

Trabajo Fin de Grado

Análisis de tendencia de la temperatura promedio anual hemisféricas (1913-2012) mediante el empleo de ventanas móviles decrecientes.

Trend analysis of annual hemispheric mean temperature (1913-2012) using decreasing temporal window.

Autor/es

Carlos Calvo Sancho

Director/es

José Carlos González Hidalgo

Resumen.

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se analiza la evolución de las temperaturas promedio anual en el hemisferio norte y hemisferio sur en versión tierra+océano durante el período 1913-2012. El estudio se ha realizado empleando tres bases de datos: Climatic Research Unit (CRU), Goddard Institute for Spatial Studies (GISS) y National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y los objetivos generales del trabajo han sido analizar la evolución de la tasa de la temperatura media anual, detectar las diferencias entre hemisferios y evaluar el período mínimo en el que la tendencia refleje señales climáticas. El análisis de tendencia, significación y signo se ha realizado mediante ventanas móviles decrecientes de 1913-2012 a 1998-2012, mediante el estadístico de Mann-Kendall y la tasa se ha calculado por el estimador de pendiente de Sen. Los resultados principales indican que ha existido un aumento de la temperatura media en el período analizado; que el máximo aumento se ha detectado en el período 1992-2012 siendo superior en el hemisferio norte que en el hemisferio sur; en los 20 años finales del período analizado las tendencias no son significativas en el hemisferio sur y en el hemisferio norte ha dejado de aumentar. Finalmente, el análisis de la evolución de los intervalos de confianza de las tasas sugiere que se necesita períodos superiores a 30 años para validar que la tasa de las tendencias de las temperaturas refleje una señal climática, pues con un menor número de años la variación del rango del intervalo supera más de un grado.

Palabras clave: temperatura media anual, tendencia, significación, tasa, intervalo de confianza, bases de datos, Mann-Kendall, Sen, ventanas móviles.

Abstract.

In this Final Project is analysed the evolution annual mean temperature in the North Hemisphere and South Hemisphere of combined Land+Ocean during the period 1913-2012. The research was developed with three datasets: Climatic Research Unit (CRU, Goddard Institute for Spatial Studies (GISS) and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), and the principal goals of this project have been analysing the rate evolution of annual mean temperature, to detect differences between hemisphere and to evaluate the minimum period that the trend show climate signal. The trend, significance and sign analysis were developed with a decreasing temporal window from 1913-2012 to 1998-2012, have been analysed by Mann Kendall test and the rate by Sen slope estimator. The main results indicate that there has been an increase in the annual mean temperature in the period analyzed; the maximum increase has been detected in the period 1992-2012, being higher in the northern hemisphere than in the southern hemisphere; in the final 20 years of the period analyzed, the trends are not significant in the Southern Hemisphere and in the Northern Hemisphere it has stopped increasing. Finally, the analysis of the evolution of the confidence interval of the rates suggests that it need higher periods to 30 years to validate the trend teperature rate shows a signal climate, thus fewer years the range variation of the interval exceed more than one degree.

Key words: annual mean temperature, trend, significance, rate, confidence interval, datasets, Mann-Kendall, Sen, temporal windows.

Índice.

1. INTRODUCCIÓN	5
2. METODOLOGÍA	7
3. RESULTADOS	9
3.1. Evolución de las temperaturas	9
3.2. Evolución de la tendencia en períodos decrecientes	11
3.3. Evolución de la amplitud del intervalo de confianza de la tendencia	13
4. DISCUSIÓN	15
5. CONCLUSIÓN	18
6. BIBLIOGRAFÍA	19

Índice de figuras.

Figura 1: Evolución de las temperaturas de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur versión tierra+océano (1913-2012).

Figura 2: Anomalías de temperatura de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur versión tierra+océano (1913-2012). (a) CRU: 1961-1990; (b) GISS: 1951-1980; (c) NOAA: 1901-2000.

Figura 3: Análisis de tendencia de temperatura de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur en versión tierra+océano. Ventana móvil decreciente entre 1913-2012 y 1998-2012 (es decir, 100 a 15 años). (a) CRU; (b) GISS; (c) NOAA. Puntos negros: significación ($p < 0.05$); puntos blancos: no significación ($p > 0.05$). Líneas rojas: límite superior de confianza al 99%; líneas azules: límite inferior de confianza al 99%.

Figura 4: Evolución de la amplitud del intervalo de confianza al 99% de las bases de datos en hemisferio norte y hemisferio sur.

Figura 5: Anomalías de temperatura media anual y concentración de dióxido de carbono en hemisferio norte (izquierda) y en hemisferio sur (derecha).

Índice de tablas.

Tabla 1: Características de las distintas bases de datos climáticas globales.

Tabla 2: Relación de símbolos y niveles de significación. Fuente: Manual Makesens.

Tabla 3: Períodos de máximo calentamiento y sus tasas correspondientes sobre ventana móviles decrecientes de 100 a 15 años.

Tabla 4: Valores de la amplitud del intervalo de confianza de la tendencia en hemisferio norte y hemisferio sur en versión tierra+océano de las diferentes bases de datos. Expresado en K/Año. Se representa en la longitud del período desde 1913.

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XIX la temperatura promedio del planeta ha aumentado. Este aumento no ha sido continuado y se han identificado sucesivos períodos claramente diferenciados en la escala global y hemisférica. El primer período de calentamiento se detecta en las primeras cuatro décadas (1913-1940) al que sucede una fase de enfriamiento (1940-1970), para posteriormente volver a aumentar las temperaturas. Como resultado, en el último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) (Stocker et al., 2013) se indicó que el incremento de la tasa de la temperatura media global fue de $0,12^{\circ}\text{C}$ [$\pm 0,08/0,14^{\circ}\text{C}$] por década en el período 1951-2012 lo que supone más de medio grado centígrado desde 1950. No obstante, desde mitad de 1990, e incluso regionalmente con anterioridad, el aumento térmico parece sugerir que se ha atenuado en su intensidad y que incluso las temperaturas han descendido, recibiendo este período el nombre de hiato térmico (Fyfe et al. 2013; Kosaka and Xie, 2013), el cuál se ha definido bien como la ausencia de significación de la tendencia (Meehl, 2015), como el cese de su incremento (significativo o no) o finalmente como un enfriamiento (Fyfe et al. 2013).

