



**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA  
PRODUCTIVIDAD LABORAL  
ESTUDIO DE CASO PARA CHILE**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO**

**Alumna: Christian Rojas Cofré  
Profesor Guía: Javier Núñez, Ph.D.**

**Santiago, agosto 2023**

# Impacto del cambio climático en la productividad laboral

## Estudio de caso para Chile

Christian Ignacio Rojas Cofré

Profesor Guía: Javier Núñez

agosto de 2023

### Resumen

En este estudio de caso, se analiza el impacto del cambio climático sobre la productividad laboral para la economía de Chile, con base en un marco de investigación centrado en la literatura más actualizada sobre los efectos de estrés por calor ambiental en el rendimiento de trabajo por hora. Utilizando el índice de temperatura de bulbo húmedo (WGTB) para medir el estrés por calor, se lleva a cabo un análisis a nivel regional, trimestral y anual desde 2013 a 2022, identificando dos sectores económicos: los expuestos al calor y no expuestos. Se utilizan diversas variables sociodemográficas y climáticas para controlar los efectos en la productividad laboral. Los resultados nacionales muestran que (a) un aumento de 1°C en el índice WGTB puede tener un efecto del 2,6% en la productividad laboral del país, (b) también se puede destacar que los impactos negativos se concentran principalmente en sectores de trabajo al aire libre, lo cual se relaciona con actividades como la construcción, minería, agricultura y pesca principalmente, (c) los resultados territoriales indican que las regiones que presentan un mayor impacto en la productividad laboral se encuentran en la zona norte y centro norte del país, las cuales presentan las mayores temperaturas del país. Estos hallazgos, como una primera aproximación, resaltan la importancia de considerar tanto los efectos del cambio climático en la productividad laboral como sus implicancias económicas en el país, lo que puede tener importantes consecuencias para la formulación de políticas y estrategias de adaptación.

### Abstrac

*In this case study, we analyze the impact of climate change on labor productivity for Chile's economy, based on a research framework focused on the most updated literature regarding the effects of environmental heat stress on hourly work capacity. Using the Wet Bulb Globe Temperature (WGTB) index to measure heat stress, we conduct a regional, quarterly, and annual analysis from 2013 to 2022, identifying two economic sectors: those exposed to heat and those not exposed. Various sociodemographic and climatic variables are used to control for their effects on labor productivity. National results show that (a) a 1°C increase in the WGTB index may lead to a 2.6% decrease in the country's labor productivity, (b) negative impacts are concentrated mainly in outdoor work sectors, such as construction, mining, agriculture, and fishing, (c) territorial findings indicate that regions with the highest impact on labor productivity are located in the northern and central-northern areas of the country, which experience the highest temperatures. These findings highlight the importance of considering both the effects of climate change on labor productivity and its economic implications for the country, which could have significant consequences for policy formulation and adaptation strategies.*

### ***Puntos destacados***

1. Impacto del cambio climático en la productividad laboral en Chile: El estudio revela que un aumento de 1°C en el índice de Temperatura de Bulbo Húmedo Globe (WGTB) puede llevar a una reducción del 2,6% en la productividad laboral del país, resaltando los significativos efectos del estrés por calor ambiental en los trabajadores.
2. Sectores al aire libre afectados: Los impactos negativos del cambio climático en la productividad laboral son especialmente prominentes en sectores de trabajo al aire libre, como la agricultura y la pesca, donde los trabajadores están expuestos a condiciones extremas de calor ambiental.
3. Variaciones regionales: El análisis muestra que las regiones ubicadas en la zona y centro norte de Chile, las cuales concentran las mayores temperaturas, experimentan el impacto negativo más significativo en la productividad laboral debido al cambio climático.
4. Importancia de considerar factores sociodemográficos: El estudio incorpora diversas variables sociodemográficas para controlar sus efectos en la productividad laboral, proporcionando una comprensión integral de la interacción entre las condiciones climáticas y las características de la fuerza laboral.
5. Índice WBGT de NIOSH como medida confiable: La investigación utiliza el índice WBGT del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), una medida bien establecida y validada para evaluar los impactos del estrés por calor, lo que aumenta la credibilidad de los hallazgos del estudio.

### ***Bullet Points***

1. Impact of Climate Change on Labor Productivity in Chile: The study reveals that a 1°C increase in the Wet Bulb Globe Temperature (WGTB) index may lead to a 2.6% reduction in the country's labor productivity, highlighting the significant effects of environmental heat stress on workers.
2. Affected Outdoor Sectors: Negative impacts of climate change on labor productivity are particularly prominent in outdoor work sectors, such as agriculture and fishing, where workers are exposed to extreme environmental heat conditions.
3. Regional Variations: The analysis shows that regions located in the northern and central-northern areas of Chile, which experience the highest temperatures, are most significantly affected by the negative impact on labor productivity due to climate change.
4. Importance of Considering Sociodemographic Factors: The study incorporates various sociodemographic variables to control for their effects on labor productivity, providing a comprehensive understanding of the interaction between climatic conditions and workforce characteristics.
5. NIOSH WBGT Index as a Reliable Measure: The research uses the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) WBGT index, a well-established and validated measure for assessing heat stress impacts, enhancing the credibility of the study's findings.

## Contenidos

I.	Introducción .....	5
II.	Marco de investigación.....	7
	a. Pregunta de investigación.....	7
	b. Revisión de literatura.....	8
III.	Marco teórico .....	12
IV.	Modelo Empírico.....	14
V.	Datos.....	16
VI.	Resultados.....	18
	a. Robustez .....	20
	b. Análisis de sensibilidad .....	21
	c. Discusión de los resultados.....	25
	d. Propuestas de acción.....	28
VII.	Conclusiones.....	29
VIII.	Bibliografía.....	31
IX.	Anexos.....	33

## I. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad. El aumento de la temperatura promedio a nivel mundial y los eventos climáticos extremos tienen efectos significativos en la economía y en la vida de las personas. Uno de los efectos más importantes es su impacto en la productividad laboral, ya que la exposición a temperaturas extremas puede tener efectos negativos en la salud y el bienestar de los trabajadores, lo que a su vez puede reducir el rendimiento del trabajo. La evaluación de estos efectos es crucial para informar a los tomadores de decisiones sobre las políticas y medidas que se deben implementar para mitigar los efectos del cambio climático en la economía y la sociedad en general.

En el mismo sentido, la medición de la productividad laboral es crucial para evaluar los efectos de las políticas públicas y las intervenciones laborales en la economía porque permite identificar si estas políticas están logrando mejorar la eficiencia y la competitividad de las empresas, lo que a su vez contribuye al crecimiento económico y a la generación de empleo. Además, la medición de la productividad laboral puede ayudar a identificar problemas de calidad en el empleo y a diseñar políticas que mejoren las condiciones laborales y la calidad de vida de los trabajadores.

Existen varios estudios sobre cambio climático y su impacto en la economía, gran parte de estos trabajos se enfoca en la producción, medida como Producto Interno Bruto (PIB) o PIB per cápita, y la productividad laboral, medida en número de ocupados o número de horas efectivas trabajadas. La diferencia principal entre un estudio basado en productividad laboral y otro basado en producción es que la productividad laboral mide la eficiencia en el uso de los recursos humanos, mientras que la producción mide la eficiencia en el uso de los recursos en general. Es decir, la productividad laboral se enfoca en la relación entre la cantidad de producción y la cantidad de trabajo que se requiere para generarla. Por otro lado, la producción puede incluir otros recursos, como maquinaria, materias primas, energía, entre otros.

En términos de innovación, este estudio puede ser relevante en el contexto actual de cambio climático, ya que permite evaluar cómo la temperatura puede afectar la productividad laboral y, por lo tanto, la capacidad de las empresas para enfrentar los desafíos climáticos para Chile. Los aportes que genera esta tesis guardan relación con aportar nueva información a la literatura del país, como son la incorporación de variables climáticas y sociodemográficas al modelo, además de realizar un análisis estructural, considerando distintos niveles (por zona o territorio, con temporalidad trimestral, por actividad económica y variables sociodemográficas), controlando el efecto directo que podría tener los trabajadores en la producción y el efecto del clima. Por otra parte, se incluye el índice normalizado de la vegetación, al cual se quiere probar su significancia en este tipo de modelos, pues entrega distinciones valiosas sobre la estructura geográfica de las regiones.

Es relevante realizar un estudio en Chile debido a que el país es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático y se espera que los impactos sean cada vez más significativos. Además, la productividad laboral es un aspecto clave para la economía del país, especialmente en los sectores más afectados por el cambio climático. *IPCC (2014); IPCC (2021)*

En los últimos cien años la temperatura media del país ha aumentado en 0.5 grados Celsius, con una correspondiente disminución de las precipitaciones, en donde estas tendencias se han ido acrecentando en el tiempo.

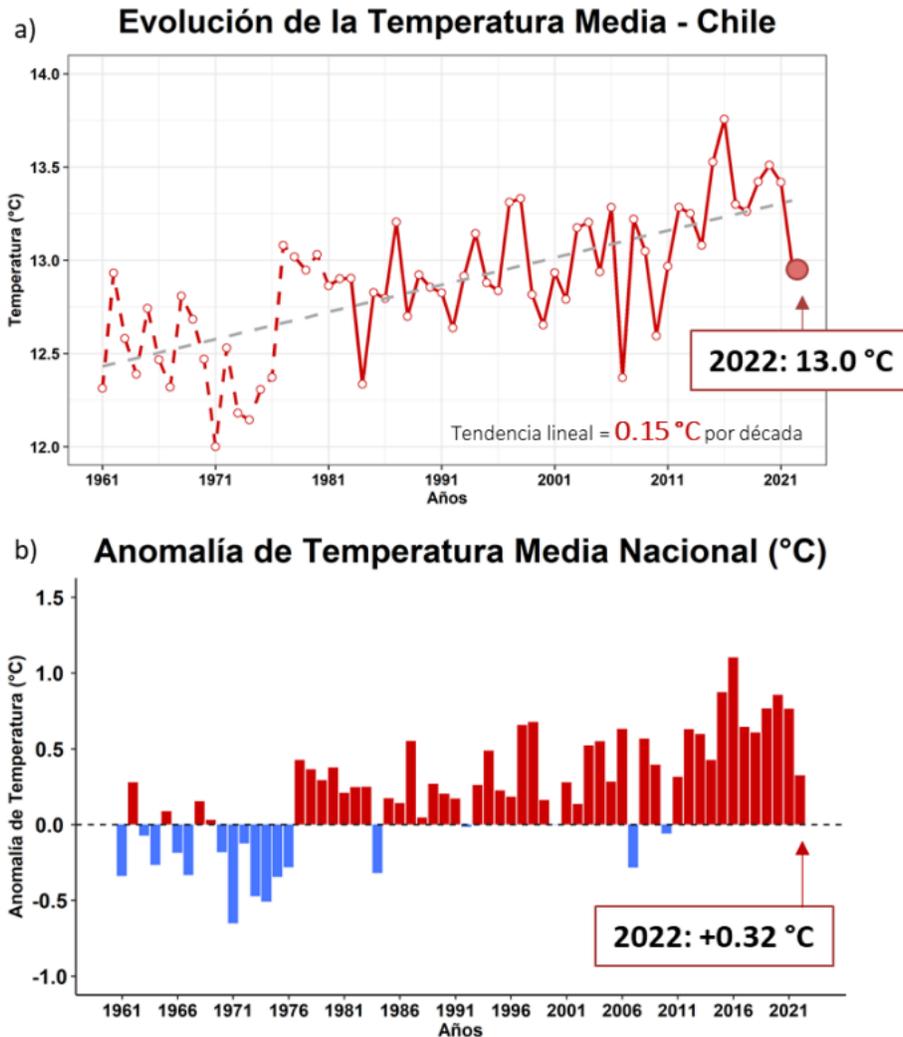


Figura 1: a) Promedio anual de la temperatura media en Chile continental. La línea segmentada roja es el promedio histórico con sesgo corregido y la línea segmentada gris indica la tendencia lineal. b) temperatura media en términos de anomalías absolutas en °C respecto al periodo 1961-1990. Las barras rojas indican calentamiento y las azules enfriamiento. Fuente: Reporte evolución del clima del Ministerio de Medio Ambiente de Chile (2022).

Para este estudio se utilizaron diversas bases de datos del Instituto Nacional de Estadísticas, Banco Central de Chile, Dirección meteorológica de Chile e imágenes Satelitales. Para más información ver Anexo.

A continuación, se resumen los informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), para tener una idea general de la evolución de los reportes en el tiempo.

Tabla 1. Resumen IPCC

Resumen de los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático	
IPCC (2014)	Este informe de evaluación del IPCC describe los efectos del cambio climático en los sistemas naturales y humanos, y destaca la necesidad de adaptación. Se señala que las altas temperaturas y el estrés térmico pueden afectar negativamente la

	productividad laboral en las industrias agrícola y de la construcción, lo que se suma a otros efectos del cambio climático.
IPCC (2018)	Este informe especial del IPCC se centra en los impactos del calentamiento global de 1.5°C en comparación con 2°C. Se destaca la importancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y se describe cómo el cambio climático puede afectar la seguridad alimentaria, la salud humana y la productividad laboral.
IPCC (2021)	Este informe de evaluación del IPCC se centra en los fundamentos físicos del cambio climático, incluyendo el aumento de las temperaturas globales. Se indica que las altas temperaturas pueden afectar la salud y la productividad laboral, y se describe cómo las olas de calor pueden aumentar el riesgo de enfermedades y muertes relacionadas con el calor.

Fuente: Elaboración propia, con información IPCC.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se hace una revisión de la literatura haciendo énfasis en los aportes del estudio a la literatura ya existente, en la Sección 3 se presenta el marco teórico, en la Sección 4 se presenta el modelo empírico, la Sección 5 describe los datos utilizados, y en la Sección 6 se describen los resultados y propuestas de acción, y finalmente la Sección 7 resume las principales conclusiones. En el último apartado se encuentra la bibliografía citada y los anexos para revisión de las gráficas descriptivas.

## II. Marco de investigación.

En el contexto de Chile, surge la interrogante sobre cómo los cambios de temperatura afectan la productividad laboral en diferentes sectores económicos y regiones del país. Se plantean cuatro hipótesis fundamentales para analizar esta relación. En primer lugar, se propone que a medida que aumenta la temperatura, la productividad laboral tiende a disminuir. Además, se sugiere que los trabajadores que se desempeñan en sectores expuestos a condiciones climáticas extremas, como la agricultura y la construcción, son más vulnerables a los efectos negativos de la temperatura en su capacidad de trabajo. Asimismo, se hipotetiza que la relación entre la temperatura y la productividad laboral puede variar según la región geográfica en Chile. Por último, se considera que factores como la educación y la edad de los trabajadores pueden influir en su capacidad de adaptación a condiciones climáticas extremas y, por ende, en su productividad laboral.

### a. Pregunta de investigación.

***¿Cómo afectan los cambios de temperatura en la productividad laboral a los diversos sectores económicos y regiones de Chile?***

- H1: A medida que aumenta la temperatura, la productividad laboral disminuye.
- H2: Los trabajadores que se desempeñan en sectores expuestos a las condiciones climáticas extremas (como la agricultura y la construcción) son más vulnerables a los efectos negativos de la temperatura en su productividad laboral.
- H3: La relación entre la temperatura y la productividad laboral varía según la región geográfica de Chile.
- H4: La educación y la edad de los trabajadores son factores que influyen en la capacidad de adaptación a las condiciones climáticas extremas y, por lo tanto, en su productividad laboral.

### Canales de distribución e hipótesis

1. ¿Serán las **regiones del país con menores recursos** las más afectadas con el cambio climático por la baja capacidad de adaptación?
  - Regiones con menos recursos tienen menores accesos a capital físico y financiero en respuesta a los impactos ambientales. *Delgado, et al (2015)*
  - Dado lo anterior tendrían una reacción más lenta a la adaptación.
2. ¿Las **regiones geográficamente más expuestas** a altas temperaturas pueden tener mayores impactos en los aumentos de temperatura?
  - Generalmente los hogares más pobres están ubicados en áreas más propensas al calor. *Huang, S., et al. (2019)*
  - En la medida en que un aumento de grado adicional en las temperaturas promedio lleve a una incidencia desproporcionadamente mayor de días de calor extremo en regiones que ya sufren estrés por calor. Estas zonas geográficas extremas pueden sufrir una mayor parte de los efectos negativos del aumento de la temperatura. *IPCC. (2018)*
3. ¿Cuál sería el **nivel de impacto de la productividad laboral en las actividades económicas** del cambio en la temperatura?
  - Las actividades más expuestas a los efectos del cambio climático serían las más afectadas (actividades en exteriores, como la agricultura, construcción, minería). *IPCC. (2014)*
  - Estas actividades y ocupaciones generalmente tienen trabajadores de menores recursos (educación), mayor edad, mayores problemas de salud. *IPCC. (2014)*
  - Para el caso agrícola, tiene un doble impacto, tanto en la productividad de los trabajadores como en el capital (terrenos), pues estos se ven afectados en sus niveles de producción. *Rosenzweig, et al. (2014)*

Los resultados de esta investigación son fundamentales para comprender cómo el cambio climático y las variaciones de temperatura afectan la productividad laboral en Chile. Se han planteado hipótesis significativas que vinculan el aumento de la temperatura con la disminución de la productividad, especialmente en sectores expuestos a condiciones climáticas extremas. Asimismo, se ha resaltado la importancia de considerar las particularidades geográficas y demográficas de las regiones del país en relación con su capacidad de adaptación y los posibles impactos en la productividad laboral. Estos hallazgos contribuyen al entendimiento de las implicancias económicas y sociales que el cambio climático puede generar en el ámbito laboral, lo que es relevante para la formulación de políticas y estrategias de adaptación adecuadas a nivel nacional. A continuación, se expone la literatura revisada enmarcando las herramientas utilizadas y posibles resultados.

