



INSTITUTO DE ESTUDIOS URBANOS Y TERRITORIALES
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ESTUDIOS URBANOS

Descifrando la Huella de Carbono en crisis climática y sociosanitaria. Un análisis de regresión múltiple para la huella de energía y calefacción en hogares de cuatro ciudades chilenas (2019-2021)

Tesis presentada para obtener el grado de magíster en Asentamientos Humanos
y Medio Ambiente

Investigación enmarcada en el proyecto “Impactos del COVID en la huella de carbono de hogares de
Chile ANID COVID 0159”, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile ANID

Diego Gálvez

Profesora Guía: Carolina Rojas

Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales

Pontificia Universidad Católica de Chile

Enero de 2023

Agradecimientos

No pensé que volvería a escribir agradecimientos de una nueva tesis, pero aquí estoy nuevamente.

A mis padres, papá y mamá, quienes indirectamente han sido parte de esta tesis, siendo el colchón necesario no sólo en el proceso de postgrado, sino en todo lo que posibilitó esto en un contexto sociosanitario adverso. A ellos, quienes siempre han estado.

A Génesis, quien ha sido mi compañera y nueva familia, acompañándome diariamente en todo este proceso. Su contención, paciencia y amor, han sido claves estos dos años. A ella, quien llegó en el mejor momento.

A Carolina Rojas, quien supo acoger mis intereses y hacerme parte del proyecto de investigación Huella Covid, siendo clave para desarrollar una investigación de carácter cuantitativo, que involucró salir de mi zona de confort. A Marc Quintana e Iván Muñiz, quienes con sus conocimientos me apoyaron directa e indirectamente en el cálculo e interpretación de regresiones lineales múltiples. Por último, a todo el equipo del proyecto ANID COVID 0159, quienes en un período altamente complejo como el de la pandemia, lograron llevar adelante esta importante tarea.

Al apoyo que brindó ANID gracias a la Beca Magister Nacional y que posibilitó mi realización de este postgrado.

Y a quienes sin saberlo han sido parte de cada día, durante dos años de aprendizaje y crecimiento.

Resumen

Las ciudades generan gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales afectan directamente en el cambio climático global. Pese a que se ha demostrado que las GEI globales disminuyeron durante la pandemia sociosanitaria, las emisiones locales vieron un fuerte aumento en este período. Esta investigación estudió la influencia de diferentes factores en la huella de carbono de calefacción y energía de hogares en ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y posterior al confinamiento por COVID-19. Mediante modelos de regresión múltiple, se demostró que la calefacción a leña, bajas temperaturas, viviendas más grandes y con mayor número de habitantes, explican en general el aumento de la huella de carbono, especialmente en confinamiento. Se discute sobre la urgencia de desarrollar políticas públicas integradas que consideren eficiencia energética de las viviendas, pobreza energética del hogar y el arraigo cultural al uso de la leña en estas ciudades.

Palabras clave

Cambio climático – Pandemia sociosanitaria – Gases de efecto invernadero – Huella de Carbono – Energía – Calefacción.

Contenido

1. Introducción y planteamiento del problema.....	7
2. Marco Teórico	11
2.1. Sustentabilidad, Cambio climático y Ciudad.....	11
2.1.1. Sustentabilidad y el paradigma del Urbanismo Climático	11
2.1.2. Descifrando factores de incidencia en las emisiones urbanas.	13
2.2. Huella de Carbono	16
2.2.1. Indicadores, huella y medio ambiente	16
2.2.2. Huella de carbono en las ciudades	17
2.3. Pandemia y Medio Ambiente	19
2.3.1. <i>El enfoque ambiental de la crisis sociosanitaria</i>	19
2.3.2. <i>Huella de carbono y emisiones GEI en crisis sociosanitaria</i>	21
3. Pregunta de investigación	24
4. Hipótesis.....	24
5. Objetivos	24
5.1. Objetivo General.....	24
5.2. Objetivos Específicos.....	25
6. Metodología	25
6.1. Caso de estudio.....	25
6.2. Enfoque metodológico.....	29
6.3. Instrumentos de recolección de datos	29
6.4. Técnicas de análisis de la información.....	31
6.4.1. <i>Modelo de regresión múltiple para las huellas de carbono</i>	32
7. Resultados.....	35
7.1. “¿Team Invierno o Team Verano?”: Factores explicativos de la huella de carbono por consumo de calefacción en el hogar.....	35
7.2. “Cuando salgas apaga la luz”: Factores explicativos de la huella de carbono por consumo de energía para otros usos distintos a calefaccionar el hogar.....	46
7.3. “Dime qué consumes, dónde vives y te diré cuánto emites”: Análisis del impacto ambiental de variables significativas en la huella de carbono en ciudades del centro-sur de Chile	55
8. Discusión.....	60

9.	Conclusiones.....	64
10.	Bibliografía.....	67
11.	Anexos.....	75
11.1.	Condicionantes de los modelos	75
11.2.	Plan de investigación	79
11.3.	Modelos de regresión por ciudad	80

Índice de figuras

Figura 1.	América Latina y resto del mundo: participación (%) de los sectores en la emisión de gases de efecto invernadero, 2016	8
Figura 2.	América Latina: emisiones de CO ₂ (megatoneladas) del sector energía en 1990, 2000 y 2016 ..	8
Figura 3.	Representación de los límites planetarios y las huellas hídricas asociados a niveles de incertidumbre	17
Figura 4.	Área de casos de estudio.....	26
Figura 5.	Casos positivos de COVID-19 confirmados por cada 100.000 habitantes para regiones seleccionadas	27
Figura 6.	Cuarentenas para las ciudades en estudio	27
Figura 8.	Promedio huella de carbono por hogar (kgCO ₂ eq/hogar) en las ciudades en estudio, invierno del 2020	28
Figura 9.	Gráfico de variables predictoras, calefacción, invierno del 2019 (T0)	37
Figura 10.	Gráfico de variables predictoras, calefacción, invierno del 2020 (T1)	40
Figura 11.	Gráfico de variables predictoras, calefacción, verano del 2021 (T2).....	43
Figura 12.	Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, invierno del 2019 (T0).....	47
Figura 13.	Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, invierno del 2020 (T1).....	50
Figura 14.	Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, verano del 2021 (T2)	53
Figura 15.	Ecuación de impacto de una vivienda de madera con calefacción a leña, huella de carbono de energía para calefaccionar.....	56
Figura 16.	Ecuación de impacto de una vivienda de madera con calefacción a leña, huella de carbono de energía sin calefaccionar	57

Índice de tablas

Tabla 1.	Tipo de combustible y factor de emisión asociado.....	30
Tabla 2.	Variables disponibles a partir de resultados del estudio de Rojas et al., (2022).....	31

Tabla 3. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, invierno del 2019 (T0).....	38
Tabla 4. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, invierno del 2020 (T1*).....	39
Tabla 5. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, verano 2021 (T2).....	44
Tabla 6. Comparación de coeficientes con mayor significancia estadística en la huella de carbono por calefacción según período.	45
Tabla 7. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, invierno 2019 (T0)	48
Tabla 8. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, invierno 2020 (T1*)	51
Tabla 9. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, verano 2021 (T2).....	52
Tabla 10. Comparación coeficientes con mayor significancia estadística en la huella de carbono por energía según período	54
Tabla 11. Variables significativas en la huella de carbono por calefacción	58
Tabla 12. Variables significativas en la huella de carbono por energía	59

Listado de abreviaciones

CO₂ = Dióxido de carbono

GEI = Gases de efecto invernadero

IPCC = (En inglés) Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático

KgCO₂eq = Kilogramos de dióxido de carbono equivalente.

MtCO₂eq = Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente.

ODS = Objetivos de Desarrollo Sostenible.

ONU = Organización de las Naciones Unidas.

Ppm = Partes por millón.

1. Introducción y planteamiento del problema

El cambio climático se ha convertido en una crisis global caracterizada por el calentamiento del planeta (Bárcena et al., 2020; M. Rojas et al., 2019), el aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como huracanes, incendios forestales, inundaciones, entre otros. El último (6^{to}) informe del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), del año 2022, reconoce formalmente que el cambio climático existe y que es inducido por el ser humano, causando efectos adversos e impactos a la naturaleza y a las personas, más allá de la variabilidad climática natural, y que aquellas personas y sistemas más vulnerables se ven afectados de manera desproporcionada por estos efectos.

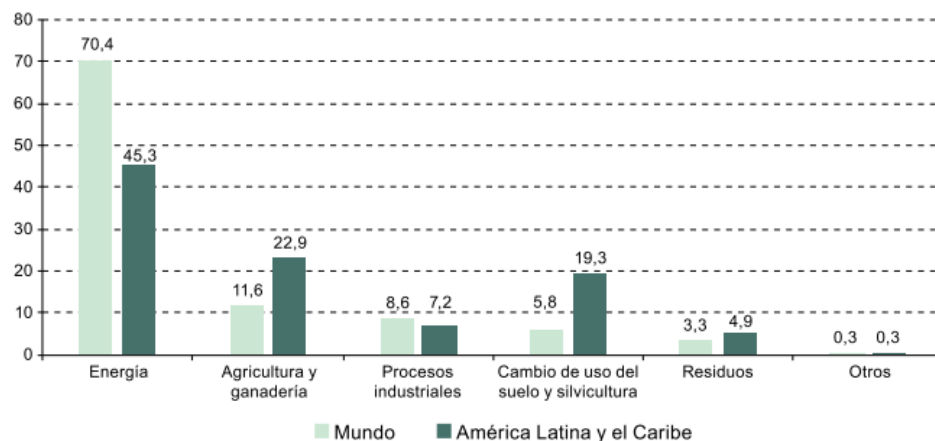
Esta tendencia ha estado acompañada de un progresivo aumento de la urbanización a nivel mundial. Hoy en día, aproximadamente la mitad de la población mundial vive en ciudades y se proyecta que, para el año 2050, esta cifra aumente hasta cerca del 70% de la población (Seto et al., 2017). Los espacios urbanos también se caracterizan por ser sistemas socioecológicos complejos (Barton, 2009), siendo responsables de generar cerca del 70% de las emisiones de GEI a nivel global (Iván Muñiz et al., 2016) y consumir el 78% de la energía mundial (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018). En América Latina, desde 1950 hasta la actualidad, el porcentaje de población que vive en las ciudades subió del 41% hasta el 80% (ONU-Hábitat, 2016), alcanzando cerca de 648 millones de habitantes, con una proyección cercana a 767 millones de habitantes al año 2050 (C. Rojas et al., 2019).

El año 2015, la comunidad internacional reconoce que el actual estilo de desarrollo es insostenible. El mismo año, los jefes de Estado y gobiernos adoptaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sustentable y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS). Un año después, en noviembre del 2016 se aprueba el Acuerdo de París, a partir de la XXI Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21). El acuerdo propone una serie de medidas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante acciones de mitigación y adaptación, como mantener los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C y alcanzar la neutralidad en carbono – es decir, que las absorciones compensen las emisiones – hacia el año 2050 (Bárcena et al., 2020).

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) aumentaron de 280 partes por millón (ppm) en la era preindustrial a 407 ppm en el año 2018 (NOAA, 2016; Tans & Keeling, 2014). Además, en el año 2016 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzaron las 50 gigatoneladas de CO₂eq a nivel global; de los cuales América Latina emitió 4,2 gigatoneladas, equivalente al 8,3% del total (IPCC, 2018). En cuanto a su estructura, según datos de la CEPAL en base a Gütschow et al. (2016), el 70% de las emisiones del mundo provienen del sector energético, mientras que en América Latina la

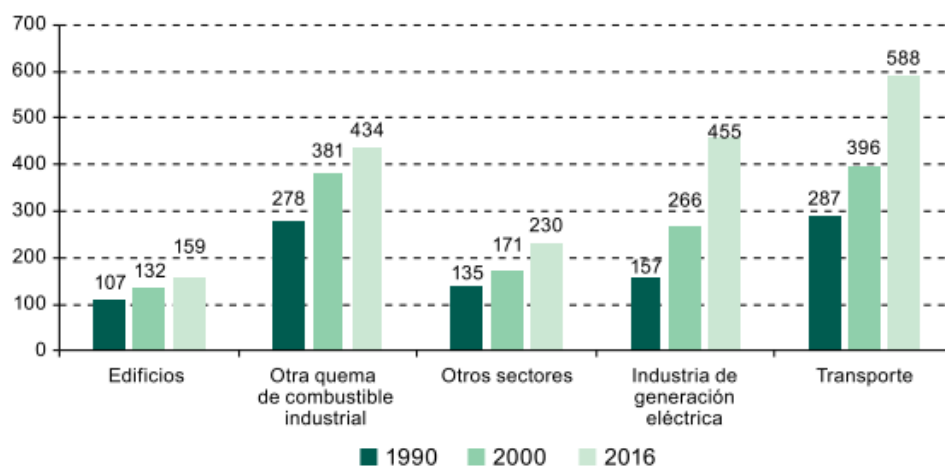
participación de este sector alcanza el 45%, siendo explicada principalmente por el transporte, generación eléctrica y quema de combustible (ver figuras 1 y 2).

Figura 1. América Latina y resto del mundo: participación (%) de los sectores en la emisión de gases de efecto invernadero, 2016



Fuente: Bárcena et al., 2020

Figura 2. América Latina: emisiones de CO₂eq (megatoneladas) del sector energía en 1990, 2000 y 2016



Fuente: Bárcena et al., 2020

En Chile, el 90% de la población vive en ciudades (M. Rojas et al., 2019) y es el país con mayores emisiones per cápita en Latinoamérica, alcanzando 4,8 tCO₂ por habitante (Banco Mundial, 2021). Según el Inventario Nacional de Emisiones del año 2018 (Ministerio del Medio Ambiente, 2020), el

sector Energía representa el 78% de las emisiones totales, en mayor medida explicado por el consumo de carbón mineral para generación eléctrica y diésel; mientras que la mayor parte de los GEI nacionales se encuentran conformados por Dióxido de Carbono CO₂ (78%), Metano CH₄ (13%) y Óxido Nitroso N₂O (6%). Así, Chile sobrepasa a países con mayores niveles de industrialización como Argentina o Brasil, siendo el sector energético el principal responsable de dichas emisiones, como ya se ha mencionado anteriormente.

Pese a estas cifras, durante los últimos años, Chile ha realizado inversiones en energías renovables que han permitido disminuir sus emisiones de CO₂eq al medio ambiente. Según datos de la Comisión Nacional de Energía (2022), desde el año 2009 hasta el 2021, el país ha pasado de reducir -0,45 MtCO₂eq a -8,39 MtCO₂eq a través del desarrollo de energías renovables, siendo la energía solar fotovoltaica la que representa una mayor reducción a la actualidad, con -3,98 MtCO₂eq (cerca del 50% del total de reducciones).

A escala de ciudad, entre los factores que inciden en las emisiones de GEI en Chile se encuentran: la morfología urbana – donde se incluyen variables como la distancia al centro, densidad, entre otras (Ivan Muñiz & Rojas, 2019; Iván Muñiz et al., 2016) -, las características materiales de las viviendas (Red de Pobreza Energética y Generadoras de Chile, 2022), las condiciones climáticas del territorio (Osses et al., 2020), los tipos de calefacción utilizadas en los hogares (Urquiza et al., 2020), especialmente la calefacción a leña (Bailis et al., 2015); entre otros. En síntesis, estos estudios han demostrado que en general la baja densidad asociada a modelos de ciudades dispersas, viviendas con baja eficiencia energética insertas en contextos urbanos con climas fríos; junto con el uso excesivo de calefacción insustentable como la basada en leña, pueden generar mayores de gases de efecto invernadero en el ambiente.

Por otro lado, los últimos años han demostrado que la Crisis Sociosanitaria por COVID-19 y las políticas de confinamiento asociadas, han generado cambios en los estilos de vida y el comportamiento de las personas. Diversas investigaciones internacionales (Forster et al., 2020; Le Quéré et al., 2020; Liu et al., 2020; Moreno et al., 2020) demostraron que las emisiones de GEI globales disminuyeron entre un 8% y un 26% en diferentes partes del mundo durante el año 2020, consecuencia de, entre otros factores, la disminución de la producción industrial y de la movilidad de transporte motorizado en las ciudades producto de las políticas de confinamiento. En Latinoamérica, por su parte, un informe estimó una caída de emisiones globales de GEI de alrededor del 5% para el año 2020, con respecto al año 2019 en toda la región (Samaniego et al., 2022). Algunos estudios en ciudades de Brasil (Bazzo Vieira et al., 2022) y Argentina (Grassi et al., 2022) también corroboraron una disminución de las emisiones en -63% y -70%, respectivamente, explicando en su mayor parte por la reducción en el transporte.

Pese a que están ampliamente documentadas las consecuencias de la crisis en las emisiones globales, se ha puesto menos atención en cómo los cambios en la rutina de las personas producto del confinamiento en pandemia han impactado en las emisiones GEI a nivel local. Contribuyendo a subsanar esta brecha de información, Rojas et al (2022) estudiaron las emisiones GEI a nivel de hogares en ciudades intermedias del centro-sur de Chile – Coronel, Temuco, Valdivia y Osorno, las cuales se vieron altamente impactadas en el inicio de la pandemia y que han sufrido fuertes impactos ambientales producto de la alta combustión a leña del sector residencial (Álamos et al., 2022). Utilizando el indicador de la Huella de Carbono, los autores estimaron las emisiones directas por consumo¹ en el hogar, en cuatro dimensiones: Energía, Calefacción, Movilidad y Alimentación.

Rojas et al. (2022) demostraron que en período de confinamiento, la huella de carbono por consumo de calefacción y energía aumentó en comparación con el mismo período del año 2019, siendo las emisiones por calefacción (con predominancia de la leña como combustible) las que representan un mayor porcentaje respecto del total de emisiones por hogar en las dimensiones estudiadas. Sin embargo, durante el período posterior a las medidas de confinamiento, existió una disminución de la huella de carbono por consumo de energía y calefacción, y un considerable aumento de la huella de carbono por movilidad en estas ciudades. Entre las causas de este comportamiento en las emisiones, los autores identifican la relevancia del confinamiento y de la estación climática del año en el consumo de las personas, debido a que en pandemia las principales actividades se trasladaron al hogar (como el trabajo o el estudio), pasando más tiempo dentro de las viviendas y consumiendo más energía, especialmente en invierno.

Con estos resultados, los autores contribuyeron al conocimiento que se tiene respecto de cómo el comportamiento de las personas y los estilos de vida afectan en las emisiones GEI a nivel local, además de reforzar conclusiones de otros estudios en Chile que demostraron el aumento de las facturas de energía eléctrica en hogares (Moreno et al., 2020) y de la concentración de otros contaminantes atmosféricos debido al aumento de la calefacción a leña en algunas ciudades del centro-sur del país, debido a la pandemia por COVID19 (Martínez-Soto et al., 2021; Morales-Solís et al., 2021). Sin embargo, aún es necesario ahondar en los factores que inciden en la huella de carbono de hogares en las ciudades estudiadas, como las características físicas y socioeconómicas de los hogares estudiados, factores relacionados al entorno como la temperatura o la morfología urbana, el tipo de combustible utilizado, entre otros (Rojas et al., 2022).

¹ Las emisiones directas de GEI son aquellas que provienen de las fuentes como el consumo de combustibles en el hogar. En cambio, las emisiones indirectas aluden a las emisiones que son provocadas por fuentes fuera del hogar.

Así, la presente investigación busca estudiar de qué manera los factores asociados a las características de los hogares y del entorno urbano inciden en la huella de carbono por consumo de calefacción y energía² en cuatro ciudades del centro-sur de Chile previo, durante y posterior a las medidas de confinamiento por COVID19. Para responder este cuestionamiento, se recurrió a un enfoque metodológico de carácter cuantitativo, mediante un análisis de regresiones múltiples a través del software estadístico R-Studio, que permitió explicar las relaciones entre variables independientes y la huella de carbono de hogares en el sur de Chile.

Adicionalmente, se discute sobre sustentabilidad y cambio climático en las ciudades y la preocupación hacia la medición de emisiones GEI locales, especialmente en zonas urbanas. En este escenario, se explora el índice de Huella de Carbono, poniendo especial énfasis en los últimos estudios realizados en contexto de pandemia por COVID-19 a nivel mundial y especialmente en Chile. Esta discusión teórica y aplicada sienta las bases para comprender qué factores presentes en las ciudades inciden en el comportamiento de la huella de carbono en diferentes períodos de la pandemia, lo que ayuda directamente en la intervención que se pueda realizar a través de una planificación urbana ambientalmente más eficiente en tiempos de crisis. Los resultados de esta investigación, por lo tanto, pueden aportar información relevante en la elaboración de políticas públicas de mitigación y adaptación al cambio climático en las ciudades.

2. Marco Teórico

2.1. Sustentabilidad, Cambio climático y Ciudad

2.1.1. Sustentabilidad y el paradigma del Urbanismo Climático

La discusión sobre la sustentabilidad³ surge en el reconocimiento y toma de conciencia de que el modelo de desarrollo de la sociedad moderna industrial ha alcanzado límites que plantean problemas de viabilidad para las generaciones futuras y se comprende a partir de dos trabajos icónicos: *The Population of Bomb* de (Ehrlich, 1972) y *The Limits of Growth* de (Meadows et al., 1972).

² No se consideró la huella de carbono por movilidad, debido a que si bien fue parte importante de las emisiones de los hogares, su medición sólo consideró viajes obligados por estudio y trabajo (Rojas et al., 2022). Por otro lado, parte importante de los antecedentes revelan el fuerte impacto que tienen las emisiones directas del sector residencial en estas ciudades, por lo que se conforma como un tema interesante de estudiar en específico.

³ En esta investigación se utilizará Sustentabilidad y Sostenibilidad como sinónimos, debido a que aún no existe consenso institucional ni académico respecto de sus diferencias. Por ejemplo, Naciones Unidas utiliza el concepto “sostenible”, mientras que desde la academia se le nombra de ambas formas.

Esta preocupación motivó la realización de diferentes cumbres y consensos globales respecto a la problemática, iniciando con la cumbre de Río de 1992 (Lezama & Domínguez, 2006). La realización del Protocolo de Kioto en el año 1997 definió metas y responsabilidades para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del aumento de la temperatura global, que junto con la creación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) instauró una institucionalidad sólida y un seguimiento constante sobre los avances en sustentabilidad de las diferentes naciones (Barton, 2009). El año 2015, en tanto, la Asamblea General de las Naciones Unidas, aprobó la ‘Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible’, que se conforma como uno de los compromisos globales más recientes para la sustentabilidad global.

Fue en las ciudades donde se concentraron las principales preocupaciones, dada su importancia como polos económicos, su alta concentración de población y responsabilidad en las emisiones globales (Samaniego et al., 2015). Las acciones en las ciudades se enfocaron en la contaminación por transporte, industrias, población vulnerable, provisión de áreas verdes, calidad del aire, reciclaje, usos de suelo, entre otros (Siclarí Bravo, 2021).

En términos conceptuales, el Desarrollo Sustentable fue definido tridimensionalmente – abarcando aspectos económicos, sociales y ambientales –, como el desarrollo que permite satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (Samaniego et al., 2015; Sánchez, 2002). Sin embargo, su definición ha sido abordada desde múltiples nociones con dificultades teórico-prácticas para su aplicación, generando ambigüedad e incongruencias para su comprensión. En general, se pueden identificar dos principales perspectivas en las que se ha basado la Agenda de Sostenibilidad de las Naciones Unidas: una visión económica y pro-crecimiento, basada en una epistemología del progreso; y, por otro lado, una visión socio-ecológica basada en una epistemología relacional (Salazar, 2018).

Según Salazar (2018), la primera perspectiva está representada por los tres pilares – equilibrio entre desarrollo económico, social y ambiental –, donde prevalece una visión que ve el crecimiento económico como parte de las soluciones y no del problema de la crisis ecológica, por lo tanto, busca mantener el sistema económico actual en la medida en que se integren a él elementos asociados a la justicia social y ambiental. Por otro lado, la visión socio-ecológica busca poner la sustentabilidad en acción, integrando a la institucionalidad como parte de los pilares fundamentales y entendiendo que el problema se manifiesta localmente y, por lo tanto, depende de dinámicas socio-ecológicas particulares de cada lugar. De esta manera, mientras la primera visión busca soluciones globales en base a la prevalencia de un modelo económico basado en el progreso; la segunda entiende que el problema tiene múltiples manifestaciones que deben ser tratadas por diferentes actores locales y globales, bajo la premisa de que se deben cambiar los patrones de producción y consumo actuales (Salazar, 2018).

Más allá de una cuestión conceptual, ambas perspectivas se mantienen en una constante pugna, funcionando como fuerzas políticas y que conlleva una constante negociación entre diferentes actores de la agenda de las naciones para lograr imponer cierta visión en los países. En esta discordancia, aquella que se ha mantenido políticamente dominante es la racionalidad económica y pro-crecimiento, bajo la nueva consigna de la ‘economía verde’ (Salazar, 2018).

En muchos casos los países han elaborado políticas bajo una interpretación de la sustentabilidad reducida a aspectos técnicos, a partir de una visión fragmentada del medio ambiente disociada de su contexto social, político y económico (Sánchez, 2002). Políticamente, el Desarrollo Sustentable se convirtió en una retórica popular que permitió madurar las estrategias neoliberales y preocupaciones ecológicas de los formuladores de políticas urbanas (Long & Rice, 2019). La ambigüedad con que se comprendió el desarrollo sustentable en general, y en las ciudades en particular, permitió que sus objetivos fueran definidos de acuerdo a las prioridades de los formuladores de políticas, élites corporativas y tomadores de decisiones, resultando en múltiples visiones sobre la sustentabilidad urbana (Long & Rice, 2019; Wheeler & Beatley, 2007; Williams, 2010).

El debate epistemológico respecto de cómo entender la sustentabilidad, tiene su asidero hoy en día en lo que Long y Rice (2019) llaman Urbanismo Climático, una serie de preceptos que ponen más atención en cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero que se concentran en las ciudades, justificando el desarrollo de políticas y programas climáticos locales en base a esta información (Bulkeley & Newell, 2015). Además, la medición a través de inventarios de carbono es fácilmente comprensible para el público en general, lo que lo convierte en un objetivo de política fácil de comunicar y que es posible lograr a través de estrategias de reducción de emisiones GEI, preocupándose directamente por su mitigación (Long & Rice, 2019); pero dejando de lado cuestiones fundamentales para la sostenibilidad como la justicia socioambiental y otras dimensiones sociales.

Tomando en consideración cómo se ha discutido la sustentabilidad y la importancia de las emisiones de carbono y otros GEI, es necesario ahondar en las características propias de cada ciudad para entender los factores que permitan explicar la configuración de emisiones que prevalecen en cada realidad urbana.

2.1.2. Descifrando factores de incidencia en las emisiones urbanas.

Parte del debate sobre la sustentabilidad ha buscado entender cuánto del impacto ambiental de las zonas urbanas es explicado por la forma y estructura de las ciudades. En general, se reconocen dos tipos de morfología urbana: el modelo de ciudad compacta y el de ciudad dispersa. El primero propone densificar y mezclar funciones en el uso del suelo, ahorrando energía en las casas y en los

desplazamientos de las personas; en contraposición a la creciente dispersión de las ciudades hacia las periferias, sobre todo en Latinoamérica (Iván Muñoz et al., 2016; Soto-Cortés, 2015).

