TRANSICIÓN ENERGÉTICA A NIVEL RESIDENCIAL | Cocción y Calefacción en América Latina

INFORME GENERAL DE MEDICIONES EN CHILE, COLOMBIA Y BRASIL

UNA INICIATIVA DE:
Global Methane Hub

IMPLEMENTADO POR:
EBP
Stanford University
Universidad Mayor
USP
Universidad de los Andes Colombia
30 años futuro latinoamericano

I. INTRODUCCIÓN:

1. Contexto Global

Actualmente se estima que el aumento de la concentración atmosférica de metano (CH_4) contribuye con el 35% del calentamiento planetario total asociado con los gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos, convirtiéndolo, tras el CO_2, en el segundo principal impulsor del cambio climático antropogénico (IPCC AR6 2023). El metano, con un tiempo de vida atmosférico de 11.2 años, se considera un contaminante climático de vida corta. Sin embargo, y a pesar de su corta vida atmosférica, el CH_4 tiene un alto potencial de calentamiento global 28 veces mayor que el del CO_2. Estas características hacen que controlar las emisiones de metano sea un paso imperativo para limitar el calentamiento global en el corto plazo: si esas emisiones pueden reducirse rápidamente, las concentraciones atmosféricas deberían disminuir poco después (en una escala de décadas, no de siglos), y también lo hará el calentamiento que causa. Sin una rápida reducción de las emisiones globales de metano, no es factible cumplir los objetivos del Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura global.

Si bien se cree que la contribución de la quema de combustibles a las emisiones globales de metano es menor, el IPCC estima que la incertidumbre en dichas emisiones es muy alta. La razón para dicha incertidumbre es que existen pocas mediciones directas de las tasas de emisión, por lo que esfuerzos para determinarlas experimentalmente puede ayudar a desarrollar factores de emisión más confiables. El uso de combustibles fósiles en usos finales residenciales, como es el caso del uso de gas natural residencial, es una fuente importante de dióxido de carbono (CO_2) durante la combustión. El Metano, por su parte, se puede producir en pequeñas cantidades durante la combustión debido a la combustión incompleta de los hidrocarburos en el combustible. Su tasa de emisión depende fuertemente de la temperatura de la caldera o la estufa. Sin embargo, las fugas de metano durante procesos de encendido o apagado pueden ser fuentes significativas de emisión. Para fuentes de combustión como estufas pequeñas y de combustión al aire libre en residencias, se espera que las tasas de emisión son más altas.

Desde el punto de vista del impacto sobre la calidad del aire intramural por el uso de gas natural en cocción residencial ha sido poco estudiado, pues la mayoría de los esfuerzos en ese sentido se han dedicado a entender las emisiones de combustibles sólidos. Pocos estudios se han centrado en estimar las tasas de emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO_2), y monóxido de carbono (CO). Ambos compuestos son contaminantes del aire asociados a múltiples efectos negativos sobre la salud.

Investigaciones recientes han demostrado que incluso cuando están apagados, los calentadores de gas (Lu et al., 2020) y las estufas y hornos de gas (Lebel, 2022) siguen filtrando metano y benceno a los hogares. Por otra parte, la exposición al NO_2 de las estufas de gas se ha relacionado con un mayor riesgo de asma en los niños (Gruenwald, et al., 2022). Los calefactores interiores a gas, comunes en el mundo en desarrollo, son fuentes masivas de mayor exposición a la contaminación del aire interior (Ruiz et al., 2010). Se estima que la electrificación de aparatos para cocinar y para calefaccionar traerán mejores resultados de salud (Smith, et al., 2022). Los co-beneficios esperados en la calidad del aire intramural y en la salud asociados a detener el uso de combustibles fósiles, pueden acelerar el proceso de electrificación de los usos finales de la energía, particularmente para los equipos de uso doméstico.

Este proyecto tiene como objetivo, por medio de evidencia científica, entregar los insumos para que países como Chile, Colombia y Brasil adopten programas para apoyar la eliminación

gradual del uso de combustibles sólidos y electrodomésticos a gas natural en favor de alternativas totalmente eléctricas y eficientes.

a) Contexto Colombia

Colombia representa el 0,41% de las emisiones globales de GEI. El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) reportado en el BUR3 indica que en 2018 las emisiones de GEI de Colombia se estimaron en 302.9 $MtCO_{2eq}$. La contribución promedio de cada GEI entre 1990 a 2018 fue de 72.4% para CO_2, 22.9% para metano, 4,40% para N_2O, y el resto para sustancias agotadoras del ozono. En particular, la proporción de CH4 ha aumentado del 19,8% en 1990 al 24,3% en 2018. Para el año 2018, la distribución de estas emisiones por categoría IPCC fue de 59.1% para AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra), 30.7% de Energía, 6,8% de Residuos y 3,5% de IPPU (Procesos industriales y uso de productos). Por su parte, para el año 2020, las emisiones de metano fueron 80.1 $MtCO_{2-eq}$ y se proyectaba que crecerían un 14% más para 2030, alcanzando 91.6 $MtCO_{2-eq}$ para ese año (VITO, UniAndes 2020). La partición sectorial proyectada de estas emisiones para 2030, según las categorías de emisiones del IPCC, es del 60% para AFOLU, del 29% para Residuos y el 11% restante se atribuye principalmente a Energía.

De acuerdo con el BUR3 de Colombia, el sector Residencial (Categoría IPCC 1A4b) generaba 5.64 $MtCO_{2-eq}$ en el año 2018, lo que equivale a 1.9% de las emisiones nacionales para ese mismo año y al 6.1% de las emisiones provenientes del sector de Energía. De estas emisiones, el 22.9% correspondía a emisiones de metano. Las emisiones en ese sector involucran todas aquellas emisiones directas de gases efecto invernadero asociadas a usos residenciales, desde calor directo, refrigeración, aire acondicionado, o uso de leña, gas natural y otros energéticos para cocinar. En el caso colombiano, es importante resaltar que el Plan de Masificación de Gas, que inició en 1991, ha ampliado significativamente la cobertura del servicio de gas natural en el país, pasando de un consumo aproximado de 2.780 TJ en 1990 a 50.066 TJ en el 2018 . (UPME, 2017b). En el mismo periodo, el consumo de leña en el sector residencial ha decrecido un 30% desde el inicio de la serie de tiempo reportada en el BUR.

b) Contexto Chile (emisiones metano a nivel residencial)

En el caso de Chile, las emisiones de metano alcanzaron 14.946 kt CO_2-eq en 2020, lo que representa aproximadamente el 14% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) en el país. Desde 1990, estas emisiones han crecido un 27%, y un 13% desde 2010. Según el inventario nacional, la mayor parte de estas emisiones proviene de los sitios de disposición de residuos sólidos (39%), seguido por la fermentación entérica (30%), el tratamiento y descarga de aguas residuales (9%), la gestión de estiércol (9%), las emisiones fugitivas relacionadas con el petróleo y gas natural (6%) y la quema de combustibles (5%).

En el sector residencial, en 2020 se emitieron 607.77 kt CO_2-eq y 4182 kt de CO_2 debido al uso de gas natural, el cual ha ido aumentando en los últimos años hasta representar 34% del consumo total en 2021. El número de clientes residenciales en 2020 alcanzó 777,257, mientras que los clientes industriales sumaron solo 19,606. Sin embargo, el consumo total del sector industrial fue significativamente mayor, con 797.0 millones de m^3, frente a los 230.9 millones de m^3 consumidos por el sector residencial. La mayor parte del consumo residencial se concentra en la Región Metropolitana, que representa el 82.45%, seguida por la Región de Valparaíso con 16.12%, mientras que el resto de las regiones suman solo el 1.42% del total.

Chile ha fortalecido su compromiso climático en línea con el Pacto de Glasgow y bajo el Acuerdo de París, con el objetivo de revertir la tendencia creciente de emisiones de metano para 2025. Entre las medidas propuestas se encuentran la reducción de residuos orgánicos, la captura de emisiones en vertederos, y la implementación de tecnologías en el sector agrícola para disminuir las emisiones provenientes del ganado. En el sector energético, se prevén controles para reducir las emisiones fugitivas y mitigar la quema de combustibles fósiles. Estas acciones refuerzan el compromiso de Chile con sus metas climáticas y la transición hacia una economía más sostenible (Cardemil, 2023).

c) Contexto Brasil (emisiones y energía a nivel residencial)

Brasil siendo signatario de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) tiene como uno de sus compromisos presentar sus Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El último Inventario Nacional contemplado en la Cuarta Comunicación Nacional presenta las emisiones de GEI de Brasil de 1990 a 2016. En 2016, las emisiones de Brasil totalizaron 1.467 Tg CO_2e, siendo el CO_2 el GEI más emitido. El sector agrícola contribuyó con el 33,2% de las emisiones totales, el sector energético con el 28,9% y el sector UTCUTS con el 27,1%. El IPPU y los residuos aportaron porciones más pequeñas de emisiones, representando el 6,4% y el 4,5%, respectivamente.

La información del informe resumen del Balance Energético Brasileño para 2020 destaca las diversas fuentes de consumo de energía en los entornos residenciales de todo el país, destacando el predominio de la electricidad con un 46%, en la totalidad de las instalaciones del hogar. Sin embargo, la dependencia de otros combustibles como la leña (26,6%), el gas licuado de petróleo (GLP) (24,4%) y el gas natural (GN) con un 1,5% varía significativamente según la región (EPE, 2020).

De acuerdo con la estimación del SEEG (SEEG Brasil) en 2023 se emitieron 2.296 Mt CO2e que se distribuyen de la siguiente manera: Deforestación (46%), Agricultura (28%), Generación de Energía (18%), Residuos (4%) y Procesos Industriales (4%). Analizando únicamente el sector energético, tenemos la siguiente distribución: Transporte (53,3%), Industria (16,2%), Producción de Combustibles (13,2%), Residencial (6,4%) y otros (11,2%). Con base en estos valores, el impacto del sector residencial en las emisiones de gases de efecto invernadero es aproximadamente del 1,2%.

Considerando también los datos de SEEG de 2023, las emisiones residenciales estimadas de CO2, metano (CH_4) y óxidos de nitrógeno (NO_x) fueron, respectivamente, 17.876.012 toneladas, 298.239 toneladas y 31.159 toneladas. Al considerar únicamente los gases de efecto invernadero (CO2 y CH_4) y convertir la masa de metano en toneladas de CO2 equivalente (utilizando el Potencial de Calentamiento Global – PCG, según el informe AR5), se observa que aproximadamente el 68% de las emisiones totales están relacionadas con el dióxido de carbono, mientras que el 32% se asocia con el metano.

En la Región Sur, los climas más fríos y las prácticas tradicionales conducen a un mayor uso de leña, mientras que las regiones Norte y Nordeste muestran una tendencia hacia los combustibles sólidos debido a las limitaciones económicas. El GLP, aunque representa un porcentaje menor del consumo total de energía, desempeña un papel crucial, especialmente como combustible principal para cocinar con más del 70% de su uso en los hogares.

II. DESCRIPCIÓN PROYECTO MONITOREO DE GASES POR COCCIÓN

El proyecto de monitoreo consiste en determinar experimentalmente las tasas de emisión de gases asociados a la combustión de gas natural en cocinas residenciales, tales como; metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO2), benceno (C6H6) y monóxido de carbono (CO) en tres países Brasil, Colombia y Chile. Este monitoreo es muy relevante dado que no existe registro de parte de estos gases producto de uso doméstico en Latinoamérica.

Las emisiones atmosféricas por la utilización de cocinas a gas natural pueden generarse ya sea por fugas (pequeñas fallas en las válvulas o empaques que permiten se escape el gas natural sin quemar), o bien como producto de la combustión. Con el propósito de cuantificar estas emisiones en diversas ciudades de Latinoamérica de forma precisa y reproducible, se conformó un equipo de expertos en monitoreo de contaminantes globales y locales de la Universidad de Stanford (USA), Universidad Mayor (Chile), Universidad de los Andes (Colombia) y la Universidad de São Paulo (Brasil). Con el respaldo de instituciones de carácter y experiencia internacional en el desarrollo de proyectos asociados a sostenibilidad y cambio climático en el entorno construido, como son la consultora EBP Chile y la Fundación Futuro Latinoamericano.

En el caso del gas metano (CH_4), el cual constituye más del 95% del gas natural, éste se emite a la atmósfera por fugas o también cuando la combustión del gas en los quemadores no es completa. Por su parte, el dióxido de carbono (CO_2), es el principal gas que se genera en la combustión del gas natural (y de cualquier otro combustible fósil), y, por tanto, se espera que se emita sostenidamente durante la utilización de los quemadores. El monóxido de carbono (CO), es un producto de la combustión incompleta, y se genera ya sea porque el proceso de combustión no cuenta con suficiente oxigeno o bien por que la temperatura del proceso no es suficientemente alta.

En el caso de Latinoamérica no existe registro de parte de estos gases producto de uso doméstico, y por tanto, las mediciones directas que se realizan en este proyecto serán una fuente clave para cuantificar las emisiones, de estos gases, asociadas a cocinas residenciales. Las mediciones se distribuirán de la siguiente manera:

Tabla 1 Distribución de mediciones y tipos de gases a medir.

PAÍS	CANTIDAD DE VIVIENDAS/CIUDAD	GASES A MONITOREAR
Chile	30 en Santiago	CH_4, CO_2, NO_2, CO, y C_6H_6.
	15 en Temuco	
Brasil	30 en São Pablo	CH_4, CO_2, NO_2
Colombia	20 en Bogotá	CH_4, CO_2, NO_2, CO

1. Protocolo de monitoreo

Para determinar las tasas de emisión de CO_2, CO, CH_4, y NO_X por el uso de cocinas a gas natral se adoptó la metodología aplicada recientemente en otros estudios (Lebel et al. 2022; Kashtan et al. 2023). Estos protocolos contemplan operar uno a uno quemadores de la cocina y medir los gases generados en el proceso con equipos de alta precisión.

El método se basa en aislar la cocina del resto de la vivienda para así minimizar el intercambio de aire entre la cocina y el exterior (***Figura 1***). El aislamiento se lleva a cabo mediante el despliegue de barreras plásticas. De esta forma, los gases generados durante el uso de la cocina se acumularán rápidamente. Adicionalmente, como se conoce de forma precisa el volumen de la zona que se aisló, es posible entonces calcular, a partir de las concentraciones medidas, la cantidad total de cada gas que fue emitido por el uso de la cocina.

a) Descripción de la metodología o fases del proceso de monitoreo

- **Ventilación.** Una vez instalados los equipos y las conducciones para los análisis se realiza una ventilación de la cocina utilizando ventiladores y abriendo ventanas para que los niveles de gases al interior de la cocina a medir sean similares a los niveles de fondo o basales (CH_4, CO_2, CO, NOx y benceno). Se procede a tomar las mediciones hasta observar una estabilización en ellas, etapa denominada "basales". Esta etapa se repite después de cada ventilación que se realice entre las mediciones. La medición “basal” de benceno dura más tiempo y se realiza dos veces al inicio de esta.
- **Estado estacionario “off”.** Cuando se alcanza una concentración estable tras la ventilación, se sella la cocina para iniciar la etapa estacionaria de apagado ("Estado Estacionario off"). Esta etapa consiste en observar las mediciones de los gases, con el espacio cerrado y los quemadores apagados, bajo circulación constante. Este proceso dura alrededor de 10 minutos.
- **Estado estacionario “On”.** Una vez completada la etapa de "Estado Estacionario off", se ingresa a la cocina y se enciende el quemador más grande. Para replicar mejor las condiciones de uso cotidiano, se colocó una olla con agua sobre el quemador durante esta fase simulando el efecto de cocinar. Durante este proceso de encendido y por efecto de la combustión del gas natural, las concentraciones de CO_2, CO, NOx, y CH_4 aumentan con el encendido del quemador, alcanzando un máximo (Kashtan et al. 2023). Cuando la concentración de estos gases se estabiliza, se desocupa y cierra la cocina para iniciar la toma de tiempo de esta etapa de medición, que dura aproximadamente 10 minutos. Al finalizar la etapa de "Steady state on", se ingresa a la cocina y se apaga el quemador, esperando unos diez segundos antes de salir. El analizador Pyxis recopila 3 puntos de datos donde cada uno es registrado cada 12 minutos aproximadamente. Entonces, cada ciclo de medición (desde el Estado estacionario On hasta el decaimiento de N_2O) para el benceno dura 60 minutos
- **Medición tasa de intercambio.** Después de la etapa anterior, se ventila la cocina para reducir las concentraciones de todos los gases. Luego se vuelve a sellar la cocina, se inyecta CO_2 hasta que se observa un máximo de 2000 – 3000 ppm. Desde afuera, se observa cómo la concentración de CO_2 sube hasta alcanzar un máximo. Cuando este gas se mezcla con el aire del interior de la cocina, las concentraciones disminuyen y se estabilizan. Este procedimiento permite establecer la tasa de intercambio de aire, que es una variable clave para inferir la tasa de emisión. El procedimiento anterior se repite hasta haber medido los gases, idealmente en todos los quemadores de la cocina.

Figura 1 Ilustración de la metodología aplicada durante el proceso de monitoreo de gases en cocinas a gas natural

El proceso de monitoreo en una vivienda consta de varias fases, cada una orientada a caracterizar un tipo de uso específico de la estufa. Un resumen visual de este proceso se presenta en la Figura 1 que presenta las fases del proceso de monitoreo:

2. Dispositivos de medición

Los rangos de concentración que deben ser detectados por los equipos para los gases de estudio son relativamente bajos en comparación con sus niveles ambientales. Por ejemplo, la concentración típica de CO_2 ronda los 430 ppm[1]. La concentración de metano es cercana a los 1800 ppb[2]. En un entorno urbano, la concentración típica de CO puede variar entre 0.15 y 1.5 ppm. Por su parte, la concentración típica de NO2 en un entorno urbano está entre los 20 y los 200 ppb. Debido a esto es necesario utilizar dispositivos de medición con una sensibilidad suficiente. En el caso de CH_4, NO_2, y CO, se requieren equipos capaces de detectar cambios en la concentración de estos gases en concentraciones del orden de 10 partes por cada 1,000,000,000 (o 10 ppb). En el caso del CO2, cuya abundancia en la atmósfera es mayor y se genera en cantidades mucho más altas durante el proceso de combustión, basta con tener equipos con precisión de 10 partes por cada 1,000,000 (o 10 ppm).

[1] 1 ppm es una parte por millón. Es decir, una molécula del gas en cuestión por cada 1.000.000 de moléculas de aire.
[2] 1 ppb denota una parte por cada mil millones. Es decir, 1 parte por cada 1.000.000.000 de moléculas de aire.

a) Dispositivos de medición utilizados en Chile

A continuación, se presenta el detalle de los instrumentos de medición utilizados en Chile.

Tabla 2 Especificaciones de los equipos de medición utilizados en la campaña de medición en Chile.

GAS	FABRICANTE	MODELO	PRINCIPIO DE DETECCIÓN	PRECISIÓN*
CH4	Aeris	Pico Mobile LDS	Espectroscopía NDIR	±0 a 100 ppm
	LICOR	LI7810	Espectroscopia de Absorción	±0 ppb a 100 ppm
CO_2	Li-COR	LI7810	Espectroscopia de Absorción	±10 ppm a 10.000 ppm
	Aeris	Pico Mobile LDS	Espectroscopia de Absorción	± 0 ppm a 10.000 ppm
CO	Li-COR	Pico Mobile LDS	Espectroscopia de Absorción	± 1ppm a 500 ppm
	Thermo	Thermo Analyzer 48i	Espectroscopía NDIR	±0 A 10.000 ppm
NO, NO_2, para determinar NOx emitido	Thermo	Thermo Analyzer 42iQ	Quimoluminiscencia	±0 a 1000 ppm
Benzeno	Pyxis	GC BTEX	Detector de Fotoionizaciòn	±1-200 ppb
Temperatura	Onset	HOBO U10 datalogger	Termistor	± 0.53°C

b) Dispositivos de medición utilizados en Colombia

A continuación, se presenta el detalle de los instrumentos de medición utilizados en Colombia.

Tabla 3 Especificaciones de los equipos de medición utilizados en la campaña de medición en Bogotá, Colombia.

GAS	FABRICANTE	MODELO	PRINCIPIO DE DETECCIÓN	PRECISIÓN*
CH4	Picarro	GasScouter G4301	Espectroscopía NDIR	± 20.0 ppb
CO2	Li-COR	Li-850	Espectroscopía NDIR	± 10.0 ppm
CO	HORIBA	APMA-370	Espectroscopía NDIR	± 25.0 ppb
NOx	Thermo Scientific	42i	Quimoluminiscencia	± 0.40 ppb
Temperatura	Onset	HOBO U10 datalogger	Termistor	± 0.53°C

Nota: Espectroscopía NDIR corresponde a espectroscopía infrarroja no dispersiva. La precisión es aquella reportada en la hoja de especificaciones de cada instrumento publicada por el fabricante.

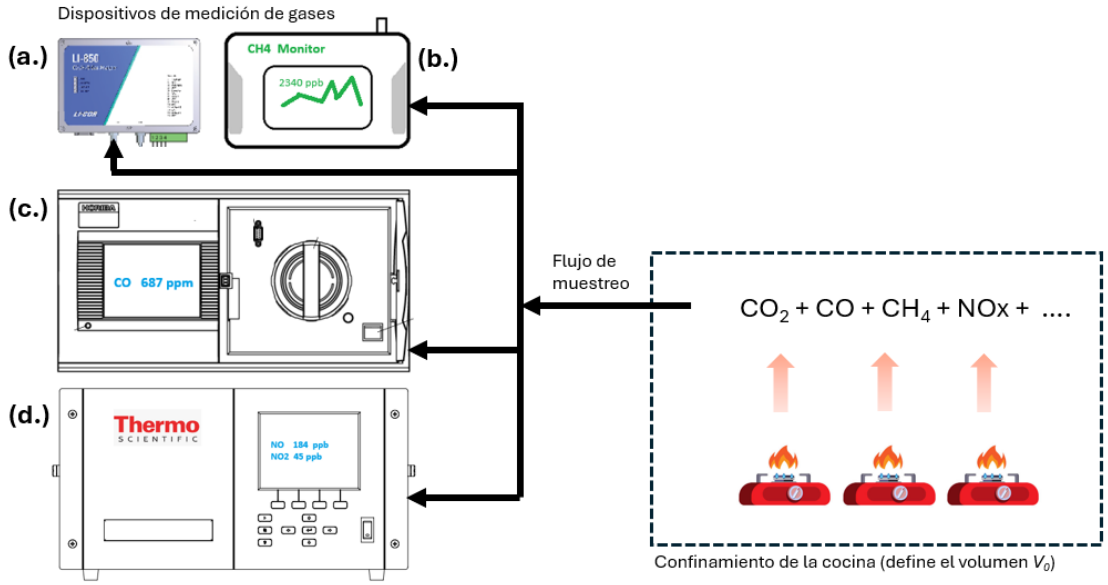


Figura 2 Esquema del proceso de monitoreo de tasa de emisión de gases. A través de una sonda se toma un flujo de muestra que proviene de la cocina que fue confinada mediante el despliegue de barreras plásticas. El flujo de muestra es conducido a los diferentes equipos de medición de gases (a.) Li-COR 850 para CO_2, (b.) Picarro G4301 para CH_4, (c.) Horiba APMA-370 para CO, y (d.) Thermo Scientific 42i para NOx.

c) Dispositivos de medición utilizados en Brasil

A continuación, se presenta el detalle de los instrumentos de medición utilizados en Colombia.

