3- Proyecciones futuras del clima	9
1.4- Área de estudio	9
1.5- Objetivos del trabajo	13
2.- BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA	15
2.1- Bases de datos	15
2.1.1- Simulaciones de CORDEX	15
2.1.2- Series de temperatura de AEMET	16
2.2- Métodos	16
2.2.1- Análisis de fiabilidad de los RCM	16
2.2.2- Porcentaje de variación futura de la temperatura media	18
3.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
3.1- Validación de datos	19
3.1.1- Test de solapamiento o de Perkins	19
3.1.2- Porcentaje de diferencia de los valores medios	21
3.2 Variaciones históricas de la temperatura media	22
3.2.1- Tendencia histórica anuales	22
3.2.2- Tendencia histórica estacional	24
3.3.- Proyecciones futuras de la temperatura media	30
3.3.1- Proyecciones futuras anuales	30
3.3.2- Proyecciones futuras estacionales	33
3.4.- Mitigación y adaptación	40
4- CONCLUSIONES	43
5- BIBLIOGRAFÍA	45

La imagen de la portada muestra la ciudad de Vigo con las Islas Cíes al fondo. Tomada de: <https://pixabay.com/es/photos/vigo-islas-c%C3%ADes-oc%C3%A9ano-atl%C3%A1ntico-1007490/>

1-INTRODUCCIÓN

1.1- Sistema climático y clima

Para poder definir el clima, primero es esencial comprender el concepto de sistema climático. El sistema climático consta de cinco componentes o subsistemas, los cuales se explican a continuación (Martín-Gomez, 2016):

- **Atmósfera:** capa de gases distribuida alrededor de la Tierra.
- **Hidrosfera:** agua en fase líquida distribuida sobre la Tierra.
- **Criosfera:** masa de nieve y hielo distribuida sobre la Tierra.
- **Biosfera:** incluye la flora y la fauna presentes tanto en los continentes como en los océanos.
- **Litosfera:** incluye a los continentes y a los fondos oceánicos.

El sistema climático es un sistema dinámico en el cual un cambio en uno de los subsistemas conduce a variaciones del resto de componentes hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio y, como consecuencia final, se producen cambios en el clima. Es decir, el clima surge como consecuencia de la interacción, a partir de complejos procesos físicos, entre los que se incluyen flujos de materia y energía, de los componentes del sistema climático (Linés-Escardo, 1998). Se puede concluir entonces que sistema climático y clima están estrechamente ligados.

1.2- Cambio climático

1.2.1- Cambio climático natural

Los componentes del sistema climático pueden sufrir variaciones, debido a causas naturales o antropogénicas, y provocar cambios en el clima de la Tierra. Por tanto, los cambios climáticos pueden ser naturales o antropogénicos, en función de la causa de la variación del sistema climático. Así, es importante tener en cuenta que el cambio climático no es un hecho reciente causado por la acción humana, si no que ha estado presente a lo largo de toda la historia de la Tierra. Se puede considerar que, hasta la Revolución Industrial, el cambio climático se debía meramente a causas naturales como consecuencia de modificaciones en los cinco subsistemas comentados anteriormente. A continuación, se comentan algunos ejemplos de variación natural en cada uno de los cinco subsistemas.

Atmósfera: los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero provocan un aumento o disminución de la temperatura a nivel global. Estas modificaciones pueden deberse a causas naturales, como por ejemplo la gran oxidación (la aparición de organismos fotosintéticos oxidativos hace 2800 millones de años) que provocó que la atmósfera terrestre pasase de estar dominada por N_2 y CO_2 a estar formada principalmente por N_2 y O_2 . (Vázquez-Abeledo, 2006).

Hidrosfera: los océanos absorben gran parte de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre e intercambian esta energía entre el ecuador y los polos mediante las corrientes oceánicas, por lo que, cambios en las corrientes oceánicas modifican el reparto de calor a nivel global, influyendo en el tiempo atmosférico y en el clima (Amestoy-Alonso, 1999). La corriente del Golfo, por ejemplo, transporta agua cálida desde el Golfo de México hasta el Atlántico Norte y asegura un clima cálido en Europa, a pesar de la latitud (Vázquez-Abeledo, 2006).

Criosfera: el ciclo de formación de hielo y deshielo provoca variaciones de la densidad de las masas de agua en las zonas adyacentes, ya que durante la formación del hielo se liberan los iones Na^+ y Cl^- , lo que contribuye a aumentar la salinidad de las masas de agua y como consecuencia, su densidad. La corriente del Golfo, descrita anteriormente, tiene como origen el hundimiento en el Atlántico Norte (entre los 40° N y los 50° W), el cual está causado por la formación de hielo en los mares del Labrador y Groenlandia. Además, cambios en la cubierta de hielo modifican el albedo terrestre y, por lo tanto, el balance energético de la Tierra (Vázquez-Abeledo, 2006).

Biosfera: cambios en las comunidades biológicas pueden modificar la composición química de la atmósfera. La glaciación Uroniana tiene, muy posiblemente, su origen en la gran oxidación comentada anteriormente.

Litosfera: el movimiento de los continentes, propuesto por Alfred Wegener en su teoría de la deriva continental, puede modificar o bloquear las corrientes oceánicas, ya que constituye una barrera física. De esta forma, una masa continental sobre o rodeando los polos bloquea la llegada de corrientes cálidas procedentes del ecuador, lo que contribuye a la expansión de los casquetes polares (Vázquez-Abeledo, 2006).

Existen otros factores externos a la dinámica interna de la Tierra que influyen en la cantidad de radiación que la Tierra recibe del Sol, y por lo tanto en su temperatura. Un ejemplo de ello son los ciclos de mayor o menor actividad del Sol. Se ha constatado un ciclo de 11 años que provoca pequeñas variaciones en la cantidad de radiación solar que recibe la Tierra. Otro ejemplo son los ciclos de Milankovich. Milutin Milankovich propuso la existencia de tres movimientos que modifican la cantidad de radiación solar que recibe nuestro planeta, y que también influyen en la mayor o menor cantidad de radiación que llega a los polos. Estos movimientos tienen que ver con variaciones en la excentricidad de la órbita terrestre, la oblicuidad del eje de la Tierra y la precesión de los equinoccios. Cada uno de estos tres movimientos tiene una periodicidad diferente y la combinación de los mismos provoca variaciones que explicarían los periodos glaciares e interglaciares que se vienen sucediendo en el Holoceno (Meteoclim, 2016).

La cantidad de radiación procedente del Sol también influye en el clima de la Tierra. Debido a las continuadas reacciones nucleares que se producen en el interior del Sol y que transforman hidrógeno -un elemento químico ligero- en helio -un elemento químico más pesado-, el peso molecular medio del Sol se encuentra en aumento constante, y, por lo tanto, también su luminosidad (ya que $L \propto M^{5.5} * R^{-0.5} * \mu^{7.5}$) dónde, M y R son la masa y el radio del Sol y μ la masa atómica del helio (Vázquez-Abeledo, 2006). Esto quiere decir que la energía emitida por el Sol se está incrementando constantemente (hasta la actualidad aumentó entre un 25 y un 30%) y como consecuencia, la Tierra recibe cada

vez más energía proveniente del Sol, dando lugar a un pequeño pero continuado aumento de temperatura.

1.2.2- Cambio climático antropogénico

El cambio climático antropogénico comienza con la Revolución Industrial (1760-1840) y la causa principal son las presiones antropogénicas originadas sobre el subsistema atmósfera. A partir de la Revolución Industrial cambia radicalmente la economía mundial y los combustibles fósiles se convierten en la principal fuente de energía. Como consecuencia, se comienzan a emitir gases de “efecto invernadero” (principalmente CO₂) a la atmósfera, lo que produce un cambio en la composición química de ésta. Esta modificación química de la atmósfera induce a nuevas variaciones en el resto de subsistemas, lo que provoca finalmente cambios en el clima de la Tierra.

Los gases emitidos directamente a la atmósfera como resultado de la explotación de combustibles fósiles son capaces de absorber la energía radiada por la superficie terrestre y reemitirla en todas direcciones, lo que termina calentando la atmósfera, esto es lo que se conoce comúnmente como efecto invernadero y los gases causantes de este fenómeno se denominan gases de efecto invernadero. La contribución de estos gases al aumento de temperatura se estudia a través del forzamiento radiativo.

Según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el forzamiento radiativo se define cómo: “*cambios del flujo radiativo neto (descendente menos ascendente) en la tropopausa por efecto del cambio de un factor externo al sistema climático (por ejemplo, un cambio de la concentración de CO₂ o de la energía emitida por el Sol). Se expresa en W/m².*” Simplificando esta definición, se puede concretar que el forzamiento radiativo es la diferencia (en Wm⁻²) entre la radiación absorbida por la Tierra y la reemitida al espacio. Cuando se absorbe más energía de la que se emite, entonces el forzamiento aumenta y como consecuencia la temperatura de la Tierra también aumenta. Si por el contrario este forzamiento decrece, la temperatura de la Tierra disminuye.

En la figura 1.1. se presentan los diferentes términos responsables del forzamiento radiativo. Los valores azules denotan enfriamiento mientras que los valores rojos se traducen en un aumento de temperatura. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno, lo que causa un aumento de temperatura. Los principales gases causantes del aumento de temperatura, como se puede ver en la figura 1.1, son los gases de permanencia larga, es decir, aquellos gases que permanecen en la atmósfera por lo menos durante 10 años (CO₂, N₂O, CH₄ y halocarbonos) y el ozono troposférico, mientras que los gases que provocan un enfriamiento son principalmente los aerosoles y el ozono estratosférico, aunque este último con mucha menos intensidad. Se entiende por aerosoles aquellas partículas que son capaces de permanecer suspendidas en un gas o en una mezcla de gases, como la atmósfera, y en función de su origen se clasifican en naturales o antropogénicos.

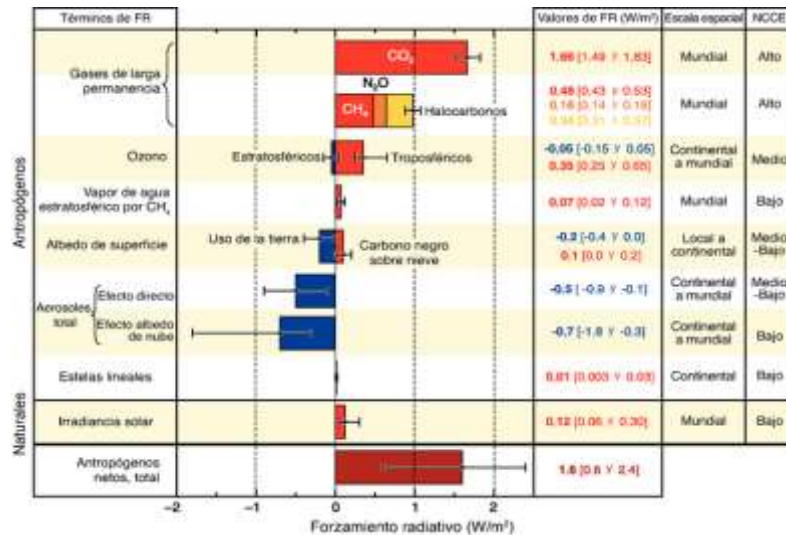


Figura 1.1: Forzamiento radiativo promedio mundial. Fuente: Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles (Alley, et al., 2018).

Existe un forzamiento radiativo positivo significativo debido a causas antropogénicas como consecuencia del aumento continuado del empleo de combustibles fósiles, en donde la principal emisión antropogénica es el CO₂. La figura 1.2 muestra cómo la concentración de CO₂ atmosférico ha aumentado aproximadamente 100 partes por millón desde 1960 hasta 2020. Las oscilaciones que se observan en la figura 1.2 (durante el verano se observa un máximo relativo anual en la concentración de CO₂ mientras que en invierno la concentración de este gas alcanza su mínimo relativo anual) se deben al ciclo del carbono, el cual está estrechamente ligado con el ciclo hidrológico. Durante el invierno aumentan las precipitaciones, lo que provoca el lavado del CO₂ troposférico mientras que, durante el verano, al disminuir las precipitaciones, aumenta la concentración de CO₂.

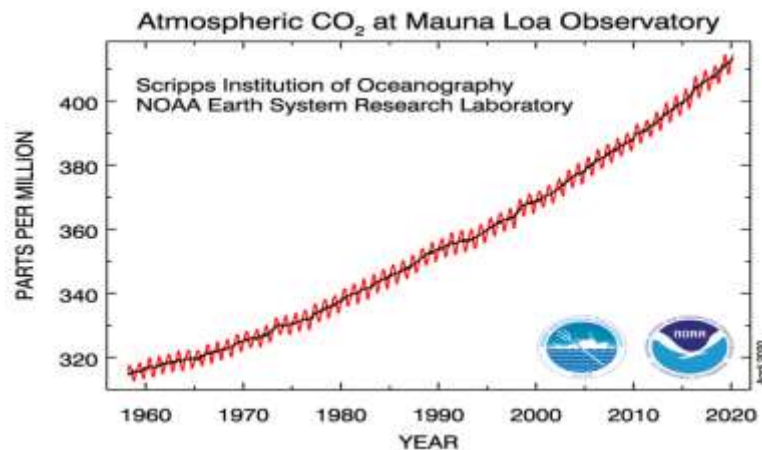


Figura 1.2: Variación de CO₂ (en partes por millón, ppm) medida en la estación de Mauna Loa (Hawaii, EEUU) de 1960 a 2020. Fuente: NOAA.

La temperatura del aire sufrió un incremento continuado desde los años 70 hasta la actualidad (figura 1.3). Se entiende, por lo tanto, que existe una relación directa entre el incremento de las emisiones de CO₂ y el aumento de la temperatura a nivel global. Sin

embargo, como se ha explicado anteriormente, el sistema climático es complejo y en él existen multitud de interacciones entre sus componentes, por lo que esta relación entre temperatura y CO₂ no es lineal, aunque se puede concluir que, debido a su capacidad de absorber la radiación infrarroja emitida por la Tierra, el incremento en la concentración de CO₂ ha ido acompañado de un aumento de la temperatura. En la figura 1.3 se observa que, desde 1880, la temperatura media se ha incrementado sobre 1°C. Además, desde la década de 1960, cada década ha sido más cálida que la década anterior y es posible intuir que esta tendencia se mantendrá, por lo menos, durante un futuro próximo. (Schmidt y Arndt, 2020)

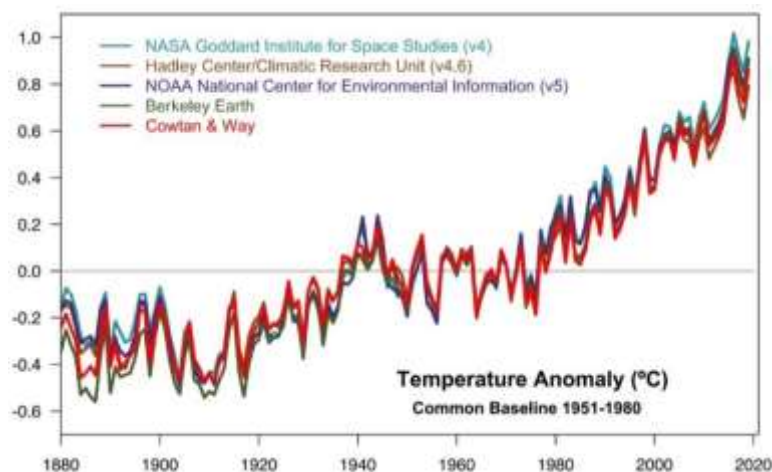


Figura 1.3: Evolución de la anomalía térmica de la temperatura promedio de la Tierra desde 1880 hasta 2020, según datos registrados por la NASA, NOAA, el Hadley Center, el grupo de investigación de Berkeley Earth y el análisis Cowtan y Way. Fuente: Schmidt y Arndt, 2020.