La literatura clásica (Gilbert, 1992; Lowe, 1992; Newman & Kenworthy, 1989; Owens, 1986), ha destacado la mayor eficiencia energética que alcanzan los asentamientos urbanos compactos en comparación con ciudades dispersas. Una ciudad dispersa necesita un mayor consumo de energía y combustibles para soportar un sistema de transporte que conecte los sectores urbanos, sobre todo si tiene una alta dependencia de movilización con base en combustibles fósiles (Alberti & Susskind, 1996).

El modelo de ciudad compacta buscaba abarcar una densidad mínima que permitiera a una comunidad ser más eficiente e interactiva; lograr una multifuncionalidad a través del uso del suelo, garantizando la cohesión social y disminuyendo la motorización; proyectos residenciales construidos en nodos con alojamiento, empleo e instalaciones cotidianas incluidas; y una armonía entre estructura espacial y el sistema de transporte público; por último, su objetivo era acortar el viaje en vehículos motorizados aumentando las densidades y empleando usos mixtos en los patrones urbanos (Hassan & Lee, 2015).

En base a una extensa revisión de investigaciones, Montejano (2017) analiza críticamente la premisa de que el modelo de ciudad compacta resultaría ser el más sustentable, pues pese a que existiría una reducción de las emisiones debido a una mayor cercanía entre orígenes y destinos en los viajes diarios que realizan las personas, una mayor eficiencia en la movilización de éstas y un menor consumo energético (Seto et al., 2017); resaltan como desventajas la potencial pérdida de espacios abiertos intraurbanos, reducción del área permeable, mayor consumo energético por edificaciones en altura, insuficientes espacios de áreas verdes, entre otras (Hassan & Lee, 2015).

Por su parte, Muñoz et al. (2016) calcularon la huella ecológica y su relación con la morfología de la ciudad en base a la distancia al centro y la densidad del barrio. Demostraron que la densidad ejerce un bajo impacto en la huella ecológica de la ciudad de Concepción, Chile; en comparación con la distancia al centro urbano, que tiene mayor significancia. Montejano (2017) concluye que, pese a existir investigaciones que demuestran que una mayor densidad poblacional permitiría disminuir las emisiones, no existe consenso respecto a qué tipo de morfología urbana es la más adecuada en un contexto de cambio climático. Sin embargo, sigue conformándose como una variable interesante de analizar en las emisiones de GEI en las ciudades, debido a que los procesos de urbanización no pueden ser explicados mediante un modelo universal, sino que éstos se encuentra anclados a las dinámicas propias de cada ciudad y de cada nación (Bettencourt et al., 2007).

Por el lado de los factores geográficos, el grueso de investigaciones ha puesto atención en el efecto que tienen las condiciones climáticas en la concentración de contaminantes atmosféricos, como los factores topográficos propios de sistemas orográficos semicerrados que dificultan la ventilación, además de la

inversión térmica que impide la elevación de masas de aire contaminadas, quedando atrapadas a baja altura, sobre todo en meses con bajas temperaturas propios de temporadas invernales en Chile (Opazo, 2011; Osses et al., 2022; Pacheco et al., 2021; Romero, 2021; Romero et al., 2010). Sin embargo, menor atención se ha puesto en el efecto que tienen las condiciones climáticas en las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales generan el cambio climático y el aumento de las temperaturas globales extremas. En ese sentido, algunos estudios en varias ciudades del mundo (Brown et al. 2009; Park et al., 2022) han demostrado que factores como la temperatura o las precipitaciones inciden en el comportamiento y los estilos de vida de las personas, específicamente en el consumo de combustibles para calefaccionar con altos niveles de emisiones GEI, lo que podría generar un efecto directo en las condiciones climáticas y, por lo tanto, reforzar estas mismas actitudes insustentables de la población.

Al poner atención en las fuentes de emisiones, diversos estudios (Álamos et al., 2020; Encinas et al., 2019, 2020; García Ochoa, 2014; Morero et al., 2021; Riquelme, 2020; Shueftan et al., 2016; Urquiza et al., 2020) han relevado la importancia por aproximarse al estudio de la sustentabilidad urbana a partir de factores asociados a la vivienda y a la calefacción en ciudades altamente contaminadas por este tipo de combustible, a través de la comprensión del concepto de pobreza energética. Dicha conceptualización, nacida en Inglaterra a inicios de los años 90s, define la incapacidad de un hogar de cubrir los requerimientos considerados social y materialmente básicos para el desarrollo y el mantenimiento de una vida digna (Morero et al., 2021), superando el 10% de sus ingresos (Boardman, 1991). Si bien no hay una única definición de este concepto, la mayor parte de ellas se enfocan en la dificultad para alcanzar un cierto nivel de confort térmico a escala de vivienda y el esfuerzo monetario para conseguirlo, por lo que la pobreza energética resulta de la combinación de bajos niveles de ingresos, baja eficiencia energética de la vivienda y elevados precios de la energía (Riquelme, 2020).

Uno de los primeros referentes que ha discutido sobre pobreza energética en América Latina, fue el informe de World Energy Council, del año 2006, que la sitúa como una de las dimensiones de la pobreza urbana y se revisa el acceso a la energía en términos de la definición de políticas públicas de personas en situación de pobreza. Luego, una segunda referencia la desarrolla García Ochoa et al. (2014), proponiendo una conceptualización basada en la dimensión social de los usos de la energía y el vínculo existente entre energía, pobreza y medio ambiente. Finalmente, una tercera referencia da cuenta de los trabajos de la Red de Pobreza Energética en Chile, que habla respecto de la multidimensionalidad del concepto a partir de las necesidades y las estrategias elaboradas para cubrir las necesidades energéticas, pero poniendo atención en la perspectiva territorial que integra la discusión sobre desigualdad socioeconómica en la definición de necesidades (Morero et al., 2021).

A partir de esta concepción que integra múltiples dimensiones, Riquelme (2020) propone hablar de pobreza energética en los hogares cuando no se dispone de energía suficiente para cubrir necesidades,

considerando tanto lo establecido por la sociedad (observado u objetivo) como también por sus integrantes (subjetivo). Esto pone atención en la incapacidad de acceder a fuentes de energía que permitan decidir entre una gama suficiente de servicios de alta calidad (adecuados, confiables, sustentables y seguros) que permita sostener el desarrollo humano y económico de sus miembros. Sin embargo, este concepto sería altamente dependiente de cada contexto territorial, por lo que las necesidades y satisfactores son definidos por una población en particular, situada en un territorio, en un contexto temporal definido y bajo condiciones socioculturales específicas (Riquelme, 2020).

La pobreza energética, entendida de esta forma, cobra relevancia en un contexto donde las ciudades concentran contaminantes producto, en su mayor parte, de la calefacción a leña de los hogares (Huneus et al., 2020). Al respecto, se ha demostrado que los hogares más vulnerables suelen presentar mayores problemas de aislación térmica de sus viviendas, por lo que necesitan mayor cantidad de energía para lograr confort en su interior (Morero et al., 2021). Entonces, factores como climas fríos, baja eficiencia energética en la construcción de las viviendas y precios significativamente bajos de la leña en comparación con otras fuentes de energía con menor impacto en el medio ambiente, permiten explicar una problemática de pobreza energética asociada al consumo intensivo de leña en ciudades contaminadas por las emisiones de los hogares (Urquiza et al., 2020).

2.2. Huella de Carbono

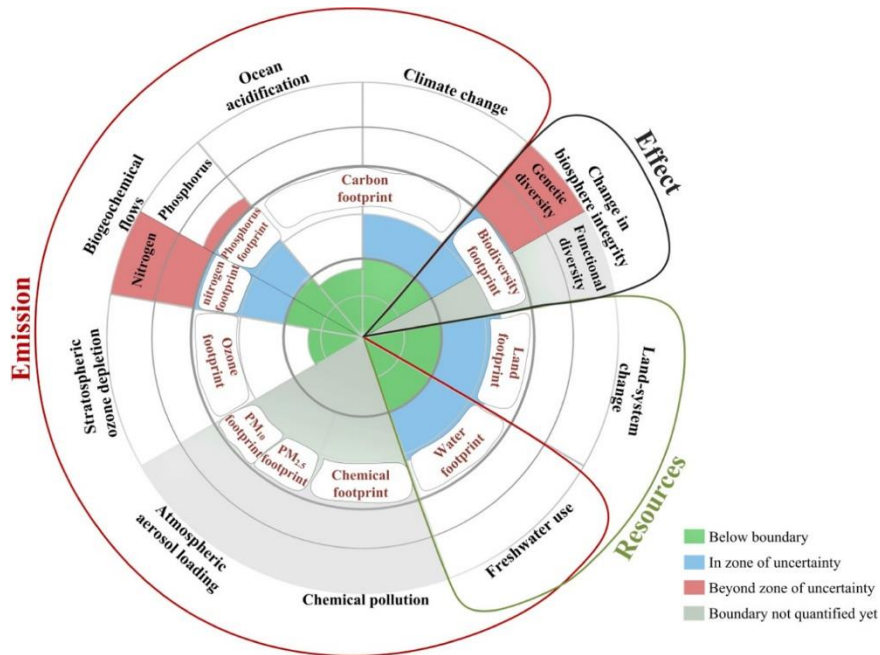
2.2.1. Indicadores, huella y medio ambiente

Dentro de las líneas de investigación de carácter cuantitativo sobre la sostenibilidad, han existido esfuerzos por desarrollar indicadores que permitan medir adecuadamente la sustentabilidad urbana. Al respecto, surge el concepto de huella ambiental como un indicador de la presión de las actividades humanas sobre el medio ambiente y su cuantificación se basa en el pensamiento del ciclo de vida a lo largo de toda la cadena de suministros y pretende ofrecer una imagen completa de la presión cuantificada (Vanham et al., 2019).

Para tratar las diferentes huellas y las problemáticas que abordan se creó la denominación de *Footprint Family* o Familias de Huellas. La figura 3 ilustra los 10 indicadores de huella existentes basados en diferentes límites planetarios (Wu et al., 2021), los cuales se pueden dividir en tres partes: huellas de emisión de contaminantes (huella de carbono, nitrógeno, fósforo, ozono, PM10, PM2,5, química e hídrica); huellas de consumo de recursos (terrestre e hídrica); y huella compuesta (huella de biodiversidad). Entre ellos, la huella de carbono es uno de los indicadores que más se han trabajado, junto con la huella hídrica (Wu et al., 2021).

Dados estos antecedentes, los avances en la medición de huellas ambientales han permitido llenar algunas brechas de información asociadas a la construcción de indicadores que puedan realizar un seguimiento de los avances en temas de cambio climático y sustentabilidad. La medición de la huella de carbono, una de las más medidas en las últimas dos décadas, es muy aplicable y es el indicador más útil para medir gases de efecto invernadero en las ciudades.

Figura 3. Representación de los límites planetarios y las huellas hídricas asociados a niveles de incertidumbre



Fuente: Wu et al. (2021)

2.2.2. Huella de carbono en las ciudades

La huella de carbono (HC) es un indicador de la cantidad de gases de efecto invernadero generados y emitidos por una empresa, vivienda o persona, incluyendo también el consumo. La HC se mide en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO_2eq), con el fin de expresar las emisiones de distintos GEI en una unidad común. Esta medida de equivalencia se calcula multiplicando las emisiones de cada GEI por su respectivo potencial de calentamiento global al cabo de 100 años (Frohmann & Olmos, 2013).

Como se comentó anteriormente las ciudades emiten el 70% de los gases de efecto invernadero a nivel global. Dada su relevancia en las emisiones, en un estudio de escala global se recopilieron datos transversales para 36 megaciudades globales; las variables incluyeron población, área, densidad de población, PIB per cápita, consumo de energía per cápita, temperatura, precipitaciones, entre otras

(Paravantis et al., 2021). Entre sus resultados, se encontró una correlación positiva entre la huella de carbono per cápita y el PIB per cápita de estas ciudades. Otro ejemplo es el análisis de las 100 áreas metropolitanas más grandes de Estados Unidos, a partir de la medición de las emisiones de carbono del transporte y de los recursos residenciales. A través de regresiones múltiples, Brown et al. (2009) demostraron que las variables que más afectaron en la huella de carbono en las áreas metropolitanas estadounidenses fueron la densidad habitacional y el transporte. Específicamente, ciudades con alta densidad y movilidad orientada hacia transporte por tren, fueron las que tuvieron menores emisiones. Además, el clima también jugó un papel importante, puesto que ciudades frías como las del noreste de Estados Unidos, presentaron altas emisiones de carbono debido al uso intensivo de combustibles para calefacción de los hogares. Los autores concluyen respecto de la importancia de políticas que incentiven el uso de movilidad baja en emisiones y de la eficiencia energética en las construcciones y en los hogares; además, resaltan las brechas asociadas a la disponibilidad de datos a escalas más pequeñas en las ciudades (Brown et al., 2009).

A escala de hogares, diversos estudios (Dubois et al., 2019; Hertwich, 2005; Huppes, 2006; Y. Shigetomi et al., 2017; Tukker et al., 2010; Tukker & Jansen, 2006) han utilizado los cálculos de huella de carbono de hogares y su relación con diferentes variables para demostrar cuáles son los factores que más afectan en el comportamiento de las emisiones de carbono en diferentes naciones del Norte Global, entre ellos, se consideraron: alimentos y bebidas, movilidad, vivienda y productos que utilizan energía, como los electrodomésticos. Un estudio reciente calcula la huella de carbono de hogares en Japón y su relación con 25 diferentes factores asociados con características socioeconómicas, demografía, urbanización, características físicas de la vivienda, el clima local, la propiedad de vehículos de pasajeros, electrodomésticos y productos electrónicos; mediante la combinación de microdatos para el consumo de más de 42.000 hogares (Yosuke Shigetomi et al., 2021). Sus resultados dieron cuenta de opciones en los estilos de vida que permiten reducir las emisiones de carbono como, por ejemplo, decisiones sobre vivir en regiones con climas moderados en contraposición a vivir en regiones con climas fríos.

Por otro lado, una reciente investigación demostró variaciones espaciotemporales en Seúl, Corea del Sur, mediante análisis de regresiones entre la huella de carbono y distintos factores. Los resultados demostraron una correlación negativa entre las emisiones de carbono y la vegetación; mientras que se correlacionó positivamente con el volumen de tráfico vehicular, con usos de suelo residenciales, comerciales y espacios con bajas temperaturas (Park et al., 2022).

Bailis et al. (2015) calcularon las emisiones de carbono de la calefacción a leña en el área pan-tropical a nivel global. Sus resultados dan cuenta de una alta cantidad de emisiones per cápita y a nivel nacional en la zona este de África, en países como Kenia, Etiopía y Uganda. Las emisiones de GEI como resultado

de recolección y de combustión de leña representó entre 1,9% y 2,3% de las emisiones globales y entre el 3,5% y 4,3% de las emisiones de la región pan-tropical. Más allá de los resultados, los autores discuten respecto de la falta de datos fiables sobre el consumo de leña, teniendo que utilizar conjuntos de datos a nivel nacional y subnacional; además de que el análisis sólo consideró un año de estudio, desconociendo los cambios de comportamiento entre usuarios de este combustible, por ejemplo, en contextos de escasez.

Sin embargo, si bien existe una amplia discusión sobre las emisiones GEI globales a escala regional o de metrópolis; menor atención se ha puesto en las emisiones locales, especialmente en ciudades intermedias. En Chile, Álamos et al. (2022) intentaron suplir esta brecha a través de un estudio de emisiones a nivel nacional, logrando completar información a una escala de 1 km² en áreas urbanas y rurales. Sus resultados dieron cuenta de la importancia del Dióxido de Carbono dentro de la composición de gases de efecto invernadero en Chile, además de la relevancia que tiene el sector residencial en las emisiones del sur del país.

Por último, investigaciones más recientes han estudiado la huella de carbono y las emisiones GEI al medio ambiente, con especial énfasis en las variaciones existentes a raíz de la crisis sociosanitaria del COVID-19. Los cambios en la cotidianidad de las ciudades y el consumo de las personas como la disminución de los viajes interurbanos, mayores lapsos de tiempo dentro del hogar, o cambios en las formas de producción; han sido factores interesantes de analizar a la luz de las emisiones provocadas por estas actividades dentro de las ciudades.

2.3. *Pandemia y Medio Ambiente*

2.3.1. *El enfoque ambiental de la crisis sociosanitaria*

La pandemia por COVID-19 fue identificada el 30 de diciembre del año 2019 y declarada como una pandemia global en marzo del 2020. Los casos fueron creciendo rápidamente, comenzando en China y expandiéndose a Corea del Sur, Japón, Europa (principalmente Italia, Francia y España) y Estados Unidos entre finales de enero y mediados de febrero del 2020 (Le Quéré et al., 2020). En Chile, se decretó estado de excepción constitucional de catástrofe el 18 de marzo del 2020 y las primeras medidas de confinamiento fueron aplicadas a partir del 26 de marzo.

Además de los efectos en la salud de la población, la pandemia tuvo efectos económicos y ambientales. Entre febrero del 2019 y marzo del 2020, diferentes índices financieros de los principales países del mundo tuvieron una caída considerable de entre 32% y 38%, afectando la economía global, producto de la inseguridad asociada a los efectos de la pandemia en las bolsas. Estados Unidos y otros países de

Europa se vieron obligados a aplicar políticas de apoyo monetario que permitiera mitigar la recesión económica en sus naciones (Lucchese & Pianta, 2020).

Las medidas de confinamiento que conllevaron cambios en los patrones de comportamiento de las personas y en las actividades productivas, también tuvieron efectos ambientales. Le Quéré et al. (2020) demostraron una disminución en el sector aviación de un 75% de sus actividades; el transporte terrestre tuvo una caída en sus actividades en un 50%; el sector industrial y construcción-comercio se redujo en un 35% y 33% respectivamente; energía disminuyó en un 15% y el sector residencial tuvo un aumento de un 5%.

Estas consecuencias económicas generaron ciertos beneficios en términos ambientales al disminuir considerablemente las emisiones contaminantes de las principales ciudades del mundo. Así, por ejemplo, la disminución de automóviles circulando debido a las políticas de confinamiento redujo la contaminación atmosférica de dióxido de nitrógeno (Wang & Su, 2020); y la demanda de combustible a nivel global cayó drásticamente, debido a los efectos de la pandemia en el sector industrial y manufacturero (Muhammad et al., 2020). La International Energy Agency (2020) estimó una disminución del 25% de demanda energética por semana en países con confinamiento total y un 18% en países con confinamiento parcial. La demanda de combustible global disminuyó en un 5% durante los primeros cuatro meses del año 2020; lo mismo para la demanda de energía en un 3,8% y la demanda de carbón en un 8% (International Energy Agency, 2020).

Así como la pandemia tuvo efectos positivos en el medio ambiente, los fenómenos de recuperación de la economía posterior a los controles aplicados a la pandemia, revierte especial interés a partir del correlacionado aumento de las emisiones contaminantes. China, quien fue la cuna del virus SARS-COV-2, también fue el primer país en comenzar a recuperar su economía. Dada su hegemonía global y por efecto de derrame, su recuperación tuvo impactos significativos en el consumo de energía y la economía de países de alta renta (0,11%-0,45%), seguidos de países de renta media-alta (0,08%-0,33%) y en menor medida países de renta media-baja (-0,02%-0,05%) (Wang & Zhang, 2021).

De esta manera, si bien la pandemia permitió reducir las emisiones, Howarth et al. (2020) cuestionan su relevancia como un modelo sustentable para combatir el cambio climático, debido a las fuertes consecuencias económicas y sociales que conlleva. Los autores reflexionan respecto de los aprendizajes a partir de la crisis sociosanitaria, por ejemplo, demostrando que los comportamientos pueden cambiar, que estos cambios tienen un costo y que es necesario un mandato social que permita garantizar que los cambios sean a largo plazo y que la ciencia juegue un papel importante en informar sobre este proceso.

Por ese motivo, si se analiza la posibilidad de que ciertos cambios de comportamiento generados por la pandemia se mantengan, es necesario integrar a la ciudadanía en las tomas de decisiones con el fin de

transitar hacia ciudades con carbono cero, puesto que, si bien las medidas de confinamiento tuvieron beneficios ambientales, éstas fueron aplicadas arbitrariamente por el Estado, por lo que carecería de gobernanza efectiva en escenarios posteriores al COVID-19 (Howarth et al., 2020).

Así, la relación entre crisis sociosanitaria, medio ambiente y los nuevos paradigmas que analizan la crisis climática global, ha renovado la discusión sobre sostenibilidad urbana y la importancia por considerar las condiciones de vulnerabilidad que viven las personas en sus hogares, los patrones de consumo y los estilos de vida de la población; así como volcar la preocupación hacia la relevancia que tienen los comportamientos de las personas en la sustentabilidad de las ciudades.

2.3.2. Huella de carbono y emisiones GEI en crisis sociosanitaria

En este escenario, la huella de carbono ha tenido una sostenida atención de la ciencia ambiental y el urbanismo, como principal indicador de la sustentabilidad urbana, estudiando los efectos de las políticas de confinamiento y la pandemia global en las emisiones GEI globales, en diferentes países del mundo.

En un análisis realizado en 69 países, 50 estados de EE.UU y 30 provincias de China, territorios que representan el 85% de la población mundial y el 97% de las emisiones GEI, se determinó que entre abril del 2019 y abril del 2020, las emisiones globales se redujeron en un 26% (2,6 Gt CO₂eq) producto de las medidas de confinamiento y los cambios en las actividades diarias (Le Quéré et al., 2020).

Un estudio similar, estimó una reducción significativa de un 8,8% de las emisiones a nivel global (-1,5 Gt CO₂eq) entre enero y junio del año 2020 en comparación con el mismo período del año 2019 (Liu et al., 2020). Los sectores que tuvieron una mayor disminución de sus emisiones fueron aviación internacional (-52,4%), aviación nacional (-35,8%) y transporte terrestre (-18,6%); seguida de una muy leve disminución en el sector industrial (-5,5%), energía (-5,0%) y residencial (-2,2%). Sin embargo, los datos más recientes demostraron una rápida recuperación de las emisiones finalizando junio del 2020, en aquellos países donde el número de contagiados disminuyó. Por su parte, Foster et al. (2020) estimaron una disminución de hasta un 30% para abril del año 2020 producto de la pandemia COVID-19, contribuyendo a un enfriamiento a corto plazo desde principios de año. La tendencia de enfriamiento fue compensada con una reducción de alrededor del 20% en las emisiones globales de SO₂, químico que debilita el efecto de enfriamiento y provoca calentamiento a corto plazo. Los autores estimaron que el efecto directo de la pandemia en el medio ambiente es insignificante, proyectando un enfriamiento de alrededor de 0,01 hasta 0,005°C para el año 2030 (Forster et al., 2020).

En Europa se estudiaron las variaciones en las emisiones de GEI en 23 países de Europa en 10 sectores económicos diferentes, a partir de las restricciones socioeconómicas producidas por la pandemia. Sus resultados dieron cuenta de una disminución total de 195,6 Mt CO₂eq, representando -12,1% del total

de emisiones. Los sectores económicos que más contribuyeron a esta disminución fueron manufactura, ventas al por mayor, comercio de retail, transporte, alojamiento y servicios de comida; siendo España, Italia y Francia quienes más contribuyeron a esta disminución (Andreoni, 2021). En transporte, se estudió el impacto de la pandemia COVID-19 en la movilidad aérea y la industria aeroportuaria en Europa (Nižetić, 2020), donde seleccionaron dos aeropuertos en Croacia, como caso de estudio, para analizar el impacto de la pandemia en la movilidad, junto con la estimación de la huella de carbono durante la pandemia y los años anteriores a ella. Se demostró una disminución del 89% en el número total de vuelos en Europa, y de un 96% de la movilidad en los aeropuertos estudiados, en directa relación con la reducción de emisiones de CO₂eq a un factor de 1.81 en vuelos comerciales de Zagreb y 3.49 en vuelos estacionales de Split.

En China, Han et al. (2021), usando datos a nivel nacional y provincial, estimaron la reducción en las emisiones de CO₂eq durante el primer cuarto del año 2020. Sus resultados dieron cuenta de una disminución de un 11% (257,7 Mt CO₂eq) en comparación con el primer cuarto del año 2019. El sector secundario industrial contribuyó en el 72,5% del total de reducciones, preferiblemente producto de la caída del consumo de carbón y la producción cementera; seguido del transporte (65,1 Mt CO₂eq).

En investigaciones más recientes, Wang et al. (2022) estudiaron el impacto de la pandemia en la reducción de las emisiones de carbono, proponiendo un nuevo método que contrasta con las comparaciones interanuales de la mayoría de los estudios previos sobre este tema. Los autores calcularon la diferencia entre las emisiones de carbono sin pandemia y las emisiones reales en el año 2020 mediante un análisis de escenarios proyectados en China, India, Estados Unidos y Europa. Sus resultados dieron cuenta de una subestimación en la reducción de las estimaciones calculadas por estudios previos de hasta un 5% en algunos casos.

Aplicado a la realidad de ciudades específicas, a través de la aplicación de regresiones y correlaciones se analizó el impacto de las medidas de confinamiento por COVID-19 en las emisiones de ocho ciudades del mundo (Wuhan, Nueva York, Milán, Madrid, Bandra, Londres, Tokio y Ciudad de México) en relación con cuatro gases contaminantes: dióxido de nitrógeno, material particulado fino 2,5, Ozono y dióxido de azufre (Wang & Li, 2021). Sus resultados demostraron que el confinamiento por la pandemia global sólo redujo las emisiones de dióxido de nitrógeno (40-50%) y material particulado (10-30%); mientras que el ozono tuvo un aumento de entre 17% a 20%. Este aumento es explicado, por un lado, por la disminución del dióxido de nitrógeno que, bajo la acción de reacciones fotoquímicas, genera el aumento de producción de Ozono; y, por otro lado, por el aumento de actividades domésticas debido al confinamiento.

En China, Bao & Zhang (2020) revelaron los efectos de las políticas de confinamiento en las reducciones de contaminación atmosférica en 44 ciudades en China. Sus resultados demostraron que la

reducción de la contaminación del aire estuvo fuertemente asociada con la restricción de movilidad, disminuyendo un 7,8% el índice de calidad del aire, especialmente gracias a una disminución de material particulado fino y dióxido de carbono. En India, analizaron datos de calidad del aire en la ciudad de Delhi, a partir de siete parámetros contaminantes monitoreados por 34 estaciones a lo largo de la metrópolis, lo que permitió establecer patrones espaciales de calidad del aire previo y durante la aplicación de políticas de confinamiento (Mahato et al., 2020). Sus resultados demostraron una disminución de concentraciones de material particulado de un 60% de MP10 y 39% para MP2,5; una baja en NO₂ de un 52,68% y -30,35% de CO₂.