#### b. Revisión de literatura.

Según el Instituto de Salud Pública de Chile, Protocolo para la Medición de Estrés Térmico. 2° versión, 2020, la exposición ocupacional al calor y los problemas de sobrecarga térmica que de ella pueden derivar son comunes en algunos lugares de trabajo, y producen en el organismo dos tipos de carga térmica: Carga externa o ambiental y carga interna o metabólica.

La carga térmica ambiental corresponde al resultado de la acción de dos mecanismos: intercambio calórico por convección-conducción e intercambio por radiación. Además, el organismo genera calor debido al calor metabólico que es una combinación del calor generado por el metabólico basal y el resultado de la actividad física (Instituto de Salud Pública de Chile, 2020).

En la literatura se distinguen tres mecanismos principales a través de los cuales el calor afecta la productividad de la fuerza laboral (Heal&Park, 2016), donde se distinguen: (i) la oferta laboral, es decir el total de horas que los individuos eligen trabajar, (ii) el esfuerzo o gasto en energía (Watts) de los trabajadores y (iii) la productividad laboral, es decir la disminución de la efectividad del trabajo. Este trabajo tendrá su foco en el tercer punto, donde la mayoría de las normas utilizan la “temperatura del globo y bulbo húmedo” (WGTB por sus siglas en inglés) para cuantificar diferentes niveles de estrés por calor y definir el porcentaje de una hora de trabajo típica que una persona puede trabajar.

Estos estándares están regulados o basados en el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) que es una agencia federal de los Estados Unidos responsable de realizar investigaciones y proporcionar recomendaciones para prevenir enfermedades y lesiones relacionadas con el trabajo. En 1986, NIOSH publicó una serie de definiciones para las industrias expuestas al calor, donde estipula un nivel de WBGT por encima del cual no se debe esperar que ningún trabajador lleve a cabo tareas.

Según NIOSH, las industrias expuestas al calor son aquellas en las que los trabajadores están expuestos a temperaturas ambientales elevadas que pueden resultar en estrés térmico. Estas industrias incluyen, pero no se limitan a: Agricultura, Minería, Fundición de Metales, Construcción, Fabricación de Vidrio, productos de caucho y plástico, procesamiento de alimentos y bebidas, producción de energía eléctrica, trabajados en exteriores. Los límites de exposición al calor para proteger a los trabajadores de estas industrias, de enfermedades y lesiones relacionadas con el calor se basan en la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del aire. Además, NIOSH ha proporcionado recomendaciones para los empleadores y los trabajadores sobre cómo prevenir enfermedades y lesiones relacionadas con el calor en el lugar de trabajo (Healt (US), 2018).

Por otra parte, según Ed Day, et., al (2019) que hace una revisión de la literatura acabada para probar el modelo basado en WGTB, encuentra que todos los estudios muestran reducciones sustanciales en la productividad laboral para aumentos de la temperatura por encima de un cierto umbral. Los conocimientos de estos estudios empíricos suelen medir la pérdida de productividad como un valor porcentual de la productividad total. En los estudios revisados la medida más común utilizada para medir la exposición al calor es el índice de temperatura de globo y bulbo húmedo.

El WBGT es un promedio ponderado de diferentes medidas de calor (bulbo húmedo, globo seco y temperatura del aire) que refleja el efecto combinado de la temperatura, la humedad, la luz solar y el viento, en diversos tipos de trabajadores (*Lemke y Kjellstrom, 2012*). Si bien no es la única medida de calor existente, es un método simple de utilizar, común, lo cual es importante cuando se quiere realizar comparaciones entre otros estudios y es ampliamente entendido para evaluar el estrés por calor. (*D’Ambrosio Alfano, Palella y Riccio, 2012*)

A continuación, se muestra una serie de estudios que exploran estas metodologías a nivel nacional, regional y a escala global, así como también para contextos específicos de trabajo.

Tabla 2. Resumen estudios internacionales relacionados.

Estudio	Contexto	Resultados
Kjellstrom, Lemke, Otto, Hyatt, y Dear (2014)	Modelos del <b>impacto del calor en la productividad laboral por región en 1975, 2030 y 2050 para sectores con diferentes intensidades de trabajo:</b> agricultura (alta), industria (moderada), servicios (ligera)	El cambio climático <b>reducirá las horas disponibles de trabajo en todas las regiones</b> , con una pérdida de capacidad de hasta el 5% en las áreas afectadas para 2050. Los mayores impactos se observan en África subsahariana, Asia del Sur, Asia Sudoriental y Oceanía.
Kopp et al. (2014)	Modelos de la reducción de la proporción de tiempo de trabajo durante los meses más calurosos en los Estados Unidos hasta 2099	Bajo un escenario de alto cambio climático, los aumentos de calor llevarían a <b>pérdidas significativas de productividad de hasta el 3% en casi todo los EE. UU.</b>
Costa, Floater, Hooyberghs, Verbeke y De Ridder (2016)	Modelos del impacto del <b>estrés térmico en la productividad laboral en Antwerp, Bilbao y Londres hasta 2100</b> , incluido un análisis sectorial de los costos esperados	En un año cálido del futuro (2081-2100), las pérdidas totales para la economía urbana oscilan entre el 0,4% del VAB para Londres y el 9,5% para Bilbao. Algunos sectores están más expuestos a pérdidas económicas: por ejemplo, los servicios financieros, la administración pública y el comercio minorista son los más expuestos en
Kovats, Lloyd, Hunt y Watkiss (2011)	Evalúa los <b>posibles impactos y costos económicos e impactos en la salud en Europa debido al cambio climático en 2080</b> , incluidos los efectos en la productividad laboral	En un escenario, se estima que Europa del Sur verá una pérdida media de productividad entre el 0,4% y el 0,9% para 2080. Las pérdidas totales de productividad para Europa podrían costar entre 300 y 700 millones de euros por año para 2080 (menos en un escenario con mayores esfuerzos de mitigación).
Roson y Sartori (2016)	Estima los daños relacionados con la reducción de la productividad laboral para 140 regiones en la base de datos del Proyecto de Análisis	Se proyecta que un <b>aumento de 3°C en la temperatura provocará costos de hasta el 8% del PIB</b> en algunos países debido a los impactos en la

	Comercial Global para un aumento de la temperatura de 3°C	productividad laboral, siendo África Occidental la región más afectada.
Healt y Park (2013)	Impacto entre la productividad laboral y la temperatura utilizando datos a nivel país, desde 1950 a 2005.	Los años más cálidos que e promedio conducen a una menor producción en los países cálidos, pero conducen a una mayor producción en los países más fríos. La relación entre el cambio de productividad laboral es alrededor del 3% o 4% en los países en estudio.
Kjellstrom et al. (2016)	Modela pérdidas globales (por región) debido a los aumentos de temperatura inducidos por el cambio climático comparando 1995 con 2085	Se prevé que las regiones más afectadas experimenten reducciones en el total de horas de trabajo por persona de entre el 1% al 10%. Se prevé que América del Sur, África, Sur de Asia, el Sudeste de Asia y Oceanía sean las regiones mas afectadas.

Fuente: *Elaboración propia, con información recopilada por Ed Day., et. Al (2019).*

Los resultados indican que un aumento de 1 grado Celsius en la temperatura puede tener importantes impactos negativos en la productividad laboral. En todas las regiones, se prevé una reducción de las horas disponibles de trabajo, con pérdidas de capacidad de hasta el 5% en áreas afectadas para 2050. En los Estados Unidos, un escenario de alto cambio climático podría llevar a pérdidas de productividad de hasta el 3%. En Europa, se estima que, en un año cálido del futuro, las pérdidas totales para la economía urbana oscilan entre el 0.4% y el 9.5% (Kjellstrom et al. (2016)). Además, se proyecta que un aumento de 3°C en la temperatura puede tener costos de hasta el 8% del PIB en algunos países debido a los impactos en la productividad laboral, siendo África Occidental la región más afectada. Estos resultados resaltan la necesidad de tomar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático para proteger la productividad laboral y la economía en general.

El estudio de la productividad laboral en el contexto del cambio climático es importante además porque puede ayudar a identificar los impactos directos e indirectos del clima extremo en la economía de una región o país. Además, puede proporcionar información valiosa para la formulación de políticas y estrategias de adaptación al cambio climático y para la prevención de posibles pérdidas económicas y de empleo en los sectores más afectados. *Liu et al. (2021), Park (2019), y Kjellstrom et al. (2009).*

Por otra parte, Park (2019) identificó dos hechos estilizados y uno factual, relacionados con la necesidad de estudiar los efectos del cambio climático en la productividad laboral:

1. Interacción entre temperatura y rendimiento del trabajo: Se observó una disminución en la sensibilidad a corto plazo de la temperatura en climas más cálidos y extremos. Esto sugiere que la adaptación puede desempeñar un papel importante en reducir los impactos

económicos reales del cambio climático, específicamente en relación con los efectos del estrés térmico en el cuerpo humano.

2. Temperatura y salud económica: Se encontró una relación significativa entre los días de temperatura y la producción en los Estados Unidos, una economía altamente desarrollada y tecnológicamente avanzada. Esto subraya la dependencia climática de gran parte de la actividad económica. A pesar de un alto nivel de desarrollo económico, se observaron pérdidas de productividad impulsadas por la temperatura, lo que sugiere que incluso en países con grandes cantidades de mano de obra, como India o China, podrían experimentar pérdidas de productividad laboral relacionadas con el clima.
3. Aumento constante de las temperaturas (hecho factual): Se menciona que las temperaturas están aumentando constantemente debido al cambio climático. Este hecho resalta la importancia del estudio, ya que las condiciones térmicas más extremas y prolongadas pueden tener impactos significativos en el rendimiento de los trabajadores.

En Chile, los estudios más recientes encontrados en la revisión de literatura investigada buscan efectos macroeconómicos de la temperatura sobre la economía. En esto destaca el Banco Central de Chile (2018), donde en su documento de trabajo analiza el impacto de las temperaturas extremas y otras variables climáticas como las precipitaciones en la producción de bienes y servicios del país, encontrando un efecto no menor en sus estimaciones.

Hughes, A.M. (2023) analizó el efecto de la sequía sobre los salarios reales, pobreza y desempleo en Chile, empleando efectos fijos por comuna y año, a nivel país, y por subgrupos. Los resultados sugieren que personas en situación de pobreza son más propensas a vivir en zonas secas y estarían más restringidas en poder mitigar los efectos de la sequía.

Finalmente, la literatura expuesta resalta la importancia de comprender los efectos del cambio climático y el estrés térmico en la productividad laboral. El índice de temperatura de globo y bulbo húmedo (WBGT) se destaca como una medida común para evaluar el estrés por calor en diversos trabajadores. Los estudios empíricos demuestran que el aumento de la temperatura por encima de cierto umbral puede llevar a reducciones significativas en la productividad. Es fundamental establecer límites de exposición para proteger la salud de los trabajadores en industrias expuestas al calor. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de adaptación y prevención para garantizar la sostenibilidad y el bienestar laboral en el contexto del cambio climático.

### III. Marco teórico

En este capítulo, presentamos un marco conceptual teórico económico que se basa en la literatura entregada por el paper de Park (2016). Nuestro objetivo es explorar cómo las condiciones climáticas extremas, en particular el estrés por calor, pueden influir en la productividad laboral y la oferta de trabajo en la economía.

En esta sección, se presenta un modelo teórico que explora la interacción entre el estrés por calor y la productividad laboral en la economía. El objetivo es analizar cómo el estrés por calor puede afectar la productividad laboral y cómo estas variables están relacionadas, considerando que el calor extremo puede tener impactos negativos en el rendimiento económico.

Se considera una función de producción general para las empresas en la economía, donde la producción ( $Y$ ) depende tanto de la productividad laboral ( $A$ ) como de la oferta de trabajo ( $L$ ), la cual incluye tanto las horas trabajadas como el esfuerzo empleado. Para simplificar el análisis, se excluyen los insumos de capital en esta investigación.

Se plantea que la productividad laboral y la oferta de trabajo pueden verse afectadas por la temperatura experimentada en el entorno laboral, lo que sugiere que la producción está relacionada con la temperatura experimentada. Es decir, la función de producción se puede expresar como

$$Y(A, L) = Y[A(T^E), L(T^E)], \text{ donde } T^E \text{ representa la temperatura experimentada.}$$

Se asume que no existen problemas de agente principal ni fricciones en el mercado laboral, de manera que el impacto en los ingresos debido a cambios en la productividad se internaliza completamente. Los trabajadores maximizan su utilidad ( $U$ ), la cual depende positivamente de la producción (ingresos) y negativamente de la oferta de trabajo, el esfuerzo laboral y el estrés por temperatura. Específicamente, el estrés por calor puede generar una utilidad directa ( $\delta U / \delta T^E < 0$ ).

La literatura sobre productividad sugiere que la productividad de las tareas físicas y cognitivas disminuye con temperaturas extremas, tanto de calor como de frío. En este modelo, nos enfocamos en el extremo caluroso de la relación entre la productividad y la temperatura, lo que implica que la productividad laboral disminuye a medida que aumenta el estrés por calor:

$$\delta A / \delta T^E < 0$$

Además, estudios previos indican que la oferta de trabajo, definida como la combinación de horas trabajadas y esfuerzo laboral, reacciona negativamente ante temperaturas extremas debido a la utilidad directa y a una menor productividad:

$$\delta L / \delta T^E < 0$$

Se puede demostrar que, en ausencia de fuertes efectos de ingresos, las desviaciones de la temperatura óptima de termorregulación afectarán las horas de trabajo y el esfuerzo laboral en la misma dirección, lo que implica que los choques de calor reducirán la productividad laboral efectiva, considerando las respuestas de los trabajadores que podrían reasignar su esfuerzo y horas de trabajo en consecuencia.

Por lo tanto, se asume que tanto la productividad laboral ( $\delta A / \delta T^E < 0$ ) como la oferta de trabajo ( $\delta L / \delta T^E < 0$ ) disminuyen con el aumento del estrés por calor, lo que implica que el calor extremo reducirá la producción total debido a esta disminución en la productividad laboral total:

$$\frac{dY(A(T^E), L(T^E))}{dT^E} < 0$$

Los resultados del modelo sugieren que las fluctuaciones en la producción observadas en respuesta a los choques de temperatura deberían considerar los ajustes en la oferta de trabajo y el esfuerzo laboral para obtener una visión completa de cómo el estrés por calor impacta la economía.

A través de este modelo teórico, se busca ofrecer una visión general de cómo el estrés por calor puede afectar la producción y la productividad laboral en una economía sin considerar otras interacciones e inclusive las adaptativas que puedan tener los diversos sectores. El objetivo es proporcionar un punto de partida sólido para futuras investigaciones empíricas que puedan validar y cuantificar estos efectos en contextos específicos.

#### IV. Modelo Empírico.

En el contexto del cálculo del índice WBGT (Índice de Temperatura de Globo y Bulbo Húmedo), que se utiliza para evaluar el estrés por calor en el trabajo, el  $T_w$  es una variable clave. El índice WBGT combina el  $T_w$  con la temperatura del bulbo seco y la temperatura de globo (una esfera metálica pintada de negro que mide el calor radiante). El cálculo psicométrico proporciona la información necesaria para calcular el  $T_w$  y, junto con otras mediciones, permite estimar el nivel de estrés térmico al que están expuestos los trabajadores. Un psicrómetro es un instrumento utilizado para medir la humedad del aire y calcular la temperatura del bulbo húmedo (TW). Consiste en dos termómetros, uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo. El termómetro de bulbo seco mide la temperatura real del aire, mientras que el termómetro de bulbo húmedo mide la temperatura cuando se envuelve con una mecha humedecida en agua. Dado que no todos los países/regiones cuentan con un psicrómetro o medidas históricas del mismo, es que se generó un cálculo psicométrico.

