

Taller 3: Doing Economics - Midiendo la temperatura de la Tierra y el CO₂

Con su respectivo grupo (ver e-aulas), realizar este taller en clase. Debe seguirse las reglas de uso de repositorio Git con la estructura de carpetas vista en clase. El taller DEBE realizarse en Python (vía Anaconda, no con notebooks jupyter/ Google colab, etc).

Parte 1.1. Analizando anomalías de temperatura

En lugar de medir la temperatura absoluta, los científicos suelen usar anomalías de temperatura, que indican cuánto se desvía la temperatura promedio de un periodo de referencia. Esta medida permite comparar fácilmente lugares y épocas distintas, incluso cuando los instrumentos de medición han cambiado. Vamos a empezar construyendo gráficas similares a la siguiente, para encontrar patrones en los datos.

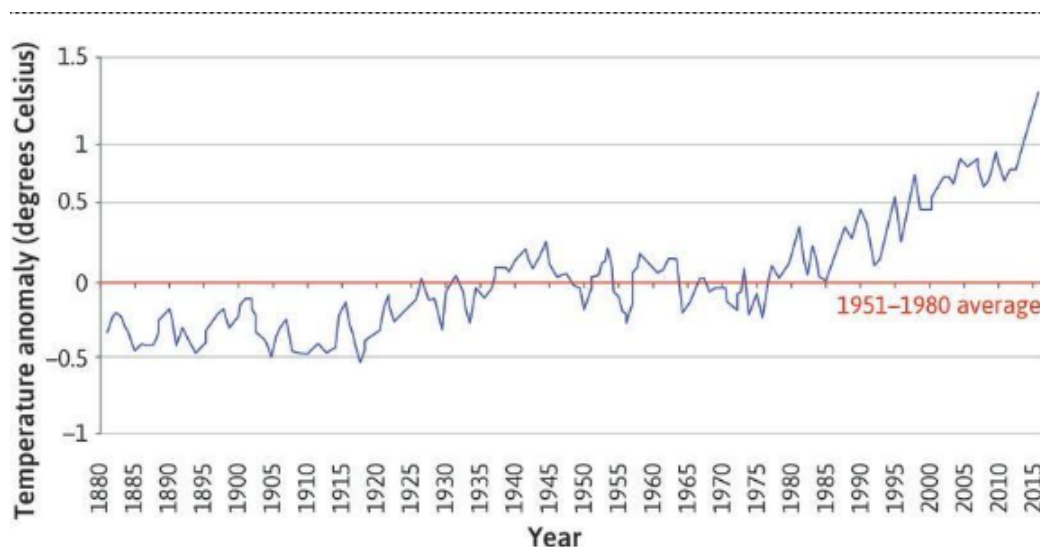


Figure 1.1 Northern hemisphere temperatures (1880–2016).

Pregunta 1.1.1

Ve al sitio web del *Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA*.

Bajo el subtítulo “*Combined Land-Surface Air and Sea-Surface Water Temperature Anomalies*”, selecciona la versión CSV de “*Northern Hemisphere-mean monthly, seasonal, and annual means*” (clic derecho → Guardar enlace como...).

El nombre por defecto de este archivo es `NH.Ts+dSST.csv`.

Asígnale un nombre adecuado y guárdalo en la carpeta `RawData`.

En este conjunto de datos, la temperatura se mide como “anomalías” en lugar de temperatura absoluta.

- Explica con tus propias palabras qué significa “*anomalía de temperatura*”.
- ¿Por qué los investigadores han preferido esta medida frente a otras (como la temperatura absoluta)?

Respuesta

RTA 1: El significado de una *anomalía*, en el contexto de la base de datos proporcionada por la NASA (temperatura y CO₂), radica en identificar un comportamiento inusual. Un dato se considera atípico cuando presenta una variación de dos grados con respecto al valor anterior, lo que puede indicar que la temperatura es más fría o más caliente de lo esperado.