El cambio climático causado por la actividad humana afecta principalmente al subsistema atmósfera (los gases emitidos a la atmósfera aumentan el forzamiento radiativo terrestre, y finalmente calientan la atmósfera), pero como se ha comentado anteriormente, cualquier cambio en alguno de los componentes del sistema climático tiene impacto sobre el resto de subsistemas. A continuación, se comentarán algunas de las consecuencias más significativas del cambio climático extraídas del resumen del IPCC, *El Cambio climático y la Tierra* (IPCC, 2020), para responsables de políticas:

Cambios en la temperatura: A partir de la Revolución Industrial el incremento de la temperatura media superficial del aire fue aproximadamente el doble que el de la temperatura media global en superficie, la cual incluye tanto continentes como océanos. La temperatura media superficial del aire se incrementó entre 1.38 y 1.68°C desde 1850-1900 hasta 2006-2015 mientras que la temperatura media global en superficie aumentó entre 0.75 y 0.99°C.

Cambios en las zonas climáticas: Debido al incremento de las temperaturas, se estima, con un nivel de confianza alto, que las diferentes regiones climáticas se seguirán desplazando hacia los polos en latitudes medias y altas. También se espera que la zona tropical continúe en expansión.

Se sabe con un nivel de confianza alto que debido al cambio climático las zonas climáticas áridas han sufrido una expansión mientras que las zonas climáticas polares se han contraído. Se ha estimado con un nivel de confianza alto que las modificaciones de las

diferentes regiones climáticas han afectado a los ciclos biológicos florales y faunísticos o a la distribución y abundancia de especies, lo que repercute en la cadena trófica y por lo tanto sobre el propio ecosistema. También se ha observado, con un nivel de confianza medio, un incremento de la desertificación y de la escasez de agua en zonas climáticas áridas (como son el África Subsahariana, Asia oriental y central o Australia) debido a la labor combinada del cambio climático y la acción humana, lo que provoca la pérdida de cubierta vegetal. Estos dos factores (la desertificación y la pérdida de cubierta vegetal) se han relacionado, con un nivel de confianza alto, con un incremento en las emisiones de CO₂. Sin embargo, esta disminución de la vegetación incrementa el albedo local, lo que reduce la temperatura superficial (nivel de confianza alto).

Cambios en el suelo: Se puede afirmar, con un nivel de confianza alto, que el cambio climático acelera los procesos de degradación de la Tierra a través del incremento de la frecuencia, duración e intensidad de los fenómenos extremos, por ejemplo, las lluvias torrenciales sobre regiones áridas son uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de la materia vegetal del suelo. Estos cambios en las condiciones del suelo, también afectan al clima regional y global.

Es muy posible que los cambios del suelo estén marcados por procesos de retroalimentación: por ejemplo, en las regiones boreales, la pérdida de la capa de nieve disminuirá el albedo local, lo que provocará el incremento de las temperaturas durante el invierno.

Cambios en la vegetación: Se tiene constancia, con un nivel de confianza alto, de un aumento del reverdecimiento de la vegetación a nivel global, ocasionado principalmente por un incremento de la fertilización causado por el aumento del CO₂ y el N₂, la actividad humana y el aumento de las temperaturas, que provocan que las fases de crecimiento de las plantas se extiendan en el tiempo. Sin embargo, en diferentes regiones de Eurasia septentrional, América del Norte, Asia central y el Congo, se ha observado, con un nivel de confianza medio, un oscurecimiento de la vegetación debido principalmente al estrés causado por la falta de agua.

Fenómenos extremos: Se ha establecido una relación positiva, con un nivel de confianza alto, entre el incremento de las temperaturas y el aumento de la frecuencia, duración e intensidad de los fenómenos relacionados con el calor, como por ejemplo las olas de calor. El cambio climático también está relacionado, con un nivel de confianza medio, con un incremento en la frecuencia e intensidad de las sequías (principalmente en la región mediterránea, Asia, África y América del Sur) y la intensidad de las precipitaciones a escala mundial. Entre 1961 y 2013, la extensión anual de sequía en zonas áridas ha aumentado algo más de un 1%. En las regiones climáticas áridas, como la península Arábiga, Oriente Medio y Asia central, la frecuencia e intensidad de las tormentas de polvo también ha aumentado (nivel de confianza alto), lo que repercute negativamente sobre el bienestar de las poblaciones o asentamientos humanos presentes en dichas regiones (IPCC, 2020).

1.3- Proyecciones futuras del clima

Para poder analizar la evolución del clima en el futuro, así como los posibles efectos del cambio climático es necesario emplear modelos climáticos, los cuales pueden ser globales o regionales. Las mallas de los modelos climáticos globales (GCM) abarcan toda la Tierra y presentan una resolución espacial de entre 100 y 200 km cada cuadrícula. Debido a su gruesa resolución espacial, los GCM se emplean para predecir la evolución del clima de la Tierra, pero no son capaces de simular con exactitud el clima en países o ciudades, donde la topografía juega un papel importante en la determinación del clima de esa zona. Para poder predecir el clima futuro de una región determinada, se emplean los modelos climáticos regionales (RCM), los cuales presentan una resolución de entre 50 km o unos pocos kilómetros y están alimentados, en cuanto a condiciones iniciales y de contorno, con datos de simulaciones de los GCM. En este trabajo se emplearon simulaciones de RCMs del proyecto EURO-CORDEX (*Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment*), el cual es alimentado con datos provenientes de diferentes GCMs del proyecto CMIP5. (Meteo-Sim, 2020).

A la hora de estudiar la contribución de las actividades humanas en el forzamiento radiativo se emplean los escenarios de emisión. A partir de los escenarios de emisiones se obtienen los escenarios de concentraciones, los cuales se emplean en las proyecciones climáticas. En el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se definieron los escenarios de emisión conocidos como *Representative Carbon Pathway (RCP)*. Los RCP proyectan el forzamiento radiativo futuro esperado en función de diversos supuestos, como pueden ser el desarrollo económico y social, para el año 2100. Este forzamiento radiativo se espera que varíe entre 2.6 y 8.5 Wm⁻², por lo que se definieron 4 RCPs: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, siendo 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 el incremento en el forzamiento radiativo (en Wm⁻²) que se espera para finales del siglo XXI sobre el valor preindustrial (Moss et al, 2010).

El escenario de emisiones de gases de efecto invernadero RCP8.5 fue el que se consideró en las proyecciones futuras de este trabajo. El RCP8.5 se trata del escenario más pesimista de todos. En él se contempla la posibilidad de que no se realice ningún esfuerzo, por parte de las autoridades políticas, orientado a combatir el aumento continuado de las emisiones de gases de efecto invernadero, y como consecuencia, que el forzamiento radiativo alcance los 8.5 Wm⁻² a finales del siglo XXI y siga en aumento incluso después. En este escenario las emisiones de CO₂ duplicarían las actuales, llegando hasta las 936 ppm para el año 2100 (Hausfather, 2019).

1.4- Área de estudio

Este trabajo se centró en las siete ciudades principales de Galicia (Vigo, A Coruña, Ferrol, Ourense, Pontevedra, Lugo y Santiago) (Figura 1.4). Estas ciudades, distribuidas a lo largo del territorio gallego, representan casi el 40% de la población total de Galicia.

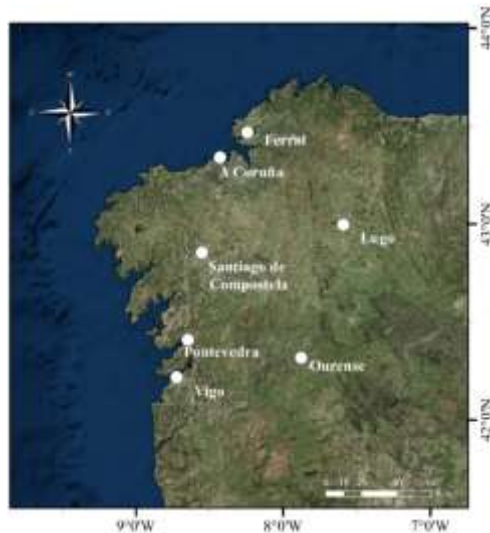


Figura 1.4. Localización de las siete ciudades analizadas en el presente trabajo.

Galicia se encuentra entre 42°-44°N y 7-10°W, lo que le otorga un clima oceánico donde la amplitud térmica anual oscila en torno a 10°C y las abundantes precipitaciones se distribuyen de manera más o menos homogénea a lo largo del año. En términos generales, la cercanía del océano Atlántico contribuye a mantener unas temperaturas similares a lo largo del año, con inviernos suaves y veranos no muy calurosos. Como resultado de las suaves temperaturas y las abundantes precipitaciones, Galicia presenta una vegetación dominada por bosques caducifolios (roble, haya, castaño, fresno y olmo). Sin embargo, debido al relieve accidentado del territorio y a las diferentes masas de aire que circulan sobre Galicia, se aprecian diferencias climáticas entre las zonas de costa y de interior, así como entre las zonas norte y sur. (Cortizas y Alberti, 1999).

La circulación de las masas de aire en Galicia está dominada por la presencia de la depresión de Islandia y dos anticiclones, el de las Azores y el Centroeuropeo (figura 1.5).

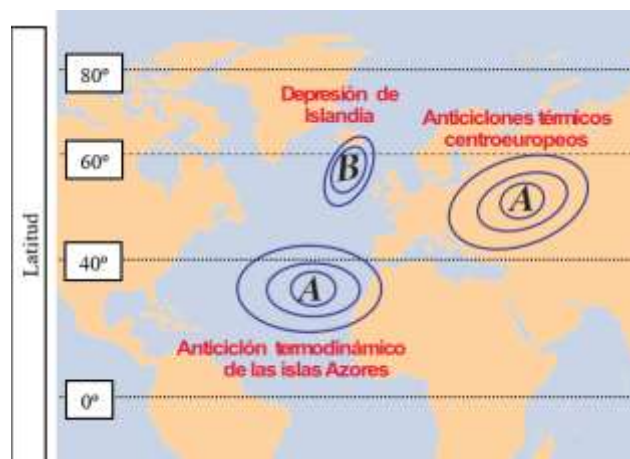


Figura 1.5: Localización media de los principales elementos béricos que controlan la situación atmosférica superficial sobre la Península Ibérica. Fuente: *Atlas climático de Galicia* (Cortizas y Alberti, 1999)

La borrasca o depresión de Islandia se encuentra sobre el Atlántico norte y es responsable de la llegada de masas de aire polar marítimo a Galicia mientras que el anticiclón Centroeuropeo, que se origina durante el invierno, es responsable de las corrientes de aire polar continental que circulan sobre este territorio. Por otro lado, el anticiclón de las

Azores moviliza masas de aire cálido sobre la Península Ibérica, aunque su efecto es más apreciable sobre la región sur de España.

La temperatura media anual varía entre norte y sur; y entre costa e interior (figura 1.6). Los valores mínimos se registran en las montañas orientales y sudorientales mientras que los valores máximos se registran en zonas costeras de menor latitud. De esta manera, A Coruña y Pontevedra presentan las temperaturas medias ponderadas más elevadas. Durante el invierno las zonas de interior presentan temperaturas más bajas que las zonas costeras y en la zona sudeste es donde se registran las temperaturas invernales más bajas. La amplitud térmica anual, debido al efecto termorregulador del océano, es menor en las zonas costeras que en el interior. (Cortizas y Alberti, 1999).

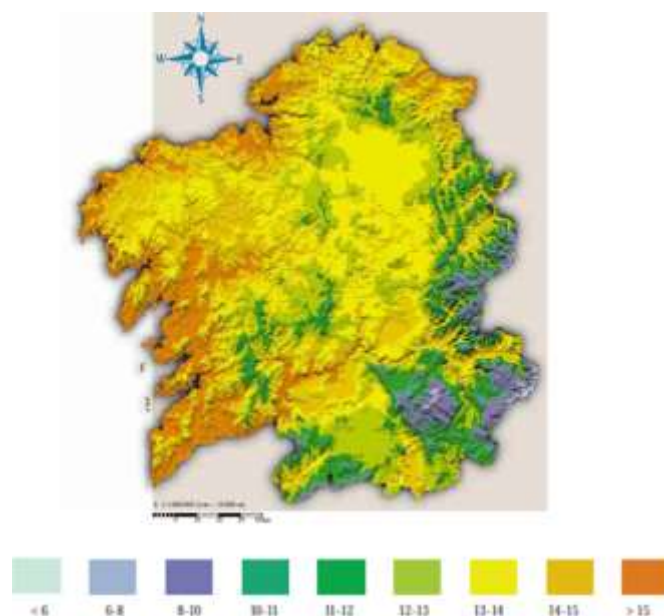


Figura 1.6: Temperatura media anual de Galicia. Fuente: *Atlas climático de Galicia* (Cortizas y Alberti, 1999)

La variación intra-anual de las temperaturas medias superficiales para las ciudades de estudio, promediada al período 1980-2005, se muestran en la figura 1.7. Como se puede observar, Ourense es la ciudad que presenta la mayor amplitud térmica anual (15°C), con valores medios de temperatura en torno a los 5°C durante el invierno y sobre los 20°C durante los meses de más calor. En las ciudades costeras la amplitud térmica anual es menor. Las ciudades interiores orientales (Lugo y Ourense) registran las temperaturas mínimas durante el mes de enero y la temperatura media anual es menor que en las ciudades localizadas en zonas costeras. Las ciudades costeras del sur de Galicia (Vigo y Pontevedra) presentan valores medios de temperatura más altos que las ciudades costeras del norte (A Coruña y Ferrol). Esto se debe en parte a que durante el verano predominan los vientos del nordeste, que hacen llegar vientos más secos y cálidos al sur de Galicia después de atravesar toda Galicia desde el norte. Dentro de una misma provincia también existen diferencias térmicas entre costa e interior, por ejemplo, en la provincia de A Coruña se ubican tres ciudades objeto de estudio en este trabajo: A Coruña, Ferrol y Santiago. Debido a su mayor cercanía al océano, A Coruña y Ferrol presentan unas temperaturas medias a lo largo del año más homogéneas que Santiago, es decir, Santiago presenta mayor amplitud térmica.

