



TRANSICIÓN ENERGÉTICA A NIVEL RESIDENCIAL

Cocción y Calefacción
en América Latina

Reporte campaña de medición: Bogotá, Colombia

Towards the electrification of gas appliances in Latin America:
A narrative from the Global South

UNA INICIATIVA DE:



IMPLEMENTADO POR:



Stanford University



UNIVERSIDAD
MAYOR



Universidad de
los Andes
Colombia



futuro
latinoamericano

EBP 

30 años |  **futuro**
latinoamericano

Ricardo Morales Betancourt, PhD., Universidad de los Andes, Bogotá.

Thalia Alejandra Montejó, MsC., Universidad de los Andes, Bogotá.

Paola Valencia, EBP Chile.

Nicola Borregaard, EBP Chile.

Diciembre 2024, Bogotá, Colombia.

CONTENIDO

CONTENIDO	3
1. INTRODUCCIÓN:	4
a. Contexto Global	4
a. Contexto colombiano de las emisiones residenciales	4
b. Descripción proyecto monitoreo	6
2. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	7
a. Protocolo de monitoreo	7
b. Dispositivos de medición	9
c. Definición de elementos de muestreo	9
d. Selección y caracterización de viviendas	10
e. Contacto con voluntarios post-selección	11
f. Metodología de estimación de la tasa de emisión	12
3. RESULTADOS	14
a. Concentración de gases muestreados	14
b. Resultados consolidados	16
Metano CH ₄	16
Óxidos de nitrógeno NO _x	18
Monóxido CO	19
c. Factores de emisión estimados para Bogotá	20
4. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES	21
a. Impacto global de las emisiones residenciales: CH ₄ y CO ₂	21
b. Impacto en la salud: calidad del aire intramural	22
c. Contribución de las emisiones de NO _x por cocción residencial en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá	23
d. Conclusiones	25
5. BIBLIOGRAFÍA	26
6. ANEXOS	27
a. Formulario de inscripción de voluntarios	27
b. Formularios de Consentimiento Informado	29
c. Formulario de caracterización vivienda seleccionada	30

1. INTRODUCCIÓN:

a. Contexto Global

Actualmente se estima que el aumento de la concentración atmosférica de metano (CH_4) contribuye con el 35% del calentamiento planetario producido por 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. A pesar de su corta vida atmosférica, el CH_4 tiene un alto potencial de calentamiento global, que para un horizonte de 100 años es 28 veces mayor que el del CO_2 ¹. En un horizonte más corto, de 20 años, por ejemplo, el potencial de calentamiento global del metano es inclusive mayor, estimado en 84 veces 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.

b. Contexto colombiano de las emisiones residenciales

En Colombia, para el año 2020, las emisiones de metano fueron 80.1 $\text{MtCO}_{2\text{-eq}}$ y se proyectaba que crecerían un 14% más para 2030, alcanzando 91.6 $\text{MtCO}_{2\text{-eq}}$ 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.

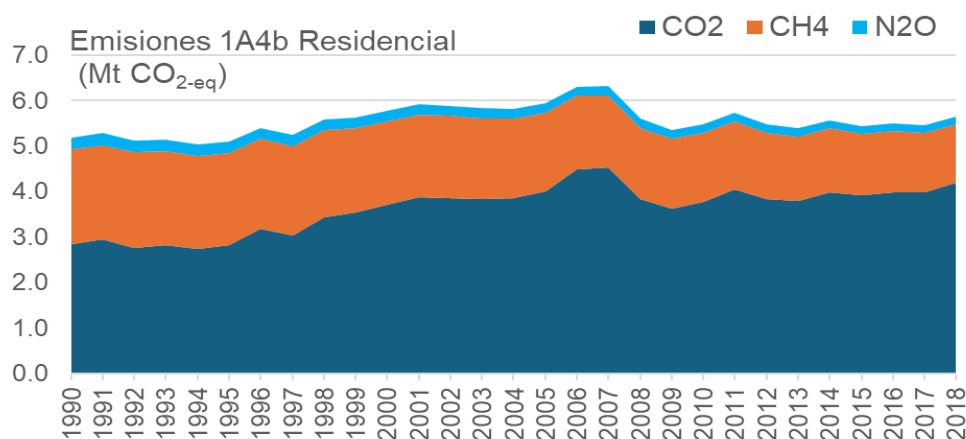


Figura 1. Emisiones de gases efecto invernadero (en $\text{CO}_2\text{-eq}$) por parte del sector residencial (categoría IPCC 1A4b) de acuerdo con el inventario de gases efecto invernadero reportado en el BUR3. Los datos provienen del BUR3 de Colombia. Elaboración propia con datos del BUR3.²

¹ [Climate Change 2014: Synthesis Report \(Box 3.2\)](#)

² [BUR3: 3er Informe Bienal de Actualización de Cambio Climático de Colombia.](#)

Por su parte, de acuerdo con el BUR3³ de Colombia, el sector Residencial (Categoría IPCC 1A4b) generaba 5.64 MtCO_{2-eq} en el año 2018 (**Figura 1**), lo que equivale a 1.9% de las emisiones nacionales para ese mismo año (302 MtCO_{2-eq}). 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 (que incluye la cocción de alimentos), calentamiento de agua, refrigeración, iluminación, y uso de electrodomésticos. Adicionalmente incluye la demanda asociada a diversos energéticos como energía eléctrica, leña, LPG y gas natural. En el caso colombiano, 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 (**Figura 2**). Adicionalmente, entre los años 2005 y 2016 se incrementó 122% los usuarios residenciales conectados a gas natural (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.

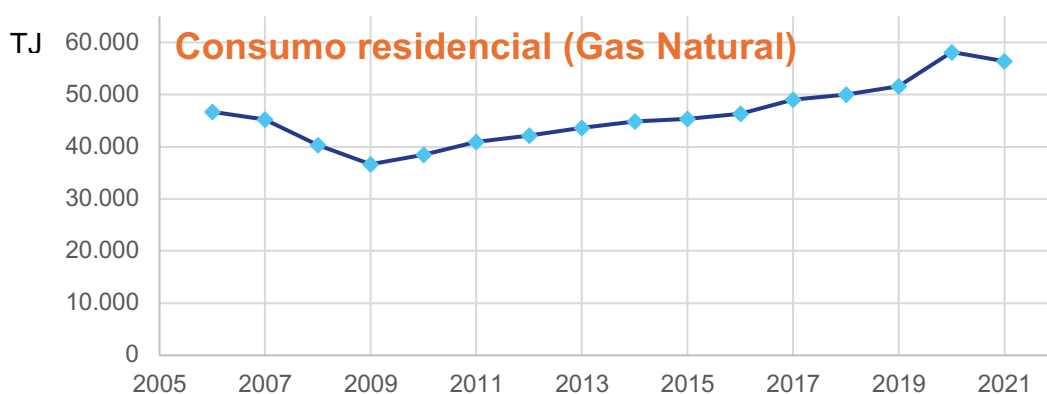


Figura 2. Consumo final de gas natural por el sector residencial en Colombia. Fuente: Balance Energético Colombiano (BECO)

Si bien la contribución de la quema de combustibles a las emisiones globales de metano es relativamente 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 (CO₂) 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 + NO₂), 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 (Jackson et al., 2022) siguen filtrando metano y benceno a los hogares. Por otra parte, la exposición al NO₂ 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.

c. Descripción proyecto monitoreo

El proyecto de monitoreo consiste en determinar las tasas de emisión de gases asociados al uso de gas natural en cocinas residenciales. 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 Sao Paulo (Brasil).