Los estudios globales sobre las temperaturas se han realizado por medio de las principales bases de datos mundiales, de las que las más conocidas son BEST (Rohde et al. 2013), CRU (Jones et al. 2012), GISS (Hansen et al. 2010) y NOAA (Lawrimore et al. 2011). En cada una de ellas además los valores de temperatura se presentan en diferentes opciones espaciales (hemisferios, continentes, regiones, terrestres, combinación tierra-océano u océano).

En el análisis de tendencia de una serie temporal de datos como los climáticos, un hecho importantísimo es la longitud de la serie disponible y el periodo analizado. De este modo, cualquier valor de tendencia, su signo y significación, así como su intensidad debe ser ponderado por el periodo al que se refiere y por su longitud. Por ello es muy importante cuando se analiza tendencias del pasado o se hacen proyecciones futuras tener muy presente tanto los periodos como las longitudes involucradas (Dixon et al. 2006), teniendo en cuenta que el análisis de tendencias tiene un umbral de mínima longitud para considerarse como señal climática y no variabilidad natural (Liebmann et al. 2010).

En el presente trabajo fin de grado se plantea analizar la evolución de las tendencias de las series de temperatura media anual (T_{mean}) de las principales bases de datos mundiales en sus versiones océano-continente y en ambos hemisferios, mediante la aplicación del método de ventanas temporales decrecientes, con los siguientes objetivos:

- Identificar si el signo de la tendencia ha experimentado variaciones temporales estadísticamente significativas en las bases de datos empleadas en el período 1913-2012.
- Identificar si la tasa de la tendencia ha experimentado variaciones temporales estadísticamente significativas en las bases de datos empleadas en el período 1913-2012.

- Identificar si existe diferencias entre hemisferios.
- Verificar la existencia del hiato e identificar su inicio y duración en las distintas bases de datos.
- Por último, identificar un período mínimo de años necesario para detectar una señal climática mediante el estudio de los rangos del intervalo de confianza de las tasas.

2. MÉTODOS

El estudio analiza las diferentes tasas de tendencia, significación e intervalo de confianza de la Temperatura Media Anual (T_{mean}) del hemisferio norte y hemisferio sur, en el período 1913-2012 de las principales bases de datos mundiales, mediante el método de ventanas móviles decrecientes. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las opciones en que se presentan. Para la realización del presente TFG se han usado las bases de datos CRU, GISS y NOAA, en su versión tierra-océano (*Land+Ocean*) del hemisferio norte (HN, en adelante) y hemisferio sur (HS, en adelante).

	Serie continental	Serie oceánica	Serie combinación continente-océano	Hemisferio norte	Hemisferio sur
GISS	Si	No	Si	Si	Si
CRU	Si	Si	Si	Si	Si
BEST	Si	Si	Si (solo global)	Si	Si
NOAA	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 1: Características de las distintas bases de datos climáticas globales.

Finalmente, la base de datos BEST no se ha utilizado debido a que no tiene datos hemisféricos en la versión tierra+océano.

El método de ventana decrecientes supone acortar el período de análisis fijando siempre el año final del período de manera que refleja el efecto semejante a considerar que la toma de datos se hubiese comenzado a realizar en períodos cada vez más cortos.

El análisis de las tendencias se ha realizado con el estadístico no paramétrico de Mann Kendall y la estimación de la tasa mediante el método de Sen. El análisis se ha realizado en ventanas decrecientes entre 1913-2012 y 1998-2012 (es decir en periodos entre 100 a 15 años) empleando el programa Makesens desarrollado por la Oficina Meteorológica Finlandesa (Salmi et. al. 2002).

El análisis de la significación según el estadístico de Mann-Kendall incluye los siguientes niveles de significación (Tabla 2).

Símbolo	Nivel de significación (α)
***	0.001
**	0.01
*	0.05
+	0.1

Tabla 2: Relación de símbolos y niveles de significación. Fuente: Manual Makesens.

El programa permite también conocer los diferentes intervalos de confianza de la tasa de cada periodo con los que se ha calculado su amplitud empleando el umbral del 99% ($\alpha=0.01$) con el fin de poder valorar el periodo mínimo de tiempo para considerar que los resultados del análisis de tendencia indiquen señales climáticas, no variabilidad natural.

Las tres bases de datos proporcionan sus series de temperaturas medias como anomalías, no obstante, los períodos de referencia para su cálculo no son los mismos porque cada base de datos usa uno distinto (CRU: 1961-1990; GISS: 1951-1980; NOAA: 1901-2000).

3. Resultados.

3.1. Evolución de las temperaturas.

La evolución de la temperatura promedio anual en el HN y HS en versión tierra+océano de las diferentes bases de datos CRU, GISS y NOAA se muestra en la figura 1.

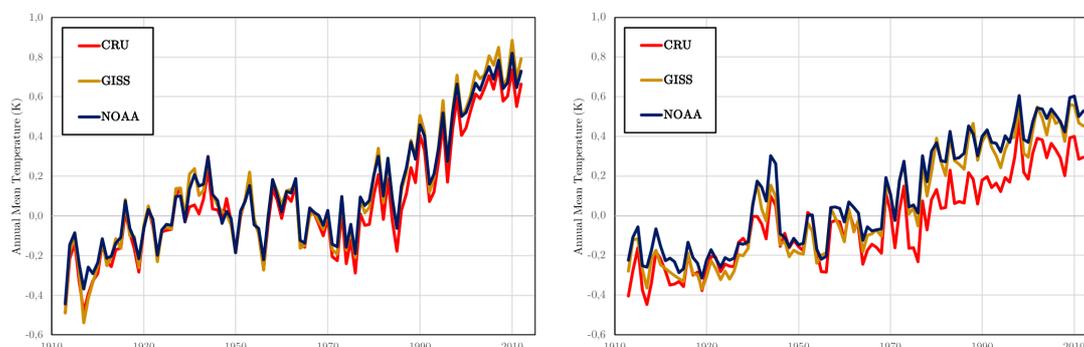


Figura 1: Evolución de las temperaturas de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur versión tierra+océano (1913-2012).