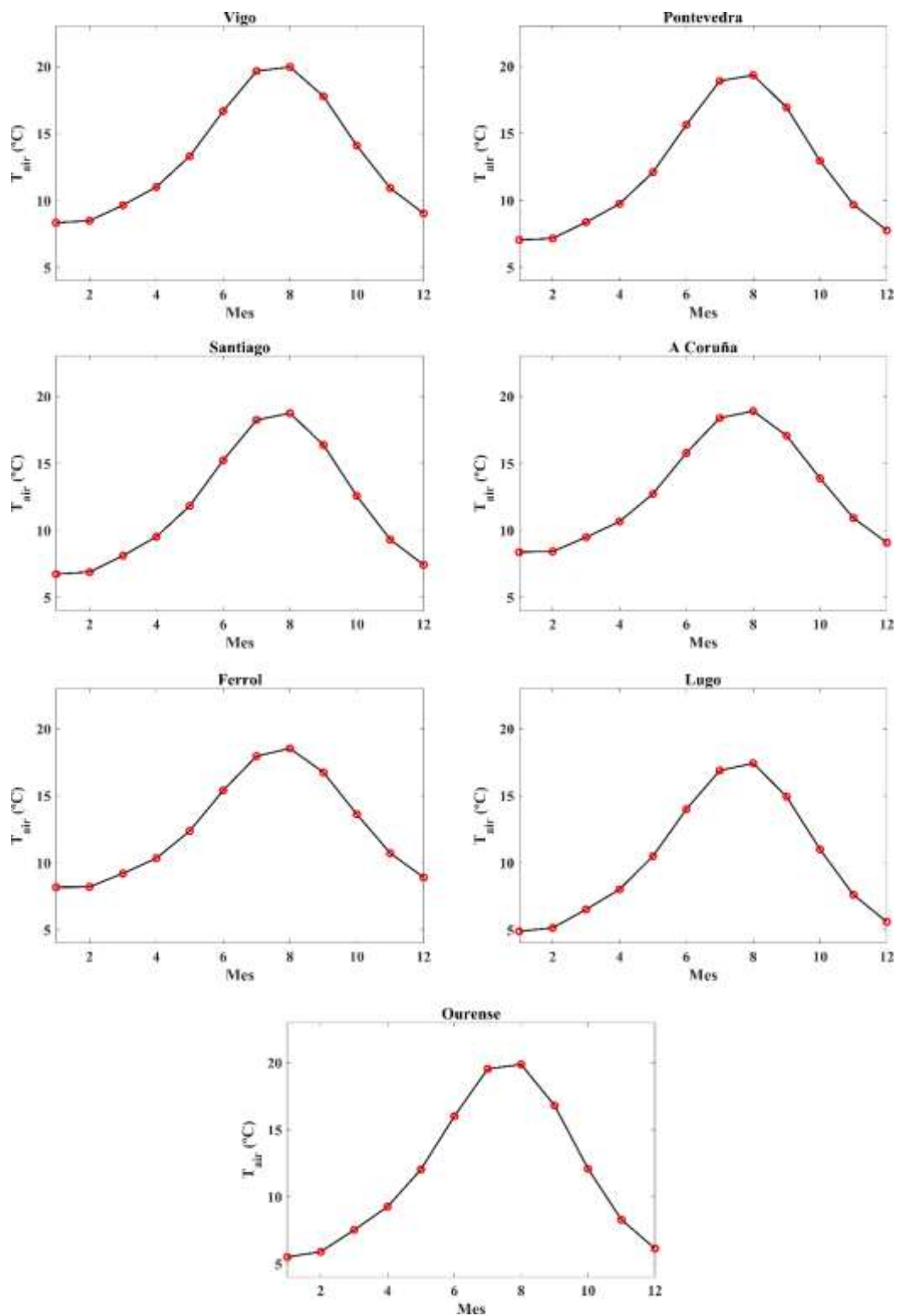


Figura 1.7: Variación intra-anual de la temperatura media superficial para las 7 ciudades objeto de estudio promediada durante el período 1980-2005.

1.5- Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la variación futura de la temperatura media superficial en las siete principales ciudades de Galicia bajo el escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 durante el período 2020-2099. Este análisis se realizará tanto a escala anual como estacional. Además, para mostrar la capacidad de reproducir la realidad de las simulaciones numéricas obtenidas del proyecto CORDEX, se comparan las temperaturas históricas obtenidas de las simulaciones numéricas con los datos de temperatura media superficial de las estaciones meteorológicas gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

La estructura del trabajo es la siguiente:

En el capítulo 2 se describen las dos bases de datos de temperatura superficial empleadas en el presente trabajo: proyecto CORDEX y AEMET. También se explican las métricas empleadas para comparar las series reales con las simulaciones de CORDEX.

Los resultados y la discusión se presentan en el capítulo 3. En primer lugar, se muestran y discuten los resultados de la validación de las simulaciones con los datos de las estaciones meteorológicas de AEMET. Posteriormente, se exponen las variaciones históricas y las proyecciones futuras de la temperatura media a escala anual y estacional. También se analiza el incremento porcentual de la temperatura futura respecto del período histórico. Los valores obtenidos de las tendencias se comparan con estudios previos en otras zonas.

Finalmente, el capítulo 4 recoge las principales conclusiones del trabajo.

2.- BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

2.1- Bases de datos

Para realizar este estudio se emplearon dos bases de datos diferentes: Por un lado, los datos de la temperatura media de diferentes simulaciones del proyecto CORDEX y, por otro lado, las series de temperatura de las estaciones de AEMET que se utilizarán para validar los datos de CORDEX.

2.1.1- Simulaciones de CORDEX

CORDEX (*Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment*) es un proyecto que trata de organizar un marco internacional coordinado con el objetivo de producir proyecciones o simulaciones de cambio climático mejoradas. Los resultados de estas simulaciones se emplean para llevar a cabo estudios de impacto y adaptación al cambio climático (CORDEX, 2015).

En este trabajo se empleó, más específicamente, el dominio EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net/>). Se seleccionaron un total de 7 simulaciones en las que se emplearon un total de 3 RCMs diferentes alimentados por diferentes GCMs del proyecto CMIP5, tal y como se especifica en la tabla 2.1. Estos RCMs tienen una resolución espacial de $0.11^\circ \times 0.11^\circ$ y se tomaron los datos a escala diaria.

Tabla 2.1: RCMs del proyecto CORDEX empleados en este trabajo. Incluye el GCM del proyecto CMIP5 que aporta las condiciones de frontera a cada RCM y el instituto responsable del desarrollo del modelo climático.

GCM	RCM	Instituto
MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	CLMcom
IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	SMHI
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17	CLMcom
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	SMHI
MOHC_HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	CLMcom
MOHC_HadGEM2-ES	RCA4	SMHI
ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E	KNI

Para seleccionar las series temporales de temperatura media superficial para cada ciudad se empleó el método de los vecinos más próximos. Se realizó un promedio de los cuatro puntos de malla más próximos a las coordenadas de cada una de las ciudades (Tabla 2.2), otorgando a cada punto un peso diferente dependiendo de su cercanía a las coordenadas de la ciudad, siendo más alto cuánto más próximo se sitúe.

La tabla 2.2 recoge las coordenadas de las ciudades objeto de estudio. Estas siete ciudades abarcan todo el territorio gallego, así como diferentes zonas climáticas de la provincia:

Tabla 2.2: Coordenadas de las 7 ciudades seleccionadas en el presente trabajo.

CIUDADES	LATITUD	LONGITUD
Vigo	-8.812058	42.215494
Pontevedra	-8.619253	42.422415
Santiago	-8.547363	42.880241
A Coruña	-8.418801	43.371259
Ferrol	-8.227730	43.503367
Lugo	-7.499439	43.002632
Ourense	-7.902105	42.350882

2.1.2- Series de temperatura de AEMET

Se seleccionaron series de temperatura de seis estaciones de AEMET repartidas por las principales ciudades de Galicia (Vigo, Pontevedra, Santiago, A Coruña, Lugo y Ourense). La ciudad de Ferrol no fue considerada en la validación de los datos ya que no hay estación de AEMET en esta urbe.

Los valores diarios de temperatura media de AEMET para el período 1980-2005 se promediaron mensualmente. Esto permitió comparar las simulaciones históricas de CORDEX con los datos medidos directamente por AEMET y conocer el grado de fiabilidad de las proyecciones de CORDEX, es decir, analizar si las simulaciones reproducen de forma acertada la realidad o, si, por el contrario, existe algún tipo de sesgo en ellas.

2.2- Métodos

2.2.1- Análisis de fiabilidad de los RCM

La validación de las simulaciones de temperatura media superficial para cada RCM, consistió en comparar la serie mensual de temperatura media de cada uno de los modelos con el promedio mensual de temperatura media de las estaciones de AEMET. El período histórico para el que se realizó la comparación fue 1980-2005.

Para realizar dicha comparación se emplearon dos métodos estadísticos diferentes:

1. Test de solapamiento o test de Perkins.
2. Porcentaje de error de los valores medios (PE).

Estos métodos estadísticos son complementarios permitiendo una visión mucho más completa. Así, el test de solapamiento o de Perkins compara toda la serie de datos rango por rango mientras el PE nos indica como divergen las medias.

- Test de solapamiento o test de Perkins

Esta prueba mide el grado de solapamiento entre la temperatura obtenida de cada RCM y los valores reales medidos en las estaciones de AEMET. Una ventaja de este método es que permite comparar toda la serie de datos y no se basa únicamente en la comparación

de un único valor, como sucede, por ejemplo, cuando comparamos el valor medio de ambas series.

Para obtener un valor de solapamiento para cada ciudad y modelo se realizaron los siguientes pasos: en primer lugar, se dividen ambas series en diferentes rangos de temperatura de 1°C cada uno. Posteriormente, se calcula el porcentaje de probabilidad para cada uno de los rangos de cada serie por separado. A continuación, en cada uno de los rangos de 1°C se selecciona el valor más bajo del porcentaje de probabilidad, ya sea el de la estación o el del modelo. Posteriormente, se suman todos los valores más bajos de cada uno de los rangos y se multiplican por 100 para conocer el porcentaje de solapamiento. Cuanto más se aproxime a 100 este porcentaje, más se ajustará a la realidad el modelo (Perkins et al.,2007).

- Porcentaje de error

Para calcular el porcentaje de error de los valores medios se empleó la siguiente fórmula:

$$PE (\%) = \left(\frac{T_{mod} - T_{est}}{T_{ref}} \right) * 100$$

Donde:

- T_{mod} es la temperatura media de cada modelo para el período histórico.
- T_{est} es la temperatura media de cada estación de AEMET.
- $T_{ref} = \frac{T_{mod} + T_{est}}{2}$

El porcentaje de error se emplea para comparar únicamente el valor medio de la serie de la temperatura *in-situ* con la serie de temperatura simulada del modelo.

Valores de $PE < 0$ indican que la temperatura media del modelo es menor que la temperatura medida en la estación mientras que si $PE > 0$, la temperatura medida en la estación es menor que la temperatura media del modelo. Por lo tanto, esta estadística nos puede aportar información acerca de si las simulaciones están subestimando o sobreestimando la temperatura media de la zona de estudio.

Con el propósito de conseguir unos resultados más fiables, en este trabajo se empleó un enfoque multimodelo, en el cual se promediaron los datos de temperatura de las diferentes simulaciones de CORDEX. El objetivo es trabajar con una única serie de datos de proyecciones para cada ciudad. Estudios previos (e.g: Jacob et al., 2014) demostraron que el uso de un multimodelo de simulaciones minimiza los sesgos e incertezas de las simulaciones individuales.

Además, se calculará la desviación estándar para cada modelo empleando la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Donde:

- x_i es la observación número i (cada instante de tiempo) de la variable x (temperatura media).
- \bar{x} es la media de la variable x .
- N es el número de observaciones.

2.2.2- Porcentaje de variación futura de la temperatura media

Con el objetivo de conocer mejor la influencia del cambio climático sobre la temperatura media se calculó el porcentaje de variación en cada ciudad entre el periodo histórico y el futuro. Este cálculo se hizo siguiendo la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{T_F - T_H}{T_H} * 100$$

Donde: T_F es el promedio de la temperatura anual o estacional para el período futuro (2020-2099) y T_H es el promedio de la temperatura anual o estacional de todo el período histórico (1980-2005).

3.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1- Validación de datos

3.1.1- Test de solapamiento o de Perkins

La tabla 3.1 muestra los valores de solapamiento entre las series de temperatura media superficial de los modelos de CORDEX y las series de datos *in-situ* de las estaciones de AEMET durante el período 1980-2005. En general se pueden observar que el promedio del porcentaje de solapamiento de todas las estaciones varía entre 72.98 ± 7.96 % para el modelo 1 y 81.2 ± 8.70 % para el modelo 7 (tabla 3.1). Estos elevados valores de porcentaje de solapamiento indican la capacidad de los modelos para reproducir la temperatura *in situ* para el periodo histórico. Además, debido a la pequeña diferencia en el porcentaje de solapamiento entre el peor y el mejor modelo no se despreció ninguno de los 7 RCMs.

Cuando se analiza el porcentaje de solapamiento de cada estación promediado a todos los modelos observamos que éste varía entre 85.03 ± 3.28 % en Vigo y 65.73 ± 4.81 % en Pontevedra.

Tabla 3.1: Porcentaje de solapamiento entre las series de temperatura media superficial de los modelos de CORDEX y las series de datos *in-situ* de las estaciones de AEMET durante el período 1980-2005.

ESTACIONES	MODELOS							Promedio modelos (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
Vigo	82.37	85.58	82.69	86.54	81.41	85.58	91.03	85.03 ± 3.28
Pontevedra	61.32	61.23	60.91	65.02	68.72	70.37	72.43	65.73 ± 4.81
Santiago	76.28	74.36	80.45	81.73	77.56	78.21	87.18	79.40 ± 4.22
A Coruña	76.60	82.37	76.28	84.62	78.21	84.94	84.62	81.09 ± 3.94
Lugo	76.05	73.53	73.95	76.47	82.77	81.09	83.19	78.15 ± 4.12
Ourense	65.26	65.58	68.83	68.18	77.27	74.03	68.83	69.71 ± 4.41
Promedio estaciones (%)	72.98 ± 7.96	73.78 ± 9.36	73.85 ± 8	77.09 ± 8.87	77.67 ± 4.91	79.04 ± 4.91	81.21 ± 8.70	76.52 ± 7.31

En la figura 3.1 se observa la distribución de probabilidades para cada estación de AEMET seleccionada y para la serie del punto correspondiente del multimodelo de CORDEX. En general, visualmente se observa una distribución similar en todas las ciudades, aunque en algunos casos, como en las ciudades de Pontevedra u Ourense, se puede observar que el multimodelo tiende a infravalorar la temperatura media ya que en los rangos con probabilidades más altas en el caso del multimodelo se dan valores más bajos que en la serie de datos de AEMET.