En el caso del gas metano (CH₄), el cual constituye entre el 80% y el 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 (CO₂), es el principal producto que se genera en la combustión del gas natural (y de cualquier otro combustible fósil), y, por tanto, se espera que se genere 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 oxígeno o bien por que la temperatura del proceso no es suficientemente alta. A su vez, los óxidos de nitrógeno, NO y NO₂, se producen en cualquier proceso de alta temperatura en presencia de aire. Su formación, se debe a la descomposición térmica del aire (compuesto de N₂ y O₂) que en las altas temperaturas de un proceso de combustión se separa y se recombina para formar pequeñas cantidades de NO y NO₂. A la suma de estos dos gases, que una vez en la atmósfera se convierten rápidamente el uno al otro, se les conoce como la familia química del NO_x (= NO+NO₂).

En el caso de Latinoamérica no existe registro de parte de estos gases producto de uso doméstico en Latinoamérica, y por tanto, las mediciones directas que se plantean en este proyecto serán una fuente clave para cuantificar las emisiones 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 ₆ H ₆ .
	15 en Temuco	

Brasil	30 en Sao Pablo	CH ₄ , CO ₂ , NO ₂
Colombia	20 en Bogotá	CH ₄ , CO ₂ , NO ₂ , CO

2. Descripción de actividades

a. Protocolo de monitoreo

Para determinar las tasas de emisión de CO₂, CO, CH₄, 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 3**). 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. Las estufas que se estudiaron en este proyecto se definen naturalmente como la superficie plana que contiene uno o varios elementos de cocción individuales, a los que 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.

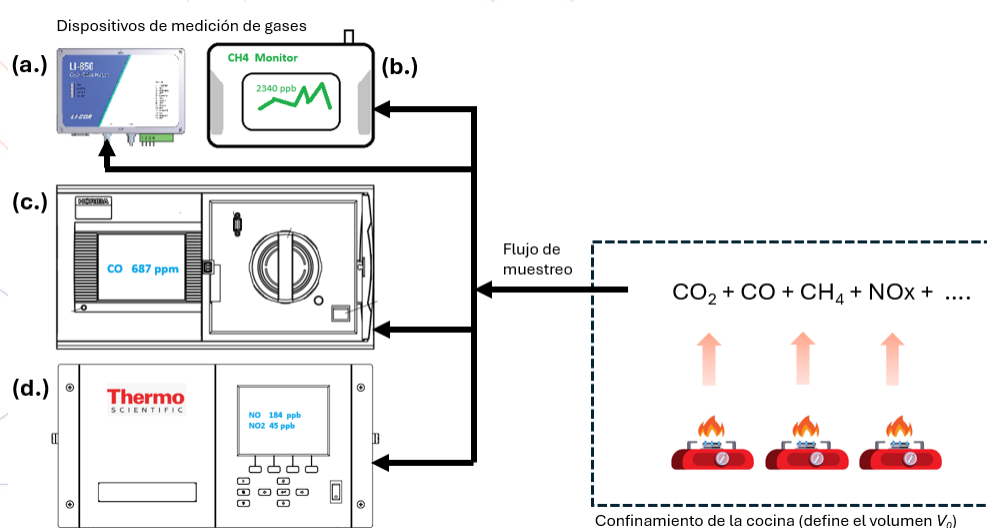


Figura 3. Esquema del proceso de monitoreo de tasa de emisión de gases. A través de una sonda se toma un flujo de muestra que proviene de la cocina que fue confinada mediante el despliegue de barreras plásticas. El flujo de muestra es conducido a los diferentes equipos de medición de gases (a.) Li-COR 850 para CO₂, (b.) Picarro G4301 para CH₄, (c.) Horiba APMA-370 para CO, y (d.) Thermo Scientific 42i para NO_x.

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 2. A continuación, se describen las fases de manera detallada:

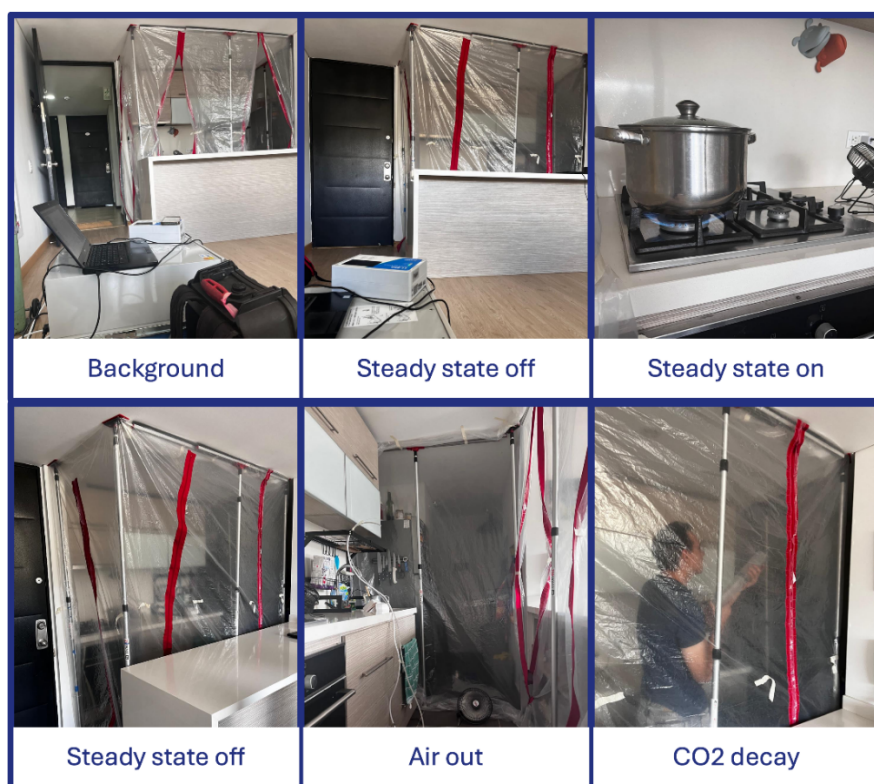


Figura 4. Ilustración de la metodología aplicada durante el proceso de monitoreo de gases en cocinas a gas natural

Ventilación. Este proceso consiste en permitir que los niveles de los gases a medir al interior de la cocina sean similares a los niveles de fondo o basales. Para ello, se permite el intercambio efectivo de aire a través de ventanas y con ayuda de ventiladores.

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 , NO_x , 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.

Medición tasa de intercambio. Después de la etapa anterior, se ventila la cocina para reducir las concentraciones de todos los gases. Después de volver 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 CO₂ 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.

b. 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 CO₂ ronda los 430 ppm⁴. La concentración de metano es cercana a los 1800 ppb⁵. 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 CH₄, NO₂, 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).

Tabla 1. Especificaciones de los equipos de medición utilizados en la campaña de medición en Bogotá, Colombia. 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.

GAS	FABRICANTE	MODELO	PRINCIPIO DE DETECCIÓN	PRECISIÓN*
CH ₄	Picarro	GasScouter G4301	Espectroscopía NDIR	± 20.0 ppb
CO ₂	Li-COR	Li-850	Espectroscopía NDIR	± 10.0 ppm
CO	HORIBA	APMA-370	Espectroscopía NDIR	± 25.0 ppb
NO _x	Thermo Scientific	42i	Quimoluminiscencia	± 0.40 ppb
Temperatura	Onset	HOBO U10 datalogger	Termistor	± 0.53°C

c. Definición de elementos de muestreo.

