

Impacto de la pandemia Covid-19 en las variaciones de la huella de carbono de hogares de ciudades chilenas

Carolina Rojas. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Diego Gálvez. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

François Simon. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Marc Quintana. Consultor independiente, Barcelona, España.

Iván Muñiz. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.

RESUMEN | Las ciudades generan gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales afectan directamente el cambio climático global. Pese a que se ha demostrado que los GEI globales disminuyeron durante la pandemia sociosanitaria, las emisiones locales vieron un fuerte aumento en ese periodo. Esta investigación estudió la influencia de diferentes factores en la huella de carbono de la calefacción y energía de hogares en ciudades del centro-sur de Chile antes y durante la pandemia 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 la eficiencia energética de las viviendas, la pobreza energética del hogar y el arraigo cultural al uso de la leña en estas ciudades.

PALABRAS CLAVE | medioambiente, morfología urbana, sustentabilidad urbana.

ABSTRACT | *Cities generate a large share of greenhouse gas (GHG) emissions, which directly affect global climate change. Although it has been shown that global GHGs decreased during the socio-health pandemic, local emissions saw a sharp increase. This research studied the influence of different factors on the heating and energy carbon footprint of households in cities in south-central Chile before and during the Covid-19 pandemic. By means of multiple regression models, it was shown that wood heating, low temperatures, larger dwellings and higher number of inhabitants generally explain the increase of the carbon footprint, especially in confinement. The urgency of developing integrated public policies that consider housing energy efficiency, household energy poverty and the cultural rootedness to the use of firewood in these cities is discussed.*

KEYWORDS | *environment, urban morphology, urban sustainability.*

Recibido el 28 de marzo de 2024, aprobado el 13 de octubre de 2024.

E-mails: carolina.rojas@uc.cl | dgalvez@uc.cl | francois.simon@uc.cl | marc.quintana@protonmail.com | ivan.muniz@uab.cat

Introducción

La pandemia del Covid-19 ha dejado a su paso una serie de consecuencias ambientales, sociales, económicas y sanitarias, entre otras, en las ciudades de todo el mundo, donde uno de los aspectos de mayor interés científico ha sido evaluar el impacto ambiental de la crisis. Específicamente, se ha observado un efecto positivo, dado por una marcada disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el año 2020, llegándose a reducciones que oscilan entre 8% y 26%. Este fenómeno se atribuye directamente a la paralización de la producción industrial y la restricción de la movilidad en respuesta a las medidas de confinamiento para evitar la propagación de contagios (Forster et al., 2020; Le Quéré et al., 2020; Liu et al., 2020; Moreno et al., 2020).

Aunque se ha estudiado extensamente el impacto de los confinamientos en la movilidad (Aloi et al., 2020; Arimura et al., 2020; Fatmi, 2020; Oestreich et al., 2023), existe una brecha de conocimiento en cuanto a cómo dichos procesos han afectado el comportamiento humano, especialmente en el ámbito residencial, en relación al consumo de energía para movilidad, calefacción, cocinar, entre otros. Más aún al considerar que las ciudades generan aproximadamente el 70% de las emisiones directas e indirectas de GEI, y la necesidad apremiante de reducir estas emisiones para abordar los desafíos del cambio climático.

En América Latina, una región con serios problemas de adaptación al cambio climático, el 45% de las emisiones de GEI proviene de sectores como el transporte, la industria de generación eléctrica y la quema de combustibles residencial e industrial (Bárcena et al., 2020), sectores en los que se evidenció una disminución del 10% en las emisiones de GEI durante la pandemia (Global Carbon Budget, 2023). Chile no fue una excepción en este proceso. Sin embargo, como país predominantemente urbano, con el 90% de su población viviendo en ciudades y con las emisiones de GEI más altas de la región, se enfrenta a desafíos permanentes por su vulnerabilidad frente al cambio climático y crisis ambientales.

En Chile, por efecto de la pandemia del Covid-19, se demostró cómo los confinamientos han afectado no solo las emisiones, sino también los patrones de consumo de energía en los hogares (Samaniego et al., 2022). Esto es muy relevante, ya que el país registra los niveles más altos de contaminación atmosférica en la región (IQAir, 2023) y también uno de los niveles más altos de emisiones de GEI per cápita (Belloc & Molina, 2023), superado solamente por Uruguay y México. Aunque se reconoce internacionalmente que el país ha realizado inversiones significativas en energías renovables, las cuales repercuten en la huella de carbono, la pandemia ha dejado evidencias de su paso en los patrones de consumo de energía y, sobre todo, de calefacción en las ciudades chilenas (Rojas et al., 2022). Tales huellas hoy plantean interrogantes sobre la asociación entre los cambios señalados y las características urbanas, y sobre la posibilidad de controlarlos mediante medidas de planificación urbana y eficiencia energética.

Este estudio se centra en las viviendas de ciudades del centro-sur de Chile, zonas que durante la pandemia experimentaron variaciones notables en su huella de carbono por el uso extensivo de calefacción y energía, particularmente vinculadas al

uso de la leña. Considerando la expansión urbana en curso y los modelos de crecimiento dispersos, se plantea la necesidad de analizar factores urbanos específicos, como la morfología urbana, la materialidad de las viviendas, el tipo de calefacción utilizado y las condiciones climáticas, para comprender las variaciones en la huella de carbono y explorar enfoques de la planificación urbana como una respuesta adaptativa y sostenible a estos desafíos ambientales.

Este artículo contribuye al debate sobre el urbanismo y el cambio climático, especialmente en ciudades con limitada capacidad de adaptación. Se plantea la posibilidad de que acciones autónomas, locales y desde el hogar sean fundamentales para una transición exitosa hacia la sustentabilidad en un contexto de creciente conciencia climática.

Morfología urbana y factores climáticos en la huella de carbono

La intersección entre la morfología urbana, factores climáticos y su impacto ambiental emerge como un campo crucial de estudio en la planificación y desarrollo sostenible de las ciudades. Tradicionalmente, los modelos de sustentabilidad han destacado estrategias específicas en el diseño de sistemas de transporte, uso del suelo y energía. Dos paradigmas opuestos han dominado este escenario: la ciudad compacta, que aboga por la densificación y mezcla de funciones para reducir el consumo de energía y la motorización; y la ciudad dispersa, que tiende a expandirse hacia las periferias, generando un mayor consumo de energía y combustibles (Hassan & Lee, 2015; Muñiz et al., 2016; Seto et al., 2017; Soto-Cortés, 2015). No obstante, la ciudad compacta, a pesar de estar asociada a menores emisiones de GEI, no es inmune a críticas. Las preocupaciones se centran en la pérdida de espacios abiertos, reducción de áreas permeables y un mayor consumo energético en edificaciones en altura (Hassan & Lee, 2015; Montejano, 2017). La falta de consenso sobre la morfología urbana más adecuada en el contexto del cambio climático añade complejidad a la discusión (Montejano, 2017).