Tabla 4 Especificaciones de los equipos de medición utilizados en la campaña de medición en São Paulo, Brasil.

GAS	FABRICANTE	MODELO	PRINCIPIO DE DETECCIÓN	PRECISIÓN*
CH4	ABB	Microportable Greenhouse Gas Analyzer - MGGA (LGR-ICOS ™ GLA Series)	Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS)	± 0.01 - 100 ppm.
CO2				± 10 ppm - 20000
NOx	Ecotech	Serinus 40	Chemiluminescence	± 0 to 20 ppm

3. Definición de elementos de objetos de muestreo.

Se definieron muestreos en cocinas donde se define cocina una habitación diseñada y equipada específicamente para la preparación, cocción y, en algunos casos, almacenamiento de alimentos. Generalmente, una cocina incluye electrodomésticos como artefacto estufa[3] o artefacto cocina, hornos, refrigeradores y microondas, así como superficies de trabajo, fregaderos, y gabinetes para almacenar utensilios y alimentos. La cocina es un área central en el hogar, utilizada tanto para la preparación de comidas.

Dentro de la cocina centramos el estudio en diferentes tipos de artefactos estufas, concretamente estufas que usan gas natural como combustible para calentar y cocinar los alimentos. Definimos una

[3] Para efecto del presente estudio se utilizará el concepto artefacto estufa en vez de artefacto cocina, para evitar conflictos con el nombre de recinto cocina.

"estufa" como una superficie plana que contiene entre 2 y 6 elementos de cocción individuales denominaos “quemadores”. Los "quemadores" son aquellos elementos cocción que utilizan una llama de gas para cocinar y que son el objeto de análisis del presente estudio.

Por otra parte, se analizaron dos tipos de recintos de cocinas durante el muestreo, aquellas que son abiertas y las que son cerradas.

4. Definición de muestra

Cada unidad muestral se establece como una unidad cocina con un “artefacto estufa a gas natural” donde se realizan mediciones en dos quemadores los cuales se usan en modo alto de poder calorífico y bajo poder calorífico para estimar las emisiones y fugas desde los mismos siguiendo metodologías previamente establecidas (Lebel et al., 2022, Kashtan et al., 2023) (Figura 3).

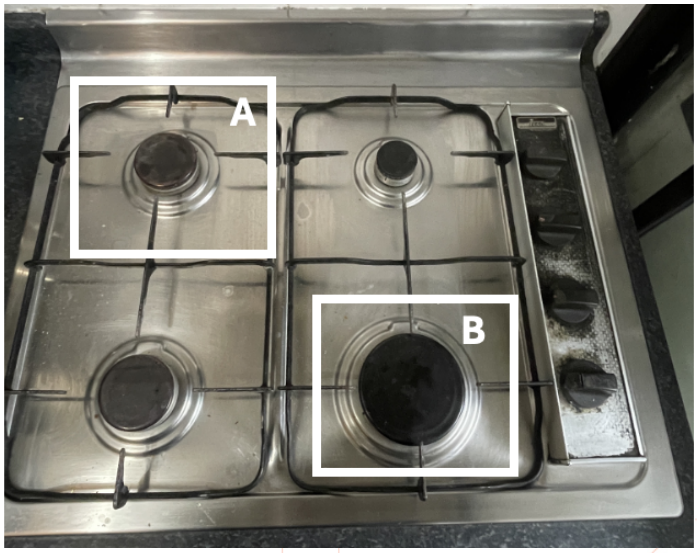


Figura 3 A quemador de menor tamaño y quemador de mayor tamaño de una de las cocinas usadas para la toma de muestras en Santiago de Chile (Foto tomada por Abenezer Shankute)

5. Selección y caracterización de viviendas

a) Campaña de difusión y selección de voluntarios

En cada país, se realizó una campaña de difusión, que consistió en publicar en RRSS y correos electrónicos a contactos de las diferentes instituciones que participan en el proyecto, con información sobre el proyecto para captar voluntarios.

Para llevar a cabo esta etapa, cada país ha diseñado un formulario para recopilar información sobre las viviendas participantes. El formulario incluye preguntas sobre la ubicación de la vivienda, las características de la cocina y la estufa, así como detalles sobre la ventilación y el uso de esta, sean ventanas o extractores. Además, se solicitó información sobre la disponibilidad de los participantes para coordinar las visitas y logística del equipo de medición. Los criterios utilizados para la selección de las viviendas participantes fueron los siguientes:

- Estrato socioeconómico: esta distribución varía según país

- Ubicación: considerar viviendas en diferentes partes de las ciudades a intervenir.
- Tipo de cocina: Se han considerado dos tipos de cocina: abiertas y cerradas. Se ha dado prioridad a las cocinas cerradas, ya que facilitan el proceso de medición.
- Uso de gas: Solo se seleccionaron viviendas en las que la cocina funciona con gas, ya que es el foco principal del estudio.

i. Campaña en Chile

La primera Campaña de difusión para Chile fue desarrollada entre el 23 de abril hasta el 09 de mayo del 2024. En este periodo se logró registrar 24 voluntarios para la región metropolitana (RM) y 10 voluntarios para Temuco.

La caracterización de los voluntarios interesados de la RM estuvo representada por 15 comunas; Las Condes, La Reina, Vitacura, Ñuñoa, Maipú, Conchalí, Quinta Normal, San Joaquín, Santiago, Lo Barnechea, Recoleta, San Bernardo, Renca, Cerrillos y La Florida. Con 19, 5% de representatividad en Renca y Las Condes y 14,6 en Ñuñoa. En el caso de Temuco 9 voluntarios eran de Temuco y uno de Padre de la Casas.

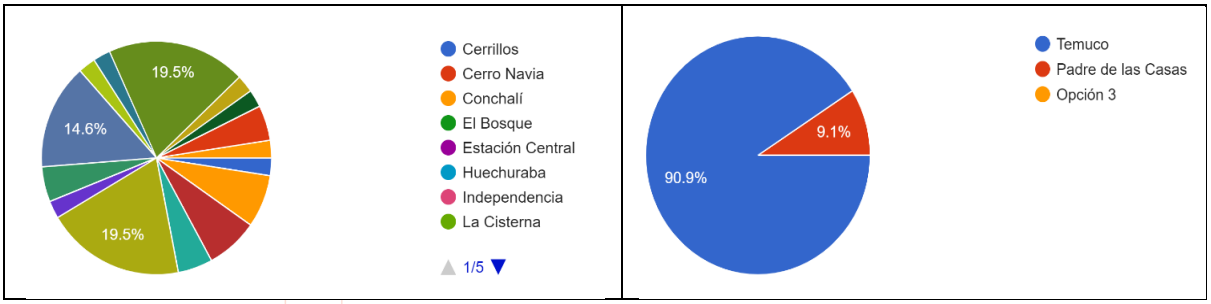


Gráfico 1 Gráfico de distribución comunal de voluntarios en Santiago

Por otra parte, se levantó que el 55% de las viviendas eran casas y el 45% departamentos. En cuanto a materialidad se obtuvo que el 63% era en hormigón, el 28% en ladrillo y sólo el 9% en madera, estas últimas ubicadas principalmente en Temuco. Otro dato relevante de la caracterización de las viviendas es que el 57% de ellas eran construidas antes del año 2007, lo que determinaba que tenían, pero condición de aislación térmica. Además, el 59% de las cocinas eran recintos cerrados y sólo 41 abiertos y finalmente el más relevante fue que el 33% de los voluntarios declaró no contar con cocina a gas natural, lo que obligó a buscar otros mecanismos de selección basados principalmente en contactos conocidos de los investigadores del proyecto.

Caracterización de viviendas y cocinas

Con el objeto de contar con una muestra representativa de los diferentes tipos de viviendas y cocinas en las dos ciudades seleccionadas de Chile y de identificar los factores que podrían influir en la calidad de aire interior de las viviendas. Se realizó un análisis de la representatividad de tipologías de viviendas que se basó en cuatro factores: el estrato social de la comuna, tipo de vivienda (casa o departamento), tipo de materialidad (ladrillo, hormigón, madera), año de construcción (<2007 o >2007), este punto es relevante dado que es el año donde cambió la reglamentación térmica de viviendas en Chile y a partir de esa fecha las viviendas cuentan con mejor estándar térmico de envolvente. Además, las viviendas fueron caracterizadas según zona urbana (Santiago o Temuco), tipo de cocina (abierta o cerrada) y si contaban con gas natural o gas licuado.

Tabla 5 Descripción de las viviendas analizadas hasta 31 de agosto 2024 (n=45)

acterística	n (%)
Ciudad	
Santiago	34 (75%)
Temuco	11 (25%)
Comunas de Santiago	
Ñuñoa	9 (26%)
Vitacura	8 (23%)
Las Condes	7 (20%)
Providencia	3 (9%)
Renca	2 (6%)
La Reina	2 (6%)
Lo Barnechea	1 (3%)
Peñalolén	1 (3%)
La Florida	1 (3%)
Tipo de vivienda	
Casa	29 (65%)
Departamento	16 (35%)
Tipo de cocina	
	14 (31%)
Departamento	31 (69%)
¿Cuántos años tiene su cocina?	
<=3 años	7 (22%)
4-6	12 (38%)
7-9	1 (3%)
10+	11 (35%)
Característica	n (%)
¿Cómo se enciende su cocina?	
Chispa eléctrica	22 (70%)
Una luz piloto	1 (3%)
A mano	8 (25%)
¿Cuántas personas viven en la vivienda?	
1	2 (6%)
2	8 (25%)
3-4	19 (61%9
5+	2 (6%)

Fuente: Elaboración propia.

Una vez caracterizadas todas las viviendas se identificó que el 98%contaba con gas natural por lo que se debió continuar con la campaña, ya que se requería que todas las viviendas contarán con gas natural.

ii. Campaña en Colombia

De un total de 42 viviendas que se alcanzaron al lanzar la convocatoria considerada, se preseleccionaron 23 para participar en el estudio. La selección de las viviendas se realizó en función de criterios como la ubicación por localidad, estrato socioeconómico y proximidad entre viviendas para optimizar la logística de la campaña. Como resultado, las viviendas elegidas se encuentran distribuidas en 11 de las 20 localidades de la ciudad, y se incluyó al menos una vivienda en cada estrato económico (**Figura 4**). Las visitas a las viviendas preseleccionadas se coordinarán de acuerdo con la disponibilidad de los residentes. Las viviendas no seleccionadas estarán disponibles para ajustar la muestra si es necesario. Mantendremos una comunicación continua con los participantes para resolver dudas y garantizar el éxito del estudio

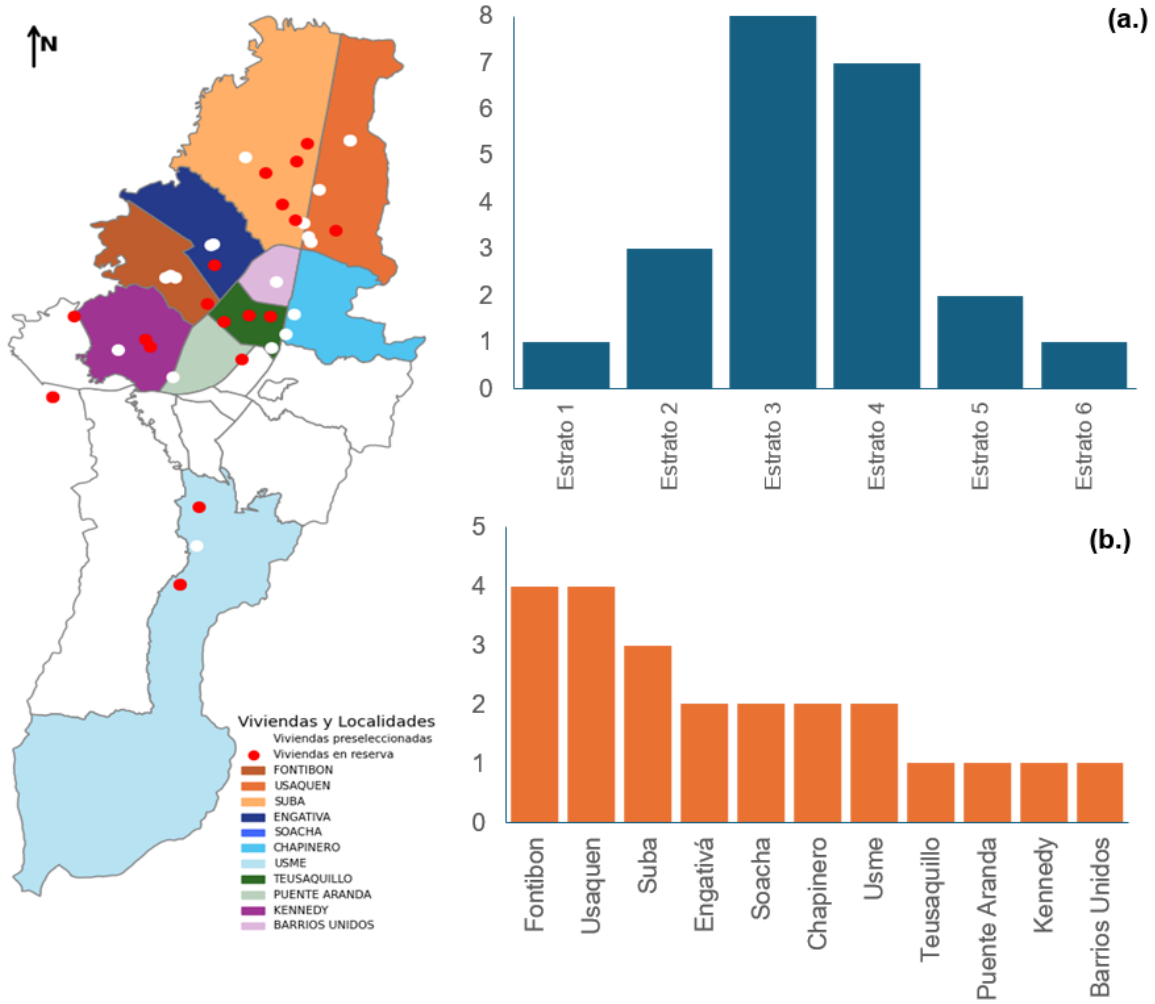
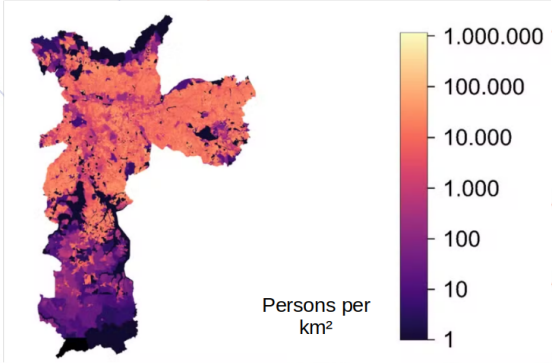


Figura 4. Mapa de la ciudad de Bogotá mostrando la distribución espacial de las viviendas seleccionadas. Se muestra también su distribución de acuerdo con (a.) estrato socioeconómico de la vivienda y (b.) la localidad en la que están ubicadas. Localidad es una división administrativa utilizada en la ciudad de Bogotá.

iii. Campaña en Brasil

Región de estudio: São Paulo



La ciudad de São Paulo es conocida como la más poblada del estado de São Paulo y de Brasil, según el censo de 2022 la población de São Paulo es de 11.451.999 personas, y sumando con las ciudades de la región metropolitana de São Paulo llega a alrededor de 20 millones de habitantes.

Figura 5 Map of population density in the city of São Paulo (SP) - CENSUS 2022/IBGE

Distribución de viviendas:

La mayoría de las residencias de voluntarios para el estudio estaban ubicadas en la ciudad de São Paulo, con muestras adicionales de ciudades vecinas en la región metropolitana, como se muestra en el mapa de distribución de viviendas Figura 1. El mapa destaca la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP), con la ciudad de São Paulo marcada en rojo. Los triángulos representan la distribución de las residencias de voluntarios, lo que indica que la mayor parte de la recopilación de datos se realizó dentro de la ciudad de São Paulo.

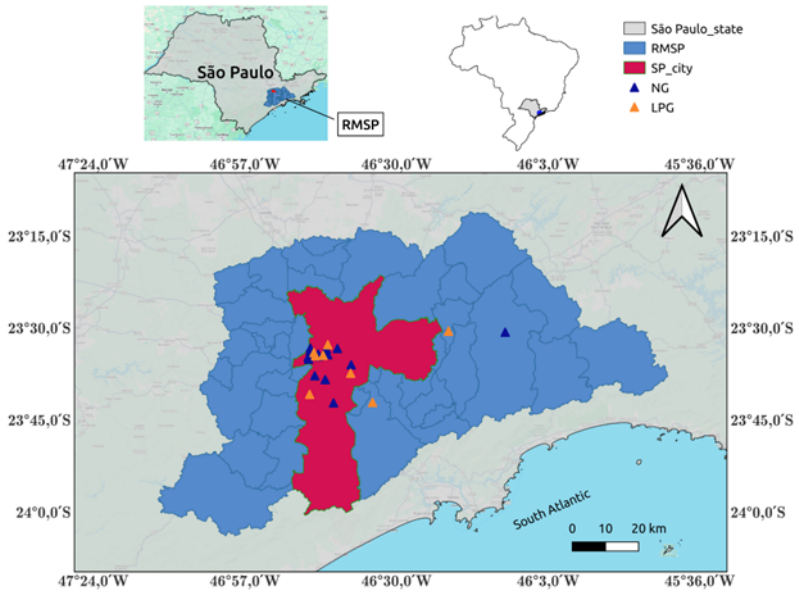


Figura 6 Distribución espacial de las viviendas

El 86% de los hogares tenía ingresos superiores a tres salarios mínimos y el 14% tenía ingresos inferiores. Considerando a los participantes del proyecto, no se encontraron factores estructurales relevantes en estos dos grupos de viviendas que pudieran haber influido en los resultados del estudio. Las diferencias se concentran en la calidad de los acabados utilizados y en el tamaño y ubicación de las propiedades.

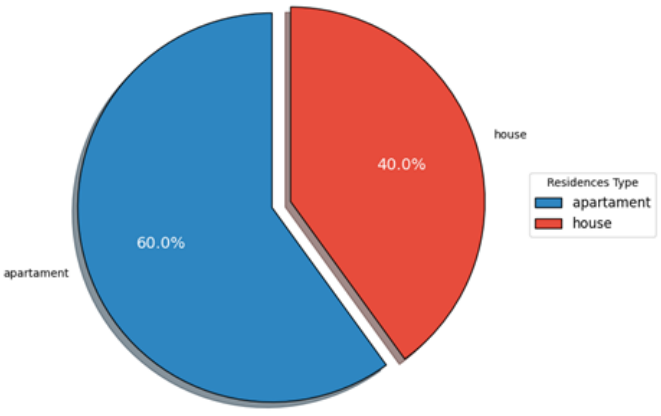


Gráfico 2 Distribución entre viviendas y departamentos

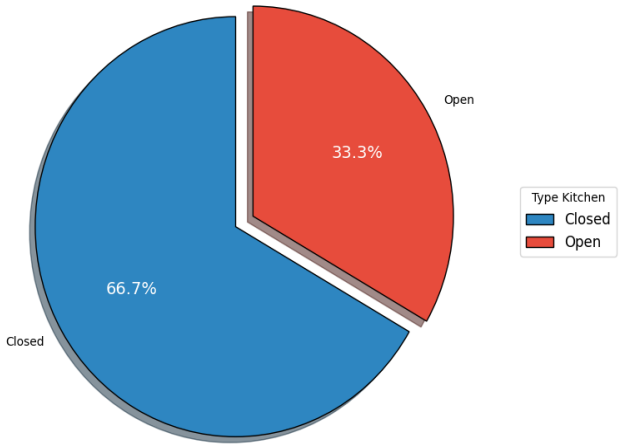


Gráfico 3 Distribución entre cocinas abiertas y cerradas

Las residencias participantes incluyeron apartamentos y casas, lo que refleja la variedad de viviendas en São Paulo. El 60% de las muestras fueron recolectadas en apartamentos, mientras que el 40% fueron en casasGráfico 2, que generalmente tenían cocinas más grandes. Aproximadamente el 67% de las cocinas eran del tipo cerrado, mientras que el 33% eran abiertas, requiriendo sellado. En la Figura 7, se muestra un ejemplo de cocinas abiertas (SP_CASA01) - alrededor del 33% de las cocinas eran del tipo abierto - lo que requiere colocar un sello. Aproximadamente el 67% de las cocinas eran del tipo cerrado (SP_CASA23), no necesitaron colocar sello.

Figura 7 tipos de cocinas

En Brasil existen dos tipos de gases para cocinar: GLP (Gas Licuado de Petróleo) y gas natural (GN). En este contexto, el uso de gas natural es más común en la realización de tareas en São Paulo.

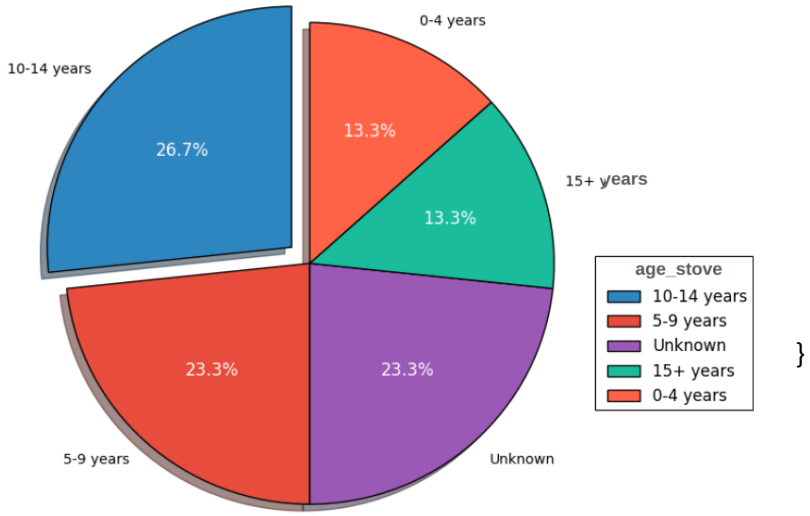


Gráfico 4 Distribución antigüedad estufas

Las cocinas donde se realizaron los muestreos contaban con estufas de edades más diversas (1- 40 años de uso). La edad más común es la de 10-14 años, representando ~27% del total de estufas registradas. Seguido del rango de 5-9, y quienes no sabían respondieron con igual proporción. Las más pequeñas entre las estufas medidas se encontraban en los extremos, de 0-4 años y mayores de 15 años.

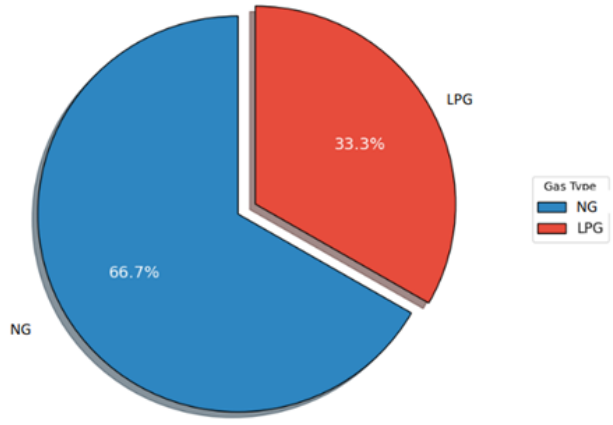


Gráfico 5 Distribución tipo de combustibles de las estufas.