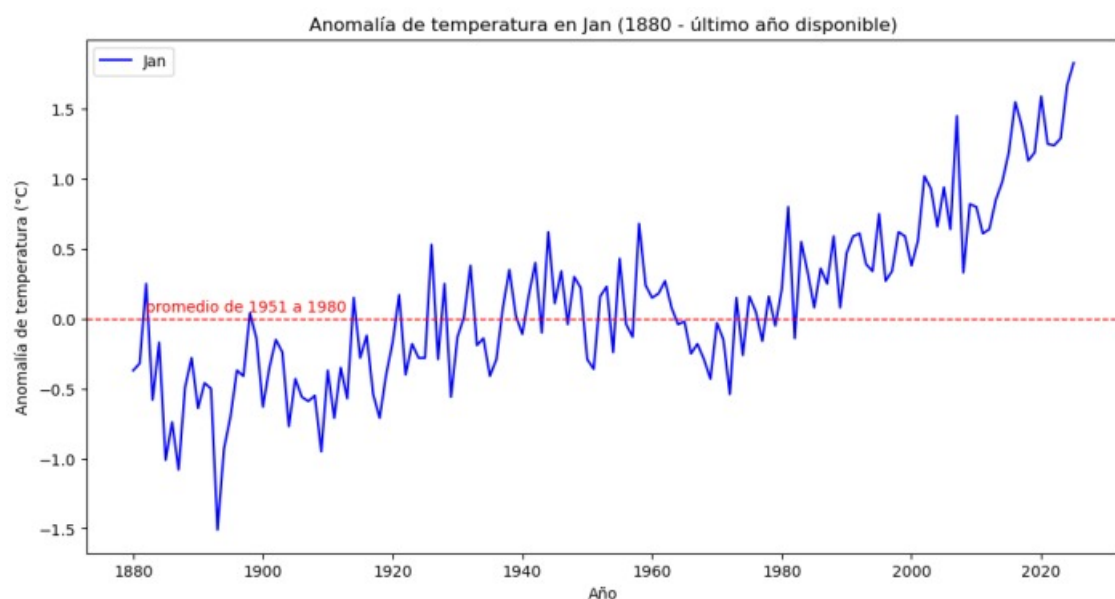
RTA 2: Los investigadores prefieren usar *anomalías de temperatura* en lugar de temperaturas absolutas porque permiten comparar más fácilmente diferentes regiones del mundo, sin importar si son frías o cálidas en promedio. Además, eliminan el efecto de las variaciones naturales locales y muestran únicamente la diferencia respecto al promedio histórico.

Pregunta 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4

Vamos a construir tres gráficos:

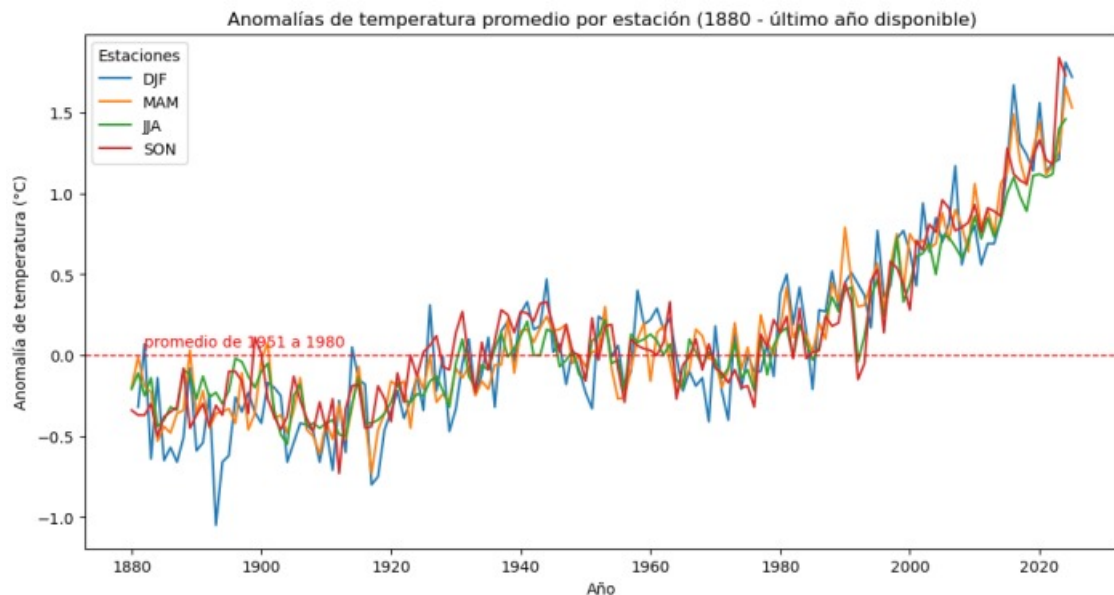
1.1.1) Elige un mes y construye un gráfico de línea con la anomalía de temperatura promedio en el eje vertical y el tiempo (desde 1880 hasta el último año disponible) en el eje horizontal.