En el contexto latinoamericano, se estudiaron los cambios en la calidad del aire a partir del confinamiento en Río de Janeiro. Sus resultados demostraron una disminución de entre un 30,3% y 48,5% de emisiones de carbono, presuntamente a partir de la baja en las emisiones de vehículos, sobre todo en las primeras semanas. Sin embargo, se evidenció un aumento de material particulado en Abril del 2020, debido al incremento de los movimientos de vehículos y personas producto del poco consenso en torno a la importancia de mantener la distancia social y respetar las cuarentenas (Dantas et al., 2020). Entre las investigaciones desarrolladas en Chile, un estudio realizado en Santiago evidenció el impacto del COVID-19 en la demanda eléctrica de distintos tipos de consumidores, incluyendo demanda residencial, comercial e industrial. Los resultados demostraron que los impactos de la pandemia dependen mucho de los tipos de consumidores. Por ejemplo, los consumos residenciales de electricidad experimentaron un alza de hasta un 17% durante junio de 2020 en comparación con el mismo período en 2019 (Moreno et al., 2020).

Gran parte de las investigaciones en pandemia se enfocaron en contaminantes atmosféricos como el material particulado y sus efectos en la calidad del aire en todo el mundo; mientras que los estudios que se estimaron las emisiones de GEI, lo hicieron a nivel global, sólo extrapolando datos a una escala local a través de modelos matemáticos indirectos. De manera que ha existido una brecha respecto de investigaciones que se enfoquen en cómo los cambios en el comportamiento de las personas y los estilos de vida afectaron en las emisiones GEI a un nivel más local, como lo que ocurrió en ciudades intermedias.

En esa línea, recientes resultados sobre huella de carbono en ciudades del sur de Chile revelaron un aumento de las emisiones producidas por calefacción de los hogares en ciudades altamente contaminadas previo, durante y posterior a las medidas de confinamiento, de entre un 1% y un 6%; mientras que las emisiones provocadas por el consumo de energía eléctrica y a gas para otros usos diferentes a la calefacción, incrementaron entre un 8% y un 23% en estos hogares (C. Rojas et al., 2022), siendo la única referencia al respecto.

La revisión de estas investigaciones demostró que, contrariamente a los efectos positivos que tuvieron las políticas de confinamiento y los cambios en el consumo de las personas en las emisiones globales; mayores actividades residenciales provocaron el aumento de emisiones GEI a una escala local, debido entre otros factores, al creciente consumo de energía en los hogares.

3. Pregunta de investigación

¿De qué manera los factores asociados a las características de los hogares y del entorno urbano inciden en la huella de carbono de calefacción y energía en ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y post medidas de confinamiento por crisis socio sanitaria?

4. Hipótesis

Los factores que inciden mayormente en la huella de carbono corresponden al tipo de combustible empleado, especialmente leña en calefacción; algunos materiales de la vivienda y la renta del hogar. Entre los factores del entorno, se identifica la temperatura y la densidad

La leña y ciertos materiales de la vivienda con peor aislación térmica explican el aumento de la huella de carbono, lo mismo sucede con la renta del hogar. Temperaturas más altas y densidades elevadas en la ciudad explican menores valores en las emisiones. El mayor impacto ambiental está dado por hogares con calefacción a leña de renta alta en sectores de baja densidad.

En períodos de confinamiento y pandemia, la relevancia de los factores aumenta debido a que las personas, al pasar más tiempo en las casas, potencian las causas que explican la huella de carbono, tanto de calefacción como de energía, al aumentar el consumo durante el mes.

5. Objetivos

5.1. *Objetivo General*

Analizar la incidencia y el impacto ambiental de factores del entorno urbano y las características del hogar en la huella de carbono de calefacción y energía en hogares en ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y post medidas de confinamiento por crisis socio sanitaria (2019, 2020 y 2021).

5.2. *Objetivos Específicos*

Identificar los factores del entorno urbano y las características del hogar que inciden en la huella de carbono por consumo de calefacción y energía para otros usos en ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y post medidas de confinamiento.

Explicar estadísticamente de qué manera los factores del entorno urbano y las características del hogar inciden en la huella de carbono por consumo de calefacción y energía para otros usos en ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y post medidas de confinamiento.

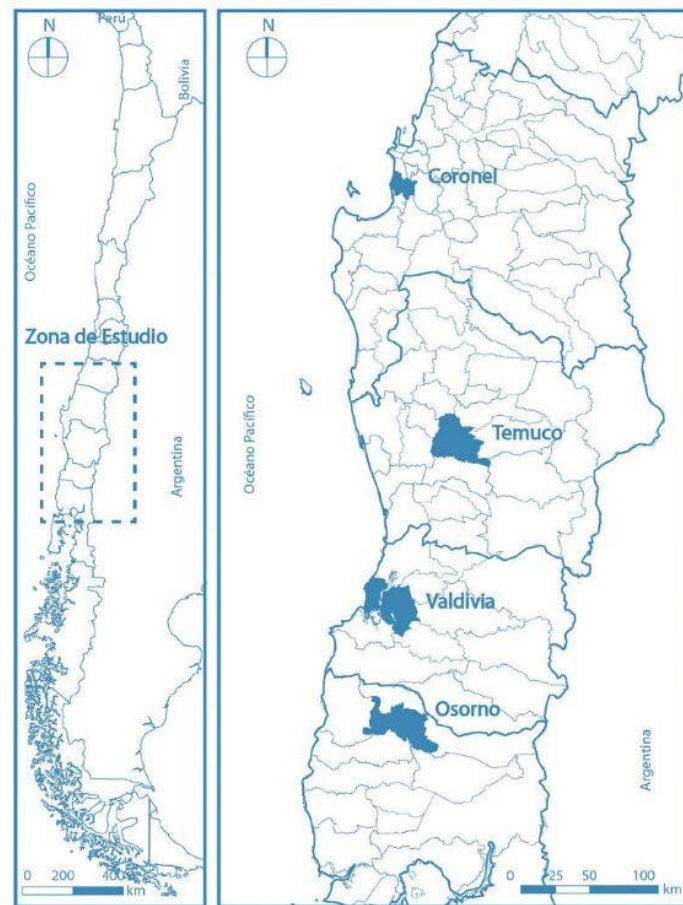
Analizar la relación estadística entre factores para determinar los que tienen un mayor impacto ambiental en las ciudades del centro-sur de Chile pre, durante y post medidas de confinamiento.

6. Metodología

6.1. *Caso de estudio*

La estrategia metodológica de esta investigación será aplicada en cuatro ciudades del sur de Chile: Coronel, Temuco, Valdivia y Osorno; cada una de ellas representa dinámicas urbanas importantes dentro de las regiones Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, respectivamente (ver Figura 4); además, datos del índice de Calidad del Aire mundial (IQ Air, 2021) indican que entre las 10 ciudades más contaminadas de Sudamérica, se encuentran los principales centros urbanos de estas regiones, incluyendo las ciudades en estudio. Para el caso de Coronel, la ciudad se encuentra integrada funcionalmente al área metropolitana de Concepción, San Pedro de la Paz y Lota; y ha sido un importante escenario de conflictos socioambientales asociados a efectos sobre la salud de las personas producto de la contaminación atmosférica en el territorio (Toledo, 2020).

Figura 4. Área de casos de estudio



Fuente: Rojas et al., 2021

Temuco, por su parte, es la capital de la región de La Araucanía y ha sido categorizada como una de las ciudades más contaminadas del mundo, producto de las condiciones geográficas, el uso de leña como principal fuente de calefacción de los hogares y la gran proporción de viviendas que no cuentan con aislación térmica mínima (Toro, 2020). En el caso de las ciudades de Valdivia y Osorno, forman parte importante como articuladoras de otros asentamientos urbanos; la primera como capital de la región de Los Ríos, y la segunda como capital provincial con una fuerte interacción con la capital regional, Puerto Montt (C. Rojas et al., 2021).

Dado que el marco temporal donde se aplicó el marco metodológico de esta investigación se sitúa en el primer año de la pandemia, es importante considerar los valores asociados a casos confirmados de COVID-19 y políticas de confinamiento aplicadas. En ese sentido, la Figura 5 muestra el número de casos positivos y su evolución durante el primer año de pandemia. Desde mediados de junio del año 2020 se observa un alza en las regiones de Biobío y Los Lagos que se equipara en octubre con las

demás regiones, y que coincidió con la aplicación de medidas de confinamiento a partir de septiembre. Adicionalmente, se observa un aumento pronunciado en el número de contagios por cada 100.000 habitantes para las regiones de Los Lagos y Los Ríos entre enero y febrero del año 2021.

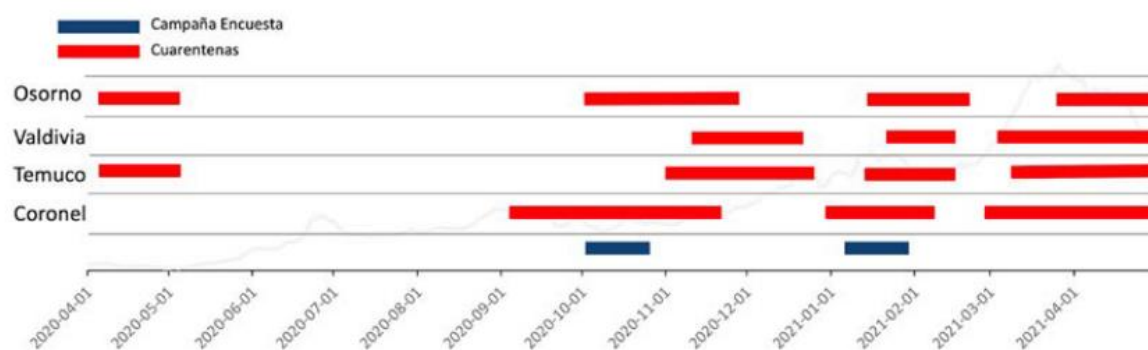
Figura 5. Casos positivos de COVID-19 confirmados por cada 100.000 habitantes para regiones seleccionadas



Fuente: Rojas et al., 2021 en base a cifras oficiales

Por su parte, la Figura 6 muestra el marco temporal de las medidas de confinamiento interpuestas en las ciudades de estudio. Las cuatro ciudades coinciden en tres períodos de tiempo: entre octubre y noviembre del año 2020; febrero del año 2021; y entre marzo y abril del año 2021. Los primeros dos episodios coinciden con la aplicación del instrumento de recolección de datos.

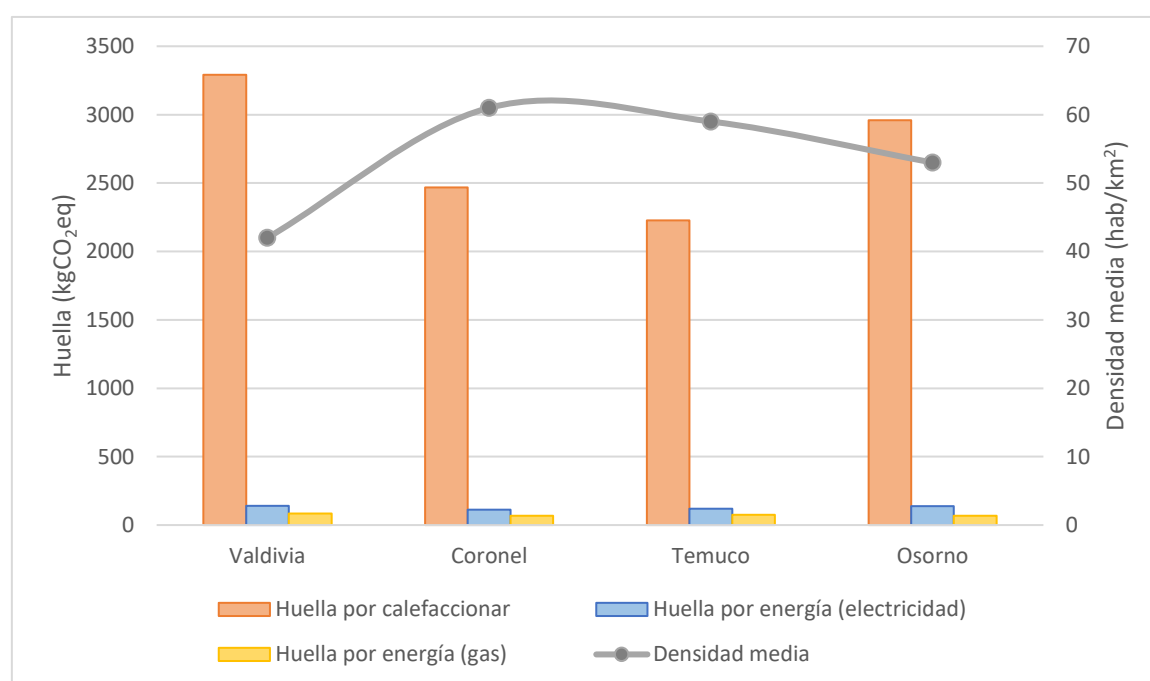
Figura 6. Cuarentenas para las ciudades en estudio



Fuente: Rojas et al., 2021

Según el estudio realizado por Rojas et al. (2022) en estas ciudades, la leña es el principal combustible utilizado como calefacción de los hogares. Mientras que en Temuco el 66% de la calefacción de los hogares se encuentra basada en combustión de leña, esta dependencia sube hasta 80% en las ciudades de Coronel y Valdivia, y hasta 82% en la ciudad de Osorno. Complementariamente, la Figura 7 muestra la huella de carbono calculada por consumo de energía para calefaccionar y para otros usos en las cuatro ciudades de estudio, en comparación con la densidad media de cada una de ellas. De ella se desprende que ciudades más densas como Coronel y Temuco, no necesariamente presentan un mayor consumo de energía (tanto para calefaccionar como para otros usos); mientras que Valdivia tiene una menor densidad, pero presenta un mayor consumo que las otras ciudades.

Figura 7. Promedio huella de carbono por hogar (kgCO₂eq/hogar) en las ciudades en estudio, invierno del 2020



Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rojas et al. (2022)

El estudio comparado sobre huella de carbono en estas ciudades, demostró que los impactos negativos de la pandemia se producen principalmente en invierno, precisamente cuando el consumo de energía de los hogares es más alto; mientras que hay una disminución de energéticos en meses estivales. Por otro lado, la calefacción suele extenderse a meses más cálidos, comprobándose una dependencia de la leña en el 80% de los hogares. Las principales conclusiones permitieron comprobar cambios en los comportamientos y en las prácticas de los hogares en relación con la energía, problemas de aislación térmica en las viviendas y la necesidad por acelerar la transición energética de impacto local, mejoramiento de la calidad constructiva en eficiencia y rendimiento térmico (C. Rojas et al., 2021).

Dados estos antecedentes, la metodología aplicada en esta investigación se centrará en el análisis estadístico de estos resultados, permitiendo profundizar en los factores explicativos del aumento de la huella de carbono de energía en los hogares de las ciudades en estudio.

6.2. *Enfoque metodológico*

El enfoque metodológico de esta investigación es de carácter cuantitativo, que implica el uso de modelos matemáticos y técnicas estadísticas para comprender los fenómenos geográficos. Estudios cuantitativos permiten la replicabilidad de los datos de manera más coherente, facilita la comparación entre estudios similares y permite la generalización de los resultados (Clifford et al., 2010). Las investigaciones de carácter cuantitativo comprenden procedimientos para la formulación y comprobación de hipótesis a partir de la experimentación, constituyendo un análisis de tipo hipotético-deductivo, es decir, se parte de la teoría general (a partir de la cual se genera la hipótesis) hacia la particularidad de los hechos en la recolección de los datos (Mousalli-Kayat, 2015).

Dada la importancia de aportar en la gran variedad de estudios sobre huella de carbono, es importante que la metodología sea replicable, de manera que se pueda aplicar a diferentes casos de estudios o ciudades del país y de contextos similares, incidiendo directamente en las conclusiones y aportes que se desprendan de los resultados.

6.3. *Instrumentos de recolección de datos*

La presente investigación se integra dentro del proyecto “Impactos del COVID en la huella de carbono de hogares de Chile ANID COVID 0159”, financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), que tuvo como objetivo medir la huella de carbono de los hogares en ciudades chilenas afectadas por COVID-19 durante las diferentes fases en las medidas de confinamiento, de manera que fuera posible estimar cambios en los consumos de dichos hogares y aportar con propuestas para la sustentabilidad en las emisiones de GEI (C. Rojas et al., 2020). Específicamente, en la presente investigación se estudiarán las emisiones asociadas a consumos de energía y calefacción en estos hogares.

En base a Rojas et al. (2022), la evaluación de las emisiones de GEI relacionadas con el consumo de energía de los hogares, se realizó a través del procesamiento de encuestas que midieron el gasto de energía de los consumidores, multiplicando las unidades monetarias de consumo por los factores de combustible correspondientes, detallados en la Tabla 1. Los factores de emisión se obtienen a partir de

la base de datos de IPCC (Gomez et al., 2006) y luego se convierten en kilogramos de CO₂ equivalente, emitido por kilogramo de combustible (kgCO₂-eq/kg de combustible).

Tabla 1. Tipo de combustible y factor de emisión asociado

Tipo de combustible	Factor de emisión (kgCO₂-eq/kg_{combustible})
Parafina	3,359
Gas natural	2,472
Gas de petróleo licuado	3,202
Leña seca	1,767
Leña húmeda	1,263
Bencina / Petróleo	3,399

Fuente: Rojas et al. (2022)

El instrumento de recolección es una encuesta de carácter longitudinal que buscó monitorear una misma cohorte y comparar patrones de consumo en el contexto sociosanitario de COVID-19 antes, durante y después de las medidas de confinamiento. Este instrumento es un nuevo cuestionario, basado en un trabajo realizado por Muñiz y Rojas (2019) en la ciudad de Concepción, y fue aplicado a 1.200 hogares durante septiembre del año 2020 (invierno), de manera aleatoria entre los jefes de hogar mediante un sistema de Entrevistas Telefónicas Asistidas por Computadora. Las 1.200 encuestas se distribuyeron equitativamente entre las cuatro ciudades, con muestras de 300 hogares por ciudad.

Aplicadas las encuestas, se identificaron las variables que fueron utilizadas para construir el modelo de regresión final, estas fueron discutidas junto al grupo de investigadores. Entre ellos, se encuentran factores asociados al entorno urbano y otros relativos a las condiciones de los hogares (características de la vivienda, condiciones socioeconómicas, tipos de calefacción). La sistematización de estas variables permitió tener una primera aproximación a los datos disponibles que se ocuparon para la construcción del modelo final. En la Tabla 2 se muestran los valores promedios de cada variable con el fin de dar contexto a los datos utilizados para la presente investigación.

Tabla 2. Variables disponibles a partir de resultados del estudio de Rojas et al., (2022)

Variables independientes o predictoras	Tipo de variable	Valor promedio
Temperatura promedio	Cuantitativa continua	8,9°C (I) y 14,5°C (V)
Densidad del barrio (habitantes)	Cuantitativa continua	54 hab/km ²
Distancia al centro (análisis de redes)	Cuantitativa continua	4 km
Distancia al centro (euclidiana)	Cuantitativa continua	3 a 4 km
Renta (categoría)	Cualitativa ordinal	33% C2 y 25% C3
Renta total (CLP total)	Cuantitativa discreta	
Metros cuadrados de la vivienda	Cuantitativa continua	87 mts ²
Número de personas en el hogar	Cuantitativa discreta	3 personas
Material de construcción de la vivienda	Cualitativa nominal	50% mixto y 30% madera
Tipo de combustible usado para calefacción	Cualitativa nominal	77% leña y 19% electricidad
Actitudes sustentables (aislación térmica)	Cualitativa ordinal	28%
Actitudes sustentables (cambio de calefactores)	Cualitativa ordinal	11%

Fuente: Elaboración propia

Las variables cualitativas como el material de construcción de la vivienda o el tipo de combustible utilizado para calefaccionar el hogar, fueron capturadas a partir de la propia encuesta y transformadas en variables *dummy*, esto es, que sólo toman valores de 0 y 1. En cada uno de los datos observados, para cada indicador sólo una variable adquiere el valor 1 y el resto se mantiene con valores 0.

La base de datos fue sistematizada, considerando la información levantada por la encuesta relativas a la caracterización de los hogares, incluyendo la huella de carbono por calefacción y energía; además de otras variables recopiladas a partir de datos disponibles de temperatura promedio de cada ciudad, la densidad y la distancia al centro del barrio en el que se encontraba el hogar encuestado.

6.4. Técnicas de análisis de la información

A partir de los resultados de las encuestas, se calcularon las emisiones de GEI por uso doméstico de energía, considerando las emisiones directas debido al uso de combustibles en el hogar y del uso de electricidad (C. Rojas et al., 2022). Otros estudios han demostrado la importancia de estudiar el impacto ambiental desde un punto de vista del consumo, en contraposición con las metodologías que basan la

medición del impacto ambiental a partir de la producción (Brown et al., 2009; Rees & Wackernagel, 2008), por ese motivo, las emisiones fueron calculadas a partir del consumo de cada hogar.

Diversos estudios (Han et al., 2021; Paravantis et al., 2021; Park et al., 2022) ya han demostrado la aplicabilidad de los modelos de regresión para describir la relación entre las emisiones de carbono y distintas variables en las ciudades, por lo que se sitúa como una metodología extensamente desarrollada para este tipo de investigaciones. A continuación, se describen los pasos seguidos para la elaboración del modelo de regresión.

6.4.1. *Modelo de regresión múltiple para las huellas de carbono*

El análisis de regresión múltiple permite establecer la relación que se produce entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, de manera que sea posible explicar fenómenos sociales complejos. Así, el objetivo del modelo de regresión múltiple es identificar, de un conjunto de variables explicativas, cuáles son las que más influyen en el comportamiento de la variable dependiente (Rojo, 2007).

El modelo arroja diferentes cálculos estadísticos que comprueban la significancia estadística y la bondad de ajuste del mismo, además de otros parámetros que permiten explicar su funcionamiento. En general, en el análisis del modelo de regresión se debe poner atención en algunos parámetros por cada una de las variables predictoras: valor estimado, valor “T” y p-value (Rodríguez & Mora, 2001). Según los autores, el valor estimado (β) es la cantidad que varía la variable dependiente cuando cada variable predictora aumenta en una unidad. El valor “T” y el p-value representan valores que permiten rechazar la hipótesis nula – la cual indica que no existe relación lineal entre dos variables –, por lo tanto, valores “T” altos indican un rechazo de la hipótesis nula; del mismo modo, si el p-value es menor a 0,05, se demuestra que existe relación lineal y que, por lo tanto, el modelo es válido (Rodríguez & Mora, 2001). La ecuación que permite explicar el comportamiento de las variables predictoras en relación con la variable dependiente en el modelo, se describe a continuación:

$$y' = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_i x_i + \varepsilon$$

Donde:

y' = Variable dependiente

α = Valor constante estimado por el modelo, *intercept*

β = Cantidad que varía y' cuando la variable x_i aumenta en una unidad

x = Variable predictora

ε = Error estándar

De esta manera, la forma en que cada predictor explica el comportamiento de la variable dependiente, se traduce en una variación en β valor de la variable y' , por cada unidad que aumenta la variable x , siempre y cuando los otros predictores se mantengan constantes.

Adicional a ellos se encuentran otros parámetros del modelo general como el coeficiente de correlación múltiple al cuadrado o *R-Square* y el Coeficiente de Determinación Ajustado, ambos miden la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por los predictores que hayan sido incluidos en el modelo, sin embargo, el segundo coeficiente no es influenciado por el número de variables introducidas, mientras que el primer parámetro sí (Rodríguez & Mora, 2001). Dicho de otro modo, si por ejemplo un modelo arroja un valor R^2 igual a 0,53, significa que las variables predictoras introducidas en él permiten explicar en un 53% el comportamiento de la variable dependiente. Por lo tanto, sus valores se encuentran entre 0 y 1.

Por otro lado, existen una serie de condiciones para que los resultados del modelo de regresión múltiple sean válidos, entre ellas se encuentra la no colinealidad, es decir, que las variables predictoras deben ser independientes entre sí, en caso contrario se corre el riesgo de sobreestimar los coeficientes que arroja el modelo y, por lo tanto, su validez estadística disminuye (Rodríguez & Mora, 2001). Entre otras condiciones, los datos residuales del modelo deben seguir cierta linealidad y deben tener una distribución normal. Para graficarlo, en el Anexo 1 se muestra una matriz de correlación entre todas las variables de estudio, descartando una posible colinealidad entre ellas, además de otras pruebas de linealidad y normalidad de los errores o residuos del modelo.

Luego, uno de los primeros pasos seguidos para la construcción de un modelo de regresión, dice relación con la elección de los predictores (variables predictoras) que se utilizarán. Se conocen varios métodos para la selección de las variables predictoras, pero en general se utilizan tres métodos: jerárquico (basados en el criterio del analista), de entrada forzada (se introducen todos los predictores) y paso a paso o *stepwise* (se emplean criterios matemáticos para su elección).

Basado en este último, esta investigación utilizó una dirección metodológica mixta, en la que se incorporan variables predictoras, analizando de qué manera pueden mejorar el ajuste del modelo, y tras cada nueva incorporación de variables se realiza un test de extracción de predictores, de modo que a medida que se añaden más predictores, si algunos de los que se encuentran dentro del modelo dejan de contribuir estadísticamente, se eliminan.

Los pasos a seguir para la elección del mejor modelo de regresión, se realizaron a través del software R-Studio. En primer lugar, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple a cada una de las bases de datos para huella de carbono de calefacción y energía en los tres períodos de tiempo: invierno 2019, invierno 2020 y verano del 2021. En base al trabajo realizado por Rojas et al. (2022), se utilizaron los

códigos T0 (resultados de la primera encuesta, período invierno del 2019), T1 (resultados de la primera encuesta aplicada, período invierno del 2020), T2 (resultados de la segunda encuesta aplicada, período verano del 2021), y T1* (resultados de la segunda encuesta aplicada y validación del período invierno del 2020). Con el fin de unificar información, se consideraron los modelos construidos para T0, T1* y T2.

Se calcularon modelos para huella por hogar, por persona y también una huella dinámica, representada por la resta entre los valores en diferentes períodos (es decir, para medir la diferencia entre el valor del período T2 y el período T0, por ejemplo). Tanto la variable por persona como la variable dinámica fueron descartadas: la primera, porque pese a que el modelo mejoraba levemente su ajuste de bondad estadística, se descartaron variables como el número de personas por hogar (posible colinealidad), y categorías de renta (debido a que ésta es calculada por hogar); por parte de la huella dinámica, los resultados de los modelos no arrojaron suficiente significancia estadística y no fueron considerados. De esta manera, los modelos que se estudiaron corresponden a huella de carbono por hogar.

Luego, a través del método de medición Akaike (AIC) se realizó la selección de los mejores predictores para un modelo que permitiera explicar los cambios en los valores de huella de carbono. El criterio de información de Akaike (AIC) proporciona un método simple y objetivo que selecciona el modelo más adecuado para caracterizar datos experimentales, su interpretación se considera como una medida de la calidad con la que el modelo se ajusta a los datos (Martínez et al., 2009). Las ecuaciones que resumen las variables de cada modelo estudiado se presentan en el Anexo 2.

Así, mediante el software R-Studio fue posible identificar aquellos modelos con mejor bondad de ajuste en base a todas las variables incluidas. Para cada período, se construyó un modelo de regresión para la huella por hogar. Luego, se identificó la combinación de factores que mayor influencia ejercieron sobre la variable dependiente en cada período de tiempo, para construir un modelo de regresión. De esta forma, fue posible realizar un primer análisis por separado, que fue complementado con un análisis comparativo según cada período. Finalmente, para analizar las variables que tienen mayor impacto ambiental, se identificaron sólo aquellos predictores con mayor significancia estadística y coeficientes más altos, según cada período.