6. Contacto con voluntarios post-selección.

En los tres países, una vez definido los voluntarios finales, el equipo de investigadores se comunicó con las personas interesadas para confirmar que sus viviendas cumplían con el principal criterio de inclusión que es tener una cocina conectada a la red de gas natural. Luego de esa confirmación, se procedió con la entrega de mayor información sobre el estudio y con agendar la visita.

Además, se explicó que el muestreo se hacía en 3 horas por lo que se realizaba en dos opciones de turnos, uno en la mañana (llegada a las 9:00) y el segundo en la tarde (llegada a las 14:00). Por otra parte, se informó que el equipo de trabajo llevaba todos los instrumentos y accesorios necesarios para realizar los muestreos. Adicionalmente, se informó que los residentes de las viviendas no podían entrar a la cocina durante el muestreo (3 horas aproximadamente). El día anterior del muestreo, se informó los nombres de los técnicos que visitaban las viviendas y la hora de llegada a cada una.

Al llegar a la vivienda el día de la visita, se solicitó al propietario la firma del formulario de consentimiento, en el cual se explica los detalles del proyecto y se solicita autorización para tomar fotos en la vivienda. Complementario a lo anterior, se solicitaba al dueño de la vivienda contestar una breve encuesta para caracterizar la vivienda.

III. Metodología de estimación de la tasa de emisión

1. Metodología general

En los tres países se siguió el mismo procedimiento para la determinación de la tasa de emisión de los diversos gases, siguiendo muy de cerca la metodología descrita por Lebel et al. 2022 y Kashtan et al. 2023, que fue aplicada a viviendas de California, USA. El método se fundamenta en confinar la cocina, y homogeneizar las concentraciones de los gases emitidos, de forma que, si se mide la concentración de estos gases, se pueda conocer la masa total de los mismos en el espacio confinado. El método para estimar la tasa de emisión de un gas "i" en nuestra campaña se realiza mediante un balance de masa de dicha especie en el dominio de control (es decir, en el espacio de la cocina que fue aislado del exterior y del resto de la vivienda mediante plásticos). Asumiendo que una vez emitidos, los gases no reaccionan químicamente de forma significativa, la evolución de la concentración C_i (e.g., en µmol/mol (ppm) o nmol/mol (ppb)[4]) de dicho gas en el tiempo t se expresa como:

$$V_0 \frac{dC_i}{dt} = E_{v,i} - \lambda V_0 (C_i - C_{i,b})$$

Donde $\frac{dC_i}{dt}$ es la tasa de cambio de la concentración medida del gas "i" (ppb/min) en el intervalo de tiempo "t" $C_{i,b}$ (ppb) es la concentración basal o ambiental del gas "i", V_0 es el volumen de la cocina (m^3), λ (min^{-1}) es la tasa de intercambio de aire, equivalente a la llamada ACH[5] (*Air Changes per Hour).* De esta forma, al medir de forma precisa la concentración C_i en el tiempo, es posible determinar la tasa de emisión volumétrica instantánea del gas "i", $E_{v,i}$ en (µL/min). Por lo tanto, el método depende de la medición precisa de las concentraciones C_i en el tiempo, de la concentración de fondo o basal del gas "i" ($C_{i,b}$), en la determinación de la tasa de intercambio λ, y en la medición del volumen V_0 de la cocina confinada. El análisis se llevó de forma homogénea en cada país, siendo las diferencias más notables los diferentes equipos que se utilizaron para la medición, y el diferente conjunto de gases analizados en cada caso. En todos los países se siguió la misma metodología básica. Miembros del equipo colombiano participaron en mediciones en la ciudad de Santiago de Chile para asegurar que la misma metodología fuese aplicada en los tres países. En el caso de las emisiones de Benceno, un procedimiento ligeramente diferente debe ser aplicado pues el tiempo de toma de muestra es muy largo en comparación con la escala de tiempo de intercambio de aire. El detalle de este método se muestra en la sección Metodología Aplicada en Chile.

Estimación de la tasa de intercambio de aire

El primer paso es estimar la corrección por intercambio de aire entre el espacio confinado y el exterior, es decir saber cuánto gas puede escaparse de la cámara de medición por deficiencia en el sellado (Lebel et al., 2022). Para esto se usó también la concentración de un gas conocido (por ejemplo, N_2O o CO_2) dependiendo de la disponibilidad de éstos durante la toma de muestra. Para esto se usan ecuaciones que estiman como la concentración del gas conocido inyectado va decayendo en función del tiempo. Para esto se usó la siguiente ecuación. Durante la inyección la concentración decayó siguiendo la siguiente ecuación

$$C_{i,t} - C_{i,b} = \left(C_{i,0} - C_{i,b}\right) e^{-\lambda t}$$

[4] 1 ppb = 1 nmol/mol (nanomol por cada mol de aire) o equivalentemente 1 µL/m^3 (microlitro por cada m^3 de aire)
[5] ACH típicamente se expresa en intercambios por hora (i.e., $hora^{-1}$) . De forma que $ACH = 60\,\lambda$.

Donde $C_{i,t}$ es la concentración del gas "i" (N_2O o CO_2) en el tiempo t, $C_{i,b}$ es la concentración basal del gas i (medida previamente), $C_{i,0}$ es la concentración del gas x en el tiempo 0, y la tasa de decrecimiento de la concentración concentración factorizado por e. En esta ecuación debemos estimar lambda por lo que resolviendo con la siguiente ecuación.

$$Ln(C_{i,t} - C_{i,b}) = -lt + Ln(C_{i,0} - C_{i,b})$$

Por lo que se cumple que la pendiente de la recta con respecto al tiempo es -λ y $C_{i,0}$ es la concentración en el tiempo 0. La tasa de intercambio l, se puede entonces determinar haciendo una regresión lineal de los datos recopilados durante un periodo posterior a la inyección del gas en cuestión (N2O o CO2), siempre y cuando no haya fuentes de dicho gas en el volumen de control durante el periodo de análisis. Esta metodología se aplicó en los tres países.

Estimación de volumen de las cocinas:

Para poder estimar el volumen o la masa emitida de cada gas y los correspondientes factores de emisión es importante conocer el volumen de la cocina. El volumen del espacio confinado se puede determinar mediante dos métodos:

- Dilución de gases. Este método se basa en la liberación de una cantidad conocida de un específico del cual no haya fuentes conocidas en el espacio en cuestión. Si la concentración de ese gas puede medirse de forma precisa concentración (asumiendo una concentración homogénea del gas), entonces puede inferirse el volumen del espacio.
- Medición geométrica del volumen. Este método consiste en la medición geométrica del espacio confinado así como de los electrodomésticos y otros elementos que puedan restar volumen libre a la cocina.

Metodología de dilución de gases. Este método se basa en la inyección de un gas puro para observar como la concentración sube durante un periodo de entre 30 y 200 segundos. Aumentando esta desde el nivel basal hasta una concentración elevada. Posteriormente es estima la concentración mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{0.5\ L}{\Delta C_E} X 1.000.000$$

Donde V es el volumen de la cocina, ΔC_E es la diferencia entre la concentración más baja y más alta del gas inyectado (ppm) y 1.000.000 es un factor de corrección aplicado al equipo. Así mismo se tomaron medidas de la cocina simplificando a la figura geométrica más simple para de esta manera tener un volumen aproximado de la misma. Este método ha sido usado varias veces y demuestra buenas correlaciones en cuanto a los equipos. En el caso de los muestreos realizados en Santiago se usaron dos gases N_2O y CO_2 (Lebel et al., 2022).

Metodología de medición geométrica del volumen. Algunos estudios reportan que la medición del volumen con este procedimiento difiere solamente en un 3% de la determinación del volumen por medio del método de dilución de gas. Por lo tanto, en la campaña de medición realizada en Bogotá, se tomaron registros precisos de las dimensiones del espacio de estudio para así poder establecer el volumen del espacio de control (Lebel et al. 2022).

2. Detalle metodológico de Chile

Estimaciones de volumen de las cocinas:

En Santiago se utilizaron ambos métodos, el de dilución de gases, y el de medición geométrica del volumen de la cocina confinada.

Estimación de las emisiones de gases

Una vez determinada la tasa de intercambio de aire en el espacio confinado l (que es equivalente a ACH), podemos establecer una corrección a las concentraciones siguiendo la siguiente ecuación:

$$C'_{g,t} = C_{g,t} + C_{correction}$$

Donde $C'_{g,t}$ es la concentración con el factor de corrección en el gas para el tiempo t, $C_{g,t}$ es la concentración sin corregir y el $C_{correction}$ es el factor de corrección de gas que se calcula siguiendo la siguiente ecuación

$$C_{Correction} = \sum_{i=0}^{t} (C_{g,t} - C_{g,b}) x e^{-\lambda(t_i - t_{i-1})} - (C_{g,t} - C_{g,b})$$

Donde $C_{g,b}$ es la concentración basal ti es el tiempo en el punto i (toma de medida).

De esta manera podemos obtener la concentración real de cada gas corregida a lo largo de todo el proceso de toma de muestras y podemos estimar de forma correcta la cantidad de gas que se emite durante proceso de encendido o apagado. Con estas concentraciones se puede estimar de forma adecuada la cantidad de gas que se emite durante el proceso de encendido y apagado y podemos estimar las emisiones por ejemplo de Metano de forma. Por lo que podemos estimar las concentraciones de gases emitidos en el proceso de mediciones en el cambio On/Off. Por lo que podemos estimar las emisiones durante el encendido y apagado,

En el caso del estado estacionario usamos las concentraciones corregidas mediante la aproximación de un modelo lineal ajustado a los datos durante cada periodo de medición. Siguiendo este la formula general de una regresión lineal simple de la siguiente manera.

$$y = mx + c$$

Donde sustituyendo por los factores de la regresión obtenemos la siguiente ecuación

$$C'_g = \left(1.000.000 \frac{Q}{V}\right) t + C$$

Donde C'_g es la concentración corregida en ppm, 1.000.000 es el factor de corrección de ppm. Q es el factor de emisión en L h^{-1}, V es el volumen de la cámara (estimado según lo mostrado anteriormente) en L $_t$ es el tiempo en horas de la medición y C es intercepto de la recta cuando t=0

Por lo que al obtener la pendiente de la recta m podemos estimar el factor de emisión en L por hora (Q) de la siguiente manera:

$$m = 1.000.000 \frac{Q}{V}$$

Resolviendo para Q:

$$V \times m = 1.000.000 \times Q$$

$$Q = \frac{V \times m}{1.000.000}$$

Por lo que podemos obtener los factores de emisión en cada uno de los periodos medidos.

En el caso del Benceno se usó la aproximación propuesta en Kashtan et al., 2023 donde se estiman las tasas de emisión promedio teniendo en cuenta los puntos tomados, recordemos que las emisiones de benceno no se toman en continúo debido a la metodología de estimación donde el equipo utilizado permite tomar una muestra cada 12 minutos aproximadamente.

Para esto se usó la siguiente ecuación:

$$f_b = V\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} \quad \lambda\left(\frac{C_{b,ti} - C_{b,ti-1} \times e^{-\lambda(t_i - t_{i-1})}}{1 - e^{-\lambda(t_i - t_{i-1})}} - C_{b,b}\right)$$

Donde f_b es la emisión de benceno a lo largo de las medidas en unidades de volumen por tiempo, V es el volumen de la cocina o de la cámara sellada por unidad de tiempo, λ es el factor de intercambio entre la cocina y el exterior medido en unidades de tiempo inversas (i.e h^{-1}), n es el número de muestras que se tomaron de benceno, $C_{b,t}$ es la concentración de benceno en el tiempo t (en ppb). $C_{b,b}$ es la concentración de benceno medido a nivel basal.

Si asumimos en la ecuación anterior un valor de λ=0 entonces la ecuación sustituyendo nos quedaría de la siguiente manera:

$$V\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} \quad l\left(\frac{C_{b,ti} - C_{b,ti-1} \times e^{-\lambda(t_i - t_{i-1})}}{1 - e^{-\lambda(t_i - t_{i-1})}} - C_{b,b}\right) = V\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} \quad \left(\frac{C_{b,ti} - C_{b,ti-1}}{t_i - t_{i-q}}\right)$$

Posteriormente se realizará la estimación de las emisiones basándose en la energía consumida basándose en cada quemador, pues se obtienen las emisiones de CO2 y la entalpía de combustión de metano por lo que siguiendo la siguiente reacción química:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

Y teniendo en cuenta las entalpias podemos saber la cantidad de metano consumido y la energía siguiendo la siguiente ecuación para estimar la entalpia de la reacción.

$$\Delta H_C = \Delta H_{f(Products)} - \Delta H_{f(Reactants)}$$

Adaptando la ecuación a la reacción anterior nos da como resultado:

$$\Delta H_C = \left(\Delta H_{f(CO_2)} + 2\Delta H_{f(H_2O)}\right) - \left(\Delta H_{f(CH_4)} + 2\Delta H_{f(O_2)}\right)$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación las entalpías de formación del H20 (-241.6 kJ mol^{-1}, CH4 (-76.2 kJ mol^{-1}), CO2 (-394.8 kJ mol^{-1}y O2 (0 kJ mol^{-1}) obtenemos que la entalpía final de la combustión es

$$\Delta H_{C,CH_4} = (-394{,}8 + 2\,(-241{,}6) - (-76{,}2 + 2(0))$$

Obteniendo un valor de energía de -801,8 kJ mol-1 lo cual es equivalente a 5011,9 J g-1 el cual convertiremos en unidades de tiempo al conocer los gramos que se emiten durante el periodo t obteniendo los factores en función de los J de energía emitidos por tiempo.

3. Detalle metodológico de Colombia

Siguiendo una metodología equivalente a la descrita en el punto anterior, se puede determinar la tasa de emisión promedio durante un tipo de operación específico de la cocina. Por ejemplo, si se enciende un quemador y se aplica la metodología, se puede determinar la tasa de emisión para ese quemador. Si se repite con otros quemadores, se puede también conocer la tasa de emisión de los quemadores adicionales. Para un tipo de operación específico, la tasa de emisión promedio de la especie "i" puede escribirse como:

$$\underline{E_i} = V_0 \left(\frac{\Delta C_i}{\Delta t} + \lambda \left(\underline{C_i} - C_{i,b} \right) \right) \frac{p}{RT}$$

En la ecuación anterior, $\underline{E_i}$ (mol/min) es la tasa de emisión promedio durante el periodo Δt bajo un modo de operación, y $\underline{C_i}$ es la concentración promedio durante ese mismo periodo. El factor $\frac{p}{RT}$ simplemente transforma la tasa de emisión de µL/min a mol/min. Las variables clave para determinar la tasa de emisión son el volumen V_0, la tasa de intercambio λ, y la concentración del gas (ambiental o basal, y aquella medida al interior de la cocina).

Una vez determinada la tasa de emisión $\underline{E_i}$, es posible expresar las emisiones por unidad de gas natural consumido. Si conocemos la composición promedio del gas natural (C_xH_y) y asumiendo que la mayoría del carbono contenido originalmente en el gas natural se emite como CO_2, CO, y CH_4, las moles totales de estas tres especies son un buen estimativo de las moles totales de Carbono contenidas en el gas natural consumido. Es decir, la tasa de consumo de gas natural, $\underline{q_{GN}}$ en (mol/min), será $\underline{q_{GN}} \approx (\underline{E_{CO_2}} + \underline{E_{CO}} + \underline{E_{CH_4}})/x$. Usando el poder calorífico del gas natural, LHV (MJ/mol), y el peso molecular de la especie (M_i en kg/mol) se puede estimar un factor de emisión para el gas "i" en unidades de kg/TJ o kg/MJ: $FE_i = M_i \underline{E_i} / (\underline{q_{GN}}\ LHV)$. Por convención, se utiliza el LHV (*Low Heating Value* o Poder Calorífico Inferior) para calcular el factor de emisión por unidad de energía. Los parámetros necesarios para este cálculo se detallan en la Tabla 6 composición química y propiedades físicas del gas natural usado en Bogotá.

Las mediciones directas de tasas de emisión pueden ser utilizadas para estimar factores de emisión por unidad de masa (e.g., kg de metano emitidos por cada kg de gas natural consumido) o por unidad de energía (e.g., kg de metano por cada TJ de energía). Esto permite que las tasas de emisión inferidas con nuestras mediciones puedan ser comparadas con los valores utilizados en inventarios nacionales. Para ello deben conocerse las propiedades físicas y químicas del gas utilizado. En el caso de Bogotá, la ciudad se alimenta de una mezcla de gas proveniente de los pozos de Apiay y Cusiana. Sus propiedades se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6 Composición química y propiedades físicas del gas natural distribuido en la ciudad de Bogotá, factores de emisión utilizados para los inventarios Nacionales. FE CO_2 y FE CH_4 se refiere a los factores de emisión usados en inventarios de emisiones de gases efecto invernadero. LHV and HHV son el poder calorífico inferior y superior del gas natural. Fuente: UPME- FECOC (Factores de Emisión de Combustibles Colombianos).

CARACTERÍSTICAS DEL GAS NATURAL USADO EN BOGOTÁ				
Componentes		%	Propiedades Físicas	
CH_4	Metano	82.27%	Densidad (kg/Nm^3)	0.83
C_2H_6	Etano	10.23%	#C promedio	1.14
C_3H_8	Propano	1.12%	#H promedio	4.19
C_4H_{10}	Butano	1.67%	Peso mol. (g/mol)	19.55
C_5H_{12}	Pentano	0.24%	LHV (MJ/kg)	45.05
C_6H_{14}	Hexano	0.02%	HHV (MJ/kg)	49.81
CO_2	Dióxido de carbono	3.43%	FE CO_2 (tCO_2/TJ)	56.39
N_2	Nitrógeno	0.70%	FE CH_4 ($kgCH_4$/TJ)	1.00

De acuerdo con datos de la Bolsa Mercantil de Colombia, durante los pasados 12 meses (sept. 2023 – sept. 2024), el consumo diario de gas natural en Bogotá fue de 12,438 MBTU, para un total de 4.5 millones de MBTU de gas natural consumidos durante ese periodo por el sector residencial[6].

Estimaciones del volumen V0 de las cocinas:

En la campaña en Bogotá, el volumen del espacio confinado se determinó geométricamente, tomando registros precisos de las dimensiones del espacio de estudio para así poder establecer el volumen del espacio de control.

Estimaciones de la tasa de intercambio ACH.

En Bogotá, se siguió el mismo procedimiento de determinación de la tasa de intercambio. Se usaron dos momentos durante las mediciones. Los momentos Estado Estable Off (SS off) posteriores a tener un quemador encendido, y en algunas otras viviendas, momentos específicos dedicados donde se inyectó CO2 al interior de la cocina.

4. Detalle metodológico Brasil

Para determinar con precisión las emisiones de gases en las cocinas residenciales, se adoptaron metodologías que combinan el cálculo del volumen del ambiente, la tasa de intercambio de aire (ACH) y el balance de masa de las concentraciones de gases monitoreadas. Estos enfoques garantizan una estimación confiable, lo que permite evaluar el comportamiento de las emisiones en diferentes condiciones operativas.

[6] BMC - Energía Tomada por Comearcializadores

Balance de masa y tasa de emisión

La tasa de emisión de un gas "i" se estimó utilizando un enfoque de balance de masa dentro del dominio de control, representado por el espacio de la cocina aislado del resto de la residencia mediante barreras de plástico. Suponiendo que los gases no experimentan reacciones químicas significativas después de ser emitidos, la evolución de la concentración C_(i,b) (mol/m³) a lo largo del tiempo se describe mediante la ecuación:

$$V_0 \ (dC_i)/dt=E_i-\lambda V_0 \ (C_i-C_{(i,b)})$$

Donde:

- C_(i,b) es la concentración basal del gas;
- V_0 es el volumen de la cocina (m³);
- λ es la tasa de troca de ar (ACH), en min^{-1}.

La medición precisa de las concentraciones de gas a lo largo del tiempo permite determinar la tasa de emisión instantánea del gas “i”. Esta metodología se aplicó a diferentes modos operativos de cocinas, como el uso de quemadores individuales, y la tasa de emisión promedio se calculó de la siguiente manera:

$$_(E_i)=V_0 ((\Delta C_i)/\Delta t+\lambda (_(C_i)-C_{(i,b)})) \ p/RT$$

Este método tiene en cuenta el volumen del entorno, las concentraciones de referencia y medidas y la tasa de intercambio de aire, proporcionando información detallada sobre las emisiones.

Estimación del volumen

La fórmula para calcular el volumen del ambiente (en litros) se basa en las dimensiones físicas del espacio que se mide, como una cocina:

Medido (L): V = (Alto x Ancho x Profundidad) x 1000

Además, se realizó una liberación controlada de un gas trazador (CO_2) para validar las estimaciones de volumen, suponiendo una dispersión homogénea del gas. Este enfoque combinado redujo las incertidumbres, asegurando una mayor precisión en los cálculos.

Determinación de la tasa de intercambio de aire (ACH)

La tasa de intercambio de aire λ se determinó después de ventilar la cocina y asegurar concentraciones similares a las del ambiente externo. Luego se realizó una liberación controlada de CO_2 y se monitoreó la tasa de decaimiento de la concentración, lo que permitió el cálculo preciso de la ACH. Este paso fue esencial para validar las mediciones y evaluar el grado de aislamiento en el ambiente.

Cálculo del factor de emisión

Una vez determinada la tasa de emisión (E_i), las emisiones se pudieron expresar por unidad de gas natural consumido q_GN, en función de la composición promedio del gas natural (C_x H_y).

Suponiendo que la mayor parte del carbono se emite como CO_2, CO y CH_4, la tasa de consumo viene dada por:

_q_GN≈〖(_E〗_(〖CO〗_2)+_E_CO+_E_(〖CH〗_4))/x

El factor de emisión 〖FE〗_i para el gas “i” se calculó utilizando:

〖〖FE〗_i=M_i _E〗_i/(_q_GN .LHV)

Donde:

- M_i es el peso molecular del gas “i”;
- LHV es el poder calorífico inferior del gas natural.

IV. RESULTADOS

1. Resultados Santiago de Chile

Se han realizado muestreos en 34 cocinas en Santiago de Chile, datos que han permitido realizar los primeros análisis los cuales están todavía los análisis comparativos y resultados para las casas en las cuales se han analizado los datos de forma preliminar.

Los muestreos han consistido en la toma de datos durante 3.5 horas aprox. sobre el comportamiento de dos quemadores por artefacto estufa. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un ciclo de medición de un quemador en una de las casas donde se tomaron muestras.