Cada unidad muestral se establece como una unidad cocina con un “artefacto estufa a gas natural” donde se realizan mediciones en al menos 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 5**).

⁴ 1 ppm es una parte por millón. Es decir, una molécula del gas en cuestión por cada 1.000.000 de moléculas de aire.

⁵ 1 ppb denota una parte por cada mil millones. Es decir, 1 parte por cada 1.000.000.000 de moléculas de aire.



Figura 5. Quemador 1 y quemador 2 (diversos tamaños) en la cocina M7_Casa13, medida en Bogotá.

d. Selección y caracterización de viviendas

Para llevar a cabo esta investigación, se 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 bien sean ventanas o extractores. Además, solicitamos 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: Busca asegurar una representación adecuada (en Colombia este varía desde 1 hasta 6, siendo 1 el más bajo y 6 el más alto).
- Localidad: Se consideró para abarcar diversas áreas y contextos de la ciudad.
- 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.

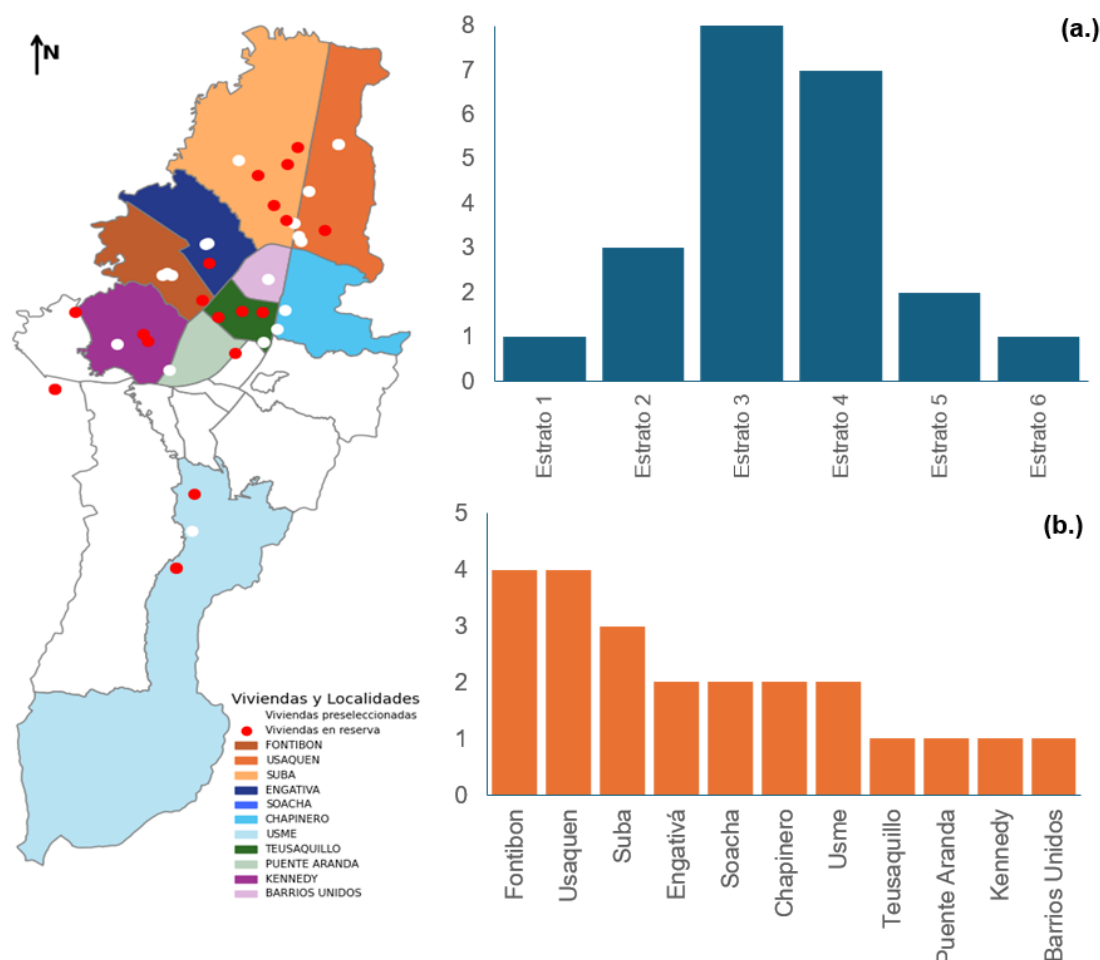


Figura 6. Mapa de la ciudad de Bogotá mostrando la distribución espacial de las viviendas seleccionadas. Se muestra también su distribución de acuerdo con (a.) estrato socioeconómico de la vivienda y (b.) la localidad en la que están ubicadas. Localidad es una división administrativa utilizada en la ciudad de Bogotá.

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 6**). 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.

e. Contacto con voluntarios post-selección.

Desde el equipo de investigación, se designó a una persona específica como único punto de contacto con los propietarios de las viviendas seleccionadas, cuya identidad fue notificada a los participantes por correo electrónico. Una vez confirmada esta designación, el equipo de investigación contactó a los interesados para confirmar que sus viviendas cumplían con el criterio principal de inclusión: tener una cocina conectada a la red de gas natural. Tras esta confirmación, se proporcionó información detallada sobre el estudio y se agendó la visita.

Se explicó también que cada muestreo tomaría aproximadamente 3 horas, con dos opciones de turno: el primero en la mañana (llegada a las 9:00) y el segundo en la tarde (llegada a las 14:00). Además, se informó a los participantes que el equipo llevaría todos los instrumentos y accesorios necesarios para realizar el muestreo y que, durante este tiempo, no podrían ingresar a la cocina. Un día antes de la visita, se enviaron los nombres de los técnicos que asistirían, junto con la hora de llegada programada. Al llegar a la vivienda el día de la visita, se solicitó al propietario la firma del formulario de consentimiento (Anexo 3: Formularios de Consentimiento Informado), donde se detallan los aspectos del proyecto y se solicita autorización para tomar fotografías en el lugar.

f. Metodología de estimación de la tasa de emisión

La estimación de 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 (mol/m³) de dicho gas en el tiempo se expresa como:

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

Donde $\frac{dC_i}{dt}$ es la tasa de cambio de la concentración medida del gas “i” (mol / m³.min) en el intervalo de tiempo dt , $C_{i,b}$ (mol/m³) es la concentración basal o ambiental del gas “i”, V_0 es el volumen de la cocina (m³), λ (min⁻¹) es la tasa de intercambio de aire, también conocida como ACH (*Air Changes per Hour*) y al medir de forma precisa la concentración C_i en el tiempo, es posible determinar la tasa de emisión instantánea del gas “i”. Esta metodología puede ser aplicada repetidas veces al interior de una misma cocina, alterando en cada ocasión el modo de operación de la estufa. 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:

$$\bar{E}_i = V_0 \left(\frac{\Delta C_i}{\Delta t} + \lambda (\bar{C}_i - C_{i,b}) \right) \frac{p}{RT}$$

En la ecuación anterior, $\bar{E}_i$ (mol/min) es la tasa de emisión promedio durante el periodo Δt bajo un modo de operación, y $\bar{C}_i$ es la concentración promedio durante ese mismo periodo. 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). El factor $\frac{p}{RT}$, es un factor de transformación que debe tenerse en cuenta. Una vez determinada la tasa de emisión $\bar{E}_i$, es posible expresar las emisiones por unidad de gas natural consumido. Si conocemos la composición promedio del gas natural ($C_x H_y$) y asumiendo que la mayoría del carbono contenido originalmente en el gas natural se emite como CO₂, CO, y CH₄, 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, $\bar{q}_{GN}$ en (mol/min), será $\bar{q}_{GN} \approx (\bar{E}_{CO_2} + \bar{E}_{CO} + \bar{E}_{CH_4})/x$. 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”: $FE_i = M_i \bar{E}_i / (\bar{q}_{GN} LHV)$ en unidades de kg/TJ o ng/J. Los parámetros necesarios para este cálculo se detallan en la **Tabla 2**.