El enfoque del urbanismo climático emerge como una respuesta estratégica, focalizando la atención en las emisiones de GEI a nivel urbano y su interacción directa con la morfología de la ciudad. Este paradigma propone políticas urbanas que permitan la adaptación y gestión del carbono, posicionando a las ciudades como actores clave en la acción climática (Bulkeley & Newell, 2023; Long & Rice, 2019). El urbanismo climático, no exento de críticas, busca medir y monitorear las emisiones de GEI para respaldar políticas y programas locales de reducción de su impacto en las ciudades.

La complejidad de la relación entre morfología urbana y clima se evidencia especialmente en las ciudades del centro-sur de Chile. Las condiciones topográficas, caracterizadas por sistemas orográficos semicerrados, presentan desafíos a la ventilación y propician fenómenos como la inversión térmica. Este proceso, intensificado durante las noches invernales, contribuye a la concentración de contaminantes en la baja atmósfera, afectando la calidad del aire (Opazo, 2011; Osses et al., 2020; Pacheco et al., 2021; Romero, 2021; Romero et al., 2010). Además, en contraste con las investigaciones en ciudades europeas, las llevadas a cabo en ciudades

chilenas, como Concepción, han revelado resultados que desafían la relación tradicional entre densidad urbana y huella ecológica (Muñiz & Rojas, 2019). En este aspecto, en nuestras ciudades la distancia al centro urbano emerge como un factor más significativo que la densidad en cuanto a las emisiones de GEI, demostrando que incluso con medidas de sustentabilidad escasas, el impacto ecológico puede variar notablemente. Junto a ello, se destaca al respecto la importancia de factores vinculados a la vivienda y la calefacción, particularmente en el contexto de pobreza energética. La pandemia, además de los confinamientos, ha arrojado luz sobre la influencia local del clima y la morfología en ciudades frías y lluviosas, destacando la necesidad de consumir mayor energía para lograr confort térmico, lo que a su vez incide en las emisiones de GEI (Morero et al., 2021).

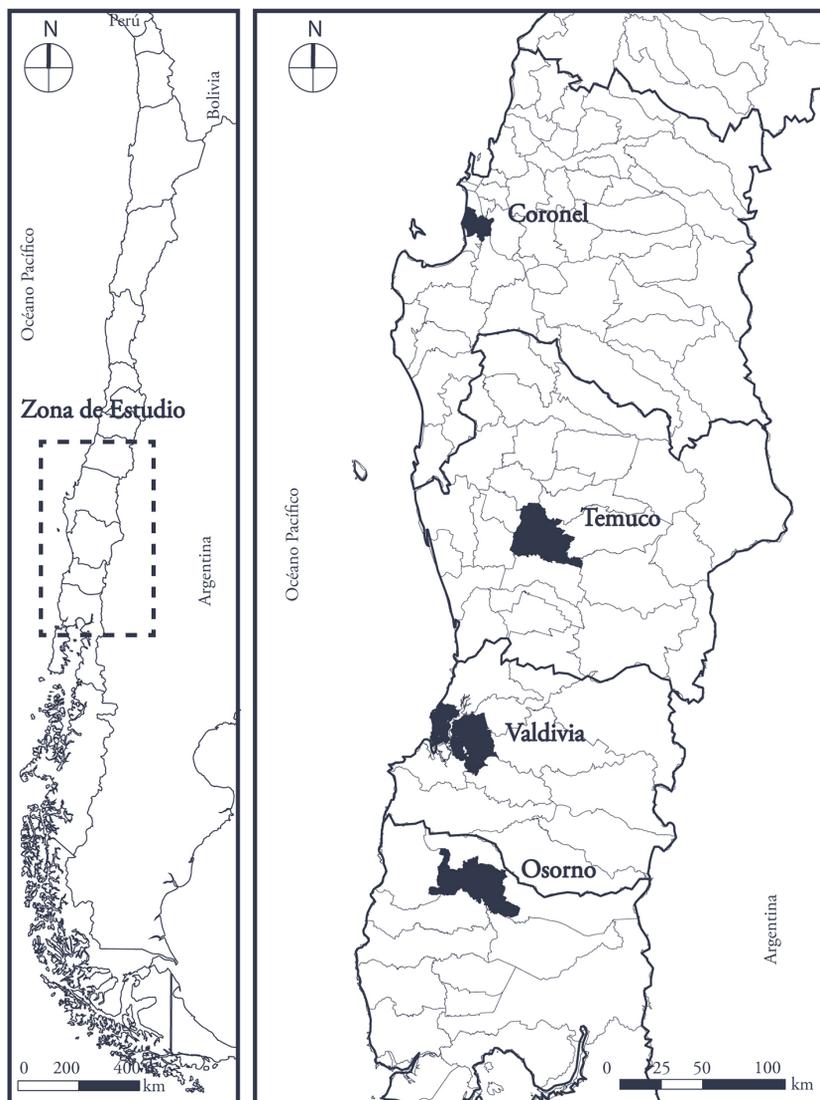
Método

El método aplicado en este estudio consiste en identificar los factores explicativos asociados al clima, la vivienda y la morfología del entorno del hogar que influyen en la huella de carbono calculada antes y durante la pandemia, a partir de una encuesta telefónica y cuyos resultados fueron publicados en Rojas y otros (2022). Estos factores, hipotéticamente, deberían estar ligados a la materialidad de la edificación, los metros cuadrados de la vivienda, el nivel de renta de sus habitantes, el número de personas que la habitan y el tipo de calefacción que utilizan, y características climáticas como la temperatura promedio de la ciudad en cierta estación del año y el volumen de precipitación, junto con la densidad poblacional del barrio donde se encuentran los hogares y la distancia al centro de la ciudad.

Encuesta

La encuesta de emisiones de GEI asociadas al consumo energético durante el invierno de 2020 es un estudio longitudinal que busca monitorear la misma cohorte y comparar patrones de consumo en el contexto de la pandemia de Covid-19, considerando tanto el invierno de 2020 como el verano de 2021, además de situaciones previas al invierno de 2019. Este cuestionario original fue inspirado por trabajos realizados en la ciudad de Concepción (Muñiz & Rojas, 2019). La encuesta fue validada por el comité de ética en ciencias sociales de la Pontificia Universidad Católica de Chile y aplicada a 1.200 hogares en septiembre de 2020 (invierno), utilizando el sistema de Entrevista Telefónica Asistida por Computadora (CATI), con una distribución aleatoria entre jefes de hogar. Las encuestas se distribuyeron equitativamente entre las cuatro ciudades estudiadas, con una muestra de 300 hogares por ciudad, y en ella se consultó sobre los combustibles usados en calefacción y en energía del hogar. La evaluación de las emisiones de GEI provenientes del consumo energético en los hogares se realizó procesando los datos de las encuestas sobre el gasto en energía de los consumidores, multiplicando las unidades monetarias de consumo por los factores de emisión de cada tipo de combustible usado (Rojas et al., 2022).

FIGURA 1 | Área de casos de estudio



FUENTE: ROJAS ET AL. (2022).