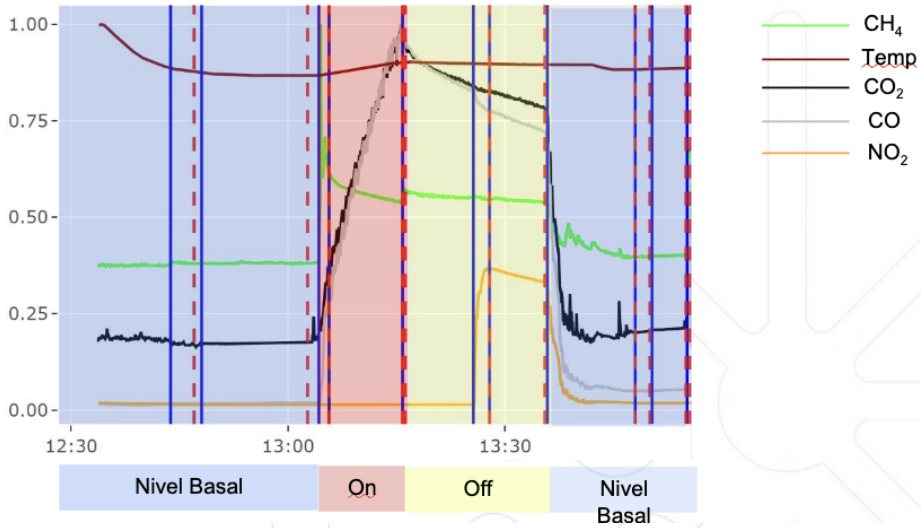


Figura 8 Esquema de una toma de muestra con niveles obtenidos para los diferentes gases medidos, así como la temperatura. En el mismo se encuentran demarcados los diferentes niveles de cada uno de los gases medidos exceptuando benceno

En la figura previa se aprecian los procesos de establecimiento o desempeño de concentraciones obtenidas en tendencia. En el mismo gráfico se aprecia el ciclo de mediciones desde la determinación de niveles basales (niveles de emisiones de gases antes de encender el quemador) hasta la obtención de los niveles en estado On y Off para la determinación de las concentraciones de cada uno de los gases en según qué estado del muestreo de quemador se estaba.

A continuación, se muestran algunos resultados de las emisiones de los gases muestreados a la fecha para las casas. En la **Figura 3** se muestran los valores medidos para los pulsos On y Off de metano en mg totales, donde se aprecian las diferencias entre las concentraciones cuando el quemador está en estado On y en estado Off. Como se aprecia en la figura pese a estar en posición Off hay equipos que emiten metano de forma importante. No obstante, éstas siempre son menores que cuando los equipos están funcionando, habiendo un rango de entre 1 y 10 órdenes de magnitud de diferencia en algunos casos.

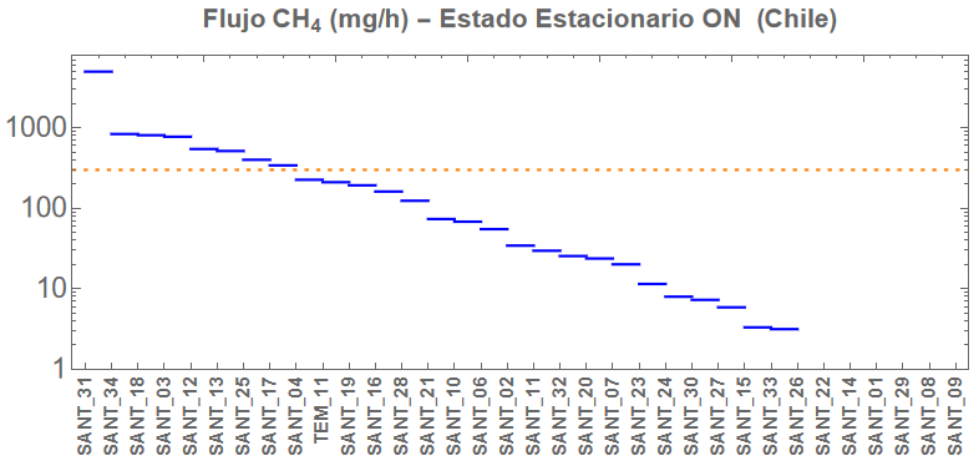


Figura 9 Flujos de emisión de metano por en mg/h para la operación tipo "Estado Estacionario ON" en las casas medidas totales en las diferentes casas en las que se ha medido en Santiago de Chile y cuyos datos han sido explorados

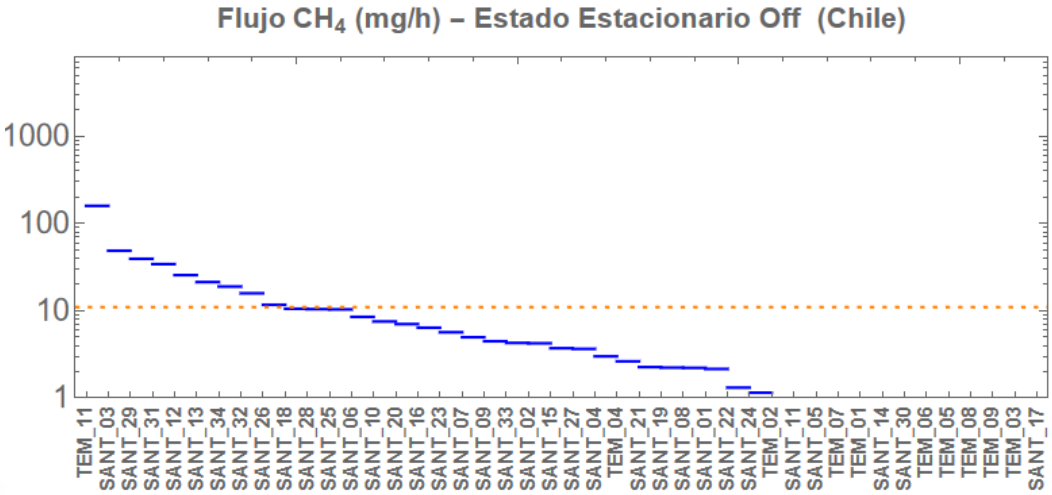


Figura 10 Flujos de emisión de metano por en mg/h en las casas medidas totales en las diferentes casas en las que se ha medido en Santiago de Chile y cuyos datos han sido explorados.

a) Estimación de los factores de emisión los gases medidos

i. Metano (CH_4)

Los resultados obtenidos comparan las emisiones de metano (CH_4) de quemadores individuales en Chile con las reportadas en estudios recientes en EE.UU. (Gráfico 6). En cuanto a Chile las emisiones de metano (CH_4) presentan un promedio de **319.5 mg/hora**, con una dispersión significativa entre los quemadores individuales. Algunos quemadores alcanzan valores extremos de hasta **6000 mg/hora**, lo que indica una alta variabilidad en las emisiones entre las casas examinadas. Al compararlo con la bibliografía los valores medios de emisiones de metano en Chile son de **319.5 mg/hora** (punto azul), mientras que los estudios en EE.UU., como el de **Kashtan et al. (2023)**, muestran emisiones medias más altas, con **387.3 mg/hora** (punto rojo). Sin embargo, el estudio de **Lebel et al. (2022)** reporta un promedio más bajo de **259 mg/hora** (punto púrpura), con medianas de emisiones que también son

más bajas que las chilenas. Es importante destacar que, aunque el valor promedio de Chile está por debajo del valor de Kashtan et al., 2023, la dispersión de los datos en Chile es significativa.

Es importante comentar que tras examinar los resultados vemos que cuando los quemadores se encuentran en estado Off se producen emisiones fugitivas que pueden aumentar las concentraciones a nivel intradomiciliario de forma importante. Teniendo en cuenta patrones de uso diario de cocinas podemos estimar que basándonos en el promedio de emisión de metano en estado On durante un día asumiendo un uso de 2 horas y un flujo de emisión de 319.5 mg/h se estarían emitiendo en promedio 0.64 g/dia de metano por día como consecuencia del uso. A eso habría que sumar la emisión diaria fugitiva que es en torno a 10.9 mg h en promedio por lo que podemos estimar que las emisiones fugitivas diarias estarían en torno a 0.24 g/día (27% emisiones fujitivas). Lo que nos daría unas emisiones totales de aproximadamente 0.9 g/día por cocina.

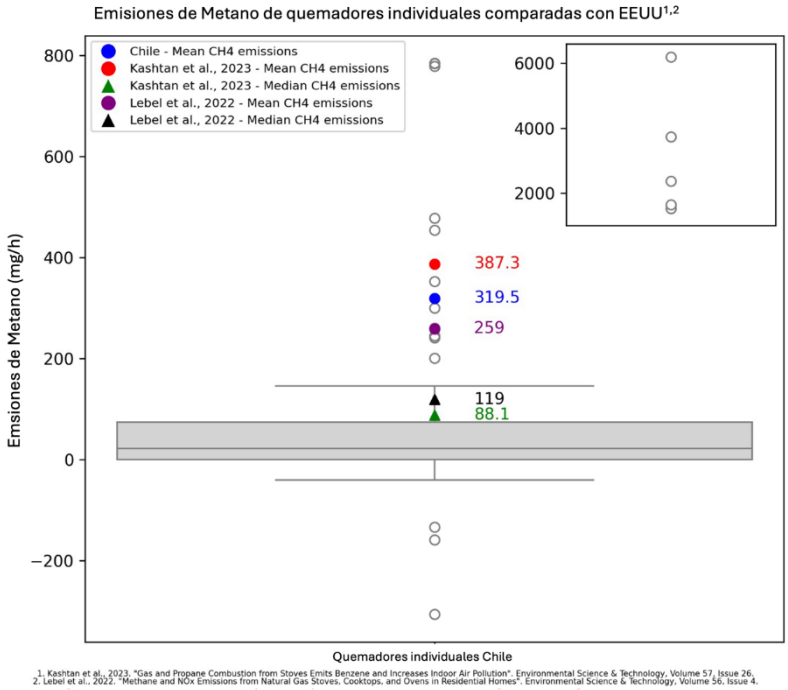


Gráfico 6 Comparación de los factores de emisión de Metano obtenidas en las casas de Santiago de Chile.

ii. Dióxido de Carbono (CO_2)

En cuanto al CO_2 reportado en el presente estudio las emisiones de dióxido de carbono (**CO_2**) de quemadores individuales en Chile (Gráfico 5), promedian **392.28 g/hr** (punto azul). Los datos de Chile presentan una gran variabilidad, con algunos quemadores individuales, mostrando emisiones que alcanzan hasta los **1000 g/hr** . Esta dispersión en las emisiones sugiere que hay diferencias significativas entre los quemadores en términos de eficiencia de combustión, lo que resalta una mayor variabilidad entre los diferentes equipos utilizados. Cuando se comparan las emisiones promedio de CO_2 en Chile (**392.28 g/hr**) con los estudios citados, se observa que las emisiones en Chile son más bajas en promedio. **Kashtan et al. (2023)** reporta un valor medio de **579.35 g/hr** (punto rojo) y una mediana de **591.31 g/hr** (triángulo verde) en sus estudios de EE.UU. Los valores más altos reportados en los estudios de EE.UU. sugieren que los quemadores utilizados en Chile, aunque presentan una alta variabilidad, tienen en promedio menores emisiones de CO_2. Sin embargo, es importante señalar

que algunos quemadores individuales en Chile presentan emisiones que se acercan a los valores más altos observados en EE.UU.

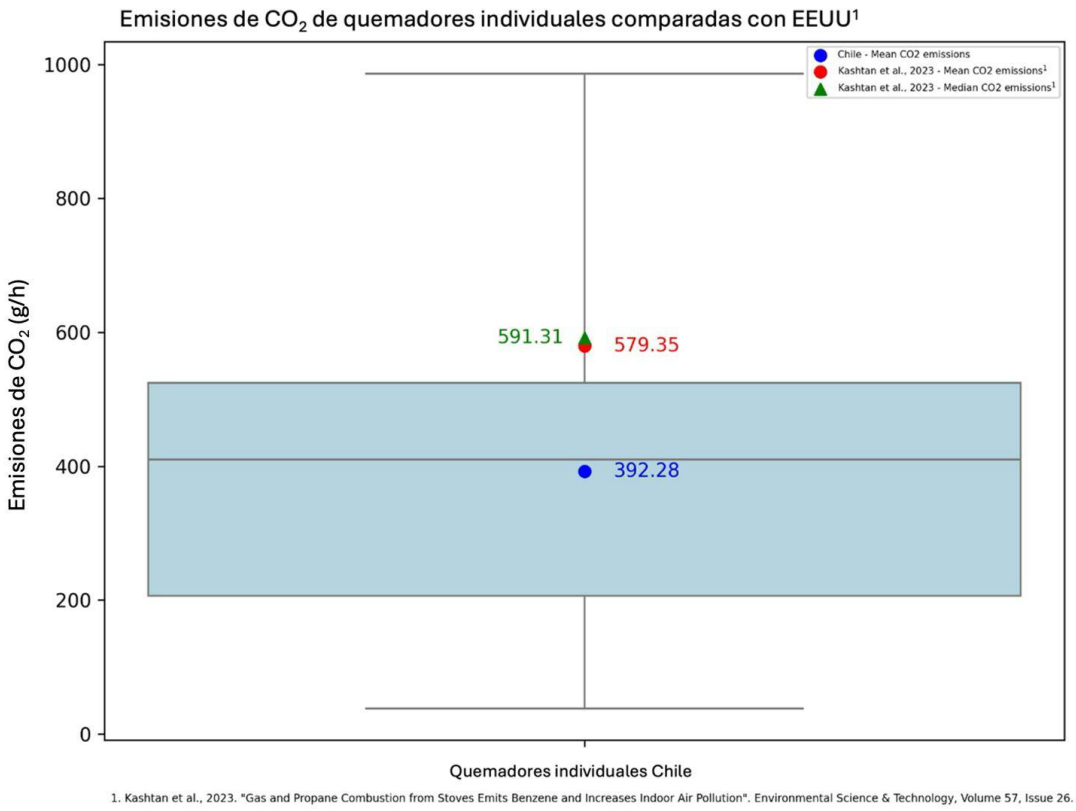


Gráfico 5 Comparación de las emisiones de CO_2 del presente estudio en comparación con representado en la bibliografía.

iii. Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En el caso de las emisiones de dióxido de nitrógeno (**NO_2**) en Chile (Gráfico 6), se muestra un promedio de **6.66 mg/J** (punto azul). Al igual que en otros contaminantes, las emisiones de NO_2 en Chile presentan cierta variabilidad entre los diferentes quemadores. Los datos individuales (círculos grises) sugieren que la mayoría de los quemadores se encuentran por debajo de los **10 mg/J** , con algunas excepciones que superan ese valor.

Cuando se comparan las emisiones de NO_2 en Chile con los datos de **Kashtan et al. (2023)**, se observa que las emisiones promedio de NO_2 en EE.UU. son más altas. Kashtan reporta un promedio de **11.11 mg/J** (punto rojo) y una mediana de **8.66 mg/J** (triángulo verde). Estos valores son superiores a los observados en Chile, donde el promedio es de **6.66 mg/J** . Esto indica que, en general, los quemadores en Chile tienden a emitir menos NO_2 que los reportados en EE.UU. por Kashtan y colaboradores en 2023. Sin embargo, es importante señalar que algunos quemadores en Chile superan los valores de mediana y se acercan a los niveles medios reportados en EE.UU. Esto sugiere que, aunque las emisiones promedio en Chile son más bajas, sigue habiendo casos aislados de equipos con emisiones elevadas.

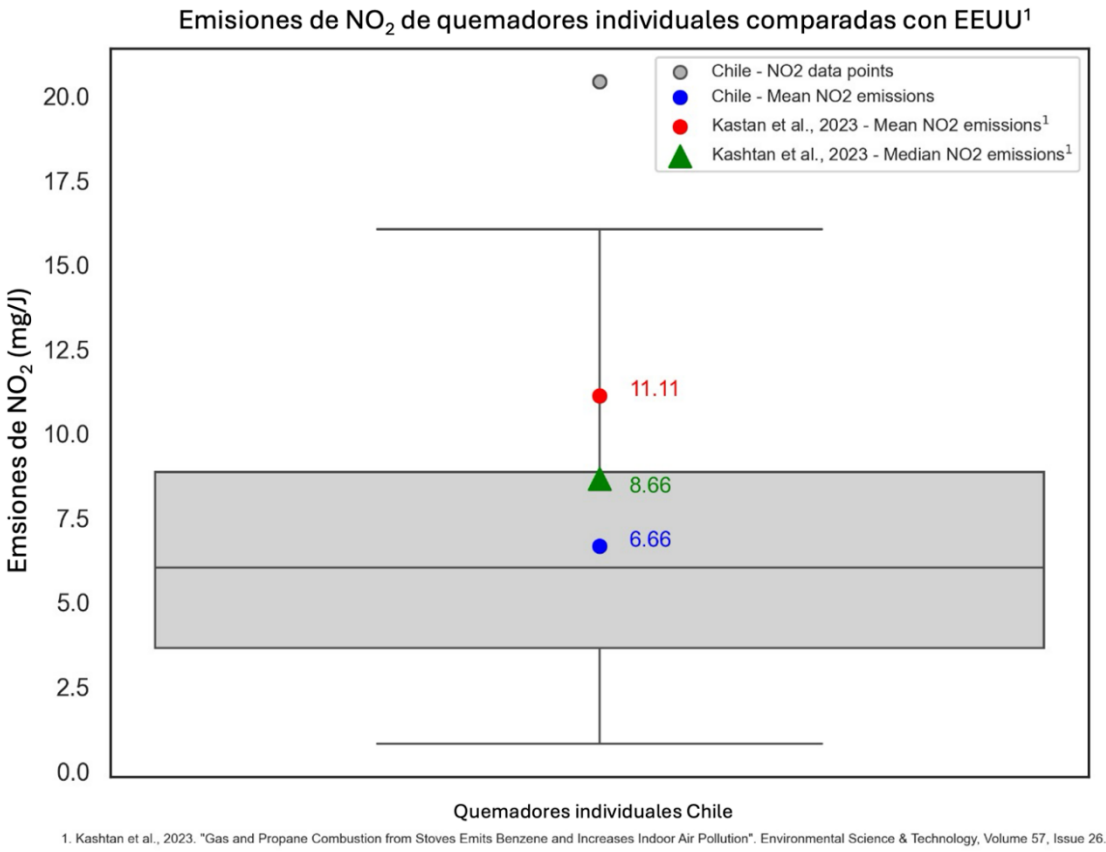


Gráfico 6 Comparación de los factores de emisión de NO_2 obtenidos en Santiago de Chile en comparación con valores reportados en la bibliografía

iv. Monóxido de carbono (CO)

En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono (**CO**) en quemadores individuales en Chile (Gráfico 7) muestra un promedio de **286.0 mg/J** (punto azul). Similar a otros contaminantes, los datos en Chile presentan una amplia dispersión, con algunos quemadores alcanzando valores superiores a **1000 mg/J** . Esta variabilidad sugiere diferencias significativas en la eficiencia de combustión de los quemadores utilizados en los hogares chilenos. El valor promedio indica que, aunque muchos quemadores se encuentran en un rango moderado de emisiones, una parte considerable de los equipos podría estar operando con una combustión incompleta, liberando cantidades elevadas de CO, un gas tóxico que tiene efectos graves sobre la salud, especialmente en espacios cerrados mal ventilados.

En comparación con los datos de Traynor et al. (1996) sobre emisiones de CO en EE.UU., el promedio de emisiones en Chile (286.0 **mg/J**) es significativamente más alto que el promedio reportado en EE.UU., que fue de 165.0 **mg/J** (punto rojo). Esto indica que, en promedio, los quemadores en Chile emiten más CO que los quemadores reportados en el estudio de EE.UU. Además, la dispersión en los valores de Chile es notablemente mayor, lo que sugiere una mayor variabilidad en la eficiencia de los equipos de combustión en Chile.

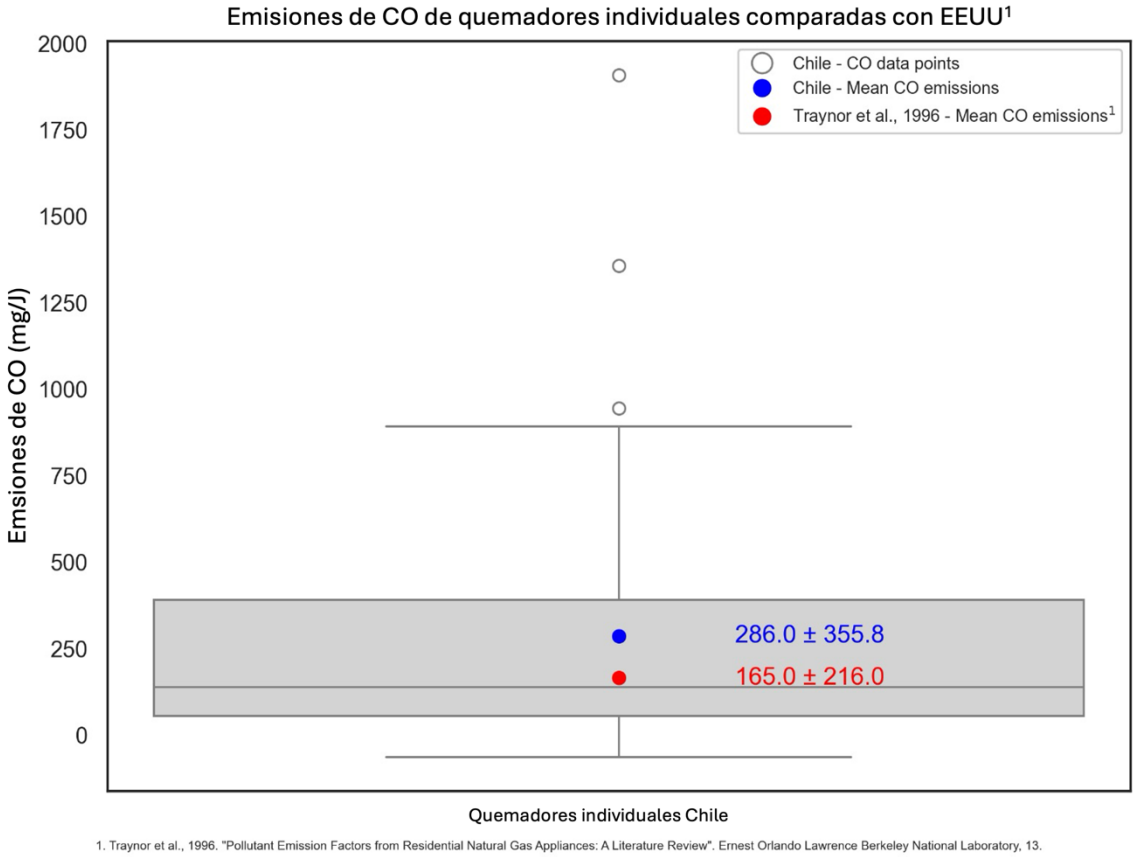


Gráfico 7 Comparación de las emisiones de CO del presente estudio en comparación con lo reportado en la bibliografía.

v. Benceno (C_6H_6)

En el caso de las emisiones de benceno (**C_6H_6**) en quemadores individuales en Chile (Grafico 8) muestra un promedio de **4.20 µg/min** (punto azul). Las emisiones de benceno en Chile también presentan una considerable dispersión, con algunos quemadores emitiendo cantidades significativamente más altas, lo que refleja diferencias en la calidad de los equipos o el mantenimiento de los mismos. En este sentido estas medidas son pioneras pues sólo se ha valorado recientemente estas emisiones de contaminantes. Al compararlo con el estudio más reciente en la materia, vemos que cuando se comparan las emisiones de benceno en Chile con los datos reportados en EE.UU,vemos que los datos presentados en Chile, tenemos un valor mayor en promedio pero no estadísticamente significativo. Además que el número de muestras recolectadas en Chile es (Chile con un N=20 y EEUU con un N=52). No obstante, en **Kashtan et al. (2023)**, se reporta que las emisiones promedio en Chile (**4.20 µg/min**) son más altas que las reportadas en EE.UU., donde el promedio fue de **2.63 µg/min** (punto rojo). Esto sugiere que los quemadores en Chile, en promedio, emiten cantidades mayores de benceno que los quemadores evaluados en el estudio de Kashtan. Además, en ambos países se observa una dispersión considerable en los datos, lo que indica que la eficiencia y el rendimiento de los quemadores son altamente variables.