El cálculo psicométrico se basa en la comparación de las temperaturas registradas por ambos termómetros para determinar la humedad relativa del aire. La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que podría contener a una determinada temperatura. Con esta información, se puede utilizar una tabla psicométrica o una fórmula matemática para calcular la temperatura del bulbo húmedo (TW). Para este estudio se cuantificó el WBGT diaria, en el entendido que es una medida compuesta, se evaluó primero la temperatura del bulbo húmedo Tw a partir de la humedad relativa media diaria y Tmax siguiendo la relación empírica de Stull, R. (2011):

$$T_w = T_{max} * \text{atan}(0.151977[HR + 8.313659]^{0.5} + \text{atan}(T_{max} + HR) - \text{atan}(HR - 1.676331) + 0.00391838(HR)^{\frac{3}{2}} \text{atan}(0.023101 * HR) - 4$$

Posteriormente, el WBGT se calcula a partir de datos subsidiarios como son temperatura máxima diaria y humedad relativa media diaria, tomando en cuenta (Dasgupta, 2021) las condiciones exteriores y a la sombra, usando la fórmula de Bernard y Pourmoghani (1999):

$$WBGT_{sombra} = 0.67 * T_w + 0.33 * T_{max}$$

Esta segunda ecuación fue empleada por Lemke y Kjellstrom, donde la temperatura de bulbo húmedo se reemplaza con la temperatura de bulbo húmedo psicométrica. Sin embargo, según (Dasgupta, 2021) es razonable utilizar Tw en la ecuación  $WBGT_{sombra}$ .

El WBGT para exteriores o bajo sol se aproximó siguiendo a Kjellstrom et. Al., por tanto, se realiza una aproximación simple basada en las curvas psicométricas para el  $WBGT_{sol}$ :

$$WBGT_{sol} = WBGT_{sombra} + 3^{\circ}C$$

De esta manera se tiene una estimación de la sensación térmica de los trabajadores basados en varios aspectos climáticos y condiciones ambientales de trabajo, el cual se encuentra validado y existe bastante bibliografía a su favor.

En una segunda fase se realiza un modelo de regresión log-log múltiple para estimar el impacto de esta "sensación" térmica o estrés calórico de la fuerza labora ocupada en la productividad laboral. Entonces se incluye como variable dependiente la productividad laboral medida en producción interna bruta por horas de trabajo por persona y la variable independiente o explicativa el índice

WBG, además se incluyen otras variables sociodemográficas y climáticas para controlar los efectos y explicar los movimientos en la productividad laboral, como se muestra a continuación.

Modelo de regresión lineal múltiple log-nivel para la productividad laboral (PL):

$$PL_{a,t,r,s} = \beta_0 + \beta_1 WBG_{a,t,r,s} + \sum_{i=1}^n \beta_2 (S_i)_{a,t,r,s} + \sum_{j=1}^n \beta_3 (C_j)_{a,t,r,s} + \sum_{l=4}^n \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \beta_l (S_i: C_j)_{a,t,r,s} + \sum_{l=4}^n \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n \beta_l (S_i: X_d)_{a,t,r,s} + \sum_{l=4}^n \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^n \beta_l (C_j: X_d)_{a,t,r,s} + v_{a,t,r,s}$$

Donde:

- $WBG_{a,t,r,s}$ : Índice de Temperatura de Bulbo Húmedo (WGTB) para cada año (a), trimestre (t), región (r) y sector (s).
- $(S_i)_{a,t,r,s}$ : Variable Sociodemográfica i en logaritmo natural, como por ejemplo "Edad" se refiere a la edad del trabajador y la producción generada en logaritmo natural, para cada año (a), trimestre (t), región (r) y sector (s).
- $(C_j)_{a,t,r,s}$ : Variables Climáticas i en logaritmo natural, para cada año (a), trimestre (t), región (r) y sector (s). Como, por ejemplo, NDVI, Velocidad del viento, Precipitaciones, entre otras.
- $(X_d)_{a,t,r,s}$ : Variables dummy, d (e.g. zona geográfica), para cada año (a), trimestre (t), región (r) y sector (s).

Finalmente, el término  $v_{a,t,r,s}$  en el contexto de la regresión lineal representa el error o residuo del modelo. Este error representa las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo de regresión, además el modelo incluye interacciones entre las variables independientes para mejorar la precisión de la estimación de productividad laboral. Cada interacción tiene una justificación teórica, como se discutió previamente.

Es importante tener en cuenta que la validez y precisión del modelo dependen en gran medida de la calidad y cantidad de los datos utilizados para su construcción.

Las variables e interacciones que se incluyen tienen las siguientes justificaciones:

- Precipitaciones y Humedad relativa: esta interacción se basa en la relación que existe entre la cantidad de humedad en el aire y la formación de precipitaciones. La literatura ha demostrado que a medida que aumenta la humedad relativa, también aumenta la probabilidad de que se produzcan precipitaciones.
- Velocidad del viento: La velocidad del viento puede influir en la temperatura al afectar la transferencia de calor entre la superficie de la tierra y el aire. Un viento fuerte puede ayudar a enfriar la temperatura, mientras que un viento débil puede permitir que el aire caliente se acumule en un lugar, aumentando la temperatura. Además, la velocidad del viento puede afectar la evaporación de la humedad del suelo, lo que puede influir en la temperatura de la superficie terrestre y, por lo tanto, influir en la temperatura del aire.
- NDVI: El NDVI es un índice de vegetación que mide la salud y densidad de la vegetación. La vegetación puede afectar la temperatura al influir en la cantidad de radiación solar que es absorbida o reflejada por la superficie de la tierra. Una mayor densidad de vegetación puede

reducir la temperatura al reflejar más luz solar y reducir la cantidad de calor absorbido por la superficie de la tierra. Además, la vegetación puede afectar la evaporación de la humedad del suelo, lo que puede influir en la temperatura de la superficie terrestre y, por lo tanto, influir en la temperatura del aire.

- La variable "Sexo" corresponde al sexo del trabajador y la producción laboral generada en cada categoría. La cual entrega mayor significancia al utilizarse con la interacción de otras variables como, actividad o sector de exposición.
- La variable educación, corresponde al nivel de educación del trabajador, la hipótesis es que los trabajadores con un mayor nivel educativo pueden estar más informados sobre los riesgos y efectos del estrés térmico. La educación puede proporcionar información sobre cómo protegerse y adaptarse a condiciones climáticas extremas, lo que podría mejorar su capacidad para enfrentar el calor y reducir el impacto en su productividad laboral.
- La variable edad de los trabajadores, corresponde al rango de edad de los trabajadores, los jóvenes pueden ser más resilientes frente a condiciones climáticas extremas debido a su mayor resistencia física. Sin embargo, los trabajadores mayores pueden tener una mayor conciencia de los riesgos asociados con el calor extremo y tomar medidas preventivas para proteger su salud y bienestar.
- Además, se incluyeron variables dummy, diversos autores encontraron que la inclusión de variables dummy trimestrales mejoró significativamente la capacidad del modelo para la predicción, a su vez se incluyeron dummies para actividades económicas y su interacción con ciertos trimestres como ocurre por ejemplo con la agricultura para capturar la estacionalidad de la producción marcada que tiene el sector, entre otros.

En resumen, el modelo de regresión lineal utilizado busca analizar la relación entre la productividad laboral y variables como la temperatura (WBGT), considerando otras variables climáticas y factores sociodemográficos. Además, se utilizan variables dummy para capturar la estacionalidad de las actividades económicas y se considera el género de los trabajadores como variable relevante en la productividad. Con esto, se busca comprender los factores determinantes de la productividad laboral y sus implicancias en el contexto del cambio climático. La finalidad de utilizar la variable wbgmt en nivel es para capturar de manera más directa el impacto del aumento de un grado Celsius en la productividad laboral.

## V. Datos.

Los datos del Producto Interno Bruto (PIB) vienen de la base de datos estadísticos del Banco Central de Chile para los periodos 2013 hasta el 2022, a nivel regional, con base trimestral y por actividad económica, a precios encadenados 2018, en miles de millones de pesos.

Para el análisis estas actividades se agruparon en 8 categorías y posteriormente se separaron en dos categorías, las actividades expuestas al sol (minería, construcción y agricultura principalmente) y las que se realizan en oficina generalmente.

Para los trabajadores se utilizó la base de datos de la Encuesta Nacional de Empleo, con datos de 2013 las cuales cuentan con la misma metodología hasta el periodo 2022, donde se obtuvieron los

factores de expansión para estimar el número de ocupados por trimestre, región, actividad y año, además de otras variables como sexo de los ocupados, educación, edad y horas efectivas trabajadas en la semana.

Los datos climáticos, se obtuvieron desde la base de datos que proporciona la Dirección Meteorológica de Chile a nivel mensual, regional, desde el año 2010 en adelante, la cual se procedió trimestralizar para realizar el cálculo del índice WBGT por sector (a la sombra o interno). A continuación, se muestran los resultados descriptivos para la temperatura media del país a nivel regional. Para más información revisar anexo 4.

En el siguiente cuadro se resumen la información recopilada y sus fuentes de información. Donde se aprecia que la cantidad de datos obtenidas en las distintas bases son de 5.600 para productividad laboral, 6.400 para variables climáticas y el acople entre ambas se resume en 1.280 filas con 50 variables aproximadamente.

Tabla 3. Resumen de los datos utilizados.

Variante	Etiqueta	Definición	Cálculo
Productividad Laboral	lg_prod_hr	Corresponde al logaritmo natural de la productividad laboral medida en horas de trabajo.	Producción de la actividad $i$ , en el trimestre $j$ , para la región $h$ , dividido por el número de ocupados, por región, actividad y trimestre, por las horas efectivas trabajadas. Luego se obtiene el logaritmo natural.
Producción (Pib)	lg.agyp; lg.min; lg.cons; lg.serv; lg.com; lg.trans; lg.ega; lg.indu	La producción es anual, trimestral, regional y por sector económico para las 8 actividades económicas seleccionadas.	Producción total de todas las actividades económicas, por trimestre, región y año. Luego se obtiene en escala logarítmica.
Ocupados	ocupados	Ocupados se obtuvieron de la ENE, a nivel anual, trimestral, regional y por actividad.	Sumatoria de todos los trabajadores por las horas efectivas trabajadas (construcción a partir de las bases de datos ENE y metodología asociada). Luego se obtiene en escala logarítmica.
Temperatura (mínima, media y máxima)	tme;lg_tme; lg_wgtb; wgtb	Temperatura (tme,tmx, tmin, tex) e índice de estrés térmico (wbgt)	Promedio de temperaturas $i$ , además del cálculo del índice wbgt.por región, trimestre, sector y año. Temperaturas e índice se obtienen en nivel y en escala logarítmica.
Precipitaciones	lg_pp	Precipitaciones en mm por día.	Logaritmo natural de las precipitaciones por región, trimestre y año (promedias por trimestre).
Velocidad del viento	lg_vv	Velocidad del viento promedio en m/s.	Logaritmo natural del promedio de velocidad del viento, por región, trimestre y año.
Humedad Relativa	lg_hr	Humedad relativa del aire	Logaritmo natural del promedio de humedad relativa, por región, trimestre y año.
Índice Normalizado de Vegetación	lg_ndvi	Obtenido del satélite MODIS Terra, información útil para conocer la estructura de vegetación de cada región.	Logaritmo natural del índice, por región trimestre y año.
Oferta laboral según sexo.	lg.Hombre; lg.Mujer	Ocupados se obtuvieron de la ENE, a nivel anual, trimestral, regional y por actividad.	Logaritmo natural del sexo $i$ de los trabajadores por región, trimestre, sector, año.
Edad	edad_15_29; edad_30_44; edad_45_59; edad_60	Corresponden a rangos de edad de ocupados, en los subíndices mencionados.	Logaritmo natural de los rangos de edad $i$ de los trabajadores por región, trimestre, sector, año.
Años de escolaridad	ed.bas; ed.med; ed.pro; ed.univ	Número de ocupados según rango de edad.	Logaritmo natural de los niveles de educación $i$ de los trabajadores por región, trimestre, sector, año.

Fuente: Elaboración propia.

En el contexto del estudio, la consideración detallada de la oferta laboral se presenta como una decisión metodológica esencial. Dado que el objetivo central de mi estudio es analizar cómo las condiciones climáticas extremas pueden afectar la productividad en diferentes zonas geográficas, resulta fundamental incluir la oferta de trabajo como una variable significativa. La distinción entre hombres y mujeres en la oferta laboral agrega una dimensión crítica, permitiendo examinar las posibles disparidades de género en términos de productividad y cómo estas disparidades podrían interactuar con las condiciones climáticas. Esta desagregación de género no solo enriquecerá la comprensión de los efectos climáticos en la productividad laboral, sino que también contribuirá a una evaluación más completa de las implicaciones socioeconómicas y de igualdad de género. Al considerar detenidamente la oferta laboral, se busca identificar posibles patrones, tendencias y desafíos que puedan pasar desapercibidos en un análisis más generalizado. En última instancia, esta aproximación permitirá un abordaje más holístico y robusto de la interacción entre el cambio climático y la productividad laboral, brindando así información valiosa para la formulación de políticas y estrategias que aborden de manera efectiva los desafíos emergentes en un mundo en constante transformación climática.

Para obtener más información gráfica y descriptiva de los datos utilizados en esta investigación, se puede consultar el anexo adjunto al final del documento.

## VI. Resultados.

Para realizar el análisis econométrico se utiliza el método de regresión múltiple a escala logarítmica. El uso del logaritmo natural en la regresión de la productividad laboral tiene varios objetivos. Uno de ellos es transformar una relación no lineal en una relación lineal. En algunos casos, la relación entre la productividad y las variables explicativas no es lineal, lo que dificulta su modelización. El uso del logaritmo natural permite convertir la relación no lineal en una relación lineal, lo que facilita su modelización mediante una regresión lineal.

Otra razón del uso del logaritmo natural en el modelo es interpretar los resultados de la regresión en términos porcentuales. Al transformar la variable de la productividad laboral en su logaritmo natural, se pueden interpretar los coeficientes de regresión en términos porcentuales. El modelo Log-Log se atribuye a  $\beta$  la elasticidad de Y, respecto a X. Se interpreta como un incremento del 1% en X es asociado a un cambio en Y de  $B_1\%$ . Sin embargo, para una comprensión más directa se trabajará solamente la variable explicativa de interés (WBGT) en su mismo nivel, es decir, para  $\beta_1$  se interpreta como un incremento de 1 unidad en X es asociado a un cambio en Y de  $(100 \cdot \beta_1)\%$ .

Además, el uso del logaritmo natural ayuda a manejar datos con alta dispersión. En el caso de la productividad laboral, puede haber una gran variación en los valores de la productividad entre los trabajadores o empresas, lo que dificulta su análisis. Al tomar el logaritmo natural, se reduce la variabilidad de la variable y se puede obtener una distribución más normal y manejable para su análisis.

Dada la naturaleza de los datos y los objetivos de la investigación se optó por un modelo de regresión lineal múltiple ya que este permite analizar las relaciones de causalidad y explicación entre variables, es decir, lograr identificar cómo las variables climáticas y sociodemográficas influyen en la productividad laboral, lo que es relevante para establecer relaciones causales. En el mismo sentido, al considerar múltiples variables explicativas el modelo de regresión lineal múltiple permite

incorporar estas variables en una estructura conjunta y evaluar sus efectos individuales y conjuntos. Por otra parte, el modelo permite capturar efectos no lineales de las interacciones para analizar como los efectos pueden cambiar en diferentes condiciones.

Finalmente, los coeficientes de la regresión son directamente interpretables en términos de la magnitud y dirección del impacto de cada variable independiente en la variable dependiente. No obstante, es importante señalar que la selección del modelo adecuado depende de la naturaleza específica de los datos y de las preguntas de investigación. Por ejemplo, los modelos de series de tiempo también pueden ser apropiados si los datos tienen una estructura temporal prominente y se requiere analizar patrones a lo largo del tiempo, donde se pueda buscar realizar pronósticos de la productividad laboral en el futuro o investigar las relaciones de causalidad temporal entre las variables.

Utilizando la metodología explicada se seleccionaron cinco modelos, los cuales muestran en la siguiente tabla, con los coeficientes de determinación más altos obtenidos en el modelo de regresión múltiple.

Tabla 4. Resultados de los modelos seleccionados.