Casos de estudio

Se estudiaron cuatro ciudades del sur de Chile: Coronel, Temuco, Valdivia y Osorno, representativas de los consumos energéticos en las regiones de Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, respectivamente (Figura 1); y que, además, están entre las diez ciudades más contaminadas de Sudamérica (IQAir, 2023). Un antecedente clave es que, de acuerdo con nuestro primer estudio, publicado en la revista *Carbon Management* (Rojas et al., 2022), la leña es el principal combustible utilizado como

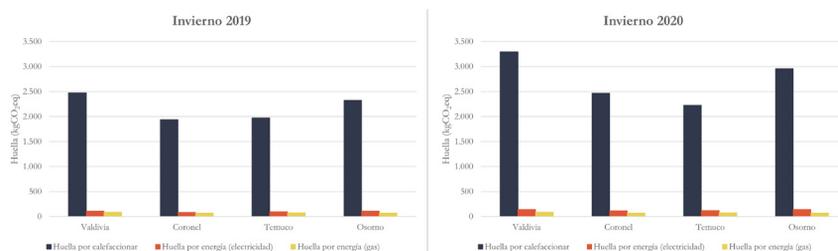
calefacción en los hogares, superando incluso el 80% en ciudades como Osorno y Valdivia. De hecho, la Figura 2 muestra que las huellas más altas corresponden al uso de energía para calefacción, especialmente altas en Valdivia y Osorno, con cifras que en el año 2020 superaron los 3.000 kgCO₂eq,¹ cerca de un 30% más que en el mismo periodo del año 2019. Temuco presenta una huella menor en comparación con estas ciudades, pero aún considerable, que da cuenta, además, de un aumento del 13% entre 2019 y 2020. Coronel tiene la huella de calefacción más baja entre las cuatro ciudades, pero también aumentó en un 27% en comparación con el año anterior. En todas las ciudades referidas la contribución de la electricidad (rojo) y el gas (amarillo) a la huella total es pequeña en comparación con la de la calefacción (Figura 2). Sin embargo, Coronel y Temuco muestran una leve mayor proporción de huella relacionada con electricidad en comparación con las otras dos ciudades. En la Figura 3, la línea que representa la densidad muestra una tendencia explicativa. Temuco tiene la densidad poblacional más alta, con más de 60 habitantes por km², mientras que Coronel y Valdivia están por debajo de ese valor. Osorno, a pesar de tener una huella alta por calefacción, tiene la densidad poblacional más baja de las cuatro ciudades. A su vez, todas las ciudades en estudio presentan un mayor consumo en invierno y la calefacción se extiende a meses más cálidos, validando la dependencia anual de la leña.

Factores explicativos

Dados los antecedentes de la investigación previa (Rojas et al., 2022) y la relación indirecta entre densidad poblacional y huella de carbono –es decir, que ciudades con menor densidad (como Osorno) y mayor densidad (como Valdivia) igualmente presentan las huellas más altas (Figura 2)–, se propone un análisis estadístico de las huellas de carbono para identificar los factores explicativos del aumento de la huella de carbono de energía en los hogares en el invierno de 2020 en las cuatro ciudades en estudio. Las huellas de carbono fueron calculadas con base en los patrones de consumo de energía de 1.200 hogares, 300 por ciudad, en septiembre de 2020 (Rojas et al., 2022). En esta encuesta se preguntó por el consumo de energía en el invierno del año 2019 o T0 (sin pandemia) y en el invierno que estaban viviendo o T1 (con pandemia). En específico, las preguntas de calefacción y de energía de la encuesta fueron: ¿Qué tipo de calefacción usa? (Selección múltiple: Leña, Parafina, Carbón, Eléctrica, Gas, Petróleo y Otro). ¿Cuántos meses usa la calefacción? ¿Cuánto pagó en promedio? Luego las preguntas de energía se refirieron a cuánto se pagó en promedio en las cuentas de electricidad, gas licuado y gas natural. Posteriormente, se diseñaron modelos de regresión múltiple, donde la variable dependiente es el valor de la huella de carbono en invierno, y las variables independientes remiten a forma urbana, clima y características de la vivienda.

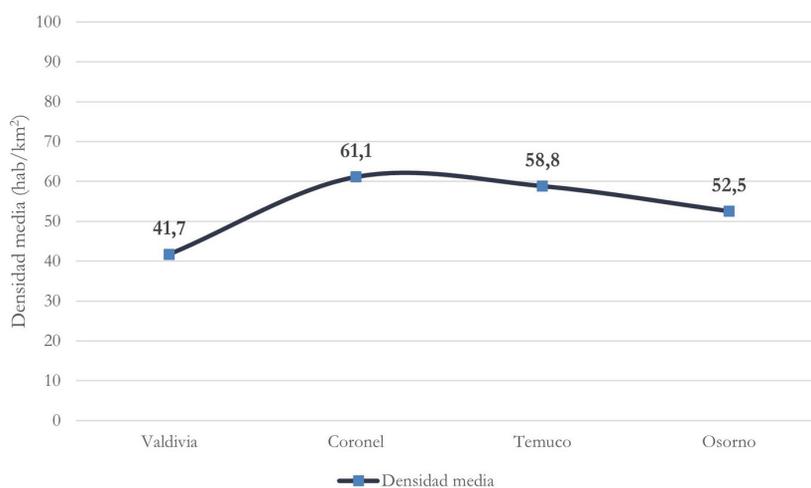
1 Un equivalente de dióxido de carbono o equivalente de CO₂, abreviado como CO₂eq, es una medida métrica utilizada para cuantificar el impacto de los gases de efecto invernadero (GEI) en función de su potencial de calentamiento global (GWP), convirtiendo las cantidades de otros gases en la cantidad equivalente de dióxido de carbono con el mismo potencial de calentamiento global (Eurostat, Explicación de las estadísticas, Glosario: Equivalente de dióxido de carbono. <https://bit.ly/3QJo22F>).

FIGURA 2 | Promedio huella de carbono por hogar (kgCO₂eq/hogar) en las ciudades en estudio, invierno 2019 y 2020



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RESULTADOS DE ROJAS ET AL. (2022).

FIGURA 3 | Densidad media (hab./km²) en las ciudades en estudio



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RESULTADOS DE ROJAS ET AL. (2022).

Se diseñaron modelos de regresiones diferenciados, principalmente por las evidencias existentes respecto del efecto de la calefacción. La calefacción supone más del 60% del consumo de energía total de las viviendas. En la muestra considerada en este estudio destaca la variedad de fuentes de energía primarias utilizadas (leña húmeda, leña seca, pellets, queroseno, gas licuado del petróleo, gas natural, etc.), cada una de ellas con un impacto diferenciado en términos de huella por kilovatio (kW) (Rojas et al., 2022). Se supone que la huella de carbono de la calefacción está más correlacionada con los indicadores de estructura espacial (densidad, distancia al centro) que la huella de la electricidad. La razón es que la fuente de energía utilizada para calentar las viviendas depende de su tipología (vivienda en bloques, vivienda unifamiliar aislada, casas adosadas, etc.), la cual a su vez está correlacionada con las variables explicativas de forma y estructura espacial, densidad y distancia al centro. En los espacios menos densos y más alejados del centro, se espera que el uso de

la leña sea significativamente superior al de los centros urbanos densos. Además, la variabilidad observada en la huella de carbono de la calefacción depende de las diferencias de temperatura. Los lugares más fríos presentan una mayor huella de carbono de la calefacción (Andrews, 2008; Norman et al., 2006; VandeWeghe & Kennedy, 2007). Estos aspectos explican el hecho de que los trabajos pioneros en el estudio que tienen los efectos de la forma y estructura espacial de las ciudades sobre su huella de carbono (Brown & Logan, 2008; Glaeser & Kahn, 2010) presenten regresiones diferenciadas para el total de consumos residenciales y para la calefacción. Entonces, en dichos estudios se muestra cómo la magnitud y significatividad de los parámetros de forma y estructura espacial influye en la huella de carbono.