Durante el período analizado se puede observar que el aumento global no es continuo y se pueden detectar distintos períodos de enfriamiento, calentamiento y atenuación de la temperatura. En general en los tres casos el aumento de temperatura es superior en el HN que en el HS, si bien hay diferencias entre periodos

Desde comienzo de siglo (1910) hasta finales de 1930 se puede observar un aumento de temperaturas más fuerte e intenso en el HN que en el HS.

Con posterioridad, en la década de los 40 se produce un período de enfriamiento en ambos hemisferios que se alarga hasta la década de los 70. Dicho período y el posterior calentamiento, en escala regional, queda bien descrito en distintos estudios.

A partir de 1970, la figura muestra un período de fuerte calentamiento hasta mediados de los noventa, sobre todo en el HN. En general, en el HN las tres bases de datos se solapan entre si, mientras en el HS la evolución de la serie de CRU tiene valores claramente inferiores a GISS y a NOAA.

Entre ambos hemisferios se pueden observar importantes diferencias en los valores de anomalías que puede ser consecuencia de un menor número de estaciones meteorológicas o del reparto continentes y océanos diferenciado entre hemisferios (figura 2).

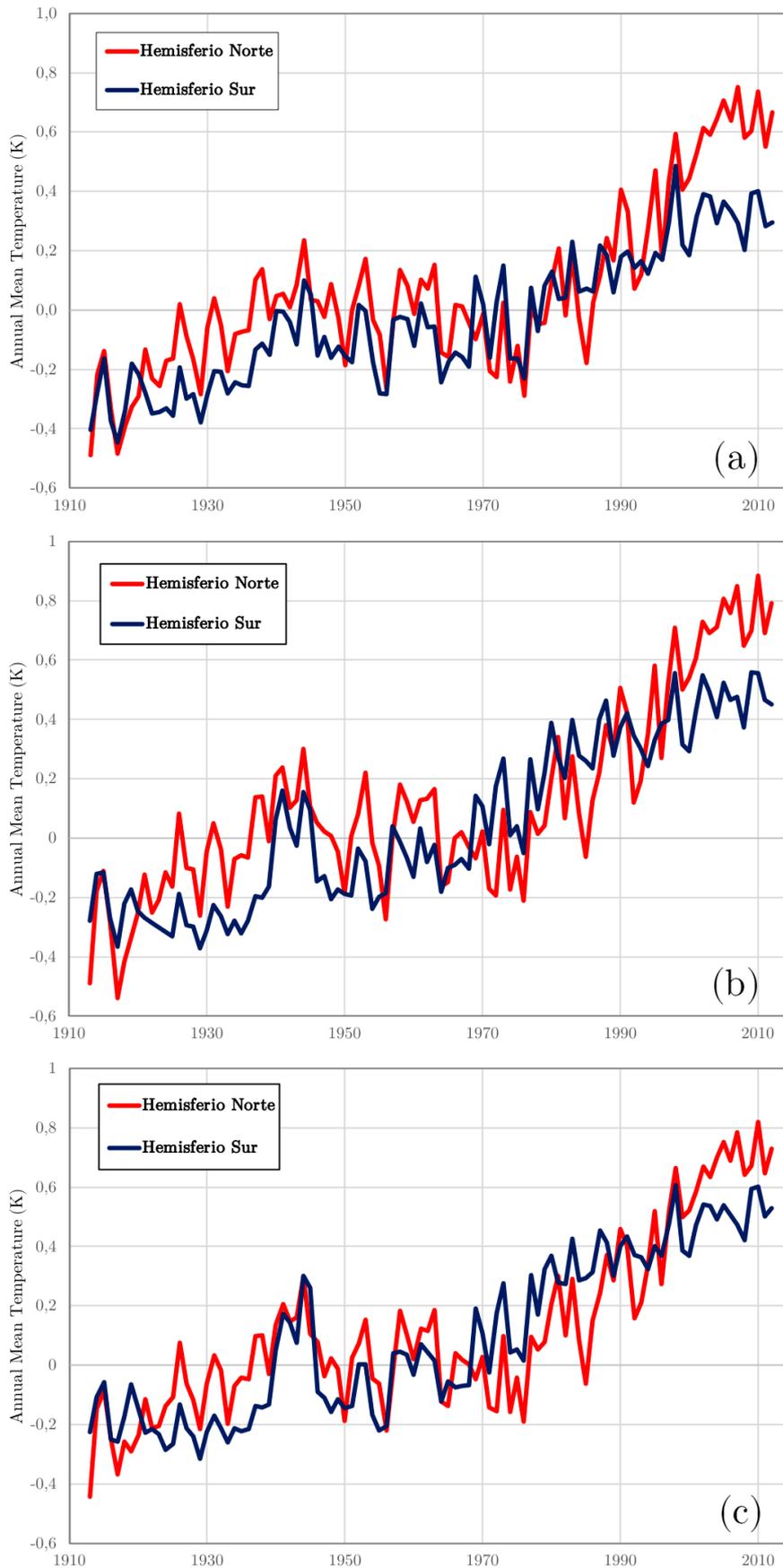


Figura 2: Anomalías de temperatura de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur versión tierra+océano (1913-2012). (a) CRU: 1961-1990; (b) GISS: 1951-1980; (c) NOAA: 1901-2000.

3.2. Evolución de la tendencia anual.

La evolución de la tasa de la temperatura promedio anual (expresado en $^{\circ}\text{C}/\text{año}$) de las tres bases de datos en la versión tierra+océano analizada en ventanas móviles decrecientes de 1913-2012 a 1998-2012 (es decir, 100 a 15 años), se muestra en la figura 3.