Respuesta



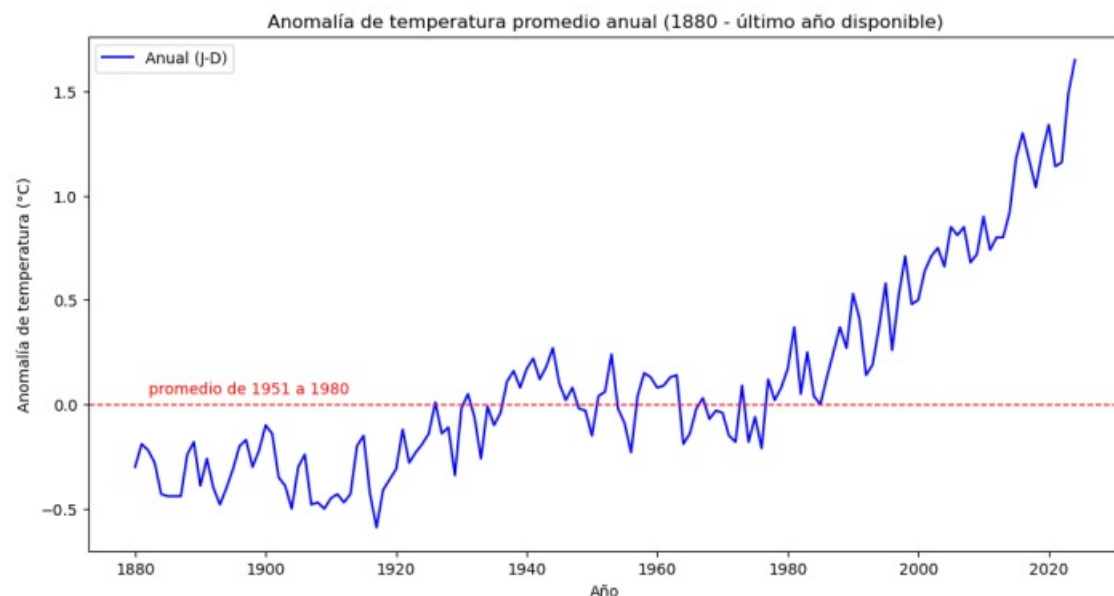
1.1.3) Ahora, otro gráfico pero con los promedios de cada estación (una línea por estación). Las columnas DJF, MAM, JJA, SON contienen dicha información. Por ejemplo, MAM es el promedio de los meses Marzo, Abril y Mayo.

Respuesta



1.1.4) Ahora hagamos una gráfica con los promedios de las anomalías anuales. Esta información está en las columnas J-D

Respuesta



Etiqueta los ejes adecuadamente y ponle un título apropiado a cada una (usa la Figura 1.1 como ejemplo). Agrega además una línea horizontal en el valor “0” y con una etiqueta que diga “promedio de 1951 a 1980”

Respuesta

Al analizar los gráficos se observa una tendencia clara en la relación entre la temperatura y el tiempo. Durante las primeras décadas, entre 1880 y 1920, las anomalías de temperatura fueron en su mayoría negativas, lo que indica que el clima era más frío que el promedio de referencia de 1951–1980. Entre 1920 y 1970, las variaciones fueron más irregulares, con años fríos y cálidos que se compensaban y no mostraban un patrón sostenido de aumento. Sin embargo, a partir de 1980 la situación cambia de manera evidente: las anomalías comienzan a aumentar de forma constante y alcanzan valores superiores a 1 °C en las últimas décadas.

Este mismo comportamiento se observa cuando se analiza un mes específico, como enero. Aunque existe variabilidad interanual, la tendencia de largo plazo es inequívoca: las temperaturas han pasado de valores negativos en la primera mitad del siglo XX a valores claramente positivos después del año 2000. De manera similar, al revisar los promedios por estaciones, se confirma que el incremento de la temperatura es generalizado, sin importar la época del año.

En conjunto, los gráficos sugieren que existe una relación positiva y sostenida entre el paso del tiempo y las anomalías de temperatura. El calentamiento es un fenómeno persistente que se ha intensificado especialmente en los últimos 40 años, y se manifiesta de manera consistente tanto en meses individuales como en estaciones completas.

Pregunta 1.1.5

Ya tienes gráficos para tres intervalos de tiempo: mes, estación, y año. - Para cada intervalo, ¿qué patrones en la temperatura podemos aprender que no se aprecian en los otros intervalos?

Respuesta

Cuando observamos las anomalías mensuales, como en el gráfico de enero, podemos apreciar con mayor nitidez la variabilidad de corto plazo, es decir, los altibajos de un año a otro. Este nivel de detalle permite ver que, aunque la tendencia de largo plazo es ascendente, en ciertos años concretos se presentan desviaciones marcadas hacia arriba o hacia abajo que quedan suavizadas en otras escalas.

Al pasar al promedio por estaciones, los gráficos muestran una reducción de la volatilidad respecto a los datos mensuales. Aquí es más evidente que el incremento de las temperaturas es consistente en todas las épocas del año, lo que nos ayuda a ver que el calentamiento no se concentra en un mes particular, sino que afecta al ciclo climático completo.