Los modelos aplicados arrojan diferentes cálculos estadísticos que evidencian la significancia estadística y la bondad de ajuste de este estudio, además de otros parámetros que permiten explicar su funcionamiento. Para interpretar el modelo de regresión, son relevantes el valor estimado (β) o la cantidad en que cambia la variable dependiente cuando cada variable predictora aumenta en una unidad. El valor “T” y el *p-value* evalúan la hipótesis nula, que propone la inexistencia de relación lineal significativa entre la huella de carbono y variables urbanas, climáticas y de vivienda. Un *p-value* menor al nivel de significancia (0,05) indica suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, confirmando así una relación significativa. Esta información permite validar la capacidad predictiva del modelo (Kutner et al., 2005).

Otros parámetros relevantes son el R-Square y el Coeficiente de Determinación Ajustado, que 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 lo es (Rodríguez & Mora, 2001). Por último, en los cálculos se usa GrE TL (un software libre para análisis estadístico y econométrico basado en el lenguaje de programación C, versión gratuita) y el entorno de desarrollo integrado Rstudio para R.²

Los modelos de huella de carbono por hogar calculados son:

Donde:

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

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.

2 El código utilizado se encuentra disponible en la plataforma web: https://github.com/dlgalvez11/Huella_Carbono.git

En los modelos disponibles, para la elección de los predictores se utiliza el método “paso a paso” o *stepwise* (se emplean criterios matemáticos para su elección). 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, cuya interpretación se considera como una medida de la calidad con la que el modelo se ajusta a los datos (Martínez et al., 2009). Por último, para evitar problemas de colinealidad entre las variables, se calculó el Factor de Inflación de la Varianza (VIF) para cada uno de los modelos, que permite estimar la multicolinealidad en un análisis de regresión (Kutner et al., 2005).

Resultados Calefacción

2019 Invierno antes de la pandemia (T0)

Los resultados del modelo T0 (invierno de 2019, antes de la pandemia) indican que la constante es de 2.674, cifra que representa el valor esperado de la huella de carbono cuando todas las variables independientes son cero. Entre las variables significativas que tienen una unidad de medida distinta a la variable independiente (kgCO_2eq), se destaca la distancia (m) del centro, que muestra una relación directa con la huella de carbono. Esto sugiere que una vivienda situada a mayor distancia del centro de la ciudad emite más que una con las mismas características ubicada en el centro de la ciudad. Además, la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), promedio de la ciudad, al tener un signo negativo en su valor ‘ t ’, incrementa las emisiones al disminuir su valor, sugiriendo que las ciudades más frías tienden a tener mayores emisiones. El tamaño de la vivienda (m^2) también desempeña un rol relevante: un aumento en su magnitud implica un incremento en la huella de carbono, manteniéndose las mismas características.

En cuanto a los materiales de construcción, tanto la albañilería como la madera muestran coeficientes positivos, lo que sugiere un aumento en la huella de calefacción en comparación con otros materiales. Esto podría deberse a la retención de frío en viviendas de albañilería y al mayor esfuerzo necesario para calentar hogares de madera. Respecto a los sistemas de calefacción, los más eficientes son la calefacción eléctrica (-2.012,87 kgCO_2eq), a gas (-1.972,47 kgCO_2eq) y a parafina (-1.637,55 kgCO_2eq), los cuales están asociados con una disminución en la huella de carbono por hogar. El modelo es capaz de explicar aproximadamente el 20% de la variabilidad en las emisiones de carbono por calefacción en los hogares (R^2 : 0,1987; R^2 ajustado: 0,1865), lo que indica una relación moderada entre las variables estudiadas y las emisiones observadas (Tabla 1).

TABLA I | Modelo de regresión múltiple, huella de carbono de calefacción, invierno 2019 (T0)

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

2020 Invierno en pandemia (T1)

Para el caso de la huella de carbono calculada en invierno del año 2020 (Tabla 2), la regresión muestra que el valor esperado de la huella de carbono por calefacción, cuando todas las variables independientes son cero, es de -316,89. Las variables significativas en este modelo incluyen la renta C1 (valor binario), los metros cuadrados de la vivienda y todos los tipos de calefacción a leña (kgCO₂eq), además de la calefacción a petróleo (kgCO₂eq). El modelo refleja con precisión cómo la leña es la variable más relevante para explicar las emisiones de los hogares, especialmente en el contexto del confinamiento en invierno, cuando las personas permanecieron más tiempo en sus casas.

De acuerdo con los coeficientes del modelo, se estima que los hogares que utilizan únicamente calefacción basada en la combustión de leña emiten 2.300 kgCO₂eq más que otros hogares, en términos generales. Sin embargo, una combinación de fuentes energéticas podría modificar esta brecha. Por ejemplo, un hogar que utiliza leña como fuente principal de calefacción podría aumentar sus emisiones en promedio en 79 kgCO₂eq si la combina con energía eléctrica, y hasta en 7.920 kgCO₂eq si la combina con energía eléctrica y otras fuentes. En contraste, si este

hogar cambiara su calefacción a sistemas basados en parafina y energía eléctrica, reduciría sus emisiones en 1.468 kgCO₂eq, lo cual sugiere un consumo más sustentable en términos de emisiones. Aunque un aumento en la renta C1 se asocia a un incremento en la huella de carbono por calefacción, su estadístico T es muy bajo, lo que sugiere que la relación entre la renta y la huella de carbono podría no ser lineal.

El modelo de regresión lineal múltiple presentado en la Tabla 2 explica aproximadamente el 22% de la variabilidad en la huella de carbono por calefacción durante este periodo (R²: 0,2252; R² ajustado: 0,2120). Las variables predictoras más relevantes para explicar esta variación incluyen el tamaño físico de la vivienda (m²), con un valor T de 5,76, y los tipos de combustible utilizados para calefaccionar, en particular la leña, que muestra un coeficiente elevado de 2.300,71 (kgCO₂eq). Por otro lado, variables como el número de personas en el hogar presentan menor relevancia estadística, con un valor T de 2,40. Esto sugiere que las características físicas de la vivienda y el uso de ciertos combustibles tienen un impacto mucho más significativo en las emisiones de carbono por calefacción que la composición del hogar en términos de número de habitantes.