Estimaciones del volumen V_0 de las cocinas:

El volumen del espacio confinado se puede determinar con la liberación de una cantidad conocida de un gas específico, por ejemplo, CO₂ o etano, del cual no haya fuentes al interior del espacio y del cual se pueda determinar de forma precisa de su concentración (asumiendo una concentración homogénea del gas). Sin embargo, algunos estudios reportan que la medición del volumen con este procedimiento solamente difiere en un 3% de la determinación del volumen por medio del 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).

Estimaciones de la tasa de intercambio ACH.

La tasa de intercambio, o ACH cuantifica la tasa de intercambio entre un dominio y el exterior. Por nuestra metodología, se busca que, una vez cerrada la cocina, la tasa de intercambio ACH sea muy baja. En nuestro estudio, reservamos un periodo del proceso de medición para, después de ventilar la cocina y asegurarse que las concentraciones fueran similares a las ambientales, hacer una liberación controlada de CO₂ y medir la tasa de decaimiento de la concentración. Con este proceso estándar es posible determinar la tasa ACH.

Características 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 comparados 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 2**.

Tabla 2. Composición química y propiedades físicas del gas natural distribuido en la ciudad de Bogotá, factores de emisión utilizados para los inventarios Nacionales. 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/m ³)	0.83
C ₂ H ₆	Etano	10.23%	#C promedio	1.14
C ₃ H ₈	Propano	1.12%	#H promedio	4.19
C ₄ H ₁₀	Butano	1.67%	Peso mol. (g/mol)	19.55
C ₅ H ₁₂	Pentano	0.24%	LHV (MJ/kg)	45.05
C ₆ H 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%	FECH ₄ (kgCH ₄ /TJ)	5.00

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 residencial⁶.

⁶ [BMC - Energía Tomada por Comerciantes](#)

3. RESULTADOS

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.

September 2024						
Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
						1
2	3	4	5	6	7	8
9 M1_Casa4 M2_Casa17	10 M3_Casa22 M4_Casa33	11 M5_Casa23 M6_Casa37	12 M7_Casa13 M8_Casa2	13 M9_Casa1 M10_Casa27	14 M11_Casa9 M12_Casa8	15 M13_Casa6
16 M14_Casa28 M15_Casa34	17 M16_Casa26 M17_Casa25	18 M18_Casa20 M19_Casa40	19 M20_Casa38 M21_Casa39	20	21	22
23	24	25 M22_Casa41 M23_Casa42	26	27	28	29
30						

Figura 7. 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.

a. Concentración de gases muestreados

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 CO₂, 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.

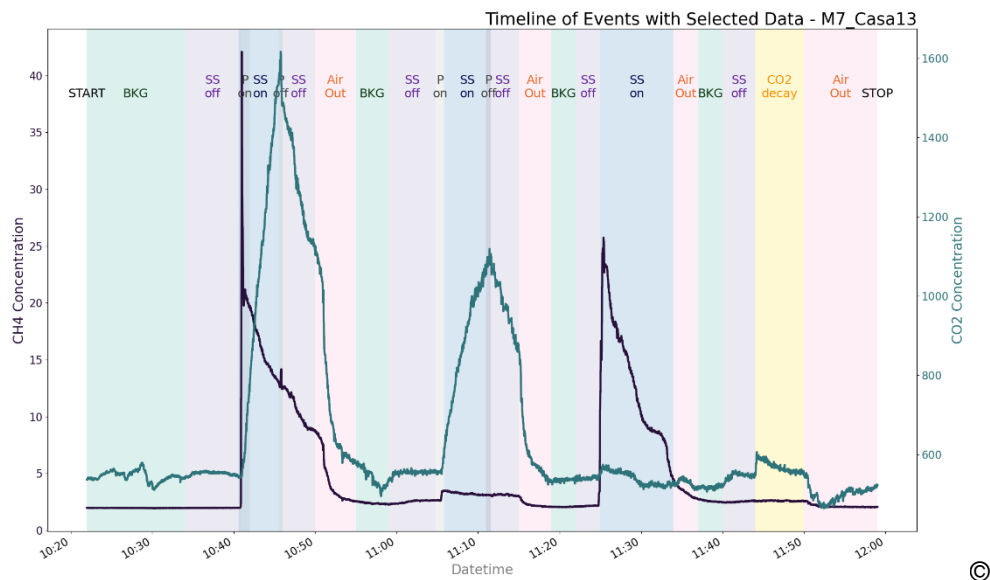


Figura 8 Serie de tiempo del proceso de medición (M7_Casa13). En la gráfica se ven los cambios abruptos de concentración para CH₄, NO_x y CO₂ durante los diferentes momentos de la medición. En el mismo se encuentran demarcados los diferentes niveles de cada uno de los gases medidos exceptuando benceno

En la **Figura 9** se muestra la dinámica de las concentraciones de CH₄, CO₂ y NO_x medidas durante el primer ciclo de medición en la cocina de la casa M7_Casa13. 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 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.

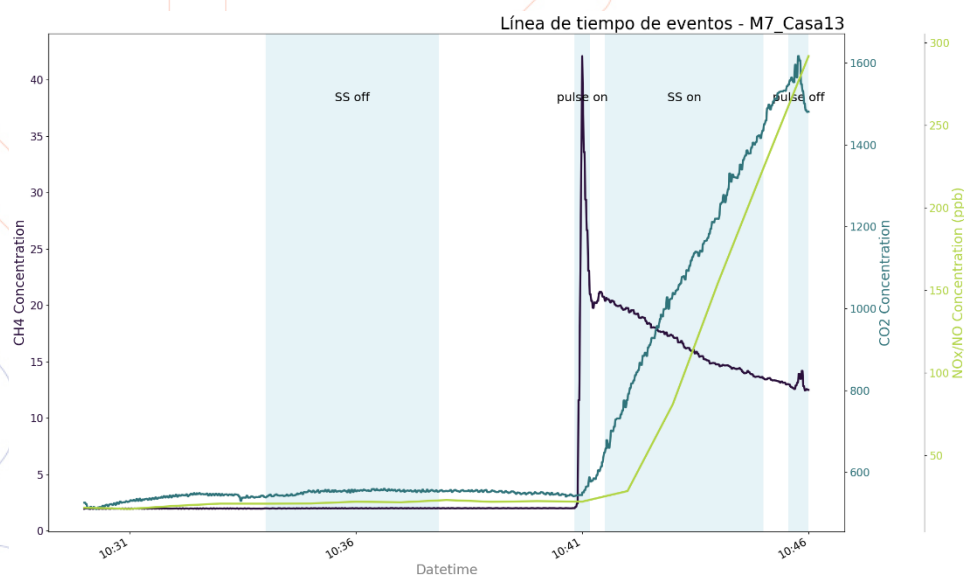


Figura 9. Dinámica de concentraciones de CH₄, CO₂ y NO_x durante el ciclo de medición del quemador en una cocina.