Finalmente, en el promedio anual se distinguen de manera más clara los patrones de largo plazo, sobre todo el aumento sostenido desde finales del siglo XX. Aunque se pierde parte de la variación estacional y mensual, se gana una visión más nítida de la tendencia general de calentamiento global.

Pregunta 1.1.6

Compara tu gráfico de la Pregunta 1.1.4 con la Figura 1.4 (a continuación), que muestra la evolución de la temperatura usando datos de la Academia Nacional de Ciencias.

- ¿Qué similitudes y diferencias encuentras entre los gráficos? .
- Al observar el periodo 1000–1900 en la Figura 1.4, ¿los patrones de tu gráfico son inusuales?
- Con base en tus respuestas, ¿crees que el gobierno debería preocuparse por el cambio climático?

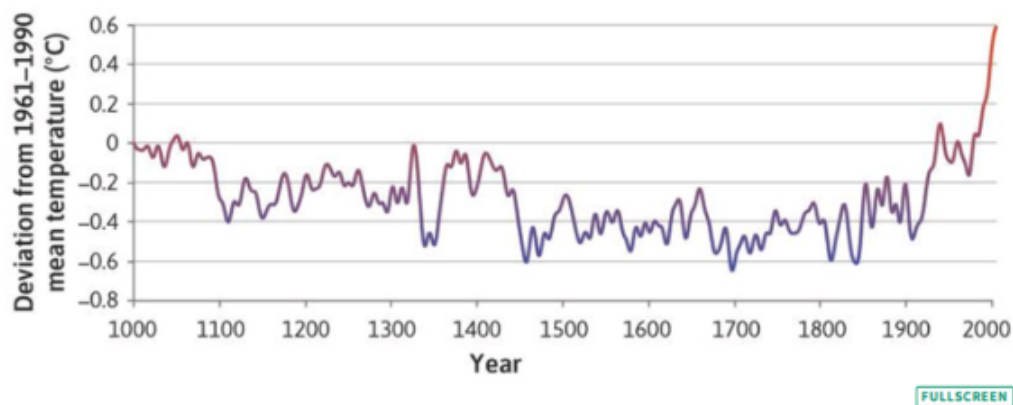


Figure 1.5 Northern hemisphere temperatures over the long run (1000–2006).

Respuesta

RTA 1: En las dos gráficas de tiempo podemos observar sus líneas temporales. En la gráfica 1.5, la línea de tiempo abarca desde el año 1000 hasta el 2000, mientras que en la gráfica 1.1.4 se extiende desde 1880 hasta 2020. Si observamos la gráfica 1.1.4, podemos ver que existe una relación en los datos, alcanzando puntos muy similares y con una diferencia mínima. Un ejemplo de ello es el año 2000, donde en la gráfica 1.5 el valor llega un poco más arriba que en la otra, aunque ambas coinciden en sus puntos de corte cuando el valor es 0.

RTA 2: Sí, a lo largo del milenio se presentan momentos en los que la temperatura varía de manera significativa en comparación con sus inicios. Estas fluctuaciones muestran incrementos y descensos abruptos que reflejan cambios importantes en el clima.

RTA 3: Deberían, ya que esto muestra un efecto preocupante a largo plazo para la humanidad. Estos cambios tan bruscos pueden afectar directamente a muchos animales y a la fauna en general, alterando el ciclo de la vida y provocando grandes repercusiones en los ecosistemas.

Parte 1.2. Variación de la temperatura en el tiempo

El cambio climático no solo se refleja en un aumento de la temperatura promedio, sino también en la forma en que se distribuyen las temperaturas a lo largo del tiempo. Un artículo del *New York Times* analizó cómo la frecuencia de temperaturas “frías”, “templadas” y “calientes” cambió entre los periodos 1951–1980 y 1981–2010. Este enfoque muestra que incluso pequeños cambios en la media pueden alterar de forma significativa la probabilidad de experimentar temperaturas extremas.

En esta sección replicaremos parte de ese análisis, construyendo tablas de frecuencias e histogramas para comparar la distribución de anomalías de temperatura en ambos periodos, y evaluando si las temperaturas se han vuelto más extremas o más variables con el tiempo.

Pregunta 1.2.1

Crea dos tablas de frecuencias similares a la Figura 1.6 para los años 1951–1980 y 1981–2010.

Range of temperature anomaly (T)	Frequency
-0.30	
-0.25	
...	
1.00	
1.05	

Figure 1.6 A frequency table.