En las tres bases de datos se puede apreciar que las tendencias en el HN siempre son significativas y positivas, aumentan progresivamente a medida que la serie se reduce en el tiempo hasta los últimos 30-20 años finales, momento en que se estabilizan e incluso comienzan a atenuarse. En el HS por el contrario las tasas se mantienen mucho más bajas en los tres casos y además descienden con mayor fuerza que en el HN llegando incluso a ser no significativas o incluso a tener signo negativo en los últimos 15 años de análisis.

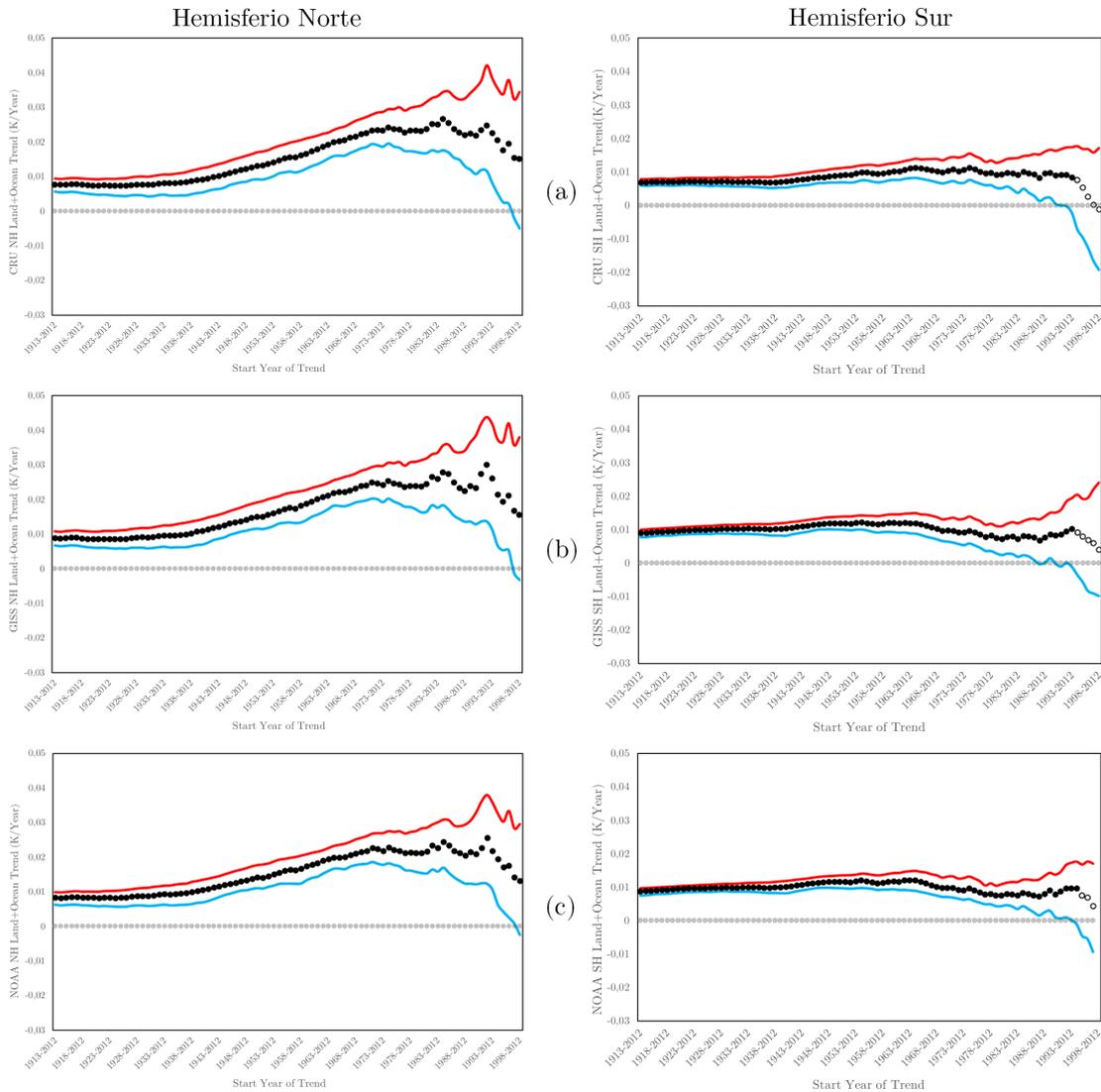


Figura 3: Análisis de tendencia de temperatura de promedio anual en hemisferio norte y hemisferio sur en versión tierra+océano. Ventana móvil decreciente entre 1913-2012 y 1998-2012 (es decir, 100 a 15 años). (a) CRU; (b) GISS; (c) NOAA. Puntos negros: significación ($p < 0.05$); puntos blancos: no significación ($p > 0.05$). Líneas rojas: límite superior de confianza al 99%; líneas azules: límite inferior de confianza al 99%.

En el HN, en todos los intervalos los resultados son positivos y significativos.

- El valor del período completo (1913-2012) es de 0.07°C/década, 0.08°C/década y 0.08°C/década respectivamente en CRU, GISS y NOAA.
- La máxima tasa identificada a su vez es de 0.26°C/década en el período 1984-2012, 0.30°C/década en período 1992-2012 y 0.25°C/década en el período 1992-2012 en CRU, GISS y NOAA.
- El valor del período final (1998-2012) respectivamente es de 0.15°C/década, 0.15°C/década y 0.13°C/década en CRU, GISS y NOAA.

Las tasas a medida que se acorta el período aumentan, especialmente los últimos 40-35 años (es decir, en el período 1970/75-2012). En los últimos 35-20 años, la tasa se mantiene entre 1975-2012 y 1993-2012. En los últimos 20 años, la tasa comienza a decrecer.