N°	1m1	1m2	1m3	1m4	1m5
(Intercept)	13.572***	13.248***	11.441***	11.012***	10.426***
1) wgtb	-0.026***	-0.022**	-0.043***	-0.010**	-0.010**
2) lg_ndvi	0.607**	0.714**	0.559**	0.292	0.616**
3) ed.bas	-0.631***	-0.521***	-0.496***		
4) edad_60_mas	-0.027*	-0.032**	-0.021*	-0.078***	-0.053***
5) lg_ndvi x lg_wgtb	-0.369***	-0.393***	-0.349***	-0.268***	-0.367***
6) lg_wgtb x edad_45_59	0.028*	0.018	0.109***		
7) lg_wgtb x zona.n	-0.668***	-0.723***	-0.663***	-0.519***	-0.604***
10) lg_ndvi x q1	0.045**	0.045**		0.052***	0.062***
11) lg_ndvi x lg_agyp	0.076***	0.076***	0.073***	0.065***	0.061***
12) q1 x lg_agyp	0.040***	0.039***		0.041***	0.041***
13) zona.n x lg.min	0.098***	0.098***	0.083***	0.090***	0.090***
14) lg_mujer x d.se	-0.040	-0.105***	-0.200***	-0.358***	-0.394***
15) ed.bas x lg.min	0.021***	0.021***	0.023***	0.021***	0.020***
16) lg.cons x edad_15_29	0.004***	0.004***		0.002**	
17) lg_pp x lg_vv	-0.012***	0.001	-0.014***	-0.009**	-0.013***
18) edad_45_59 x lg.inds	0.025***	0.024***	0.017***	0.008***	
19) ed.med x zona.cn	-0.010***	-0.009***	-0.016***	-0.019***	-0.021***
20) lg_pp x lg_hr	0.007***		0.008***	0.005***	0.007***
21) lg_ndvi x zona.n	-0.585***	-0.678***	-0.594***	-0.399***	-0.502***
22) ed.med x d.si	-0.061**				
23) d.si x lg_hombre		-0.114***			
24) d.si			0.847***	-1.967***	-2.297***
25) lg_agyp x q1			0.030***		
26) lg_wgtb x ed.bas			-0.069**		
27) lg_wgtb x d.se			0.850***		
28) ed.med				-0.040	0.119***
29) ed.bas x zona.s				0.009***	0.009***
30) lg.cons x lg_hombre					-0.004**
R-squared	0.860	0.858	0.867	0.841	0.831
N	1280	1280	1280	1280	1280
AIC	-232.3	-221.3	-303.6	-68.8	3.8
BIC	-118.8	-113.1	-190.2	44.5	112.0

Significance: \*\*\* =  $p < 0.001$ ; \*\* =  $p < 0.01$ ; \* =  $p < 0.05$

Fuente: *Elaboración propia.*

Estos modelos nos permiten comprender los efectos de las variables y sus interacciones en la productividad laboral, teniendo una mirada integral de los efectos en productividad. Lo que se

procuró fue seleccionar los modelos que contaran con un mejor ajuste, en esta muestra todos tienen un R ajustado sobre el 0.8, lo cual nos sugiere que el 80% de la variación de la variable independiente se debe a las variables incorporadas en el modelo. En el mismo sentido, gran parte de las variables y sus interacciones son significativas al 0.001%.

### a. Robustez

Por otra parte, el criterio AIC (Akaike's Information Criterion) y el criterio BIC (Bayesian Information Criterion), muestran el nivel de parsimonia de los modelos, por lo cual utilizando este criterio se puede seleccionar el mejor modelo que explique los datos sin sobreajustarlos, los mejores modelos son el 1 y 3. Sin embargo, el modelo 1 es más robusto y estable al comprobarlo con la regresión cuantílica independiente del criterio (ver anexo 8, tabla 5). A este modelo se realizaron pruebas y test estadísticos para evaluar endogeneidad o correlación entre sus variables, evaluación de la autocorrelación del modelo, análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de dos o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos, heterocedasticidad, así como también una evaluación del poder estadístico, para más detalle ver anexo 8.

En resumen, el modelo de regresión muestra que los residuos no tienen heterocedasticidad ni autocorrelación de primer orden, y posee una potencia del 100%, indicando su capacidad para detectar efectos significativos. Además, la matriz de correlaciones no presenta correlaciones significativas entre las variables predictoras, evitando problemas de multicolinealidad. Aunque los residuos no siguen una distribución normal, la regresión cuantílica permite obtener estimaciones robustas del parámetro  $b_1$ , manteniendo la consistencia del modelo previo. En conjunto, estos resultados respaldan la fiabilidad del modelo para explicar la relación entre las variables y la productividad laboral.

Por otra parte, la pendiente ascendente de la productividad laboral en diversas zonas geográficas (anexo 7) y la correlación negativa que se observa entre el índice de estrés térmico y productividad laboral (anexo 6) respalda la validez de la relación planteada en la regresión lineal, sugiriendo que no hay efectos espurios y que la influencia del estrés térmico en la productividad laboral es plausible y relevante en este contexto.

En el siguiente apartado, se presentarán los resultados y conclusiones obtenidas a partir de los análisis de sensibilidad realizados en el marco de este estudio. Estos análisis desempeñan un papel fundamental en la comprensión de la robustez y la variabilidad de los resultados del modelo de regresión lineal múltiple propuesto. En primer lugar, se abordará el análisis de un solo parámetro, el cual arroja luz sobre cómo se ven afectados los resultados al variar el indicador de estrés térmico (WBGT) a la vez, manteniendo todas las demás constantes. Esta exploración permitirá comprender mejor la influencia relativa de cada factor en los resultados obtenidos. Posteriormente, se abordará el análisis de escenarios, que involucra la manipulación simultánea de múltiples variables para examinar cómo los resultados responden en diferentes condiciones, según zona geográfica y según exposición al sol. Este enfoque proporcionará una visión integral de cómo se comportan los resultados bajo diversas circunstancias, contribuyendo así a una comprensión más completa de las relaciones modeladas. Ambos análisis contribuirán significativamente a fortalecer las conclusiones de este estudio proporcionando una evaluación de la estabilidad de las estimaciones.

## b. Análisis de sensibilidad

Dado que existe presencia de endogeneidad en el modelo, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los resultados cambian ante diferentes supuestos lo cual puede ofrecer una mayor confianza en la validez del modelo. En este sentido, este apartado muestra diversos resultados a través de un análisis de sensibilidad sobre la temperatura, mínima, media, máxima, llevadas al modelo wbg. También se realiza para el sector externo e interno y finalmente por zona geográfica.

En primera instancia se muestra el intervalo de confianza al 95% del modelo seleccionado en la siguiente tabla.

Tabla 5. Intervalos de confianza

Confidence interval	2.5 %	97.5 %
(Intercept)	13.093577294	14.050414826
wgtb	-0.040951853	-0.011713909
lg_ndvi	0.172860430	1.041318417
ed.bas	-0.732817245	-0.529483831
edad_60_mas	-0.049306361	-0.005673622
lg_ndvi:lg_wgtb	-0.517279439	-0.220878158
lg_wgtb:edad_45_59	0.002540946	0.053924209
lg_wgtb:zona.n	-0.806944228	-0.529086609
lg_ndvi:q1	0.016137515	0.073715286
lg_ndvi:lg_agyp	0.069398398	0.082528974
q1:lg_agyp	0.035737256	0.044396833
zona.n:lg.min	0.089801831	0.105713417
lg_mujer:d.se	-0.089438027	0.010133831
ed.bas:lg.min	0.020197605	0.022395377
lg.cons:edad_15_29	0.002835583	0.005073484
lg_pp:lg_vv	-0.017216926	-0.006371345
edad_45_59:lg.inds	0.022490826	0.026559689
ed.med:zona.cn	-0.015002234	-0.004149639
lg_pp:lg_hr	0.004191267	0.009663172
lg_ndvi:zona.n	-0.777105332	-0.392542933
ed.med:d.si	-0.105812915	-0.016751852

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que la estimación puede tener un margen de error al 95%, el cual implicaría un rango de disminución entre el 1% y el 4% de la productividad laboral con el aumento de un grado de temperatura. Lo cual confirma la existencia de un impacto negativo en la productividad laboral dado el aumento de la temperatura o estrés térmico.

A continuación, en la tabla 6, se muestra el cálculo del índice de estrés térmico con una temperatura media mínima (lm\_min), media (lm\_med), media máxima (lm\_mx) y Extrema (lm\_ex).

Tabla 6. Temperaturas media mínima, máxima y Extrema.

	lm_min	lm_med	lm_mx	lm_ex
(Intercept)	12.910***	13.170***	13.572***	13.850***
wgtb	-0.013***	-0.018***	-0.026***	-0.032***
lg_ndvi	0.204	0.371	0.607**	0.786***
ed.bas	-0.499***	-0.551***	-0.631***	-0.687***
edad_60_mas	-0.024*	-0.027*	-0.027*	-0.027*
lg_ndvi x lg_wgtb	-0.228**	-0.289***	-0.369***	-0.412***
lg_wgtb x edad_45_59	-0.003	0.006	0.028*	0.048***
lg_wgtb x zona.n	-0.446***	-0.556***	-0.668***	-0.629***
lg_ndvi x q1	0.025	0.029	0.045**	0.054***
lg_ndvi x lg.agyp	0.073***	0.075***	0.076***	0.076***
q1 x lg.agyp	0.039***	0.040***	0.040***	0.041***
zona.n x lg.min	0.096***	0.097***	0.098***	0.096***
lg_mujer x d.se	-0.073**	-0.054*	-0.040	-0.052*
ed.bas x lg.min	0.021***	0.021***	0.021***	0.021***
lg.cons x edad_15_29	0.004***	0.004***	0.004***	0.004***
lg_pp x lg_vv	-0.009**	-0.010***	-0.012***	-0.012***
edad_45_59 x lg.inds	0.024***	0.025***	0.025***	0.024***
ed.med x zona.cn	-0.006*	-0.008**	-0.010***	-0.011***
lg_pp x lg_hr	0.005***	0.006***	0.007***	0.007***
lg_ndvi x zona.n	-0.336**	-0.461***	-0.585***	-0.571***
ed.med x d.si	-0.092***	-0.077***	-0.061**	-0.072**
R-squared	0.861	0.860	0.860	0.861
N	1280	1280	1280	1280

Significance: \*\*\* =  $p < 0.001$ ; \*\* =  $p < 0.01$ ; \* =  $p < 0.05$

El análisis de sensibilidad muestra que el índice de estrés térmico (wgtb) tiene un efecto negativo significativo en la productividad laboral en todas las condiciones climáticas evaluadas, representadas por las temperaturas medias mínima, media, máxima y extrema (lm\_min, lm\_med, lm\_mx, lm\_ex). Los coeficientes estimados son -0.013, -0.018, -0.026 y -0.032, respectivamente, lo que indica que un aumento en el índice de estrés calórico está asociado con una disminución en la productividad laboral en todas las situaciones climáticas consideradas.

Tabla 7. Análisis por sector económico expuesto al sol y sector no expuestos

	lm1_se	lm1_si
(Intercept)	14.497***	14.613***
wgtb	-0.051***	-0.012***
lg_ndvi	1.776***	0.418***
ed.bas	-0.737***	-0.685***
edad_60_mas	-0.026	
lg_ndvi x lg_wgtb	-0.772***	
lg_wgtb x edad_45_59	0.102***	

lg_wgtb x zona.n	-0.623***	
lg_ndvi x q1	0.125***	
lg_ndvi x lg.agyp	0.041**	
q1 x lg.agyp	0.035***	
zona.n x lg.min	0.255***	
lg_mujer x d.se	-0.163***	
ed.bas x lg.min	0.016***	
lg.cons x edad_15_29	0.003***	
lg_pp x lg_vv	-0.016***	
ed.med x zona.cn	-0.023***	
lg_pp x lg_hr	0.010***	
lg_ndvi x zona.n	0.565**	
lg_ndvi x lg.ega		-0.050***
lg.com x q3		-0.002*
lg_mujer x lg.serv		0.012***
lg.com x ed.bas		0.006***
lg.indc x edad_15_29		-0.004**
lg.indc x edad_45_59		0.021***
ed.bas x zona.s		-0.003**
d.si x ed.med		-0.190***
R-squared	0.911	0.842
N	640	640

Significance: \*\*\* =  $p < 0.001$ ;

\*\* =  $p < 0.01$ ; \* =  $p < 0.05$

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 7 indican que el impacto negativo en la productividad laboral de sectores expuestos al sol, como son el agrícola y pesquero, forestal, hortícola, cultivos, minería y construcción, es mucho mayor en la zona norte, lo que guarda relación con que las temperaturas en la zona norte son extremas en relación con el sur del país. El impacto aislado solamente para los sectores expuestos al sol sería de una disminución del 5,1% de la productividad laboral por aumento de un grado Celsius de temperatura y el impacto en sectores no expuestos al sol sería de 1,2% en detrimento de la productividad laboral.

Finalmente, en la tabla 8 se muestra un análisis de sensibilidad por zona geográfica.

Tabla 8. Análisis por zona geográfica

	lm1_zn	lm1_zcn	lm1_zcs	lm1_zs
(Intercept)	7.309***	14.704***	5.465***	1.596***
wgtb	-0.098***	-0.040**	-0.012***	-0.009***
lg.min	0.269***			
ed.med	0.109***			0.143***
edad_60_mas	-0.033***	-0.166***	-0.549***	
lg_ndvi	-0.444***	-0.178	-0.231**	-0.385***
lg.agyp x lg_ndvi	0.100***			
wgtb x lg.min	0.007***	0.005***		

wgtb x lg.serv	0.008***			
lg.agyp x q1	0.188***			
lg.min x q1	-0.124***			
lg.cons x q3	-0.022***			
edad_30_44		-0.726***		
wgtb x lg.inds	0.005***			
lg.serv x ed.med	0.028***			
lg_hombre x lg.cons	0.024***			
lg_hombre x lg.agyp	-0.002			
lg_ndvi x lg.agyp	-0.024***	-0.059***		
wgtb x lg_vv	-0.001			
wgtb x lg_ndvi	0.013*			
lg.nmin		0.672***		
lg.agyp		0.154***	1.253***	
lg.agyp x lg_hombre		-0.014***	-0.070***	
lg_vv			0.118***	
lg.com			0.420***	
lg.inds			0.822***	
lg.inds x ed.med			-0.067***	
lg.serv x q3			-0.003	
R-squared	0.959	0.814	0.805	0.913
N	320	240	320	400

Significance: \*\*\* =  $p < 0.001$ ; \*\* =  $p < 0.01$ ; \* =  $p < 0.05$

Los resultados del modelo de regresión de la tabla 8 muestran que el impacto del estrés calórico en la productividad laboral varía según la zona geográfica en Chile. En particular, en la zona norte (Desde la Región Arica y Parinacota hasta la Región de Atacama) y centro norte del país (Desde Coquimbo hasta Valparaíso), se observa una mayor pérdida de la productividad laboral debido al aumento del índice de estrés calórico (WBGT). Esto puede explicarse por las condiciones climáticas más extremas y el mayor grado de exposición al sol en la zona norte y centro norte, lo que puede generar una mayor carga térmica en los trabajadores y afectar su rendimiento físico y cognitivo. En comparación, en las zonas centro sur (desde la Región de O'Higgins hasta Ñuble) y sur (desde la Región de Araucanía hasta Magallanes), se observa una menor pérdida de la productividad laboral frente al estrés calórico, lo que sugiere que el estrés térmico es menos adverso en estas áreas.

Los diferentes análisis de sensibilidad, que consideraron variaciones en las temperaturas, sectores expuestos al sol y zonas geográficas, han demostrado que el coeficiente del índice de estrés térmico (wgtb) sigue siendo significativo y negativo en todos los escenarios. Esta consistencia en las estimaciones sugiere que el efecto del estrés térmico en la disminución de la productividad laboral es robusto y no está influenciado por factores endógenos o sesgos de especificación del modelo. En consecuencia, podemos afirmar con mayor confianza que altas temperaturas y condiciones climáticas desfavorables tienen un impacto significativo y negativo en la productividad laboral en diferentes sectores y regiones de Chile.