7. Resultados

7.1. “¿Team Invierno o Team Verano?”: Factores explicativos de la huella de carbono por consumo de calefacción en el hogar

Para explicar, en términos comparativos, el comportamiento de la huella de carbono de calefacción antes y durante la pandemia (T0, T1* y T2), se analizan los resultados de los modelos de regresión para la huella por hogar, identificando en cada uno los factores explicativos más relevantes.

En el caso de la huella de carbono por calefaccionar el hogar en invierno del 2019, la manera en que las diferentes variables inciden estadísticamente en su comportamiento se representa en base a la siguiente ecuación:

Huella calefacción invierno 2019

$$\begin{aligned} = & 2.674 + 0,05_{\text{Distancia euclidiana}} + -126,27_{\text{Temperatura}} + 4,18_{\text{Mts}^2 \text{ vivienda}} \\ & + 62,51_{\text{N}^\circ \text{ personas}} + -188,73_{\text{Aislación}} + 586,03_{\text{Albañilería}} + 266,94_{\text{Madera}} \\ & + -2.012_{\text{Eléctrica}} + -1926_{\text{Eléctrica y gas}} + -1.728_{\text{Eléctrica y otros}} + -1.972_{\text{Gas}} \\ & + -1.978_{\text{Gas y otros}} + 266,57_{\text{Leña}} + 553,90_{\text{Leña y parafina}} - 1.663_{\text{Otros}} \\ & + -1.637_{\text{Parafina}} + -1.170_{\text{Parafina y eléctrica}} + -2.035_{\text{Parafina, eléctrica y otros}} \end{aligned}$$

De esta forma, si todos los hogares compartieran las mismas características y se situaran en el mismo lugar, por cada metro de distancia que un hogar se aleje del centro, debería aumentar su huella de carbono por calefacción en 0,05 kgCO₂eq, de manera que un hogar que se encuentre a más de 1 kilómetro de distancia del centro (1.000 metros), se estima que emitirá en promedio 50 kgCO₂eq más que una vivienda con las mismas características, ubicada en el centro de la misma ciudad.

En la misma línea, una disminución de 1°C de la temperatura de una ciudad, implicaría un aumento promedio de 126,27 kgCO₂eq en hogares con las mismas características materiales y utilizando los mismos métodos de calefacción, de manera que ciudades más frías conllevarían en general mayores emisiones de CO₂ desde los hogares. Considerando el tamaño de la vivienda, que se configura como una variable estadísticamente significativa en el modelo, un aumento de 1 metro cuadrado explicaría 4,18 kgCO₂eq más de emisiones promedio, de manera que si hipotéticamente una vivienda de 60 mts² emite 250 kgCO₂eq para calefaccionar el hogar; una vivienda de 100 mts² con la misma materialidad e independiente del combustible utilizado, emitiría en promedio 168 kgCO₂eq más.

En el caso de las variables cualitativas como el tipo de materialidad de la vivienda y el combustible utilizado para calefacción, la ecuación se modifica en función de la explicación de las mediciones que se quiera comprobar. En ese sentido, si en la ecuación anterior se quiere comprender cómo influyen los factores en la huella de carbono de una vivienda de madera con calefacción a leña, el coeficiente

respectivo se suma al valor de la constante y el resto de las variables cualitativas del modelo pasan a tener valores cero, como se presenta a continuación.

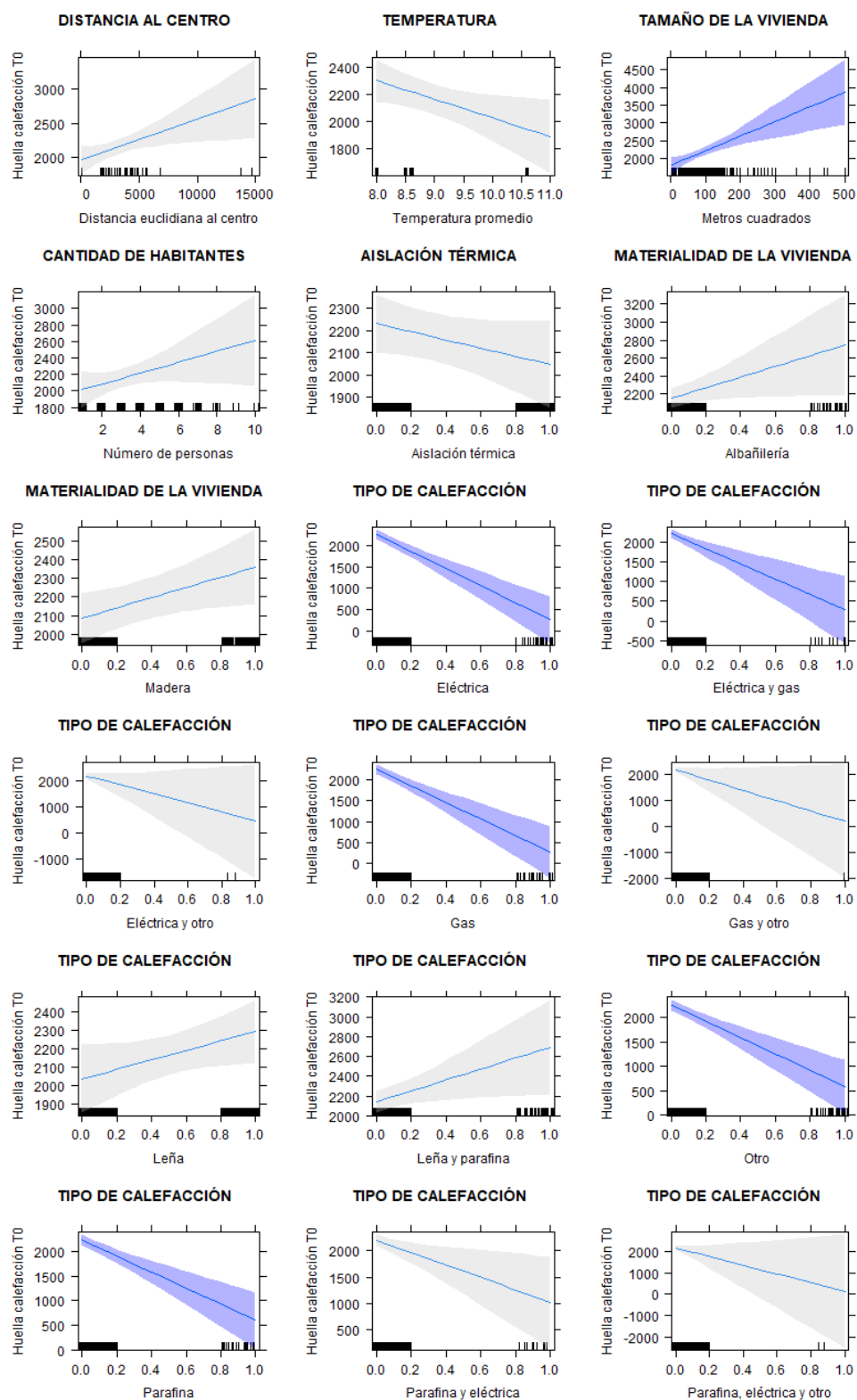
Huella de una vivienda de madera con calefacción a leña en invierno 2019

$$= 3.207 + 0,05_{Distancia\ euclidiana} + -126,27_{Temperatura} + 4,18_{Mts2\ vivienda} + 62,51_{N^o\ personas} + -188,73_{Aislación}$$

Los coeficientes de madera y leña se suman a la constante, por lo que queda con un valor de 3.207. Por lo tanto, se espera que una vivienda de estas características emita 3.207 kgCO₂eq en un período de invierno sin crisis sociosanitaria, y que por cada temperatura promedio que disminuya la ciudad donde se encuentra, este valor aumente en promedio 126,27 kgCO₂eq, mientras que por cada metro cuadrado que se amplíe la vivienda, sus emisiones también aumentarían en promedio 4,18 kgCO₂eq. Al mismo tiempo, actitudes sustentables como prácticas de aislación térmica permitirían disminuir estas emisiones en 188,73 kgCO₂eq, aunque esta última variable carece de significancia estadística para explicar el comportamiento de la huella. También es posible identificar la relación entre variables. Por ejemplo, poniendo atención en los tipos de calefacción más relevantes del modelo, se espera que un hogar con calefacción basada en energía exclusivamente eléctrica, emita 375 kgCO₂eq menos que un hogar que utiliza sólo parafina para calefaccionar la vivienda (resultado de la diferencia entre los coeficientes 2.012 y 1.637 de cada variable), lo que también se podría interpretar como un consumo más sustentable.

Dada la relación entre las variables, la Tabla 3 muestra el modelo de regresión lineal múltiple que muestra la significancia estadística de éstas. El modelo es capaz de explicar casi el 20% de la variabilidad de la huella de carbono emitida por calefacción en hogares en ese período de tiempo (R²: 0,1987, R² ajustado: 0,1865). Las variables que tienen mayor significancia estadística, por lo tanto, que explican mayormente la variabilidad de la huella por calefacción en invierno del 2019, es el tamaño físico de la vivienda (4,18), con un valor positivo, es decir, un mayor tamaño estaría asociado a un aumento de la huella de carbono para calefaccionar, como se vio anteriormente. También el uso de calefacción eléctrica (-2.012,87), a gas (-1.972,47), parafina (-1.637,55) y otras fuentes, al ser variables significativas con valores negativos, estarían asociadas a una disminución de la huella de carbono por cada hogar. Por otro lado, si bien tiene una menor significancia estadística, también influyen factores asociados a la materialidad de la vivienda, esto es, viviendas construidas en base a albañilería (586,03) y madera (266,94) explicarían un aumento de la huella de carbono por calefacción, debido a que su coeficiente tiene un valor positivo. Por otro lado, la Figura 8 muestra el comportamiento de la huella de carbono por calefaccionar en relación con las variables predictores (en azul se muestran las variables estadísticamente significativas).

Figura 8. Gráfico de variables predictoras, calefacción, invierno del 2019 (T0)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, invierno del 2019 (T0)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>	
Constante (Intercept)	2.674,81	4,59	4,75e-06	***
<i>Distancia euclidiana al centro</i>	0,05	2,23	0,025880	*
<i>Temperatura promedio</i>	-126,27	-2,09	0,036243	*
<i>Metros cuadrados de la vivienda</i>	4,18	3,71	0,000213	***
<i>Número de personas en el hogar</i>	62,51	1,49	0,134609	
<i>Act. Sustentables (Aislación térmica)</i>	-188,73	-1,56	0,117724	
<i>Materialidad Albañilería</i>	586,03	2,00	0,045569	*
<i>Materialidad Madera</i>	266,94	2,11	0,034655	*
<i>Calefacción eléctrica</i>	-2.012,87	-6,97	4,94e-12	***
<i>Calefacción eléctrica y gas</i>	-1.926,01	-4,39	1,19e-05	***
<i>Calefacción eléctrica y otros</i>	-1.728,38	-1,55	0,119863	
<i>Calefacción a gas</i>	-1.972,47	-6,14	1,13e-09	***
<i>Calefacción a gas y otros</i>	-1.978,78	-1,78	0,075163	.
<i>Calefacción a leña</i>	266,57	1,83	0,067195	.
<i>Calefacción a leña y parafina</i>	553,90	2,16	0,030305	*
<i>Calefacción otros</i>	-1.663,24	-5,80	8,37e-09	***
<i>Calefacción a parafina</i>	-1.637,55	-5,50	4,50e-08	***
<i>Calefacción a parafina y eléctrica</i>	-1.170,98	-2,62	0,008714	**
<i>Calefacción a parafina, eléctrica y otros</i>	-2.035,83	-1,49	0,135274	

*p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 1.906 sobre 1.181 grados de libertad

R-cuadrado múltiple: 0,1987

R-cuadrado ajustado: 0,1865

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la huella de carbono calculada en invierno del año 2020, es decir, en contexto de crisis sociosanitaria y bajo políticas de confinamiento, la calefacción a leña y sus combinaciones es la variable que más se repite para explicar las emisiones de los hogares, especialmente importante en un contexto de confinamiento en invierno, donde las personas permanecieron más tiempo en sus casas.

Huella calefacción invierno 2020

$$\begin{aligned}
 = & -316,89 + -4,05_{\text{Densidad}} + 0,16_{\text{Distancia en red}} + -0,21_{\text{Distancia euclidiana}} \\
 & + 357,26_{\text{Renta (C1)}} + 242,70_{\text{Renta (C2)}} + 9,19_{\text{Mts2 vivienda}} + 119,90_{\text{N° personas}} \\
 & + 277,22_{\text{Madera}} + 2.300_{\text{Leña}} + 2.379_{\text{Leña y eléctrica}} + 2.369_{\text{Leña, eléctrica y gas}} \\
 & + 10.220_{\text{Leña, eléctrica y otros}} + 2.382_{\text{Leña y gas}} + 2.414_{\text{Leña y parafina}} \\
 & + 2.809_{\text{Leña, parafina y eléctrica}} + 3.655_{\text{Leña, parafina, eléctrica y gas}} \\
 & + 2.371_{\text{Leña, parafina y gas}} + 7.632_{\text{Leña y petróleo}} + 832,42_{\text{Parafina y eléctrica}} \\
 & + 2.414_{\text{Petróleo}}
 \end{aligned}$$

En ese sentido, se espera que los hogares que utilizan sólo calefacción basada en combustión a leña emitan 2.300 kgCO₂eq más que otras viviendas a nivel general; sin embargo, una combinación de

fuentes permitiría modificar esta brecha. Así, un hogar que utiliza leña para calefaccionar el hogar, podría aumentar sus emisiones en promedio 79 kgCO₂eq si la combina con energía eléctrica y hasta en 7,920 kgCO₂eq si se combina con energía eléctrica y otras fuentes. Al contrario, si este hogar cambiara su calefacción basada en parafina y energía eléctrica, disminuirían sus emisiones en 1.468 kgCO₂eq, lo que podría considerarse un consumo más sustentable en términos de emisiones (ver Figura 9).

El modelo de regresión lineal múltiple (Tabla 4) explica aproximadamente el 22% de la variabilidad de la huella por calefacción en este período (R²: 0,2252; R² ajustado: 0,2120). Las variables predictoras más importantes para explicar esta variación, está relacionada con valores positivos del tamaño físico de la vivienda (9,19) y los tipos de combustibles utilizados para calefaccionar, sobre todo en base a leña (2.300,71); en cambio, con menor relevancia estadística se encuentran variables como el número de personas en el hogar (119,90). Es interesante que aparezca la renta como una de las variables relevantes, sin embargo, su estadístico “T” es muy bajo, lo que podría indicar que no existe una relación lineal entre la renta (C1 y C2) y la huella de carbono (situación que se acercaría a la hipótesis nula).

Tabla 4. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, invierno del 2020 (T1*)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>
Constante (Intercept)	-316,89	-1,03	0,300430
Densidad del barrio	-4,05	-1,55	0,119933
Distancia al centro (redes)	0,16	1,50	0,132126
Distancia euclidiana al centro	-0,21	-1,70	0,088573
Tramo de Renta C1	357,26	1,99	0,045837
Tramo de Renta C2	242,70	1,50	0,131751
Metros cuadrados de la vivienda	9,19	5,76	1,06e-08
Número de personas en el hogar	119,90	2,40	0,016432
Materialidad madera	277,22	1,87	0,061659
Calefacción a leña	2.300,71	12,36	< 2e-16
Calefacción a leña y eléctrica	2.379,44	9,48	< 2e-16
Calefacción a leña, eléctrica y gas	2.369,39	4,56	5,49e-06
Calefacción a leña, eléctrica y otros	10.220,44	6,28	4,59e-10
Calefacción a leña y gas	2.382,76	8,65	< 2e-16
Calefacción a leña y parafina	2.414,41	8,78	< 2e-16
Calefacción a leña, parafina y eléctrica	2.809,09	6,12	1,26e-09
Calefacción a leña, parafina, eléctrica y gas	3.655,46	3,18	0,001510
Calefacción a leña, parafina y gas	2.371,41	2,87	0,004104
Calefacción a leña y petróleo	7.632,06	3,35	0,000829
Calefacción a parafina y eléctrica	832,42	1,73	0,082612
Calefacción a petróleo	2.414,73	2,53	0,011246

*p < 0.05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 2.265 sobre 1.179 grados de libertad

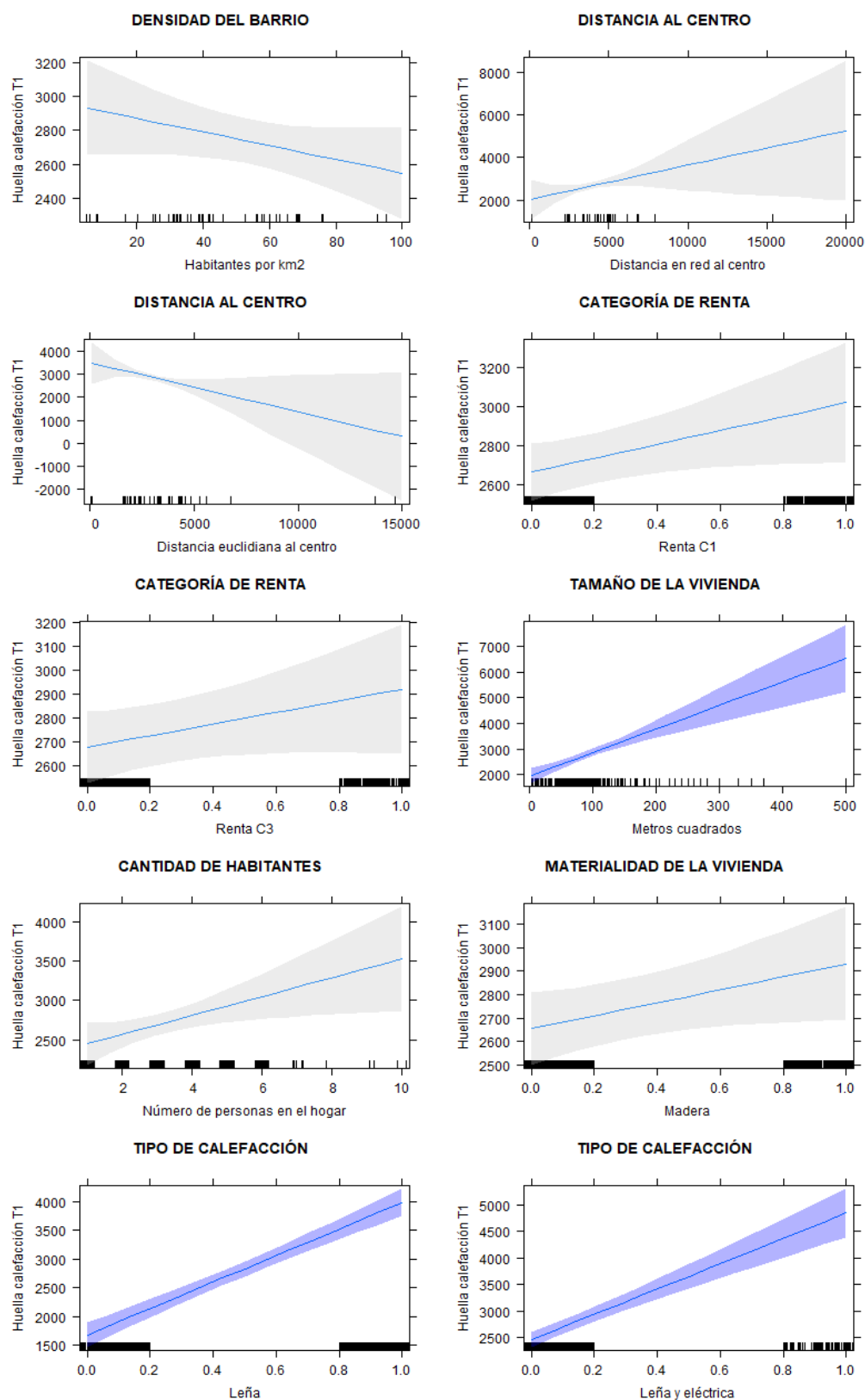
R-cuadrado múltiple: 0,2252

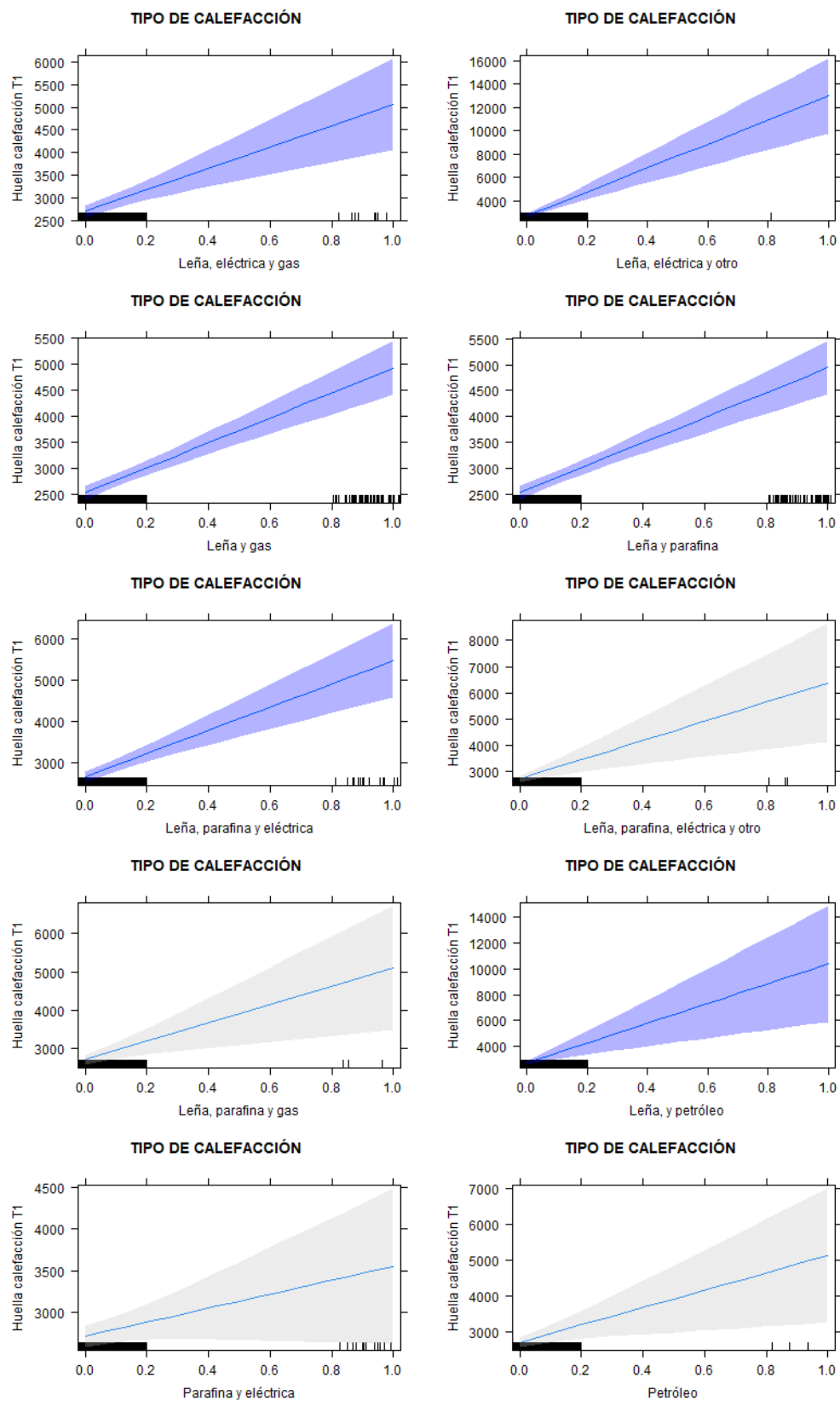
R-cuadrado ajustado: 0,2120

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Gráfico de variables predictoras, calefacción, invierno del 2020 (T1)





Fuente: Elaboraci3n propia

Por último, con respecto al período de verano del 2021, el comportamiento de las variables en relación con la huella se muestra a continuación:

Huella calefacción verano 2021

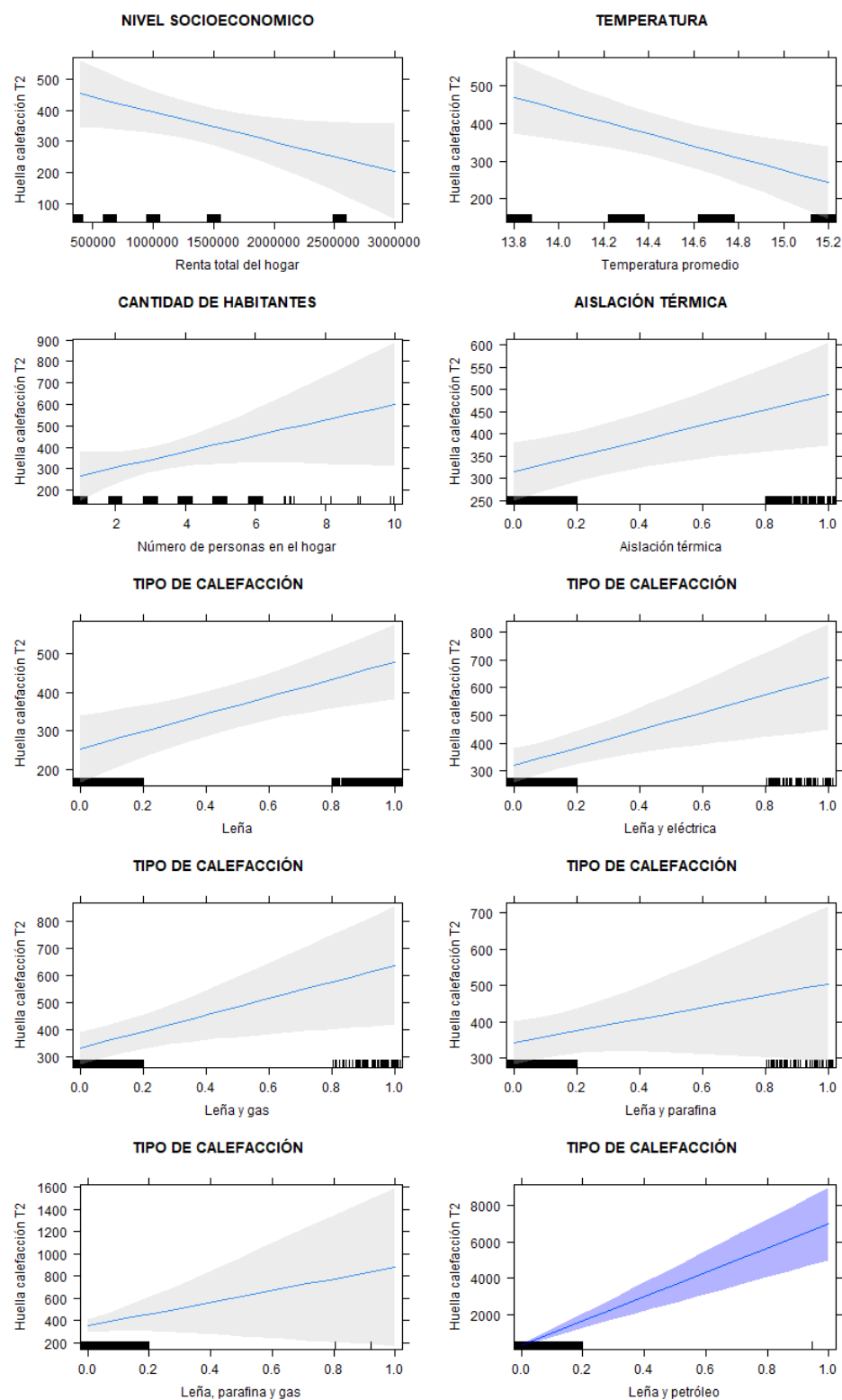
$$\begin{aligned}
 &= 2.479 - 9,56e-05_{Renta} - 161,71_{Temperatura} + 36,99_{N^{\circ}personas} \\
 &+ 174,48_{Aislación\ térmica} + 225,24_{Leña} + 316,89_{Leña\ y\ eléctrica} \\
 &+ 305,00_{Leña\ y\ gas} + 162,29_{Leña\ y\ parafina} + 527,17_{Leña, parafina\ y\ gas} \\
 &+ 6.620_{Leña\ y\ petróleo}
 \end{aligned}$$

Es interesante que la renta tenga un coeficiente negativo, si bien este es muy bajo ($9,56e-05 = 0,00009561$), varía en función de cada unidad de \$ (peso chileno) que aumenta la renta del hogar. Así, si un hogar aumenta su renta en \$500.000, se espera que disminuyan sus emisiones en alrededor de 47 kgCO₂eq. Sin embargo, estos resultados deben tomarse con cautela, en la medida en que la bondad del modelo es muy baja ($R^2 = 0,06$. Ver Tabla 5 más adelante), y porque en el verano baja el consumo por calefacción, por lo que se corre el riesgo de que estos valores no tengan la significancia estadística suficiente para explicar adecuadamente la huella de carbono por calefacción en verano.