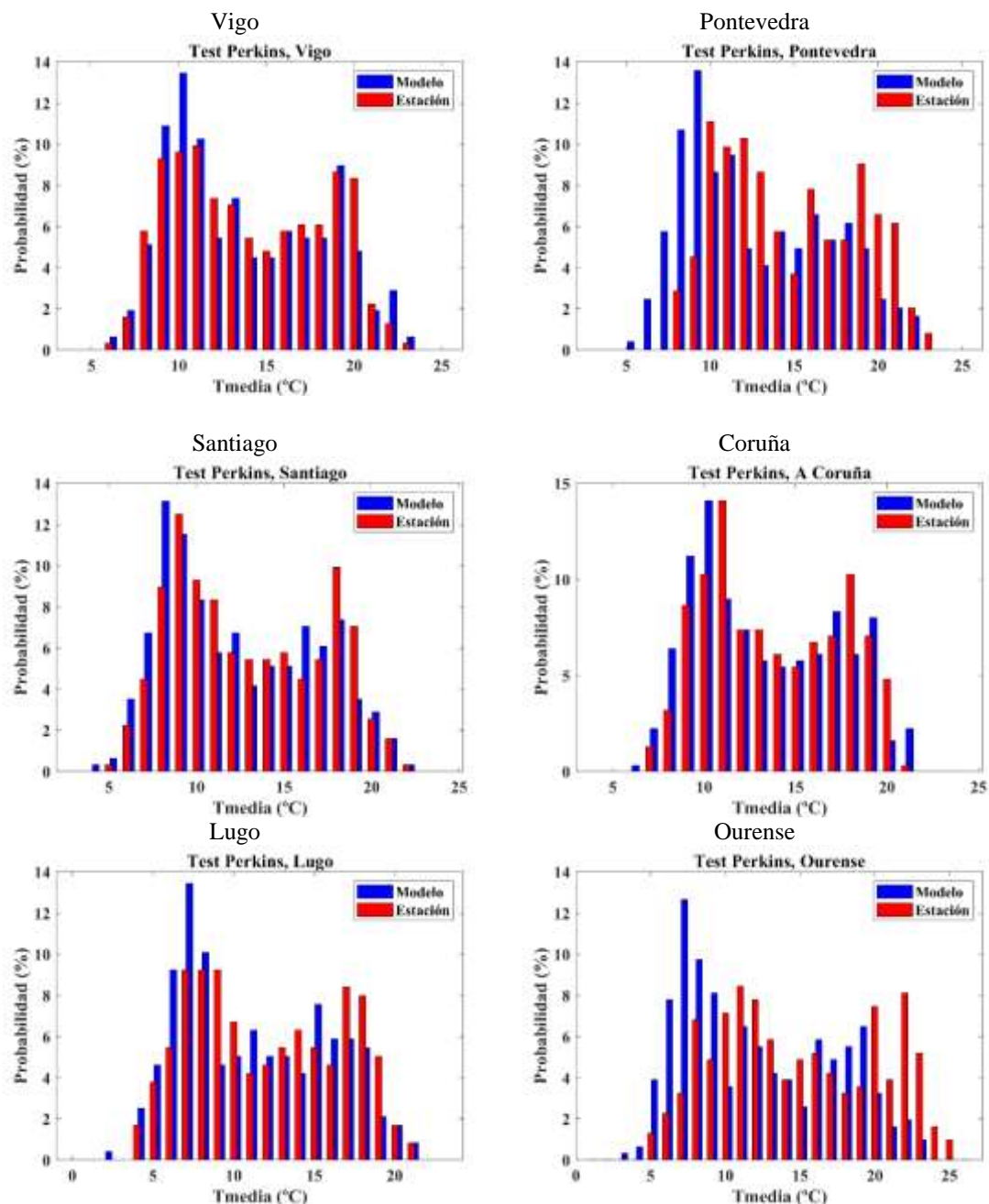


Figura 3.1: Distribución de probabilidades de las series de temperatura media simuladas del multimodelo (barras azules) y las series de cada estación de AEMET (barras rojas) para las siete ciudades seleccionadas.

Los valores de solapamiento que se obtuvieron en este estudio son similares a los que mostraron otros estudios que también compararon las salidas de RCMs de CORDEX con valores *in-situ*. Aunque no existen estudios previos que hayan utilizado esta métrica para la validación de la variable temperatura media de simulaciones del proyecto CORDEX sí que existen estudios que han utilizado el test de solapamiento con otras variables atmosféricas. Un ejemplo es el estudio de Santos et al., (2018), en el cual se analizaron los vientos simulados por CORDEX sobre la Península Ibérica. Dentro de este análisis, se calcularon porcentajes de solapamiento entre 9 RCMS de CORDEX y series de viento medidas *in-situ* sobre tierra en Galicia. Los valores que obtuvieron estos autores son similares (~78%) al valor medio de solapamiento de este trabajo (76.5%). Por lo tanto,

los RCMs que se utilizaron en este estudio representan la realidad en un grado similar a los utilizados en estudios previos en Galicia (Santos et al., 2018).

3.1.2- Porcentaje de diferencia de los valores medios

El porcentaje de diferencia de los valores medios (PE) presenta valores negativos en todas las estaciones y para todos los modelos (tabla 3.2). Los valores se calcularon como la diferencia del valor medio de temperatura de cada modelo menos el valor medio medido *in-situ* en las estaciones, esto significa que, en la práctica, las simulaciones del proyecto CORDEX tienden a subestimar los valores de temperatura media. Como ocurría con el porcentaje de solapamiento, los peores valores se obtuvieron para las ciudades de Pontevedra y Ourense, donde la infravaloración es algo mayor. El modelo número 5 es el que tiene el menor valor de PE, por lo que es el modelo que menos subestima la temperatura real, mientras que, por el contrario, los modelos 1 y 3 presentan los valores más altos.

Tabla 3.2: Porcentaje de diferencia (PE en %) entre el valor medio de las series de temperatura media superficial de los modelos de CORDEX y las series de datos *in-situ* de las estaciones de AEMET durante el período 1980-2005.

		MODELOS							
ESTACIONES	1	2	3	4	5	6	7	Promedio modelos	
Vigo	-12.03	-9.55	-12.23	-6.06	1.27	1.76	-2.70	-5.65	
Pontevedra	-27.87	-25.93	-28.60	-19.67	-11.83	-11.42	-16.51	-20.26	
Santiago	-16.23	-16.90	-14.96	-11.10	-0.96	-3.12	-5.28	-9.79	
A Coruña	-13.72	-10.77	-12.92	-8.24	-0.93	0.16	-4.52	-7.28	
Lugo	-20.87	-22.56	-23.46	-15.64	-4.27	-6.60	-8.43	-14.55	
Ourense	-29.68	-31.62	-29.68	-23.51	-16.24	-17.12	-21.14	-24.58	
Promedio estaciones	-20.07	-19.56	-20.31	-14.04	-5.50	-6.06	-9.76	-13.69	

Estos dos análisis estadísticos realizados muestran que los diversos modelos representan los datos reales históricos de manera fiable ya que ninguno de ellos muestra desviaciones significativas del valor promedio para cada estadístico. Por lo tanto, el multimodelo empleado se puede considerar como válido y las simulaciones futuras del proyecto CORDEX se pueden emplear para analizar cómo variará la temperatura media superficial del aire en las siete principales ciudades de Galicia a lo largo del siglo XXI.

En relación con la temperatura media, es importante señalar que estudios previos como el de Cardoso et al., (2019) ya detectaron un ligero sesgo de las simulaciones de EURO-CORDEX al infravalorar los valores de temperatura media en un estudio que llevaron a cabo en Portugal. Comparando el porcentaje de error con otros estudios que analizaron porcentajes de error en otras variables de simulaciones de CORDEX (e.g: Santos et al., 2018) se puede ver que los valores son de un orden similar. Por lo tanto, podemos concluir que los RCMs de este trabajo representan la realidad de forma aceptable ya que los valores las tablas 3.1 y 3.2 son similares que los que muestran estudios previos como el desarrollado por Santos et al., (2018).

Al analizar de forma específica cada una de las 6 localizaciones consideradas en el proceso de validación de las simulaciones se ve que Ourense y Pontevedra son las ciudades que presentan los porcentajes más desviados con respecto al resto de ciudades, tanto en el test de solapamiento como en el porcentaje de error. En este punto es importante mencionar en relación a la localización de las estaciones meteorológicas de AEMET que las de Ourense y Pontevedra son las dos únicas que se encuentran claramente en el interior de las ciudades puesto que en las 4 ciudades restantes se encuentran próximas a aeropuertos. Por lo tanto, las mayores diferencias en % de solapamiento y PE en Pontevedra y Ourense pueden guardar relación con el efecto de isla de calor que se produce en el interior de las urbes. El efecto isla de calor supone que se incremente la temperatura en el interior de las ciudades debido al calor retenido por el asfalto y los grandes edificios. Ya que la resolución espacial del fenómeno de isla de calor es demasiado baja, los modelos no logran reproducirlo con exactitud, por lo que las temperaturas registradas en estas ciudades son superiores a las simuladas por los modelos.

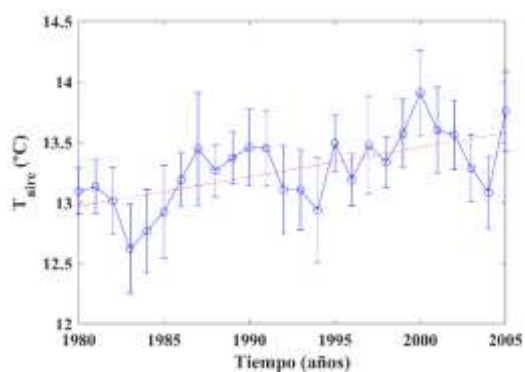
Así, es posible explicar los altos valores negativos de PE que se obtuvieron en estas dos ciudades, lo que denota que las simulaciones tienden a infravalorar los valores de temperatura media. Otro factor que se debe tener en cuenta a la hora de discutir los resultados del proceso de validación es el método de elección de las series de temperatura media simuladas de cada ciudad empleado en este trabajo. Se ha utilizado el método de los vecinos más próximos porque es el que ofrece unas mayores garantías a la hora de seleccionar las series de las simulaciones. Sin embargo, es posible que en algunos casos pueda conducir a pequeños sesgos. Así, por ejemplo, la ciudad de Ourense se encuentra ubicada en el fondo de un valle, por lo que los puntos de malla seleccionados pueden estar localizados fuera de la ciudad, en algún punto de las montañas que rodean Ourense. Esto causa que la temperatura estimada por el modelo tienda a ser más baja que la medida en la estación.

3.2 Variaciones históricas de la temperatura media

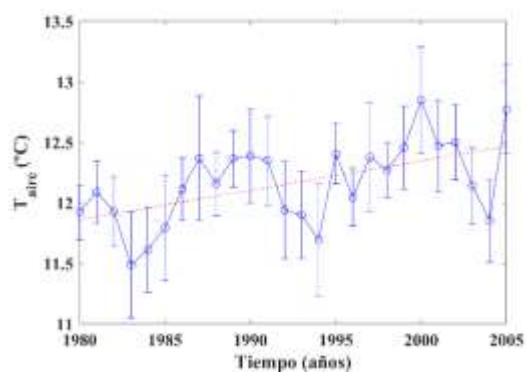
3.2.1- Tendencia histórica anuales

La figura 3.2 muestra la evolución interanual de la temperatura media superficial (línea azul) para las ciudades objeto de estudio durante el período histórico 1980-2005, así como su tendencia (línea roja). Se observa que, durante todo este período, la tendencia de las temperaturas medias superficiales ha sido creciente en las siete ciudades.

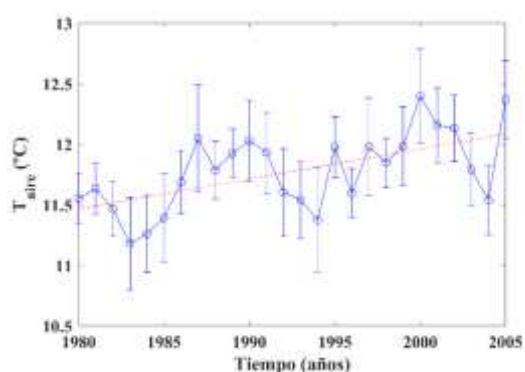
Vigo



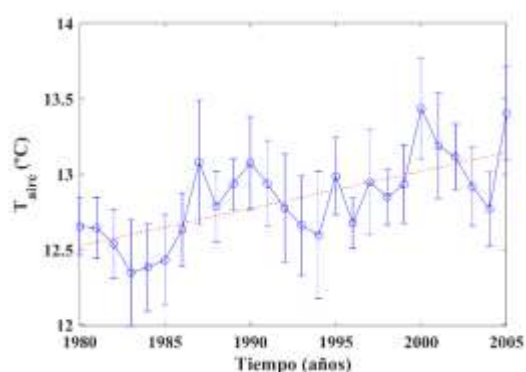
Pontevedra



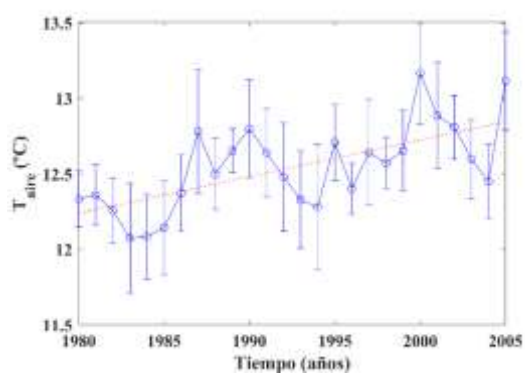
Santiago



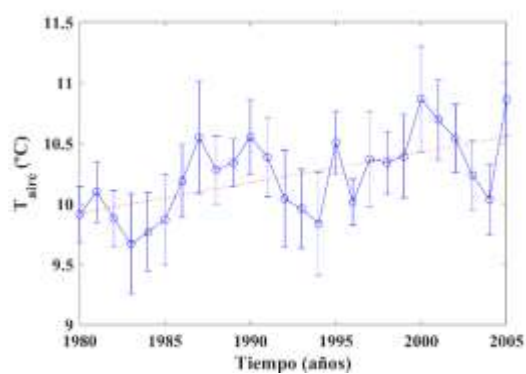
Coruña



Ferrol



Lugo



Ourense

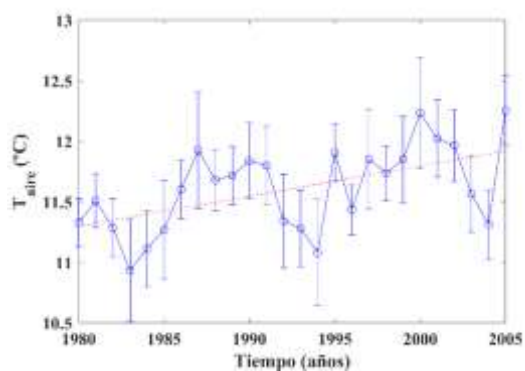


Figura 3.2 (a-g). Temperatura media anual (°C) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

La tabla 3.3 muestra que los valores de la tendencia histórica anual para todas las ciudades varían entre 0.24 y 0.25°C por década.

Tabla 3.3: Tendencia anual de la temperatura media superficial (°C/dec) para las siete ciudades de estudio durante el período histórico 1980-2005.

CIUDADES	TENDENCIA HISTÓRICA ANUAL (°C/dec)
Vigo	0.24 ± 0.08
Pontevedra	0.24 ± 0.08
Santiago	0.25 ± 0.05
A Coruña	0.25 ± 0.11
Ferrol	0.24 ± 0.10
Lugo	0.25 ± 0.08
Ourense	0.25 ± 0.07

Estos valores de tendencia indican que la temperatura media en las siete principales ciudades de Galicia se ha incrementado aproximadamente 0.6°C durante el período histórico (1980- 2005).

Estudios previos, como por ejemplo el desarrollado por Mestre et al., (2015) titulado *Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España*, también calcularon tendencias de temperatura media desde los años 80. Concretamente, en este estudio se analizó la variación durante el periodo 1981-2010 utilizando series de temperatura media provenientes de numerosas estaciones de AEMET distribuidas por toda España. La tendencia media obtenida para todas las estaciones fue de 0.26°C por década que está claramente en consonancia con los valores que se muestran en la tabla 3.3. Por lo tanto, se puede concluir que, en términos anuales, las variaciones históricas observadas en las ciudades gallegas utilizando el multimodelo de CORDEX son muy similares al patrón de variación medio que tuvo lugar en España.

3.2.2- Tendencia histórica estacional

Las siguientes figuras (figura 3.3 a figura 3.6) muestran la variación estacional de la temperatura media superficial durante el período histórico. La selección de las estaciones fue la siguiente: el invierno comprende los meses de diciembre, enero y febrero; la primavera los meses de marzo, abril y mayo; el verano comprende desde junio hasta agosto y finalmente, el otoño abarca septiembre, octubre y noviembre.

Se puede observar una tendencia creciente de la temperatura media superficial durante las cuatro estaciones en todas las ciudades.