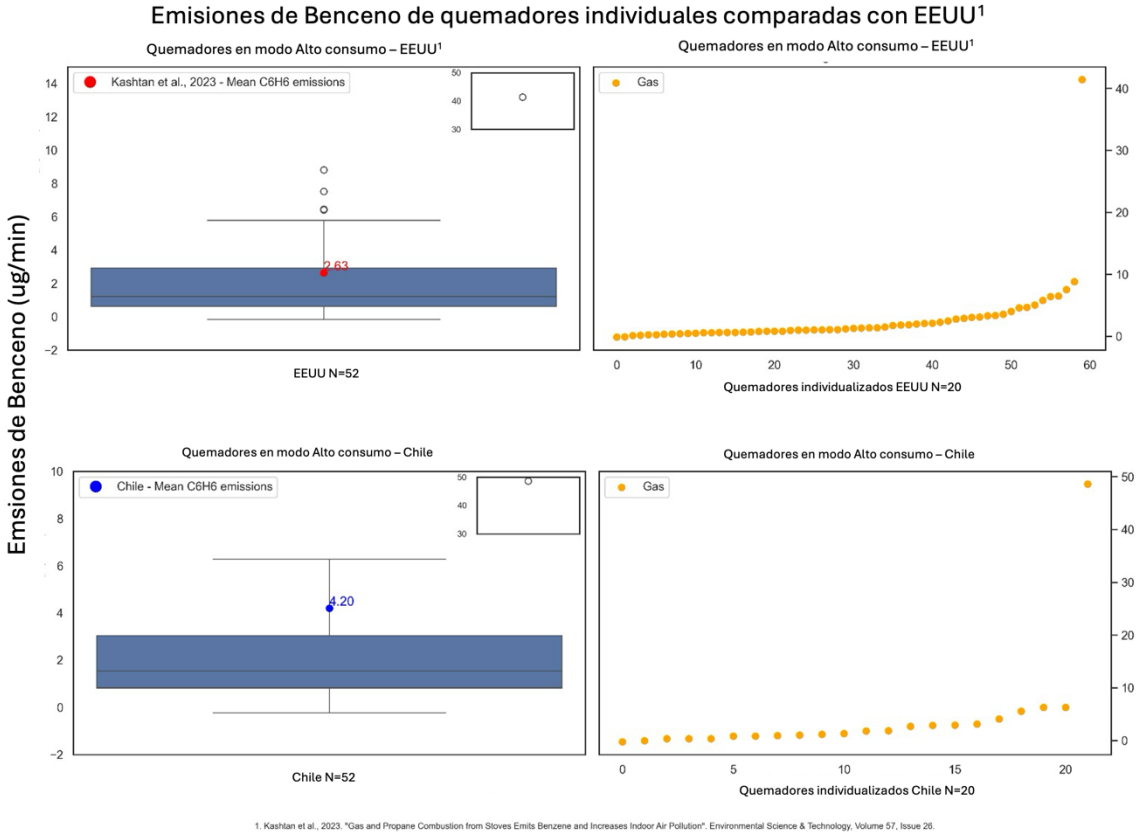


Gráfico 8 Comparación de las emisiones de Benceno del presente estudio en comparación con lo reportado en la bibliografía.

Las conclusiones sobre la variabilidad en las emisiones de contaminantes en Chile, según los análisis realizados de los gráficos, sugieren que las principales causas de esta variabilidad pueden estar relacionadas con varios factores. En primer lugar, podría deberse a las diferencias en la tecnología de los quemadores utilizados en los hogares chilenos, con equipos más antiguos, de menor calidad, podría motivar las emisiones más elevadas identificadas. En segundo lugar, el mantenimiento insuficiente de los aparatos podría estar contribuyendo a una combustión ineficiente, lo que incrementa las emisiones de gases como el CO y el NO_2.

b) Factores de emisión

A partir de nuestras mediciones directas, hemos podido derivar factores de emisión que pueden ser utilizados en la elaboración de inventarios de emisiones. Estos factores se expresan comúnmente en términos de energía consumida (kg del compuesto emitido por terajulio, TJ, de energía consumida) o en función del volumen de gas natural utilizado (kg del compuesto emitido por millón de pies cúbicos, MPC, de gas natural consumido). En la tabla siguiente presentamos los resultados de las mediciones directas realizadas en este proyecto, expresados como factores de emisión. Estos factores son aplicables en la elaboración de futuros inventarios de emisiones a nivel ya que los datos de actividad están disponibles en términos de consumo energético ya sea en total o en volumen consumido.

Tabla 7 Tasas de emisión promedio (en g/h o mg/h) medidas durante la campaña en Chile para el proceso de combustión por cada quemador se presentan en la tabla. Estas tasas incluyen el factor de emisión inferido a partir de las mediciones directas. En el caso del metano (CH4), se decidió excluir del cálculo dos puntos extremos, ya que se consideraron estadísticamente anómalos y con una influencia excesiva en el cálculo del valor promedio.

GAS	Tasa de Emisión	Factor de emisión
CH_4	405.96 (mg/h)	199.12 ($kgCH_4/TJ$)
CO_2	386.20 (g/h)	84.91 (tCO_2/TJ)
CO	1793.44 (mg/h)	313.02 (gCO/GJ)
NOx	93.54 (mg/h)	14,72 (gNO_x/GJ)
Benceno (C_6H_6)	0.28 (mg/h)	8,88(ugC_6H_6/TJ

2. Resultados Bogotá, Colombia.

Las mediciones en la ciudad de Bogotá se llevaron a cabo en un total de 23 viviendas. La **Figura 7** muestra el cronograma de la campaña de medición, junto con la nomenclatura utilizada para identificar las viviendas.

Figura 11. *Cronograma detallado de medición.*

En la **Figura 8** se presenta la línea de tiempo de los eventos registrados durante la medición realizada en la vivienda M7_Casa13, mostrando cada etapa del proceso de monitoreo. Las abreviaciones en la gráfica indican los siguientes eventos: *BKG* para el periodo de background, en el que se mide las concentraciones de fondo; *SS off* y *SS on* para el estado del sistema apagado y encendido (con pulsos, respectivamente); *P on* y *P off* para los pulsos encendido y apagado; *Air Out*, el evento donde se realiza la ventilación de la cocina para alcanzar las concentraciones de fondo; y *CO2 decay* para el decaimiento de CO_2, utilizado para calcular el ACH (Air Changes per Hour). Estos eventos permiten seguir el proceso de monitoreo y observar el comportamiento de las variables medidas en tiempo real.

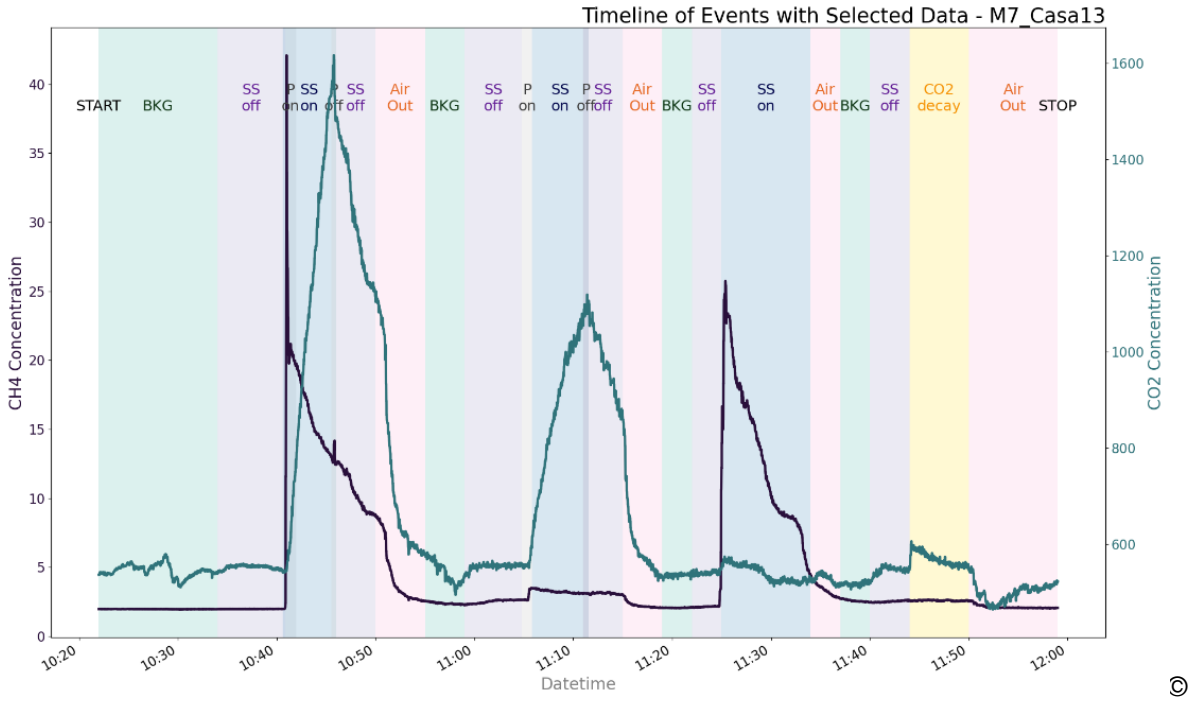


Figura 12 Serie de tiempo del proceso de medición (M7_Casa13). En la gráfica se ven los cambios abruptos de concentración para CH4, NOx y CO2 durante los diferentes momentos de la medición. En el mismo se encuentran demarcados los diferentes niveles de cada uno de los gases medidos exceptuando benceno

Muy similar a lo observado en los experimentos en Santiago, la **Figura 9**se muestra la dinámica de las concentraciones de CH_4, CO_2 y NOx medidas durante el primer ciclo de medición en una de las viviendas. El ciclo incluye diferentes etapas: “steady-state-off” antes de encender el quemador, donde se observa la concentración de fondo; “pulse on”, que corresponde al pulso inicial de gas metano emitido al encender el quemador; “steady-state-on”, que refleja las emisiones en estado estable mientras el quemador permanece encendido; y “pulse off”, que captura el pulso de emisiones cuando el quemador se apaga. Esta representación permite observar cómo varían las concentraciones de cada gas a lo largo del ciclo de funcionamiento del quemador.

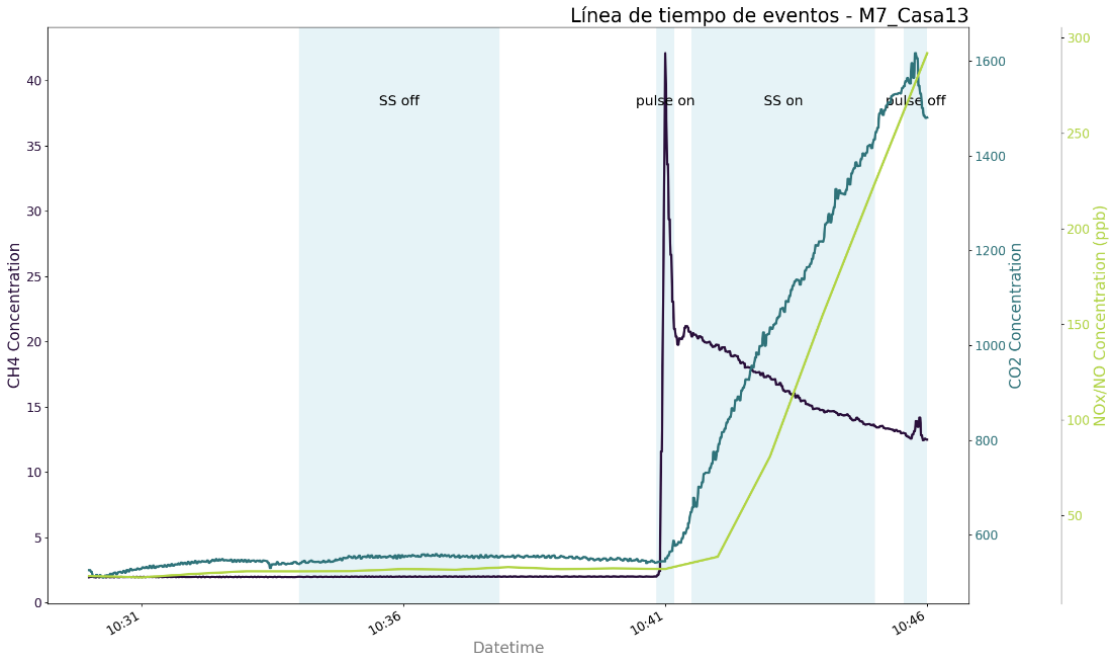


Figura 13. Dinámica de concentraciones de CH_4, CO_2 y NOx durante el ciclo de medición del quemador en una cocina.

En la serie de tiempo de la **Figura *8*** y **Figura *9*** se hace claro también una gran inyección de metano a la atmósfera durante el corto periodo de encendido de los fogones. La cantidad de metano emitido en esos breves instantes constituye una fracción significativa de las emisiones totales. Contrario a lo observado para el Metano, aquellas especies que son producto de la combustión (CO_2, CO, y NOx) aumentan rápidamente su concentración durante los periodos en los que un quemador está encendido.

c) Resultados consolidados

La tabla siguiente contiene las tasas de emisión promedio por quemador observadas durante el proceso de combustión (*Steady state ON*). Estos son los resultados de promediar todas las mediciones individuales (un total de 57 quemadores diferentes fueron explorados en esta medición).

Tabla 8. Tasas de emisión promedio (en g/h o mg/h) medidas durante la campaña en la ciudad de Bogotá para el proceso de combustión por cada quemador. Se incluye también el factor de emisión inferido a partir de las mediciones. (** para el metano, se decidió excluir del cálculo dos puntos extremos pues los consideramos estadísticamente anómalos y con excesiva influencia en el cálculo del valor promedio)..

GAS	Tasa de Emisión	Factor de emisión
CH_4	105.00 (mg/h)**	31.75 ($kgCH_4/TJ$)
CO_2	258.70 (g/h)	56.85 (tCO_2/TJ)
CO	1190.08 (mg/h)	213.3 (gCO/GJ)
NOx	91.04 (mg/h)	19.10 (gNOx/GJ)

Las tasas de emisión obtenidas para las 23 casas en las que se realizaron.

Metano CH4

Las tasas de emisión de metano encontradas para cada vivienda muestreada durante la campaña se muestran en la **Figura 10**. Se aprecia una distribución altamente asimétrica, con algunos pocos valores muy altos. Este tipo de distribuciones son características de tasas de emisión, donde un subconjunto pequeño de la muestra (los más altos emisores) pueden representar una fracción significativa de las emisiones totales de la muestra. Similar a lo encontrado en otros estudios, los datos demuestran que las tasas de emisión de metano durante la combustión son más altos que aquellos que ocurren de forma continua. Sin embargo, las primeras sólo ocurren durante la operación, mientras las segundas ocurren de forma permanente. Como se aprecia en la figura pese a estar en posición Off hay equipos que emiten metano de forma importante. No obstante, éstas siempre son menores que cuando los equipos están funcionando, habiendo un rango de entre 1 y 10 órdenes de magnitud de diferencia en algunos casos.

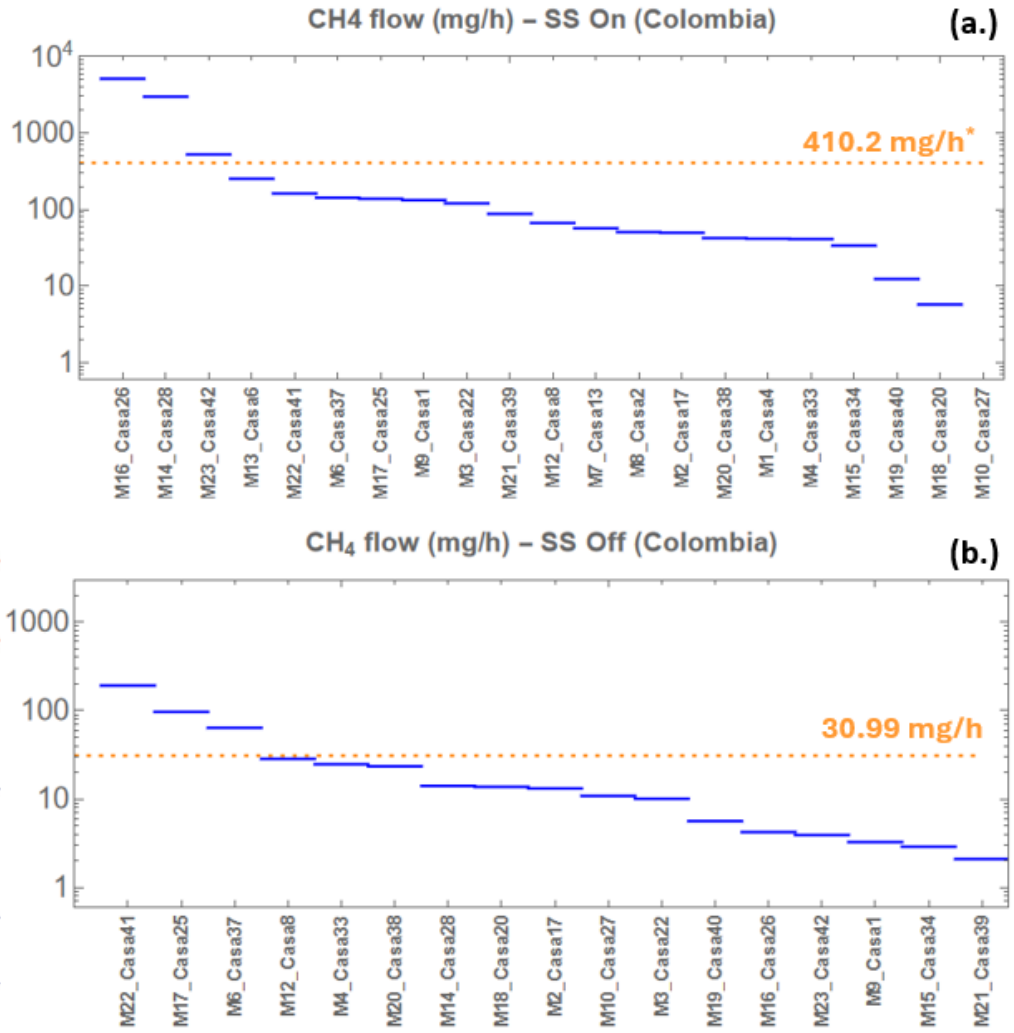


Figura 10. Tasas de emisión promedio para cada vivienda durante la fase (a.) "estado estacionario ON" es decir, emisiones de metano durante la combustión, y (b.) "estado estacionario OFF", es decir, fugas de metano provenientes de las cocinas cuando la estufa no está en operación. La línea puntead (y el valor sobre ella) representa el promedio de todos los quemadores medidos.

Los valores negativos (4 en total) se mantuvieron en el límite de detección estimado del método, de 0.2 mg/h. **El valor promedio reportado para metano durante la combustión incluyó 2 valores extremos.

En la **Figura 11** se muestran todos los datos recolectados sobre emisiones de metano. En el caso de los pulsos de encendido y apagado (pulsos On y Off), se evidencia que durante el brevísimo intervalo de encendido de un quemador se pueden liberar cantidades bastante significativas de metano a la atmósfera, comparables a las emisiones generadas durante varios minutos de combustión, y el equivalente a cerca de una hora de fugas continuas de metano. en mg totales, donde se aprecian las diferencias entre las concentraciones cuando el quemador está en estado On y en estado Off.

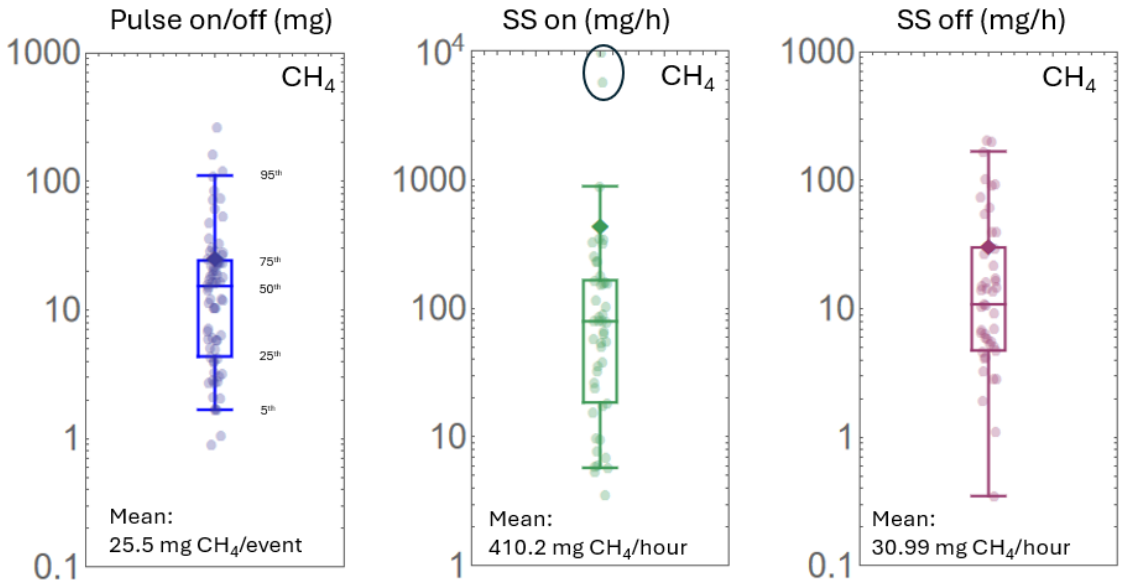
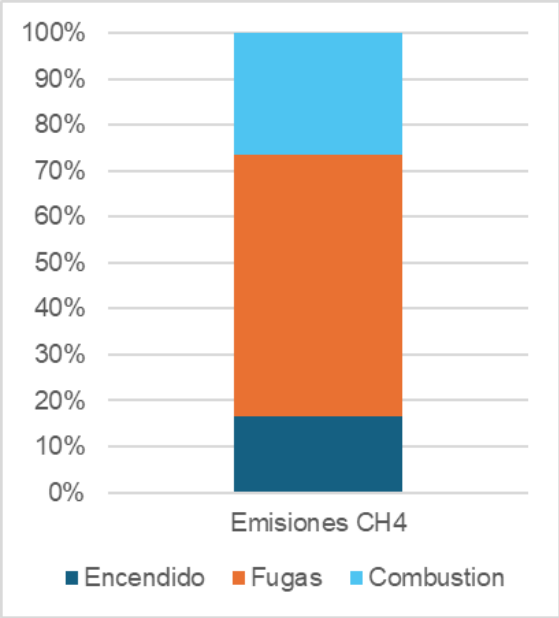


Figura 11. Gráfica tipo "*box-plot*" con los datos consolidados de las emisiones de metano bajo los tres modos de operación considerados: Pulsos de encendido y apagado, estado estacionario ON, y estado estacionario OFF. En esta representación se hace claro que hay dos valores extremos en las emisiones de metano. Debido al desproporcionado impacto que estos dos puntos tienen sobre el promedio, hemos decidido omitirlos del cálculo de la tasa promedio.