Respuesta

Rango de anomalía (°C)	Frecuencia (1951–1980)
-0.23	1
-0.21	1
-0.19	1
-0.18	2
-0.15	1
-0.14	1
-0.09	1
-0.07	1
-0.06	2
-0.04	1
-0.03	1
-0.02	2
0.02	1
0.03	2
0.04	2
0.06	1
0.08	2
0.09	1
0.12	1
0.13	2
0.14	1
0.15	1
0.17	1

Cuadro 1: Tabla de frecuencias de anomalías de temperatura (1951–1980).

Respuesta

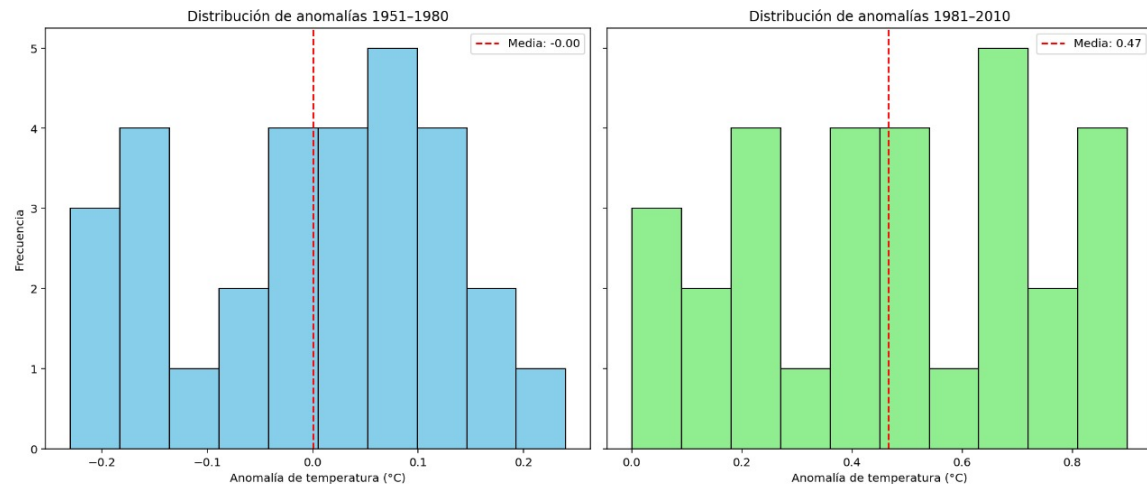
Rango de anomalía (°C)	Frecuencia (1981–2010)
0.04	1
0.05	1
0.13	1
0.14	1
0.19	1
0.25	2
0.26	1
0.27	1
0.37	3
0.41	1
0.48	1
0.50	1
0.52	1
0.53	1
0.58	1
0.64	1
0.66	1
0.68	1
0.71	2
0.72	1
0.75	1
0.81	1
0.85	2

Cuadro 2: Tabla de frecuencias de anomalías de temperatura (1981–2010).

Pregunta 1.2.2

Con las tablas de frecuencias: - Construye dos histogramas (1951–1980 y 1981–2010) mostrando la distribución de anomalías de temperatura.

Respuesta



- Describe las similitudes y diferencias entre las distribuciones de estos dos periodos.

Respuesta

Durante el periodo 1951–1980, la distribución de anomalías de temperatura se concentra en torno a valores cercanos a cero e incluso negativos, lo que refleja un clima relativamente estable en relación con el promedio histórico. El histograma presenta una forma simétrica y sin valores extremos, evidenciando cierta regularidad en los registros anuales. La mayoría de los años muestran anomalías mínimas, lo que sugiere la ausencia de un cambio significativo en la temperatura global. En conjunto, se observa un comportamiento compacto y agrupado, señal de que la variabilidad climática se mantenía dentro de rangos normales.

En contraste, el periodo 1981–2010 exhibe una distribución desplazada hacia valores positivos, lo que indica un aumento sostenido de las anomalías de temperatura. Aunque conserva una forma relativamente simétrica, la media se ubica claramente por encima de cero, evidenciando que la mayoría de los años fueron más cálidos en comparación con el promedio histórico. Asimismo, la dispersión es algo mayor, con un número creciente de años que registran valores elevados. En conjunto, esta comparación pone de manifiesto el efecto del calentamiento global en las últimas décadas.

Pregunta 1.2.3

El artículo del New York Times clasifica el tercio inferior (1er al 3er decil) como “frío” y el tercio superior (7° al 10° decil) como “caliente”. - Usa la función `np.quantile` (numpy) en Python para encontrar los valores correspondientes a los deciles 3 y 7 en 1951–1980.