En el HS:

- El valor del período completo (1913-2012) es de 0.06°C/década, 0.08°C/década y 0.08°C/década respectivamente en CRU, GISS y NOAA.
- La tasa máxima identificada a su vez es de 0.11°C/década en el período 1964-2012, 0.12°C/década en el período 1954-2012 y 0.12°C/década en el período 1963-2012 en CRU, GISS y NOAA.
- El valor del período final (1998-2012) a su vez es de -0.01°C/década, 0.03°C/década y 0.04°C/década en CRU, GISS y NOAA.

Las tasas han sido inferiores y no experimenta el ascenso del HN al acortarse el período, si no mucho más constantes. En ningún momento supera el valor de 0.15°C/década. Además, en los últimos 17-20 años es no significativo y en la base de datos CRU en los últimos 15 años la tasa es negativa (1998-2012).

En la Tabla 3 se muestran los periodos de máximo calentamiento por base de datos y hemisferios. Como se puede observar el aumento máximo en los tres casos se produjo en el HN, con valores que doblan al HS. También se puede observar la diferencia existente del período máximo entre hemisferios.

Hemisferio	Base de datos	Per. Máx. Cal.	Número de años	Tasa máxima
HN	CRU	1984-2012	29	0.02672
	GISS	1992-2012	21	0.03010
	NOAA	1992-2012	21	0.02555
HS	CRU	1964-2012	49	0.01127
	GISS	1954-2012	59	0.01218
	NOAA	1963-2012	50	0.01210

Tabla 3: Períodos de máximo calentamiento y sus tasas correspondientes.

Los resultados en la figura 3, sugiere la detección del comienzo del hiato. En el HN se detecta a través de la constancia de la tasa en los últimos 35-20 años y el decrecimiento de esta en los últimos 20 años. En el HS se detecta en los últimos 20-15 años por la pérdida de significación, valores negativos y tasa decreciente.

3.3. Evolución de la amplitud del intervalo de confianza de la tendencia.

La evolución de la amplitud del intervalo de confianza de las tendencias analizadas se muestra en la figura 4. En la figura se puede observar que dichos intervalos de confianza tienen un fuerte incremento tanto en el HN como en el HS cuando la tendencia se calcula sobre el periodo de los últimos 30 años al final de las series, si bien el comportamiento difiere entre hemisferios y bases de datos.

En general, el rango de variación de la tasa en períodos decrecientes aumenta mucho más en el HN que en el HS, como se muestra en la figura 4. En ambos casos, este rango o amplitud se mantiene constante al acortarse el período de calculo desde el período de inicio 1913-2012 hasta aproximadamente las últimas décadas, con valores en torno a $0.4^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en el HN y en torno a $0.25^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en el HS en los últimos períodos. En el HN la amplitud del intervalo comenzó a aumentar exponencialmente en torno a los últimos 40 años finales, mientras que en el HS lo hizo en los últimos 30 años finales.

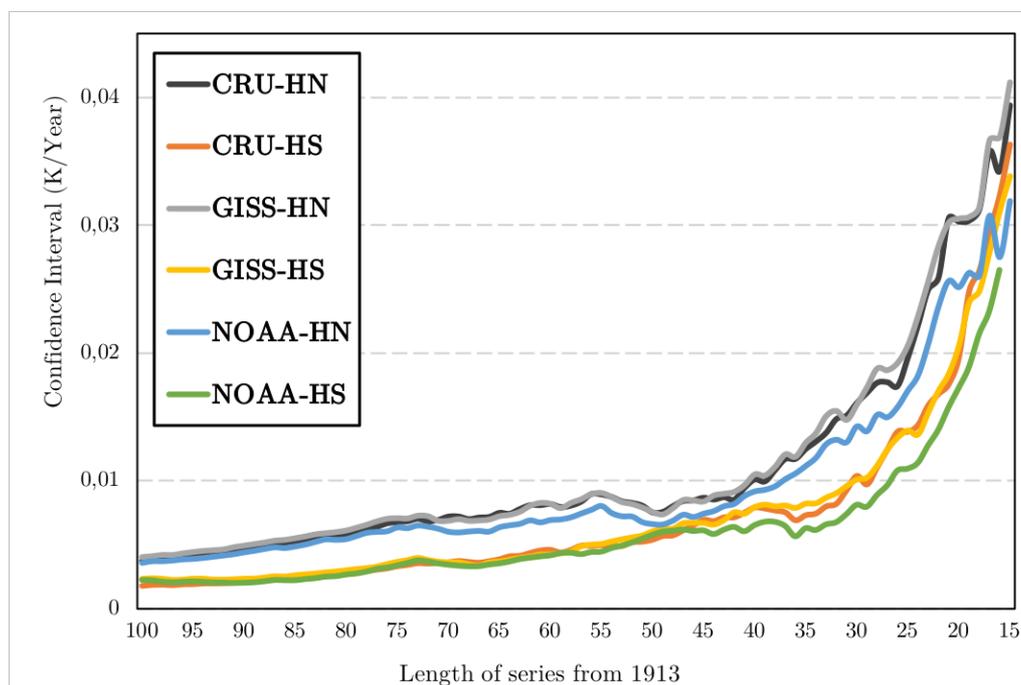


Figura 4: Evolución de la amplitud del intervalo de confianza al 99% de las bases de datos en hemisferio norte y hemisferio sur.

En la tabla 4 se muestra la amplitud del intervalo de confianza en distintos años prefijados (15, 20, 25, 30, etc.). En el HN a partir de los últimos 40 años el rango es superior a 1°C , es decir, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, mientras que en el HS a partir de los últimos 30 años el rango es superior a 1°C .

Periodo	Años	CRU		GISS		NOAA	
		HN	HS	HN	HS	HN	HS
1998-2012	15	0.039	0.036	0.041	0.033	0.031	0.027
1993-2012	20	0.030	0.019	0.030	0.030	0.035	0.017
1988-2012	25	0.019	0.013	0.020	0.139	0.017	0.010
1983-2012	30	0.016	0.010	0.015	0.010	0.014	0.008
1978-2012	35	0.012	0.007	0.012	0.008	0.011	0.006
1973-2012	40	0.010	0.007	0.010	0.007	0.009	0.006
1968-2012	45	0.008	0.006	0.008	0.006	0.007	0.006
1963-2012	50	0.007	0.005	0.007	0.006	0.006	0.005

Tabla 4: Valores de la amplitud del intervalo de confianza de la tendencia en hemisferio norte y hemisferio sur en versión tierra+océano de las diferentes bases de datos. Expresado en °C/Año.