TABLA 2 | Modelo de regresión múltiple, huella de carbono de calefacción, invierno 2020 (T1)

COEFICIENTES	UNIDAD	ESTIMACIÓN	VALOR T	PR (> T)	
Constante (Intercept)		-316,89	-1,03	0,300430	
Densidad del barrio	Hab/km ²	-4,05	-1,55	0,119933	
Distancia al centro (redes)	m	0,16	1,50	0,132126	
Distancia euclidiana al centro	m	-0,21	-1,70	0,088573	.
Tramo de renta C1	Binario	357,26	1,99	0,045837	*
Tramo de renta C3	Binario	242,70	1,50	0,131751	
Metros cuadrados de la vivienda	m ²	9,19	5,76	1,06e-08	***
Número de personas en el hogar	Nº	119,90	2,40	0,016432	*
Materialidad madera	Binario	277,22	1,87	0,061659	.
Calefacción a leña	kgCO ₂ eq	2.300,71	12,36	< 2e-16	***
Calefacción a leña y eléctrica	kgCO ₂ eq	2.379,44	9,48	< 2e-16	***
Calefacción a leña, eléctrica y gas	kgCO ₂ eq	2.369,39	4,56	5,49e-06	***
Calefacción a leña, eléctrica y otros	kgCO ₂ eq	10.220,44	6,28	4,59e-10	***
Calefacción a leña y gas	kgCO ₂ eq	2.382,76	8,65	< 2e-16	***
Calefacción a leña y parafina	kgCO ₂ eq	2.414,41	8,78	< 2e-16	***
Calefacción a leña, parafina y eléctrica	kgCO ₂ eq	2.809,09	6,12	1,26e-09	***
Calefacción a leña, parafina, eléctrica y gas	kgCO ₂ eq	3.655,46	3,18	0,001510	**
Calefacción a leña, parafina y gas	kgCO ₂ eq	2.371,41	2,87	0,004104	**
Calefacción a leña y petróleo	kgCO ₂ eq	7.632,06	3,35	0,000829	***
Calefacción a parafina y eléctrica	kgCO ₂ eq	832,42	1,73	0,082612	.
Calefacción a petróleo	kgCO ₂ eq	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.

Resultados Energía

2019 Invierno antes de la pandemia (T0)

Los resultados presentados corresponden a la huella de carbono (kgCO₂eq) asociada al consumo de electricidad y gas para usos distintos a la calefacción, estimada a partir de los consumos energéticos (en adelante, huella de energía). La Tabla 3 muestra que los valores relacionados con la huella de carbono de la energía dependen de los ingresos del hogar, aunque los valores para los diferentes rangos de renta son positivos. Por ejemplo, se espera que un hogar perteneciente a la categoría de renta C3 emita más que hogares con renta E (menores ingresos). Sin embargo, estos valores no presentan una significancia estadística suficiente como para ser considerados relevantes al momento de explicar la huella de carbono de energía en este contexto.

Por otro lado, la temperatura, con un valor T negativo, indica que con una disminución en la temperatura promedio (°C) de la ciudad, las emisiones de carbono de cada hogar aumentarían. También resultan significativos para el aumento de la huella de energía el tamaño de la vivienda (m²), el número de personas en el hogar, el recambio de calefactores (binario) y la madera como material de construcción de la vivienda (binario). Así, si una vivienda aumenta su superficie debido a una ampliación, se espera que su huella energética se incremente; del mismo modo, cada persona adicional que habite en la vivienda incrementaría las emisiones promedio del hogar. Finalmente, una vivienda construida con madera tendría más huella de carbono que otra sin este material, independientemente del tipo de energía utilizada.

TABLA 3 | Modelo de regresión múltiple, huella de carbono de energía, invierno 2019 (T0)

COEFICIENTES	UNIDAD	ESTIMACIÓN	VALOR T	PR (> T)	
Constante (Intercept)		82,71	4,25	2,26e-05	***
Tramo de Renta C3	Binario	7,72	1,74	0,081654	.
Tramo de Renta E	Binario	13,28	1,49	0,134755	
Temperatura	°C	-6,89	-3,41	0,000660	***
Metros cuadrados de la vivienda	m ²	0,35	9,04	< 2e-16	***
Número de personas en el hogar	Nº	10,39	7,35	3,62e-13	***
Act. sustentables (recambio de calefactores)	Binario	10,58	1,72	0,085161	.
Materialidad madera	Binario	17,28	4,02	6,05e-05	***
Calefacción a leña y otros	kgCO ₂ eq	87,04	3,48	0,000507	***
Calefacción a petróleo	kgCO ₂ eq	62,45	2,77	0,005675	**
Calefacción eléctrica	kgCO ₂ eq	19,67	2,15	0,031411	*
Calefacción a parafina y eléctrica	kgCO ₂ eq	30,50	2,04	0,040863	*
Calefacción a carbón y gas	kgCO ₂ eq	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.

Este modelo explica aproximadamente el 16% del comportamiento de la huella de carbono de energía durante el invierno de 2019, siendo las variables más significativas la temperatura, el tamaño físico de la vivienda, el número de personas en el hogar, la materialidad de la vivienda y el uso de calefacción a leña, que ofrecen una explicación más robusta de las variaciones en la huella de carbono.

2020 Invierno en pandemia (T1)

Con las mismas variables explicativas, se construyó el modelo para el invierno de 2020 (Tabla 4). Este modelo presenta una menor precisión en comparación con el año anterior, por lo que explica solamente el 11% del comportamiento de la huella de carbono (kgCO₂eq) por energía en el hogar. Las variables significativas incluyen los metros cuadrados de la vivienda, con un valor T positivo, y la cantidad de habitantes, ambos reflejando una relación similar a la observada en el modelo de 2019. Entre las variables novedosas, se observa que la calefacción eléctrica tiene un impacto significativo, pues aumenta en 60,46 kgCO₂eq la huella de carbono; y que la calefacción a petróleo incrementa las emisiones en 212,06 kgCO₂eq. El resto de las combinaciones de sistemas de calefacción no resultó estadísticamente significativo.

TABLA 4 | Modelo de regresión múltiple, huella de carbono de energía, invierno 2020 (T1)

COEFICIENTES	UNIDAD	ESTIMACIÓN	VALOR T	PR (> T)	
Constante (Intercept)		64,86	1,67	0,094672	.
Distancia al centro (redes)	m	0,01	1,83	0,067101	.
Distancia euclidiana al centro	m	-0,01	-1,83	0,066856	.
Renta	Puntaje	0,00	2,38	0,017088	*
Tramo de Renta C1	Binario	-92,99	-2,25	0,024432	*
Tramo de Renta C2	Binario	-33,01	-1,85	0,064036	.
Temperatura	°C	-8,94	-2,43	0,014963	*
Metros cuadrados de la vivienda	m ²	0,56	6,80	1,61e-11	***
Número de personas en el hogar	N°	10,87	4,12	3,96e-05	***
Calefacción eléctrica	kgCO ₂ eq	60,46	3,51	0,000455	***
Calefacción eléctrica y a gas	kgCO ₂ eq	54,08	2,13	0,033118	*
Calefacción a leña y carbón	kgCO ₂ eq	111,77	1,61	0,106550	
Calefacción a leña, eléctrica y otros	kgCO ₂ eq	148,36	1,74	0,081410	.
Calefacción a leña y gas	kgCO ₂ eq	25,79	2,04	0,041293	*
Calefacción a leña y parafina	kgCO ₂ eq	-20,47	-1,64	0,100480	
Calefacción a leña, parafina y eléctrica	kgCO ₂ eq	48,17	2,08	0,036909	*
Calefacción a parafina y eléctrica	kgCO ₂ eq	35,60	1,46	0,142286	
Calefacción a petróleo	kgCO ₂ eq	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.