Respuesta

Decil 3 (30 %): -0.06°C

Decil 7 (70 %): 0.08°C

Pregunta 1.2.4

Usando los valores de la Pregunta 3, cuenta cuántas anomalías se consideran “calientes” en 1981–2010 y exprésalo como porcentaje. - ¿Esto sugiere que experimentamos temperaturas altas más frecuentemente en 1981–2010?

Respuesta

Acorde a los resultados que nos arroja la operación dentro del código, entre 1981 y 2010, hay al menos 27 años de los 30, en los cuales se registran temperaturas mas altas de lo que se estimaba, esto significa que el 90% de los años en este intervalo de tiempo experimentaron temperaturas diferentes a lo pronosticado e incluso de lo que venia siendo normal.

Pregunta 1.2.5

El artículo discute si las temperaturas se han vuelto más variables con el tiempo. - Calcula la media y varianza de las temperaturas en cada estación (DJF, MAM, JJA, SON) para 1921–1950, 1951–1980 y 1981–2010.

Respuesta

	1921–1950		1951–1980		1981–2010	
	Media	Varianza	Media	Varianza	Media	Varianza
DJF	-0.042	0.057017	-0.002333	0.050384	0.522333	0.079944
MAM	-0.055667	0.0314116	0.000333	0.025447	0.508667	0.075198
JJA	-0.066333	0.0215206	0.000667	0.0145926	0.398667	0.067929
SON	0.068333	0.0284351	-0.001333	0.026384	0.427	0.110698

Cuadro 3: Medias y varianzas de anomalías de temperatura por estaciones y periodos.

- Compara las varianzas. ¿Las temperaturas parecen más variables en los periodos recientes?

Respuesta

Al analizar las varianzas de las anomalías de temperatura en las estaciones DJF, MAM, JJA y SON para los periodos 1921–1950, 1951–1980 y 1981–2010, se observa que los cambios en la variabilidad no son muy marcados. En los dos primeros periodos, las varianzas se mantienen relativamente estables, lo que indica que las fluctuaciones de temperatura giraban en torno al promedio sin grandes alteraciones. En el periodo más reciente, 1981–2010, las varianzas muestran ligeros aumentos en algunas estaciones, pero no de manera generalizada ni significativa. Lo que sí resulta evidente es el aumento constante de las medias, que se desplazan hacia valores positivos. Esto demuestra que el cambio principal no es un aumento en la variabilidad, sino un calentamiento sostenido. En otras palabras, el clima no se volvió mucho más variable, sino claramente más calido.

Pregunta 1.2.6

Con base en el artículo y tus respuestas, ¿aconsejarías al gobierno gastar más recursos en mitigar los efectos de eventos climáticos extremos?

Respuesta

Sí, sería aconsejable que el gobierno destine más recursos a mitigar los efectos de los eventos climáticos extremos. Aunque el análisis muestra que la variabilidad de las temperaturas no ha aumentado de forma significativa, las anomalías positivas son cada vez más frecuentes, lo que significa que el planeta se está calentando de manera sostenida. Este incremento de la temperatura media favorece la ocurrencia de fenómenos como olas de calor, sequías, tormentas más intensas y deshielos acelerados, cuyos impactos sociales y económicos son muy altos.

Invertir en mitigación y adaptación permitiría reducir riesgos en salud pública, agricultura, infraestructura y recursos hídricos. Además, prepararse frente a estos cambios puede ser más rentable a largo plazo que enfrentar los costos de los desastres climáticos una vez ocurren. En conclusión, aunque no se observe una variabilidad extrema mucho mayor, el desplazamiento hacia un clima más cálido hace urgente la acción gubernamental para proteger a la población y asegurar la sostenibilidad futura.

Parte 1.3. CO₂ y su relación con la temperatura

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero. Su concentración en la atmósfera ha aumentado de manera constante desde mediados del siglo XX, y este cambio está fuertemente vinculado con la actividad humana.

El observatorio de Mauna Loa (Hawái) es una de las series de datos más conocidas para medir estos cambios. Vamos a utilizar la siguiente base de datos:

<https://tinyco.re/3763425>

Pregunta 1.3.1

Los datos de CO₂ se registraron en un observatorio en Mauna Loa. - ¿Consideras que son una representación confiable de la atmósfera global? Explica usando el artículo del Earth System Research Laboratory.

Respuesta

El artículo señala que las mediciones de CO₂ en el Observatorio de Mauna Loa son una representación confiable de la atmósfera global. Esta confiabilidad se debe, en primer lugar, a la ubicación del observatorio en las laderas del volcán Mauna Loa, a unos 3400 metros de altitud, lo que le permite captar masas de aire representativas no solo del hemisferio norte, sino también de gran parte del planeta. Además, el entorno del observatorio, compuesto por extensiones de lava desnuda sin vegetación ni suelo, facilita la medición del aire de fondo o línea base, es decir, aire que ha estado en circulación durante días y que no presenta la influencia inmediata de emisiones o absorciones locales de CO₂.