Los resultados sugieren que al margen de que sea o no estadísticamente significativa una tasa, se debería considerar también dicho intervalo de confianza pues se considera que $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de variabilidad en una tasa introduce demasiado ruido en una eventual señal climática.

4. Discusión.

El último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) AR5 (Stocker et. al., 2013), establece que la temperatura media global se incrementó en 0.85°C durante el período de 1880 a 2012, y que gran parte del calentamiento desde 1900 es atribuible a factores antrópicos como el incremento de las concentraciones en la atmósfera de gases de efecto invernadero.

El análisis de tendencia realizado en el presente trabajo de fin de grado identifica los tres grandes períodos de la evolución de la temperatura en el siglo veinte: un calentamiento de 1915 a 1945 (súbito en el HS), un período de enfriamiento o de atenuación de las temperaturas de 1945 a 1975 y un período de intenso calentamiento de 1975 hasta el 2012. En conjunto, el signo de la tendencia es positiva en todo el período analizado en ambos hemisferios y en todas las bases de datos, excepto en la base de datos CRU (véase a continuación).

Los resultados del trabajo muestran que existen diferencias espaciales en la evolución de las temperaturas entre ambos hemisferios. El mayor grado de calentamiento que se ha producido en el planeta desde 1975 ha sido en el HN. Así, la tasa máxima de todas las bases de datos analizadas y de ambos hemisferios es del HN con $0.3^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (GISS) en el período 1992-2012. El HS ha tenido un comportamiento distinto en la tendencia de temperatura de promedio anual. La tasa máxima es de $0.12^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en el período 1954-2012 de GISS. También, en la base de datos CRU, se encuentra el único período (1998-2012) con tasa negativa en todas las bases de datos y ambos hemisferios analizados cuya tendencia es negativa con un valor de $-0.01^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

El diferente grado de calentamiento de ambos hemisferios se debe casi con seguridad a la proporción de tierra y océano. El carácter más oceánico del HS sugiere que la tendencia de la temperatura estará más suavizada. Strangeways (2010) sugiere que gran parte del calentamiento global desde 1975 se puede deber a distintos eventos de ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) así como que la diferencia de temperatura entre ambos hemisferios puede deberse a una menor concentración de población y menor actividad industrial en los países del HS. Otros autores sugieren diferentes factores para explicar el diferente calentamiento de los dos hemisferios, y relacionan el aumento de temperatura en el HN con el efecto de la isla de calor urbana dado que en el HN se concentra la mayoría de las grandes ciudades, así como con cambios en la circulación atmosférica, en los usos del suelo o en la cobertura nubosa (McKittrick and Michaels, 2004; De Laat and Maurellis, 2006). Finalmente, también se ha indicado que la diferencia entre hemisferios puede deberse a la menor densidad de estaciones meteorológicas en el HS.

La comparación entre bases de datos tiene un grado de dificultad porque existe un hándicap de entrada: el período de referencia. Cada institución elabora su base de datos con homogeneización y metodología diferente usando cada una un período de referencia distinto. Esto influye en la comparación entre hemisferios

debido a que un valor de anomalía en un período de referencia no puede (o no debería) ser comparado con otro valor de anomalía en otro período de referencia. En todo caso las tres bases de datos permiten confirmar que ha habido un aumento de temperaturas en el periodo analizado y que ha habido diferencias entre ambos hemisferios.

Cuando se proporciona una tasa de la tendencia se asume en general que esta es constante de modo que las variaciones internas quedarán ocultas en el conjunto del periodo, por ello tanto el valor de la tasa como su significación están influenciados por la elección del período analizado. En el presente TFG la ventana más corta analizada es de 15 años (1998-2012) al considerar que un período inferior a 15 años incluiría una gran variabilidad aleatoria y no una señal realmente climática. Dicho período mínimo es acorde con período similares sugeridos por Loehle (2009) (19 años), Liebmann et. al. (2010) (22 años), Santer et. al. (2011) (20 años) y McKittrick (2014) (19 años). Sin embargo, no existe un consenso de período mínimo en la comunidad científica. En nuestro caso los resultados del análisis realizado con ventanas móviles indican que la tasa de calentamiento no ha sido constante, y que existe alta variabilidad entre hemisferios y bases de datos.

No es frecuente encontrar análisis sobre la fiabilidad de las tendencias, y en este estudio hemos tratado de indagar este problema mediante el análisis del intervalo de confianza de la tasa, calculando el rango o amplitud de las mismas en ventanas decrecientes y estimando que cuando el rango de variabilidad es 1°C (es decir, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) la fiabilidad del valor de la tendencia es, con independencia de su significación estadística, al menos discutible.

Los resultados del análisis de dicho rango en las tres bases de datos analizadas y en sus versiones hemisféricas indican que en los últimos 40 años el rango de variabilidad de las tasas estimadas es $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, en suma, supera $1^{\circ}\text{C}/\text{siglo}$. Es decir, en el supuesto de que los registros de temperatura hubieran comenzado hace 40 años, la fiabilidad de las tasas de tendencia resultante sería siempre moderada por el elevado rango o amplitud de sus límites de confianza que excederían en total el valor de 1°C .

Para terminar, los resultados obtenidos en este trabajo de fin de grado sugieren que durante las últimas décadas la tasa de calentamiento se ha atenuado o ha sufrido una pausa, fenómeno que ha recibido el nombre de hiato. El fenómeno es muy controvertido en los estudios climáticos actuales debido a que sí se ha detectado en los datos de superficie y de los satélites desde 1979 hasta la actualidad (Loehle, 2009), mientras que no aparece en los modelos numéricos de predicción climática, que daban una tasa de calentamiento constante y monótona superior a $0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ durante todo el siglo XXI sin pausa. Además, el fenómeno cobra especial relevancia en tanto que los gases de efecto invernadero han seguido aumentando (figura 5).