Con los datos obtenidos en el estudio es factible estimar la participación de cada tipo de actividad (encendidos, combustión, y fugas) en las emisiones típicas de una estufa. Asumiendo el uso de 2 quemadores durante un promedio de 1.5 horas al día, y asumiendo que hay 8 eventos de apagado y encendido, tenemos la siguiente distribución estimada de las emisiones. En total, estimamos que es posible que una estufa a gas natural, bajo este tipo de uso emita 0.45 kg de CH_4 anualmente, de los cuales 57% corresponden a fugas, 16% a operaciones de encendido, y el 26% restante al uso de los

quemadores durante a la combustión. Un estimativo rápido sugiere que, para los 10.1 millones de usuarios de gas natural residencial en Colombia, estas emisiones implican 4.5 Gg CH_4/año.



Óxidos de nitrógeno NOx

Los resultados de las mediciones de NOx en la **Figura 13** . Las emisiones de NOx dependen significativamente de la intensidad de la llama. En promedio, en nuestro estudio encontramos que las tasas de emisión de NOx son de 30.66 mg/h, 74.07 mg/h y 139.0 mg/h para intensidades de llama baja, media y altas respectivamente.

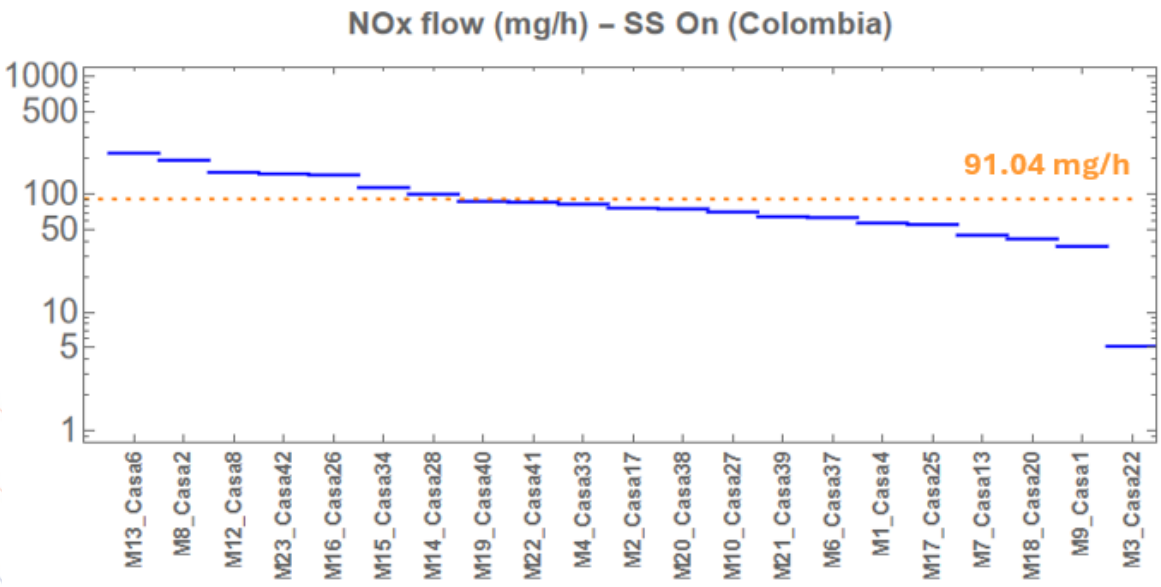


Figura 13. Tasas de emisión de NOx (en mg/h) promediadas por vivienda en la ciudad de Bogotá. La línea punteada representa el valor promedio de todos los quemadores individuales.

Monóxido CO

Por su parte, el CO, es uno de los productos intermedios de la combustión, y se genera debido a que la oxidación del combustible no se lleva a cabo de forma completa hasta convertirlo en CO_2. Una fracción baja, del orden del 1% o menor del carbono del combustible puede ser emitido como CO. Los resultados obtenidos en nuestro estudio van en esa misma dirección, pues la tasa de emisión de CO promedio (1.19 g/h) es aproximadamente el 0.46% de los 258 g/hora de CO_2 que emitieron las estufas analizadas.

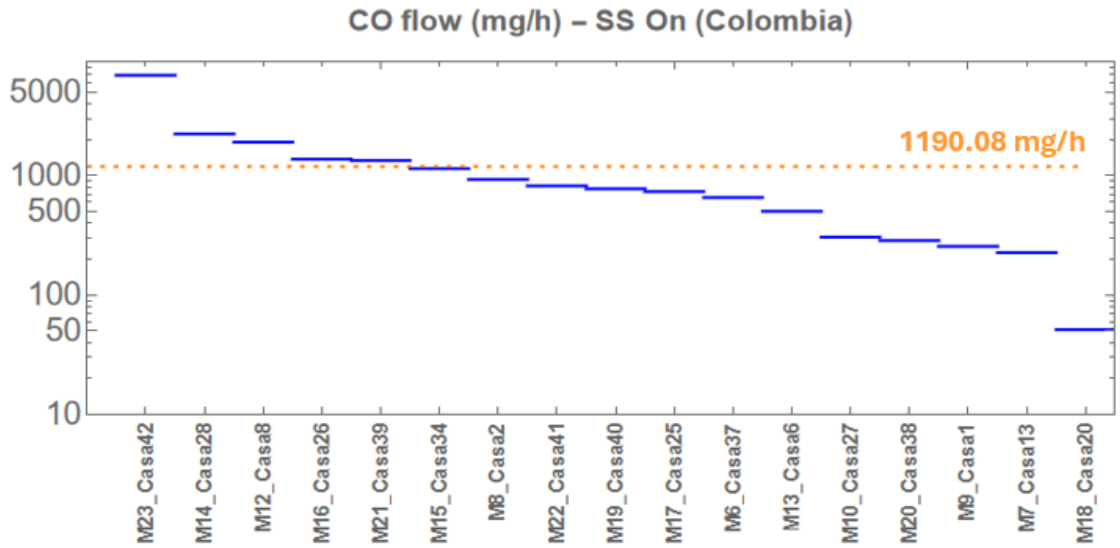


Figura 14. Tasas de emisión de monóxido de carbono (CO) para todos las viviendas en las que se midió este gas.

3. Resultados São Paulo, Brasil.

a) Ejemplos de series temporales

Los perfiles de concentración normalizados ilustran las diferencias de variabilidad temporal entre dos ejemplos de hogares: SP_CASA02, que utiliza gas licuado de petróleo (GLP), y SP_CASA03, que utiliza gas natural (GN) para CH_4, CO_2 y NO_x. En el caso del GLP, las concentraciones de CO_2 y NO_x aumentan al encender la estufa (St_ON), excepto durante el ciclo 4 (condiciones ambientales).

Las concentraciones de metano (CH_4) se mantuvieron estables durante la mayor parte del período en SP_CASA02, pero mostraron variabilidad a partir del ciclo 3 en adelante, lo que sugiere una influencia externa no relacionada con la fuente de GLP.

En el caso del GN (SP_CASA03), todos los gases mostraron un aumento al encender la estufa (St_ON), excepto en el ciclo 4. En el ciclo 3 (uso del horno), la respuesta pareció demorarse, pero resultó en concentraciones más altas de CH_4. Los ciclos 1 y 2 (quemadores grandes y pequeños) generaron respuestas inmediatas en todos los compuestos. Las figuras 15 y 16 presentan ejemplos de series temporales de la casa SP_CASA02, que utiliza GLP para cocinar, y la casa SP_CASA03, que utiliza gas natural.

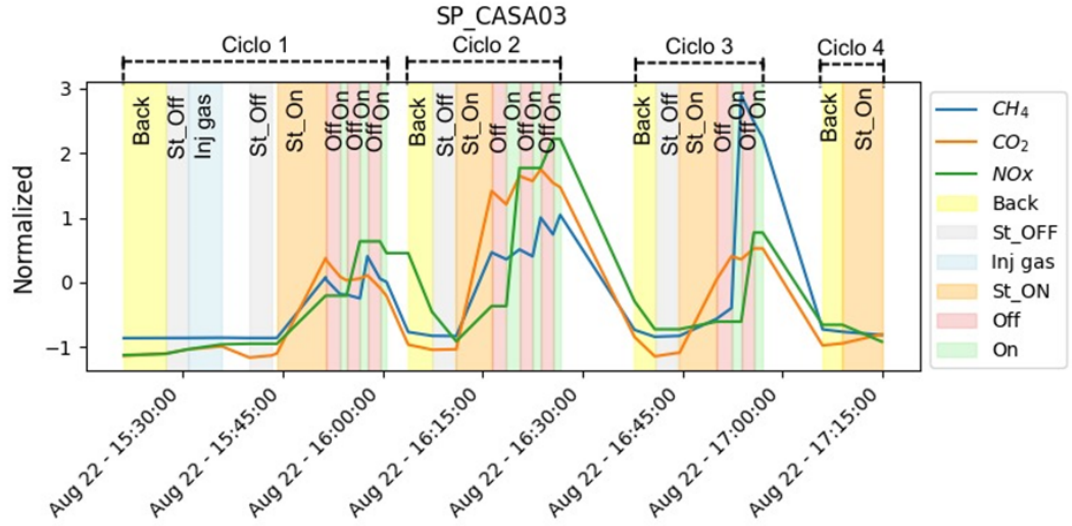


Gráfico 7 GN: Casa 03 (SP_CASA03) – Apartamento (dimensiones (m): 2,53x3,57x2,05)

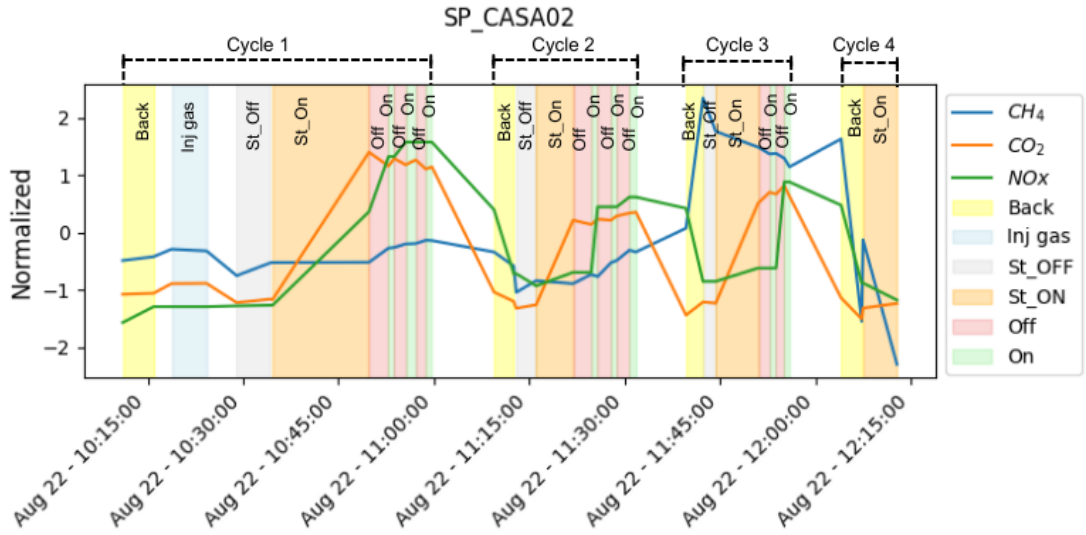


Gráfico 8 GLP: Casa 02 (SP_CASA02) – Vivienda (dimensiones (m): 3,2x4,86x2,54)

Nota: En ambas casas las cocinas están cerradas, no siendo necesario plástico para su sellado.

b) Variabilidad de concentración de gas

Las variaciones en las concentraciones de gas en las casas monitoreadas se representan mediante ciclos operativos y eventos de estado estable (St_Off y St_On) para CH_4, CO_2 y NO_2.

En general, los niveles de concentración de metano observados dentro de las casas se aproximan a los valores ambientales (1,9–2,0 ppm). Sin embargo, en algunos casos, es evidente la influencia de una fuente externa, con concentraciones que alcanzan hasta 10 ppm incluso cuando todos los electrodomésticos están apagados y las puertas y ventanas cerradas (St_Off). Tras la activación del quemador (St_On), se observan aumentos de concentración específicamente en las casas que utilizan gas natural (GN) en ambos ciclos.

En el Ciclo 1, las concentraciones aumentan, pero generalmente se mantienen en niveles bajos, con la excepción de las Casas 07 y 20. Por el contrario, el Ciclo 2 (quemador más pequeño) exhibe los valores de concentración más altos entre las casas, junto con la mayor variabilidad entre casas.

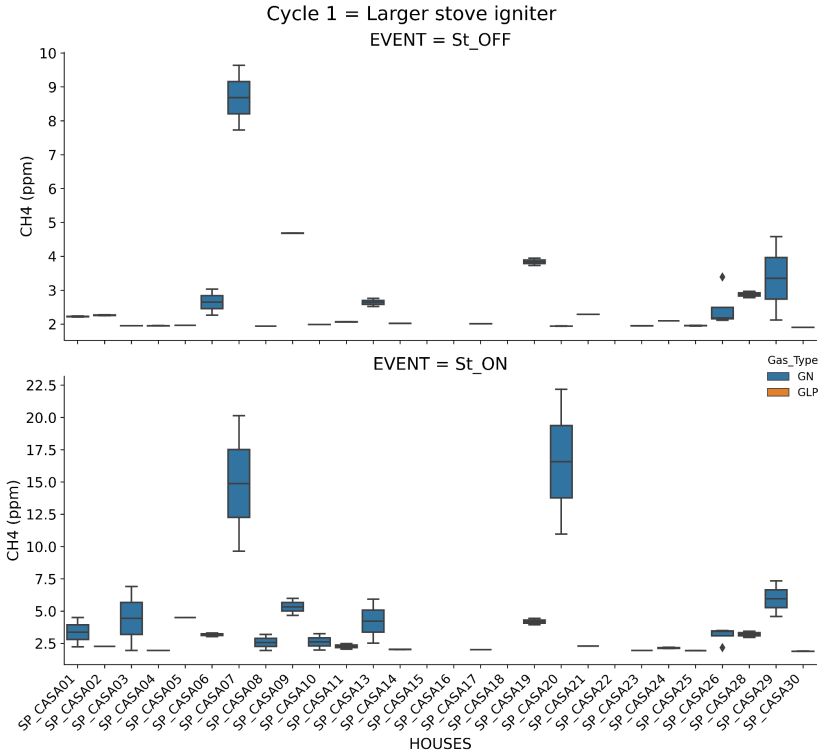


Gráfico 9 Variabilidades de las concentraciones de metano en las 30 residencias, en el Ciclo 1, separadas por eventos de estado estable (St_Off y St_On).

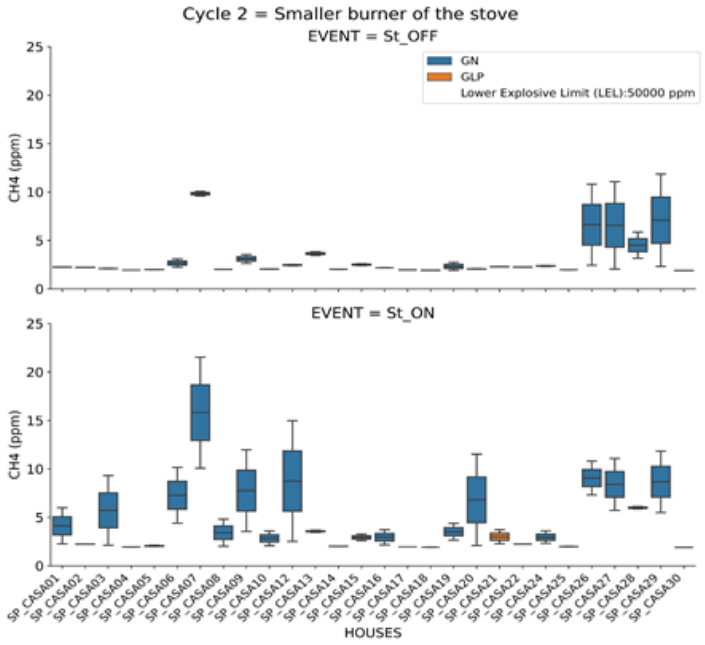


Gráfico 9 y 10 Variabilidades de las concentraciones de metano en las 30 residencias, separadas en el ciclo 2 y eventos de estado estable (St_Off y St_On).

En el Ciclo 3 (horno), como se muestra en la Figura 18, se destacan ciertos valores cuando el horno está activado, con concentraciones superiores a 50 ppm en algunos casos, como en la Casa 07. En condiciones ambientales (Ciclo 4), se registran los niveles de concentración más bajos observados. Las concentraciones observadas se mantienen muy por debajo del límite inferior de explosividad de 50.000 ppm establecido por la NFPA (National Fire Protection Association), lo que indica que los niveles detectados no se acercan a ningún umbral de seguridad.

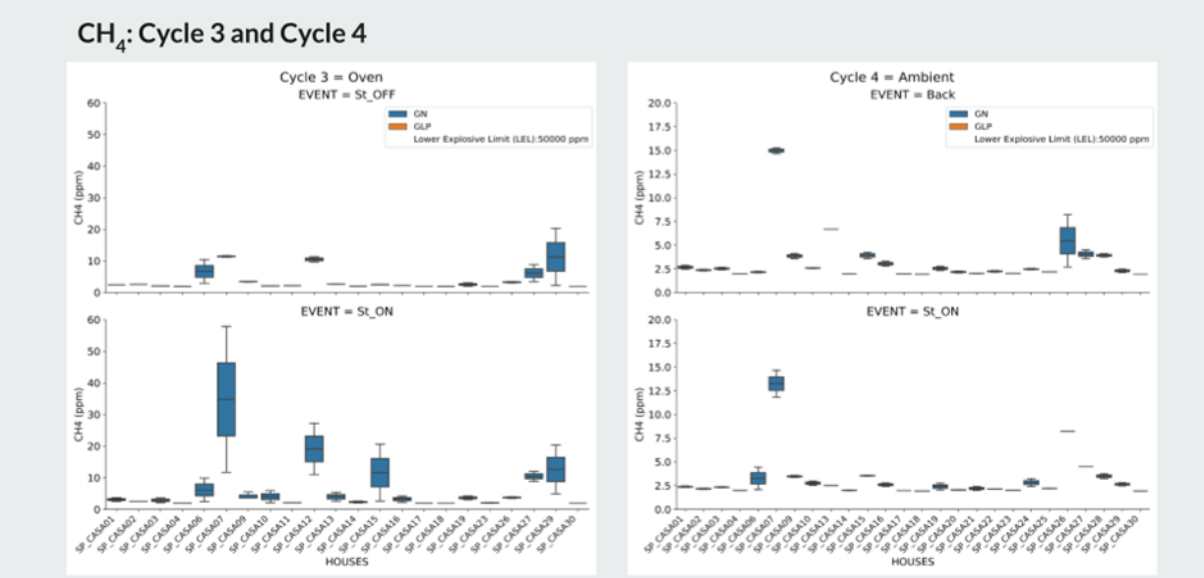


Figura 17 Variabilidades de las concentraciones de metano en las 30 residencias, separadas por los ciclos 3 y 4, y eventos de fondo y estado estable (Back, St_Off y St_On).

En el caso del CO_2, las concentraciones con todos los sistemas apagados (St_Off) oscilan entre 500 y 1000 ppm. En el ciclo 1, los niveles de St_On se encuentran entre 500 y 1800 ppm. Durante el ciclo 2, algunos casos superan el umbral de efectos sobre la salud (NIOSH), alcanzando niveles en los que podrían producirse efectos mínimos sobre la salud. Si bien existe una variabilidad considerable entre las viviendas, las concentraciones tanto de gas natural como de gas licuado de petróleo siguen siendo similares (Figura 19).

En el ciclo 3, los niveles de St_Off oscilan entre 500 y 1500 ppm, y los niveles de St_On se asemejan a los del ciclo 2, pero se mantienen por debajo del umbral de 2000 ppm. El ciclo 4 presenta valores más bajos en general, con una variabilidad reducida (Figura 17).).

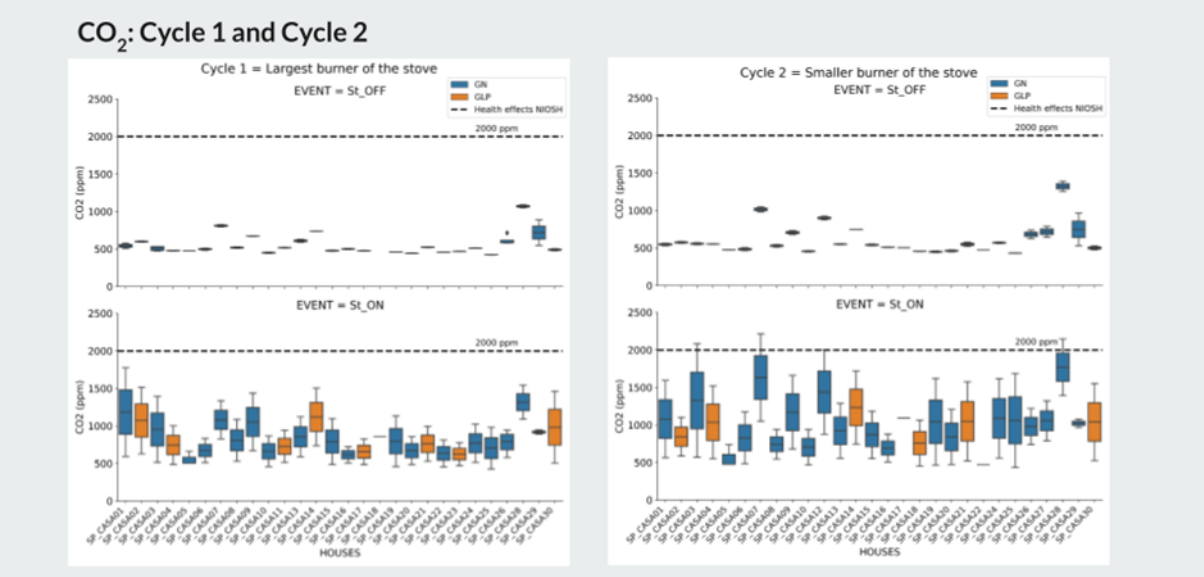


Figura 18 variabilidades de las concentraciones de dióxido de carbono en las 30 residencias, separadas por los ciclos 1 y 2, y eventos de estado estable (St_Off y St_On).