Por otro lado, llama la atención el coeficiente asociado a la calefacción a leña y petróleo combinado, puesto que el valor supera con creces los coeficientes estimados para los otros predictores, lo que puede indicar una sobreestimación producida por algunos casos específicos que estarían influyendo en los resultados del modelo de regresión. De manera más general, dados los signos de los coeficientes y sus valores, se entiende que gran parte del alza de la huella de carbono podría estar explicada por viviendas basadas en energía a leña para calefaccionar, incluyendo algunas combinaciones (ver Figura 10).

Estas variables explican cerca del 7% de la variación de la huella de carbono (ver Tabla 5), es decir, su significancia estadística es mucho menor que los modelos calculados con anterioridad. Pese a ello, es interesante que aparezca la renta con valor negativo ($-9,561e-05$) y las iniciativas de aislación térmica (174,48) como algunos de los factores incluidos, aunque la calefacción a leña (225,24) y las combinaciones siguen siendo el factor predominante para explicar la huella en estas ciudades, lo que puede indicar una constante relacionada con la continuidad de este tipo de material como principal fuente de calefacción de los hogares en las ciudades en estudio, aún en períodos estivales.

Figura 10. Gráfico de variables predictoras, calefacción, verano del 2021 (T2)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de calefacción, verano 2021 (T2)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>	
Constante (Intercept)	2.479,84	2,93	0,00336	**
<i>Renta</i>	-0,00	-2,13	0,03310	*
<i>Temperatura</i>	-161,71	-2,82	0,00486	**
<i>Número de personas en el hogar</i>	36,99	1,70	0,08887	.
<i>Act. Sustentables (Aislación térmica)</i>	174,48	2,56	0,01046	*
<i>Calefacción a leña</i>	225,24	3,05	0,00232	**
<i>Calefacción a leña y eléctrica</i>	316,89	3,05	0,00231	**
<i>Calefacción a leña y gas</i>	305,00	2,60	0,00918	**
<i>Calefacción a leña y parafina</i>	162,29	1,41	0,15822	
<i>Calefacción a leña, parafina y gas</i>	527,17	1,45	0,14582	
<i>Calefacción a leña y petróleo</i>	6.620,96	6,59	0,00000	***

*p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 999,4 sobre 1.189 grados de libertad

R-cuadrado múltiple: 0,0678

R-cuadrado ajustado: 0,0600

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, dados los factores con mayor significancia para cada período, la Tabla 6 muestra los principales coeficientes para los tres períodos estudiados. En ella es posible observar que la significancia de las variables cambia según el período de tiempo en el que se encuentren. De esta forma, la calefacción basada en energía eléctrica logra ser un factor significativo para explicar posibles disminuciones promedios por hogar en período prepandémico; sin embargo, en invierno del año 2020, es decir, dentro de una crisis sociosanitaria con políticas de confinamiento aplicadas, estos factores ya no son incluidos dentro del modelo y el comportamiento de la huella pasa a ser explicado de mejor manera por la calefacción basada en leña, que influye en el aumento del consumo energético y de la huella de carbono en cada hogar. Esto podría indicar que hogares que basan su calefacción en combustión a leña, logran tener un mayor peso cuando las personas pasan más tiempo en las viviendas y así consumen mayor energía con este fin.

Algunas variables se mantienen con una alta significancia relativa en diferentes períodos, como el tamaño físico de la vivienda (con valores positivos) y calefacción a leña combinada con parafina (también con valores positivos). Esto quiere decir que, independiente de las condiciones climáticas asociadas a temporada invernal o estival, el aumento de la huella de carbono sigue siendo explicado por viviendas con más metros cuadrados de superficie y que mantienen estrategias de calefacción basadas en combustión de leña. Sin embargo, sus coeficientes pueden variar, por ejemplo, si una vivienda de 50 mts² decidiera ampliarse hasta 150 mts² de superficie, se espera que en promedio su huella de carbono aumente en 418 kgCO₂eq; pero en período de confinamiento esta cifra podría llegar en promedio hasta los 919 kgCO₂eq, independiente del tipo de calefacción que se utilice.

Tabla 6. Comparación de coeficientes con mayor significancia estadística en la huella de carbono por calefacción según período.

Coeficientes con mayor significancia estadística (***) de cada período	Huella de calefacción invierno 2019 (T0)	Huella de calefacción invierno 2020 (T1*)	Huella de calefacción verano 2021 (T2)
Metros cuadrados de la vivienda	*** 4,18 (3,71)	*** 9,19 (5,76)	No incluido
Calefacción eléctrica	*** -2.012,87 (-6,97)	No incluido	No incluido
Calefacción eléctrica y a gas	*** -1.926,01 (-4,39)	No incluido	No incluido
Calefacción a gas	*** -1.972,47 (-6,14)	No incluido	No incluido
Calefacción a leña	266,57 (1,83)	*** 2.300,71 (12,36)	** 225,24 (3,05)
Calefacción a leña y eléctrica	No incluido	*** 2.379,44 (9,48)	** 316,89 (3,05)
Calefacción a leña, eléctrica y gas	No incluido	*** 2.369,39 (4,56)	No incluido
Calefacción a leña, eléctrica y otros	No incluido	*** 10.220,44 (6,28)	No incluido
Calefacción a leña y gas	No incluido	*** 2.382,76 (8,65)	** 305,00 (2,60)
Calefacción a leña y parafina	* 553,90 (2,16)	*** 2.414,41 (8,78)	162,29 (1,41)
Calefacción a leña, parafina y eléctrica	No incluido	*** 2.809,09 (6,12)	No incluido
Calefacción a leña y petróleo	No incluido	*** 7.632,06 (3,35)	*** 6.620,96 (6,59)
Calefacción otros	*** -1.663,24 (-5,80)	No incluido	No incluido
Calefacción a parafina	*** -1.637,55 (-5,50)	No incluido	No incluido
R-cuadrado múltiple	0,1987	0,2252	0,0678
R-cuadrado ajustado	0,1865	0,2120	0,0600

Estadístico “T” entre paréntesis

Fuente: Elaboración propia

7.2. “Cuando salgas apaga la luz”: Factores explicativos de la huella de carbono por consumo de energía para otros usos distintos a calefaccionar el hogar.

Además de las emisiones por uso de energía para calefaccionar, se analizaron las variables que explican las emisiones de los hogares por el uso de energía para otros fines distintos a calefacción (en adelante, huella de energía). La siguiente ecuación lo explica de manera matemática:

Huella energía invierno 2019

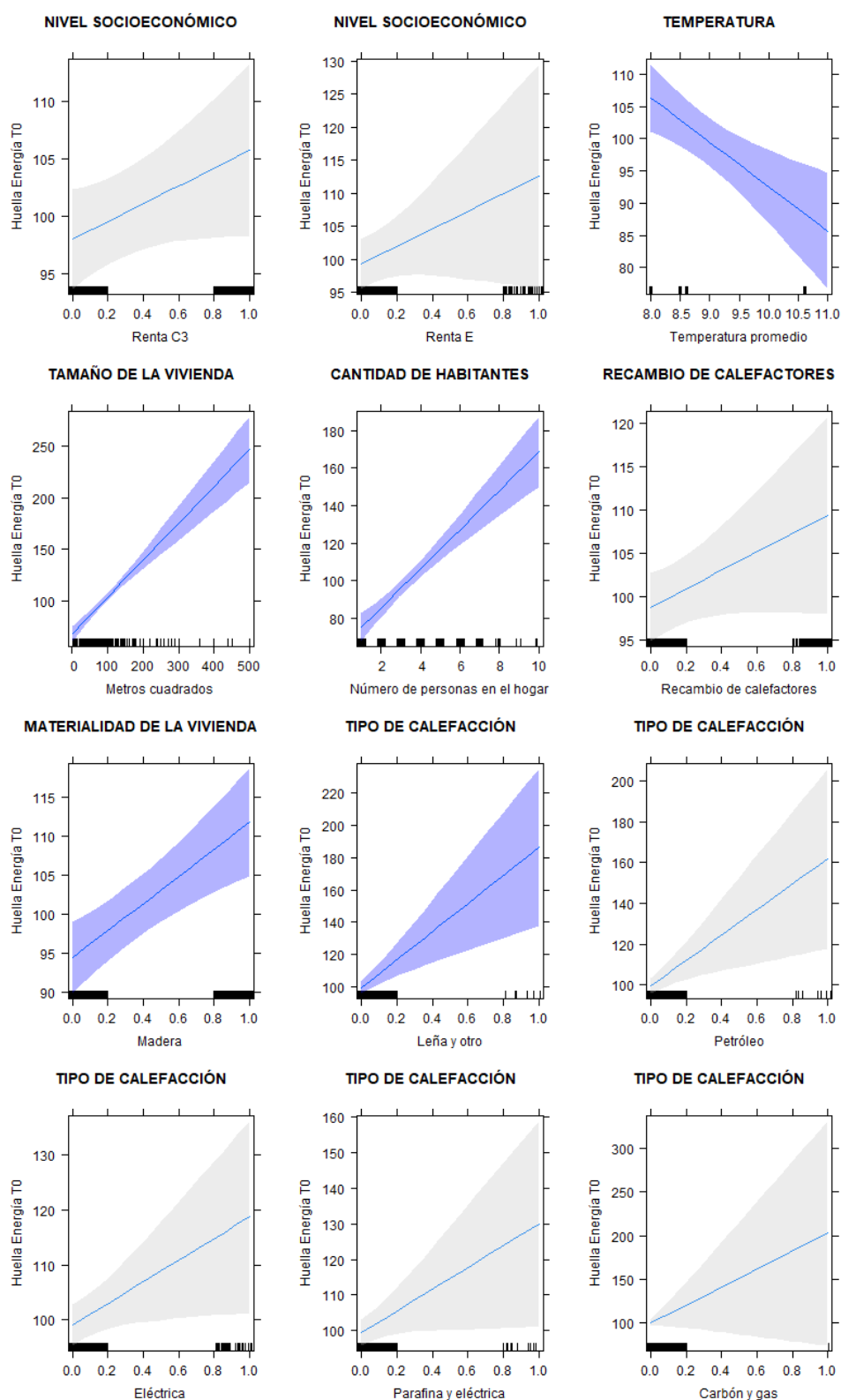
$$\begin{aligned} &= 82,71 + 7,72_{Renta\ C3} + 13,28_{Renta\ E} - 6,89_{Temperatura} + 0,35_{Mts^2\ vivienda} \\ &+ 10,39_{N^\circ\ personas\ en\ el\ hogar} + 10,58_{Recambio\ calefactores} + 17,28_{Madera} \\ &+ 87,04_{Leña\ y\ otros} + 62,45_{Petróleo} + 19,67_{Eléctrica} + 30,50_{Parafina\ y\ eléctrica} \\ &+ 102,80_{Carbón\ y\ gas} \end{aligned}$$

En términos generales, se tiene que viviendas con niveles de ingresos bajos (13,28) podrían estar emitiendo una mayor huella de carbono por energía, mientras que la disminución de la temperatura (-6,89), un mayor tamaño de las viviendas (0,35), el recambio de calefactores (10,58) y la madera como material de construcción de las viviendas (17,28) podrían estar influyendo en el aumento de las emisiones de hogares.

Los valores asociados a la renta del hogar son positivos, de manera que un hogar con una Renta C3 (rango de ingresos), se esperaría que emitiera en promedio 7,72 kgCO₂eq más; cifra que se eleva a 13,28 kgCO₂eq en hogares con una Renta E (rango de ingresos), es decir, hogares con menores ingresos. Sin embargo, estos valores no arrojan una significancia estadística que los haga relevantes para poner atención en ellos a la hora de explicar el comportamiento de la huella de carbono de energía.

En ese sentido, la temperatura vuelve a ser una de las variables más relevantes, también con una relación negativa, debido a que cada 1°C que en promedio disminuya la temperatura de una ciudad, se espera que las emisiones de cada hogar aumenten en promedio 6,89 kgCO₂eq. Además, las características de la vivienda pasan a ser un factor predictor con una alta significancia estadística, en la medida en que viviendas de mayor tamaño y con mayor cantidad de habitantes en ellas, explican el aumento de la huella de carbono por energía. Así, si una vivienda decidiera aumentar la extensión de su superficie en 30 mts², se espera que su huella por energía aumente en 10,5 kgCO₂eq; mientras que cada persona adicional que llegue a vivir a una vivienda en estas ciudades incidirá en el aumento promedio de 10,39 kgCO₂eq de cada hogar. Por último, independiente del tipo de energía que utilicen, se espera que una vivienda construida en madera tenga 17,28 kgCO₂eq más de huella de carbono que otra vivienda sin este material. En la figura 11 se muestra el comportamiento de la huella según las variables predictoras.

Figura 11. Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, invierno del 2019 (T0)



Fuente: Elaboración propia

Pese a estas explicaciones, los coeficientes en general no superan el valor 100, en contraste con algunos de los resultados vistos en la huella de carbono por calefacción, de manera que las emisiones que se generan tienden a ser menores. Esto se debe a que los modelos explican la huella de carbono en cada período, por lo que si los coeficientes en general son más bajos, obedece a que la huella en general también es más baja y, por lo tanto, los factores explicativos inciden en valores similares.

La combinación de estas variables permite explicar el 16% del comportamiento de la huella de carbono de energía en invierno del 2019, siendo la temperatura, el tamaño físico de la vivienda, el número de personas viviendo en el hogar, la materialidad de la vivienda y la calefacción a leña las variables que tienen una mayor significancia estadística y que, por lo tanto, explican de mejor manera el comportamiento de la huella.

Tabla 7. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, invierno 2019 (T0)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>	
Constante (Intercept)	82,71	4,25	2,26e-05	***
Tramo de Renta C3	7,72	1,74	0,081654	.
Tramo de Renta E	13,28	1,49	0,134755	
Temperatura	-6,89	-3,41	0,000660	***
Metros cuadrados de la vivienda	0,35	9,04	< 2e-16	***
Número de personas en el hogar	10,39	7,35	3,62e-13	***
Act. Sustentables (recambio de calefactores)	10,58	1,72	0,085161	.
Materialidad madera	17,28	4,02	6,05e-05	***
Calefacción a leña y otros	87,04	3,48	0,000507	***
Calefacción a petróleo	62,45	2,77	0,005675	**
Calefacción eléctrica	19,67	2,15	0,031411	*
Calefacción a parafina y eléctrica	30,50	2,04	0,040863	*
Calefacción a carbón y gas	102,80	1,56	0,117625	

*p < 0.05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 66,53 sobre 1.187 grados de libertad

R-cuadrado múltiple: 0,1670

R-cuadrado ajustado: 0,1586

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la huella de energía en invierno del 2020, la ecuación que explica su comportamiento se representa a continuación.

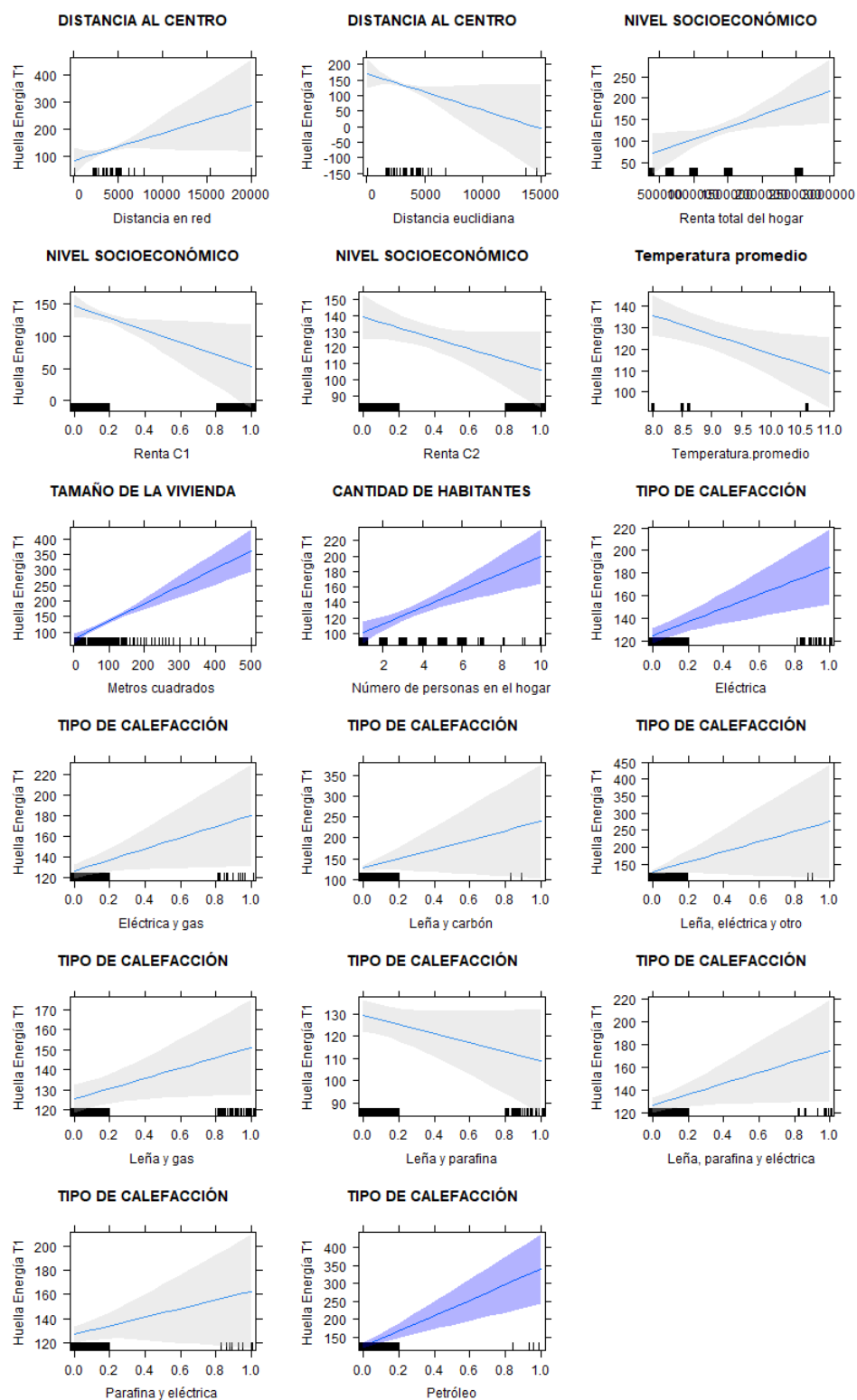
Huella de energía, invierno 2020

$$\begin{aligned} &= 64,86 + 0,01_{\text{Distancia en red}} + -0,01_{\text{Distancia euclidiana}} + 0,00_{\text{Renta}} \\ &+ -92,99_{\text{Renta (C1)}} + -33,01_{\text{Renta (C2)}} + -8,94_{\text{Temperatura}} + 0,56_{\text{Mts2 vivienda}} \\ &+ 10,87_{\text{Nº personas hogar}} + 60,46_{\text{Eléctrica}} + 54,08_{\text{Eléctrica y gas}} \\ &+ 111,77_{\text{Leña y carbón}} + 148,36_{\text{Leña, eléctrica y otros}} + 25,79_{\text{Leña y gas}} \\ &+ -20,47_{\text{Leña y parafina}} + 48,17_{\text{Leña, parafina y eléctrica}} \\ &+ 35,60_{\text{Parafina y eléctrica}} + 212,06_{\text{Petróleo}} \end{aligned}$$

Al igual que en invierno del año 2019, en período de pandemia vuelven a aparecer variables socioeconómicas, pero no logran tener suficiente valor estadístico para explicar la huella de energía. La ecuación expresa que un aumento de la huella de energía en invierno del 2020 se explicaría por viviendas de gran superficie y con mayor número de personas por cada hogar. Una vivienda basada en energía eléctrica para calefaccionar, explica con una alta significancia estadística un aumento de 60,46 kgCO₂eq, esto podría deberse a que viviendas que eligen un tipo de combustible más sustentable, pero más costoso, como la energía eléctrica, es posible que también consuman más energía para otros usos y tenga una mayor huella de carbono.

Estas variables explican el 11% del comportamiento de la huella por energía en el hogar (ver Tabla 8), teniendo como variables con una alta relevancia en su predicción el tamaño físico de la vivienda (0,56), la cantidad de habitantes (10,87), la calefacción eléctrica (60,46) y la calefacción a petróleo (212,06). Sin embargo, las demás combinaciones de calefacción no lograron ser estadísticamente significativas. Por su parte, la Figura 12 muestra los gráficos que representan el comportamiento de estas variables según la huella de energía para otros usos.

Figura 12. Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, invierno del 2020 (T1)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, invierno 2020 (T1*)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>	
Constante (Intercept)	64,86	1,67	0,094672	.
<i>Distancia al centro (redes)</i>	0,01	1,83	0,067101	.
<i>Distancia euclidiana al centro</i>	-0,01	-1,83	0,066856	.
<i>Renta</i>	0,00	2,38	0,017088	*
<i>Tramo de Renta C1</i>	-92,99	-2,25	0,024432	*
<i>Tramo de Renta C2</i>	-33,01	-1,85	0,064036	.
<i>Temperatura</i>	-8,94	-2,43	0,014963	*
<i>Metros cuadrados de la vivienda</i>	0,56	6,80	1,61e-11	***
<i>Número de personas en el hogar</i>	10,87	4,12	3,96e-05	***
<i>Calefacción eléctrica</i>	60,46	3,51	0,000455	***
<i>Calefacción eléctrica y a gas</i>	54,08	2,13	0,033118	*
<i>Calefacción a leña y carbón</i>	111,77	1,61	0,106550	.
<i>Calefacción a leña, eléctrica y otros</i>	148,36	1,74	0,081410	.
<i>Calefacción a leña y gas</i>	25,79	2,04	0,041293	*
<i>Calefacción a leña y parafina</i>	-20,47	-1,64	0,100480	.
<i>Calefacción a leña, parafina y eléctrica</i>	48,17	2,08	0,036909	*
<i>Calefacción a parafina y eléctrica</i>	35,60	1,46	0,142286	.
<i>Calefacción a petróleo</i>	212,06	4,29	1,90e-05	***

*p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 118,9 sobre 1.182 grados de libertad

R-cuadrado múltiple: 0,1172

R-cuadrado ajustado: 0,1045

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

Para verano del 2021, la expresión matemática que expresa los coeficientes de cada variable predictora se presenta a continuación. Una vivienda que decidiera expandir su estructura en 100 mts², se esperaría un aumento de sus emisiones en 40,12 kgCO₂eq. Si su expansión se traduce en la llegada de 5 personas más al hogar, involucraría un aumento de 55,60 kgCO₂eq. En total, se espera que este tipo de situaciones aumenten por cada hogar en promedio 95,72 kgCO₂eq sus emisiones, debido al aumento en el consumo de energía del hogar.

Huella energía verano 2021

$$\begin{aligned}
 &= 166,04 + 0,01_{\text{Distancia en redes}} + 0,01_{\text{Distancia euclidiana}} + 0,01_{\text{Temperatura}} \\
 &+ 0,40_{\text{Mts}^2 \text{ vivienda}} + 11,12_{\text{N}^\circ \text{ personas hogar}} + 6,80_{\text{Aislación térmica}} \\
 &+ 113,89_{\text{Leña y carbón}} + 127,29_{\text{Leña, eléctrica y otros}} + 84,51_{\text{Leña y otro}} \\
 &+ 23,53_{\text{Leña y gas}} + 24,08_{\text{Leña, parafina y eléctrica}}
 \end{aligned}$$

Adicionalmente, aunque con una menor significancia estadística, se espera que hogares que mantengan calefacción a leña y combinación con otras fuentes, también aumenten las emisiones de CO₂eq, sobre todo si ésta es combinada con carbón, o bien, con fuentes eléctricas y otras.

Estas variables explican casi el 16% del comportamiento (ver Tabla 9) de la huella de carbono por energía para otros usos, similar a otros períodos, pero tiene una relevancia estadística mucho mayor en comparación con el mismo período para huella por calefacción (R^2 energía = 0,1579 y R^2 calefacción = 0,0678).

El aumento de la huella de energía en este período es explicado en mayor parte por las características de la vivienda como su tamaño (0,40) y la cantidad de personas que la habitan (11,12), de manera que mientras más personas y mayor tamaño tenga un hogar, se espera que las emisiones por energía aumenten. La temperatura (-10,18) y la distancia al centro (0,01) influyen con una menor relevancia estadística; lo mismo sucede con los diferentes tipos de calefacción, destacando la calefacción a leña con valores positivos en sus diferentes combinaciones, explicando el aumento de la huella de carbono.

Tabla 9. Modelo de regresión múltiple, Huella de carbono de energía, verano 2021 (T2)

<i>Coefficientes</i>	<i>Estimación</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr (> t)</i>	
Constante (Intercept)	166,04	2,82	0,00484	**
<i>Distancia al centro (redes)</i>	0,01	2,30	0,02115	*
<i>Distancia euclidiana al centro</i>	-0,01	-2,53	0,01151	*
<i>Temperatura</i>	-10,18	-2,48	0,01299	*
<i>Metros cuadrados de la vivienda</i>	0,40	8,73	< 2e-16	***
<i>Número de personas en el hogar</i>	11,12	7,39	2,59e-13	***
<i>Act. Sustentables (aislación térmica)</i>	6,80	1,45	0,14636	
<i>Calefacción a leña y carbón</i>	113,89	2,83	0,00466	**
<i>Calefacción a leña, eléctrica y otros</i>	127,29	2,57	0,01003	*
<i>Calefacción a leña y otros</i>	84,51	2,43	0,01514	*
<i>Calefacción a leña y gas</i>	23,53	3,24	0,00121	**
<i>Calefacción a leña, parafina y eléctrica</i>	24,08	1,81	0,07049	.