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 NO_x) aumentan rápidamente su concentración durante los periodos en los que un quemador está encendido.

b. Resultados consolidados

Metano CH_4

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 altas 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.

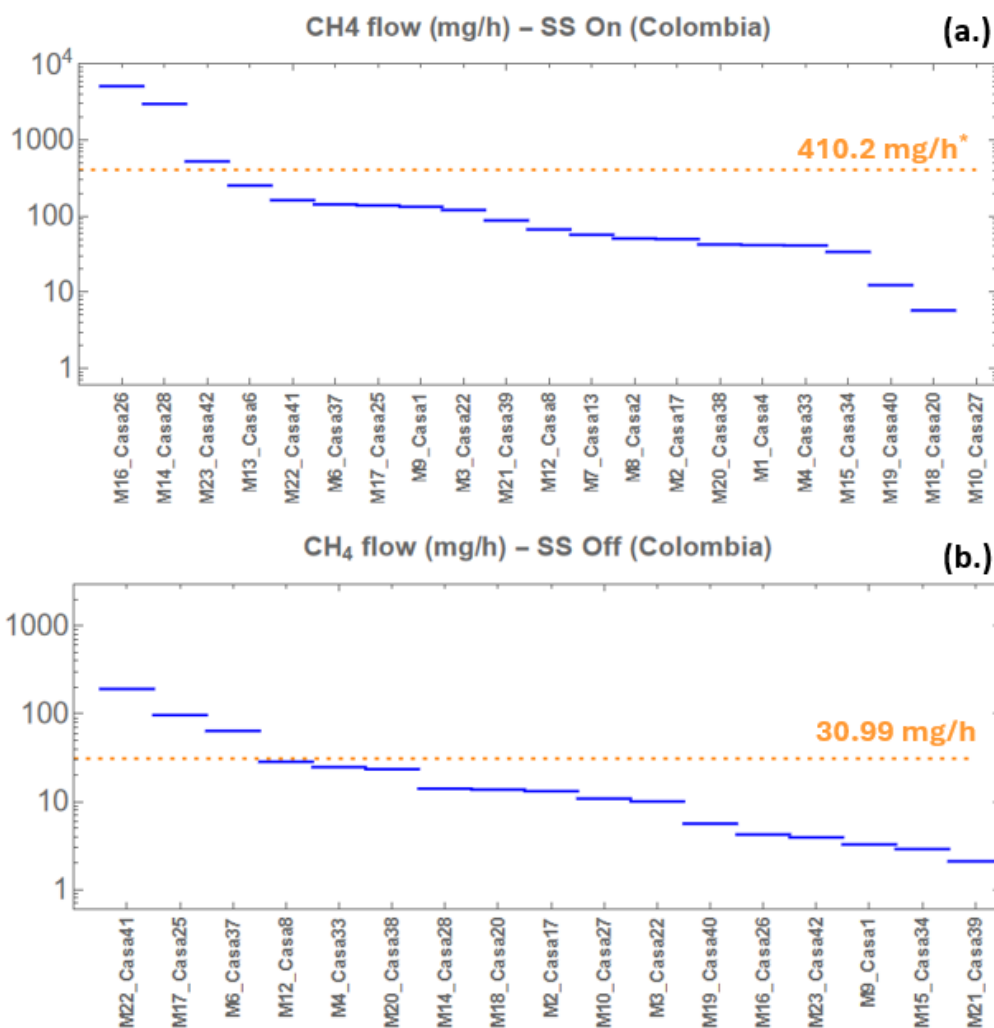


Figura 10. Tasas de emisión promedio para cada vivienda durante la fase (a.) “estado estacionario ON” es decir, emisiones de metano durante la combustión, y (b.) “estado estacionario OFF”, es decir, fugas de metano provenientes de las cocinas cuando la estufa no está en operación. La línea punteada (y 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.

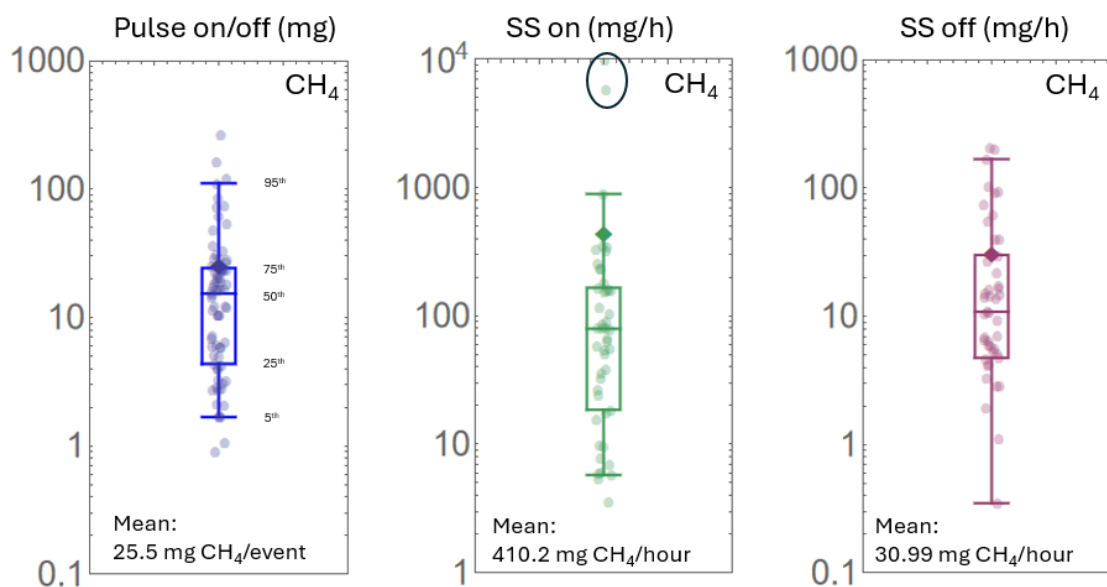


Figura 11. Gráfica tipo “box-plot” con los datos consolidados de las emisiones de metano bajo los tres modos de operación considerados: Pulsos de encendido y apagado, estado estacionario ON, y estado estacionario OFF. En esta representación se hace claro que hay dos valores extremos en las emisiones 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 CH₄ 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 CH₄/año.

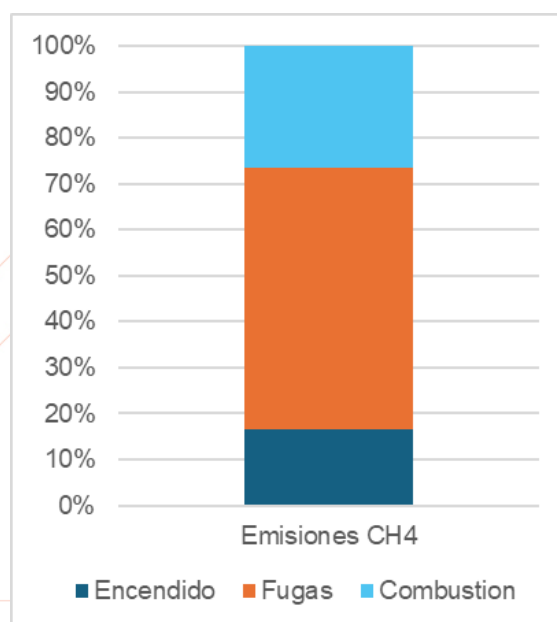


Figura 12. Participación de cada tipo de actividad en la generación de emisiones de metano a la atmósfera en cocinas residenciales.