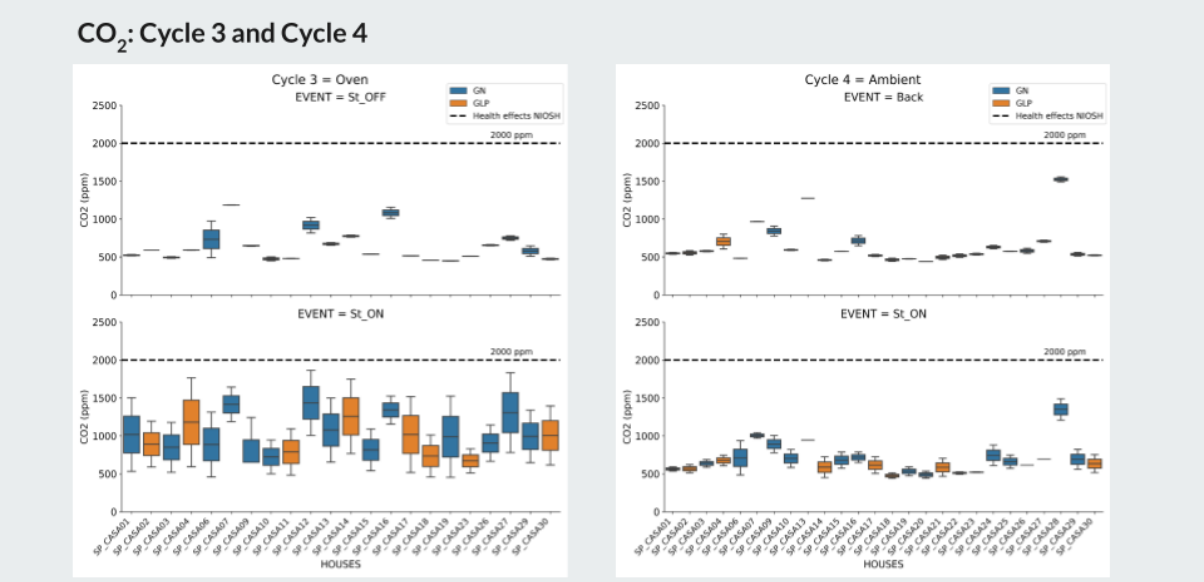


Figura 19 Variabilidades de las concentraciones de dióxido de carbono en las 30 residencias, separadas por los ciclos 3 y 4, y eventos de fondo y estado estable (Back, St_Off y St_On).

Se destaca a continuación la alta variabilidad en las concentraciones de NO_2 entre hogares, observada tanto en los estados St_On como St_Off. No parece haber una diferencia significativa entre las fuentes de gas natural (GN) y gas licuado de petróleo (GLP). El ciclo 2 muestra concentraciones elevadas de NO_2 en los hogares, con niveles tanto en St_On como St_Off que con frecuencia superan los límites recomendados por la OMS.

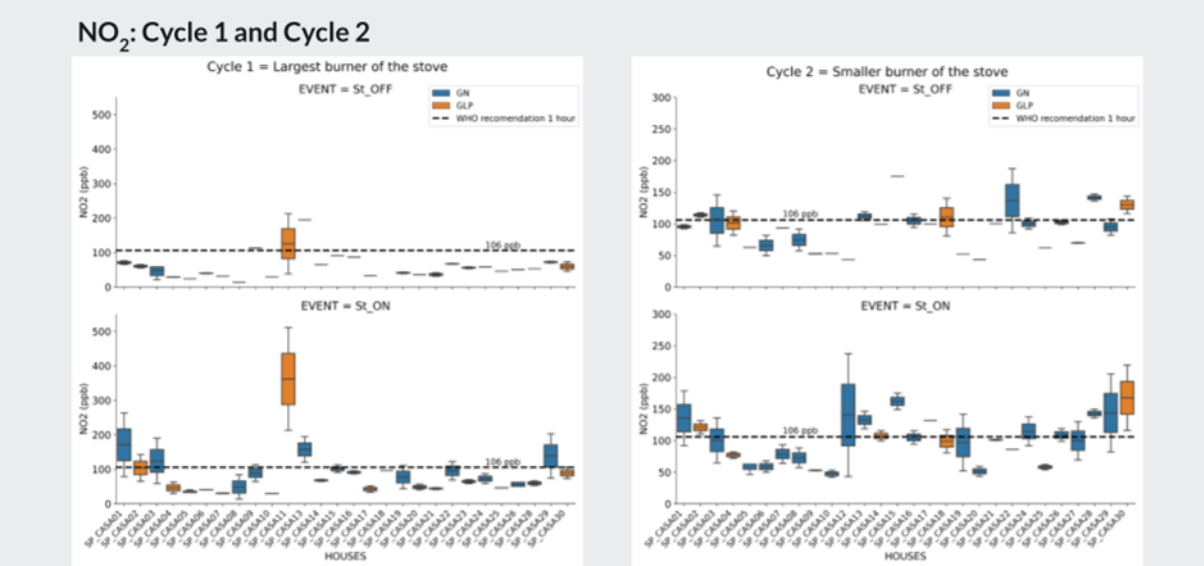


Figura 20 Variabilidades de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en las 30 residencias, separadas por los ciclos 1 y 2, y eventos de estado estable (St_Off y St_On).

En el ciclo 3 (Figura 21), las concentraciones de NO_2 superan las recomendaciones de la OMS tanto en los estados St_On como St_Off, y los valores más altos se dan en St_On. En el ciclo 4, los niveles de fondo siguen siendo elevados, aunque la variabilidad entre viviendas disminuye. Durante St_On, las concentraciones tienden a disminuir, probablemente debido a una mayor circulación del aire.

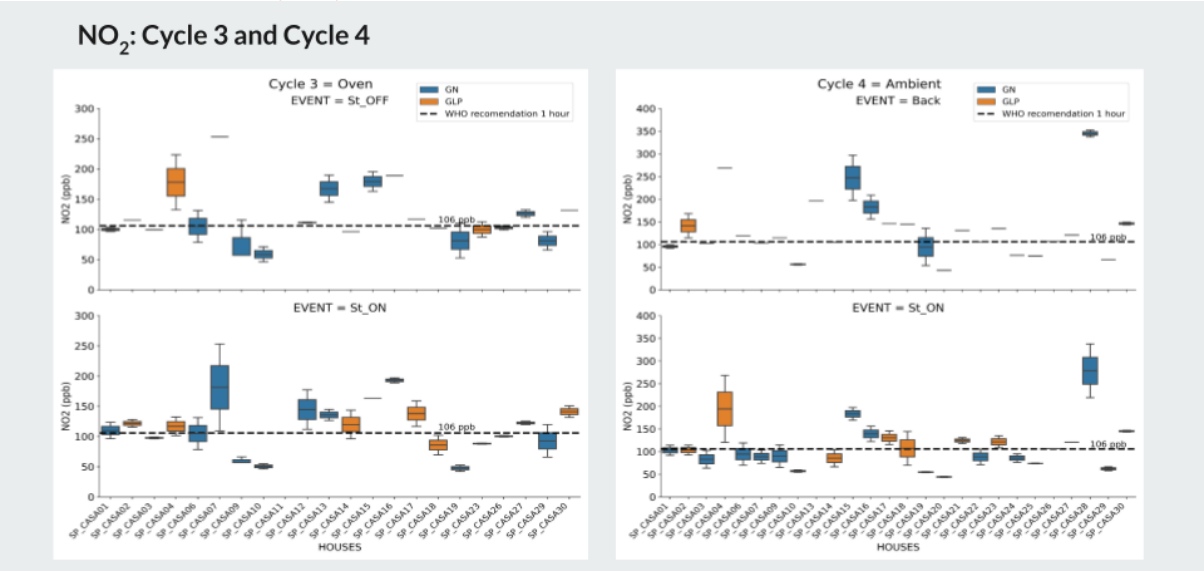


Figura 21 Variabilidades de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en las 30 residencias, separadas por los ciclos 3 y 4, y eventos de fondo y estado estable (Back, St_Off y St_On).

c) Factores de emisión

i. Metano

Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero, Brasil podría utilizar los datos del IPCC para estimar los valores de las emisiones de metano de los hogares. Sin embargo, el factor adoptado en Brasil (GLP = 1,1 kgCH4/TJ y GN = 1 kgCH4/TJ), siguiendo los factores nacionales y divergiendo del IPCC (GN = GLP = 5 kgCH4/TJ).

Considerando los valores utilizados en el inventario brasileño y un consumo medio de GN de 0,225 m3/h, tendremos un factor de emisión de 147.68 mgCH4/h sin valores atípicos y 495.34 mgCH4/h con todos los valores. El factor de emisión de metano promedio obtenido a partir de las mediciones por GN tomadas fue de 14,58 kg/TJ sin los valores atípicos y con el cien por ciento de los datos fue de 48,92 kg/TJ, **49 veces mayor que el factor nacional y 9,8 veces mayor que el valor del IPCC** .

El factor de emisión obtenido para el CO2 fue de 20.440 kg/TJ para el gas natural y de 14.580 kg/TJ para el GLP, sin valores atípicos, y con el cien por ciento de los datos fue de 20.940 kg/TJ para los dos combustibles. Para el NO2 la emisión fue de 0,29 kg/TJ para el gas natural, y de 0,46 kg/TJ sin valores atípicos y de 1,3 kg/TJ con todos los datos para el GLP.

Tabla 9 Factor de emisión para el CO2, CH4 y NO2

Compound	Natural Gas (NG)	Liquefied petroleum gas (LPG)
CO_2	20,440 (20,940) kg/TJ	14,580 (20,940) kg/TJ
CH_4	14.58 (48.92) kg/TJ	1.60 (1.60) kg/TJ
NO_2	0.29 (0.76) kg/TJ	0.46 (1.31) kg/TJ

V. Conclusiones e implicaciones

1. Conclusiones Chile

a) Contribución a las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero

Mediante los resultados obtenidos podemos estimar la contribución del uso de las cocinas a las emisiones de gases de efecto invernadero reportadas por Chile durante aproximadamente un año para los diferentes gases estudiados. Según el último inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile. Se reporta que las emisiones del sector residencial son las reportadas bajo el código 1.A.4.b., en el que se reporta que las emisiones en Kt de CO2 anual son 4182.258, las de CH4 son 21.784, las de CO son 288.890.

Según los datos reportados por Ministerio de desarrollo social y familia (MDSF, 2022) en la encuesta CASEN 2022, se reporta que aproximadamente hay 995.313 hogares que reportan usar gas natural para cocinar alimentos. Esto nos permite estimar el total de emisiones de este sector para los gases reportados. Para el caso del CO2 usando los promedios reportados en el presente estudio vemos que en promedio se emiten 392 g/h y asumimos que durante el proceso de cocinar alimentos en todo el día el uso por hogar es de unas 2 horas (incluyendo desayuno, almuerzo y comida), bajo esta premisa estimamos que cada casa emite por día unos 784 g/día de CO_2. Este proceso se produce durante todo el año por lo que cada casa emite 286364 g/año. Al multiplicarlo por el total de casas que reportan el uso de cocina a gas obtenemos que en total se emiten 285.729 toneladas al año como consecuencia de cocinar alimentos usando gas natural o lo que es lo mismo 285 Kton de CO2 al año. **Al comparar esto con el inventario de emisiones más reciente (2022), vemos que las emisiones de CO2 por este concepto serían en torno al 7% de las emisiones residenciales por el uso de cocina a gas natural.**

Si bien las cocinas a gas natural representan un porcentaje bajo con respecto al inventario de emisiones más reciente para Chile (2022). En el caso del metano, según los datos del presente estudio se observa que puede suponer en torno al **1.56% de las emisiones de CH4** como consecuencia de cocinar alimentos.

En este proyecto hemos identificado factores de emisión específicos para la combustión de gas natural en Chile, encontrando que las emisiones combinadas de dióxido de carbono y **metano alcanzan 90.46 tCO_2-eq/TJ,** con el metano representando el 6.14% del total. Este valor es **significativamente mayor a los estándares internacionales**, como los del IPCC, lo que subraya la **necesidad de un enfoque local** para mejorar los inventarios de emisiones. En el presente proyecto obtenemos factores de emisión de metano en torno a **199.12 (kgCH4/TJ).** Al comparar los valores obtenidos para los factores de emisión de Chile en comparación con los que usan actualmente para los factores. **Encontramos que este valor es en torno a 39 veces mayor en promedio que lo usado para construir el inventario nacional de emisiones (5 kgCH4/TJ).**

Al analizar las tecnologías de cocción, se observa que las **cocinas a gas, con una eficiencia del 42.1%, generan 0.215 kg de CO_2-eq por unidad de energía útil, mientras que las cocinas de inducción, con una eficiencia del 79.7%, producen solo 0.145 kg de CO_2-eq, logrando una reducción del 32.6%, tomando en cuenta los factores de emisión de electricidad actuales.** Con mayor integración de energías renovables estos factores están bajando cada vez más. Esto evidencia que avanzar hacia la electrificación de los sistemas de cocción, especialmente con tecnologías eficientes como las cocinas de inducción, puede hacer una contribución para disminuir las emisiones en los hogares chilenos y contribuir al cumplimiento de los objetivos climáticos del país.

En el caso del CO tenemos los resultados de 282.7 ng / J. Lo primero es realizar la transformación a mg / h, que serían en torno a 3053 mg / h. Realizando el cálculo con los mismos supuestos vemos que cada casa emite uno 6106 mg de CO al día, lo que, llevándola a todo el universo de usuarios, supone 2218 toneladas al año o, lo que es lo mismo, 2.218 Kton al año a nivel nacional. Al compararlo con el total de emisiones reportadas para el sector residencial que es de **288.90 Kt podemos estimar que es en torno a un 0.77% de las emisiones de CO reportadas para el sector residencial.**

A partir de los resultados obtenidos, es posible estimar la contribución de las cocinas a gas en las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residencial de Chile. Se estima que el uso de **cocinas a gas natural representa aproximadamente el 7% de las emisiones totales de CO_2 del sector residencial,** contribuyendo con 285 Kton anuales de CO_2. En cuanto al metano (CH_4), las emisiones no fugitivas de las cocinas representan alrededor del 1.1% del total del sector, con 232 toneladas anuales, mientras que las emisiones fugitivas, que ocurren incluso cuando el equipo está apagado, suman otras 0.1 Kt al año, lo que eleva el total de las emisiones de CH_4 a un 1.56% del total reportado para el sector residencial. En el caso del monóxido de carbono (CO), se calcula que las cocinas a gas emiten 2.218 Kt al año, lo que representa aproximadamente el 0.77% de las emisiones totales de CO del sector residencial. Estos resultados reflejan que, aunque las cocinas a gas no son la principal fuente de emisiones en el sector residencial, su contribución no es despreciable, particularmente en términos de metano, un gas con un fuerte potencial de calentamiento global.

Como precaución hay que tener en cuenta que estas estimaciones han sido realizadas basándose en un N de 34 casas en la ciudad de Santiago, los resultados serían más precisos si aumentamos el número de valores siendo más representativos. Así como midiendo en varias ciudades para poder tener mayor certeza de los factores de emisión obtenidos en terreno.

b) Implicaciones para salud

Las personas pasan hasta el 90% de su vida en espacios interiores y el 60% de ese tiempo en casa (Vardoulakis et al., 2019). Aunque no son la única fuente de contaminación intradomiciliaria, las estufas de gas son una fuente importante, ya que durante su uso emiten una variedad de contaminantes que pueden afectar la calidad del aire en el hogar y, en consecuencia, la salud de las personas.

La exposición aguda a altos niveles de contaminantes puede tener efectos graves en la salud. El metano (CH_4), a concentraciones elevadas en espacios cerrados, puede desplazar el oxígeno, provocando asfixia, problemas de visión, náuseas y vómitos. El dióxido de carbono (CO_2), entre 1,000 y 2,000 ppm, causa somnolencia y malestar por la calidad del aire, mientras que entre 2,000 y 5,000 ppm genera dolores de cabeza, pérdida de atención y aumento de la frecuencia cardíaca; exposiciones superiores a 30,000 ppm pueden resultar en mareos, aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias. El monóxido de carbono (CO) es altamente tóxico, incluso a bajas concentraciones, y puede interferir con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, causando síntomas como dolores de cabeza, mareos, fatiga, y en casos graves, pérdida de conciencia y muerte. El dióxido de nitrógeno (NO_2) puede irritar los ojos, nariz y garganta, y en niveles más altos, llevar a edema pulmonar, una acumulación peligrosa de líquido en los pulmones. Por último, el benceno (C_6H_6) puede provocar mareos, dolores de cabeza, somnolencia, confusión y, en casos extremos, pérdida de conciencia. Con respecto a esto no hay normas nacionales en Chile que regulen la contaminación intradomiciliaria. Por lo que se recurrió a normativas internacionales. Canadá tiene normas para CO2 (Health Canada, 2021), Benceno (Health Canada, 2019) y NO2 (Health Canada 2021) y EEUU tiene normas para trabajadores o exposición ocupacional para el caso de CO2 Y Benceno CO_2 y C_6H_6 (www.dir.ca.gov). En el caso de exposiciones ocupacionales dos organizaciones importantes, ambas de EEUU, son: *Occupational Safety and Health Administration* / Administración de Seguridad y Salud Ocupacional y *American Conference of Governmental and Industrial Hygienists* / Conferencia

Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales. Estas organizaciones tienen normas para límites de exposición permitido (PEL= *Permissiable exposure limit*) y límite de Exposición a Corto Plazo (STEL= *Short term exposure limit*).

En la tabla siguiente se muestran los niveles de 4 de los contaminantes medidos en partes por ppm en las viviendas en las que no se usó la metodología de cámara plástica. Los resultados obtenidos en el presente estudio son indicativos de que ninguna de las casas en las que se tomaron medidas superaron las normas mencionadas para CO_2 y Benceno Para CO_2, la mediana fue menor al límite de exposición a corto plazo (15 minutos): 1.412 versus 30.000 ppm. Para Benceno también los niveles fueron inferiores a las normas establecidas para trabajadores. Sin embargo, si se compara con las normas canadiense para el aire interior, las medianas de valores para las viviendas muestreadas en Chile para CO_2 y C_6H_6 exceden los niveles recomendados: CO_2 1.412 versus 1.000 y 0,5 versus 0,2 para C_6H_6. En el caso de NO_2, Canadá cuenta con una norma residencial de 1 hora (90 ppm) y 24 horas (11 ppb) (Health Canada, 2021). En las viviendas en las cuales se midió NO_2, la mediana superó la norma de 1 hora: 125 versus 90 ppm. Entonces, si es mismo nivel (125 ppm) hubiera seguido por una hora, 50% de las viviendas muestreadas hubieran superado la norma canadiense. La exposición a niveles altos de contaminación intradomiciliaria podría dañar la salud (Tabla 10), sin embargo, está fuera del alcance de este informe hacer una asociación directa con la salud de los habitantes de las viviendas muestreadas.

Es importante mencionar que, en Chile, es común tener cocinas cerradas y eso podría implicar una mayor exposición a altos niveles de contaminación intradomiciliaria. Por lo tanto, la ventilación es clave: utilizar campanas extractoras o abrir ventanas mientras se usa la cocina.

Tabla 10 Descripción de niveles (partes por millón, ppm) de contaminantes en 28 viviendas chilenas y las recomendaciones internacionales para cada una

	Mediciones de viviendas chilenas				Norma
Contaminante	N de quemadores	Mínimo	Máximo	Mediana	
CH_4	41	1,9	89	2,9	*
CO_2	33	446	6.873	1.412	1.000[a] PEL: 5.000[b] STEL: 30.000[c]
C_6H_6 (Benceno)	13	0,07	2,68	0,51	0,2[d] PEL: 1[e] STEL: 5[f]
NO_2	24	33	703	125	24 horas: 11[g] 1 hora: 90[h]

PEL= *Permissiable exposure limit* / Límite de Exposición Permitido

STEL= *Short term exposure limit* / Límite de Exposición a Corto Plazo

* El metano se considera generalmente no tóxico a niveles típicos de exposición, por lo que no se establecen límites específicos de PEL o STEL basados en efectos tóxicos directos.

[a] Norma canadiense: 1.000 ppm durante un periodo de 24 horas.
[b] OSHA (*Occupational Safety and Health Administration* / Administración de Seguridad y Salud Ocupacional): 5,000 ppm (partes por millón) para una jornada laboral de 8 horas.

[b] ACGIH (*American Conference of Governmental and Industrial Hygienists* / Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales): recomienda 30.000 ppm, lo que significa que los trabajadores no deben estar expuestos a este nivel durante más de 15 minutos sin medidas de protección.

[d] Norma canadiense: 0,2 ppm durante por lo menos un periodo de 24 horas.
[e] OSHA: 1 ppm promedio ponderado en 8 horas.
[f] OSHA: 5 ppm durante un período de 15 minutos.

[g] Norma canadiense: 11 ppm durante un período de 24 horas.
[h] Norma canadiense: 90 ppb durante una hora.

c) Conclusiones generales Chile

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la variabilidad significativa en las emisiones de contaminantes provenientes de quemadores de gas en hogares de Santiago de Chile. Las emisiones de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y benceno (C_6H_6) muestran dispersión entre los diferentes aparatos evaluados, lo que sugiere diferencias en la eficiencia de combustión, el estado de los equipos y los patrones de uso. La alta variabilidad de las emisiones, especialmente en casos como el metano y el CO, indica que algunos quemadores emiten cantidades elevadas de contaminantes, lo que plantea riesgos para la salud y el ambiente, especialmente en espacios cerrados con poca ventilación.

Un hallazgo importante es la presencia de emisiones fugitivas, incluso cuando los quemadores se encuentran en estado apagado (Off). Este fenómeno resalta la necesidad de monitorear continuamente las emisiones, ya que las concentraciones de contaminantes pueden acumularse en el aire interior de los hogares, afectando la salud de los ocupantes. Las emisiones fugitivas de metano, por ejemplo, contribuyen significativamente a las emisiones totales, elevando el impacto ambiental de estas fuentes domésticas. Se estima que, en promedio, una cocina emite cerca de 0.8 kg de metano por día, sumando tanto las emisiones operativas como las fugitivas.

Finalmente, las comparaciones con estudios internacionales sugieren que, aunque algunas emisiones promedio en Chile son menores que las reportadas en EE.UU., como en el caso del CO_2 y el NO_2, persisten casos de emisiones elevadas que deben ser abordados. En especial, el caso del benceno, cuyas emisiones en Chile superan los niveles recomendados por normativas internacionales, subraya la necesidad urgente de implementar regulaciones para la contaminación intradomiciliaria en Chile, con énfasis en mejorar la eficiencia de los quemadores, garantizar el mantenimiento adecuado de los aparatos y fomentar una mayor ventilación en los hogares.

Si bien las cocinas a gas representan un porcentaje bajo con respecto al inventario de emisiones más reciente para Chile (2022). En el caso del metano vemos que puede suponer en torno al 1.56% de las emisiones de CH4 como consecuencia de cocinar alimentos. Además, cuando se usan los factores de emisión propuestos para quema de gas natural, hemos encontrado que el factor de emisión estimado en el presente estudio es al menos 39,8 veces mayor cuando lo comparamos con el usado actualmente de 5 kg de CH4 por TJ por lo que se recomienda revisar el factor de emisión que usa actualmente.

La contaminación intradomiciliaria causada por cocinas a gas natural en los hogares de Chile representa un riesgo significativo para la salud, ya que las emisiones de contaminantes como metano, CO_2, CO, NO_2 y benceno pueden superar los límites recomendados por normativas internacionales. Estos contaminantes, especialmente el CO y el benceno, pueden causar efectos graves como mareos, fatiga, irritación respiratoria y, en casos extremos, riesgos mortales. Dado que en Chile no existen normativas nacionales específicas para la calidad del aire interior, es crucial mejorar la ventilación en los hogares y adoptar medidas preventivas para reducir la exposición a estos contaminantes.