Un aspecto relevante, como también lo indicó la investigación de Rojas y otros (2022), es que la huella de carbono por energía durante el invierno de 2020 aumentó, en contraste con el transporte, cuyas emisiones disminuyeron. Esto es particularmente relevante en las ciudades del centro-sur de Chile, donde las viviendas suelen ser frías y húmedas. En este contexto, el tamaño de la vivienda y el número de personas que la habitan ejercen una mayor influencia en las emisiones que el tipo de energía utilizada, ya que es común el uso de varios tipos de calefacción. Aunque la electricidad se percibe como una opción de menor emisión durante el invierno, su factor de emisión es más elevado debido a la generación de energía a partir de combustibles fósiles.

Discusión

Los hallazgos permitieron comprobar cambios en los comportamientos y en las prácticas de los hogares en relación con el consumo de energía, junto a problemas de aislación térmica en las viviendas y la necesidad de acelerar la transición energética de impacto local, y ello por medio del mejoramiento de la calidad constructiva en eficiencia y rendimiento térmico (Rojas et al., 2022). Asimismo, los resultados son concordantes con los hallazgos respecto del aumento de GEI locales en las ciudades por efecto de la pandemia (Rojas et al., 2022; Wang & Li, 2021) y también respecto de la demanda de energía en hogares en un contexto socio sanitario (Moreno et al., 2020). Lo anterior ocurre en contraste con un extenso grupo de publicaciones científicas que demostraron la disminución de las emisiones de GEI globales en las principales ciudades del mundo por efecto 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 & Su, 2020; Wang et al., 2022). Tal disminución se debería al factor de escala o, como señalan Sporchia y otros (2024), también al hecho de que la pandemia del Covid-19 ha afectado los territorios de forma heterogénea, dependiendo del contexto territorial y las variables socioeconómicas y ambientales, en relación con las cuales la escala es muy sensible.

Así, la metodología reveló la necesidad de prestar atención a factores locales para comprender el comportamiento de las emisiones de GEI y formular políticas públicas efectivas y territorialmente relevantes (Bulkeley & Newell, 2023). Entre estos factores, nuestro estudio exploró la influencia de variables climáticas y de morfología urbana en ciudades del centro-sur de Chile, tal cual otras investigaciones hechas en Latinoamérica (Muñiz & Rojas, 2019; Muñiz et al., 2016; Opazo, 2011; Pacheco et al., 2021), así como el nivel socioeconómico y las características de los hogares en ciudades con alta contaminación ambiental debido a la calefacción con leña (Urquiza et al., 2020). Entonces, nuestros resultados respaldan la premisa de que los cambios en los patrones de consumo y el comportamiento diario de las personas, como respuesta a las medidas de confinamiento, han generado modificaciones en las emisiones locales de GEI, impactando directamente la sostenibilidad de las ciudades. Por tanto, este enfoque se alinea con perspectivas que destacan la importancia de considerar criterios de sostenibilidad vinculados a estrategias de desarrollo local, incluso cuando se implementan

políticas autoritarias en situaciones de emergencia, como ocurrió durante la pandemia (Howarth et al., 2020; Salazar, 2018).

En específico en el ámbito de la calefacción local, antes de la pandemia factores como la distancia al centro, la temperatura de la ciudad y el tamaño de la vivienda eran clave en la magnitud de la huella de carbono. Sin embargo, en pandemia la leña se ha hecho el combustible más influyente en el aumento de la huella de carbono por hogar, destacando al respecto la necesidad de alternativas más sostenibles, como la energía eléctrica y a gas. Por otra parte, la falta de significancia estadística de la variable renta indicó que el efecto de la calefacción a leña involucra aspectos culturales independientes del nivel socioeconómico. Es decir, la elección de la leña como combustible está arraigada en complejas dinámicas socioeconómicas y culturales, como la pobreza energética y la valoración cultural de la cocina a leña (Urquiza et al., 2020).

En Chile, la pobreza energética depende de factores críticos, como la eficiencia energética y el tamaño de la vivienda (Villalobos et al., 2021). Así, el uso de la leña en el país está 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). En el tipo de ciudades del centro-sur de Chile como las estudiadas, es ambientalmente deficiente la interacción entre bajos niveles de ingresos, baja eficiencia energética de la vivienda y elevados precios de la energía (Riquelme, 2020). En este sentido, es interesante en los resultados observar que la temperatura promedio de la ciudad emerge como un factor crucial para explicar la huella de carbono. Es decir, una temperatura exterior más baja se correlaciona con mayores emisiones, coincidiendo con investigaciones anteriores en ciudades y hogares en diferentes partes del mundo (Brown & Logan, 2008; Paravantis et al., 2021; Park et al., 2022; Shigetomi et al., 2021). Así, los resultados permiten entender que, en Chile, se espera que ciudades como Valdivia y Osorno, que en invierno tienen temperaturas promedio de 8,5 °C y 8,0 °C respectivamente (Rojas et al., 2022), tengan una huella de carbono mayor por efecto de la calefacción que otras ciudades con temperaturas más altas, de climas templados, como es el caso de Coronel, que en invierno tiene una temperatura promedio de 10,6 °C.

El hallazgo señalado subraya la necesidad de políticas que aborden tanto los aspectos económicos como los socioculturales para lograr un cambio significativo en las elecciones de los tipos de calefacción. Además, a pesar de los esfuerzos en políticas públicas, como los programas de recambio de calefactores y mejoramiento térmico de viviendas en pandemia, nuestros resultados indican que tales medidas no han logrado el impacto esperado. La resistencia a abandonar la leña como fuente principal de calefacción destaca la complejidad de abordar las motivaciones sociales, económicas y culturales detrás de las elecciones de calefacción.

En cuanto a la huella de energía para otros usos, se observó un cambio en la relevancia de los factores, destacando al respecto el efecto de la temperatura ambiental y la cantidad de personas en la vivienda o que componen el hogar. Esto respalda la hipótesis según la cual durante la pandemia se intensificó el efecto que tiene el número de personas que comparten un mismo espacio, sobre la magnitud de la huella de carbono, hecho que subraya la relevancia del tamaño de la vivienda en

esta materia, vinculado a las políticas de confinamiento que aumentaron el tiempo de permanencia de las personas en los hogares.

Respecto a la morfología urbana, a pesar de la larga historia de argumentos científicos que sugieren que las ciudades densas reducirían las emisiones de GEI (Ewing & Rong, 2008; Frey, 2003; Jabareen, 2006; Mollay, 2010; Rong, 2006), nuestros modelos de regresión contradicen tales afirmaciones y aumentan la necesidad de evidencias para ciudades intermedias del sur global, donde la densidad tiende a ser baja, pero con poblados que ocupan una menor superficie de suelo. Las características morfológicas de la ciudad, como la distancia del hogar al centro urbano o la densidad poblacional del barrio, no lograron explicar de manera significativa la huella de carbono asociada a la calefacción ni al consumo de energía en pandemia, aspecto concordante con hallazgos previos para ciudades chilenas (Muñiz et al., 2016; Muñiz & Rojas, 2019). Esto sugiere que antes de las medidas de control de la densidad son necesarias las que implican un cambio en la materialidad de las viviendas.