A esto se suma un proceso de calibración riguroso y constante, que garantiza la precisión de los registros y la posibilidad de compararlos con otras mediciones independientes. De hecho, las comparaciones con la serie realizada por la Institución Scripps muestran diferencias mínimas, menores a 0.2 ppm, lo que refuerza aún más su fiabilidad. En conjunto, todos estos elementos permiten concluir que los datos de Mauna Loa reflejan con gran precisión los niveles de CO₂ presentes en la atmósfera global, en particular en las capas superiores del hemisferio norte.

Pregunta 1.3.2

Las variables trend e interpolated son parecidas, pero no idénticas. - Explica la diferencia en tus propias palabras. - ¿Por qué podría haber variación estacional en los niveles de CO₂?

Respuesta

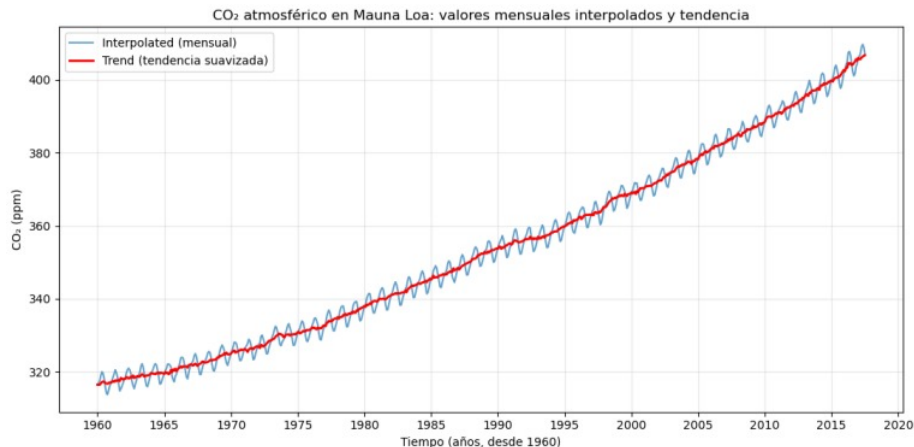
La variable interpolated corresponde a los valores de CO₂ ajustados para que no haya vacíos en la serie, ya que en algunos meses los promedios mensuales no se pudieron calcular y aparecen como valores faltantes. De esta manera, la columna interpolada nos da una estimación continua de la concentración de CO₂ mes a mes. Por otro lado, la variable trend no busca mostrar los valores exactos de cada mes, sino reflejar la evolución de largo plazo de la serie. Para ello elimina las fluctuaciones cortas, incluidas las variaciones estacionales, y nos permite observar con mayor claridad la tendencia general del aumento en la concentración de CO₂.

La variación estacional en los niveles de este gas se explica principalmente por los ciclos naturales de la vegetación. Durante la primavera y el verano en el hemisferio norte, cuando la fotosíntesis es más intensa, las plantas absorben grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera, lo que provoca una disminución en las concentraciones. En cambio, en otoño e invierno, la fotosíntesis se reduce y la descomposición de materia orgánica libera CO₂, aumentando los niveles en el aire. Como la mayor parte de la masa terrestre y de la vegetación se encuentra en el hemisferio norte, este patrón se refleja de forma clara en los datos globales.

Pregunta 1.3.3

Grafica una línea con los niveles de CO₂ (interpolated y trend) en el eje vertical y el tiempo (desde enero de 1960) en el eje horizontal. - Etiqueta los ejes, incluye la leyenda y titula el gráfico. - ¿Qué sugiere este gráfico sobre la relación entre CO₂ y tiempo?