2. Conclusiones Colombia

Este estudio constituye la primera medición directa de las tasas de emisión de NOx, CO, y CH_4 provenientes del uso de gas natural en cocinas residenciales en Latinoamérica. Los resultados del esfuerzo de obtener tasas de emisión *del mundo real* están consignados en la **Tabla *8***. Dichos valores,

expresados como factores de emisión (e.g., cantidad del contaminante emitido por unidad de energía o por unidad de volumen de gas natural consumido) permite que estos puedan ser comparados más fácilmente con aquellos valores utilizados en la construcción de inventarios nacionales de GEI o bien, que sean eventualmente adoptados en la construcción de inventarios nacionales o locales de contaminantes del aire. A continuación, presentamos algunas implicaciones de las tasas de emisión que encontramos en nuestro proyecto:

a) Contribución a las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero

i. CH4 y CO2

En el proceso de combustión de gas natural, se generan emisiones directas de CO_2 (producto de la combustión) y emisiones de CH4 correspondiente a una pequeña fracción que no se quema adecuadamente durante la combustión. En los lineamientos del IPCC para el cálculo de inventarios nacionales de gases efecto invernadero se sugiere utilizar un factor de emisión default de metano de 5.0 kg CH_4/TJ para combustión de gas natural (categoría de emisiones 1A4b – Residencial)[7]. La agencia ambiental de los Estados Unidos, US. EPA, utiliza un factor de emisión menor, equivalente a 0.95 kgCH_4/TJ para el mismo proceso[8]. Por su parte, en Colombia, como se expresa en la **Tabla *8***, el factor de emisión de CO_2 y CH_4 sugerido por la UPME para la combustión del gas natural que se distribuye en Bogotá es de 56.39 tCO2/TJ y 1.0 kg CH_4/TJ.

El factor de emisión para el proceso de combustión que encontramos de CH4 en este proyecto fue de 31.75 kgCH_4/TJ. Este valor es 6 veces más alto que aquellos utilizados en la construcción de inventarios nacionales. Esto sugiere entonces que, es posible que la contribución del sector residencial a las emisiones nacionales esté significativamente subestimada. Adicionalmente, se deben considerar las emisiones fugitivas adicionales que encontramos en el estudio, asociadas con el encendido y apagado de los quemadores, así como a pequeñas fugas que puedan ocurrir mientras los fogones estén apagados. Estos resultados sugieren también la necesidad de replicar este tipo de análisis en otras localidades de Colombia, con mezclas de gas natural diferentes y con diferentes condiciones ambientales que pueden afectar la eficiencia de la combustión (humedad, temperatura, altura, etc.).

Con las tasas de emisión estimadas en este reporte (**Tabla *8***), el factor de emisión de CO_{2eq} (i.e., de CO_2 y Metano) para la combustión de gas natural, FE_{GN}, se puede estimar de forma sencilla como $FE_{GN} = FE_{CO_2} + GWP \times FE_{CH_4}$. De esta forma, $FE_{GN} = 57.73\, tCO_{2eq}/TJ$. De este valor total, 1.5% proviene de las emisiones de metano durante la combustión de estufas de gas natural residenciales.

Por otra parte, para estimar el posible abatimiento de emisiones que se lograría mediante electrificación de la cocción residencial, es preciso considerar el potencial aumento de la demanda de energía eléctrica y sus emisiones asociadas. Según las estimaciones de la UPME, la tasa de emisión de GEI para la generación eléctrica en el sistema interconectado nacional es de 0.112 tCO_{2eq}/MWh[9]. Este valor equivale a 31.11 tCO_{2eq}/TJ.

En el caso de la ciudad de Bogotá, se estima que la demanda promedio diario de gas natural en el sector residencial es de 38.5 GBTU/día (alrededor de un 27% de la demanda nacional residencial), equivalente a un consumo anual de 14825 TJ. Por lo tanto, nuestras mediciones indican una emisión

[7] Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
[8] Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories (US. EPA)
[9] Resolución 705 de 2024 - UPME

anual de metano por gas natural en Bogotá de 425.4 tCH_4 = 0.119 MtCO2-eq. En adición, se emiten directamente 0.836 MtCO2 por la combustión de dicho energético en Bogotá.

Por lo tanto, **es factible esperar que por cada unidad de consumo de energía final en cocción residencial que migre de gas natural a energía eléctrica, se logre un abatimiento de 26.6 tCO_{2eq}/TJ, es decir, una reducción significativa, equivalente al 54% de reducción**. Al tener en cuenta la eficiencia de las cocinas, esta reducción sería aún mayor, pues para la misma energía útil necesaria, se requería un menor consumo de energía final. De esta forma, dado que el consumo energético sería 1.75 veces menor, y aplicando los factores de emisión correspondientes, se puede inferir que la reducción en emisiones de gases efecto invernadero en Colombia por la electrificación de cocinas de gas natural es cercana al 70%. Este potencial de abatimiento significativo asume implícitamente que el factor de emisión de generación eléctrica permanece igual, es decir, que no se modifica la intensidad de carbono de la generación eléctrica.

ii. NOx y CO

La última edición del inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad de Bogotá (Tabla 11), incluyó por primera vez de forma explícita la contribución de las emisiones residenciales de NOx provenientes de consumo de gas natural. Para la estimación de las emisiones, la ciudad utiliza factores de emisión de la Agencia Ambiental Europea, que corresponden a los mostrados a continuación:

Tabla 11 Factores de emisión fuentes residenciales ciudad de Bogotá

Tabla G-1. Factores de emisiones de fuentes residenciales

Contaminante	g/GJ
NO_X	42
CO	22
SO_2	0,30
PM_{10}	0,20
$PM_{2.5}$	0,20
COV	1,80

Fuente: (European Environment Agency, 2019)

NOx. Mediante nuestras mediciones, encontramos que **el factor de emisión de NOx es de 19.10 g/GJ** indicando un valor 50% menor que el utilizado en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá. Este valor es compatible con el rango observado en otros estudios que reportan tasas de emisión para NOx entre 10 y 30 g/GJ (Figura 4b, de (Lebel et al. 2022)). La tasa de emisión depende de la intensidad con la que se opere el quemador. El factor observado es sin embargo menor que el utilizado en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá. De acuerdo a su última versión, las emisiones de NOx a la atmósferea de Bogotá provenientes de la quema de gas natural en residencias corresponde a 622 tNOx/año. Nuestros resultados indican que este valor es quizás un poco menor, del orden de 264 t NOx/año. Los resultados posiblemente indican que por la altura a la que se encuentra la ciudad de Bogotá, la combustión puede ser un poco más deficiente de oxígeno, lo que puede causar menor temperatura máxima en la combustión. Las emisiones de NOx son altamente sensibles a las temperaturas máximas alcanzadas durante la combustión. A mayor temperatura, mayor generación de NOx.

CO. Para este gas tóxico, encontramos que la **tasa de emisión derivada de este estudio es de 213.3 g/GJ**, indicando un valor significativamente más alto (un factor de 10 mayor) que el utilizado en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá. Este valor relativamente alto de emisión de CO,

acorde con nuestra discusión anterior, respalda la hipótesis la combustión a la altura de Bogotá puede ser deficiente de oxígeno, facilitando la ocurrencia de la combustión incompleta. Estos hallazgos, que indican discrepancias significativas entre los valores usados en la generación de inventarios y las emisiones del mundo real, invitan a expandir el tamaño de muestra para obtener valore más representativos y que puedan llegar a sustituir los valores por default utilizados actualmente

b) Implicancias para la calidad del aire intramural y salud

Según el enfoque del estudio, el diseño experimental permite únicamente estimar las tasas de emisión generadas durante diferentes tipos de operación de quemadores de gas natural. Es decir, no se evaluó explícitamente el impacto de la operación sobre la concentración de estos gases al interior de las viviendas.

Sin embargo, mediante un análisis sencillo, es posible estimar el potencial efecto que las tasas de emisión medidas experimentalmente en este proyecto (ver **Tabla *8*** podrían tener sobre la concentración de estas especies bajo diferentes niveles de ventilación (i.e., diversos ACH de la vivienda) y diversos tamaños de vivienda (i.e., expresados en área superficial en m^2). En términos generales, un valor de ACH (en h^{-1}) se considera bajo (una mala ventilación) si este es inferior a 3 intercambios por hora, mientras que se considera que el nivel ideal debe ser superior a 6 intercambios por hora.

Mediante el empleo de un modelo de caja simple, se puede estimar la concentración en estado estable de la siguiente manera:

$$C_{ss,i} = C_{i,b} + \frac{E_i}{ACH\ V_0}$$

Aplicando este análisis encontramos que, para aquellas viviendas pequeñas, tipo estudios, y en cualquier caso para tasas de intercambio muy bajas (ACH < 1 intercambio por hora), es factible que la concentración de NO2 exceda el límite de 90 ppb estipulado por la agencia ambiental canadiense para 1 hora de exposición. En cocinas con baja ventilación, y para periodos de cocción prolongados, las concentraciones de NO_2 pueden ser mucho mayores. Esto puede implicar un riesgo para las personas encargadas de la preparación de alimentos.

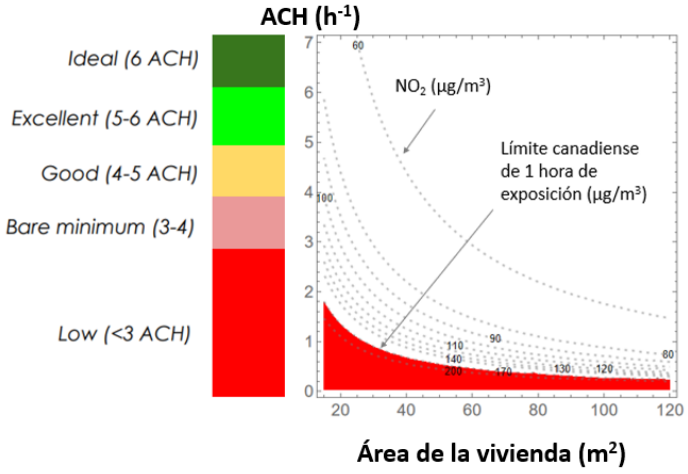


Figura 22. Estimación de la concentración de estado estable de NO2 que se puede alcanzar al interior de una vivienda, de acuerdo al área de la vivienda, y bajo diversos escenarios de intercambio de aire. Los contornos corresponden a la concentración de NO_2 en estado estable. La zona roja de la gráfica muestra aquellas condiciones que superan el límite de 90 ppb para una hora de exposición. Una altura típica de 2.4 metros fue

asumida para el inmueble, y una concentración de fondo del NO_2 de 40 µg/m^3 (que corresponde al promedio anual encontrado en la ciudad de Bogotá).

c) Conclusiones generales Colombia

Este estudio representa la primera medición directa de las tasas de emisión de contaminantes como NOx, CO y CH_4 en cocinas residenciales que utilizan gas natural en Colombia. Los resultados sugieren que las tasas de emisión de metano en el sector residencial podrían estar significativamente subestimadas en los inventarios nacionales, ya que el factor de emisión obtenido en este análisis es 6 veces mayor que los valores de referencia utilizados por la IPCC y la UPME. Adicionalmente, encontramos que, para un uso típico, las emisiones debidas a combustión son solamente el 26%, mientras que las fugas son el doble de esto, y las emisiones de encendido y apagado, que son una actividad relativamente menor, contribuyen emisiones de metano cercanas al 60% de aquellas provenientes de combustión. Esto indica la necesidad de replicar este tipo de estudios en distintas regiones de Colombia para capturar mejor la variabilidad de las emisiones según las condiciones locales de combustión y la mezcla de gas natural disponible, e incluir las fugas en el punto de uso de forma correcta en los estimativos de emisiones.

Adicionalmente, el estudio observó altas emisiones de CO (un indicador de combustión incompleta) y emisiones de NOx que, al compararlas con las utilizadas en inventarios de emisiones, son relativamente menores. Mediante nuestras mediciones, encontramos que la **tasa de emisión de NOx es de 19.10 g/GJ**, indicando un valor 50% menor que el utilizado en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá. Estos dos hechos sugieren que la combustión de gas natural en Bogotá, debido a la altura, podría estar ocurriendo en un régimen deficitario de oxígeno, lo que la hace menos eficiente que sitios a nivel del mar. Nuestra conjetura es que la disminución en la eficiencia térmica puede disminuir las temperaturas máximas alcanzadas en el proceso, lo que afecta la generación de contaminantes como NOx. Las emisiones de este gas están relacionadas directamente con las temperaturas alcanzadas durante la combustión.. Esto es particularmente relevante para la calidad del aire en espacios cerrados, tal como el que puede encontrarse en viviendas pequeñas, tipo estudios, o en sitios con tasas de intercambio muy bajas (ACH < 1 intercambio por hora), pues para dichas circunstancias es factible que la concentración de NO2 exceda el límite de 90 ppb estipulado por la agencia ambiental canadiense para 1 hora de exposición. En cocinas con baja ventilación, y para periodos de cocción prolongados, las concentraciones de NO2 pueden ser mucho mayores. Esto puede implicar un riesgo para las personas encargadas de la preparación de alimentos..

El estudio también sugiere que la electrificación de la cocción residencial podría ser una alternativa viable para reducir las emisiones de GEI en el sector residencial, al disminuir la dependencia del gas natural. Sin embargo, este cambio requeriría considerar el impacto en la demanda de electricidad y las emisiones asociadas a la generación de energía en el país. La migración de gas natural a energía eléctrica en la cocción residencial podría representar una reducción significativa en emisiones de CO_2 y CH_4, lo que contribuiría a los objetivos de Colombia de mitigación de cambio climático y mejoraría la calidad del aire en los hogares.

3. Conclusiones Brasil

Existe una variabilidad significativa en las concentraciones, probablemente relacionada con el tipo, la calidad, la edad y el estado de mantenimiento de las estufas incluidas en el estudio. Con base en las pruebas realizadas, no es posible determinar la causa exacta de las variaciones, sin embargo, se están

realizando más análisis para investigar factores como el tipo de gas, la edad de la estufa, el tipo de cocina y el tipo de vivienda (apartamento, casa).

La variabilidad en las casas para CH4 muestra que los valores más altos son solo para GN; para CO2, las concentraciones varían entre casas, pero GN y GLP parecen similares.

Las concentraciones de NOx (específicamente NO_2) fluctúan alrededor del límite de la OMS (100 ppb) (actualmente se observa en 106 ppb) sin ninguna tendencia clara. En general, se mantiene por debajo del límite de efecto sobre la salud (NIOSH 2000 ppm), excepto en algunos casos en el Ciclo 2; para NO_2, incluso cuando está en el evento de apagado constante (St_OFF), los valores a veces superan la recomendación de la OMS (1 hora = 106 ppb), pero es importante destacar que esta recomendación de valor de la concentración es para las condiciones ambientales exteriores, no en interiores. Se mantiene por debajo del límite de efecto sobre la salud (NIOSH REL ST (NO2): 1 ppm) en condiciones de operación estándar; para NO, las concentraciones se mantienen por debajo del límite de efecto sobre la salud (NIOSH REL TWA (NO): 25 ppm) en condiciones de operación estándar.

El cálculo preliminar de la tasa de emisión sugiere que los factores de emisión adoptados actualmente para el inventario de emisiones de GEI podrían estar subestimados en Brasil, una conclusión similar a la alcanzada por las universidades de Colombia y Chile.

El factor de emisión de metano promedio obtenido a partir de las mediciones por GN tomadas fue de 14,58 kg/TJ sin los valores atípicos y con el cien por ciento de los datos fue de 48,92 kg/TJ, 49 veces mayor que el factor nacional y 9,8 veces mayor que el valor del IPCC.

4. Conclusiones generales

Las conclusiones de los estudios en los tres países evidencian que las emisiones de metano y otros contaminantes provenientes de cocinas a gas representan un desafío para la salud pública y el medio ambiente en ambos países. En Chile, se destaca la presencia de emisiones fugitivas de metano incluso cuando los quemadores están apagados, lo cual resalta la necesidad de monitoreo y regulación de estos aparatos en los hogares. En Colombia y Brasil, las mediciones directas sugieren que las emisiones de metano en el sector residencial podrían estar subestimadas en los inventarios nacionales, especialmente en áreas urbanas como Bogotá, donde la combustión de gas natural podría ser menos eficiente debido a la altura y las condiciones ambientales locales. Esto refleja la importancia de realizar estudios en diferentes regiones para obtener datos representativos y mejorar la precisión de los inventarios de emisiones.

Los estudios en los tres países obtienen factores de emisión de metano diferentes a los establecidos en los inventarios nacionales y en IPCC. En el caso de Chile el factor de emisión de 199.12 (kgCH4/TJ) **39 veces mayor en promedio que lo usado para construir el inventario nacional de emisiones (5 kgCH4/TJ).** En el caso de Colombia el factor de emisión obtenido es de 31.75 kgCH4/TJ, 6 veces más alto que aquellos utilizados en la construcción de inventarios nacionales. En el caso de Brasil el factor de emisión de metano promedio obtenido a partir de las mediciones por GN tomadas fue de 14,58 kg/TJ sin los valores atípicos y con el cien por ciento de los datos fue de 48,92 kg/TJ, 49 veces mayor que el factor nacional y 9,8 veces mayor que el valor del IPCC.

Tabla 12 Factores de emisión levantados en el estudio

	Fatores de Emissão	
	Varições com relação ao IPCC	
	CO2 (kg/TJ)	CH4 (kg/TJ)
Colombia	56.850	31,75
Cuantas veces diferente al IPCC	**1,013**	**6,4**
Chile	84.910	199,12
Cuantas veces diferente al IPCC	1,514	39,8
Brasil	20.940	49
Cuantas veces diferente al IPCC	0,37	9,8

Tabla 13 Fatores de emisión del IPCC para Gas Natural (kg/TJ)

Fatores de emissão do IPCC para Gas Natural (kg/TJ)	
CO2	CH4
56.100	5

Fuente: Cuadro 2.4, Capitulo 2 IPCC. Factores de emisión por defecto para la combustión estacionaria en la categoría RESIDENCIAL (kg de gas de efecto invernadero por TJ sobre una base calórica neta)

En todos los países se enfrentan al reto de reducir las emisiones en el sector residencial, ya sea mediante la mejora de la eficiencia de los quemadores, la promoción de la electrificación en la cocción residencial, o la implementación de normativas que regulen la calidad del aire interior. La migración de gas natural a fuentes de energía eléctrica puede representar una reducción significativa en emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire en los hogares, contribuyendo a los compromisos ambientales de Chile y Colombia. Este enfoque conjunto de regulación, monitoreo y transición energética será fundamental para proteger la salud de los ciudadanos y avanzar en las metas de mitigación del cambio climático.

Con respecto al impacto en la salud de las personas por medio de este estudio se identifica en el caso de Chile, los niveles de CO2 la media de emisiones es superior a lo establecido por la norma canadiense de 1.000 ppm durante un periodo de 24 horas, llegando a 1.412 ppm. Y con respecto a NO_2 se idéntica en Chile que la media de emisiones supera los 90 ppm establecido por la norma canadiense de Residential Indoor Air Quality Guidelines (Health Canada) para una hora. Por otro lado, en Brasil se identificó que, en algunos casos, cuando los quemadores de cocina estén encendidos, los niveles de emisión de NO_2 superan el umbral de efectos sobre la salud establecidos por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos, alcanzando niveles que podrían producir efectos mínimos sobre la salud. Finalmente, en el caso de Colombia se concluye que si las tasas de intercambio son muy bajas (ACH < 1 intercambio por hora), es factible que la concentración de NO_2 exceda el límite de 90 ppb estipulado por la agencia ambiental canadiense para 1 hora de exposición.

VI. BIBLIOGRAFÍA

IPCC AR6. 2023. “Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kashtan, Yannai S., Metta Nicholson, Colin Finnegan, Zutao Ouyang, Eric D. Lebel, Drew R. Michanowicz, Seth B.C. Shonkoff, and Robert B. Jackson. 2023. “Gas and Propane Combustion from Stoves Emits Benzene and Increases Indoor Air Pollution.” Environmental Science & Technology 57 (26): 9653–63. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09289.

Lebel, Eric D., Colin J. Finnegan, Zutao Ouyang, and Robert B. Jackson. 2022. “Methane and NO x Emissions from Natural Gas Stoves, Cooktops, and Ovens in Residential Homes.” Environmental Science & Technology 56 (4): 2529–39. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04707.

VITO, UniAndes. 2020. “Informe Sobre El Desarrollo y Supuestos Del Escenario de Mitigación.” https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/cambio-climatico-Informe-sobre-el-desarrollo-supuestos-del-escenario-de-mitigacion-ndc.pdf.

Vardoulakis S., Kinney P. Grand Challenges in Sustainable Cities and Health. Front. Sustain. Cities. 2019;1 doi: 10.3389/frsc.2019.00007

DIR. Department of Industrial Relatiohips. State of California, online resource. General Industry safety orders, subchapter Control of hazardous substances, article 107 dusts, fumes, mists, vapors and gasses. Visitado online el 10 de octubre del 2024. (https://www.dir.ca.gov/title8/5155table_ac1.html#_blank)

Health Canada. (2021). Residential indoor air quality guidelines: Carbon dioxide (CO_2). Government of Canada. https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/residential-indoor-air-quality-guidelines-carbon-dioxide/carbon-dioxide.pdf

Health Canada. (2019). Consultation on proposed residential indoor air quality guidelines for benzene. Government of Canada. https://www.canada.ca/en/health-canada/programs/consultation-proposed-residential-indoor-air-quality-guidelines-benzene/document.html

Traynor, G. (1996). Pollutant Emission Factors from Residential Natural Gas Appliances: A Literature Review. Lawrence Berkeley National Laboratory.

MDSF (Ministerio de Desarrollo Social y Familia). 2022. [en línea]. Resultados Vivienda Casen 2022. Recuperado en: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/Resultados_Vivienda_Casen_2022.pdf. Consultado el 12 de Octubre de 2024.

DIR. Department of Industrial Relatiohips. State of California, online resource. General Industry safety orders, subchapter Control of hazardous substances, article 107 dusts, fumes, mists, vapors and gasses. Visitado online el 10 de Octubre del 2024. (https://www.dir.ca.gov/title8/5155table_ac1.html#_blank)

Health Canada. (2021). *Residential indoor air quality guidelines: Carbon dioxide (CO_2)*. Government of Canada. https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/residential-indoor-air-quality-guidelines-carbon-dioxide/carbon-dioxide.pdf

Health Canada. (2019). *Consultation on proposed residential indoor air quality guidelines for benzene*. Government of Canada. https://www.canada.ca/en/health-canada/programs/consultation-proposed-residential-indoor-air-quality-guidelines-benzene/document.html

Traynor, G. (1996). Pollutant Emission Factors from Residential Natural Gas Appliances: A Literature Review. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

MDSF (Ministerio de Desarrollo Social y Familia). 2022. [en línea]. Resultados Vivienda Casen 2022. Recuperado en: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/Resultados_Vivienda_Casen_2022.pdf. Consultado el 12 de Octubre de 2024.

Cardemil, M (2023). *Emisiones de gas metano en el contexto de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC)*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Serie Minutas Nº 119-23.