### c. Discusión de los resultados

A continuación, se muestra un resumen del modelo seleccionado, sus niveles de significancia y una explicación las interacciones que se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resumen modelo seleccionado (lm1)

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	13.5719961	0.2438610	55.655	< 2e-16	***
wgtb	-0.0263329	0.0074516	-3.534	0.000424	***
lg_ndvi	0.6070894	0.2213365	2.743	0.006178	**
ed.bas	-0.6311505	0.0518219	-12.179	< 2e-16	***
edad_60_mas	-0.0274900	0.0111203	-2.472	0.013565	*
lg_ndvi:lg_wgtb	-0.3690788	0.0755413	-4.886	1.16e-06	***
lg_wgtb:edad_45_59	0.0282326	0.0130956	2.156	0.031282	*
lg_wgtb:zona.n	-0.6680154	0.0708152	-9.433	< 2e-16	***
lg_ndvi:q1	0.0449264	0.0146744	3.062	0.002249	**
lg_ndvi:lg.agyp	0.0759637	0.0033465	22.700	< 2e-16	***
q1:lg.agyp	0.0400670	0.0022070	18.155	< 2e-16	***
zona.n:lg.min	0.0977576	0.0040553	24.106	< 2e-16	***
lg_mujer:d.se	-0.0396521	0.0253770	-1.563	0.118417	
ed.bas:lg.min	0.0212965	0.0005601	38.021	< 2e-16	***
lg.cons:edad_15_29	0.0039545	0.0005704	6.933	6.54e-12	***
lg_pp:lg_vv	-0.0117941	0.0027641	-4.267	2.13e-05	***
edad_45_59:lg.ind	0.0245253	0.0010370	23.650	< 2e-16	***
ed.med:zona.cn	-0.0095759	0.0027659	-3.462	0.000554	***
lg_pp:lg_hr	0.0069272	0.0013946	4.967	7.72e-07	***
lg_ndvi:zona.n	-0.5848241	0.0980101	-5.967	3.14e-09	***
ed.med:d.si	-0.0612824	0.0226982	-2.700	0.007029	**

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.219 on 1259 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8597, Adjusted R-squared: 0.8574

F-statistic: 385.6 on 20 and 1259 DF, p-value: < 2.2e-16

*Fuente: Elaboración propia.*

Luego de revisadas las pruebas estadísticas, es posible deducir lo siguiente del modelo propuesto:

- I. Coeficientes y significancia: Los coeficientes estimados de las variables independientes proporcionan información sobre la dirección y magnitud de la relación con la variable dependiente. Los coeficientes para "WGBT" (wgtb), "Índice NDVI" (lg\_ndvi) y otras variables tienen valores significativos, lo que sugiere que todas las variables tienen un efecto estadísticamente significativo alto en la "productividad laboral".

- II. Interpretación de los coeficientes: Se observó que el coeficiente estimado para el índice de estrés calórico ( $lg\_wgtb$ ) es negativo, lo que sugiere que un aumento en el índice de estrés calórico está asociado con una disminución en la productividad laboral. Por otro lado, el coeficiente estimado para el índice de vegetación ( $lg\_ndvi$ ) es positivo, lo que indica que un mayor índice de vegetación está asociado con un aumento en la productividad laboral.
- III. Coeficientes de interacción: También hay términos de interacción en el modelo los cuales indican cómo las relaciones entre algunas variables cambian dependiendo de los niveles de otras variables. Por ejemplo, la interacción " $lg\_wgtb:lg\_vv$ " muestra cómo el impacto del índice de estrés calórico puede variar según el nivel del logaritmo de la velocidad del viento.
- IV. Bondad de ajuste: Para evaluar la calidad del modelo, hemos considerado el coeficiente de determinación (R-cuadrado) y el estadístico F. En general, el modelo tiene un buen ajuste (Multiple R-squared: 0.8597) y muestra una alta significancia estadística en general ( $p < 0.001$ ) para la mayoría de las variables.
- V. Residuos: Los residuos son los errores del modelo y se presentan con estadísticas descriptivas. Un examen de los residuos puede ayudar a verificar si se cumplen las suposiciones del modelo, como la homocedasticidad y la normalidad de los residuos. A través de diferentes pruebas, como el test de White y gráficos de Q-Q, hemos examinado si los residuos presentan homocedasticidad y si siguen una distribución normal. Además, el test de Breusch-Pagan nos ha permitido evaluar la autocorrelación de los residuos.

Por otro lado, las interacciones en el modelo tienen una relevancia importante ya que capturan las relaciones no lineales y las sinergias entre las variables explicativas. Cada interacción representa una combinación específica de factores que pueden afectar de manera conjunta la productividad laboral en diferentes sectores económicos y regiones de Chile.

En resumen, los resultados del modelo sugieren que el índice de estrés calórico, el índice de vegetación, el sector laboral, las condiciones climáticas y otras variables influyen en la productividad laboral. A continuación, evaluaremos cada uno de ellos dándole una explicación intuitiva:

1.  $lg\_wgtb$  (Índice de estrés calórico): Si el índice de estrés calórico aumenta en 1 unidad, se espera que la productividad laboral disminuya aproximadamente un 2.63%. Esto indica que las altas temperaturas o condiciones de estrés calórico pueden tener un impacto negativo significativo en la productividad de los trabajadores. Esta relación tiene sentido, ya que altas temperaturas y condiciones climáticas desfavorables pueden tener efectos negativos en el rendimiento y bienestar de los trabajadores. El estrés calórico puede provocar fatiga, deshidratación, y afectar la capacidad de los trabajadores para realizar tareas físicas y cognitivas de manera óptima. (Respondiendo a la hipótesis 1.)
2. Índice de Vegetación Normalizado ( $lg\_ndvi$ ): El coeficiente estimado de 0.6071 muestra que un aumento del 1% en el Índice de Vegetación Normalizado se relaciona con un aumento del 0.6071% en la productividad laboral. Esto sugiere que la presencia de vegetación, como áreas verdes o bosques, puede tener un efecto positivo en el bienestar de los trabajadores y, por lo tanto, en su rendimiento laboral. Una posible explicación es que la vegetación puede proporcionar sombra, reducir la temperatura ambiente y mejorar la calidad del aire, lo que a su vez promueve un ambiente de trabajo más cómodo y saludable.
3.  $lg\_mujer:d.se$  (Interacción entre Género femenino y Sector expuesto al sol): El coeficiente estimado para esta interacción es -0.0396521. Esto indica que el efecto combinado de ser mujer y trabajar en sectores expuestos al sol está asociado con una disminución de

aproximadamente 0.0396521 unidades en la productividad laboral. Esto sugiere que las mujeres que trabajan en actividades expuestas al sol pueden experimentar una disminución en su productividad laboral en comparación con los hombres en esas mismas actividades.

4. Educación Básica (ed.bas): El coeficiente estimado de -0.6312 indica que un aumento del 1% en la educación básica está asociado con una disminución del 0.6312% en la productividad laboral. Esto podría deberse a que la educación básica, en comparación con niveles más altos de educación, puede estar relacionada con trabajos menos especializados y, por lo tanto, con tareas laborales menos productivas o complejas. (Responde a hipótesis 4)
5. Edad de 60 y más años: Tener 60 años o más está asociado con una disminución de aproximadamente 0.0274900 unidades en la productividad laboral. Esto sugiere que los trabajadores mayores pueden tener una disminución en su productividad laboral en comparación con otros grupos de edad. (Responde a hipótesis 4)
6. Interacción entre lg\_ndvi y lg\_wgtb: El coeficiente estimado de -0.3691 indica que el efecto del Índice de Vegetación Normalizado en la productividad laboral depende del nivel de Estrés Calórico. Una posible explicación es que la presencia de vegetación puede tener un efecto más beneficioso en mitigar el estrés por calor y mejorar la productividad en condiciones de alta temperatura.
7. Zona Norte (zona.n): El coeficiente estimado de -0.6680 muestra que la productividad laboral es más baja en la zona norte en comparación con otras zonas geográficas. Una razón hipotética podría ser que la zona norte enfrenta altas temperaturas durante gran parte del año, lo que crea condiciones más adversas para el trabajo y puede afectar negativamente la productividad de los trabajadores. (Responde a la hipótesis 3)
8. Precipitaciones (lg\_pp): El coeficiente estimado de -0.0118 sugiere que un aumento del 1% en las precipitaciones está asociado con una disminución del 0.0118% en la productividad laboral. Una posible explicación es que las lluvias pueden causar interrupciones en las actividades al aire libre y en la agricultura, lo que puede afectar negativamente la productividad en estos sectores.

Estas son solo algunas hipótesis para interpretar los resultados. Es importante recordar que los efectos observados en el modelo pueden estar influenciados por múltiples factores y contextos específicos, por lo que se requiere un análisis más profundo y estudios adicionales para validar estas interpretaciones.

Es importante tener en cuenta que las interpretaciones de las interacciones pueden ser complejas y a veces dependen del contexto específico del estudio y la naturaleza de las variables involucradas. Por lo tanto, es recomendable validar y profundizar en los resultados obtenidos con expertos en el campo y realizar análisis adicionales para comprender completamente el impacto de cada variable en la productividad laboral.

Las interacciones en el modelo proporcionan una visión más completa y detallada de cómo diversos factores interconectados pueden afectar la productividad laboral en Chile en el contexto del cambio climático. Estas relaciones complejas y sinergias son cruciales para comprender plenamente el impacto de las condiciones ambientales y laborales en el rendimiento de los trabajadores y, por ende, en la economía del país.

Al comparar los resultados con otros autores, se observa que los años más cálidos conducen a una menor producción, sobre todo en zonas más cálidas, específicamente según el estudio de Healt y Park (2013), donde se examinó la relación general entre la productividad laboral y la temperatura utilizando datos a nivel país entre 1950 y 2005, se obtuvieron resultados del 3% o 4% de cambio de productividad laboral por cada °C de variación. Lo cual se ajusta a la estimación obtenida en el

modelo expuesto, correspondiente al 2.6% de cambio en la productividad laboral del país por cada °C de temperatura. Otros estudios, algunos más específicos que otros, sugieren variaciones entre el 1,8% al 8% de cambio, dependiendo de cada zona de estudio.

Es importante destacar que, aunque el modelo muestra una alta capacidad explicativa de la variabilidad de la temperatura en la productividad laboral, y muchas de las variables tienen coeficientes estadísticamente significativos, siempre se debe tener en cuenta el contexto específico del estudio y la posibilidad de otras variables que puedan influir en la productividad laboral y que no están incluidas en el modelo.

#### d. Propuestas de acción

Los resultados sugieren que el cambio climático y las altas temperaturas pueden tener un impacto significativo en la productividad laboral en Chile. Para evitar el avance del impacto de las altas temperaturas en la productividad laboral, se pueden considerar los siguientes mecanismos de acción:

**Implementación de medidas de adaptación:** Las empresas y sectores laborales expuestos al aire libre deben considerar la implementación de medidas de adaptación para proteger a los trabajadores del estrés térmico. Estas medidas pueden incluir la provisión de sombra, pausas regulares para descansar y rehidratarse, y el uso de ropa y equipo adecuados para protegerse del calor.

**Mejora de la infraestructura:** La infraestructura urbana y laboral puede ser mejorada para mitigar los efectos del calor extremo. Por ejemplo, se pueden crear áreas verdes y espacios arbolados en zonas urbanas y de trabajo para reducir la temperatura y proporcionar un entorno más fresco y agradable para los trabajadores.

**Fomento de la educación y capacitación:** La educación y capacitación de los trabajadores sobre los riesgos asociados con el calor extremo y las medidas de protección pueden ayudar a mejorar su capacidad de adaptación y reducir el impacto en su productividad laboral. Además, la capacitación puede incluir la promoción de prácticas laborales más seguras y eficientes bajo condiciones climáticas extremas.

**Desarrollo de políticas públicas:** Los gobiernos y las autoridades pueden desempeñar un papel importante en la formulación de políticas públicas que aborden los desafíos del cambio climático y su impacto en la productividad laboral. Estas políticas pueden incluir regulaciones para proteger a los trabajadores expuestos al calor, incentivos para la adopción de prácticas laborales más sostenibles y medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Fomento de la investigación:** Continuar con investigaciones y estudios sobre la relación entre el cambio climático y la productividad laboral es fundamental para comprender mejor el fenómeno y desarrollar estrategias más efectivas de adaptación y mitigación. Esto permitirá obtener un conocimiento más sólido y basado en evidencia para guiar las decisiones políticas y empresariales.

En resumen, es crucial abordar el impacto del cambio climático en la productividad laboral a través de una combinación de medidas de adaptación, mejoramiento de la infraestructura, educación y capacitación, desarrollo de políticas públicas y fomento de la investigación. Al trabajar en conjunto, se puede lograr una mayor resiliencia económica y proteger la salud y bienestar de los trabajadores en un escenario de cambio climático en constante evolución.

## VII. Conclusiones.

En esta tesis, hemos investigado los efectos del cambio climático en la productividad laboral en Chile, tomando en cuenta la literatura proporcionada por estudios previos y utilizando un modelo climático global para el análisis de impacto del estrés térmico en los trabajadores. El enfoque teórico y empírico nos ha permitido obtener una comprensión más profunda de cómo diversas variables climáticas y ambientales pueden afectar la productividad laboral en diferentes sectores y regiones del país.

Es relevante mencionar que, para evaluar los efectos del cambio climático sobre la productividad laboral, utilizamos el índice WBGT de NIOSH, que es ampliamente reconocido y probado para este tipo de análisis.

El modelo de regresión lineal log-nivel utilizado en este estudio ha revelado relaciones significativas entre las variables independientes y la productividad laboral. En particular, encontramos que el índice de estrés calórico (WBGT) tiene un impacto negativo en la productividad laboral, lo que indica que altas temperaturas y condiciones climáticas desfavorables pueden disminuir la eficiencia y bienestar de los trabajadores, afectando así la producción de bienes y servicios en la economía.

Los resultados revelaron que la variable WBGT (medida por  $lg\_wgtb$ ) tiene un efecto significativo en la productividad laboral, evidenciado por un coeficiente estimado de  $-0.026$  con un valor  $p$  muy pequeño ( $< 2.2e-16$ ), para Chile. Esto indica que, en promedio, un aumento de  $1^{\circ}C$  en el índice de estrés calórico está asociado con una disminución de aproximadamente el 2.6% en la productividad laboral, teniendo en cuenta las otras variables incluidas en el modelo.

El coeficiente de determinación múltiple R-cuadrado ajustado de 0.859, lo que sugiere que alrededor del 85.9% de la variabilidad en la productividad laboral puede ser explicada por las variables incluidas en el modelo. El estadístico F y su  $p$ -value indican si el modelo en su conjunto es significativo, con un  $p$ -value ( $< 0.0004$ ) extremadamente bajo, confirmando la significancia del modelo. Este alto R-cuadrado sugiere que el modelo ajustado tiene una buena capacidad predictiva y puede ser útil para entender cómo la temperatura y otras variables influyen en la productividad laboral.

Por otra parte, los análisis de sensibilidad muestran consistentemente que el índice de estrés térmico ( $wgtb$ ) tiene un impacto negativo significativo en la productividad laboral, independientemente de las temperaturas, el sector económico expuesto al sol o la ubicación geográfica, mostrando robustez para los resultados del modelo en su estimación puntual. Los sectores expuestos al aire libre son los más afectados por los aumentos de temperatura, con un 5% aproximadamente, en cuanto a los sectores no expuestos impactan en un deterioro del 1% a la productividad laboral. En el mismo sentido la zona norte tiene un doble impacto, pues su economía depende de actividades netamente expuestas al sol y por otra parte las temperaturas son aún mayores, mostrando disminuciones de la productividad del 9% aproximadamente, la zona centro norte disminuye su impacto llegando al 4% de disminución. La zona centro sur y sur disminuyen muestran que el aumento de  $1^{\circ}$  Celsius impacta en un menos uno por ciento a la economía.

Los resultados también han revelado que el índice de vegetación (NDVI) está positivamente relacionado con la productividad laboral y es significativo para el análisis. Esto sugiere que una mayor presencia de vegetación, como en áreas verdes o bosques, puede estar asociada con un aumento en la productividad laboral. Estas conclusiones son coherentes con estudios previos que han

demostrado cómo un entorno más verde y natural puede tener efectos positivos en el bienestar y rendimiento de los trabajadores.

Además, en este estudio, consideramos otras variables significativas tanto climáticas como sociodemográficas. Estas interacciones complejas nos proporcionan una visión más completa de cómo diferentes factores se combinan para afectar la productividad laboral en el contexto del cambio climático.

Es importante destacar que, aunque el modelo ha mostrado una alta capacidad explicativa de la variabilidad de la temperatura en la productividad laboral, siempre debemos considerar el contexto específico del estudio y la posible influencia de otras variables que no fueron incluidas en el modelo. También es relevante mencionar que, hasta donde llega nuestro conocimiento, este es uno de los primeros estudios que analiza específicamente la relación entre el cambio climático y la productividad laboral en Chile.

Finalmente, este estudio proporciona una base sólida para comprender cómo el cambio climático puede afectar la productividad laboral en Chile. Estos hallazgos respaldan la importancia de considerar los impactos del estrés térmico en el ámbito laboral y económico, y ofrecen información valiosa para la formulación de políticas públicas y estrategias empresariales que puedan mitigar los efectos negativos del calor extremo en los trabajadores y mejorar la resiliencia económica del país en un mundo en constante cambio climático. Para futuras investigaciones, recomendamos seguir explorando y ampliando este marco conceptual teórico y empírico, considerando diferentes variables y contextos específicos, para obtener una comprensión aún más completa de los factores determinantes de la productividad laboral y sus implicancias en el contexto del cambio climático en Chile y otras regiones similares.