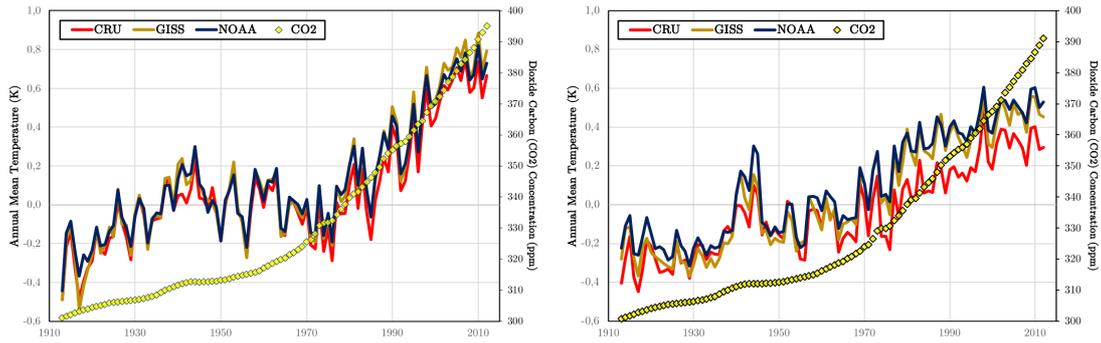


Figura 5: Anomalías de temperatura media anual y concentración de dióxido de carbono en hemisferio norte (izquierda) y en hemisferio sur (derecha).

El inicio del hiato térmico se ha datado en fechas distintas y por ello tiene una duración variable según los autores: 1998-2009 (Loehle, 2009), 1998-2008 (Kaufmann et. al., 2011), 2000-2009 (Meehl et. al., 2011), 1999-2012 (Trenberth et al., 2014), 1997-2013 (Schmidt et. al., 2014); en otros casos se lleva el comienzo del hiato a comienzos de 1990 (1993-2012, Fyfe et. al. 2013) o a mediados de los 80 (González-Hidalgo et. al. 2015). Frente a estos autores, otros niegan su existencia tanto global como regionalmente, aludiendo a los efectos de puntos de ruptura de la tendencia, cambios de inicio del período de análisis, aumento de observatorios tanto en tierra como en superficie marítima o la reducción de número de años en los últimos períodos en los análisis de tendencia (Karl et. al. 2015; Rahmstorf et. al. 2017).

McKittrick (2014) utilizó el intervalo de confianza para detectar el comienzo del hiato, y concluyó que cuando el valor del límite inferior del mismo pasa a tener un signo negativo, se puede considerar como su comienzo. En el presente trabajo hemos aplicado este enfoque, y los resultados del análisis del intervalo de confianza de las tendencias indican que el hiato térmico tiene su inicio hace más de dos décadas y que difiere según hemisferio entre 40 y 20 años (HN y HS, respectivamente). Estos resultados tanto en el inicio como la duración, va en concordancia con los estudios anteriores, pero se observa ligeras diferencias entre bases de datos en la fecha de comienzo del hiato.

5. Conclusiones.

Durante el período 1913-2012 se ha constatado un aumento significativo de la temperatura en el HN como en el HS. El signo de la tendencia ha sido positivo en ambos hemisferios y bases de datos, excepto en CRU en el HS en el período 1998-2012 que es negativo. La evolución de las tendencias de temperatura promedio anual en el HN y en el HS en versión tierra+océano de las distintas bases de datos durante el siglo XX y principios del siglo XXI, identifica una tasa máxima de calentamiento producido entre 1950 y 1990 con 0.30 °C/década y 0.12 °C/década (base de datos GISS).

Las tendencias de la temperatura media anual son estadísticamente significativas durante todos los períodos analizados en el HN, mientras que en el HS en todas las bases de datos los últimos 15-20 años la tendencia es estadísticamente no significativa. La tasa de la tendencia no ha sufrido grandes variaciones entre distintas bases de datos, pero entre hemisferios existen fuertes diferencias.

El análisis de la evolución de la amplitud del intervalo de confianza identifica los períodos mínimos por los que la confianza de la tendencia no entre ruido en la señal climática. Con los umbrales prefijados, se estima un período mínimo de 40 años, dado que un menor número de años la variabilidad de los datos sería muy elevada tras superar el 1°C/siglo ($\pm 0.5^\circ\text{C}$).

El hiato se identifica en ambos hemisferios en los últimos 25-20 años. En el HN como una atenuación y descenso de la tasa de temperatura media, mientras que en el HS mediante el descenso y la pérdida de significación estadística.

Por último, he de destacar que esta investigación continuará a través del estudio hemisférico de Tmax y Tmin y a una escala regional durante los próximos años.

6. Bibliografía.

Abatzoglou, J. T., Rupp, D. E., & Mote, P. W. (2014). Seasonal Climate Variability and Change in the Pacific Northwest of the United States. *Journal of Climate*, 27(5), 2125–2142. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00218.1.

Brunet, M., P. D. Jones, J. Sigro', O. Saladie', E. Aguilar, A. Moberg, P. M. Della-Marta, D. Lister, A. Walther, and D. Lo'pez (2007), Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D12117, doi:10.1029/2006JD008249.

Chen, X., & Tung, K.-K. (2014). Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 345(6199), 897–903. doi:10.1126/science.1254937.

Dixon, H., Lawler, D. M., Shamseldin, A. Y., & Webster, P. (2006) The Effect of Record Length on the Analysis of River Flow Trends in Wales and Central England. *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts*. IAHS Publ. 308, 2006.

Douville, H., A. Voldoire, and O. Geoffroy (2015), The recent global warming hiatus: What is the role of Pacific variability?, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 880–888, doi:10.1002/2014GL062775.