*p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Error estándar residual: 69,12 sobre 1.188 grados de libertad

R-cuadrado múltiple: 0,1579

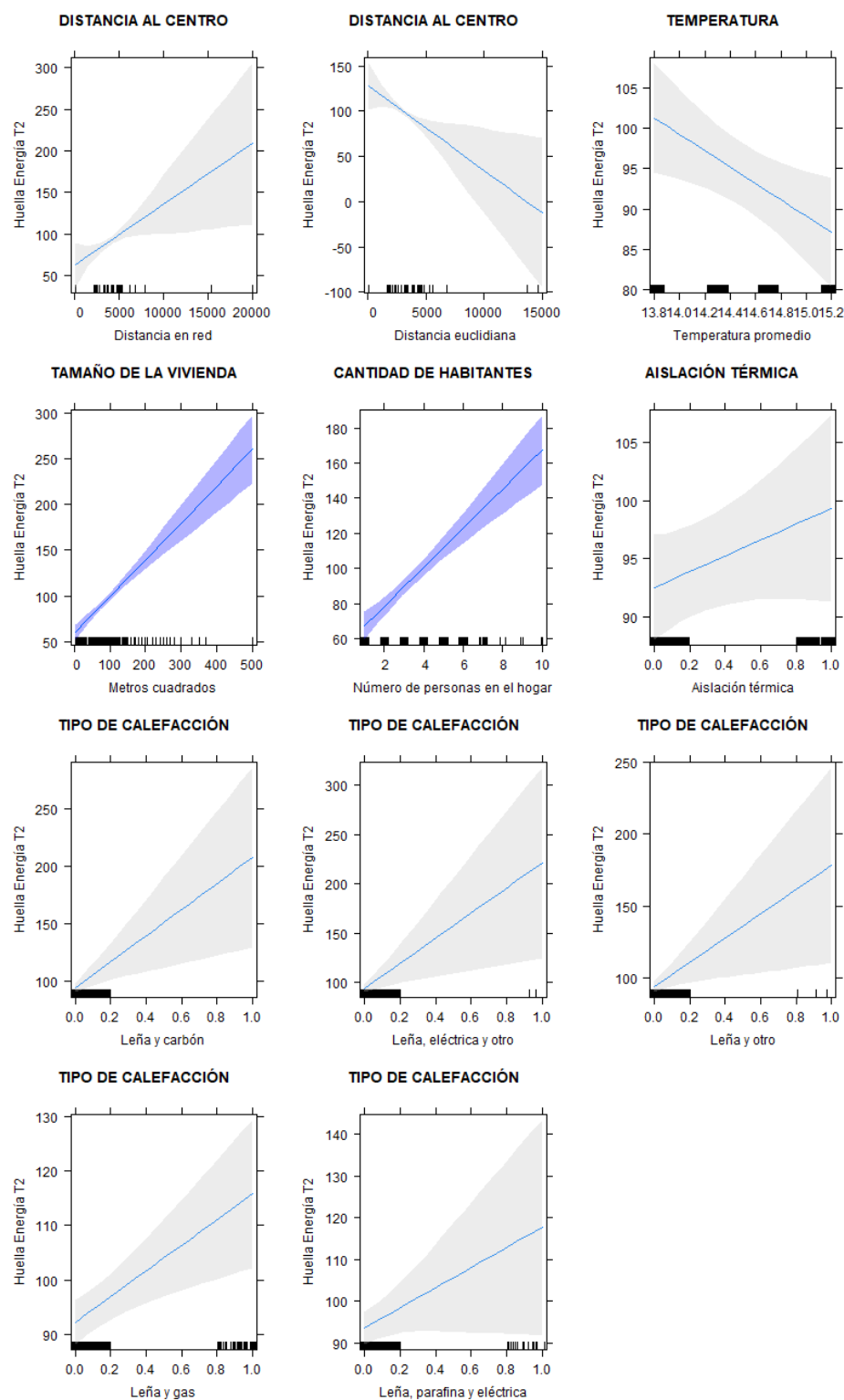
R-cuadrado ajustado: 0,1501

Valor p: < 2,2e-16

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Figura 13 muestra las variables predictoras y la manera en la que inciden en la variable dependiente. Es posible notar que los gráficos coloreados en azul, corresponden a las variables estadísticamente significativas, por lo tanto, que mejor explican el modelo, siendo aquellas las que tienen un área más estrecha, asociada al margen de error.

Figura 13. Gráfico de variables predictoras, energía otros usos, verano del 2021 (T2)



Fuente: Elaboración propia

En términos comparativos, la Tabla 10 muestra los coeficientes más importantes para explicar la huella de carbono por energía en los períodos estudiados. En general, se puede observar que las fuentes de calefacción disminuyen su significancia estadística si se comparan con la huella de carbono para calefaccionar. Así, los factores explicativos que se repiten tienen que ver con las características físicas del hogar y las condiciones climáticas en las que se sitúan, de manera que viviendas con mayor superficie y con más personas viviendo en ellas, en ciudades más frías, transversalmente explican el aumento de la huella por energía para otros usos a nivel transversal. Sin embargo, sus coeficientes se modifican. En general, se ve un aumento de sus valores en períodos de confinamiento, debido presuntamente a que las personas pasan más tiempo en sus casas y, por lo tanto, el peso que tiene un mayor consumo de energía por viviendas más grandes, o bien, por tener más personas viviendo en ellas, implica un aumento con un factor multiplicador mayor.

Tabla 10. Comparación coeficientes con mayor significancia estadística en la huella de carbono por energía según período

Coeficientes con mayor significancia estadística (***) de cada período	Huella de energía invierno 2019 (T0)	Huella de energía invierno 2020 (T1*)	Huella de energía verano 2021 (T2)
Temperatura	*** -6,89 (-3,41)	* -8,94 (-2,43)	* -10,18 (-2,48)
Metros cuadrados de la vivienda	*** 0,35 (9,04)	*** 0,56 (6,80)	*** 0,40 (8,73)
Número de personas en el hogar	*** 10,39 (7,35)	*** 10,87 (4,12)	*** 11,12 (7,39)
Materialidad de madera	*** 17,28 (4,02)	No incluido	No incluido
Calefacción eléctrica	* 19,67 (2,15)	*** 60,46 (3,51)	No incluido
Calefacción a leña y otros	*** 87,04 (3,48)	No incluido	* 84,51 (2,43)
Calefacción a petróleo	No incluido	*** 212,06 (4,29)	No incluido
R-cuadrado múltiple	0,1670	0,1172	0,1579
R-cuadrado ajustado	0,1586	0,1045	0,1501

Fuente: Elaboración propia

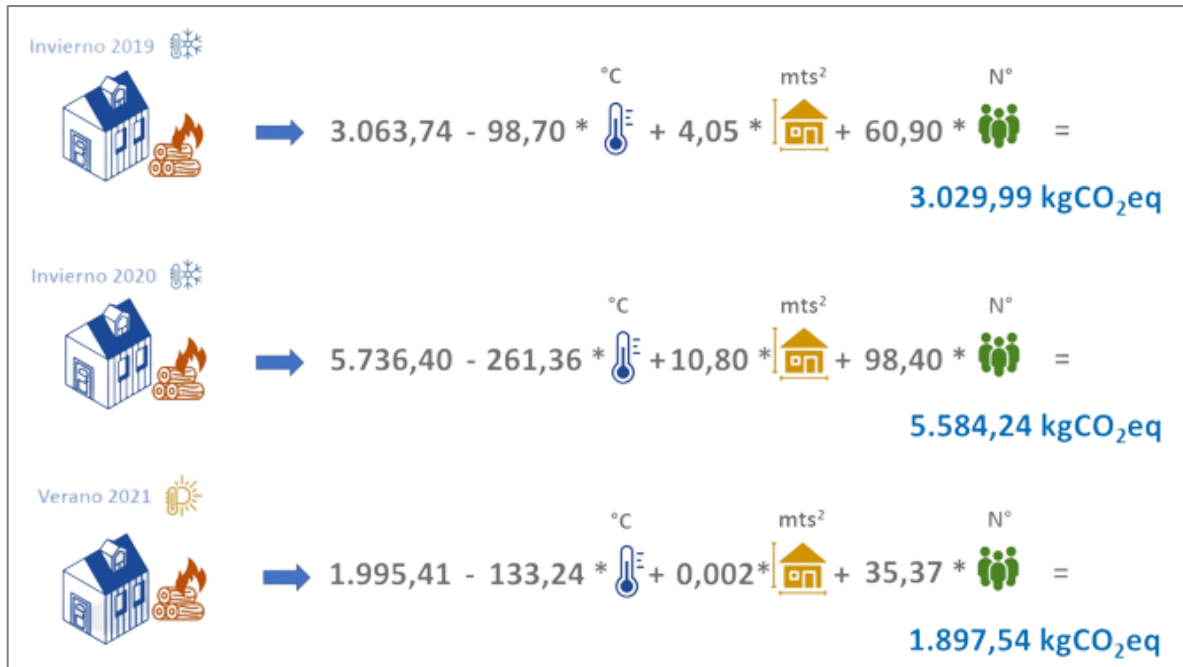
7.3. “Dime qué consumes, dónde vives y te diré cuánto emites”: Análisis del impacto ambiental de variables significativas en la huella de carbono en ciudades del centro-sur de Chile

Para analizar el impacto ambiental de las variables significativas, se identificaron los factores con mayor incidencia en la huella de carbono de los diferentes períodos, esto es: temperatura, tamaño de la vivienda, número de personas en el hogar, materialidad de la vivienda y tipo de calefacción. Con el fin de analizar comparativamente el impacto de cada una de estas variables, se calcularon modelos de regresión para cada período agregando los mismos predictores transversalmente, independiente de los cambios que puedan existir en la bondad del modelo y priorizando el análisis de los coeficientes y el tipo de relación con la huella de carbono.

Adicionalmente, con el fin de entender la relevancia que tiene cada una de las fuentes de energía para entender las emisiones de GEI en estas ciudades, se simplificaron los modelos de regresión para que éstos analizaran el peso que tiene cada fuente por separado, a diferencia de los modelos anteriores que calcularon la relevancia de cada fuente y sus posibles combinaciones.

La Figura 14 representa la ecuación teniendo como base las emisiones esperadas para una vivienda de madera que basa su calefacción en combustión a leña. Teniendo el resto de las variables constantes, se espera que una vivienda de estas características emita en promedio 3.029 kgCO₂eq en invierno del 2019, 5.584 kgCO₂eq en invierno del 2020 y 1.897 kgCO₂eq en verano del 2021. Además, se espera que con el aumento de la temperatura las emisiones por calefacción bajen, con un mayor coeficiente en verano del 2021. Pese a ello, la mayor parte del impacto ambiental está explicado por el consumo de leña para calefaccionar.

Figura 14. Ecuación de impacto de una vivienda de madera con calefacción a leña, huella de carbono de energía para calefaccionar

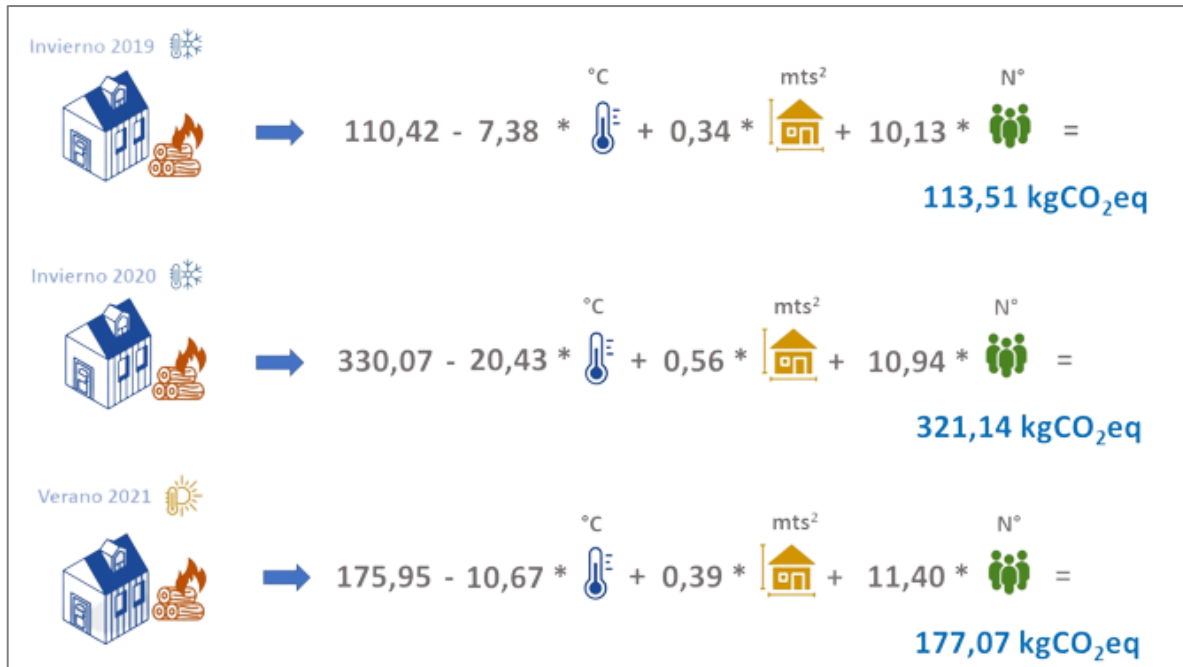


Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 representa la ecuación para la huella de energía teniendo como base las emisiones esperadas para una vivienda de madera que basa su calefacción en combustión a leña. Teniendo el resto de las variables constantes, se espera que una vivienda de estas características emita en promedio 113,51 kgCO₂eq en invierno del 2019, 321,14 kgCO₂eq en invierno del 2020 y 177,07 kgCO₂eq en verano del 2021.

La temperatura se mantiene con valores negativos y el resto de las variables (tamaño y cantidad de habitantes) con valores positivos, de manera que una disminución en 1°C promedio de temperatura podría hacer aumentar las emisiones en 7,38 kgCO₂eq en invierno del 2019 y en 10,37 kgCO₂eq en período de pandemia. El número de personas también tiene un mayor peso en el impacto ambiental en período de crisis sociosanitaria, presuntamente por la llegada de más habitantes que pudo haber traído la pandemia COVID19, por lo que, si por este motivo cada hogar aumentó en promedio 2 habitantes, se espera que esto implique un aumento de 24,14 kgCO₂eq promedio por hogar.

Figura 15. Ecuación de impacto de una vivienda de madera con calefacción a leña, huella de carbono de energía sin calefaccionar



Fuente: Elaboración propia

Por último, se tiene la significancia estadística de estas variables en los tres períodos de tiempo en la Tabla 11 y Tabla 12. En términos estadísticos, las variables que más impacto ambiental generan son la calefacción en base a leña (2.478 kgCO₂eq en promedio por hogar en pandemia) y temperatura (disminución de 261,36 kgCO₂eq por cada grado de temperatura promedio que aumenta la ciudad), a nivel transversal. El impacto generado por la calefacción a leña es mayor en pandemia (2.478) que en época prepandemia (1.999), en la misma estación del año (invierno). La Tabla 11 muestra que la misma vivienda, con políticas de confinamiento, emite casi 500 kgCO₂eq más que una vivienda con el mismo tipo de calefacción y características físicas en un período sin políticas de confinamiento por crisis sociosanitaria. Al pasar más tiempo en las casas por este tipo de políticas, cualquier cambio que conlleve emitir más emisiones se multiplicará por un coeficiente mayor que en otros períodos. Lo mismo sucede con el tamaño de la vivienda (10,80 en pandemia y 4,05 prepandemia), de manera que el impacto ambiental que generaría una vivienda de gran tamaño podría llegar a ser más del doble que el impacto que genera la misma vivienda en un período previo a la pandemia.

En comparación, la huella de carbono por energía para otros usos (Tabla 12) fue explicada en gran parte por factores externos a las fuentes de las emisiones, como la temperatura promedio de la ciudad (aumento de 20,43 kgCO₂eq por cada grado de temperatura promedio que disminuye la ciudad en

invierno); acompañada del tamaño de la vivienda (incremento de 0,56 kgCO₂eq por cada metro cuadrado de la vivienda en pandemia) y la cantidad de habitantes por hogar (aumento de 10,94 kgCO₂eq por persona en pandemia), siendo los tipos de calefacción variables con menor significancia en el comportamiento de la huella de carbono. Al igual que en la huella de carbono por calefaccionar, el impacto de cada variable en la huella de carbono es mayor en período de pandemia en comparación con el período prepandémico, comprobando el peso que pueden tener las políticas de confinamiento en la huella de cada hogar.

Tabla 11. Variables significativas en la huella de carbono por calefacción

	T0	T1*	T2
Constante	905,35 (1,25)	2.724,67 (1,31)	1.661,41 (1,80)
Temperatura	-98,70 (-1,65)	-261,36 (-1,91)	* -133,24 (-2,19)
Tamaño vivienda	*** 4,05 (3,51)	*** 10,80 (7,05)	0,002 (0,003)
N° personas	60,90 (1,45)	98,40 (1,93)	35,37 (1,56)
Mat. Albañilería	501,34 (0,89)	252,94 (0,38)	252,66 (0,85)
Mat. Hormigón	-27,52 (-0,05)	230,74 (0,38)	186,64 (0,69)
Mat. Madera	159,28 (0,32)	533,32 (0,90)	280,23 (1,07)
Mat. Mixto	-75,81 (-0,15)	343,19 (0,58)	215,71 (0,83)
Leña	*** 1.999,11 (11,76)	*** 2.478,41 (12,35)	*** 334,00 (3,73)
Gas	-95,20 (-0,58)	-3,96 (-0,02)	41,71 (0,50)
Eléctrica	-219,52 (-1,46)	270,11 (1,67)	26,52 (0,36)
Parafina	* 377,00 (2,38)	324,30 (1,81)	-51,92 (-0,65)
Petróleo	* 1.452,56 (2,37)	*** 3.124,62 (3,46)	* 848,22 (2,11)
Otro	35,49 (0,13)	563,37 (1,40)	13,72 (0,07)
R cuadrado múltiple	0,19	0,20	0,03
R cuadrado ajustado	0,18	0,19	0,02

T0 = Período invierno 2019

T1* = Período invierno 2020

T2 = Período verano 2021

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Variables significativas en la huella de carbono por energía

	T0	T1*	T2
Constante	82,09 (3,26)	313,92 (2,89)	147,10 (2,32)
Temperatura	*** -7,38 (-3,56)	** -20,43 (-2,85)	* -10,67 (-2,56)
Tamaño vivienda	*** 0,34 (8,69)	*** 0,56 (7,03)	*** 0,39 (8,54)
Nº personas	*** 10,13 (6,99)	*** 10,94 (4,11)	*** 11,40 (7,36)
Mat. Albañilería	18,71 (0,96)	29,81 (0,85)	4,63 (0,22)
Mat. Hormigón	15,02 (0,85)	33,64 (1,05)	12,55 (0,67)
Mat. Madera	* 35,35 (2,07)	29,11 (0,94)	16,77 (0,93)
Mat. Mixto	17,54 (1,03)	25,14 (0,82)	14,46 (0,81)
Leña	-7,02 (-1,19)	-12,96 (-1,23)	* 12,08 (1,97)
Gas	-1,48 (-0,26)	7,51 (0,77)	* 12,42 (2,38)
Eléctrica	7,11 (1,37)	** 25,18 (2,97)	4,96 (1,00)
Parafina	-1,23 (-0,22)	-10,25 (-1,09)	-2,13 (-0,39)
Petróleo	37,05 (1,74)	*** 179,49 (3,79)	29,92 (1,08)
Otro	-0,79 (-0,08)	6,10 (0,29)	** 34,32 (2,80)
R cuadrado múltiple	0,15	0,10	0,16
R cuadrado ajustado	0,14	0,09	0,14

T0 = Período invierno 2019

T1* = Período invierno 2020

T2 = Período verano 2021

Fuente: Elaboración propia

Por último, se exploraron los modelos para las variables significativas en cada una de las ciudades, como se puede ver en el Anexo 4 y Anexo 5. Dejando de lado que variables climáticas altamente relevantes como la temperatura, debido a su escala, se omiten por no tener variabilidad dentro del modelo por ciudad; los resultados no dan cuenta de grandes diferencias entre los coeficientes o en los signos, además de que la significancia estadística de ciertas variables se mantiene, como la importancia de la calefacción a leña, el tamaño de la vivienda o el número de habitantes. Debido a esto, no se consideró necesario explorar en un análisis más detallado por ciudad.

8. Discusión

A nivel general, los resultados de esta investigación han podido complementar los hallazgos que han identificado otros estudios sobre el aumento de GEI local en las ciudades (C. Rojas et al., 2022; Wang & Li, 2021) y también de la demanda de energía en hogares en un contexto sociosanitario (Moreno et al., 2020); en contraste con un extenso grupo de publicaciones científicas que demostraron la disminución de las emisiones GEI globales en las principales ciudades del mundo por efectos de las cuarentenas y/o restricciones (Andreoni, 2021; Dantas et al., 2020; Han et al., 2021; Le Quéré et al., 2020; Liu et al., 2020; Nižetić, 2020; Wang et al., 2022; Wang & Su, 2020).

Los hallazgos aportan en la premisa de que los cambios en los patrones de consumo y en el comportamiento cotidiano de las personas producto de las medidas de confinamiento por crisis sociosanitaria, generaron cambios en las emisiones GEI locales y, por lo tanto, impactan directamente en la sostenibilidad de las ciudades. Tal como argumenta Salazar (2018) y Howarth et al. (2020), entre otros, se demostró la importancia de considerar criterios de sostenibilidad más asociados a estrategias de desarrollo local, a pesar de que la aplicación de políticas autoritarias propias de estados de emergencia – como ocurrió con la pandemia – no formarían parte de las estrategias que es necesario trabajar para lograr ciudades más sustentables.

El análisis de regresión múltiple aplicado demostró que es fundamental poner atención en factores locales para comprender el comportamiento de las emisiones de GEI y así construir políticas públicas efectivas y con relevancia territorial (Bulkeley & Newell, 2015). Entre ellos, esta investigación estudió la influencia que pueden tener factores climáticos y la morfología urbana en ciudades del centro-sur de Chile (Ivan Muñiz & Rojas, 2019; Iván Muñiz et al., 2016; Opazo, 2011; Pacheco et al., 2021), y el nivel socioeconómico y características de los hogares en ciudades con altas emisiones por calefacción a leña (Urquiza et al., 2020).

Con respecto a la morfología urbana, pese a que por décadas se ha argumentado que ciudades densas permitirían reducir las emisiones GEI (Dong, 2006; Ewing & Rong, 2008; Frey, 2003; Jabareen, 2006; Mollay, 2010), los resultados de los modelos de regresión aquí presentados demostraron que las características morfológicas de la ciudad, como la distancia del hogar al centro urbano o la densidad poblacional del barrio, no logran explicar el comportamiento de la huella de carbono para calefaccionar, ni tampoco en el caso del consumo de energía para otros usos, careciendo de significancia estadística. Estos resultados refuerzan los hallazgos de Muñiz et al. (2016) y Muñiz y Rojas (2019), que estudiaron la huella de energía de las viviendas en el Área Metropolitana de Concepción, Chile, y demostraron que variables como la densidad y la distancia al centro no son variables estadísticamente significativas para explicar la huella por vivienda.

Por otro lado, los resultados demostraron que uno de los factores más importantes para explicar la huella de carbono es la temperatura promedio de la ciudad. El valor de su coeficiente fue negativo, por lo que se espera que ciudades con bajas temperaturas promedio tengan valores más altos en sus emisiones, en el mismo sentido que otras investigaciones habían comprobado al estudiar la huella de carbono de megaciudades en el mundo (Paravantis et al., 2021), en áreas metropolitanas de Estados Unidos (Brown et al., 2009) y en otras ciudades como Seúl en Corea del Sur (Park et al., 2022) y en hogares de Japón (Yosuke Shigetomi et al., 2021). En ese sentido, los resultados permiten entender que, en Chile, ciudades como Valdivia y Osorno, que en invierno tienen temperaturas promedio de 8,5°C y 8,0°C respectivamente (Rojas et al., 2022), se espera que tengan una huella de carbono para calefaccionar mayor que otras ciudades con temperaturas más altas, como Coronel, que en invierno tiene una temperatura promedio de 10,6 °C., en línea con los resultados de Rojas et al. (2022), quienes demostraron que efectivamente las ciudades de Valdivia y Osorno son aquellas con mayor huella de carbono por calefaccionar el hogar.

Al poner atención en la huella de carbono por consumo directo, esta investigación puso énfasis en las fuentes de esas emisiones, por lo que variables como la temperatura ayudan a explorar los estilos de vida y decisiones que toman las personas para adaptarse a las condiciones climáticas, por ejemplo, respecto a cómo calefaccionar el hogar ante las bajas temperaturas y cómo esto incide en las emisiones, sobre todo en contexto de crisis sociosanitaria. Este escenario también entrega algunas luces para poner atención en cómo cambiarán los estilos de vida y pautas de consumo de las personas en un contexto de crisis, con el fin de adaptarse a las nuevas condiciones.

En ese sentido, los resultados también evidenciaron cambios en el comportamiento de la huella de carbono según la variación de las condiciones climáticas. Así, por ejemplo, la temperatura influye más en la huella por calefacción en período de verano, teniendo un peso mucho menor en invierno, debido a que en esos casos la huella depende mucho más del tipo de calefacción (leña), sobre todo en período invernal de pandemia, donde el confinamiento evidenció una mayor influencia de la leña en la huella de carbono; en cambio, en verano se evidencia cómo las altas temperaturas permiten prescindir de la calefacción y disminuir las emisiones (Yosuke Shigetomi et al., 2021), arrojando una significancia estadística mayor en los modelos de regresión. En la huella de energía, por su parte, la temperatura tiene un potente efecto en las emisiones en todos los períodos, presuntamente porque las emisiones dependen más de otros factores independiente del tipo de calefacción, por lo que la baja temperatura podría incidir en el tiempo que las personas pasan dentro del hogar y, por ende, aumentan el consumo de electricidad. Debido a que la relación no es tan directa como pasa con la huella de calefacción (bajas temperaturas corresponden un mayor consumo de combustible para calefaccionar la vivienda), los coeficientes en general son más bajos.

Con respecto a los tipos de calefacción, la leña se mantiene como el combustible que más afecta en el aumento de la huella de carbono por hogar, debido a que es el más usado en las ciudades, demostrando que otras alternativas de calefacción como la energía eléctrica y a gas podrían disminuir la huella de carbono. Además, el análisis de diferentes períodos permitió demostrar que esta influencia es mucho mayor en períodos donde las políticas de confinamiento obligaron a las personas a permanecer más tiempo en sus casas y, por ende, a la necesidad de calefaccionar el hogar por una mayor cantidad de tiempo.