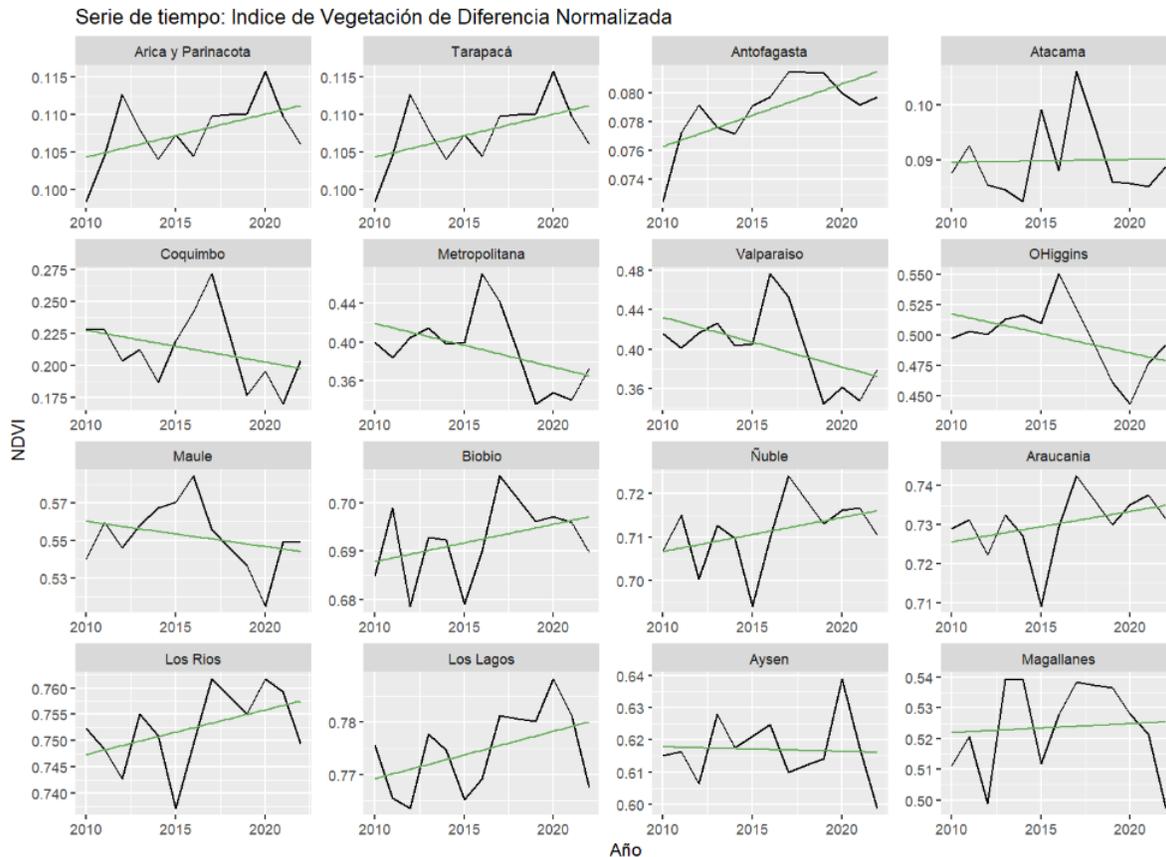
## VIII. Bibliografía.

1. Banco Central de Chile. (2018). Efectos de las temperaturas extremas sobre la actividad económica en Chile. Documentos de Trabajo / Banco Central de Chile, (824). Recuperado de <https://www.bcentral.cl/estudios/documentos-trabajo/dtbc824.pdf>
2. Banco Interamericano de Desarrollo. (2018). Cambio climático y productividad laboral en América Latina y el Caribe. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Cambio-climatico-y-productividad-laboral-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
3. Bernard, T. E., & Pourmoghani, M. (1999). Validation of NIOSH heat stress equations. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health.
4. Costa, H., Floater, G., Hooyberghs, H., Verbeke, S., & De Ridder, K. (2016). Climate change, heat stress and labour productivity: A cost methodology for city economies. London, UK: Centre for Climate Change Economics and Policy.
5. Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S., & Wheeler, D. (2014). Exposure to temperature extremes and the cost of adaptation. *Ecological Economics*, 102, 17-34
6. Day, E., Fankhauser, S., Kingsmill, N., Costa, H., & Mavrogianni, A. (2019). Upholding labour productivity under climate change: an assessment of adaptation options. *Climate policy*, 19(3), 367-385.
7. Delgado, L., Torres Gómez, M., Tironi, A., & Marín, V. (2015). Estrategia de adaptación local al cambio climático para el acceso equitativo al agua en zonas rurales de Chile.
8. Du, L., Guo, Y., & Wu, S. (2017). Assessment of heat-related health impacts on productivity labor in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(5), 460. doi: 10.3390/ijerph14050460
9. Grossman, G., & Helpman, E. (2018). Integrating climate change into growth theory. *The Economic Journal*, 128(612), F1-F29. doi: 10.1111/eoj.12483
10. Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2010). *Basic Econometrics*. McGraw-Hill Education.
11. Heal, G., & Park, J. (2016). Reflections—temperature stress and the direct impact of climate change: a review of an emerging literature. *Review of Environmental Economics and Policy*.
12. Health (US), Centers for Disease Control, Prevention (US), & Human Services Dept (US) (Eds.). (2018). *NIOSH criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments*. National Institute on Drug Abuse.
13. Hughes, A. M. (2023). Cambio Climático, Sequía y Pobreza en Chile (Tesis para optar al grado de Magíster en Análisis Económico).
14. Huang, S., et al. (2019). "Association between neighborhood socio-environmental factors and cognitive performance among elderly Chinese people." *Environmental Pollution* 245: 753-760. doi: 10.1016/j.envpol.2018.11.094.
15. Kjellstrom, T., Kovats, S., Lloyd, S. J., Holt, T., & Tol, R. S. (2009). The direct impact of climate change on regional labor productivity. *Archives of environmental & occupational health*, 64(4), 217-227.
16. Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Hyatt, O. (2016). Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts. *Annual review of public health*, 37, 97-112.
17. Kopp, R., Rasmussen, D., Mastrandrea, M., Muir-Wood, R., Wilson, P., Hsiang, S. M., ... Houser, T. (2014). *American climate prospectus: Economic risks in the United States*.

18. Kovats, S., Lloyd, S., Hunt, A., & Watkiss, P. (2011). The Impacts and Economics Costs on Health in Europe and the Costs and Benefits of Adaptation. Technical Policy Briefing Note 8, the Climate Cost Project. <http://www.climatecost.cc/>.
19. Liu, Y., Wang, Y., Ji, Y., Zhao, P., Zhao, X., Lu, Y., & Wu, W. (2021). Assessment of heat-related impacts of climate change on productivity labor in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 161.
20. Lemke, B., & Kjellstrom, T. (2012). Calculating workplace WBGT from meteorological data: a tool for climate change assessment. *Industrial health*, 50(4), 267-278.
21. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2017). Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático de Chile. Gobierno de Chile. Recuperado de <https://www.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/Segunda-Comunicacion-Nacional-de-Cambio-Climatico-de-Chile.pdf>
22. Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.
23. Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2020). *El cambio climático y el mundo del trabajo: Impactos y vulnerabilidades*. OIT.
24. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5_SPM_FINAL.pdf)
25. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). (2018). *Cambio climático y tierra: un informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de la tierra, la gestión sostenible de la tierra, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
26. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021). *Cambio climático 2021: Informe de los fundamentos físicos. Contribución del Grupo de trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del IPCC*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
27. Park, J., & Heal, G. (2013). Will we adapt? Temperature shocks, labor productivity, and adaptation to climate change in the United States. *American Economic Review*, 103(3), 166-172.
28. Park, J. (2019). Will we adapt? Temperature shocks, labor productivity, and adaptation to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 95, 62-80.
29. Pahlevan, N., & Entekhabi, D. (2015). Improving land surface temperature modeling using the assimilation of vegetation index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(4), 1414-1434
30. Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Miller, C., Arneth, A., . . . & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268-3273.
31. Roson, R., & Sartori, M. (2016). *Estimation of climate change damage functions for 140 regions in the GTAP9 database*. Policy Research Working Paper 7728. Washington, DC: World Bank.
32. Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of applied meteorology and climatology*, 50(11), 2267-2269.

## IX. Anexos.

### Anexo 1. Índice de vegetación Normalizada por región.



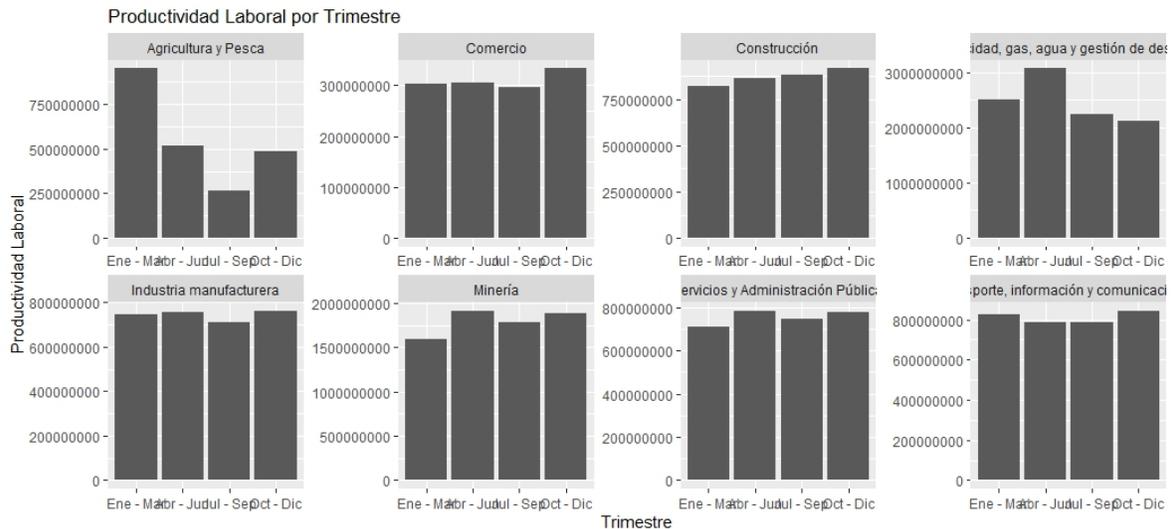
Fuente: Elaboración propia, con datos del satélite MODIS TERRA.

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) es una medida utilizada para evaluar la salud y densidad de la vegetación en un área determinada, especialmente en zonas cubiertas por vegetación como bosques, cultivos o áreas agrícolas. El NDVI se calcula a partir de imágenes satelitales que capturan la radiación reflejada por la superficie terrestre en dos longitudes de onda, generalmente en el rango del infrarrojo cercano y del rojo.

El valor del NDVI oscila entre -1 y 1. Un valor de -1 indica la presencia de agua, mientras que un valor cercano a 0 sugiere la presencia de suelo desnudo o superficies no vegetadas. Por otro lado, un NDVI cercano a 1 indica una vegetación densa y saludable. Cuanto mayor es el valor del NDVI, mayor es la densidad y salud de la vegetación presente en el área estudiada.

En resumen, un NDVI alto implica que la zona analizada está cubierta por una mayor cantidad de vegetación saludable, como se observa en las zonas centro sur del gráfico, mientras que un NDVI bajo indica la presencia de suelo desnudo o áreas con poca vegetación, como se observa en la zona norte principalmente. El NDVI es una herramienta útil para monitorear el estado de la vegetación y su cambio a lo largo del tiempo, lo que es relevante para estudios relacionados con el medio ambiente, la agricultura, la silvicultura y el cambio climático.

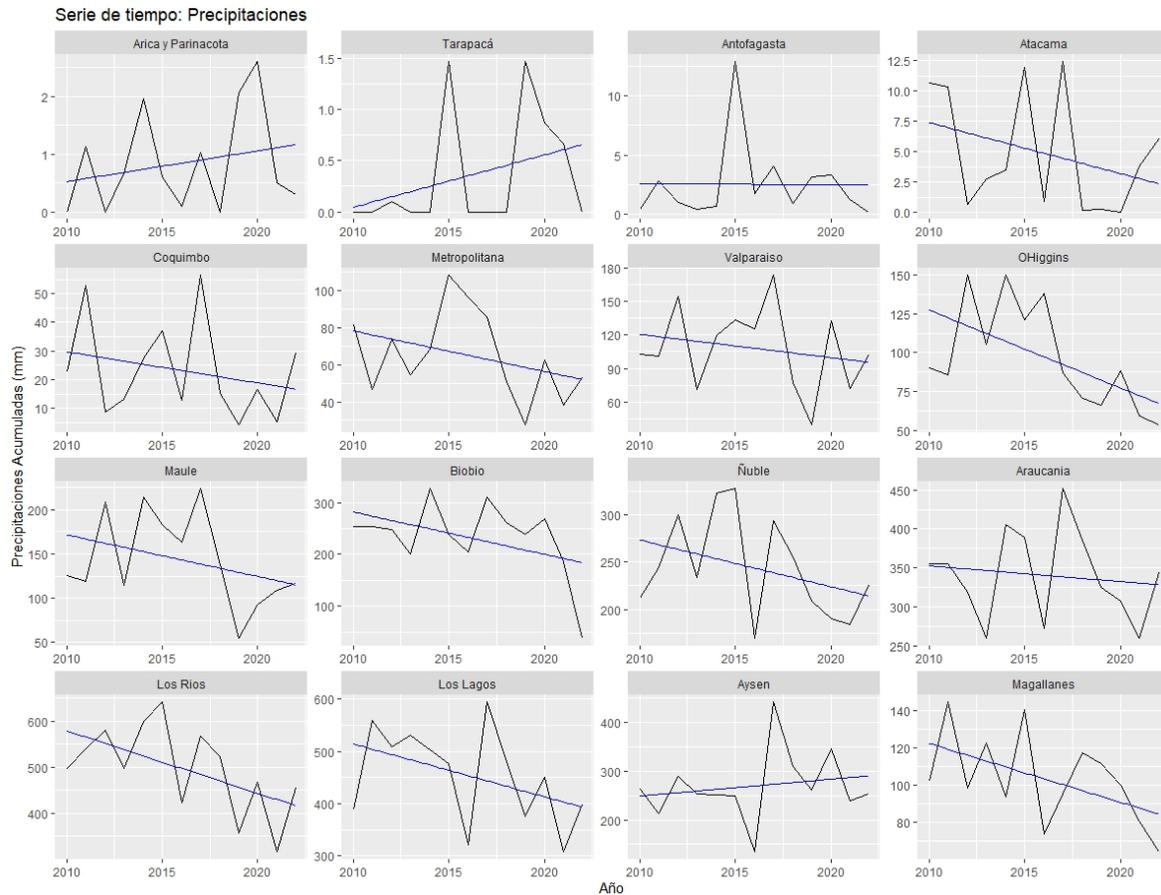
## Anexo 2. Productividad laboral por trimestre y actividad económica.



Fuente: Elaboración propia, con datos del Banco Central de Chile.

Las ocho actividades económicas analizadas muestran patrones estacionales trimestrales, reflejando la influencia de factores cíclicos y estacionales en su desempeño a lo largo del año. En el sector agrícola y pesquero, las cosechas y la pesca pueden experimentar fluctuaciones debido a los ciclos naturales de crecimiento y migración de especies. En el comercio, las ventas pueden verse influenciadas por temporadas específicas, como festividades o periodos de descuentos. La construcción experimenta cambios estacionales en la demanda de proyectos, relacionados con condiciones climáticas y preferencias del consumidor. Asimismo, el consumo de energía, gas y agua puede variar según las estaciones, como la demanda de calefacción o refrigeración. La industria y la minería enfrentan cambios estacionales, incluyendo periodos de mantenimiento de equipos y disponibilidad de recursos naturales. Además, los servicios y el transporte también presentan variaciones estacionales debido a las necesidades cambiantes de la población y días festivos. Estos patrones estacionales en las actividades económicas son cruciales para la toma de decisiones y la planificación en cada sector, asegurando una gestión eficiente y adaptada a las diferentes épocas del año.