Para subsanar parte de este problema, se han realizado esfuerzos gubernamentales en políticas públicas. Entre ellos, 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, tal variable no logró ser un factor estadísticamente significativo dentro del modelo, confirmando que este tipo de medidas no parece haber conseguido el efecto esperado (Álamos et al., 2020). En el panorama actual, el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026 busca actualizar los estándares de eficiencia energética y fomentar la renovación térmica de edificaciones. Aunque estas iniciativas son muy valiosas, parece haber una brecha en la consideración de estilos de vida y patrones de consumo que perpetúan la dependencia de la calefacción a leña en ciudades como las estudiadas. Al respecto, Chiang et al. (2023) proponen la sustitución de la leña por briquetas de carbón vegetal (*charcoal briquettes*) a partir de residuos de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*.

La discusión de los resultados también permite hacerse cargo de algunos de los cuestionamientos relativos al urbanismo climático y la incesante búsqueda de cuantificar las emisiones en las ciudades (Long & Rice, 2019), dado que en este estudio se avanza también en evaluar las condiciones de los hogares y su entorno.

Conclusiones

Este estudio identifica factores críticos que afectan la huella de carbono en calefacción y consumo energético de los hogares en ciudades del centro-sur de Chile, revelando que la pandemia acentuó el uso de leña debido a la mayor permanencia de las personas en los hogares y a las limitaciones en la eficiencia térmica de las viviendas. Los resultados subrayan el papel significativo de variables como el tamaño de la vivienda y la temperatura local en el aumento de emisiones, mientras que factores como la densidad urbana y la proximidad al centro urbano no demostraron ser

determinantes en la reducción de la huella de carbono, sugiriendo la necesidad de explorar medidas de planificación urbana más adaptadas a las condiciones locales. La dependencia de la leña, profundamente vinculada a factores culturales y económicos, refuerza la urgencia de implementar políticas públicas que promuevan alternativas energéticas sostenibles y mejoren la eficiencia térmica de las viviendas, mediante incentivos a tecnologías de calefacción de menor impacto y la creación de un mercado sostenible de leña. En conjunto, estos hallazgos presentan una base para reorientar estrategias de política energética en ciudades intermedias y ponen de relieve la importancia de considerar características socioeconómicas y culturales en la formulación de políticas climáticas urbanas adaptativas.

Por último, la morfología de la ciudad, aspecto que podría controlarse por medio de planificación urbana, contrario a las expectativas, no demostró ser tan influyente en las emisiones de GEI por energía. En ciudades intermedias de densidades bajas resalta la importancia de abordar los patrones de consumo y de eficiencia energética, con especial foco en compensar y controlar el alto consumo de leña por calefacción. En este sentido, una de las limitantes del estudio es haber realizado la encuesta de forma telefónica, dado que Chile estaba en cuarentena. Así, el estudio se puede replantear con una encuesta puerta a puerta y una distribución geográfica determinada, lo que permitiría observar el efecto de la renta en la materia en estudio. A partir de los resultados, se sugiere concentrar esfuerzos públicos en la creación de incentivos para un mercado de leña más sostenible que involucren tanto a productores como a consumidores, considerando aspectos como la proporción de la renta del hogar que es destinada exclusivamente a calefacción. Considerando también que los cambios en la huella de carbono según la variación de las condiciones climáticas refuerzan la idea de un impacto ambiental mayor de las ciudades en la estación invernal, se plantea que las políticas y estrategias deben centrarse en acondicionar las viviendas, incluyendo a la vez, por supuesto, las dinámicas cambiantes de los estilos de vida de las personas, especialmente en situaciones críticas.

Agradecimientos

La investigación fue realizada gracias al financiamiento de ANID - Proyecto “Impactos del Covid-19 en la Huella de Carbono de Hogares de Chile”, ANID COVID 0159 (2020-2021), <https://huellacovid.cl/>; Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Fondo de Financiamiento de Centros de Excelencia en Investigación ANID FONDAP I 523A0004; Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España (Proyecto de Investigación PID2021-128227OB-I00 y TED2021-132184B-I00); y la Generalitat de Catalunya (Proyecto de investigación 2021SGR00189).

La autora principal desea agradecer el apoyo de las siguientes instituciones: Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales (IEUT UC), Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) y Centro de Energía UC.

Referencias bibliográficas

- 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*. Documento de trabajo N° 7. Red de Pobreza Energética. <https://pobrezaenergetica.cl/wp-content/uploads/2023/01/DT7.-Caracterizacion-mercado-de-la-leña-en-Chile.pdf>
- Aloi, A., Alonso, B., Benavente, J., Cordera, R., Echániz, E., González, F., Ladisa, C., Lezama-Romanelli, R., López-Parra, Á., Mazzei, V., Prieto-Quintana, D., Rodríguez, A. & Sañudo, R. (2020). Effects of the COVID-19 lockdown on urban mobility: Empirical evidence from the city of Santander (Spain). *Sustainability*, 12(9), 3870. <https://doi.org/10.3390/su12093870>
- Andreoni, V. (2021). Estimating the European CO₂ emissions change due to COVID-19 restrictions. *Science of the Total Environment*, 769, 145115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145115>
- Andrews, C. J. (2008). Greenhouse gas emissions along the rural-urban gradient. *Journal of Environmental Planning and Management*, 51(6), 847-870. <https://doi.org/10.1080/09640560802423780>
- Arimura, M., Ha, T. V., Okumura, K. & Asada, T. (2020). Changes in urban mobility in Sapporo city, Japan due to the COVID-19 emergency declarations. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 7, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100212>
- 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?* Naciones Unidas, CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/45677/S1900711_es.pdf
- Belloc, I. & Molina, J. A. (2023). Are greenhouse gas emissions converging in Latin America? Implications for environmental policies. *Economic Analysis and Policy*, 77, 337-356. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.11.022>
- Brown, M. A. & Logan, E. (2008). *The residential energy and carbon footprints of the 100 largest U.S. Metropolitan Areas*. Georgia Tech Working Paper Series, 39. <http://hdl.handle.net/1853/22228>
- Bulkeley, H. & Newell, P. (2023). Governing climate change. A brief history. En H. Bulkeley & P. Newell, *Governing Climate Change* (pp. 1-25). Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9781003219828-1>
- Chiang, L. E., Castro, F. A. & Molina, F. A. (2023). Socioeconomic and environmental benefits of substituting firewood with charcoal briquettes produced from biomass residues in the Forestry Belt in Chile. *Energy for Sustainable Development*, 77, 101341. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101341>
- 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>
- Ewing, R. & Rong, F. (2008). The impact of urban form on US residential energy use. *Housing Policy Debate*, 19(1), 1-30. <https://doi.org/10.1080/10511482.2008.9521624>