Sin embargo, la elección de este combustible no tiene una explicación sencilla, puesto que el consumo de leña obedece a factores asociados a la pobreza energética de los hogares, estrechamente relacionado con la exposición a climas fríos, materiales de construcción con baja eficiencia energética y precios más asequibles de este combustible (Huneus et al., 2020). Pese a estos antecedentes, los resultados demostraron que existe muy poca significancia estadística en factores como la materialidad de la vivienda y la renta de los hogares en los diferentes períodos estudiados, por lo que es necesario explorar también en otras variables socioculturales. En ese sentido, Urquiza et al. (2020) demostraron que además de las brechas de acceso a fuentes con menor impacto, existe un arraigo cultural a la cocina a leña por su multifuncionalidad; la autoevaluación positiva de las condiciones térmicas de la vivienda; la valoración positiva que existe al ser posible acceder a la leña por distintos medios, como la recolección en terreno propio o ajeno, intercambio y/o beneficios asociados a redes de amistad, parentesco o laborales (regalías); entre otras.

Para subsanar parte de este problema, se han realizado esfuerzos en políticas públicas como el programa de recambio de calefactores, justamente en pandemia; el programa de mejoramiento térmico de la vivienda, dentro del marco de los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) del Ministerio del Medio Ambiente; y el programa Recambia tu Calor, del Ministerio de Energía, que buscaba aumentar el consumo eléctrico para calefacción y así ofrecer una alternativa más competitiva a la leña. El recambio de calefactores fue incluido dentro del análisis de regresión, sin embargo, no logró ser un factor relevante estadísticamente dentro del modelo, confirmando que este tipo de medidas no parece haber conseguido el efecto esperado (Álamos et al., 2020). En línea con ello, estos autores plantean que los actores del mercado de la leña no persiguen objetivos de mitigación de las emisiones, o impactos ambientales positivos, sino que son guiados por otras motivaciones de índole social, económica y/o cultural. Además, se releva la necesidad de considerar otras variables para entender los impactos de la calefacción a leña, como el tipo de artefacto utilizado, el tipo de leña y las condiciones de eficiencia energética de la vivienda. Un avance en políticas públicas más efectivas en este ámbito debería incluir hacerse cargo de los atributos negativos económicos y socioculturales asociados al mal uso de la leña,

de manera que puedan existir incentivos para que los consumidores apoyen este tipo de políticas (Álamos et al., 2020).

Actualmente el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026 (Ministerio de Energía, 2022) busca actualizar los estándares de eficiencia energética, la renovación y reacondicionamiento térmico de las edificaciones, de manera que el 30% de las nuevas viviendas logren un ahorro promedio del 30% en la demanda de energía al 2026, respecto de año 2019. Además, busca potenciar el programa educativo en energía y sostenibilidad en conjunto con la actualización de los estándares de los artefactos utilizados. Si bien este tipo de esfuerzos ayuda a establecer mejores estándares de edificación y, por ende, un menor consumo de energía, pareciera que aún deben realizarse esfuerzos en considerar los estilos de vida y las pautas de consumo que explicarían la dependencia de calefacción a leña en estas ciudades.

Por otro lado, al comparar períodos de tiempo diferentes, los resultados permitieron explicar los cambios que sufren los factores a la hora de explicar la huella de carbono en contextos diferentes, de manera que se pueda acercarse a la realidad socioterritorial que explica, en parte, las emisiones de GEI en las ciudades. Al centrarse en las condiciones de los hogares, entre otros factores, esta investigación permitió hacerse cargo de algunos de los cuestionamientos sobre el Urbanismo Climático y la incesante búsqueda por cuantificar las emisiones en las ciudades (Long y Rice, 2019), al poner especial atención en variables socioeconómicas y culturales de los habitantes, incluyendo en la discusión temas tan complejos como la pobreza energética o la eficiencia de las viviendas, demostrando así que es posible integrar políticas de mitigación de las emisiones atendiendo a la multidimensionalidad del problema.

Por otro lado, la crisis sociosanitaria motivó el desarrollo de estudios que compararon los factores que inciden en las emisiones en diferentes períodos de tiempo, en línea con lo que previamente ya habían aconsejado estudios como el de Bailis et al. (2015), para medir cambios en los comportamientos de usuarios en casos de emisiones por combustión a leña. Así, los resultados de esta investigación, permitieron aportar a subsanar no sólo las brechas asociadas a estudios comparativos en términos temporales para medir los posibles cambios en el comportamiento de usuarios, sino que también lo hizo a una escala barrial donde normalmente otras investigaciones no habían llegado (Brown et al., 2009), manteniendo las conclusiones a nivel de grandes ciudades (Paravantis et al., 2021), donde las dinámicas pueden distar en comparación con ciudades intermedias. Esto ocurre, sobre todo, cuando los estudios miden la huella de carbono emitida por el sector transporte (Brown et al., 2009; Dantas et al., 2020; Nižetić, 2020; Park et al., 2022), que efectivamente cumple un papel protagonista en las emisiones de grandes ciudades; pero que puede variar al estudiar ciudades intermedias con dinámicas que distan mucho de las grandes urbes mundiales.

Por último, en términos metodológicos, la aplicación de regresiones múltiples combinadas con la gran variedad de factores que se analizaron, tanto cuantitativos como cualitativos, se conforma como un

desafío científico para llegar a modelos con ajuste de bondad más o menos aceptables desde el punto de vista estadístico. En esta línea, otras investigaciones (Rosas et al., 2006) ya han recalcado el cuidado del análisis que se realice a regresiones con variables cualitativas, debido a que su debida conversión en variables *dummy* cuantifican el efecto producido por la presencia de una de las alternativas, dejando el resto en valores cero y afectando el valor del intercepto (o constante). En este sentido, aún falta por mejorar en términos de significancia estadística de los modelos, lo que puede ser complementado con otras variables socioculturales para entender de mejor forma la huella de carbono en los hogares, que depende en gran parte de la elección de las personas y de sus necesidades. Debido a que el levantamiento de datos fue realizado vía remota por el contexto pandémico, futuras investigaciones podrán complementar estos resultados aplicando estrategias de levantamiento de información presencial.

9. Conclusiones

El modelo de regresión múltiple permitió identificar, en primer lugar, los factores que fueron capaces de explicar un porcentaje del comportamiento de la huella de carbono de energía para calefaccionar y otros usos en los hogares de cuatro ciudades del centro sur de Chile. En segundo lugar, se explicó la relación entre estos factores y la huella de carbono, poniendo atención en la significancia estadística, es decir, aquellos factores que mantenían una relación más estrecha con la variable dependiente y que, por lo tanto, son más relevantes en diferentes períodos de tiempo. Por último, la información de los coeficientes de los respectivos modelos permitió comprender la magnitud con la cual se modifica la huella de carbono dependiendo de cada una de las variables predictoras.

Los modelos de regresión, a nivel general, rechazaron la hipótesis nula, por lo que las variables efectivamente se comportan en relación lineal con la variable dependiente, tanto para la huella de carbono por calefaccionar, como también para la huella de carbono por energía para otros usos. Se comprueba en parte lo esperado al explicar la huella de carbono para calefaccionar, ya que los factores que mejor pudieron explicar su comportamiento fue la temperatura, el tamaño de la vivienda y la calefacción a leña; sin embargo, la renta no es una variable significativa en ninguno de los modelos, debido a que el uso de la calefacción a leña no sólo da cuenta de un fenómeno de pobreza energética, sino también de arraigo cultural hacia este material, independiente de la situación socioeconómica del hogar. Pese a ello, es necesario comprobar esta explicación a través de estudios que se enfoquen en entender de mejor manera la composición socioeconómica de los hogares en ciudades intermedias mediante, por ejemplo, el levantamiento de información sobre la proporción de la renta que es utilizada sólo para calefaccionar.

Los resultados comprobaron la hipótesis sobre la huella de energía para otros usos, puesto que la calefacción dejó de ser una variable explicativa, a diferencia de la temperatura y la cantidad de personas que habitan cada hogar, que pasaron a tener una mayor relevancia estadística. Adicionalmente, se comprueba la hipótesis sobre la influencia del contexto sociosanitario, en la medida en que potenció la relevancia de algunos factores como la calefacción a leña en invierno del 2020 en comparación con el mismo período del año 2019; misma situación con el consumo de energía en período de pandemia, donde fue posible ver coeficientes más altos en variables como el número de personas y tamaño de la vivienda. Ambas situaciones fueron producidas, presuntamente, por el efecto de las políticas de confinamiento que obligó a las personas a permanecer más tiempo en sus hogares.

Entre los hallazgos, se demostró que la morfología de la ciudad no tiene la relevancia esperada en las emisiones GEI de estas ciudades. En comparación, es más importante poner atención en los patrones de consumo y eficiencia energética. Debido a que el alto consumo de calefacción a leña se explica por razones multifactoriales, es necesario que los esfuerzos públicos se concentren en crear incentivos para que el mercado de la leña sea más sustentable, de manera que tanto los productores como los consumidores apoyen este tipo de iniciativas, por ejemplo, incentivando la compra y venta de leña seca y en condiciones que permitan mitigar las altas emisiones que conlleva este tipo de calefacción en los hogares.

En resumen, el problema debería subsanarse desde dos frentes principales: eficiencia energética de las viviendas que permitan un menor consumo de calefacción y energía durante el tiempo que se permanece en ellas; y entender que existe una dependencia a la calefacción a leña y que ésta obedece a factores multidimensionales, por lo que es necesario aportar en esfuerzos para lograr que el consumo de leña sea más sustentable.

Por último, pese a que los resultados en general presentaron coeficientes y signos esperados, los modelos pudieron explicar sólo del 6% al 22% del comportamiento de la variable dependiente, por lo que aún es necesario continuar con estudios que puedan construir modelos con una validez estadística mayor. La significancia estadística puede mejorar aportando con más datos que expliquen los patrones de consumo de energía en los hogares; así como también agregando más variables asociadas al entorno urbano, por ejemplo, mediante modelos climáticos que muestren datos a una escala barrial.

En esa línea, pese a que esta investigación permitió comprender los escenarios y los factores más importantes que explicarían la huella de carbono en diferentes períodos de tiempo, aún es necesario profundizar en las causas que expliquen esta relación. Futuras investigaciones deberán complementar las conclusiones aquí expuestas, ya sea con datos capturados de forma presencial que permitan hacer un seguimiento de la huella de carbono en los hogares de diferentes ciudades; así como también con datos que tengan una mejor representatividad espacial que posibiliten, por ejemplo, analizar y comparar

información a escala de manzanas o que permitan comparar modelos diferenciados por ciudad de diferentes latitudes. Esto es especialmente relevante en ciudades intermedias, donde es necesario aumentar la representatividad de datos espaciales debido a que la escala barrial puede aportar con datos insuficientes para construir modelos de regresión espaciales estadísticamente significativos.

Modelos con una mayor significancia estadística y con datos representativos a escala espacial y temporal, podrán ser de utilidad para evaluar la incidencia de las políticas públicas que aporten en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ciudades y construir mejores estrategias de adaptación al cambio climático.

10. Bibliografía

- Álamos, N., Amigo, C., Calvo, R., Chahuán, J., Correa, V., Cortés, J., Labraña, J., & Urquiza, A. (2020). Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (No. 7). Red de Pobreza Energética.
- Alberti, M., & Susskind, L. (1996). Managing urban sustainability: An introduction to the special issue. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4–6), 213–221. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(96\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(96)00070-4)
- Andreoni, V. (2021). Estimating the European CO2 emissions change due to COVID-19 restrictions. *The Science of the Total Environment*, 769, 145115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145115>
- Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266–272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>
- Bao, R., & Zhang, A. (2020). Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. *The Science of the Total Environment*, 731, 139052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139052>
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020). La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe ¿Seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción? (p. 383). Naciones Unidas CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/45677/S1900711_es.pdf
- Barton, J. R. (2009). Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43, 5–30.
- Bazzo Vieira, J. P., Vieira Braga, C. K., & Pereira, R. H. M. (2022). The impact of COVID-19 on air passenger demand and CO2 emissions in Brazil. *Energy Policy*, 164, 112906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112906>
- Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(17), 7301–7306. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610172104>
- Boardman, B. (1991). Fuel poverty: from cold homes to affordable warmth. Belhaven Press.
- Brown, M. A., Southworth, F., & Sarzynski, A. (2009). The geography of metropolitan carbon footprints*. *Policy and Society*, 27(4), 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.polsoc.2009.01.001>
- Bulkeley, H., & Newell, P. (2015). *Governing Climate Change*. Routledge.
- Clifford, N., French, S., & Valentine, G. (2010). *Key Methods in Geography*. SAGE Publications.
- Dantas, G., Siciliano, B., França, B. B., da Silva, C. M., & Arbilla, G. (2020). The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. *The Science of the Total Environment*, 729, 139085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139085>
- Dong, F. (2006). Impact of Urban Sprawl on US Residential Energy Use. Ph.D. Dissertation, School of Public Policy, University of Maryland.
- Dubois, G., Sovacool, B., Aall, C., Nilsson, M., Barbier, C., Herrmann, A., Bruyère, S., Andersson, C., Skold, B., Nadaud, F., Dorner, F., Moberg, K. R., Ceron, J. P., Fischer, H., Amelung, D.,

- Baltruszewicz, M., Fischer, J., Benevise, F., Louis, V. R., & Sauerborn, R. (2019). It starts at home? Climate policies targeting household consumption and behavioral decisions are key to low-carbon futures. *Energy Research & Social Science*, 52, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.02.001>
- Ehrlich, P. (1972). The population bomb. Pan/Ballantine.
- Encinas, F., Aguirre Núñez, C. A., Truffello, R., Puig, I., & Hidalgo, R. (2019). Pobreza energética y segregación espacial: nuevas dimensiones urbanas para la desigualdad. *International Conference Virtual City and Territory*, 0(13). <https://doi.org/10.5821/ctv.8703>
- Encinas, F., Truffello, R., Urquiza, A., & Valdés, M. (2020, May 15). COVID-19, pobreza energética y contaminación: redefiniendo la vulnerabilidad en el centro-sur de Chile. *CIPER Académico*; unknown. <https://www.ciperchile.cl/2020/05/15/covid-19-pobreza-energetica-y-contaminacion-redefiniendo-la-vulnerabilidad-en-el-centro-sur-de-chile/>
- Ewing, R., & Rong, F. (2008). The impact of urban form on US residential energy use. *Housing Policy Debate*, 19(1), 1–30.
- Forster, P., Forster, H., Evans, M., Gidden, M., Jones, C., Keller, C., Lamboll, R., Le Quéré, C., Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C.-F., Richardson, T., Smith, C., & Turnock, S. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nat. Clim. Chang.*, 10, 913–919.
- Frey, H. (2003). *Designing the City* (Towards a more sustainable urban form).
- Frohmann, A., & Olmos, X. (2013). Huella de Carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al Cambio Climático. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*.
- Gallardo, E. (2020). Contaminación atmosférica en Coyhaique: Factores condicionantes, características y comportamiento histórico-espacial del MP10 y MP2.5 (P. Smith, Ed.) [Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/175844/Contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Coyhaique.pdf?sequence=1>
- García Ochoa, R. (2014). Pobreza energética en América Latina. CEPAL.
- Gilbert. (1992). The future of cities. *OECD Conference on Economic Social and Environmental Problems of Cities*, 18–20.
- Gomez, D. R., Watterson, J. D., & Americano, B. B. (2006). Stationary combustion. Chapter 2. In H. S. Eggleston, L. Buendia, & K. Miwa (Eds.), *Energy of 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, prepared by the national greenhouse gas inventories program. (Vol. 2, p. 22). Hayama.
- Grassi, Y., Brignole, N., & Díaz, M. (2022). Pandemic impact on air pollution and mobility in a Latin American medium-size city. *The International Journal of Environmental Studies*, 79(4), 624–650.
- Han, P., Cai, Q., Oda, T., Zeng, N., Shan, Y., Lin, X., & Liu, D. (2021). Assessing the recent impact of COVID-19 on carbon emissions from China using domestic economic data. *The Science of the Total Environment*, 750, 141688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141688>
- Hassan, A., & Lee, H. (2015). The paradox of the sustainable city: definitions and examples. *Environmental Development Sustainability*, 17, 1267–1285.

- Hertwich, E. (2005). Life cycle approaches to sustainable consumption: a critical review. *Environmental Science & Technology*, 39, 4.673-4.684.
- Howarth, C., Bryant, P., Corner, A., Fankhauser, S., Gouldson, A., Whitmarsh, L., & Willis, R. (2020). Building a Social Mandate for Climate Action: Lessons from COVID-19. *Environmental & Resource Economics*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00446-9>
- Huneus, N., Urquiza, A., Gayó, E., Osses, M., Arriagada, R., Valdés, M., Álamos, N., Amigo, C., Arrieta, D., Basoa, K., Billi, M., Blanco, G., Boisier, J., Calvo, R., Casielles, I., Castro, M., Chahuán, J., Christie, D., Cordero, L., ... Tolvet, S. (2020). El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.
- Huppes, G. (2006). Environmental impacts of consumption in the European Union. *Journal of Industrial Ecology*, 10, 129–146.
- International Energy Agency. (2020). Global Energy Review 2020. The impacts of the COVID-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions. IEA.
- IQ Air. (2021). Ciudades con mayor contaminación del mundo (datos históricos entre 2017 y 2021). Página Web de Calidad Del Aire Mundial. <https://www.iqair.com/es/world-most-polluted-cities?continent=59af929e3e70001c1bd78e50&country=&state=&sort=-rank&page=1&perPage=50&cities=>
- Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable urban forms. Their typologies, models and concepts. *J. Plann. Educ. Res*, 26, 38–52.
- Kennedy, C. A., Stewart, I., Facchini, A., Cersosimo, I., Mele, R., Chen, B., Uda, M., Kansal, A., Chiu, A., & Kim, K. (2015). Energy and material flows of megacities. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 112, 5985–5990.
- Le Quéré, C., Jackson, R., Jones, M., Smith, A., Abernethy, S., Andrew, R., De-Gol, A., Willis, D., Shan, Y., Canadell, J., Friedlingstein, P., Creutzig, F., & Peters, G. (2020). Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10, 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Lezama, J. L., & Domínguez, J. (2006). Medio ambiente y sustentabilidad urbana. *Papeles de Población*, 12(49), 153–176. <http://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v12n49/v12n49a7.pdf>
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., ... Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, 11(1), 5172. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
- Long, J., & Rice, J. L. (2019). From sustainable urbanism to climate urbanism. *Urban Studies*, 56(5), 992–1008. <https://doi.org/10.1177/0042098018770846>
- Lowe, D. M. (1992). Shaping Cities: The environmental and human dimension. *WorldWatch Paper* 105.
- Lucchese, M., & Pianta, M. (2020). The Coming Coronavirus Crisis: What Can We Learn? *Inter Economics*, 55(2), 98–104. <https://doi.org/10.1007/s10272-020-0878-0>

- Mahato, S., Pal, S., & Ghosh, K. G. (2020). Effect of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India. *The Science of the Total Environment*, 730, 139086. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139086>
- Martínez, D. R., Albín, J. L., Cabaleiro, J. C., & Blanco, V. (2009). El criterio de información de Akaike en la obtención de modelos estadísticos de Rendimiento. *XX Jornadas de Paralelismo*, 439–444. <http://dx.doi.org/>
- Martinez-Soto, A., Avendaño Vera, C. C., Boso, A., Hofflinger, A., & Shupler, M. (2021). Energy poverty influences urban outdoor air pollution levels during COVID-19 lockdown in south-central Chile. *Energy Policy*, 158, 112571. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112571>
- Meadows, D., Meadows, D., & Randers, J. (1972). *The Limits of Growth*. Pan.
- Ministerio de Energía. (2022). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_nacional_de_eficiencia_energetica_2022-2026.pdf
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades 2018 - 2022 (pp. 1–87). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29451164>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile. Gobierno de Chile. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf
- Mollay, U. (2010). Energy aware spatial planning: impact potential of settlement structures and opportunities for assessment tools to support sustainable municipal development. Doctoral dissertation.
- Montejano, J. (2017). El principio de densificación como argumento central de la sustentabilidad urbana: Una revisión crítica. *Densidad, Diversidad y Policentrismo*, 57–83.
- Morales-Solís, K., Ahumada, H., Rojas, J. P., Urdanivia, F. R., Catalán, F., Claramunt, T., Toro, R. A., Manzano, C. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2021). The effect of COVID-19 lockdowns on the air pollution of urban areas of central and southern Chile. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(8), 200677. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200677>
- Moreno, R., Sánchez, M., Suazo, C., Negrete, M., Olivares, D., Alvarado, D., Sepúlveda, C., Otárola, H., & Basso, L. (2020). Impactos del COVID-19 en el consumo eléctrico chileno. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 34, 119–146.
- Morero, B., Duran, R., Calvo, R., & Urquiza, A. (2021). Debates latinoamericanos en torno a la pobreza energética. In A. Urquiza, B. Morero, E. Costa, J. Chemes, I. Sánchez Lizama, I. Yanez, J. P. Soler, M. Proaño, P. Bertinat, M. Svampa, R. Duran, & T. Roa Avendaño (Eds.), *Energías ¿Para quiénes?* (pp. 8–23). Heinrich Böll Stiftung Cono Sur.
- Mousalli-Kayat, G. (2015). *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa*. Mérida.
- Muhammad, S., Long, X., & Salman, M. (2020). COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise? *The Science of the Total Environment*, 728, 138820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820>
- Muñiz, Ivan, & Rojas, C. (2019). Urban form and spatial structure as determinants of per capita greenhouse gas emissions considering possible endogeneity and compensation behaviors.

- Muñiz, Iván, Rojas, C., Busuldu, C., García, A., Filipe, M., & Quintana, M. (2016). Forma urbana y huella ecológica en el Área Metropolitana de Concepción (Chile). *EURE. Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, 42(127), 209–230. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612016000300009>
- Newman, P., & Kenworthy, J. (1989). *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook* Aldershot. Gower.
- Nižetić, S. (2020). Impact of coronavirus (COVID -19) pandemic on air transport mobility, energy, and environment: A case study. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10953–10961. <https://doi.org/10.1002/er.5706>
- NOAA. (2016). Trends in atmospheric carbon dioxide. Washington, D.C. [En Línea]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#global>
- Opazo, D. (2011). Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos en Santiago para el año 2009 (H. Romero, Ed.) [Memoria para optar al título de Geógrafo]. Universidad de Chile.
- Osses, M., Alamos, N., Basoa, K., Boisier, J. P., Calvo, R., Huneus, N., Gómez, L., O’Ryan, R., & Tolvett, S. (2020). Causas de la contaminación atmosférica. In N. Huneus, A. Urquiza, E. Gayó, M. Osses, R. Arriagada, M. Valdés, N. Álamos, C. Amigo, D. Arrieta, K. Basoa, M. Billi, G. Blanco, J. P. Boisier, R. Calvo, I. Casielles, M. Castro, J. Chahuán, D. Christie, L. Cordero, ... S. Tolvett (Eds.), *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro Contaminación atmosférica por MP 2,5 en el centro y sur de Chile*. (pp. 18–28). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDA P/15110009).
- Owens, S. (1986). *Energy, Planning and Urban Form*. Pion.
- Pacheco, P., Salini, G., & Mera, E. (2021). Entropía y Neguentropía: una aproximación al proceso de difusión de contaminantes y su sostenibilidad. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 37, 167–185.
- Paravantis, J. A., Tasios, P. D., Dourmas, V., Andreacos, G., Velaoras, K., Kontoulis, N., & Mihalakakou, P. (2021). A regression analysis of the carbon footprint of megacities. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su13031379>
- Park, C., Jeong, S., Park, M.-S., Park, H., Yun, J., Lee, S.-S., & Park, S.-H. (2022). Spatiotemporal variations in urban CO2 flux with land-use types in Seoul. *Carbon Balance and Management*, 17(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00206-w>
- Red de Pobreza Energética y Generadoras de Chile. (2022). Una mirada multidimensional a la pobreza energética en Chile (Reporte N°1).
- Rees, W. E., & Wackernagel, M. (2008). Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot be Sustainable—and Why They are a Key to Sustainability. In *Urban Ecology* (Vol. 16, pp. 537–555). Elsevier. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_35
- Riquelme, C. (2020). Caracterización espacial de la pobreza energética en Chile (M. Paneque, Ed.) [Memoria para optar al Título profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.

- Rodríguez, M. J., & Mora, R. (2001). Análisis de regresión múltiple. In M. J. Rodríguez & R. Mora (Eds.), *Estadística informática: casos y ejemplos con el SPSS* (pp. 109–123). Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Rojas, C., Podvin, K., & Barbossa, O. (2019). Desafíos Y Oportunidades Para Un Desarrollo Urbano Sustentable, Equitativo Y Resiliente. 1–8.
- Rojas, C., Simon, F., Irrázaval, F., Quintana, M., Stamm, C., & Castillo, B. (2021). Resultados encuestas Huellacovid: emisiones de CO2 en pandemia en hogares de ciudades del centro sur de Chile. Documento de Trabajo IEUT, 17, 1–27.
- Rojas, C., Simon, F., Muñiz, I., Quintana, M., Irrazaval, F., Stamm, C., & Santos, B. (2022). Trends in household energy-related GHG emissions during COVID-19 in four Chilean cities. *Carbon Management*, 13(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2036243>
- Rojas, C., Stamm, C., Irrázaval, F., Salazar, G., & Bergamini, K. (2020). Impactos del COVID en la huella de carbono de hogares de Chile. Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales. <https://estudiosurbanos.uc.cl/investigacion/impactos-del-covid-en-la-huella-de-carbono-de-hogares-de-chile/>
- Rojas, M., Aldunce, P., Farías, L., González, H., Marquet, P., Muñoz, J. C., Palma-Behnke, R., Stehr, A., & Vicuña, S. (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones. Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Rojo, J. (2007). Regresión Lineal Múltiple. Obtenido de Instituto de Economía y Geografía Madrid. http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Romero, H. (2021). Islas, ondas de calor y concentración de contaminación atmosférica como indicadores de segregación. In A. Pardo & M. Reyes (Eds.), *Acercamientos multidisciplinarios a experiencias de segregación, migración y marginación en contextos latinoamericanos* (pp. 199–230). Universidad de Guanajuato.
- Romero, H., Irrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE*, 36(109), 35–62.
- Rosas, M., Chacín, F., García, J., Ascanio, M., & Cobo, M. (2006). Modelos de regresión lineal múltiple en presencia de variables cuantitativas y cualitativas para predecir el rendimiento estudiantil. *Revista Facultad de Agronomía*, 23(2), 197–214.
- Salazar, G. (2018). The Incongruities of Sustainability: An Examination of the UN Earth Summit Declarations 1972-2012. In P. Spinozzi & M. Mazzanti (Eds.), *Routing Sustainable Development Towards a Culture of Wellbeing* (pp. 46–62). Routledge.
- Samaniego, J., Alatorre, J. E., Van der Borcht, R., & Ferrer, J. (2022). Panorama de las actualizaciones de las contribuciones determinadas a nivel nacional de cara a la COP 26. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47733/1/S2100765_es.pdf
- Samaniego, J., Montero, L., & Ruiz-Tagle, M. T. (2015). Sendas de desarrollo bajas en carbono en ciudades metropolitanas de América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39843/1/S1501073_es.pdf
- Sánchez, R. (2002). Sustentabilidad urbana, descentralización y gestión local. *Revista Confluencias*, 20–31.