Óxidos de nitrógeno NO_x

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

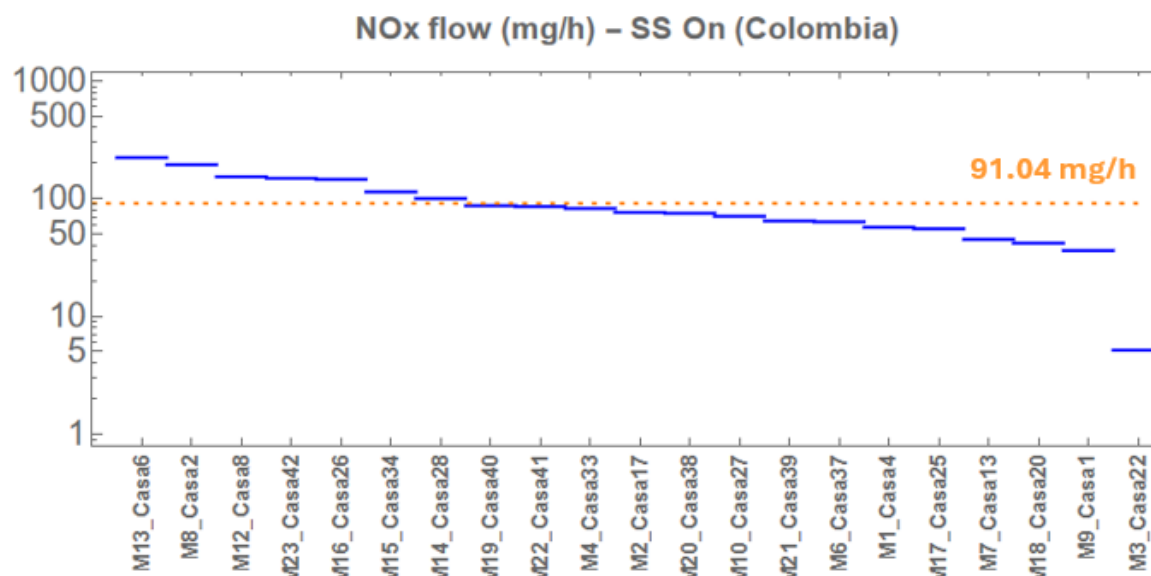


Figura 13. Tasas de emisión de NOx (en mg/h) promediadas por vivienda en la ciudad de Bogotá. La línea punteada representa el valor promedio de todos los quemadores individuales.

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 CO₂. 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 CO₂ que emitieron las estufas analizadas.

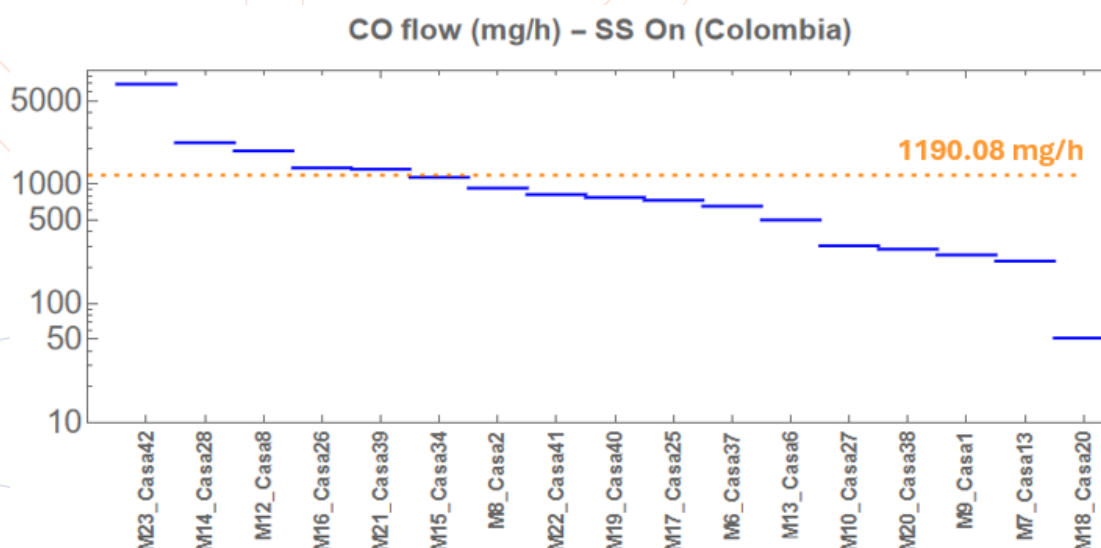


Figura 14. Tasas de emisión de monóxido de carbono (CO) para todas las viviendas en las que se midió este gas.

c. Factores de emisión estimados para Bogotá

Como resultado de nuestras mediciones directas, podemos establecer algunos factores de emisión para su utilización en inventarios de emisiones. Estos factores de emisión típicamente se expresan en términos de unidad de energía consumida (kg de la especie emitida por TJ de energía consumida) o bien en términos del volumen de gas natural utilizado (kg de la especie emitida por MPC (millones de pies cúbicos) de gas natural utilizado).

La **Tabla 3** consigna el resultado de expresar las mediciones directas de este proyecto en términos de factores de emisión. Estos pueden ser utilizados de forma más inmediata para el uso en inventarios nacionales o locales de emisión, pues los datos de actividad (i.e., de consumo) típicamente están disponibles en términos de consumo total de energía o en volumen total.

Tabla 3. 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)
NO _x	91.04 (mg/h)	19.10 (gNO _x /GJ)

4. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

Este estudio constituye la primera medición directa de las tasas de emisión de NO_x, CO, y CH₄ provenientes del uso de gas natural en cocinas residenciales en Latinoamérica. Los resultados de este esfuerzo de obtener tasas de emisión *del mundo real* están consignados en la **Tabla 3**. 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. Impacto global de las emisiones residenciales: CH₄ y CO₂

En los lineamientos del IPCC para el cálculo de inventarios nacionales de gases efecto invernadero se sugiere utilizar un factor de emisión default de 5.0 kgCH₄/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 kgCH₄/TJ para el mismo proceso⁸. Por su parte, en Colombia, el factor de emisión de CO₂ por combustión de gas natural es de 55.5 tCO₂/TJ⁹.

Para Metano, el factor de emisión para el proceso de combustión que encontramos en este proyecto fue de 31.75 kgCH₄/TJ. **Este valor es 6 veces más alto que aquellos utilizados en la construcción de inventarios nacionales.** Mas relevante aún, es que, durante un día completo, las fugas de metano, que ocurren continuamente mientras la estufa no está en operación pueden emitir un poco más del doble de metano que lo que se emite durante la operación (**Figura 12**). Este trabajo, en el que determinamos factores de emisión del mundo real, sugiere que la contribución del sector residencial a las emisiones nacionales de metano está significativamente subestimada.