- Invierno

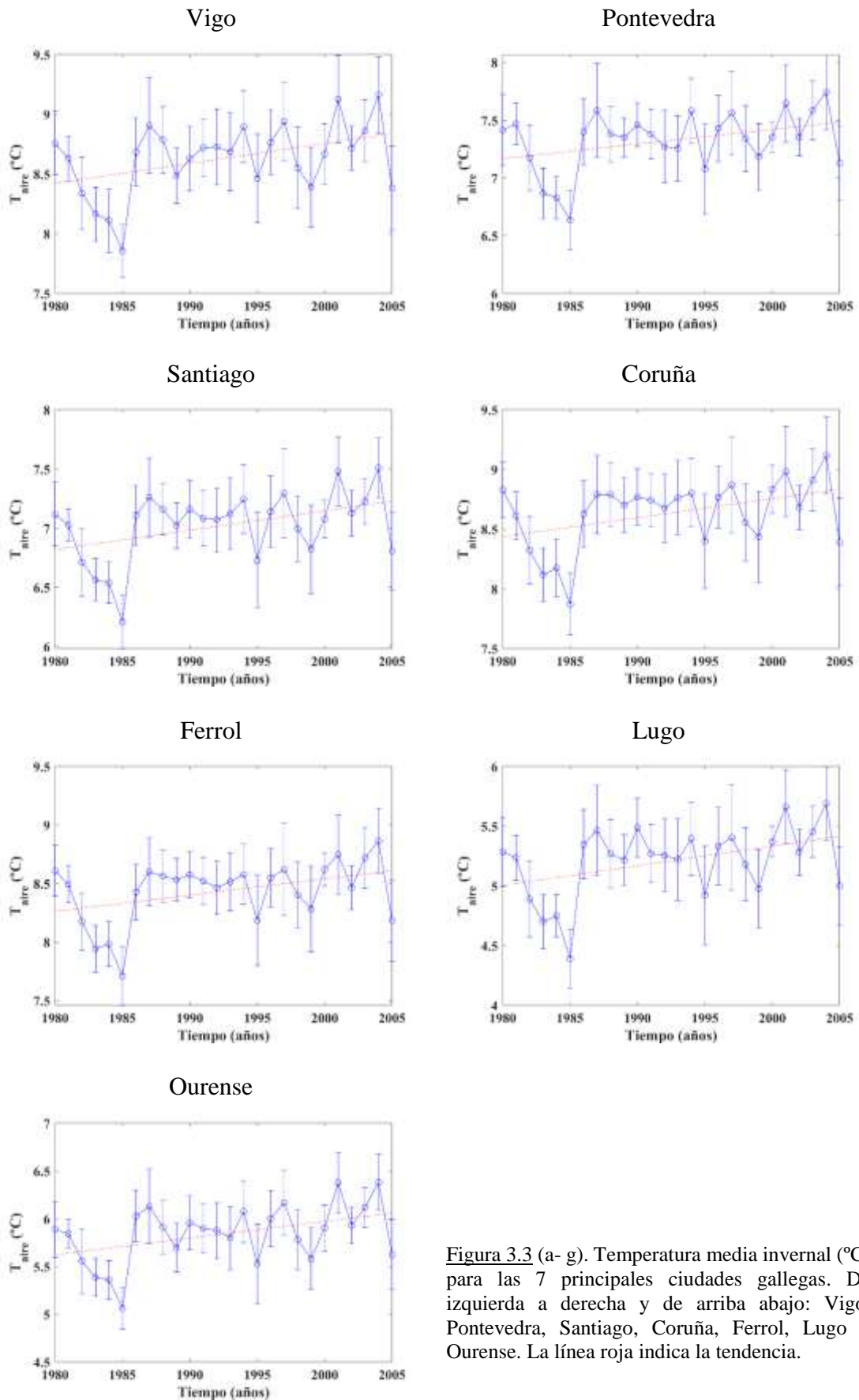


Figura 3.3 (a- g). Temperatura media invernal (°C) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Primavera

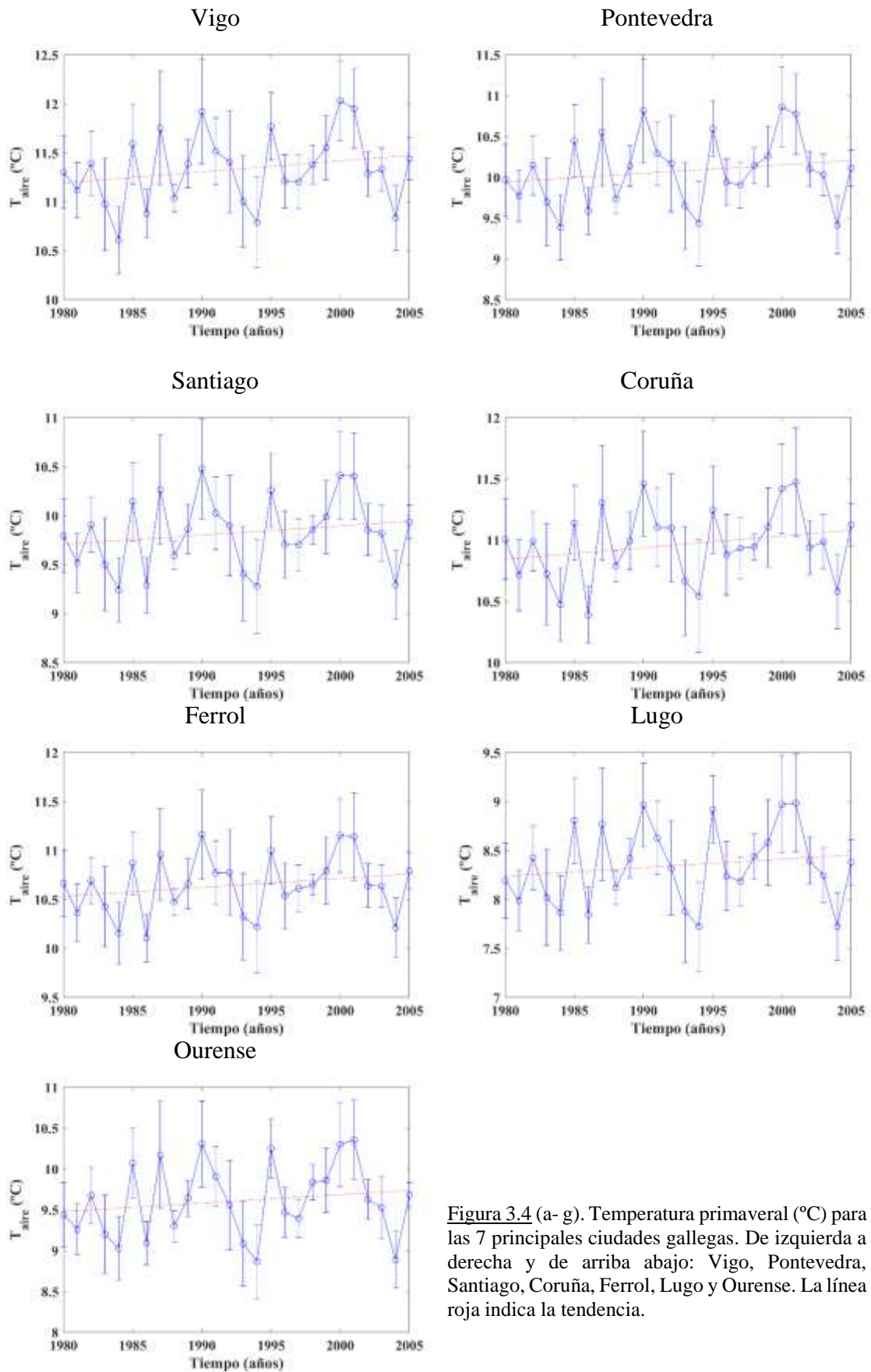


Figura 3.4 (a- g). Temperatura primaveral ($^{\circ}\text{C}$) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Verano

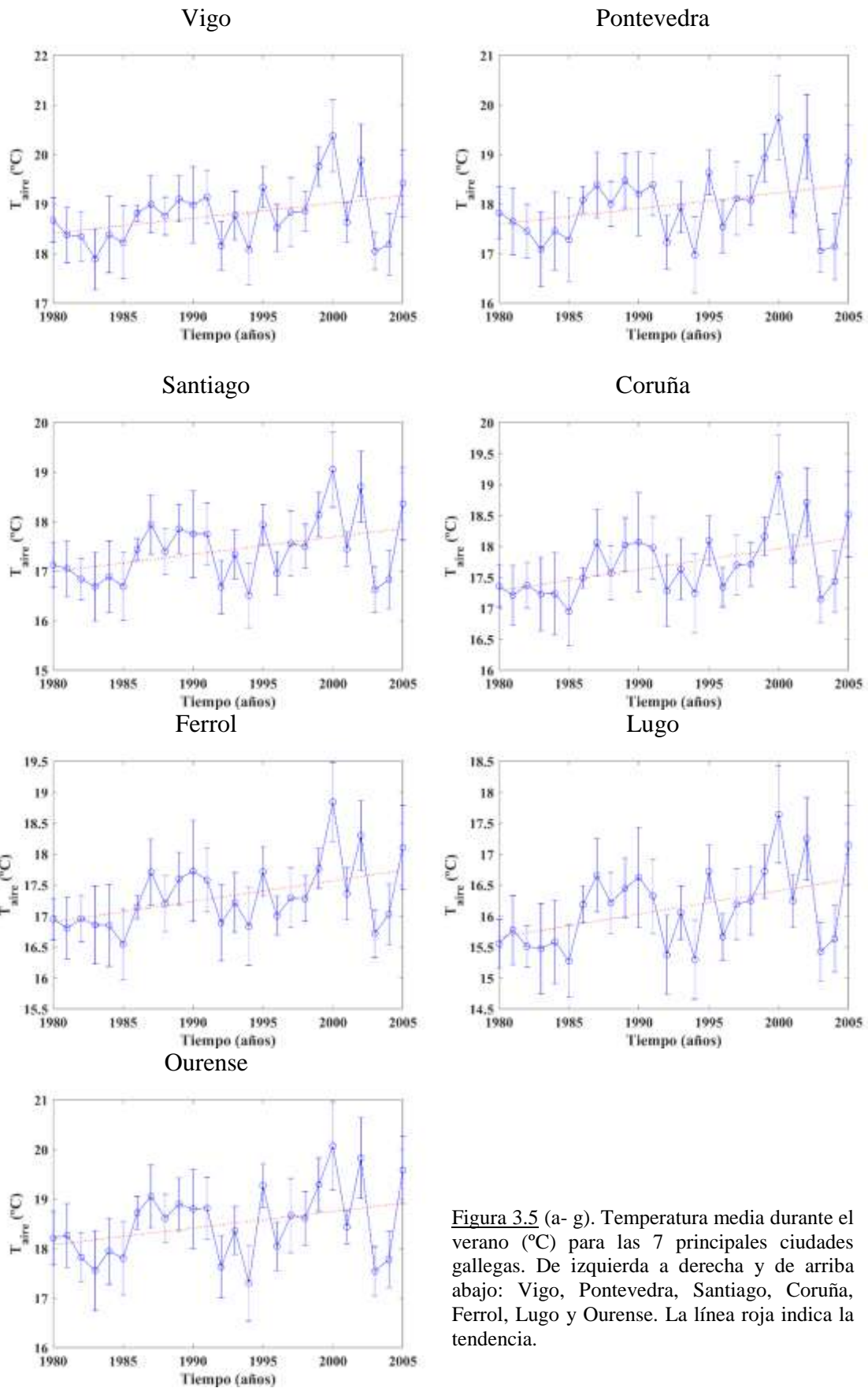


Figura 3.5 (a- g). Temperatura media durante el verano ($^{\circ}\text{C}$) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Otoño

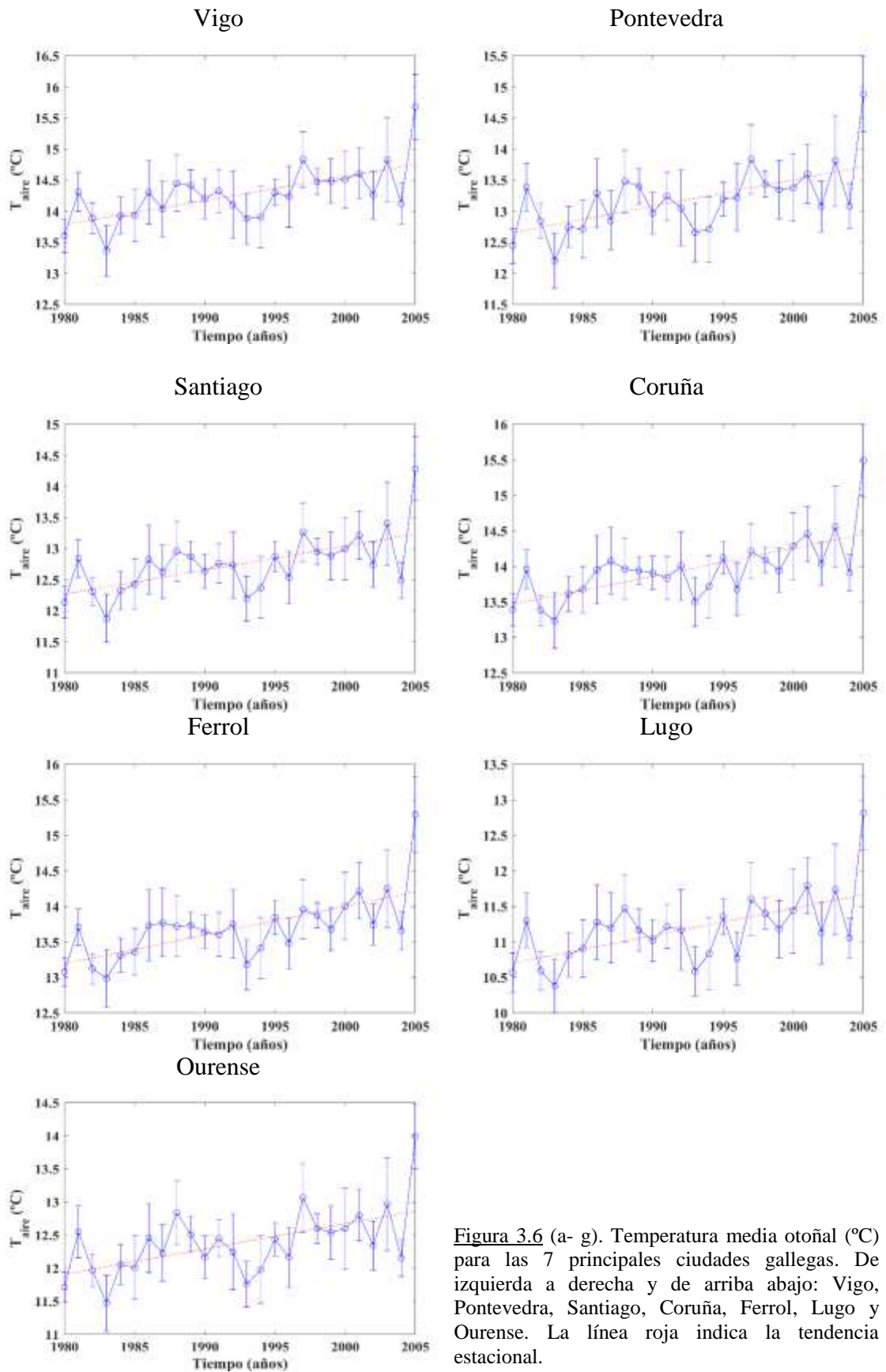


Figura 3.6 (a- g). Temperatura media otoñal (°C) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia estacional.

En la tabla 3.4 se recogen los valores de las tendencias estacionales para cada ciudad.

Tabla 3.4: Tendencia estacional (°C/dec) de la temperatura media superficial para las siete ciudades objeto de estudio durante el período histórico 1980-2005.