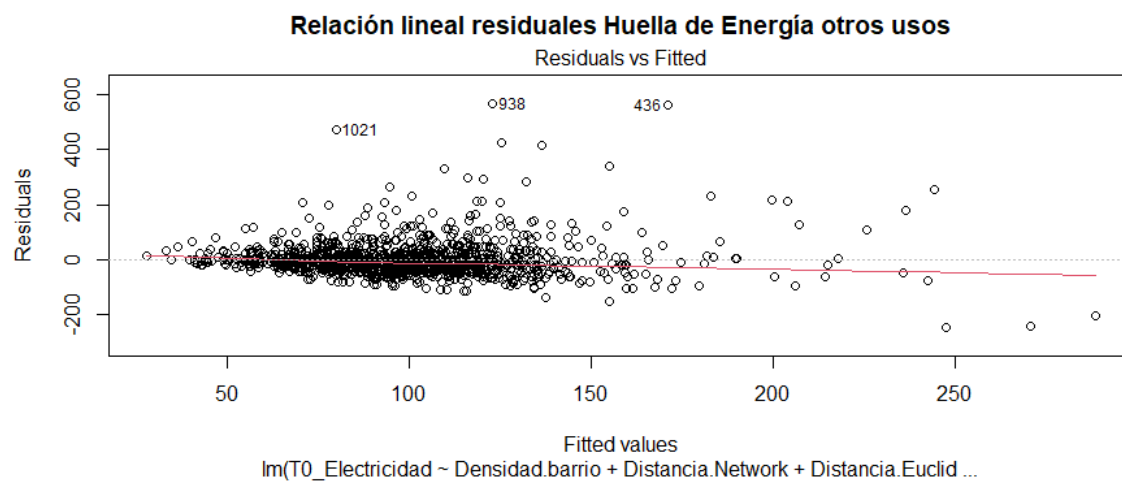
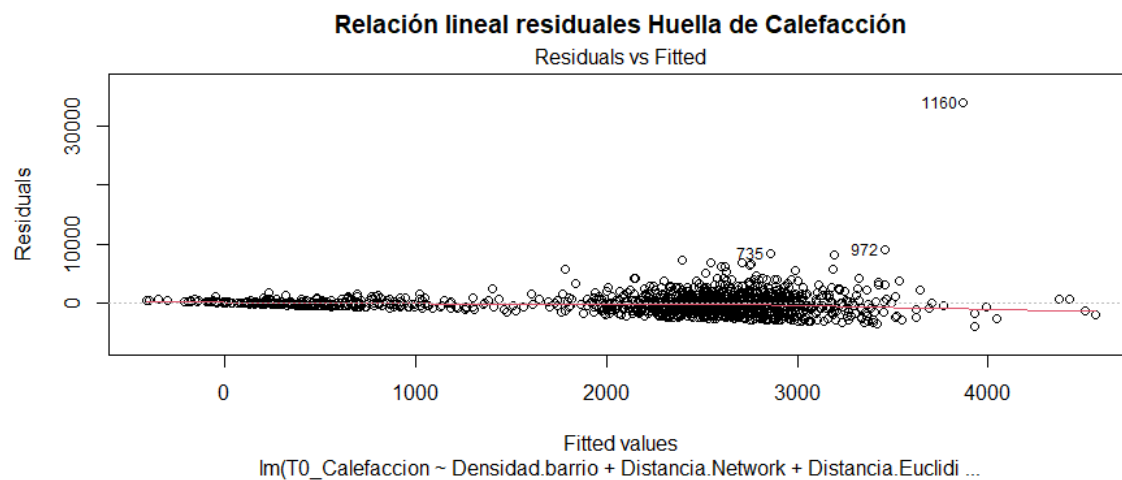
- Seto, K. C., Golden, J. S., Alberti, M., & Turner, B. L. (2017). Sustainability in an urbanizing planet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(34), 8935–8938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606037114>
- Shigetomi, Y., Shironitta, K., & Kagawa, S. (2017). Revisiting Japanese carbon footprint studies. In L. M. O. Dejuán, M. Lenzen, & M. Cadarso (Eds.), *Environmental and Economic Impacts of Decarbonization: Input–Output Studies on the Consequences of the 2015 Paris Agreements* (pp. 335–350). Routledge.
- Shigetomi, Yosuke, Kanemoto, K., Yamamoto, Y., & Kondo, Y. (2021). Quantifying the carbon footprint reduction potential of lifestyle choices in Japan. *Environmental Research Letters* (in Press), 1–25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfc07>
- Shueftan, A., Sommerhoff, J., & González, A. (2016). Demanda de leña y políticas de energía en el centro-sur de Chile. *Boletín BES, Bosques - Energía - Sociedad*, 2(5).
- Siclari Bravo, P. G. (2021). Amenazas de cambio climático, métricas de mitigación y adaptación en ciudades de América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46575/4/S2000867_es.pdf
- Soto-Cortés, J. J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma Económico*, 7(1), 127–149.
- Tans, P., & Keeling, R. (2014). Trends in atmospheric carbon dioxide. *Administración Nacional Oceánica y Atmosférica* [En Línea]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>
- Toledo, I. (2020). Evaluación de la acción del Estado por la salud y justicia ambiental en Coronel (Chile) (F. De la Barrera, Ed.) [Tesis para optar al Título Profesional de Geógrafo]. Universidad de Concepción.
- Toro, D. (2020, July). ¿Es Temuco la ciudad más contaminada del mundo? Expertos y autoridades analizan polémico artículo de medio especializado (Emol). Página Web de CR2. <https://www.cr2.cl/es-temuco-la-ciudad-mas-contaminada-del-mundo-expertos-y-autoridades-analizan-polemico-articulo-de-medio-especializado-emol/>
- Tukker, A., Cohen, M., Hubacek, K., & Mont, O. (2010). The impacts of household consumption and options for change. *Journal of Industrial Ecology*, 14, 13–30.
- Tukker, A., & Jansen, B. (2006). Environmental impacts of products: a detailed review of studies. *Journal of Industrial Ecology*, 10, 159–182.
- Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Blanco, G., Chahuán, J., Gajardo, N., Iriarte, P., Plass, M., Salinas, S., & Santander, S. (2020). Condiciones socioculturales en la transición energética. In N. Huneus, A. Urquiza, E. Gayó, M. Osses, R. Arriagada, M. Valdés, N. Álamos, C. Amigo, D. Arrieta, K. Basoa, M. Billi, G. Blanco, J. P. Boisier, R. Calvo, I. Casielles, M. Castro, J. Chahuán, D. Christie, L. Cordero, ... S. Tolvet (Eds.), *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro Contaminación atmosférica por MP 2,5 en el centro y sur de Chile*. (pp. 29–33). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDA P/15110009).
- Vanham, D., Leip, A., Galli, A., Kastner, T., Bruckner, M., Uwizye, A., van Dijk, K., Ercin, E., Dalin, C., Brandão, M., Bastianoni, S., Fang, K., Leach, A., Chapagain, A., Van der Velde, M., Sala, S., Pant, R., Mancini, L., Monforti-Ferrario, F., ... Hoekstra, A. Y. (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. The

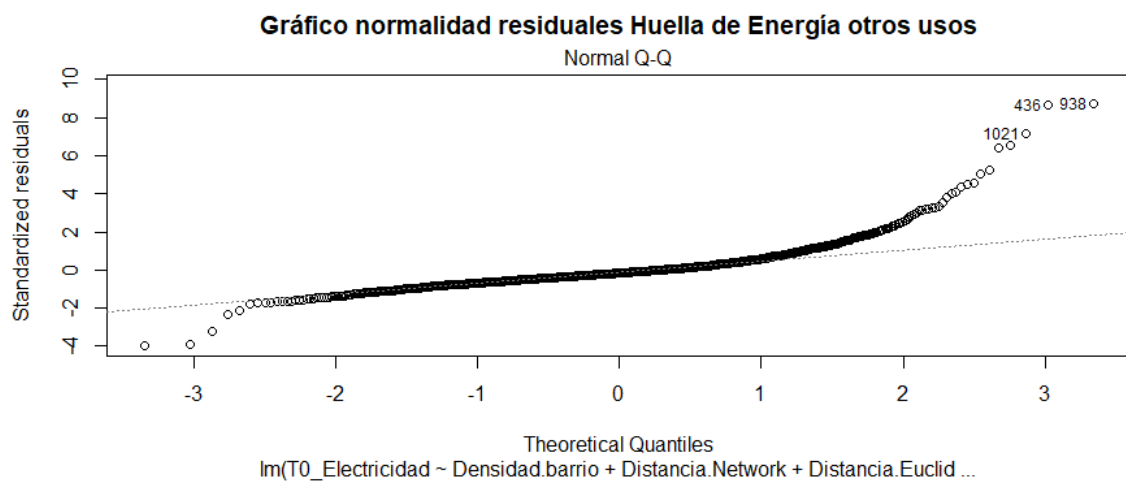
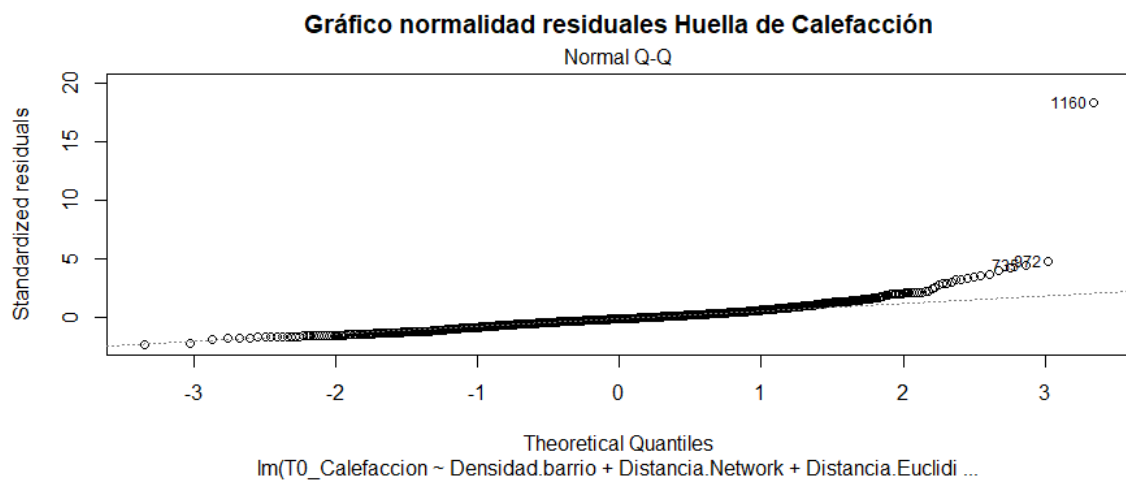
- Science of the Total Environment, 693, 133642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>
- Wang, Q., & Li, S. (2021). Nonlinear impact of COVID-19 on pollutions - Evidence from Wuhan, New York, Milan, Madrid, Bandra, London, Tokyo and Mexico City. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102629. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102629>
- Wang, Q., Li, S., Li, R., & Jiang, F. (2022). Underestimated impact of the COVID-19 on carbon emission reduction in developing countries - A novel assessment based on scenario analysis. *Environmental Research*, 204(Pt A), 111990. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111990>
- Wang, Q., & Su, M. (2020). A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment - A case study of China. *The Science of the Total Environment*, 728, 138915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138915>
- Wang, Q., & Zhang, F. (2021). What does the China's economic recovery after COVID-19 pandemic mean for the economic growth and energy consumption of other countries? *Journal of Cleaner Production*, 295, 126265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126265>
- Wheeler, S. M., & Beatley, T. (Eds.). (2007). *Sustainable Urban Development Reader*. Routledge.
- Williams, K. (2010). Sustainable cities: Research and practice challenges. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 1(1–2), 128–132.
- Wu, L., Huang, K., Ridoutt, B. G., Yu, Y., & Chen, Y. (2021). A planetary boundary-based environmental footprint family: From impacts to boundaries. *The Science of the Total Environment*, 785, 147383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147383>

11.1. Condicionantes de los modelos

Heatmap showing the correlation matrix for 30 variables. The color scale ranges from -1 (dark red) to 1 (dark blue), with 0 being white. The diagonal is dark blue (1.0). The matrix is symmetric. The variables are: Described, Isento, Distancia al centro, Paredes, Renta, persona, Renta, C1, Renta, C2, Renta, C3, Renta, C4, Renta, C5, Temperatura, promedio, Mix, Cuadrados, Vivienda, N, personas, Ingep, Act, Actividad, S, Act, Calificación, SI, Abandonó, Muebles, Motos, NoBelt, Carbon, Gas, Electrico, Gas, Cero, Electrico, Cero, Gas, Cero, Gas, Cero, Leno, Leno, Carbon, Leno, Electrico, Leno, Electrico, Gas, Leno, Electrico, Cero, Leno, Gas, Leno, Cero, Leno, Paredes, Leno, Paredes, Electrico, Gas, Leno, Paredes, Electrico, Gas, Leno, Paredes, Gas, Cero, Leno, Paredes, Cero, Paredes, Carbon, Paredes, Electrico, Gas, Paredes, Electrico, Cero, Paredes, Gas, Paredes, Cero, Paredes.

Fuente: Elaboración propia





Anexo 2. Modelos propuestos por huella y período de estudio

Variable dependiente	Período	Ecuación del Modelo propuesto
Huella de carbono: energía para calefacción	Invierno del 2019 (T0)	α + distancia euclidiana – temperatura + tamaño vivienda + personas en el hogar – aislación térmica + albañilería + madera – cal. eléctrica – eléctrica y gas – eléctrica y otros – gas – gas y otros + leña + leña y parafina – otros – parafina – parafina y eléctrica – parafina, eléctrica y otros
	Invierno del 2020 (T1*)	α – densidad + distancia en red – distancia euclidiana + renta (C1) + renta (C2) + tamaño vivienda + personas el hogar + madera + cal. leña + leña y eléctrica + leña, eléctrica y gas + leña, eléctrica y otros + leña y gas + leña y parafina + leña, parafina y eléctrica + leña, parafina, eléctrica y gas + leña, parafina y gas + leña y petróleo + parafina y eléctrica + petróleo
	Verano del 2021 (T2)	α – renta – temperatura + personas en el hogar + aislación térmica + cal. leña + leña y eléctrica + leña y gas + leña y parafina + leña, parafina y gas + leña y petróleo
Huella de carbono: energía para otros usos	Invierno del 2019 (T0)	α + renta (C3) + renta (E) – temperatura + tamaño vivienda + personas en el hogar + recambio de calefactores + madera + cal. leña y otros + petróleo + eléctrica + parafina y eléctrica + carbón y gas
	Invierno del 2020 (T1*)	α + distancia en red – distancia euclidiana + renta – renta (C1) – renta (C2) – temperatura + tamaño vivienda + personas en el hogar + cal. eléctrica + eléctrica y gas + leña y carbón + leña, eléctrica y otros + leña y gas - leña y parafina + leña, parafina y eléctrica + parafina y eléctrica + petróleo
	Verano del 2021 (T2)	α + distancia en red – distancia euclidiana – temperatura + tamaño vivienda + personas en el hogar + aislación térmica + leña y carbón + leña, eléctrica y otros + leña y otros + leña y gas + leña, parafina y eléctrica

Fuente: Elaboración propia

11.2. Plan de investigación

Dados los antecedentes metodológicos planteados para alcanzar los objetivos de esta investigación, a continuación, la siguiente figura incluye la carta Gantt, que detalla las actividades a seguir y los tiempos establecidos para cada una de ellas, con el fin de dar respuesta al objetivo general de este estudio.

Anexo 3. Carta Gantt de actividades

		Cronograma de actividades															
		Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Fase	Tarea																
Sistematización de datos	Identificación de variables																
	Categorización de variables																
	Conversión de variables cualitativas																
Elaboración de resultados	Aplicación de modelo de regresión																
	Comprobación de resultados																
	Reajuste del modelo de regresión																
	Resultado 1: Relaciones de vivienda																
	Resultado 2: Relaciones de entorno																
Discusión de resultados	Resultado 3: Análisis comparativo																
	Análisis del informe de resultados																
Conclusiones	Discusión con antecedentes teóricos																
	Resumen de principales hallazgos																
	Corroboración de hipótesis																
Generalidades	Identificación de aportes a investigación y políticas																
	Revisión y reajuste por retroalimentaciones																
	Preparación presentación de memoria																

Fuente: Elaboración propia

11.3. Modelos de regresión por ciudad

Anexo 4. Modelos de regresión por ciudad, huella de carbono por energía para calefaccionar

Huella calefacción, invierno 2019

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	-1.653,96 (-1,12)	-522,00 (-0,40)	156,21 (0,20)	472,46 (0,46)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	** 7,19 (2,87)	1,99 (0,75)	* 5,46 (2,35)	* 4,09 (2,13)
Nº personas	15,30 (0,25)	43,71 (0,36)	22,02 (0,27)	137,02 (1,90)
Mat. Albañilería	1.529,75 (1,04)	2.441,96 (1,80)	-1.088,32 (-0,95)	-517,48 (-0,47)
Mat. Hormigón	2.022,95 (1,41)	575,74 (0,45)	-633,19 (-0,82)	-497,99 (-0,49)
Mat. Madera	1.501,76 (1,04)	942,64 (0,76)	-175,58 (-0,24)	-387,30 (-0,40)
Mat. Mixto	1.798,98 (1,26)	543,59 (0,44)	-446,79 (-0,62)	-664,92 (-0,69)
Leña	*** 1.703,33 (6,74)	*** 2.052,88 (4,52)	*** 2.235,23 (6,06)	*** 2.116,67 (6,65)
Gas	-285,44 (-1,26)	294,28 (0,62)	-318,35 (-1,07)	39,47 (0,12)
Eléctrica	* -508,09 (-2,45)	-195,07 (-0,45)	202,45 (0,64)	-380,96 (-1,48)
Parafina	283,46 (0,98)	301,46 (0,74)	438,58 (1,44)	262,30 (1,04)
Carbón	-1.232,42 (-1,49)	NA	NA	203,37 (0,12)
Petróleo	NA	1.135,14 (0,56)	** 3.215,63 (3,31)	380,25 (0,47)
Otro	-591,00 (-0,40)	91,09 (0,15)	479,72 (0,86)	-73,09 (-0,17)
R cuadrado múltiple	0,28	0,15	0,21	0,27
R cuadrado ajustado	0,25	0,11	0,18	0,24

Huella calefacción, invierno 2020

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	-1.215,47 (-0,99)	-1.333,41 (-1,15)	-316,28 (-0,32)	-1.494,99 (-0,93)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	4,88 (1,36)	*** 10,09 (4,05)	*** 7,95 (3,43)	*** 14,73 (3,62)
Nº personas	67,84 (0,76)	63,02 (0,79)	164,26 (1,89)	174,47 (1,16)
Mat. Albañilería	1.096,87 (0,89)	442,59 (0,36)	-264,25 (-0,25)	-480,04 (-0,24)
Mat. Hormigón	530,09 (0,44)	540,93 (0,49)	-481,94 (-0,52)	667,50 (0,41)
Mat. Madera	930,33 (0,77)	369,90 (0,33)	-197,74 (-0,23)	924,36 (0,61)
Mat. Mixto	1.031,46 (0,89)	474,66 (0,44)	-333,84 (-0,39)	536,71 (0,35)
Leña	*** 2.514,42 (6,57)	*** 2.426,68 (8,36)	*** 2.386,53 (6,18)	*** 2.543,33 (4,45)
Gas	-76,39 (-0,22)	48,02 (0,16)	189,29 (0,65)	-109,22 (-0,19)
Eléctrica	79,33 (0,28)	364,11 (1,44)	* 616,54 (2,06)	4,41 (0,01)
Parafina	421,11 (1,06)	454,62 (1,61)	350,95 (1,21)	130,87 (0,28)
Carbón	-2.077,88 (-1,46)	NA	NA	142,35 (0,04)
Petróleo	NA	884,15 (0,43)	*** 3.855,64 (3,85)	3.283,80 (1,38)
Otro	387,21 (0,39)	* 1.276,57 (2,54)	330,78 (0,50)	-850,56 (-0,60)
R cuadrado múltiple	0,21	0,29	0,22	0,15
R cuadrado ajustado	0,18	0,26	0,19	0,11

Huella calefacción, verano 2021

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	-113,29 (-0,20)	-206,04 (0,37)	-703,23 (-1,05)	-127,96 (-0,25)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	** 4,54 (2,81)	0,26 (0,22)	-0,63 (-0,39)	-1,72 (-1,34)
N° personas	7,45 (0,18)	17,00 (0,45)	12,21 (0,20)	. 87,00 (1,83)
Mat. Albañilería	58,59 (0,10)	226,79 (0,39)	599,74 (0,84)	-208,01 (-0,32)
Mat. Hormigón	-298,76 (-0,55)	371,34 (0,71)	336,17 (0,53)	199,37 (0,39)
Mat. Madera	-84,98 (-0,15)	192,03 (0,37)	647,41 (1,11)	202,63 (0,42)
Mat. Mixto	-196,89 (-0,37)	293,55 (0,57)	469,01 (0,80)	233,41 (0,49)
Leña	235,26 (1,36)	. 246,62 (1,79)	* 682,58 (2,56)	256,27 (1,42)
Gas	21,25 (0,13)	-36,18 (-0,26)	140,16 (0,69)	-58,13 (-0,33)
Eléctrica	38,46 (0,30)	-4,61 (-0,03)	223,03 (1,08)	-120,44 (-0,84)
Parafina	-160,58 (-0,90)	-164,77 (-1,33)	43,20 (0,21)	36,39 (0,24)
Carbón	678,11 (1,06)	NA	NA	-564,49 (-0,54)
Petróleo	NA	-201,79 (-0,20)	1.854,06 (2,68)	-94,88 (-0,12)
Otro	90,03 (0,20)	-64,36 (-0,27)	233,97 (0,51)	-290,79 (-0,65)
R cuadrado múltiple	0,05	0,03	0,05	0,04
R cuadrado ajustado	0,01	-0,00	0,01	-0,00

Anexo 5. Modelos de regresión por ciudad, huella de carbono por energía para otros usos distintos a calefaccionar

Huella energía, invierno 2019

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	-8,32 (-0,14)	6,99 (0,25)	48,56 (1,56)	-24,79 (-0,49)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	*** 0,35 (3,56)	*** 0,29 (5,42)	*** 0,39 (4,20)	*** 0,38 (4,13)
Nº personas	** 6,18 (2,60)	*** 9,34 (3,82)	*** 13,08 (3,99)	*** 12,93 (3,65)
Mat. Albañilería	69,45 (1,19)	16,45 (0,58)	-26,52 (-0,57)	51,54 (0,95)
Mat. Hormigón	56,46 (0,49)	27,69 (1,05)	-12,79 (-0,41)	46,36 (0,94)
Mat. Madera	66,19 (1,16)	30,01 (1,18)	9,56 (0,32)	78,45 (1,46)
Mat. Mixto	64,28 (1,14)	18,57 (0,74)	-7,43 (-0,25)	42,99 (0,91)
Leña	** -26,00 (-2,59)	5,80 (0,62)	-18,71 (-1,25)	-1,40 (-0,09)
Gas	-7,63 (-0,84)	-5,81 (-0,60)	10,91 (0,90)	-9,15 (-0,58)
Eléctrica	8,58 (1,04)	6,06 (0,68)	-11,42 (-0,89)	17,36 (1,37)
Parafina	-9,07 (-0,79)	7,41 (0,89)	0,64 (0,05)	-9,19 (-0,74)
Carbón	17,98 (0,54)	NA	NA	107,84 (1,30)
Petróleo	NA	52,11 (1,25)	51,50 (1,30)	15,37 (0,39)
Otro	-18,65 (-0,32)	2,99 (0,24)	-9,56 (-0,52)	13,65 (0,67)
R cuadrado múltiple	0,10	0,19	0,14	0,15
R cuadrado ajustado	0,06	0,15	0,10	0,11

Huella energía, invierno 2020

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	18,71 (0,26)	29,04 (0,56)	67,71 (0,81)	-17,51 (-0,31)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	0,22 (1,10)	*** 0,51 (4,61)	** 0,62 (3,12)	*** 0,68 (4,86)
N° personas	. 9,67 (1,89)	*** 13,07 (3,67)	7,64 (1,03)	* 12,36 (2,37)
Mat. Albañilería	31,99 (0,45)	19,68 (0,36)	-7,70 (-0,08)	27,34 (0,39)
Mat. Hormigón	36,76 (0,53)	1,74 (0,03)	37,15 (0,47)	58,07 (1,04)
Mat. Madera	44,43 (0,64)	-15,57 (-0,31)	33,55 (0,46)	44,15 (0,84)
Mat. Mixto	41,72 (0,62)	-0,07 (-0,00)	18,18 (0,25)	37,06 (0,70)
Leña	-3,61 (-0,16)	-14,53 (-1,12)	-39,74 (-1,20)	-1,24 (-0,03)
Gas	19,15 (0,98)	8,50 (0,65)	4,22 (0,17)	0,91 (0,04)
Eléctrica	8,42 (0,52)	*** 38,42 (3,40)	23,88 (0,93)	* 31,33 (2,00)
Parafina	-22,23 (-0,97)	2,68 (0,21)	-21,74 (-0,88)	-4,90 (-0,30)
Carbón	-4,81 (-0,05)	NA	NA	** 319,33 (2,81)
Petróleo	NA	*** 600,54 (6,57)	-38,14 (-0,44)	*** 360,93 (4,37)
Otro	-13,06 (-0,23)	0,27 (0,01)	19,20 (0,34)	23,33 (0,48)
R cuadrado múltiple	0,03	0,33	0,05	0,19
R cuadrado ajustado	-0,00	0,31	0,01	0,15

Huella energía, verano 2021

	Coronel	Temuco	Osorno	Valdivia
Constante	-20,40 (-0,48)	-5,56 (-0,14)	-293,91 (-0,15)	-20,47 (-0,50)
Temperatura	NA	NA	NA	NA
Tamaño vivienda	. 0,20 (1,65)	*** 0,35 (4,25)	*** 0,40 (4,87)	*** 0,58 (5,65)
Nº personas	*** 12,20 (4,01)	*** 14,14 (5,35)	** 8,80 (2,85)	* 8,79 (2,29)
Mat. Albañilería	32,43 (0,77)	3,84 (0,09)	-13,56 (-0,37)	-6,43 (-0,12)
Mat. Hormigón	34,83 (0,84)	2,44 (0,06)	9,51 (0,29)	9,18 (0,22)
Mat. Madera	35,02 (0,85)	1,35 (0,03)	8,09 (0,27)	15,48 (0,40)
Mat. Mixto	45,63 (1,14)	-1,25 (-0,03)	1,75 (0,05)	13,05 (0,33)
Leña	4,81 (0,36)	9,10 (0,94)	13,12 (0,94)	19,94 (1,36)
Gas	6,13 (0,52)	. 18,49 (1,93)	11,13 (1,07)	19,13 (1,35)
Eléctrica	0,36 (0,03)	* 16,58 (1,98)	-0,49 (-0,04)	1,04 (0,09)
Parafina	-9,86 (-0,72)	1,63 (0,17)	-6,52 (-0,63)	5,39 (0,45)
Carbón	-4,10 (-0,08)	NA	NA	*** 352,44 (4,20)
Petróleo	NA	-41,57 (-0,06)	24,12 (0,67)	85,09 (1,39)
Otro	6,47 (0,19)	20,94 (1,25)	** 73,42 (3,13)	47,24 (1,31)
R cuadrado múltiple	0,10	0,18	0,15	0,20
R cuadrado ajustado	0,06	0,15	0,11	0,16