Con las tasas de emisión estimadas en este reporte (**Tabla 3**), el factor de emisión de CO_{2eq} (i.e., de CO₂ 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, $FE_{GN} = 57.73 \text{ tCO}_{2eq}/\text{TJ}$. 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}/MWh¹⁰. Este valor equivale a 31.11 tCO_{2eq}/TJ. Ahora bien, de acuerdo con el Balance de Energía Útil, las cocinas eléctricas en Colombia tienen una eficiencia del 70% mientras que las estufas a gas una del 40%. Por lo tanto, una familia que requiera la misma cantidad de energía útil para cocción va a consumir 1.75 veces más energía final si suple dicha energía con gas natural en comparación con el escenario de suplir dicha energía con electricidad.

Esto significa que la transición hacia el uso de cocinas eléctricas tiene dos componentes que contribuirían a la disminución en emisiones: (1) Una, es la menor demanda energética asociada al uso

⁷ [Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories](#)

⁸ [Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories](#) (US. EPA)

⁹ [Consolidación de Escenarios de Emisiones GEI por Sector en Colombia \(VITO - Uniandes\)](#)

¹⁰ [Resolución 705 de 2024 - UPME](#)

de electricidad (por su mayor eficiencia) y (2) dada la matriz energética colombiana, menores emisiones por unidad de energía final consumida. 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.

b. Impacto en la salud: calidad del aire intramural

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 como tal 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 3**) 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 m²). 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, solamente para aquellas viviendas pequeñas tipo estudios y solamente para viviendas con tasas de intercambio muy bajas (ACH < 1 intercambio por hora), es factible que la concentración de NO₂ exceda el límite de exposición de corto plazo (1 hora) en espacios intramurales agencia ambiental canadiense¹¹, que es de 90 ppb (170 µg/m³). Este límite es ligeramente más estricto que el estipulado por la OMS en sus directivas para calidad del aire intramural¹², que para NO₂ es de 200 µg/m³. 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.

¹¹ [Residential Indoor Air Quality Guidelines \(Health Canada\)](#)

¹² [WHO Guidelines for Indoor Air Quality \(2010\)](#)

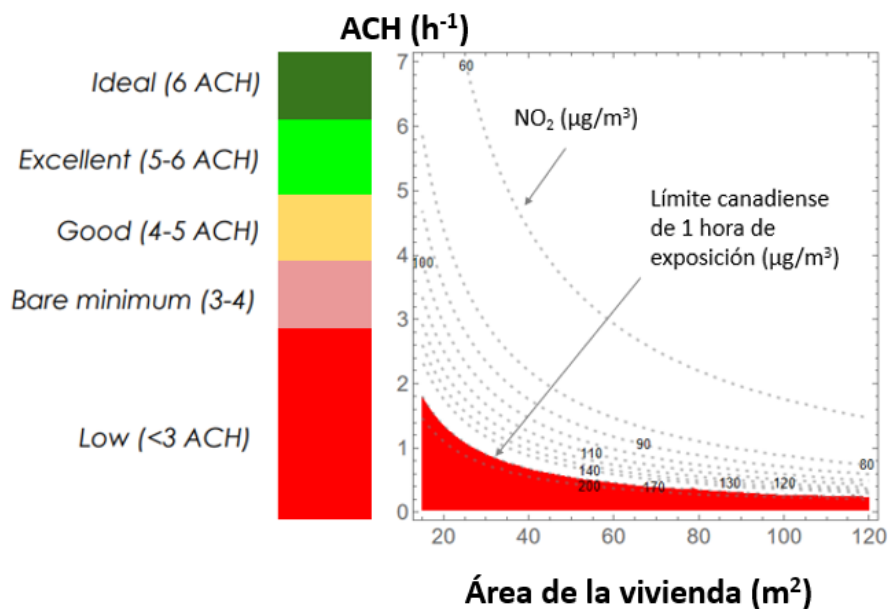


Figura 15. Estimación de la concentración de estado estable de NO_2 que se puede alcanzar al interior de una vivienda, de acuerdo con el área de la vivienda, y bajo diversos escenarios de intercambio de aire. Los contornos corresponden a la concentración de NO_2 en estado estable. La zona roja de la 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (que corresponde al promedio anual encontrado en la ciudad de Bogotá).

c. Contribución de las emisiones de NO_x por cocción residencial en el inventario de emisiones de la ciudad de Bogotá

La última edición del inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad de Bogotá (**Tabla 3**), incluyó por primera vez de forma explícita la contribución de las emisiones residenciales 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 G-1. Factores de emisiones de fuentes residenciales

Contaminante	g/GJ
NO_x	42
CO	22
SO_2	0,30
PM_{10}	0,20
$\text{PM}_{2.5}$	0,20
COV	1,80

Fuente: (European Environment Agency, 2019)

NO_x . Mediante nuestras mediciones, encontramos que la **tasa de emisión de NO_x 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 puede indicar 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 es posible que cause una menor temperatura máxima en la combustión. Las emisiones de NO_x son altamente sensibles a las temperaturas máximas alcanzadas durante la combustión. A mayor temperatura, mayor generación de NO_x . Sin embargo, el

valor obtenido en nuestras mediciones se encuentra en el rango observado en otros estudios, que para quemadores están en un rango entre 10 a 30 g/GJ (Figura 4b, de (Lebel et al. 2022)).

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 valores más representativos y que puedan llegar a sustituir los valores por default utilizados actualmente.

5. Conclusiones

Este estudio representa la primera medición directa de las tasas de emisión de contaminantes como NO_x, CO y CH₄ 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 considerablemente mayor que los valores de referencia utilizados por el IPCC. 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.

Adicionalmente, el estudio destaca que la combustión de gas natural en Bogotá podría ser menos eficiente debido a su altura, lo que afecta la generación de contaminantes como NO_x y el CO. Las emisiones del primero están relacionadas directamente con las temperaturas alcanzadas durante la combustión, y una menor eficiencia en la combustión puede llevar a concentraciones de NO_x que exceden los límites recomendados en ambientes de poca ventilación. Esto es particularmente relevante para la calidad del aire en espacios cerrados, donde la falta de intercambio de aire adecuado puede provocar la acumulación de contaminantes a niveles perjudiciales para la salud de los habitantes.

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 CO₂ y CH₄, lo que contribuiría a los objetivos de Colombia de mitigación de cambio climático y mejoraría la calidad del aire en los hogares.

6. 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>.

7. ANEXOS

a. Formulario de inscripción de voluntarios

Para recolectar participantes en el estudio, realizamos una convocatoria con el objetivo de seleccionar viviendas que cumplieran con criterios específicos: ubicación en diversas localidades de Bogotá, pertenencia a diferentes estratos socioeconómicos y disponibilidad de estufas con tecnología de gas natural. Con este fin, desarrollamos una encuesta titulada "**¿Y tú qué aire cocinas?: Estudio de la calidad del aire en viviendas**", organizada por la Universidad de los Andes, a la cual respondieron 42 hogares.

La encuesta introdujo el propósito de la investigación, enfocada en estudiar las emisiones de contaminantes en cocinas en Colombia, y detalló los términos de privacidad bajo la ley 1581 de 2012. A continuación, se pidió a los participantes información básica sobre su vivienda, incluyendo dirección, estrato socioeconómico y el número de habitantes, además de condiciones específicas de salud de los residentes.