Fall, S., Watts, A., Nielsen-Gammon, J., Jones, E., Niyogi, D., Christy, J. R., & Pielke, R. A. (2011). Analysis of the impacts of station exposure on the U.S. Historical Climatology Network temperatures and temperature trends. *Journal of Geophysical Research*, 116(D14). DOI: 10.1029/2010JD015146.

Fischer, M. J., & Paterson, A. W. (2014). Detecting trends that are nonlinear and asymmetric on diurnal and seasonal time scales. *Climate Dynamics*, 43(1–2), 361–374. DOI: 10.1007/s00382-014-2086-8.

Fyfe, J. C., Gillett, N. P., & Zwiers, F. W. (2013). Overestimated global warming over the past 20 years. *Nature Climate Change*, 3(9), 767–769. doi:10.1038/nclimate1972.

Gil-Alana, L. A. (2015). Linear and segmented trends in sea surface temperature data. *Journal of Applied Statistics*, 42(7), 1531–1546. DOI: 10.1080/02664763.2014.1001328.

González-Hidalgo JC, Peña-Angulo D, Brunetti M, Cortesi N. 2015. Recent trend in temperature evolution in Spanish mainland (1951-2010): from warming to hiatus. *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.4519.

Gonzalez-Hidalgo, J. C., Salinas, C., Peña-Angulo, D., & Brunetti, M. (2018). A moving windows visual approach to analysing spatial variation in temperature trends on the Spanish mainland 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1678–1691. <https://doi.org/10.1002/joc.5288>.

Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo (2010), Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, DOI: 10.1029/2010RG000345.

Jones, P. D., D. H. Lister, T. J. Osborn, C. Harpham, M. Salmon, and C. P. Morice (2012), Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, *J. Geophys. Res.*, 117, D05127, DOI: 10.1029/2011JD017139.

Karl TR, Arguez A, Huang B, Lawrimore JH, McMahon JR, Menne MJ, Peterson TC, Vose RS, Zhang HM. 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science* 348: 1469-1472, doi: 10.1126/science.aaa5632.

Kaufmann, R. K., Kauppi, H., Mann, M. L., & Stock, J. H. (2011). Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Kosaka, Y., & Xie, S.-P. (2013). Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501(7467), 403–407. doi:10.1038/nature12534.

Landscheidt, T. (2003). New Little Ice Age instead of global warming? *Energy and Environment* 14:327-350.

Lawrimore, J. H., M. J. Menne, B. E. Gleason, C. N. Williams, D. B. Wuertz, R. S. Vose, and J. Rennie (2011), An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3, *J. Geophys. Res.*, 116, D19121, DOI:10.1029/2011JD016187.

Liebmann, B., Dole, R. M., Jones, C., Bladé, I., & Allured, D. (2010). Influence of choice of time period on global surface temperature trend estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(11), 1485–1491. DOI: 10.1175/2010BAMS3030.1.

Loehle, C. (2009). Trend analysis of satellite global temperature data. *Energy & Environment*, 20(7), 1087–1098.

Meehl, G.A. (2015). Decadal climate variability and the early-2000s hiatus. *U.S. Clivar Var.* 13: 1-6.

Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Fasullo, J. T., Hu, A., & Trenberth, K. E. (2011). Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 1(7), 360–364. doi:10.1038/nclimate1229.

McKittrick, R. R. (2014). HAC-Robust Measurement of the Duration of a Trendless Subsample in a Global Climate Time Series. *Open Journal of Statistics*, 4(7), 527–535. DOI: 10.4236/ojs.2014.47050.

Rahmstorf S, Foster G, Cahill N. 2017. Global temperatures evolution: recent trends and some pitfalls. *Environmental Research Letters* 12 054001, doi: 10.1088/1478-9326/aa6825.

Rohde R, Muller RA, Jacobsen R, Muller E, Perlmutter S, et al. (2013) A New Estimate of the Average Earth Surface Land Temperature Spanning 1753 to 2011. *Geoinfor Geostat: An Overview* 1:1.. doi:10.4172/2327-4581.1000101.

Roy, I. (2018). Addressing on Abrupt Global Warming, Warming Trend Slowdown and Related Features in Recent Decades. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00136>

Schmidt, G.A., D.T. Shindell, and K. Tsigaridis, 2014: Reconciling warming trends. *Nature Geosci.*, 7, no. 3, 158-160, doi:10.1038/ngeo2105.

Santer, B. D., Mears, C., Doutriaux, C., Caldwell, P., Gleckler, P. J., Wigley, T. M. L., ... Wentz, F. J. (2011). Separating signal and noise in atmospheric temperature changes: The importance of timescale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D22). <https://doi.org/10.1029/2011JD016263>

Servain, J., Caniaux, G., Kouadio, Y. K., McPhaden, M. J., & Araujo, M. (2014). Recent climatic trends in the tropical Atlantic. *Climate Dynamics*, 43(11), 3071–3089. DOI: 10.1007/s00382-014-2168-7.

Solomon, S., Rosenlof, K. H., Portmann, R. W., Daniel, J. S., Davis, S. M., Sanford, T. J., & Plattner, G.-K. (2010). Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming. *Science*, 327(5970), 1219–1223. doi:10.1126/science.1182488.

Strangeways I. (2010). Measuring Global Temperatures: their analysis and interpretation. *Cambridge University Press*. New York, USA.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Branstator, G., & Phillips, A. S. (2014). Seasonal aspects of the recent pause in surface warming. *Nature Climate Change*, 4(10), 911–916. doi:10.1038/nclimate2341.

Tollefson, J. (2014). The case of missing heat. *Nature* 505: 276-278.

Watanabe, M., Y. Kamae, M. Yoshimori, A. Oka, M. Sato, M. Ishii, T. Mochizuki, and M. Kimoto, 2013: Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3175-3179, doi:10.1002/grl.50541.

Zhou, C., & Wang, K. (2016). Spatiotemporal Divergence of the Warming Hiatus over Land Based on Different Definitions of Mean Temperature. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep31789>