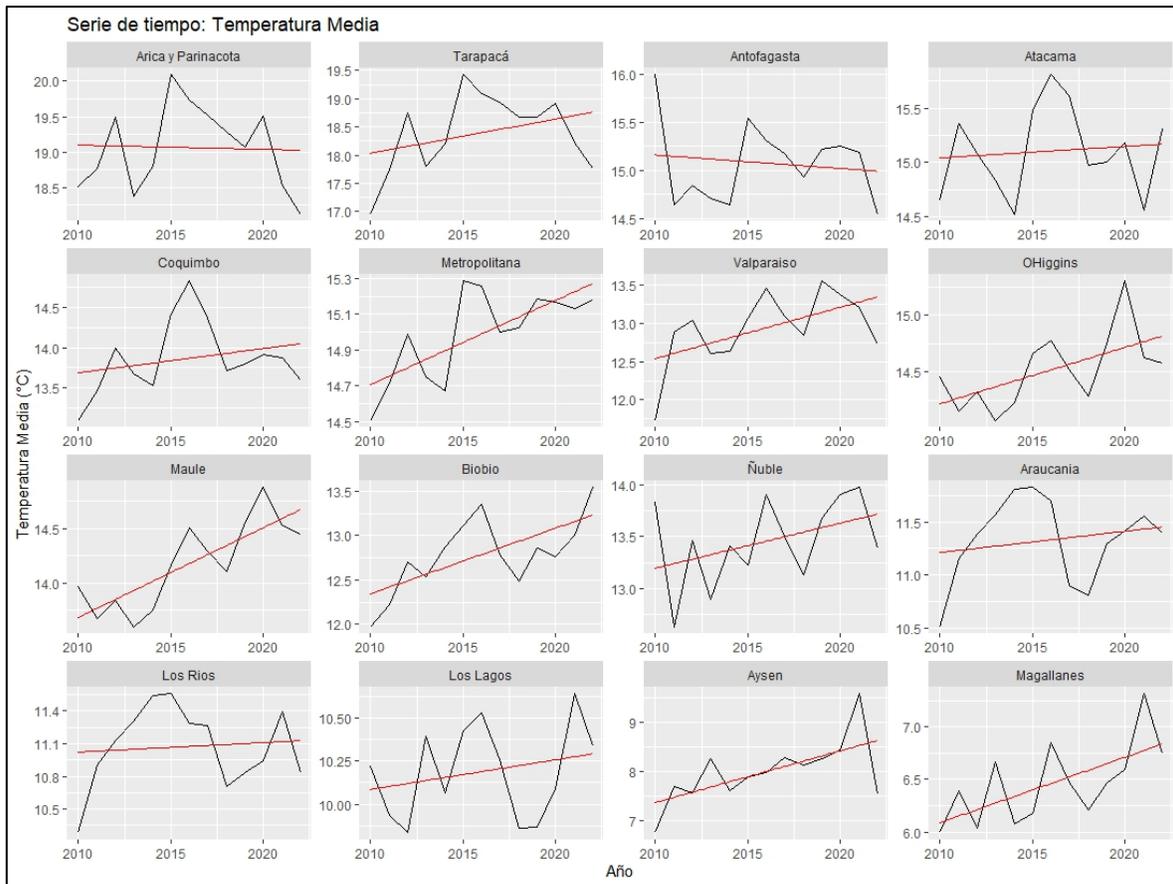
### Anexo 3. Precipitaciones por región.



Fuente: Elaboración propia, con datos de la Dirección Meteorológica de Chile.

El análisis de las precipitaciones acumuladas en distintas regiones de Chile muestra una tendencia a la disminución en las zonas del centro y sur del país, en contraste con la zona norte, donde los niveles de precipitación son más elevados. Sin embargo, es importante tener en cuenta no solo la tendencia general, sino también los niveles absolutos de precipitación en cada región. A pesar de que la zona centro-sur experimenta una disminución, sus niveles de precipitación aún pueden ser más altos en comparación con otras regiones. Estas variaciones en los patrones de precipitación tienen implicancias significativas para la gestión de recursos hídricos, la agricultura y otros sectores económicos que dependen del agua disponible. La consideración tanto de la tendencia como de los niveles absolutos de precipitación es esencial para una planificación adecuada y una comprensión completa de los efectos del cambio climático en las regiones de Chile.

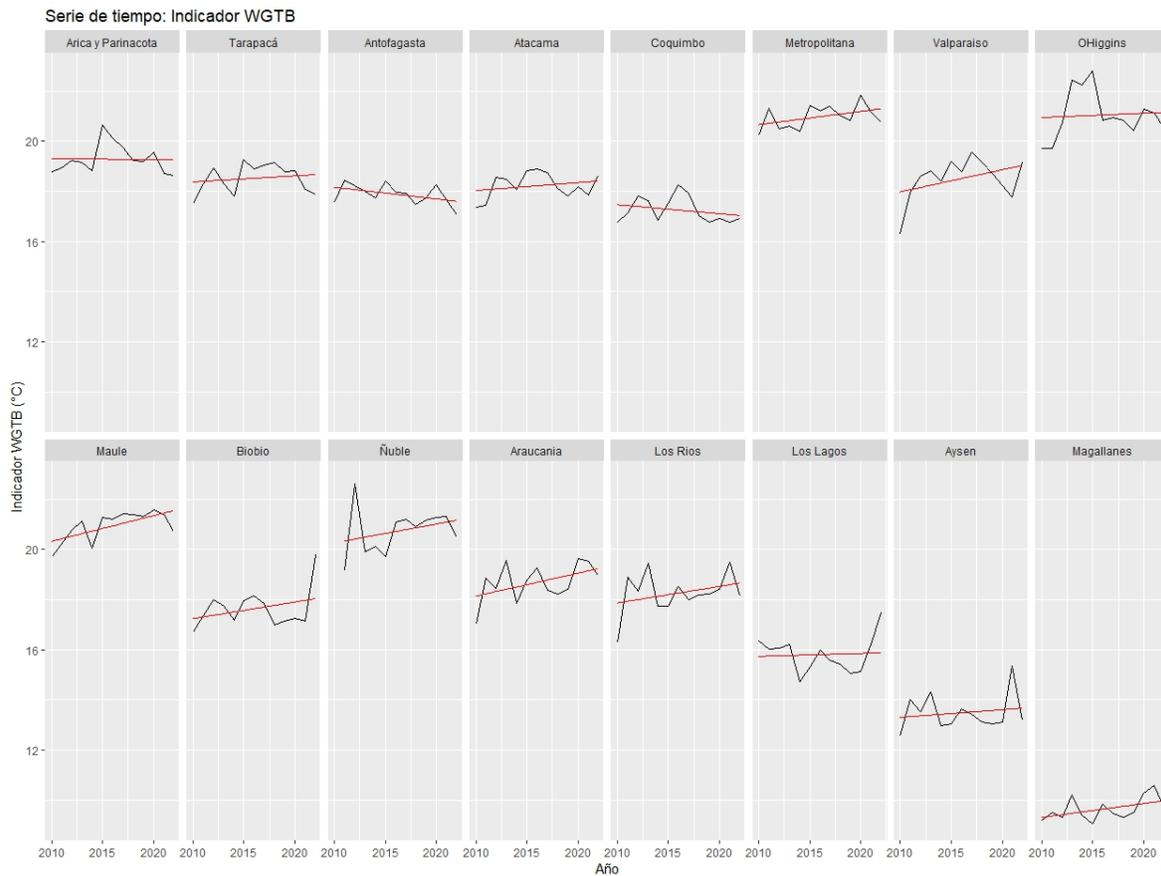
#### Anexo 4. Temperatura media por región.



Fuente: Elaboración propia, con datos de la Dirección Meteorológica de Chile.

El análisis de las temperaturas medias por año (2010 al 2022) en cada región de Chile revela una tendencia al alza en todas las zonas geográficas. El gráfico muestra claramente que las temperaturas han aumentado progresivamente durante este período, y las regiones del centro norte y norte del país presentan niveles más altos de temperatura media en comparación con las zonas del centro sur y sur. Esta tendencia al aumento de las temperaturas en las regiones del centro norte y norte sugiere una mayor exposición a condiciones climáticas extremas y estrés térmico en estas áreas, lo que puede tener importantes implicancias para la productividad laboral y la salud de los trabajadores en esas regiones.

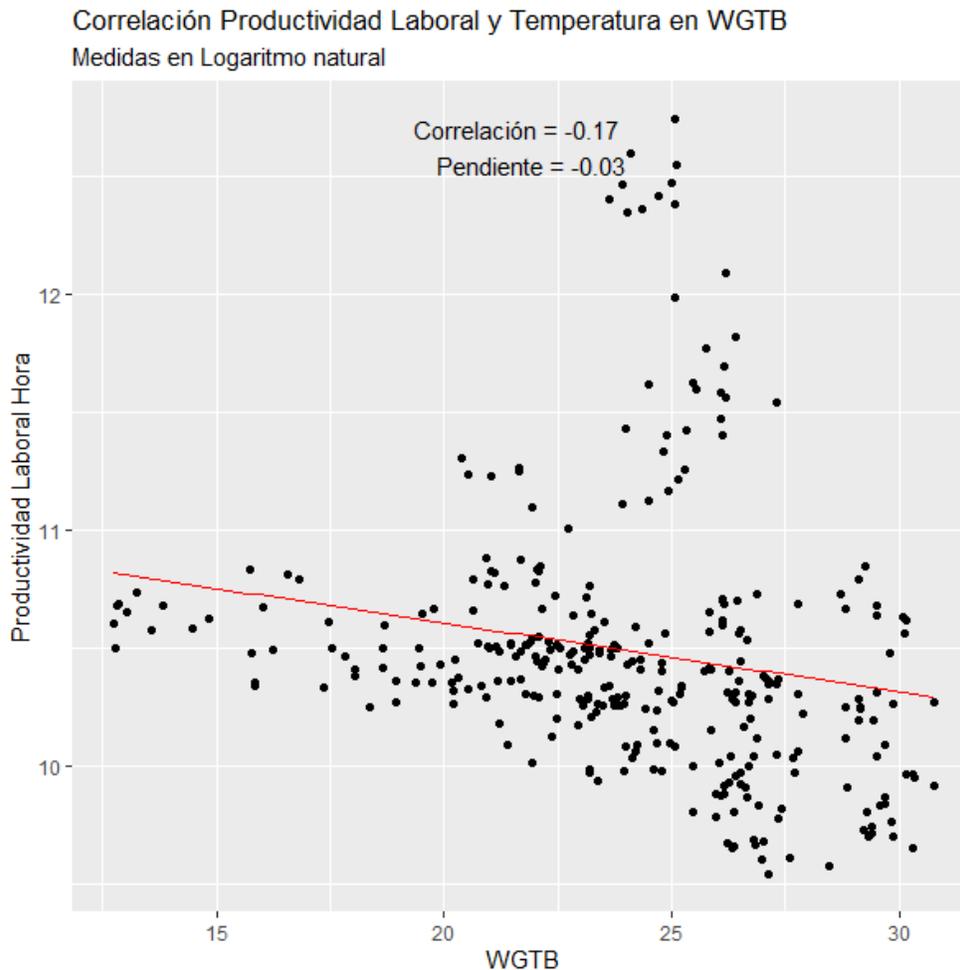
## Anexo 5. Indicador WGBT por región.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis del Indicador WGBT por región en Chile revela que las temperaturas más elevadas se encuentran principalmente en el norte y centro del país, mientras que en el sur se observan niveles de temperatura más bajos. A pesar de estas diferencias regionales, todas las zonas muestran una tendencia general al aumento de la temperatura. Esta tendencia al alza en todas las regiones sugiere un claro impacto del cambio climático en el país. Es importante destacar que las altas temperaturas en las regiones del norte y centro pueden tener consecuencias significativas para la salud humana, la agricultura y otros sectores económicos que son altamente sensibles al estrés por calor. Por otro lado, la disminución de las temperaturas en el sur puede tener implicaciones para la biodiversidad y los ecosistemas de la región. Este análisis resalta la necesidad de implementar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático para hacer frente a los efectos adversos que las variaciones térmicas pueden tener en diferentes regiones de Chile.

## Anexo 6. Correlación entre productividad laboral y WGBT.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación entre la productividad laboral y la variable temperatura (WGBT) revela una relación significativa y negativa entre ambas variables. El gráfico muestra claramente una pendiente de  $-0.03$ , lo que indica que a medida que aumenta la temperatura, la productividad laboral tiende a disminuir. La correlación de  $-0.17$ , aunque no es extremadamente alta, sugiere que existe una asociación estadísticamente significativa entre la temperatura y la productividad laboral.

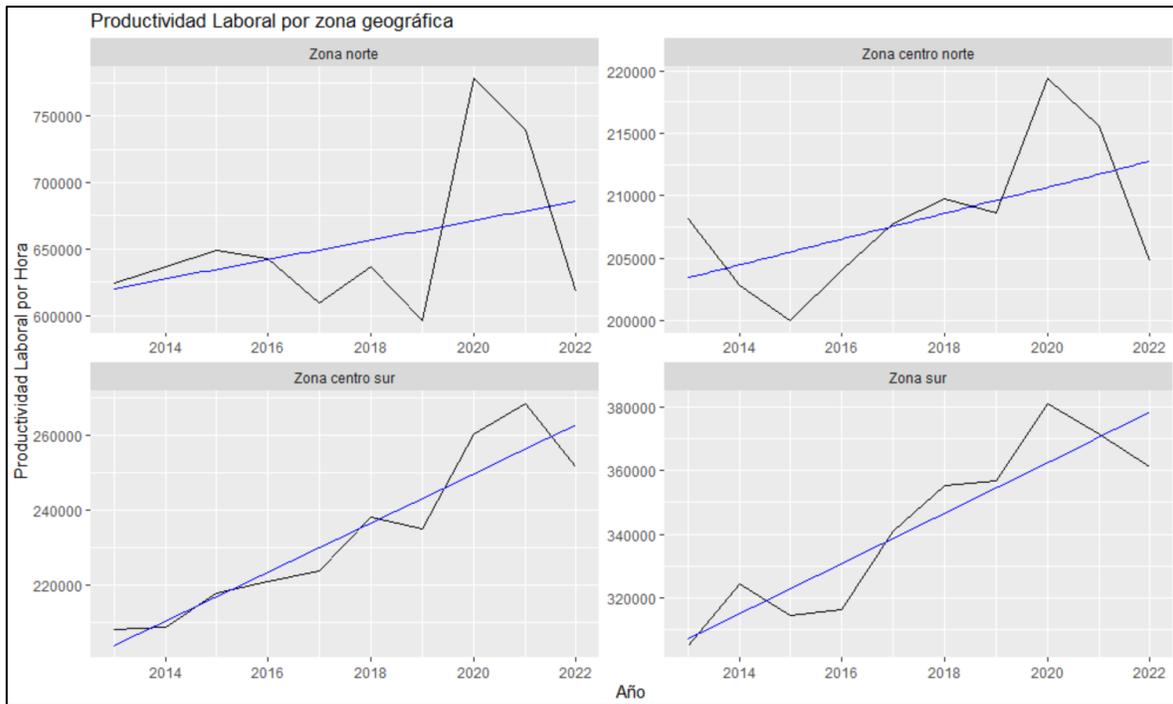
Esta relación negativa entre la temperatura y la productividad laboral puede tener importantes implicaciones económicas y sociales. El estrés por calor, generado por altas temperaturas, puede afectar la salud y el rendimiento de los trabajadores, lo que a su vez puede reducir la eficiencia y productividad en diversas industrias. Sectores como la agricultura, construcción, minería y otros trabajos al aire libre, que están expuestos a condiciones climáticas extremas, podrían ser especialmente vulnerables a este impacto.

Es fundamental considerar estos hallazgos al planificar políticas de adaptación y mitigación frente al cambio climático. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el diseño de medidas de protección para los trabajadores expuestos a altas temperaturas podrían ser estrategias clave para mitigar los efectos negativos en la productividad laboral. Además, se deben considerar

medidas de planificación urbana y ambiental que contribuyan a crear entornos laborales más seguros y saludables frente a las crecientes temperaturas.

En conclusión, este análisis de correlación nos muestra que la relación entre la temperatura (WGTB) y la productividad laboral es negativa, lo que resalta la importancia de abordar el impacto del cambio climático en el ámbito laboral y adoptar medidas para proteger la salud y bienestar de los trabajadores, así como para garantizar la sostenibilidad y productividad de las actividades económicas en el futuro.

## Anexo 7. Productividad laboral según zona geográfica.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis gráfico de la productividad laboral por hora a lo largo del periodo 2013-2022 en diferentes zonas geográficas revela una marcada tendencia al alza en todas las regiones evaluadas, desde la zona norte hasta la zona sur. Esta tendencia podría estar relacionada con diversos factores, como posibles avances tecnológicos, mejoras en la eficiencia de procesos o cambios en las condiciones laborales. Es interesante destacar que esta tendencia ascendente en la productividad laboral es consistente con la literatura que sugiere que los avances tecnológicos y las mejoras en la organización del trabajo pueden contribuir al incremento de la productividad. Además, la correlación negativa observada entre la productividad laboral y el índice WBGT (índice de estrés térmico) podría indicar que las variaciones en las condiciones climáticas están asociadas con cambios en la productividad laboral en la dirección opuesta. Esta observación, junto con la tendencia positiva de la productividad a lo largo del tiempo, respalda la validez de la relación planteada en la regresión lineal, sugiriendo que no hay efectos espurios y que la influencia del estrés térmico en la productividad laboral es plausible y relevante en este contexto.