CIUDADES	TENDENCIA ESTACIONAL (°C/dec)			
	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO
Vigo	0.12 +/- 0.28	0.11 +/- 0.17	0.30 +/- 0.23	0.39 +/- 0.28
Pontevedra	0.13 +/- 0.32	0.15 +/- 0.22	0.32 +/- 0.32	0.42 +/- 0.31
Santiago	0.16 +/- 0.28	0.10 +/- 0.16	0.35 +/- 0.25	0.39 +/- 0.26
A Coruña	0.16 +/- 0.26	0.10 +/- 0.13	0.34 +/- 0.13	0.40 +/- 0.24
Ferrol	0.14 +/- 0.26	0.09 +/- 0.14	0.33 +/- 0.15	0.40 +/- 0.23
Lugo	0.16 +/- 0.29	0.09 +/- 0.16	0.38 +/- 0.20	0.39 +/- 0.24
Ourense	0.18 +/- 0.30	0.10 +/- 0.21	0.34 +/- 0.29	0.38 +/- 0.30

Se puede observar que, durante la primavera, se detectó la menor subida de temperatura de todas las estaciones, siendo esta de unos 0.10°C por década, mientras que en el resto de las estaciones el incremento de la tendencia fue más acusada, principalmente durante el otoño (aproximadamente 0.39°C por década). Durante el verano la tendencia también muestra valores por encima de 0.3°C en todas las ciudades. Finalmente, el invierno muestra valores positivos, pero más bajos, por debajo de 0.2°C en todas las ciudades.

Analizando más en detalle casos concretos de cada ciudad, se puede observar que Ourense ha sido la ciudad que ha sufrido el mayor aumento de la temperatura durante el invierno y el menor incremento durante el otoño. Pontevedra es la ciudad con el mayor incremento de temperatura durante la primavera. Por el contrario, en Ferrol y en Lugo se detectaron los menores incrementos de temperatura durante el período primaveral. Lugo detectó el mayor incremento durante el verano, mientras que A Coruña y Ferrol detectaron el mayor aumento de la temperatura media superficial en otoño. Finalmente, Vigo ha sido la ciudad que se ha visto menos afectada por este calentamiento durante los períodos invernales y estivales.

El estudio realizado por Mestre et al., (2015) también analiza tendencias históricas estacionales para el periodo 1981-2010 para todo el territorio español. Haciendo una comparativa con los resultados del presente estudio, se observa que, pese a la similitud entre las variaciones de temperatura anuales (sección 3.2.1), las variaciones estacionales de temperatura presentan algunas diferencias. La más importante es que en el presente trabajo se obtuvo la tendencia más alta durante el otoño en todas las ciudades gallegas, sin embargo, Mestre et al., (2015) detectaron el valor de tendencia de temperatura media para la España peninsular y Baleares más bajo durante esta estación, detectando incluso una tendencia negativa (-0.05 °C por década). Por el contrario, la tendencia más baja de temperatura media en Galicia se detectó durante el período primaveral (~0.1°C por década) mientras que para el territorio nacional el incremento fue claramente mayor (~0.5°C por década). Durante el verano el valor medio de tendencia del trabajo de Mestre et al., (2015) también fue algo mayor que el de las ciudades gallegas, siendo al revés durante el invierno, es decir, una media nacional más baja que los valores registrados en el presente trabajo.

3.3.- Proyecciones futuras de la temperatura media

3.3.1- Proyecciones futuras anuales

La figura 3.7 muestra la evolución interanual de la temperatura media superficial para las ciudades de estudio durante el período 2020-2099 bajo el escenario RCP8.5 del IPCC. Se espera que la tendencia de las temperaturas siga en aumento durante este período, además las simulaciones muestran que este incremento será mayor que durante el período histórico.

En la tabla 3.5 se recoge la tendencia futura de la temperatura media superficial proyectada, la cual se estima que aumentará más de 0.40°C en todas las ciudades. Este incremento será más acusado en Ourense, donde se espera que la temperatura aumente unos 0.52°C por década. La ciudad que menos sufrirá este incremento de la temperatura media superficial será Ferrol, aun así, se estima que la temperatura aumentará dos veces más rápido que durante el período histórico.

Estos valores de tendencia suponen que las temperaturas medias para finales del siglo XXI se puedan incrementar en más de 3.5°C en todas las ciudades, siendo ligeramente superior en las ciudades interiores (~4°C) que en las costeras (3.6°C). De esta forma en ciudades costeras como Vigo se pasaría de valores medios anuales de 14°C en la actualidad a aproximadamente 17°C (figura 3.7a), mientras que en ciudades interiores como Ourense se pasaría de valores actuales de alrededor de los 12,5°C a valores superiores a los 16°C (figura 3.7g).

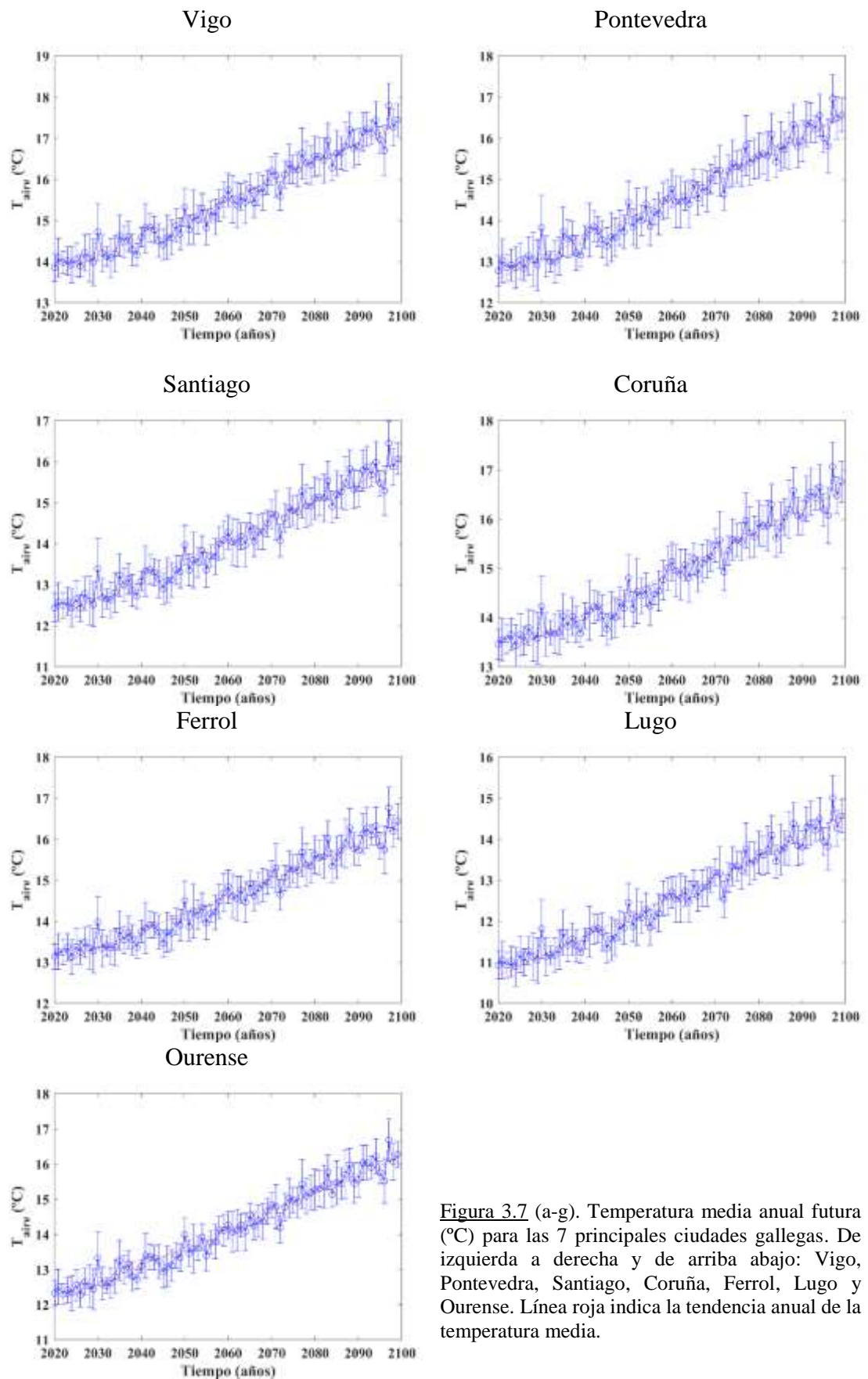


Figura 3.7 (a-g). Temperatura media anual futura (°C) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. Línea roja indica la tendencia anual de la temperatura media.

Tabla 3.5: Proyección anual (°C/dec) de la temperatura media superficial para las siete ciudades objeto de estudio durante el período futuro 2020-2099.

CIUDADES	PROYECCIÓN FUTURA ANUAL (°C/dec)
Vigo	0.46 ± 0.03
Pontevedra	0.49 ± 0.04
Santiago	0.47 ± 0.04
A Coruña	0.43 ± 0.05
Ferrol	0.42 ± 0.05
Lugo	0.47 ± 0.04
Ourense	0.52 ± 0.04

Los resultados obtenidos en la tabla 3.5 se pueden comparar con estudios previos que proyectaron la temperatura media a lo largo del S.XXI en toda la Península Ibérica. Un ejemplo es el estudio realizado por Carvalho et al., (2021), en el que se analizan las variaciones futuras de temperatura mínima, máxima y media sobre toda la Península Ibérica utilizando simulaciones del proyecto EURO-CORDEX. Los resultados arrojados por este TFG muestran un aumento de temperatura similar, aunque ligeramente superior, al calculado en el estudio de Carvalho et al., 2021, donde se estimó que el incremento térmico variará entre 3°C en la costa y 3.5°C en el interior del territorio gallego.

Para mostrar de una forma más visual el incremento que experimentará cada una de las principales ciudades gallegas a lo largo del siglo XXI con respecto al período histórico se muestra el mapa del incremento de la temperatura futura (ΔT) a escala anual (figura 3.8).

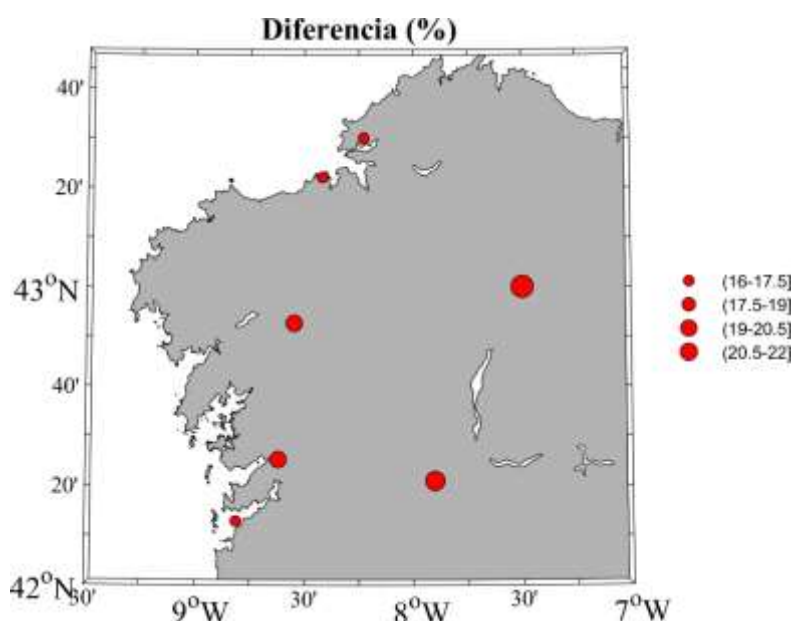


Figura 3.8: Incremento de la temperatura media anual (en %) en el futuro (2020-2099) respecto al período histórico (1980-2005).

El incremento anual futuro para las principales ciudades (figura 3.8) muestra que Lugo y Ourense serán las ciudades que van a sufrir un mayor aumento de la temperatura media anual con un incremento de entre el 20.5 y el 22% a lo largo del siglo XXI. Ese incremento

es algo inferior en Santiago y Pontevedra. Los valores de incremento más bajos, aunque superiores al 16%, se dan en Vigo, A Coruña y Ferrol.

3.3.2- Proyecciones futuras estacionales

Las siguientes figuras (figura 3.9 a figura 3.12) muestran la variación estacional de la temperatura media superficial durante el período futuro 2020-2099 para cada una de las siete ciudades. Se puede observar una tendencia creciente de la temperatura media superficial en todas las ciudades y estaciones, la cual es mayor que para el periodo histórico.

- Invierno

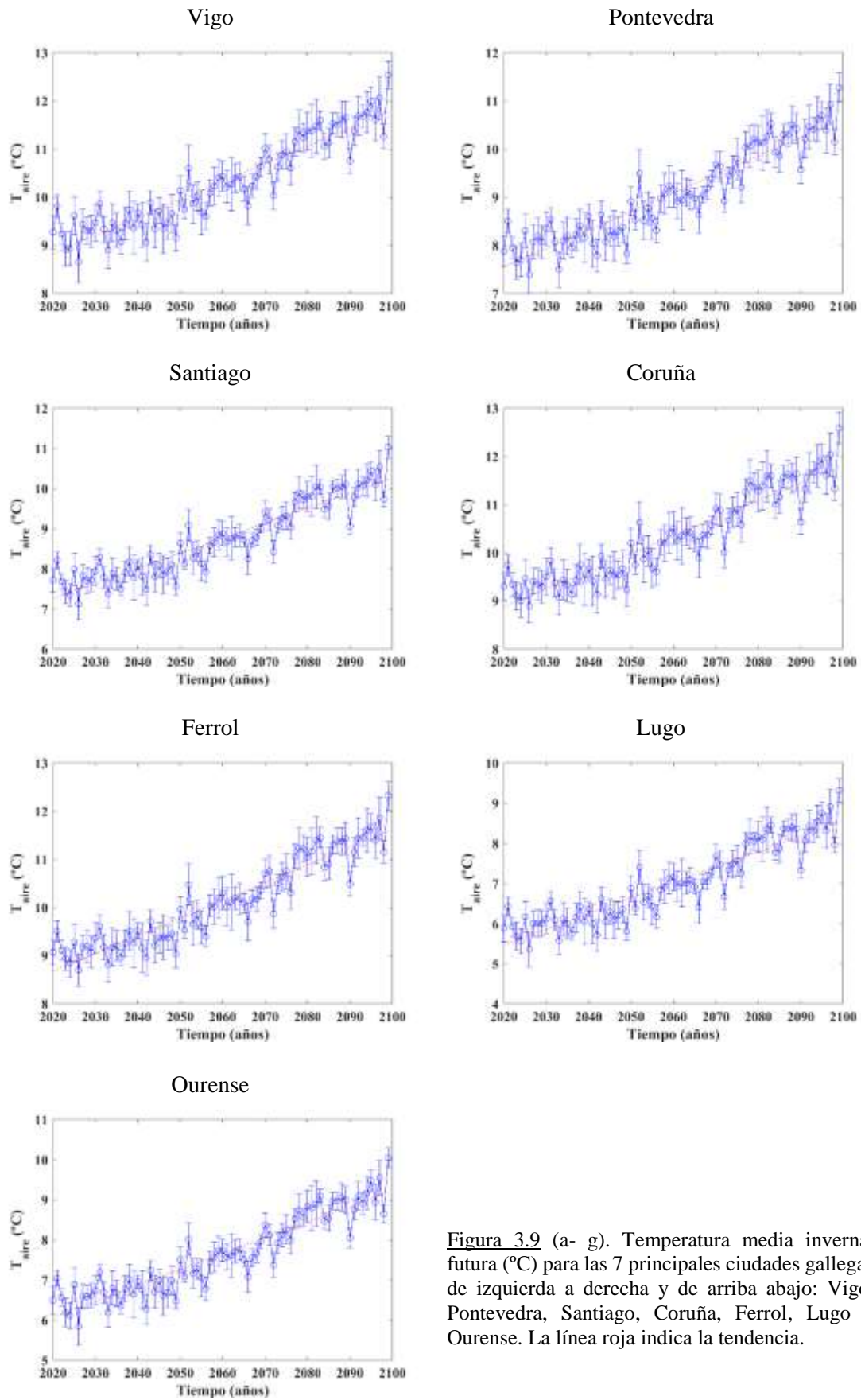


Figura 3.9 (a- g). Temperatura media invernal futura (°C) para las 7 principales ciudades gallegas de izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Primavera