En la sección de características de la cocina, se solicitó el tipo de estufa (gas natural, propano, eléctrica o mixta), su estado general, antigüedad, ventilación y frecuencia de uso como se presenta en la Tabla 4. Esta información permitió identificar las viviendas adecuadas para el estudio, priorizando aquellas con estufas de gas natural. En la última sección, los participantes indicaron sus preferencias para la visita de medición, incluyendo disponibilidad de horarios y datos de contacto. Este proceso de selección aseguró una muestra representativa, respetando la privacidad y voluntariedad de los participantes.

Tabla 4. Información sobre las cocinas medidas.

M	IDCASA	Marca	Antigüedad estufa	Por favor, indique la frecuencia de uso de la estufa, ¿Cuántas veces al día o a la semana?	cuántas personas viven en el hogar
Medicion_1	M1_Casa4	Challenger	9 años	Día 1-2 veces todos los días	1 persona
Medicion_2	M2_Casa17	Challenger	2 años	Todos los días	4 personas
Medicion_3	M3_Casa22	Challenger	17 años	Se usa 1-2 al día	2 personas
Medicion_4	M4_Casa33	Challenger	27 años	3 veces al día	2 personas
Medicion_5	M5_Casa23	Challenger	4 años	3 veces al día	2 personas

Medicion_6	M6_Casa37	Challenger	No sabe	3 veces al día	1 persona
Medicion_7	M7_Casa13	Challenger	No sabe	2 veces al día	1 persona
Medicion_8	M8_Casa2	Haceb	No sabe	2 veces al día	2 personas
Medicion_9	M9_Casa1	Haceb	No sabe	Dos veces al día	2 personas
Medicion_10	M10_Casa27	Haceb	más 20 años	2 veces al día	1 persona
Medicion_11	M11_Casa9	Abba	35 años	3 veces/día	2 personas
Medicion_12	M12_Casa8	Sin marca	35 años	7 días a la semana	4 personas
Medicion_13	M13_Casa6	Challenger	6 años	5	2 pesonas
Medicion_14	M14_Casa28	Abba	5 años	12	2 personas
Medicion_15	M15_Casa34	Haceb	3	Cinco veces	4 personas
Medicion_16	M16_Casa26	Jemagas	3	Diariamente	3 personas
Medicion_17	M17_Casa25	Superior	8	4 a 5 veces por día	5 personas
Medicion_18	M18_Casa20	Challenger	4	2 a la semana	3 personas
Medicion_19	M19_Casa40	Challenger	3	5 x día	3 personas
Medicion_20	M20_Casa38	Assento	10	Una vez a al día.	2 personas
Medicion_21	M21_Casa39	Challenger	3	3 veces al día	2 personas

Medicion_22	M22_Casa41	Haceb	1	1 vez al día	4 personas
Medicion_23	M23_Casa42	Continental	8	1 vez al día	3 personas

para el envío de la encuesta la persona del equipo encargada de la comunicación envió el siguiente mensaje "¡Hola! Estamos llevando a cabo un estudio sobre las emisiones de contaminantes en cocinas y nos encantaría contar con su participación. Por favor, ayúdanos a completar esta encuesta: <https://forms.office.com/r/0h2UiBQv0E?origin=lpLink> y envíenos por Whatsapp dos fotos de su cocina: una de la estufa y otra desde afuera para dimensionar el tamaño del espacio. ¡Gracias por su colaboración!" Solicitando fotografías para poder prever los equipos necesarios para sellarlas. Los resultados de esta encuesta se pueden consultar en el archivo "AnexoA-2.csv".

b. Formularios de Consentimiento Informado

Los participantes firmaron un formulario de consentimiento informado, en el cual se explicaron los objetivos y procedimientos del estudio, así como los derechos y responsabilidades de los involucrados. A continuación, en la Figura se presenta un ejemplo del formulario de consentimiento utilizado en esta investigación para la M22_Casa41. Así como el archivo modelo con nombre: AnexoB_Formularios de Consentimiento Informado.pdf.



M22_Casa41

Ciudad Bogotá, País Colombia Fecha 25-07-24

CONSENTIMIENTO DE USO DE IMAGEN

Señores
Global Methane Hub y Fundación Futuro Latinoamericano,

Yo Diana Catalina Castiblanco Díaz, con documento de identidad No. 4057064445 a través de este documento, doy mi consentimiento y autorizo expresamente a el Global Methane Hub, a la Fundación Futuro Latinoamericano, así como a las instituciones aliadas en el desarrollo del proyecto: "TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA A NIVEL RESIDENCIAL. ELECTRIFICACIÓN DE ESTUFAS & COCINAS EN AMÉRICA LATINA", a utilizar las imágenes, fotografías y/o videos en los que aparecemos mi familia, nuestro domicilio y yo, en el marco del proceso de instalación de equipos y monitoreo de gases en nuestra vivienda, con fines ilustrativos o demostrativos, en informes, reportes, así como publicaciones impresas y digitales a desarrollarse dentro del marco del precitado proyecto.

Atentamente,

.....Diana Catalina.....
Firma

Diana Catalina Castiblanco Díaz
Nombres completos

UNIVERSIDAD DE



Figura 16. Ejemplo del formato de consentimiento firmado para el uso de imagen empleado en el proyecto. Todas las personas que aceptaron participar como voluntarias en el proyecto firmaron este consentimiento.

c. Formulario de caracterización vivienda seleccionada

La tabla presenta un resumen de las mediciones realizadas en cada vivienda seleccionada para el estudio. En ella, se especifica el identificador de cada casa (IDCASA), la fecha en que se realizó la medición, el volumen del espacio confinado de la cocina (en m³) y las variables analizadas. Las principales variables monitoreadas incluyen CO₂, CH₄, NO_x, CO y temperatura (Temp), proporcionando una visión integral de los contaminantes y condiciones ambientales en cada vivienda. Esta información es fundamental para entender la variabilidad en las concentraciones de contaminantes en los diferentes espacios estudiados.

M	IDCASA	Fecha	Volumen (m3)	Variables
Medicion_1	M1_Casa4	09/09/2024	13.3	CO ₂ , CH ₄ , NO _x , Temp
Medicion_2	M2_Casa17	09/09/2024	21.2	CO ₂ , CH ₄ , NO _x , Temp
Medicion_3	M3_Casa22	10/09/2024	5.7	CO ₂ , CH ₄ , NO _x
Medicion_4	M4_Casa33	10/09/2024	11.9	CO ₂ , CH ₄ , NO _x , Temp
Medicion_5	M5_Casa23	11/09/2024	7.8	CO ₂ , CH ₄ , NO _x , Temp
Medicion_6	M6_Casa37	11/09/2024	7.4	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_7	M7_Casa13	12/09/2024	9.4	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_8	M8_Casa2	12/09/2024	13.3	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_9	M9_Casa1	13/09/2024	8.6	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_10	M10_Casa27	13/09/2024	10.2	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_11	M11_Casa9	14/09/2024	9.6	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_12	M12_Casa8	14/09/2024	10.8	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_13	M13_Casa6	15/09/2024	11.8	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_14	M14_Casa28	16/09/2024	18.6	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_15	M15_Casa34	16/09/2024	7.7	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_16	M16_Casa26	17/09/2024	11.0	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_17	M17_Casa25	17/09/2024	8.3	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_18	M18_Casa20	18/09/2024	18.9	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_19	M19_Casa40	18/09/2024	8.2	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_20	M20_Casa38	19/09/2024	10.6	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_21	M21_Casa39	19/09/2024	7.3	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_22	M22_Casa41	25/09/2024	10.3	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp
Medicion_23	M23_Casa42	25/09/2024	12.1	CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x y Temp