Respuesta

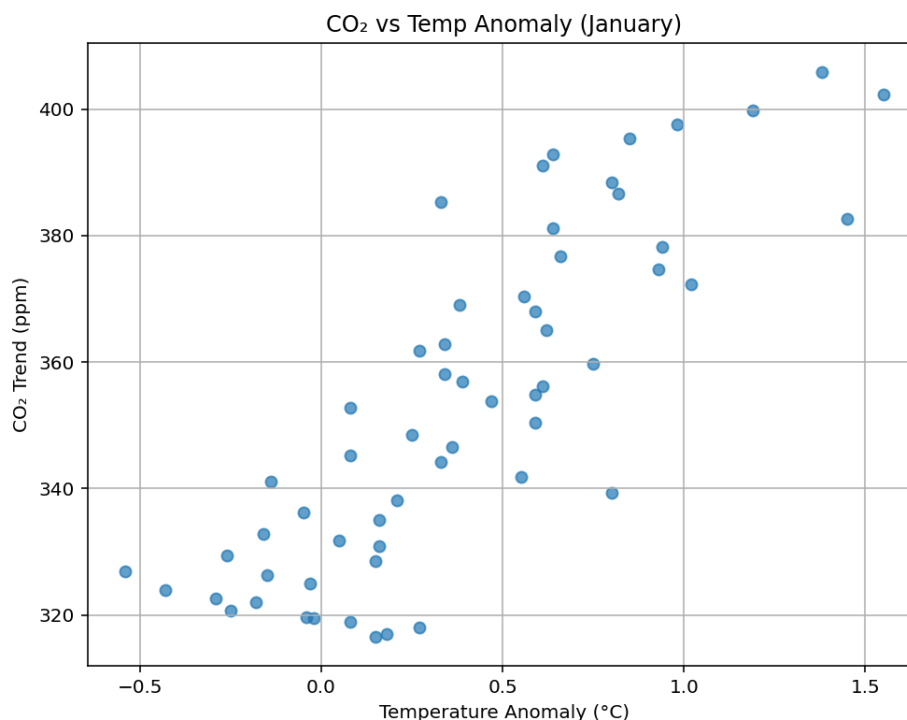


El gráfico muestra que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de manera constante desde 1960 hasta 2020. La línea de tendencia indica un crecimiento sostenido y continuo a lo largo del tiempo, mientras que la serie mensual revela pequeñas oscilaciones estacionales. Estas variaciones se deben principalmente a los ciclos naturales de la vegetación, que absorbe CO₂ en primavera y verano y lo libera en otoño e invierno. En conjunto, el gráfico sugiere que el CO₂ presenta un patrón ascendente de largo plazo, con fluctuaciones estacionales regulares superpuestas a esa tendencia creciente.

Pregunta 1.3.4

Elige un mes y añade los datos de la tendencia del CO₂ al conjunto de anomalías de temperatura de la Parte 1.1. - Haz un diagrama de dispersión (CO₂ en el eje vertical, anomalía de temperatura en el horizontal). - Calcula el coeficiente de correlación de Pearson. - Interpreta el resultado y discute sus limitaciones.

Respuesta



El Coeficiente de Correlación de Pearson que se arroja el modelo es de 0.835 esto indica una relación positiva fuerte entre las concentraciones de CO₂ (tendencia) y las anomalías de temperatura en enero. Esto significa que, a medida que los niveles de CO₂ aumentan, también tienden a aumentar las temperaturas anómalas en el hemisferio norte.

Por otra parte, el P-Valor corresponde a $3,909e^{-16}$ el cual, al ser menor a 0.05 permite rechazar la hipótesis nula de que no existe relación entre las dos variables. Por lo cual, la probabilidad de que esta correlación se deba al azar es casi nula.

En cuanto a la validez interna, aunque la correlación encontrada es alta y estadísticamente significativa, este tipo de análisis no permite establecer una relación causal directa entre las concentraciones de CO₂ y las anomalías de temperatura. Es decir, la existencia de una correlación fuerte no descarta la influencia de factores externos o no observados, ni asegura que el cambio en una variable sea consecuencia de la otra.

Respecto a la validez externa, los resultados se limitan al mes de enero, lo que restringe

la posibilidad de generalizar las conclusiones a otros meses o al comportamiento anual del clima. Además, los datos analizados corresponden a promedios históricos de largo plazo y a nivel hemisférico, lo que implica que los hallazgos no necesariamente reflejan variaciones locales o de corto plazo. Por tanto, aunque el análisis es útil para ilustrar la asociación entre CO₂ y temperatura, sus resultados deben interpretarse con cautela, considerando que no implican causalidad y que su alcance está acotado en términos de generalización.

Pregunta 1.3.5

Aunque dos variables estén fuertemente correlacionadas entre sí, esto no significa necesariamente que el comportamiento de una sea el resultado de la otra (característica conocida como causalidad). Las dos variables podrían estar correlacionadas de manera espuria. Ver video TEDx para más detalles.

- Da un ejemplo de correlación espuria relacionado con CO₂ o anomalías de temperatura.

Respuesta

Un caso de correlación espuria podría surgir si se encontrara una alta correlación entre el aumento de las concentraciones de CO₂ atmosférico y el crecimiento del uso de internet en el mundo. Ambas variables muestran una tendencia creciente en el tiempo, por lo que al compararlas podrían dar un coeficiente de correlación elevado. Sin embargo, no existe una relación causal directa entre el número de usuarios de internet y las anomalías de temperatura: la asociación se explica por el hecho de que ambas variables comparten una tendencia ascendente a lo largo del mismo periodo.