La productividad laboral se obtiene como la fracción entre producto interno bruto,  $PIB_{a,t,r,s}$ , sobre el número de ocupados,  $OCUP_{a,t,r,s}$ , por las horas efectivas,  $hrs_{a,t,r,s}$ , trabajadas en el año, trimestre, región y sector. Todo esto en logaritmo natural, como se muestra a continuación:

$$PL_{a,t,r,s} = \ln \left( \frac{PIB_{a,t,r,s}}{OCUP_{a,t,r,s} * hrs_{a,t,r,s}} \right)$$

## Anexo 8. Resultados de los test de Robustes.

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA)

Response: lg\_prod.hr

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
wgtb	1	0.016	0.016	0.3255	0.5684358
lg_ndvi	1	119.017	119.017	2481.1021	< 2.2e-16 ***
ed.bas	1	3.219	3.219	67.1027	6.272e-16 ***
edad_60_mas	1	32.544	32.544	678.4261	< 2.2e-16 ***
lg_ndvi:lg_wgtb	1	11.236	11.236	234.2401	< 2.2e-16 ***
lg_wgtb:edad_45_59	1	12.921	12.921	269.3697	< 2.2e-16 ***
lg_wgtb:zona.n	1	1.843	1.843	38.4213	7.712e-10 ***
lg_ndvi:q1	1	0.821	0.821	17.1092	3.763e-05 ***
lg_ndvi:lg_agyp	1	16.180	16.180	337.2924	< 2.2e-16 ***
q1:lg_agyp	1	10.408	10.408	216.9736	< 2.2e-16 ***
zona.n:lg.min	1	62.387	62.387	1300.5662	< 2.2e-16 ***
lg_mujer:d.se	1	0.760	0.760	15.8518	7.242e-05 ***
ed.bas:lg.min	1	65.067	65.067	1356.4226	< 2.2e-16 ***
lg.cons:edad_15_29	1	0.550	0.550	11.4561	0.0007346 ***
lg_pp:lg_vv	1	0.230	0.230	4.8038	0.0285790 *
edad_45_59:lg.ind	1	26.412	26.412	550.5994	< 2.2e-16 ***
ed.med:zona.cn	1	2.217	2.217	46.2171	1.630e-11 ***
lg_pp:lg_hr	1	1.957	1.957	40.7878	2.382e-10 ***
lg_ndvi:zona.n	1	1.812	1.812	37.7817	1.060e-09 ***
ed.med:d.si	1	0.350	0.350	7.2893	0.0070295 **
Residuals	1259	60.393	0.048		

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fuente: Elaboración propia.

El ANOVA de la tabla 1, resume el nivel de significancia de las variables, las cuales en su mayoría son significativas en el nivel más alto. Por tanto, todas las diferencias entre los grupos son estadísticamente significativas. En otras palabras, hay evidencia suficiente para afirmar que al menos dos de los grupos en estudio tienen medias diferentes en la variable dependiente que se está analizando. Esto implícitamente también nos está indicando que el poder de la muestra es alto, para ello se realiza un test de prueba.

El poder estadístico (tabla 2) con un nivel de 1 significa que el análisis estadístico tiene una probabilidad del 100% de detectar un efecto real si existe en la población subyacente. En otras palabras, el poder estadístico máximo indica que el estudio es capaz de identificar cualquier diferencia o relación significativa que pueda existir en los datos.

Tabla 2. Poder estadístico.

Multiple regression power calculation	
u =	22
v =	1236
f2 =	0.2
sig.level =	0.05

power = 1

---

*Fuente: Elaboración propia.*

Siguiendo con el análisis de especificación del modelo, en la tabla 8, se realiza el test de Durbin-Watson, que es una prueba estadística utilizada para detectar la presencia de autocorrelación de primer orden en los residuos de un modelo de regresión. La autocorrelación ocurre cuando los errores o residuos del modelo muestran algún patrón de dependencia serial, es decir, cuando los valores de los residuos en un momento dado están correlacionados con los valores de los residuos en momentos anteriores. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Test de Autocorrelación

---

Durbin-watson test
data: lm1
DW = 2.1849, p-value = 0.9993
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0

---

*Fuente: Elaboración propia.*

Con un resultado de 2.138, el valor del coeficiente de Durbin-Watson se encuentra alrededor de 2, lo que sugiere que no hay autocorrelación serial significativa en los residuos del modelo de regresión. Lo cual indica que el modelo de regresión puede estar bien especificado y que los errores son independientes entre sí, lo que significa que no hay patrones sistemáticos sin explicar en los datos, por otra parte el p-value confirma el nivel de significancia del modelo y rechaza la hipótesis nula de presencia de autocorrelación en el modelo.

El test de White (tabla 3), también conocido como test de heterocedasticidad o Non-constant Variance Score Test, se utiliza para evaluar si la varianza de los residuos del modelo de regresión es constante o si cambia de manera sistemática con respecto a los valores ajustados. La tabla a continuación muestra los resultados finales obtenidos.

Tabla 3. Test de Heterocedasticidad

---

Test de white
Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.05602113, Df = 1, p = 0.8129

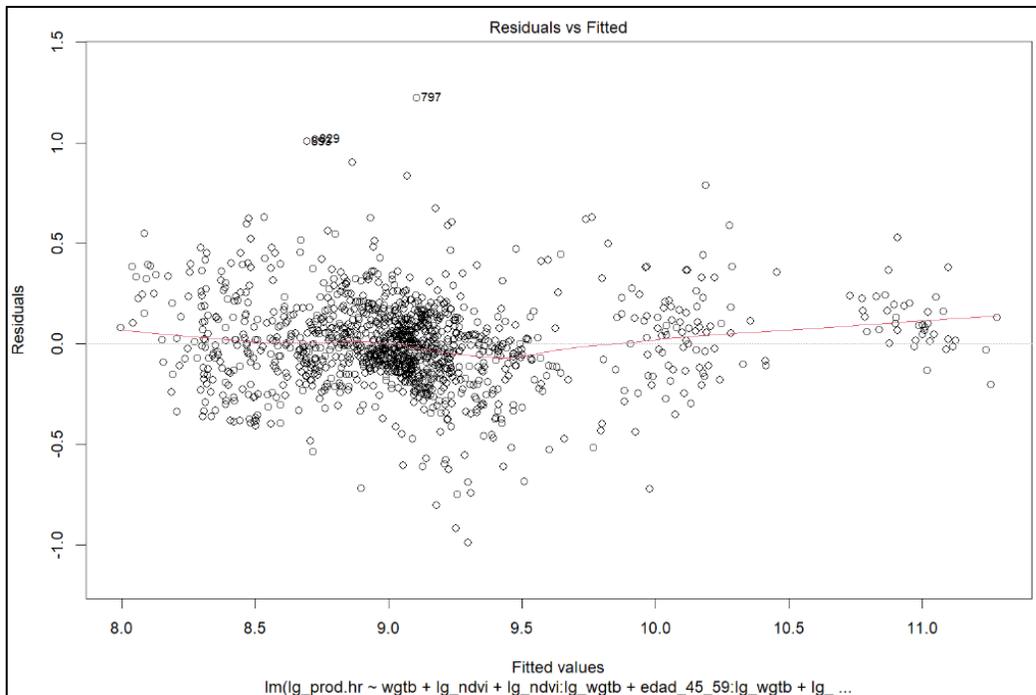
---

*Fuente: Elaboración propia.*

En el resultado, el valor p (0.12924) es mayor que el nivel de significancia utilizado (0.05). Esto indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad. En otras palabras, no se ha encontrado evidencia significativa de heterocedasticidad en los residuos del modelo. Por lo tanto, se puede asumir que la varianza de los residuos es constante en todo el rango de valores ajustados del modelo.

Por otra parte, al observar el gráfico de residuos no se aprecian patrones claros de embudo o cualquier otro patrón sistemático, esto sugiere que la heterocedasticidad no está afectando de manera importante la estimación del modelo y la precisión de los resultados.

Gráfico 1. Residuos vs valores ajustados del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del White test sugieren que no hay evidencia significativa de heterocedasticidad en el modelo y que la suposición de homocedasticidad puede considerarse válida. Esto es positivo, ya que asegura que los errores residuales tengan una varianza constante y permiten una interpretación más precisa de los resultados del modelo.

Por tanto, es posible continuar adelante con el análisis del modelo para evaluar que se cumplan los demás supuestos del modelo lineal múltiple (normalidad, linealidad, independencia de los residuos, endogeneidad, entre otros).

Para la prueba de endogeneidad se realizaron correlaciones entre las variables, como se muestra a continuación.

Tabla 4. Matriz de correlaciones – Endogeneidad.

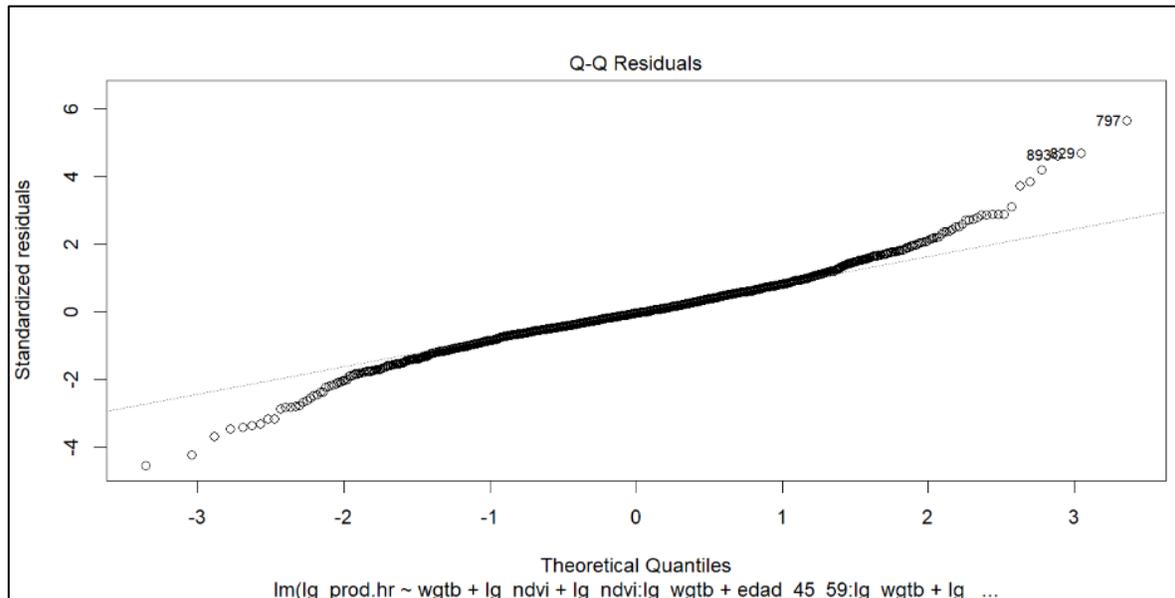
	wgtb	lg_ndvi	lg_wgtb	edad_45_59	zona.n	q1	lg.agyp	ed.bas
[1,]	-1.053148e-16	1.316e-17	-0.01072771	0.01114919	-0.001201575	-0.01471655	0.03025743	5.181532e-16
	lg.min	edad_60_mas	lg_mujer	d.se	lg.cons	edad_15_29	lg_pp	
[1,]	0.001938548	4.028481e-16	-0.009439729	0.004924698	0.01362396	-0.02943326	0.000573928	0.1124971
	lg.indc	ed.med	zona.cn	lg_hr	d.si			
[1,]	-0.004532706	0.005541267	-0.007425801	-0.1016241	-0.004924698			

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos en la matriz de correlaciones sugieren que las correlaciones entre las variables independientes y los residuos del modelo son muy cercanas a cero. Esto podría indicar que no hay una correlación significativa entre las variables independientes y los errores del modelo.

Un valor de correlación cercano a cero implica que las variables independientes no están relacionadas linealmente con los residuos del modelo. En otras palabras, los errores no parecen depender de las variables independientes, lo cual es una buena señal, ya que sugiere que la endogeneidad podría no ser un problema importante en este modelo de regresión.

Gráfico 2. Normalidad, Q-Q Residuos



Fuente: Elaboración propia.

Según Montgomery, Peck y Vining (2012), es común que en un gráfico Q-Q, los puntos se desvíen ligeramente de la línea recta en las colas, especialmente si tienes una muestra grande o si hay valores atípicos presentes. Pequeñas desviaciones en las colas no necesariamente invalidan la asunción de normalidad, especialmente si la muestra es grande. Un defecto común que aparece en la gráfica de probabilidad normal es la ocurrencia de residuos grandes. A veces, esto es una indicación de que las observaciones correspondientes son valores atípicos (Montgomery et al., 2012, p.246).

Sin embargo, dado que los resultados no se distribuyen de manera normal se realizó una regresión cuantílica, en distintos cuantiles, lo cual corroboro la estabilidad del modelo de regresión 1. A continuación se muestran los resultados de la regresión cuantílica en la tabla 5. La regresión cuantílica es adecuada para manejar datos con no normalidad y puede proporcionar estimaciones más robustas.

Tabla 5.

Parametric coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	13.2033225	0.3755222	35.160	< 2e-16 ***
wgtb	-0.0251212	0.0091979	-2.731	0.006399 **
lg_ndvi	0.5790670	0.2420091	2.393	0.016869 *
ed.bas	-0.6256016	0.0542521	-11.531	< 2e-16 ***
edad_60_mas	-0.0243548	0.0106101	-2.295	0.021872 *
lg_ndvi:lg_wgtb	-0.3173389	0.0814371	-3.897	0.000103 ***

lg_wgtb:edad_45_59	0.0180088	0.0158844	1.134	0.257118	
lg_wgtb:zona.n	-0.5884757	0.0713298	-8.250	4.44e-16	***
lg_ndvi:q1	0.0274592	0.0147056	1.867	0.062097	.
lg_ndvi:lg.agyp	0.0703892	0.0056038	12.561	< 2e-16	***
q1:lg.agyp	0.0343666	0.0035046	9.806	< 2e-16	***
zona.n:lg.min	0.1004064	0.0050065	20.055	< 2e-16	***
lg_mujer:d.se	0.0373538	0.0344938	1.083	0.279054	
ed.bas:lg.min	0.0208219	0.0009853	21.132	< 2e-16	***
lg.cons:edad_15_29	0.0032516	0.0008152	3.989	7.03e-05	***
lg_pp:lg_vv	-0.0047106	0.0027000	-1.745	0.081281	.
edad_45_59:lg.ind	0.0232279	0.0014916	15.572	< 2e-16	***
ed.med:zona.cn	-0.0034161	0.0035988	-0.949	0.342688	
lg_pp:lg_hr	0.0029196	0.0014267	2.046	0.040920	*
lg_ndvi:zona.n	-0.5933304	0.0992874	-5.976	2.98e-09	***
ed.med:d.si	0.0096124	0.0334534	0.287	0.773902	

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

---

Quantile Fidelity at tau = 0.5 is 97.9489

Effective Degrees of Freedom = 22      sample Size = 1280

---

En resumen, la regresión cuantílica es una herramienta útil cuando se trabaja con datos no normales o con distribuciones asimétricas, ya que ofrece una mayor flexibilidad y robustez en la estimación. No requiere asumir normalidad: A diferencia de la regresión lineal ordinaria, que asume normalidad en los residuos, la regresión cuantílica no hace esta suposición. En cambio, estima los cuantiles condicionales de la variable dependiente, lo que permite que el modelo sea más flexible y pueda adaptarse a distribuciones no normales, aportando en los siguientes puntos:

1. **Robustez ante valores atípicos:** La regresión cuantílica es menos sensible a valores atípicos en los datos, ya que se centra en estimar cuantiles específicos de la variable dependiente. Los cuantiles son menos afectados por valores extremos en comparación con la media o la mediana, lo que hace que la regresión cuantílica sea más robusta en presencia de observaciones atípicas.
2. **Estimación de relaciones no lineales:** La regresión cuantílica permite modelar relaciones no lineales entre las variables independientes y la variable dependiente. Al estimar diferentes cuantiles, el modelo puede capturar efectos heterogéneos en diferentes partes de la distribución de la variable dependiente.
3. **Flexibilidad en la interpretación:** Al estimar diferentes cuantiles, la regresión cuantílica proporciona información detallada sobre cómo las variables independientes afectan diferentes partes de la distribución de la variable dependiente. Esto permite una interpretación más rica y completa de los resultados.
4. **Adecuada para datos asimétricos:** Si los datos tienen una distribución asimétrica o sesgada, la regresión cuantílica puede proporcionar estimaciones más precisas y adecuadas para describir la relación entre las variables.