- Fatmi, M. R. (2020). COVID-19 impact on urban mobility. *Journal of Urban Management*, 9(3), 270-275. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2020.08.002>
- Forster, P. M., Forster, H. I., Evans, M. J., Gidden, M. J., Jones, C. D., Keller, C. A., Lamboll, R. D., Quéré, C. L., Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C.-F., Richardson, T. B., Smith, C. J. & Turnock, S. T. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nature Climate Change*, 10(10), 913-919. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0>
- Frey, H. (2003). *Designing the City: Towards a more sustainable urban form*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203362433>
- Glaeser, E. L. & Kahn, M. E. (2010). The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3), 404-418. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2009.11.006>
- Global Carbon Budget (2023) – with major processing by Our World in Data. “Annual CO₂ emissions – GCB” [dataset]. Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [original data]. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- 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. M. & Lee, H. (2015). The paradox of the sustainable city: Definitions and examples. *Environment, Development and Sustainability*, 17(6), 1267-1285. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9604-z>
- 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*, 76, 1107-1115. <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. P., 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 (CR2). <https://www.cr2.cl/contaminacion/>
- IQAir. (2023). *Most polluted city ranking based on annual average PM2.5 concentration (µg/m³) – South America*. <https://www.iqair.com/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. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38-52. <https://doi.org/10.1177/0739456X05285119>
- Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J. & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models*. McGraw-Hill.
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J. P., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F. & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10(7), 647-653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>

- 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>
- Martínez, D. R., Albín, J. L., Cabaleiro, J. C., Pena, T. F., Rivera, F. F. & Blanco, V. (2009). El criterio de información de Akaike en la obtención de modelos estadísticos de rendimiento. *XX Jornadas de Paralelismo*, A Coruña, 16-18 de septiembre de 2009, pp. 439-444.
- Mollay, U. (2010). *Energy aware spatial planning: impact potential of settlement structures and opportunities for assessment tools to support sustainable municipal development*. Tesis de maestría, Technische Universität Wien. <https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-53232>
- Montejano, J. (2017). El principio de densificación como argumento central de la sustentabilidad urbana: Una revisión crítica. En J. Montejano & C. Caudillo (Coords.), *Densidad, diversidad y policentrismo: ¿planeando ciudades más sustentables?* (pp. 57-83). Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", A.C.
- Morero, B., Durán, R., Calvo, R. & Urquiza, A. (2021). Debates latinoamericanos en torno a la pobreza energética. En A. Urquiza, B. Morero, E. Costa, J. Chemes, I. Sánchez Lizama, I. Yáñez, J. P. Soler, M. Proaño, P. Bertinat, M. Svampa, R. Durán & T. Roa Avendaño (Eds.), *Energías ¿Para quiénes?* (pp. 8-23). Heinrich Böll Stiftung Cono Sur.
- 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. https://www.dii.uchile.cl/-/ris/RIS2020/p5_impactos_covid19_consumo_electrico.pdf
- Muñiz, I. & Rojas, C. (2019). Urban form and spatial structure as determinants of per capita greenhouse gas emissions considering possible endogeneity and compensation behaviors. *Environmental Impact Assessment Review*, 76, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.02.002>
- Muñiz, I., Rojas, C., Busuldu, C., García, A., Filipe, M. & Quintana, M. (2016). Forma urbana y huella ecológica en el Área Metropolitana de Concepción (Chile). *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 42(127), 209-230. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612016000300009>
- 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>
- Norman, J., MacLean, H. L. & Kennedy, C. A. (2006). Comparing high and low residential density: life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 10-21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2006\)132:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10))

- Oestreich, L., Rhoden, P. S., da Silva Vieira, J. & Ruiz-Padillo, A. (2023). Impacts of the COVID-19 pandemic on the profile and preferences of urban mobility in Brazil: Challenges and opportunities. *Travel Behaviour and Society*, 31, 312-322. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2023.01.002>
- 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*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo, Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/aaq-opazo_d/pdfAmont/aaq-opazo_d.pdf
- 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. En 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. Casiellas, M. Castro, J. Chahuán, D. Christie, L. Cordero, ... S. Tolvett (Eds.), *El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile* (pp. 18-28). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.
- Pacheco, P., Salini, G. & Mera, E. (2021). Entropía y Neguentropía: una aproximación al proceso de difusión de contaminantes y su sostenibilidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 167-185. <https://doi.org/10.20937/RICA.53688>
- Paravantis, J. A., Tasios, P. D., Dourmas, V., Andreakos, G., Velaoras, K., Kontoulis, N. & Mihalakakou, P. (2021). A regression analysis of the carbon footprint of megacities. *Sustainability*, 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>
- Riquelme, C. (2020). *Caracterización espacial de la pobreza energética en Chile*. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183251>
- Rodríguez, M. J. & Mora, R. (2001). Análisis de regresión múltiple. En 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., Simon, F., Muñiz, I., Quintana, M., Irarrázaval, 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>
- Romero, H. (2021). Islas, ondas de calor y concentración de contaminación atmosférica como indicadores de segregación. En A. Pardo & M. Reyes (Eds.), *Acercamientos multidisciplinares a experiencias de segregación, migración y marginación en contextos latinoamericanos* (pp. 199-230). Universidad de Guanajuato.
- Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M. & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 36(109), 35-62. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612010000300002>
- Rong, F. (2006). *Impact of urban sprawl on US residential energy use*. Ph.D. Dissertation, School of Public Policy, University of Maryland.

- Salazar, G. (2018). The incongruities of sustainability: An examination of the UN Earth Summit Declarations 1972-2012. En P. Spinozzi & M. Mazzanti (Eds.), *Routing Sustainable Development Towards a Culture of Wellbeing* (pp. 46-62). Routledge.
- Samaniego, J., Alatorre, J. E., Van der Borgh, 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
- Seto, K. C., Golden, J. S., Alberti, M. & Turner II, B. L. (2017). Sustainability in an urbanizing planet. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8935-8938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606037114>
- Shigetomi, Y., Kanemoto, K., Yamamoto, Y. & Kondo, Y. (2021). Quantifying the carbon footprint reduction potential of lifestyle choices in Japan. *Environmental Research Letters*, 16, 064022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfc07>
- Soto-Cortés, J. J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma Económico*, 7(1), 127-149. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5926288>
- Sporchia, F., Marchi, M., Petraglia, A., Marchettini, N. & Pulselli, F. M. (2024). The pandemic effect on GHG emission variation at the sub-national level and translation into policy opportunities. *Journal of Environmental Management*, 349, 119539. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119539>
- 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. En 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 MP2,5 en el centro y sur de Chile* (pp. 29-33). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.
- VandeWeghe, J. R. & Kennedy, C. (2007). A spatial analysis of residential greenhouse gas emissions in the Toronto census metropolitan area. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 133-144. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1220>
- Villalobos, C., Chávez, C. & Uribe, A. (2021). Energy poverty measures and the identification of the energy poor: A comparison between the utilitarian and capability-based approaches in Chile. *Energy Policy*, 152, 112146. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112146>
- 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. & 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., 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>