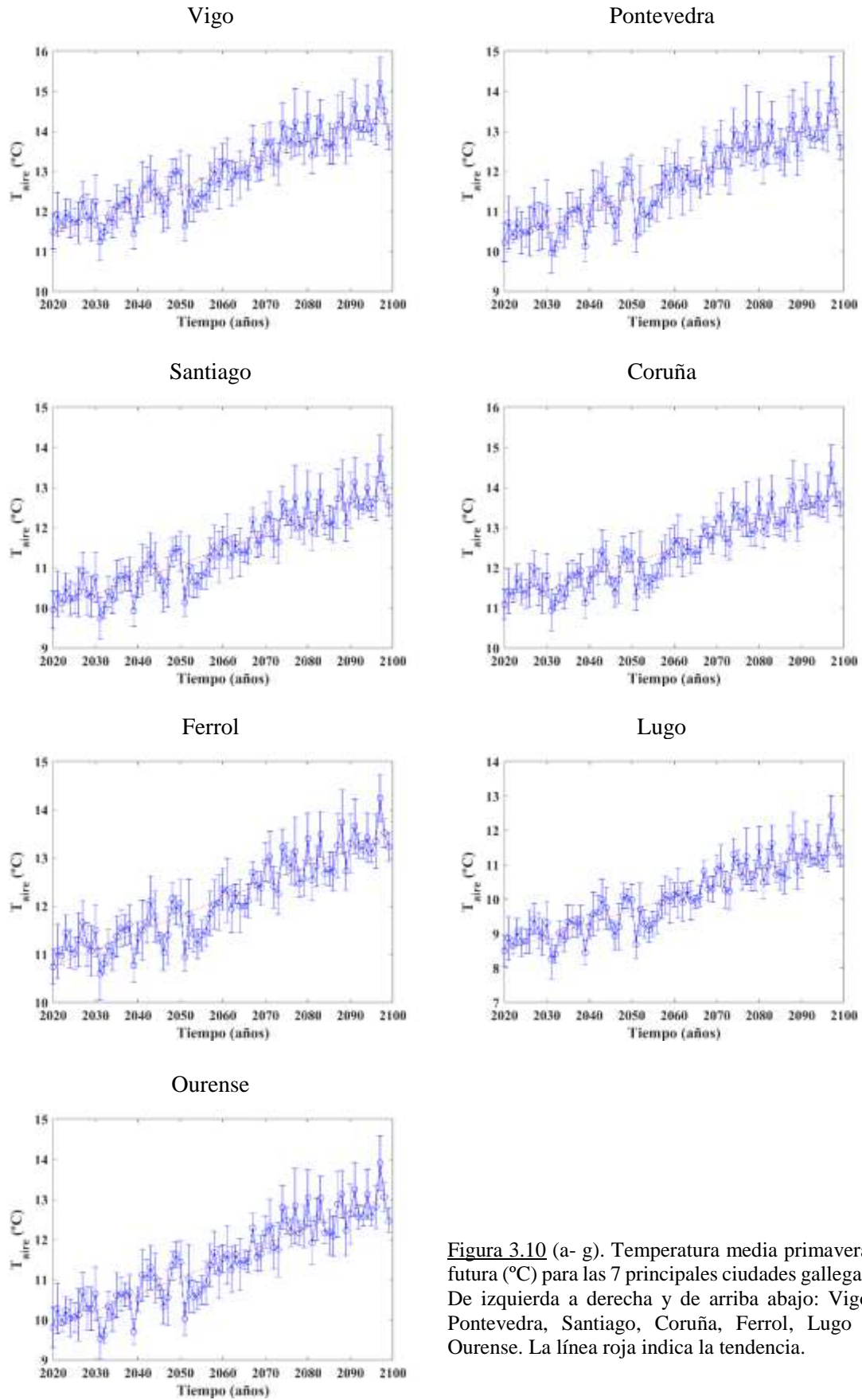


Figura 3.10 (a- g). Temperatura media primaveral futura ($^{\circ}\text{C}$) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Verano

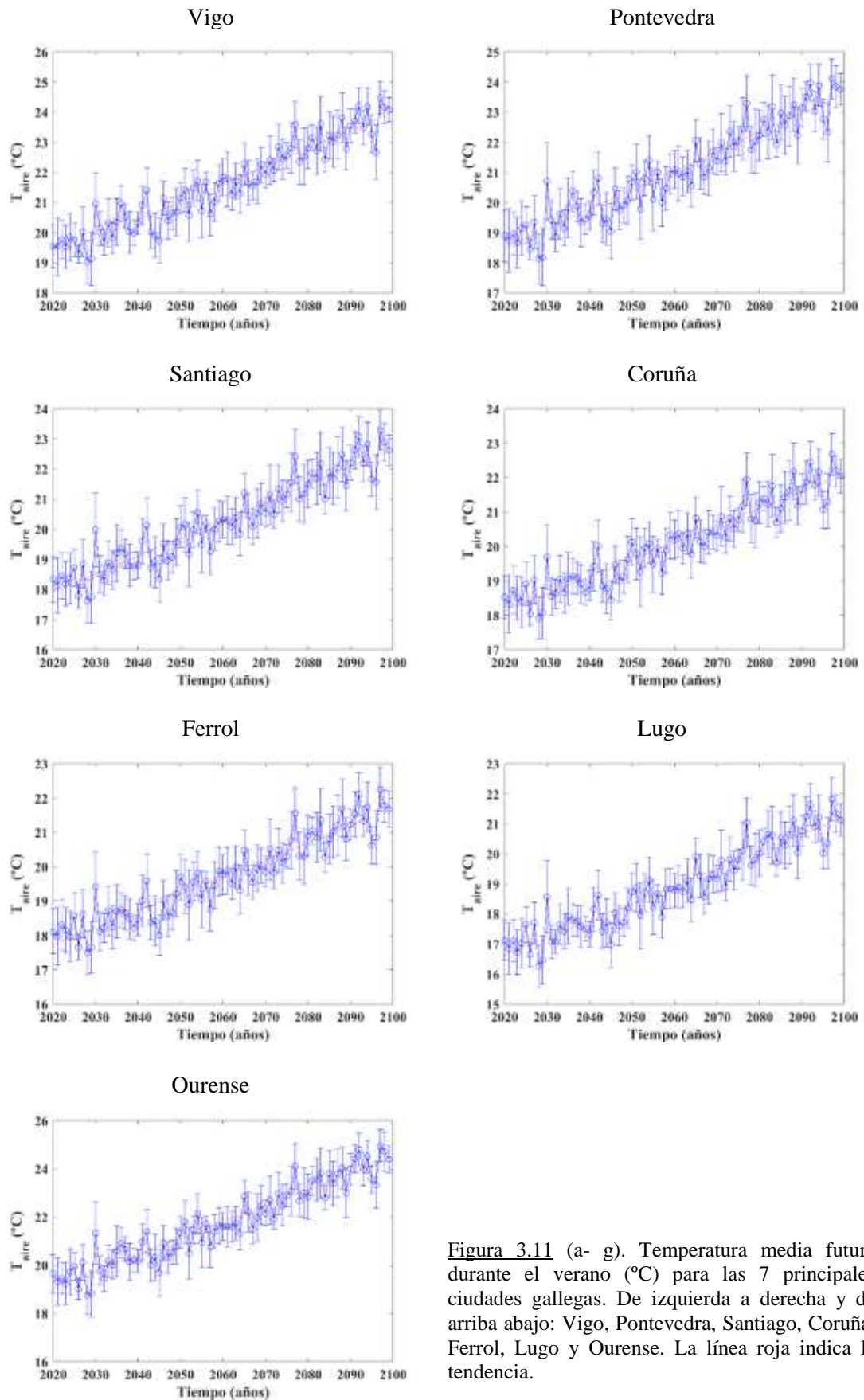


Figura 3.11 (a- g). Temperatura media futura durante el verano ($^{\circ}\text{C}$) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

- Otoño

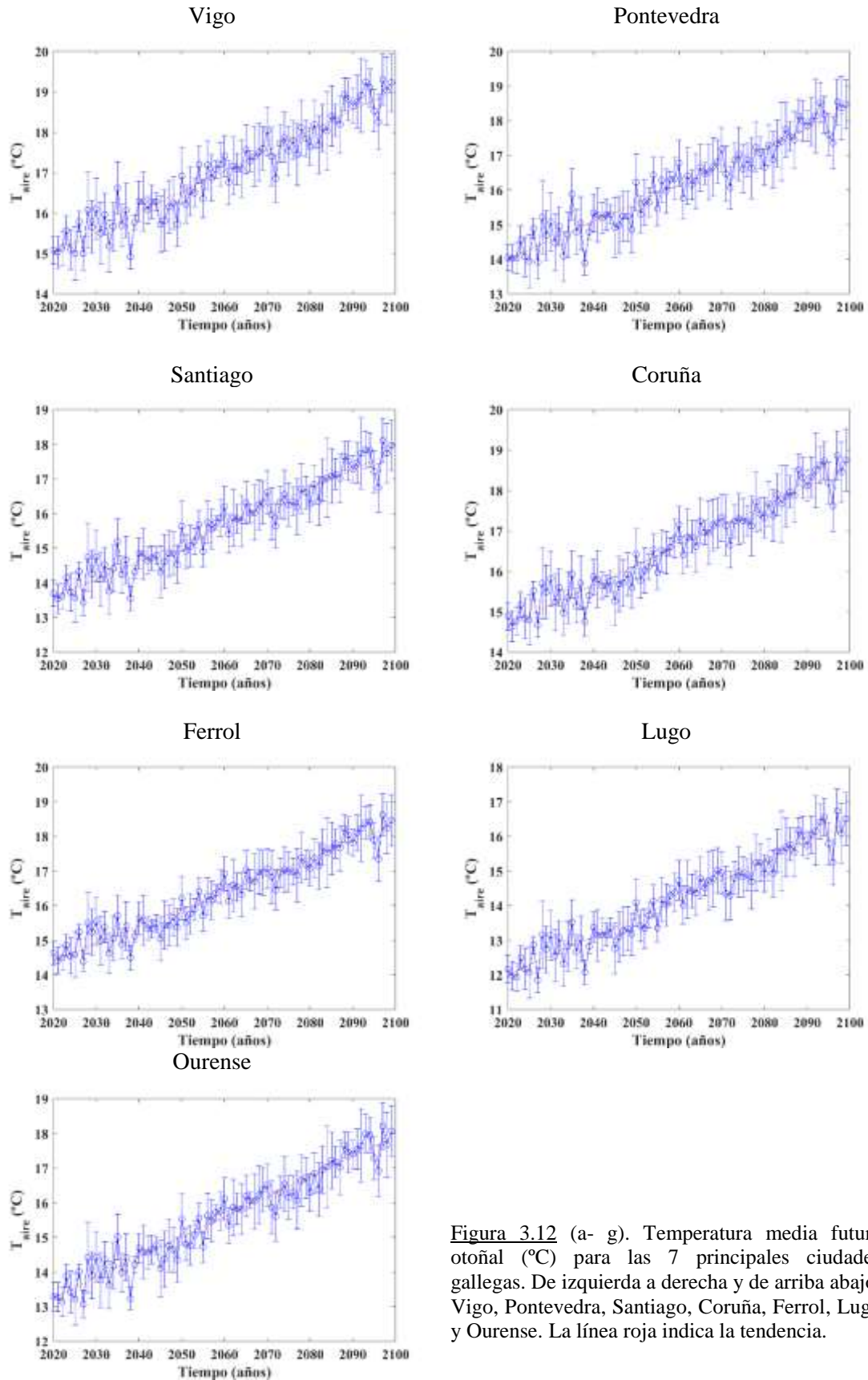


Figura 3.12 (a- g). Temperatura media futura otoñal ($^{\circ}\text{C}$) para las 7 principales ciudades gallegas. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Vigo, Pontevedra, Santiago, Coruña, Ferrol, Lugo y Ourense. La línea roja indica la tendencia.

La tabla 3.6 recoge el valor de la tendencia para cada ciudad y estación.

Tabla 3.6: proyección estacional (°C/dec) de la temperatura media superficial para las siete ciudades objeto de estudio durante el período futuro 2020-2099.

TENDENCIA ESTACIONAL (°C/dec)				
CIUDADES	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO
Vigo	0.37 ± 0.05	0.38 ± 0.05	0.59 ± 0.03	0.51 ± 0.08
Pontevedra	0.39 ± 0.06	0.40 ± 0.06	0.64 ± 0.04	0.54 ± 0.09
Santiago	0.38 ± 0.05	0.38 ± 0.06	0.60 ± 0.03	0.53 ± 0.10
A Coruña	0.37 ± 0.06	0.35 ± 0.06	0.50 ± 0.04	0.50 ± 0.09
Ferrol	0.37 ± 0.06	0.35 ± 0.06	0.49 ± 0.04	0.49 ± 0.10
Lugo	0.39 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.58 ± 0.02	0.55 ± 0.10
Ourense	0.39 ± 0.05	0.42 ± 0.06	0.67 ± 0.03	0.58 ± 0.10

Durante el invierno todas las ciudades muestran valores de tendencia similares (en torno a 0.38°C por década). Así, en Vigo, por ejemplo, se espera que la temperatura media superficial a finales de siglo aumente aproximadamente 2°C con respecto al valor de 2020, alcanzando los 12°C (figura 3.9a). Los valores de la tendencia durante la primavera son muy similares a los proyectados para el invierno. De esta forma, en ciudades como Lugo se pasaría de valores de temperatura primaveral media cercanos a 8.5°C durante 2020 a valores próximos a los 11.5°C. En ciudades como Santiago y Ourense también se espera que las temperaturas primaverales aumenten unos 3°C, pasando de 10°C al comienzo del período a unos 13°C al finalizarlo (figura 3.10). Es durante el verano cuando se proyectan los incrementos más importantes de temperatura media superficial (Tabla 3.6), con valores de tendencia superiores a los 0.5°C en todas las ciudades, excepto las ubicadas más al norte (Ferrol y A Coruña), que justamente alcanzarían valores de medio grado de incremento por década. Destacan los incrementos de ciudades como Pontevedra u Ourense con valores de en torno a 0.65°C. En esta última ciudad, se esperan valores de temperatura media superficial durante el verano para finales de siglo de 24°C, frente a los 20°C de la actualidad. Finalmente, los valores de tendencia otoñales son más bajos que los de la estación estival pero más altos que los de primavera y verano. Así, se espera que la temperatura en 2099 sea entre 3 y 4°C superior con respecto a 2020. El incremento de aproximadamente 4°C se dará en Vigo, Pontevedra, Lugo y Ourense mientras que la temperatura aumentará unos 3°C al final del período en Santiago, A Coruña y Ferrol. En A Coruña, por ejemplo, se estimaron valores de temperatura cercanos a 15°C durante 2020 y valores próximos a 18.3°C al final del siglo (figura 3.12d).

En el estudio realizado por Carvalho et al., (2021) también se analizan las variaciones futuras de temperatura media sobre la Península Ibérica a escala estacional. En este caso, los autores de este estudio calcularon valores promedio para toda la Península Ibérica. Carvalho et al., (2021) proyectan que el mayor incremento de temperatura tendrá lugar durante el verano hacia finales del S. XXI, situándose en unos 5°C comparado con el periodo histórico, seguido del otoño, cuando se espera que el incremento de temperatura ronde los 4°C. En invierno el incremento estimado será más bajo (3°C) y finalmente, durante la primavera, el aumento de temperatura es cercano a los 3.5°C. De manera resumida, el incremento máximo se produciría durante el verano y va disminuyendo hasta que finaliza el invierno. Algo similar se observa en este trabajo, ya que se espera que el verano sea la estación donde el incremento de temperatura sea mayor en todas las ciudades gallegas (~4.5°C), este incremento disminuye ligeramente durante el otoño,

alcanza su mínimo durante el invierno ($\sim 3^{\circ}\text{C}$), el cual se mantiene durante la primavera (tabla 3.6). Esta es una pequeña diferencia con el trabajo de Carvalho et al., (2021) ya que en ese estudio el incremento de temperatura es mayor durante la primavera. Por lo tanto, en términos generales, se puede afirmar que la variación estacional que se proyecta para finales de S.XXI de la temperatura media en las ciudades gallegas sigue un patrón muy similar al observado para toda la Península Ibérica.

Para mostrar de una forma más visual el incremento que experimentará cada una de las principales ciudades gallegas a lo largo del siglo XXI con respecto al período histórico se muestran los mapas del incremento de la temperatura futura (ΔT) a escala estacional (figura 3.13).

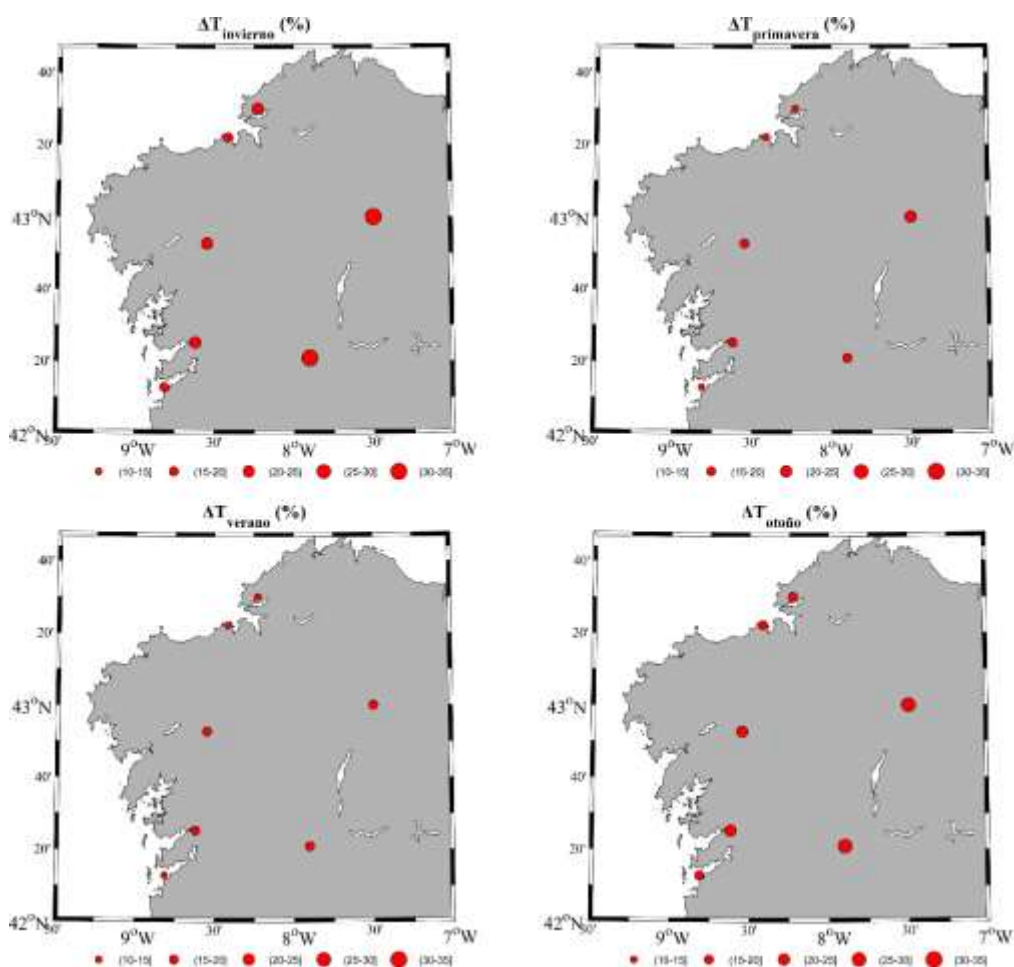


Figura 3.13: Incremento de la temperatura media estacional (en %) en el futuro (2020-2099) respecto al período histórico (1980-2005).

Se observa que los mayores incrementos de temperatura a lo largo del siglo XXI se dan durante el invierno y el otoño mientras que durante la primavera y el verano este incremento es menos acusado (figura 3.13). Esto podría indicar que en un futuro el contraste térmico entre el invierno y el verano será menor que el actual, es decir, la temperatura media del aire en superficie será cada vez más similar entre ambas estaciones. De hecho, los mayores incrementos se dan durante el invierno y los menores durante el verano.

Analizando más en detalle cada una de las estaciones, se puede ver que el mayor aumento porcentual de la temperatura media durante el invierno se da en Lugo y Ourense. Estas ciudades sufrirán un incremento de entre 30-35% a lo largo del siglo XXI, siendo este el mayor incremento registrado en una estación. Santiago y Pontevedra experimentarán un incremento de entorno al 15-20% mientras que en el resto de ciudades el aumento de la temperatura media durante el invierno se sitúa sobre el 10-15%. Se espera que, durante la primavera, Lugo sea la ciudad donde el aumento de temperatura sea mayor (20-25%) mientras que Ourense, Santiago y Pontevedra sufrirán un incremento de entre 15-20% a lo largo del siglo XXI en esta estación, siendo ligeramente menor para el resto de ciudades. Durante el verano, se espera que la temperatura aumente un 15-20% en Ourense, Lugo, Santiago y Pontevedra mientras que en el resto de ciudades este incremento se sitúa entre 10 y 15%. En otoño se da una situación similar a la de verano, con Ourense, Lugo, Santiago y Pontevedra mostrando un incremento de la temperatura media superficial del aire de 20-25% mientras que en el resto de ciudades este aumento de temperatura varía entre 15-20%.

3.4.- Mitigación y adaptación

La figura 3.13 muestra que el mayor porcentaje de aumento de la temperatura ocurre durante el invierno, seguido del otoño, mientras que el menor incremento en porcentaje se da en el periodo estival y en el primaveral. Esto parece indicar que se tenderán hacia unas temperaturas más homogéneas a lo largo del año, lo que denota cambios en las estaciones. Pese a que se espera que el verano sea la estación en la que el incremento en porcentaje de la temperatura sea menor, en esta estación las temperaturas ya son normalmente altas, sobre todo en las ciudades interiores, como por ejemplo Ourense, por lo que será necesario adoptar medidas encaminadas a adaptar las ciudades con el objetivo de paliar los efectos del aumento de temperatura. Entre las diversas medidas que se pueden tomar destacan, por su sencillez, la ampliación de las zonas verdes y parques existentes en las ciudades y la arborización urbana. La plantación de árboles en las ciudades presenta dos beneficios principales: por un lado reduce el efecto de isla de calor tan característico de las ciudades gracias a la evapotranspiración de las plantas, a la sombra generada por estos y a la captura y almacenamiento de CO_2 durante la fotosíntesis, principalmente durante la etapa de crecimiento y desarrollo del árbol, por lo que es importante establecer planes de renovación de las especies arbóreas cada cierto tiempo. Por otro lado, los árboles reducen el consumo de energía de los equipos de aire acondicionado de los edificios al protegerlos de la radiación solar durante el verano (Vargas-Gómez y Molina-Prieto 2013). Además, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente del Gobierno de España propone, en su Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, diferentes medidas potenciales de adaptación en función de los impactos esperados recogidas en la *Guía para la elaboración de planes locales de adaptación al Cambio Climático* (Feliu, et al., 2015). Este trabajo trata de ser un punto de apoyo en todo el proceso de creación de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático. En este estudio se presenta el ejemplo de Vitoria-Gasteiz, donde se proponen normas de adecuación en función del ámbito afectado, destacando la creación de un Plan Municipal de Emergencia ante situaciones de sequía para proteger los recursos

hídricos y un plan para exterminar las especies exóticas invasoras con el objetivo de conservar el medio natural. Atendiendo a los resultados mostrados en el presente trabajo, este tipo de problemáticas serán más frecuentes en el futuro en las ciudades gallegas. Además, Feliu et al., 2015 también proponen políticas de acción social, como la creación de campañas informativas y de actuación en casos de olas de calor o la educación ambiental, así como medidas que incentiven y consoliden la cooperación multidisciplinar y la interacción entre los organismos públicos y la empresa privada.

4- CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la variación de la temperatura media del aire en superficie en las siete principales ciudades de Galicia: Vigo, Pontevedra, Santiago, Ferrol, A Coruña, Lugo y Ourense. Este análisis consideró un período histórico (1980-2005) y un período futuro (2020-2099), que se analizaron a través de siete simulaciones de la rama europea del proyecto global CORDEX bajo el escenario RCP 8.5. Las series de temperatura media simuladas se compararon con medidas reales de estaciones meteorológicas dependientes de AEMET. Esta comparación se realizó empleando dos métricas diferentes (un test de solapamiento y el porcentaje de error de los valores medios) y se observó que las siete simulaciones representan de manera fiable la realidad. Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Se observa un incremento de la temperatura media del aire en superficie durante el período histórico en todas las ciudades ($\sim 0.25^{\circ}\text{C}$ por década). A lo largo del S.XXI este incremento será más acusado (valores entre $0.4\text{-}0.5^{\circ}\text{C}$ por década dependiendo de la ciudad), lo que supone un incremento total de entre $3.2\text{-}4^{\circ}\text{C}$ en la temperatura media para el año 2099 respecto al presente. Al comparar el período histórico con el futuro se observa que los mayores incrementos, en porcentaje, de la temperatura media se dan en Lugo y en Ourense. Por lo tanto, se puede concluir que las ciudades del interior sufrirán un incremento ligeramente mayor que las ciudades con mayor influencia oceánica.
- El mayor incremento futuro de temperatura se proyecta durante el verano, rondando los 0.6°C por década, seguido del otoño, estación en la que el aumento es de aproximadamente 0.5°C por década. Los menores incrementos ocurren durante el invierno y la primavera, siendo en ambos casos de unos 0.4°C por década. En valor absoluto, los incrementos futuros más importantes siempre ocurren en Ourense y Pontevedra, tanto a escala anual como estacional. Al analizar las variaciones en porcentaje entre el periodo histórico y futuro, los valores más altos se registran en invierno y los más bajos en verano. Este hecho, indica un menor contraste estacional entre invierno y verano, lo que denota cambios futuros en las estaciones.

Se puede concluir que se espera un claro aumento de la temperatura durante el período futuro, el cual se predice que será mucho más acusado que el incremento pasado, principalmente en las ciudades interiores como Lugo u Ourense, por lo que será prioritario adoptar medidas de mitigación. La variación en las ciudades costeras será menos acusada debido al efecto termorregulador del océano.

5- BIBLIOGRAFÍA

Alley, R.B., Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Stouffer, R.J., Whetton, P., Wood, R.A., Wratt, D., 2018. *Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles*. Disponible en <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>

Amestoy Alonso, José, 1999. *CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LAS AGUAS OCEÁNICAS: Introducción a la Oceanografía Física*.

Cardoso, R. M., Soares, P. M., Lima, D. C., & Miranda, P. M., 2019. *Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal*. *Climate Dynamics*, 52(1), 129-157.

Carvalho, D., Pereira, S. C., & Rocha, A. (2021). *Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EURO-CORDEX climate projections*. *Climate Dynamics*, 56(1), 123-138.

CORDEX, 2015. *CORDEX domains for model integrations* (updated 23/10/15). Available at: https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/CORDEX-domain-description_231015.pdf.

Cortizas, A. M., & Alberti, A. P., 1999. *Atlas climático de Galicia* (p. 207). Xunta de Galicia. Disponible en: http://climantica.org/descargas/resource/atlas_climatico_galicia.pdf

Feliu, E., García, G., Gutiérrez, L., Abajo, B., Mendizabal, M., Tapia, C., & Alonso, A., 2015. *Guía para la elaboración de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático*. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: Madrid. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia_local_para_adaptacion_cambio_climatico_e_n_municipios_espanoles_tcm30-178446.pdf

Gutiérrez Girán, A., 2013. *Cambio global y sus efectos sobre la biosfera*. Disponible en <http://www.madrimasd.org/blogs/biodiversidad/2013/03/cambio-global-y-sus-efectos-sobre-la-biosfera/>

IPCC, 2020. *Resumen del IPCC, El Cambio climático y la Tierra, para responsables de políticas*. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... & Yiou, P., 2014. *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.

- Linés Escardó, A., 1998. *Contribución al concepto de clima*. Disponible en http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/territoris/index/assoc/Territor/is_1998v/01p203.dir/Territoris_1998v01p203.pdf
- Martín-Gómez, V., 2016. *El Sistema climático de la Tierra*. Facultad de Ciencias de la universidad de Montevideo, Uruguay. Disponible en http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico_climatologia_2016/TEMA1_climatologia2016.pdf
- Meteo-Clim, 2016. *Ciclos de Milánkovich*. Disponible en <https://blog.meteoclim.com/ciclos-de-milankovitch>
- Meteoglosario de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). *Forzamiento radiativo*. Disponible en [https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/437_forzamiento-radiativo#:~:text=Cambio%20del%20flujo%20radiativo%20neto,cuadrado%20\(W%2Fm2\)](https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/437_forzamiento-radiativo#:~:text=Cambio%20del%20flujo%20radiativo%20neto,cuadrado%20(W%2Fm2)).
- Meteo-Sim, 2020. *Modelos Globales y Regionales de Cambio climático*. Disponible en <https://www.meteosim.com/es/modelos-globales-regionales-cambio-climatico/>
- Mestre, I., Casado, M.J., Rodríguez, E., 2015. *Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España*. Disponible en https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/11786/1/Tendencias_Observadas_Mestre.pdf
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013. *Cambio Climático: Bases Físicas GUÍA RESUMIDA DEL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC GRUPO DE TRABAJO I*. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/guia-resumida-gt1-bases-fisicas-ar5_tcm30-177777.pdf
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J., 2010. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, 463(7282), 747-756.
- Santos, F., Gómez-Gesteira, M., DeCastro, M., Añel, J. A., Carvalho, D., Costoya, X., & Dias, J. M., 2018. On the accuracy of CORDEX RCMs to project future winds over the Iberian Peninsula and surrounding ocean. Applied Energy, 228, 289-300.
- Schmidt, G.A., Arndt, D., 2020. *Annual Global Analysis for 2019*. Disponible en <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/briefings/20200115.pdf>
- Vázquez Abeledo, M., 2006. *La historia del Sol y el Cambio climático*. Madrid, España. McGraw-Hill.
- Vargas Gómez, O., Molina Prieto, L.F., 2013. *Arborizaciones urbanas: estrategia para mitigar el calentamiento global*. Disponible en <http://186.28.225.70/index.php/nodo/article/view/103/84>
- Hausfather Z., 2019. *El escenario de calentamiento global de altas emisiones "RCP8.5"*. Disponible en <https://www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario>