

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA
LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE MEDIDA PARA INVENTARIOS DE
GASES DE EFECTO INVERNADERO UTILIZANDO EL MÉTODO DE SIMULACIÓN
DE MONTE CARLO

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Estadística para optar al grado y título de Maestría Académica en Estadística

GABRIEL MOLINA CASTRO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2024

DEDICATORIA

Le dedico este documento y el título que el mismo representa a mi esposa Jéssica Rodríguez Salazar, quien desde que conozco me ha dado su amor, paciencia y apoyo incondicional en mis estudios y en mi vida, y a mi hijo Guillermo Molina Rodríguez, quien llegó a robarnos el corazón y a cambiarnos la vida mientras finalizaba este documento.

Esta dedicatoria también incluye a mis padres Edwin Molina Rivera y María Castro Rodríguez, a quienes debo todo lo que soy como persona y profesional, y a mis hermanos Silvia Molina Castro y Francisco Molina Castro, quienes me han acompañado y apoyado desde que tengo memoria.

Los amo a todos, y quiero que sepan que este éxito es por y para ustedes también.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a los miembros del Comité: M.Sc. Paula Solano Sánchez, Dr. Gilbert Brenes Camacho y M.Sc. Jessica Chavarría Sánchez por toda su guía, consejos tiempo y apoyo en el desarrollo y revisión del proyecto.

Agradezco también a mi jefe y amigo Dr. Bryan Calderón Jiménez por su apoyo, consejos y por siempre creer en mi trabajo y alentarme a ser mejor cada día, y a mis demás compañeros y amigos del LACOMET: Lic. Jimmy Venegas Padilla, Lic. Katia Rosales Ovarés, Lic. Eric Ortiz Apuy, BQ. Jennifer Meneses Sánchez, M.Sc. Fernando Andrés Monge y M.Sc. Marcela Prendas Peña por su apoyo, colaboración y comprensión en este proceso.

Adicionalmente, extendiendo el agradecimiento para mis colegas Ing. Laura Mora Mora, Ing. Kendal Blanco Salas, Ing. Ana Rita Chacón Araya, Ing. Adrián Sandí Campos, Ing. Verónica Vargas Madrigal por compartir conmigo sus conocimientos técnicos en el campo de la gestión de inventarios de GEI, que me permitieron generar el concepto y las bases de datos de la herramienta. También agradezco al Dr. Antonio Possolo (NIST, USA) y al M.Sc. Gabriel Fonseca Sarmanho (INMETRO, Brasil) por su guía y consejos en tópicos estadísticos complejos y en las bases de programación de aplicaciones en R Shiny.

Agradezco al Fondo Regional para la Infraestructura de la Calidad para Biodiversidad y Protección del Clima del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) y al NDC Support Programme del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) por todo el apoyo económico y logístico brindado para desarrollar este proyecto, incluyendo las publicaciones relativas al estudio de las incertidumbres de los factores de emisión.

Por último, pero no menos importante, agradezco al Posgrado de Estadística de la UCR y a todo su cuerpo docente y administrativo con el que compartí estos últimos años, de quienes siempre recibí un trato excepcional, y que me dejaron un gran aprendizaje en este nuevo campo en mi formación académica y profesional.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Estadística de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Estadística.

Dra. María Fernanda Alvarado Leitón
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**

M.Sc. Paula Solano Sánchez
Directora de Tesis

Dr. Gilbert Brenes Camacho
Asesor

M.Sc. Jessica Chavarría Sánchez
Asesora

M.Sc. Ericka Méndez Chacón
**Representante Programa de
Posgrado en Estadística**

Gabriel Molina Castro
Candidato

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
HOJA DE APROBACIÓN	iv
TABLA DE CONTENIDO	v
RESUMEN	vii
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivo general	6
1.5 Objetivos específicos	6
1.6 Presentación de capítulos	6
CAPÍTULO II. CAMBIO CLIMÁTICO Y CUANTIFICACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	10
2.1 Clima y cambio climático	10
2.2 Gases de efecto invernadero (GEI)	12
2.3 Cuantificación, inventarios y factores de emisión de GEI.....	20
2.4 Carbono neutralidad.....	23
CAPÍTULO III. PROCESOS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE	24
3.1 Generalidades	24
3.2 GUM y método de Gauss	25
3.3 GUM-S1, método de Monte Carlo y <i>bootstrapping</i>	27

3.4	Estimación de incertidumbre en inventarios de GEI.....	30
3.5	<i>Softwares</i> para la estimación de incertidumbre.....	34
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....		35
4.1	Distribuciones de probabilidad	35
4.2	Estimaciones de varianzas de distribuciones de probabilidad asimétricas	40
4.3	Modelos estadísticos	42
4.4	Bases de datos	45
4.5	Programación y <i>software</i>	47
CAPÍTULO V. SOBRE LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN.....		49
5.1	Factores de emisión descritos por distribuciones de probabilidad asimétricas.....	49
5.2	Otros factores de emisión con información faltante	56
CAPÍTULO VI. SOBRE LA CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA		65
6.1	Generalidades.....	65
6.2	Interfaz del usuario (objeto <i>ui</i>).....	65
6.3	Procesamiento de información (objeto <i>server</i>)	73
CAPÍTULO VII. SOBRE LA VALIDACIÓN Y PUBLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA		88
7.1.	Validación de funcionamiento y exactitud.....	88
7.2.	Validación de robustez.....	92
7.3.	Validación de uso.....	95
7.4.	Publicación.....	96
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
CAPÍTULO IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		104
ANEXO I. DATOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO.....		117
ANEXO II. OTROS DIAGRAMAS DE VARIABLES.....		129
ANEXO III. FIGURAS DE LA VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....		133

RESUMEN

El presente proyecto busca generar una herramienta estadística validada, que permita estimar la incertidumbre de medida para las emisiones de un inventario de gases de efecto invernadero mediante la propagación de distribuciones de probabilidad aplicando el método de simulación de Monte Carlo. Su justificación se fundamenta en la ausencia de *software* u hoja de cálculo de libre acceso que permita esta estimación de forma coherente con los requisitos de reporte del PPCN 2.0 y en su necesidad latente por parte las organizaciones que pretenden alcanzar la carbono neutralidad según las políticas ambientales de Costa Rica.

Inicialmente, se abordó y generó una propuesta de estimación de incertidumbre para los factores de emisión incluidos en la base de datos oficial del país, mantenida por el IMN. Esta propuesta incluyó a los factores de emisión caracterizados por intervalos de variación asimétricos y otros factores de emisión con ausencia de información sobre su incertidumbre. Dicha propuesta fue publicada internacionalmente en dos artículos científicos y fue adoptada por el IMN en la última publicación de la base de datos.

Posteriormente, se pasó a la construcción de la herramienta denominada GEISER, programada en lenguaje R bajo una estructura de aplicación web (librerías *shiny*). Su interfaz permite al usuario: contar con instrucciones generales de uso, incorporar información de un inventario con hasta cinco emisiones cuantificadas directamente y diez emisiones cuantificadas indirectamente, obtener un resumen de los resultados asociados al inventario (emisión total, su incertidumbre estándar, intervalo de cobertura al 95 % y una gráfica de su distribución) y el detalle de cada emisión y su incertidumbre estándar para identificar posibles oportunidades de mejora. Para lograr la generación de estos resultados, la herramienta usa bases de datos predefinidas y métodos de simulación de Monte Carlo (incluyendo el remuestreo o *bootstrapping*) para simular poblaciones asociadas a todas las variables de entrada y combinarlas para generar una población simulada de la variable de salida (emisión total del inventario), siguiendo los lineamientos establecidos en guías de estimación de incertidumbre pertinentes (GUM, GUM-S1 y Guía Metodológica del PPCN).

Seguidamente, se validó la exactitud de la herramienta (presentando diferencias menores a un 5 % con respecto a resultados de casos de referencia), su robustez (evidenciando cambios reducidos ante la incorporación de hasta un 10 % de valores extremos) y uso por parte de un usuario potencial. Por último, la herramienta fue publicada a través de enlace de descarga de un repositorio web mantenido por el autor y se identificaron las principales limitaciones y recomendaciones de mejora a ser consideradas en una próxima actualización de la herramienta.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Librerías de funciones de R utilizadas en el presente proyecto	47
Cuadro 5.1. Incertidumbres estándar <i>u</i> y errores relativos máximos <i>RE</i> estimados para los factores de emisión de CO ₂ por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas.....	50
Cuadro 5.2. Incertidumbres estándar <i>u</i> y errores relativos máximos <i>RE</i> estimados para los factores de emisión de CH ₄ por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas.....	51
Cuadro 5.3. Incertidumbres estándar <i>u</i> y errores relativos máximos <i>RE</i> estimados para los factores de emisión de N ₂ O por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas.....	52
Cuadro 5.4. Incertidumbres estándar <i>u</i> , errores relativos máximos <i>RE</i> estimados y distribuciones de probabilidad ajustadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 1. Los valores de <i>u</i> se reportan en las unidades indicadas en cada proceso de emisión.	58
Cuadro 5.5. Incertidumbres estándar <i>u</i> , intervalos de variación obtenidos con un 95 % de cobertura y distribuciones de probabilidad recomendadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 2.....	61
Cuadro 5.6. Incertidumbres estándar <i>u</i> , intervalos de variación obtenidos con un 95 % de cobertura y distribuciones de probabilidad recomendadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 3.....	64
Cuadro 7.1. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia del primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9).....	90
Cuadro 7.2. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia del segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10).....	90
Cuadro 7.3. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia actualizados de la guía del PPCN (Cuadro A11).....	91
Cuadro 7.4. Principales resultados de la validación de la robustez de la herramienta GEISER incorporando hasta un 10 % de valores extremos en los datos utilizados para la estimación de una emisión cuantificada de forma directa	94

Cuadro A1. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de CO ₂ , por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (<i>f</i> : valor central, <i>U_R</i> : límite superior y <i>U_L</i> : límite inferior).....	117
Cuadro A2. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para otros factores de emisión. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021; IMN, 2023) (<i>f</i> : valor central, <i>U_R</i> : límite superior y <i>U_L</i> : límite inferior)	117
Cuadro A3. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de CH ₄ , por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (<i>f</i> : valor central, <i>U_R</i> : límite superior y <i>U_L</i> : límite inferior).....	118
Cuadro A4. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de N ₂ O, por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (<i>f</i> : valor central, <i>U_R</i> : límite superior y <i>U_L</i> : límite inferior).....	119
Cuadro A5. Información disponible para los factores de emisión incluidos en el Grupo 1, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas	120
Cuadro A6. Información disponible para las magnitudes de entrada requeridas para la estimación de los factores de emisión incluidos en el Grupo 2, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas	121
Cuadro A7. Información disponible para las magnitudes de entrada requeridas para la estimación de los factores de emisión incluidos en el Grupo 3, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas	122
Cuadro A8. Valores de los potenciales de calentamiento global para los principales GEI. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2023) y utilizada en la herramienta GEISER.....	123
Cuadro A9. Datos del primer ejercicio de aplicación que simula un inventario real, tomado de INTECO (2023) y utilizados para la validación del funcionamiento y exactitud de la herramienta GEISER	123

Cuadro A10. Datos del segundo ejercicio de aplicación que simula un inventario real, tomado de INTECO (2023) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	124
Cuadro A11. Datos del ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (DCC y LCM, 2020), actualizados en INTECO (2023) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	125
Cuadro A12. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea, tomados de la guía del PPCN (DCC y LCM, 2020) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	126
Cuadro A13. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con dos valores extremos superiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	126
Cuadro A14. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con cuatro valores extremos superiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	127
Cuadro A15. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con dos valores extremos inferiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	127
Cuadro A16. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con cuatro valores extremos inferiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Crecimiento en el índice de temperatura media global, basado en datos superficiales y oceánicos desde 1880 hasta el 2022, con período base establecidos en las décadas de 1950 a 1980	11
Figura 2.2. Representación gráfica de la estructura de los principales gases que componen la atmósfera terrestre, incluyendo los gases más importantes que generan el efecto invernadero	13
Figura 2.3. Esquemmatización del ciclo del agua.....	15
Figura 2.4. Esquemmatización del ciclo del carbono como dióxido de carbono	16
Figura 2.5. Cambios en los niveles atmosféricos del CO ₂ a través del tiempo	16
Figura 2.6. Cambios en los niveles atmosféricos del CH ₄ a través del tiempo, determinados sobre superficies marinas.....	17
Figura 2.7. Cambios en los niveles atmosféricos del N ₂ O a través del tiempo, determinados sobre superficies marinas.....	18
Figura 3.1. Esquemmatización del proceso de propagación de distribuciones de probabilidad para tres magnitudes de entrada.....	29
Figura 4.1. Comparación gráfica de las distribuciones simétricas y asimétricas utilizadas en el presente estudio, ajustadas a casos datos similares para mostrar sus diferencias y similitudes. Fuente: el autor.....	36
Figura 5.1. Comparación gráfica del ajuste de las distribuciones de probabilidad asimétricas consideradas en el presente estudio para los factores de emisión de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O por quema de lubricante en usos comerciales, institucionales, residenciales, agricultura y transporte.	53
Figura 6.1. Estructura básica creada para la interfaz del usuario de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes.....	65
Figura 6.2. Extracto del contenido de la pestaña <i>Sobre GEISER</i> de la herramienta GEISER.	66

Figura 6.3. Contenido de la subpestaña <i>Cuantificaciones Directas</i> de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes.....	69
Figura 6.4. Contenido de la subpestaña <i>Cuantificaciones Indirectas</i> de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes.....	70
Figura 6.5. Contenido final de la pestaña <i>Incertidumbre Global</i> de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes.....	71
Figura 6.6. Contenido final de la pestaña <i>Mejora</i> de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes.	72
Figura 6.7. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa mediante la metodología de mediciones internas con datos ya procesados.	75
Figura 6.8. Diagramas de las etapas para la simulación de las poblaciones asociadas a los factores de emisión requeridos para las fuentes cuantificadas de forma indirecta para los sectores (a) combustibles, (b) electricidad, (c) agricultura, (d) ganadería, (e) residuos sólidos, (f) aguas residuales ordinarias, (g) aguas residuales industriales y (h) procesos industriales.	76
Figura 6.9. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante la metodología de mediciones internas con datos ya procesados.....	77
Figura 6.10. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos realizado para estimar la emisión total del inventario y la generación de las variables de salida de la herramienta....	78
Figura A2.1. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa, mediante la metodología de mediciones internas con datos crudos.....	129
Figura A2.2. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa, mediante las metodologías de reporte externo con incertidumbre (<i>MetodCuantMD</i> = 3) y reporte externo con tolerancia (<i>MetodCuantMD</i> = 4).	130
Figura A2.3. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante la metodología de mediciones internas con datos crudos.....	131

Figura A2.4. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante las metodologías de reporte externo con incertidumbre (<i>MetodCuantMI</i> = 3) y reporte externo con tolerancia (<i>MetodCuantMI</i> = 4).....	132
Figura A3.1. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando los valores de configuración por defecto.....	133
Figura A3.2. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando los valores de configuración por defecto.	134
Figura A3.3. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando un valor semilla de 100 y una cantidad de iteraciones de 10^6	135
Figura A3.4. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando un valor semilla de 100 y una cantidad de iteraciones de 10^4	136
Figura A3.5. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10), utilizando los valores de configuración por defecto.....	137
Figura A3.6. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10), utilizando los valores de configuración por defecto.	138
Figura A3.7. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (Cuadro A11), utilizando los valores de configuración por defecto.	139
Figura A3.8. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (Cuadro A11), utilizando los valores de configuración por defecto.	140
Figura A3.9. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar el escenario extremo de tiempo de procesamiento de datos, utilizando los valores de configuración por defecto.	141

Figura A3.10. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar el escenario extremo de tiempo de procesamiento de datos, utilizando los valores de configuración por defecto.	142
Figura A3.11. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea (Cuadro A12), estimado mediante el promedio simple y utilizando los valores de configuración por defecto.	143
Figura A3.12. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea (Cuadro A12), estimado mediante la mediana y utilizando los valores de configuración por defecto.	144
Figura A3.13. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con dos valores extremos superiores (Cuadro A13), estimado mediante la mediana.	145
Figura A3.14. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con cuatro valores extremos superiores (Cuadro A14), estimado mediante la mediana.	146
Figura A3.15. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con dos valores extremos inferiores (Cuadro A15), estimado mediante la mediana.	147
Figura A3.16. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con cuatro valores extremos inferiores (Cuadro A16), estimado mediante la mediana.	148

LISTA DE ABREVIATURAS

AW	Peso atómico (siglas en inglés)
BOD	Demanda bioquímica de oxígeno (siglas en inglés)
CC	Contenido de carbono
CER	Reducciones Certificadas de Emisiones (siglas en inglés)
CFC	Clorofluorocarbono
DCC	Dirección de Cambio Climático del MINAE
DNV	Det Norske Veritas
DOC	Carbono orgánico degradable (siglas en inglés)
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (siglas en inglés)
FONAFIFO	Fondo de Financiamiento Forestal del MINAE
GEI	Gases de Efecto Invernadero (GHG en inglés)
GISS	Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA (siglas en inglés)
GUM	Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (siglas en inglés)
GUM-S1	Suplemento 1 de la GUM
HBFC	Hidrobromofluorocarbono
HCFC	Hidroclorofluorocarbono
HFC	Hidrofluorocarbono
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (siglas en inglés)
IMN	Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica
INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
ISO	Organización Internacional de Normalización
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (siglas en inglés)
JCGM	Comité Conjunto sobre Guías en Metrología (siglas en inglés)
LCM / LACOMET	Laboratorio Costarricense de Metrología
MCF	Factor de corrección de metano (siglas en inglés)
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica
MMC	Método de simulación de Monte Carlo
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos (siglas en inglés)

NCV	Valor calorífico neto (siglas en inglés)
NGER	Regulaciones Nacionales sobre GEI y Energía de Australia (siglas en inglés)
NIST	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (siglas en inglés)
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (siglas en inglés)
NPL	Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido (siglas en inglés)
ODU	Oxidación durante el uso (siglas en inglés)
PCG	Potencial de calentamiento global
PFC	Perfluorocarbono
PMR	Alianza para la Preparación al Mercado (siglas en inglés)
PPCN	Programa País de Carbono Neutralidad de Costa Rica
ppm	Partes por millón
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SVS	Estudio de Visualización Científica de la NASA (siglas en inglés)
UCC	Unidades Costarricenses de Compensación
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (siglas en inglés)
UNFCCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (siglas en inglés)
VER	Reducciones Voluntarias de Emisiones (siglas en inglés)
WMO	Organización Meteorológica Mundial (siglas en inglés)

“La ciencia ha comprobado que el conocimiento tiene también sus límites... La exactitud con la que podemos medir el universo es limitada, nadie lo niega; pero la razón puede discernir esos límites, y la cabal comprensión de la incertidumbre permite conocer muchas cosas que, de otro modo, serían inexplicables.”

Isaac Asimov
Grandes Ideas de la Ciencia
1969

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

En los últimos años, el mundo se ha visto envuelto en el combate del cambio climático, entendido como los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocadas por el ser humano (ONU, 2022a). Dentro de los principales impactos de este fenómeno, se destaca el aumento de la temperatura promedio global de 1,18 °C desde finales del siglo XIX, un aumento en concentración atmosférica del dióxido de carbono (CO₂) cercano al 50 % desde inicios de la era industrial, un aumento en el nivel del mar cercano a 18 cm en los últimos 100 años, entre muchos otros (NASA, 2022). Por este motivo, y en busca de abordar el cambio climático y sus impactos negativos a través de soluciones coordinadas y cooperación internacional hacia una economía global con bajas emisiones de carbono, los principales líderes mundiales firmaron el Acuerdo de París en el año 2015, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU, 2022b). Dentro de los objetivos establecidos en dicho acuerdo, resalta el compromiso con la reducción sustancial de emisiones de GEI para limitar el aumento de temperatura global en este siglo de 2 °C (o inclusive a 1,5 °C), incluyendo compromisos para colaborar juntos en la adaptación a los impactos del cambio climático (ONU, 2022b).

En este campo, Costa Rica ha surgido como un pionero al establecer una política pública dirigida al uso de energías renovables y reducción de emisiones de GEI como aspectos claves para luchar contra este enemigo global (UNEP, 2019). Varios han sido los instrumentos adoptados por el país, incluyendo la Estrategia Nacional de Cambio Climático (DCC, 2015), el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Gobierno de Costa Rica, 2022) y el Plan Nacional de Descarbonización (Gobierno de Costa Rica, 2019), entre otros. Como parte de las acciones clave para lograr la descarbonización de la economía nacional, el Programa País Carbono Neutralidad (PPCN) surge como una herramienta fundamental para lograr una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la cuantificación de estas emisiones y su posterior reducción o compensación, buscando lograr un balance favorable para el medio ambiente (carbono neutralidad) (DCC, 2021). Este programa hace

referencia a las normas INTE B5 “Norma para demostrar la Carbono Neutralidad – Requisitos” (INTECO, 2021) e ISO 14064-1 “Gases de efecto invernadero – Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero” (ISO, 2018) para establecer los requisitos que las organizaciones deben cumplir para demostrar su carbono neutralidad.

1.2 Antecedentes

La incertidumbre de medida (o simplemente incertidumbre) es una duda que existe sobre la validez del resultado de una medición o estimación y suele utilizarse como parámetro para expresar la calidad de dicho resultado (Bell, 2001). Los procesos de estimación de incertidumbre son un área de la estadística aplicada clave para el desarrollo de la metrología como ciencia de las mediciones. Aunque existen diversas metodologías útiles en variedad de disciplinas (ciencias básicas e ingenierías, en su mayoría) basadas en referencias internacionales como la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (JCGM, 2008a), mejor conocida como GUM, la estimación de incertidumbre es una temática compleja, poco desarrollada en el país y en constante evolución, la cual permite el surgimiento de nuevos enfoques y herramientas estadísticas que faciliten y mejoren su aplicación.

En el área de cuantificación de incertidumbres en inventarios de gases de efecto invernadero, dentro de los primeros estudios enfocados a esta temática, destacan el trabajo de Benkovitz (1985), quien aplica el método de propagación de errores para estimar la incertidumbre en emisiones de óxidos nitrosos, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, y el trabajo de Eggleston (1993), el cual utiliza el método de simulación de Monte Carlo (MMC) para estimar la incertidumbre en emisiones de compuestos orgánicos volátiles en motores. Posteriormente, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) introduce la cuantificación de incertidumbre en inventarios de GEI (EPA, 1996) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) publica las primeras ediciones de sus guías para la elaboración de inventarios nacionales de GEI entre los años 1995 y 1996 (IPCC, 1996), con posteriores ediciones en el 2000 y 2006 (IPCC,

2006a) y revisiones en el 2019 (IPCC, 2019). Estos documentos incluyen la estimación de incertidumbre cuantitativa para los inventarios de GEI como un requisito de reporte.

En los años recientes, la necesidad de estimar y reportar incertidumbres para los inventarios de GEI se ha convertido en un requisito obligatorio en muchas regulaciones nacionales e internacionales (Ritter, Lev-On, y Shires, 2010). Por consiguiente, este requisito fue incorporado en la norma internacional ISO 14064-1, en sus versiones 2006 (ISO, 2006) y 2018 (ISO, 2018), la cual detalla los principios para el diseño, gestión y reporte de inventarios de GEI por parte de las organizaciones que buscan una gestión ambiental responsable de sus procesos productivos. A nivel nacional, la estimación de incertidumbre en inventarios de GEI es incluida inicialmente con carácter opcional en la norma nacional INTE 12-01-06:2011 “Sistema de gestión para demostrar la carbono neutralidad” (INTECO, 2011) y su posterior actualización en 2016 con la norma INTE B5 (INTECO, 2016), desarrollada con base en la primera versión de la norma ISO 14064-1 para que las organizaciones costarricenses pudiesen demostrar la carbono neutralidad de sus procesos productivos.

Esta misma situación se presenta con la oficialización del PPCN como una herramienta nacional para lograr una reducción de las emisiones de GEI y cumplir con los compromisos ambientales adquiridos por Costa Rica, cuya primera versión excluye la necesidad de estimar y reportar incertidumbres en los inventarios de GEI exigidos a las organizaciones participantes del programa (MINAE, 2012), tanto por desconocimiento en el tema como por falta de desarrollo y capacidades de esta temática en el país. Esto cambia con la actualización del PPCN 2.0 en 2018 y la publicación de la nueva versión de la norma nacional INTE B5:2021 (INTECO, 2021), donde estimación y reporte de incertidumbres asociados a los inventarios de GEI se vuelve obligatoria a nivel nacional (DCC, 2021), con un transitorio que exige la implementación de estimaciones de incertidumbre a partir del año 2023 (DCC y LCM, 2019). En este contexto, y para facilitar la implementación de este tópico entre las organizaciones participantes del programa, se desarrolla la guía metodológica nacional para la estimación y análisis de la incertidumbre de emisiones y remociones de GEI (DCC y LCM, 2020), la cual considera la aplicación de la ley de propagación de incertidumbre o el uso del MMC como metodologías de estimación de incertidumbre.

1.3 Justificación

Con el desarrollo y publicación de las guías de estimación de incertidumbre y las normas antes mencionadas, la necesidad de aplicar sus principios de estimación en los diferentes campos y alcances ha permitido el desarrollo de gran diversidad de herramientas o *software* que faciliten su proceso de implementación y ejecución de cálculos complejos. Algunos de los ejemplos más conocidos se incluyen en el Capítulo 3. Estas herramientas suelen compartir la característica de poseer un alcance generalizado de aplicación, es decir, pueden ser implementadas en variedad de casos de medición. Sin embargo, estas herramientas de alcances generalizados suelen requerir que el usuario conozca a fondo las características de las mediciones o estimaciones que realiza (variables de entrada y salida, modelo matemático que las relaciona, presencia de correlaciones entre variables, entre otros) y posea, además, conocimientos básicos sobre estadística y probabilidad, que le permitan completar la información de ingreso para lograr así la estimación de incertidumbre requerida.

Este tipo de herramientas generalizadas han demostrado ser de gran utilidad para los profesionales con experiencia y conocimientos en los procesos de estimación de incertidumbre, quienes fácilmente logran identificar las piezas de información requeridas para lograr la obtención de los resultados deseados, independientemente del caso de aplicación. Sin embargo, para los usuarios menos experimentados o con poco conocimiento en las bases de estimación de incertidumbre, la identificación de la información requerida suele ser un paso inicial de alta complejidad que limita su uso y aplicación a casos muy específicos sobre los que ya se cuenta con la información disponible claramente identificada y clasificada según lo requiere una herramienta en particular. Esta situación ha potenciado el desarrollo de herramientas o aplicaciones de *software* específicos para casos particulares, como el de los inventarios de gases de efecto invernadero. Algunos de los ejemplos más conocidos se incluyen en el Capítulo 3. En general, estas herramientas han sido confeccionadas para la elaboración de inventarios de GEI a gran escala, con alcances nacionales o regionales, basadas en las recomendaciones del IPCC (2006b). Debido a las diferencias que pueden existir entre este tipo de inventarios y otros de menor escala con alcances organizacionales o por instalación (Singh, Damassa, Alarcón-Díaz y Sotos, 2014), algunas de las suposiciones hechas por estas herramientas (incluyendo la elección de factores

de emisión o fuentes de incertidumbre en particular) puedan ser un inconveniente que no permitan su aplicación para inventarios de GEI a menor escala o localizados, como es el caso de los inventarios que deben presentar las organizaciones nacionales que forman parte del PPCN.

A nivel nacional, no se encontró evidencia de ningún desarrollo, *software* u hoja de cálculo de libre acceso que permita la estimación de incertidumbre para inventarios de GEI locales, adecuados a los requisitos de reporte del PPCN 2.0. Adicionalmente, con la publicación de la guía metodológica nacional (DCC y LCM, 2020), la necesidad de estos desarrollos se vuelve vital por sus diferencias metodológicas con respecto a las recomendaciones del IPCC (2006b). Esta situación justifica la importancia del presente proyecto, que busca solventar esta necesidad latente en las organizaciones que pretenden alcanzar la carbono neutralidad como diferenciador comercial y en cumplimiento de las políticas ambientales de Costa Rica.

De esta manera, este proyecto busca dotar a los usuarios en general de una herramienta estadística que facilite la estimación de incertidumbre de sus inventarios de gases de efecto invernadero mediante el método de simulación de Monte Carlo. Esta metodología es reconocida para dicho propósito en la guía metodológica nacional (DCC y LCM, 2020) y es sugerida por varios autores como Bharvirkar (1999), Frey (2007) y IPCC (2006b), debido a su ventaja de adaptarse a una gran variedad de modelos de distintas complejidades. De forma que sus resultados cuenten con el sustento teórico y la practicidad necesaria para cumplir con los requerimientos normativos y aumentar la confianza y calidad de sus declaraciones de carbono neutralidad en el marco del PPCN 2.0.

Con este proyecto se pretende aplicar teoría de combinación de distribuciones de probabilidad y herramientas de simulación (elementos propios de la estadística) para asistir a un campo de gran relevancia nacional y desarrollar una temática poco explorada de la estadística en el país. Así, este proyecto amplía el alcance y la gama de aplicación de la estadística como disciplina en Costa Rica, contribuyendo, a su vez, a los esfuerzos para declarar carbono neutralidad de los procesos productivos y al esfuerzo país en general para la protección del medio ambiente.

1.4 Objetivo general

Generar una herramienta estadística validada que permita estimar la incertidumbre de medida para las emisiones de un inventario de gases de efecto invernadero mediante la propagación de distribuciones de probabilidad aplicando el método de simulación de Monte Carlo.

1.5 Objetivos específicos

- a) Elaborar y publicar una propuesta de estimación de la incertidumbre estándar de factores de emisión descritos por distribuciones de probabilidad asimétricas.
- b) Elaborar una herramienta estadística de libre acceso adecuada para la estimación de incertidumbre de medida para las emisiones resultantes de un inventario de gases de efecto invernadero mediante la propagación y combinación de distribuciones de probabilidad de variables aleatorias aplicando el método de simulación de Monte Carlo.
- c) Validar la exactitud de los resultados producidos por la herramienta estadística generada mediante su aplicación a ejemplos bibliográficos y a un inventario real.
- d) Validar la robustez de la herramienta estadística generada mediante la incorporación de escenarios que simulen heterogeneidades no observadas con números pseudo-aleatorios, incluyendo uso de distribuciones muy asimétricas o con valores extremos.
- e) Publicar la herramienta estadística generada en una plataforma de libre acceso (sitio web o similar) para su uso generalizado por parte de los usuarios.

1.6 Presentación de capítulos

A continuación, se presenta una breve descripción de los siguientes capítulos a encontrar en el documento.

Capítulo 2: Cambio climático y cuantificación de gases de efecto invernadero. Este capítulo se divide en cuatro secciones. Se inicia con la presentación de los aspectos más relevantes para entender el concepto de cambio climático y el calentamiento global como su principal evidencia. Posteriormente, se abordan los principales GEI identificados como los causantes primarios del calentamiento global, sus orígenes y cambios en sus concentraciones atmosféricas en los últimos años. Luego, se describe la importancia y metodologías de cuantificación de estos GEI, incluyendo el desarrollo de inventarios de emisiones y el uso de

factores de emisión como facilitadores de la cuantificación de emisiones. Finalmente, se cierra el capítulo tratando el concepto de carbono neutralidad y el papel que juegan los inventarios de GEI en su consecución.

Capítulo 3: Proceso de estimación de incertidumbre. Este capítulo se divide en cinco secciones. Se inicia con la definición y exposición de las bases del proceso de estimación de incertidumbre de una magnitud de salida en función de varias magnitudes de entrada. Posteriormente, se exponen los principales métodos de estimación propuestos por la GUM y su suplemento 1, incluyendo el método de Gauss (ley de propagación de incertidumbres) y MMC, así como el uso del *bootstrapping*. Luego, se exponen los principales aspectos a tomar en cuenta para la aplicación de estas metodologías en la estimación de incertidumbres para inventarios de GEI. Finalmente, se cierra el capítulo describiendo algunos de los *softwares* más conocidos para la estimación de incertidumbre, incluyendo desarrollos específicos para los inventarios de GEI, que representan la base de partida para el presente proyecto.

Capítulo 4. Metodología. Este capítulo se divide en cinco secciones. Se describe el abordaje metodológico general utilizado en el presente proyecto, incluyendo el detalle de las distribuciones de probabilidad consideradas y las estrategias para estimar las varianzas asociadas con distribuciones asimétricas, los modelos estadísticos y bases de datos necesarias para la creación de la herramienta y los aspectos más relevantes sobre el lenguaje de programación utilizado, librerías, funciones y el proceso general de programación, validación y publicación de la herramienta.

Capítulo 5. Sobre la estimación de incertidumbre para los factores de emisión. Este capítulo se divide en dos secciones e inicia la presentación y discusión de resultados obtenidos en el proyecto. La primera sección explica el abordaje de la estimación de incertidumbre para los factores de emisión incluidos en la base de datos oficial del IMN y caracterizados por intervalos de variación asimétricos (factores de emisión por uso y quema de combustibles fósiles). La segunda sección describe el abordaje realizado para los demás factores de emisión de esta base de datos nacional con ausencia de información sobre su incertidumbre (factores asociados con aguas residuales, desechos sólidos, oxidación de lubricantes y

fermentación entérica y manejo de excretas de ganado), incluyendo los supuestos y procesos de estimación de incertidumbre llevados a cabo para determinar un valor de incertidumbre y una distribución de probabilidad asociada. En ambas secciones, se presentan los principales resultados obtenidos para todos los factores de emisión incluidos en el alcance de este proyecto y se hace referencia a dos artículos científicos publicados.

Capítulo 6. Sobre la construcción y funcionamiento de la herramienta. Este capítulo se divide en tres secciones, iniciando con una breve presentación de las generalidades de la herramienta generada en el presente proyecto. La segunda sección detalla la interfaz construida (objeto *ui*), su estructura, contenido, entradas requeridas y salidas de la herramienta, incluyendo las distintas opciones disponibles para el usuario. La tercera sección describe el contenido del programa responsable del procesamiento de datos (objeto *server*), incluyendo las distintas funciones utilizadas para la lectura de la información de entrada, creación de variables, simulación de poblaciones para la aplicación del MMC, cálculos, creación de salidas del programa y las funciones auxiliares requeridas para el adecuado funcionamiento general de la herramienta. En estas secciones, se incluyen figuras que muestran la interfaz de la herramienta y que describen el proceso general programado para implementar el método de MMC y obtener las salidas requeridas.

Capítulo 7. Sobre la validación y publicación de la herramienta. Este capítulo se divide en cuatro secciones. En la primera sección, se describe y discute el proceso llevado a cabo para validar el correcto funcionamiento de la herramienta y la exactitud de los resultados obtenidos a partir de la comparación de las salidas de la herramienta contra bases de datos de referencia. En la segunda sección, se describe el proceso seguido para validar la robustez de la herramienta ante la presencia de datos asimétricos o extremos ingresados por el usuario. La tercera sección corresponde a un proceso de validación adicional de la herramienta llevado a cabo por un potencial usuario externo al proyecto, el cual permitió mejorar el proceso de publicación final de la herramienta descrito en la cuarta sección. Con este capítulo, se finaliza el apartado de presentación y discusión de resultados del presente proyecto.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones. En este capítulo, se enumeran las principales conclusiones generadas a partir de la ejecución del presente proyecto y se describen las principales limitaciones identificadas en la herramienta, así como las posibles mejoras que podrían implementarse en una próxima actualización de la misma. Este capítulo cierra el cuerpo principal del documento.

Capítulo 9. Referencias bibliográficas. En este capítulo, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas en la totalidad del documento.

Anexos. Incluyen cuadros con las bases de datos utilizadas, diagramas complementarios que describen el proceso general programado y figuras que muestran los resultados de la validación de la herramienta.

CAPÍTULO II. CAMBIO CLIMÁTICO Y CUANTIFICACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

2.1 Clima y cambio climático

De acuerdo con Bastidas y Hernández (2019), Benavides y León (2007) y González, Fernández y Gutiérrez (2013), el clima puede entenderse como una descripción estadística de las condiciones predominantes de la atmósfera en términos de los valores promedios y de la variabilidad de magnitudes atmosféricas como la temperatura, la precipitación o el viento en una región específica por un largo período no menor a 30 años.

En este contexto, el cambio climático se establece como “*todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo resultado de la variabilidad natural o de las actividades humanas*” (SEMARNAT, 2009, p. 2). Aunque el clima puede cambiar naturalmente, el cambio provocado por las actividades humanas ha cobrado especial importancia en las últimas décadas, y el término “cambio climático” suele utilizarse cada vez más para referirse al efecto generado por el ser humano. Por este motivo, autores como Bastidas y Hernández (2019) hacen referencia al cambio climático como “*una desviación significativa de la tendencia del clima desligada de cualquier variación cíclica natural como consecuencia de actividades humanas*” (p. 11), y otros autores como González, Fernández y Gutiérrez (2013) señalan contundentemente que “*el cambio climático global se ha acentuado en los últimos años por el aumento de la población humana, el uso inadecuado del suelo o del territorio y las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos del agua y los componentes de la atmósfera, por lo que éste puede considerarse como el resultado del efecto sinérgico de las actividades humanas y la alteración de los sistemas fluidos del planeta*” (p. 332).

El ligamen directo de las variaciones climatológicas con las actividades humanas se ha generado primordialmente por el calentamiento global, aunque también se han observado importantes alteraciones en precipitaciones, ocurrencia de eventos extremos (huracanes y sequías), entre muchos otros (Galindo *et al.*, 2015). Considerado como la manifestación más evidente del cambio climático, el calentamiento global se refiere al incremento promedio de

las temperaturas terrestres y marinas globales. De acuerdo con estudios referenciados por SEMARNAT (2009, p. 2), “*existen claras evidencias de que el calentamiento del planeta registrado en los últimos 50 años puede ser atribuido a los efectos de las actividades humanas*”. En la Figura 2.1 se presenta el crecimiento promedio de la temperatura global del planeta desde 1880, basado en un índice generado a partir de datos de temperatura media superficial y oceánica y publicado mensualmente por la NASA (NASA GISS, 2022).

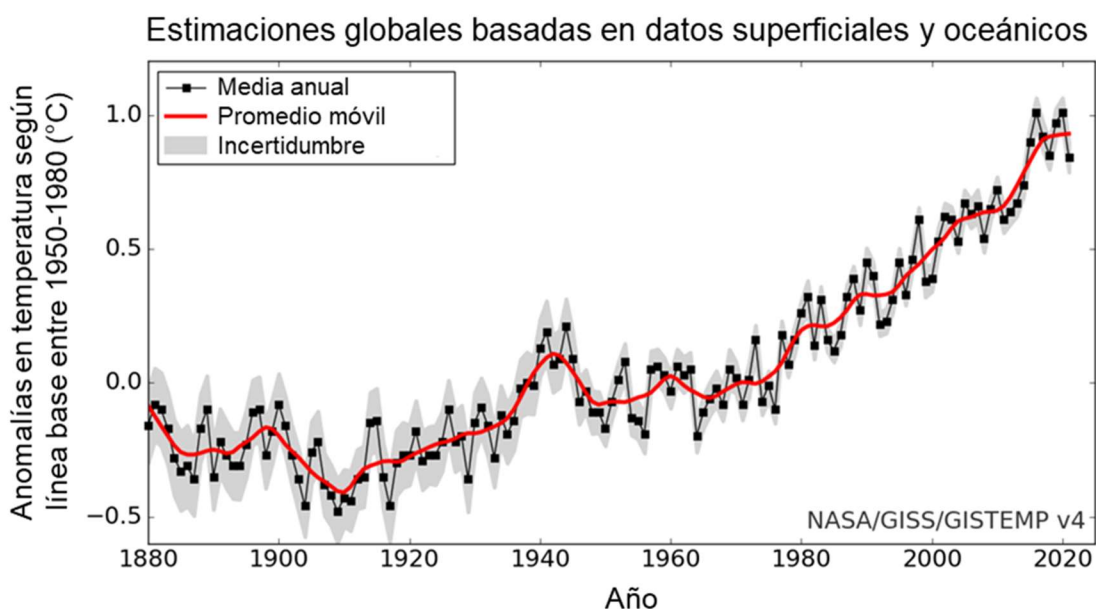


Figura 2.1. Crecimiento en el índice de temperatura media global, basado en datos superficiales y oceánicos desde 1880 hasta el 2022, con período base establecidos en las décadas de 1950 a 1980. (La línea negra continua es la media anual mundial, la línea roja continua es el promedio móvil de cinco años y el sombreado gris es la incertidumbre anual basada en un intervalo de confianza del 95 %). Fuente: (NASA GISS, 2022).

Como consecuencia del calentamiento global, uno de los impactos más importantes ha sido el derretimiento de los glaciares. Debido a este problema, ocurren dos efectos: la pérdida de los mayores reservorios de agua dulce en el planeta y el aumento aún mayor del calentamiento global, ya que su color blanco refleja hacia el espacio una gran cantidad de energía. Como consecuencias de estos deshielos glaciares, el inmenso volumen de agua que

llegaría al mar diluiría el agua salada a niveles peligrosos para el clima global por su afectación a las principales corrientes marinas y tenderían a elevar sus niveles, reduciendo la porción de tierra superficial y afectando a las poblaciones cercanas a la línea costera (Estrada, 2001).

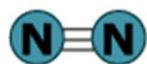
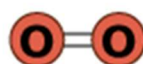
Eventos extremos como lluvias torrenciales, huracanes y sequías que provocan pérdidas materiales y de vidas humanas, así como daños importantes a los sistemas de alimentación basados en la agricultura y a los ecosistemas naturales que soportan la biodiversidad del planeta (Estrada, 2001). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, el número de víctimas en el mundo por desastres naturales aumentó de 147 millones a 211 millones entre 1991 y el año 2000. Por otro lado, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señala que de las especies que se han estudiado, alrededor del 50 % ya se han visto afectadas por el cambio climático (SEMARNAT, 2009).

La gran mayoría de fuentes coinciden en que el calentamiento global y el cambio climático se deben, en gran medida, al incremento en la atmósfera de la concentración de gases tipo invernadero, generados y emanados como consecuencia de actividades humanas.

2.2 Gases de efecto invernadero (GEI)

La atmósfera terrestre es una capa constituida por una mezcla de gases en la que dominan principalmente el nitrógeno (78,1 %) y el oxígeno (20,9 %), así como pequeñas cantidades de argón (0,93 %) y otros gases como vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno, neón, helio y kriptón (SEMARNAT, 2009; Benavides y León, 2007). Entre las funciones más importantes de la atmósfera, se destacan la filtración de la radiación ultravioleta proveniente del espacio, su función como escudo protector contra meteoritos que chocan regularmente con el planeta y la regulación de la temperatura global, esto último por medio del llamado “efecto invernadero” (SEMARNAT, 2009). En la Figura 2.2, se muestra la estructura de los principales gases que componen la atmósfera terrestre, incluyendo los gases más importantes que generan el efecto invernadero.

Gases Atmosféricos más abundantes

Nitrógeno, N_2 Oxígeno, O_2

Gases de Efecto Invernadero

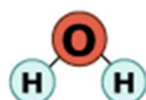
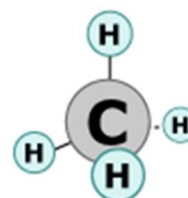
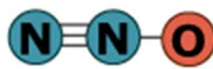
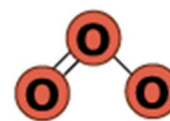
Agua, H_2O Dióxido de Carbono, CO_2 Metano, CH_4 Óxido Nitroso, N_2O Ozono, O_3

Figura 2.2. Representación gráfica de la estructura de los principales gases que componen la atmósfera terrestre, incluyendo los gases más importantes que generan el efecto invernadero. Fuente: (BSCS Science Learning, 2022).

Este último efecto es generado por la acción de los gases de efecto invernadero (GEI), los cuales dejan pasar la radiación solar y atrapan la radiación infrarroja reflejada, devolviéndola hacia la superficie. Los principales GEI presentes en la atmósfera terrestre son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3) y el vapor de agua, así como otros en menores cantidades, pero con efectos potentes como los halocarbonos, el hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (Benavides y León, 2007). La absorción de esta energía por un GEI tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Así, la energía absorbida se transforma en movimiento molecular interno del gas, que a su vez produce un aumento de su temperatura (Benavides y León, 2007). Las moléculas que provocan este fenómeno invernadero tienen constitución poliatómica, razón por la cual los gases más comunes como el oxígeno o nitrógeno no lo producen, y son sus modos de

vibración los que absorben la energía en la zona infrarroja del espectro (Velázquez de Castro, 2005). Se estima que, sin este fenómeno, la temperatura de la Tierra sería en promedio 33 °C más fría y el agua del planeta estaría congelada, lo que limitaría, en gran medida, la proliferación de la vida tal y como se conoce en la actualidad. Dado el papel preponderante de los GEI para controlar la temperatura del planeta, es claro que un incremento de su concentración en la atmósfera puede alterar el flujo natural de energía, aumentando el calor atrapado y, por ende, incrementando la temperatura global y originando el cambio climático.

La mayor parte de los GEI pueden provenir de fuentes naturales como el vulcanismo, los océanos y actividades biológicas como la respiración de plantas y animales, y la descomposición microbiana de la materia orgánica (SEMARNAT, 2009). Sin embargo, su presencia en la atmósfera puede estar influenciada directa o indirectamente por las actividades humanas. Este es el caso del vapor de agua, CO₂, CH₄, O₃ y N₂O. Por su parte, los SF₆, HFC, PFC y demás halocarbonos poseen un origen completamente artificial, producidos por el ser humano (Benavides y León, 2007). Para diferenciar las fuentes naturales de las de origen humano, a estas últimas se les ha llamado “*fuentes antropogénicas*”. Las actividades humanas relacionadas directamente o indirectamente con el uso de combustibles fósiles, la generación de electricidad, la cría de ganado, la descomposición de rellenos sanitarios, la producción y transporte de gas natural, los procesos químicos industriales, la deforestación, la producción de los alimentos y de otros tantos bienes y servicios han contribuido a incrementar la concentración de estos gases en la atmósfera (SEMARNAT, 2009; Bastidas y Hernández, 2019).

El vapor de agua es el mayor contribuyente al efecto invernadero natural y es el que está más directamente vinculado al clima. Esto ocurre dado que la temperatura de la superficie terrestre es el factor más preponderante en la evaporación del agua. Sin embargo, según Velázquez de Castro (2005) y Benavides y León (2007), el vapor de agua no suele considerarse dentro de los GEI más relevantes a cuantificar y controlar debido a su alta variabilidad y porque atraviesa la atmósfera en ciclos muy rápidos (entre ocho y diez días en promedio). En la Figura 2.3, se muestra una esquematización del ciclo del agua, en la que se observa el origen y tránsito del vapor de agua por la atmósfera antes de su precipitación.

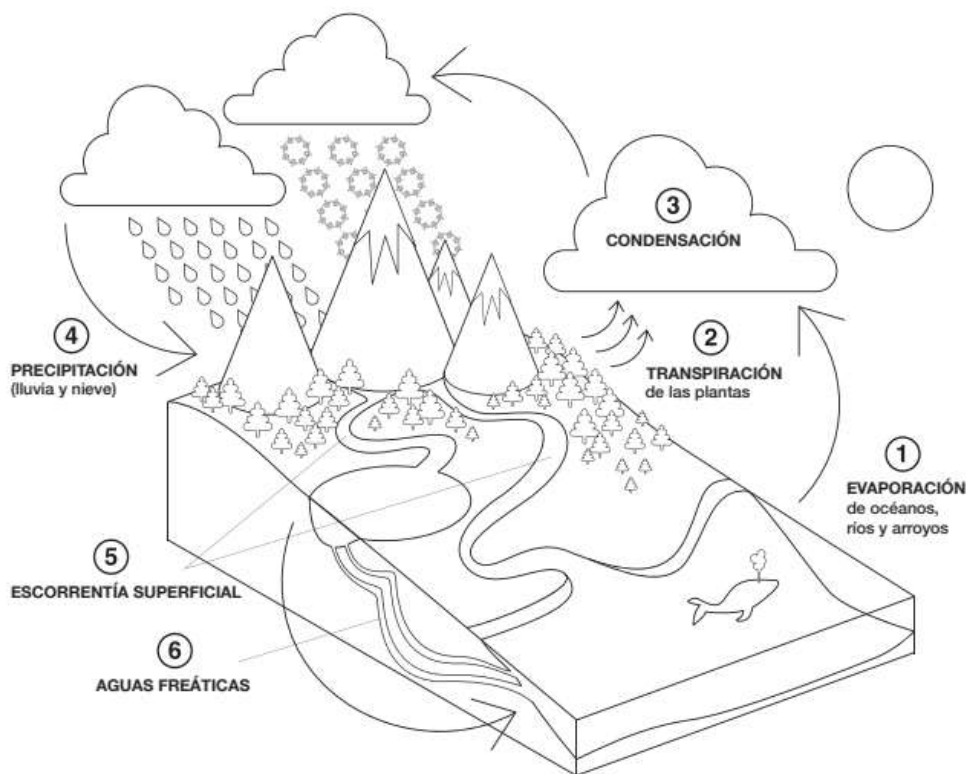


Figura 2.3. Esquematación del ciclo del agua (las etapas 1 y 2 muestran el origen natural del vapor de agua atmosférico, mientras que las etapas 3 y 4 corresponden a sus procesos de tránsito y precipitación a la superficie). Fuente: (NASA, 2022).

Después del vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2) es considerado como el segundo GEI más relevante en el calentamiento global y el más importante asociado con las actividades antropogénicas, principalmente por el consumo de combustibles fósiles y la deforestación. En relación con su origen natural, el CO_2 juega un rol principal dentro del ciclo del carbono en procesos biológicos como la respiración de los seres vivos (Benavides y León, 2007). En la Figura 2.4, se muestra una esquematización del ciclo de carbono como dióxido de carbono. De acuerdo con autores como Velázquez de Castro (2005) y Sánchez (2016), y publicaciones de NASA (2022) e IPCC (2007), la concentración de CO_2 en la atmósfera ha crecido exponencialmente desde 270 partes por millón (ppm) en la era preindustrial hasta más de 400 ppm en la actualidad. Esta concentración se considera la más elevada en los últimos 20 millones de años. En la Figura 2.5 se muestran los cambios registrados en la concentración del CO_2 atmosférico en el tiempo.

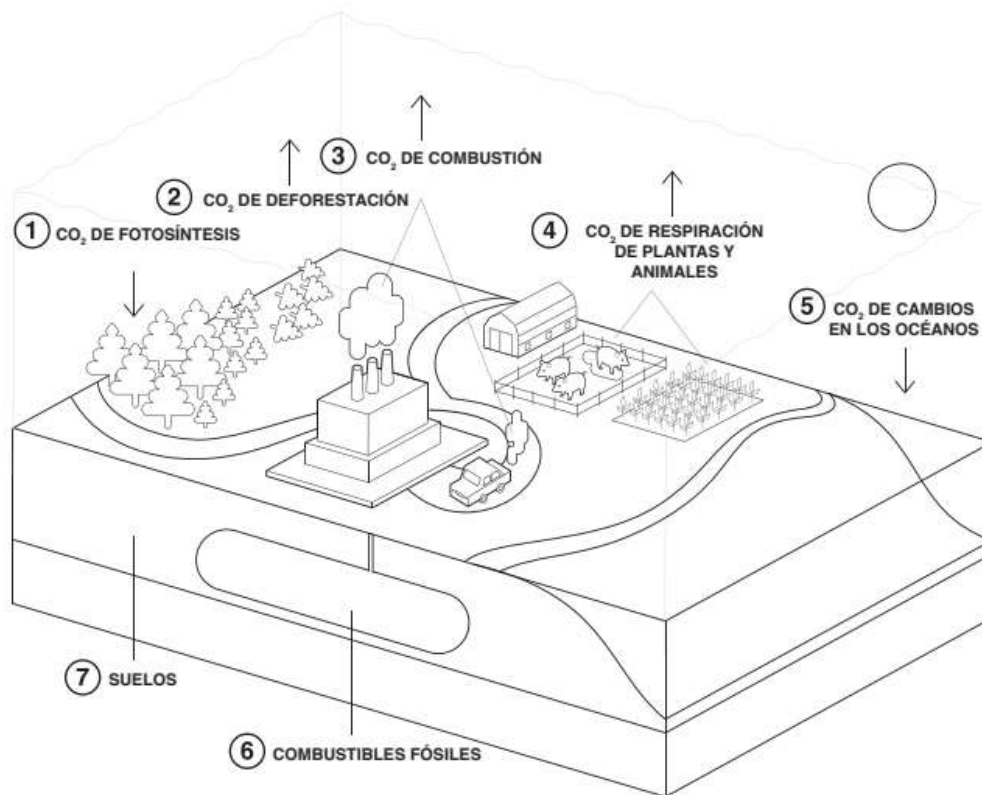


Figura 2.4. Esquematización del ciclo del carbono como dióxido de carbono (las etapas 1 y 5 muestran los principales procesos de fijación del CO₂, mientras que las etapas 2 y 3 corresponden a procesos de emisión con orígenes antropogénicos). Fuente: (NASA, 2022).



Figura 2.5. Cambios en los niveles atmosféricos del CO₂ a través del tiempo. Fuente: (NASA, 2022).

Posterior al CO_2 , el siguiente GEI en orden de importancia es el metano (CH_4). Se estima que el CH_4 es responsable de cerca del 23 % del cambio climático en el siglo anterior (NASA SVS, 2020). Actualmente, se considera que el CH_4 es aproximadamente veintiocho veces más potente que el CO_2 en su capacidad de GEI (IPCC, 2007) y su concentración ha aumentado en más de un 150 % desde el inicio de las actividades industriales y la expansión de la agricultura intensiva. En la Figura 2.6, se muestran los cambios registrados en la concentración del CH_4 atmosférico en el tiempo desde la década de 1980.

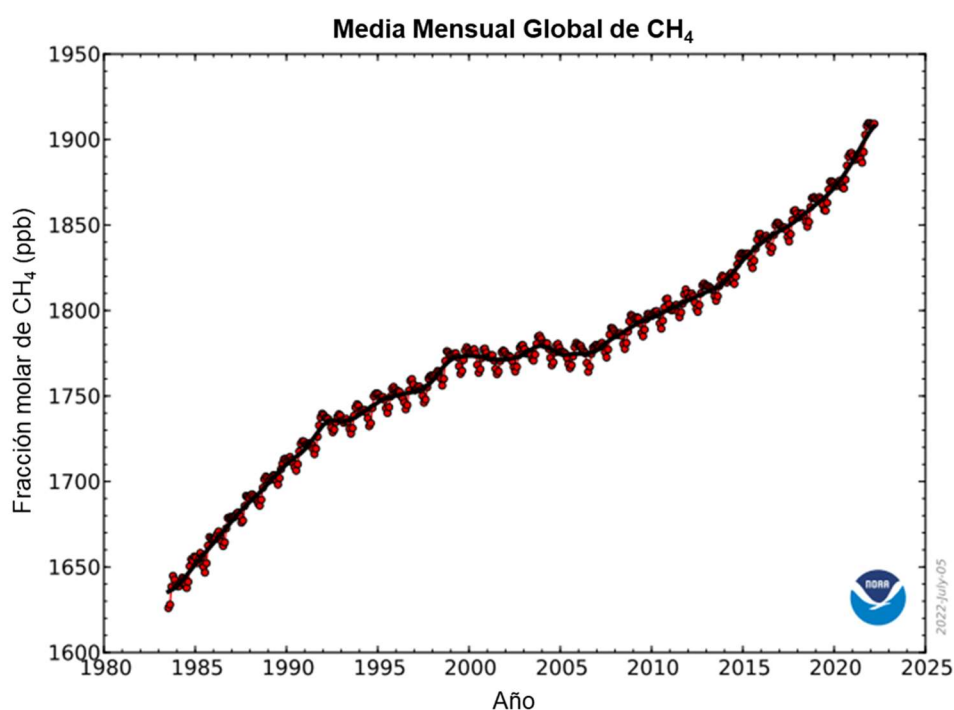


Figura 2.6. Cambios en los niveles atmosféricos del CH_4 a través del tiempo, determinados sobre superficies marinas. (Los puntos rojos corresponden a los promedios mensuales y la línea negra representa la tendencia a largo plazo equivalente a una media móvil de doce meses). Fuente: (NOAA, 2022).

En general, el CH_4 se produce por la descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos anóxicos (con cantidades reducidas de oxígeno disponibles). De acuerdo con Velázquez de Castro (2005), Benavides y León (2007) y NASA SVS (2020), las principales fuentes de emisiones de CH_4 incluyen la descomposición de materia orgánica en humedales,

ríos, lagos y estanques, las actividades agrícolas abarcando la fermentación entérica en procesos digestivos del ganado, el manejo de sus desechos sólidos, el cultivo de arroz y la quema de vegetación y otros residuos agrícolas, la disposición de desechos sólidos en vertederos y rellenos sanitarios, el tratamiento anaerobio de aguas residuales, la producción y distribución de gas natural, petróleo y carbón mineral, las colonias de termitas y una pequeña cantidad debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles.

Seguidamente, el óxido nitroso (N_2O) sobresale luego del CH_4 como GEI en importancia. Con una capacidad doscientas sesenta y cinco veces mayor que el CO_2 para atrapar calor y generar efecto invernadero, se estima que la concentración atmosférica de N_2O crece a una tasa del 2 % por década (IPCC, 2007). En la Figura 2.7, se muestran los cambios registrados en la concentración del N_2O atmosférico en el tiempo, desde la década del 2000.

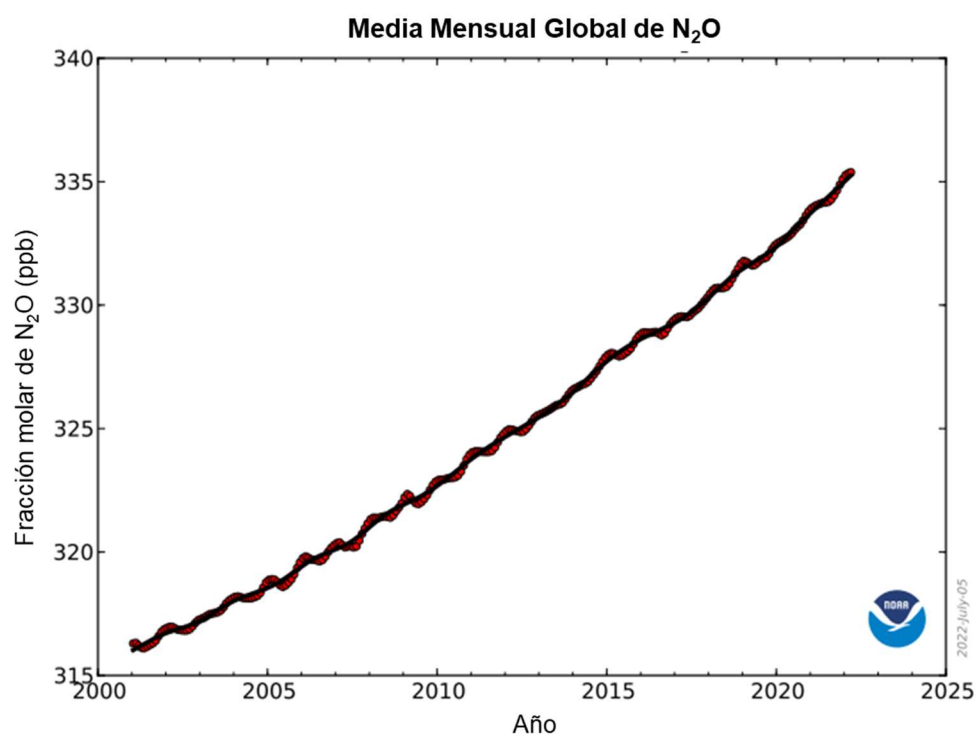


Figura 2.7. Cambios en los niveles atmosféricos del N_2O a través del tiempo, determinados sobre superficies marinas. (Los puntos rojos corresponden a los promedios mensuales y la línea negra representa la tendencia a largo plazo equivalente a una media móvil de doce meses). Fuente: (NOAA, 2022).

Se estima que dos terceras partes de las emisiones de N_2O son de origen natural, pero de forma similar al CH_4 , sus fuentes antropogénicas se encuentran relacionadas con la agricultura, específicamente con procesos microbiológicos de nitrificación y desnitrificación del suelo y el empleo de fertilizantes agrícolas y, en menor medida, con el tratamiento de aguas residuales y la combustión de combustibles fósiles y biomasa (Velázquez de Castro, 2005; Benavides y León, 2007)

Finalmente, la lista de los principales GEI cierra con los compuestos halogenados, incluyendo tanto a los halocarbonos (considerando el CFC) como a los HFC, PFC y SF_6 . Estos gases presentan la característica común de ser artificiales en su totalidad, es decir, producidos por el ser humano. En general, se consideran productos químicos con excelentes propiedades químicas como una alta estabilidad, baja toxicidad y reactividad, además de no ser costosos de producir. Por este motivo, han sido utilizados en diversas aplicaciones como propelentes de aerosoles, gases de refrigeración, espumas, solventes en aplicaciones industriales y como gases para limpieza en seco de dispositivos electrónicos (Velázquez de Castro, 2005; Benavides y León, 2007).

Los CFC y otros halocarbonos como el HCFC y HBFC en particular presentan una característica especialmente perjudicial como lo es la destrucción catalítica del ozono estratosférico por procesos de oxidación fotoquímica. Esto llevó a su prohibición a través del Protocolo de Montreal y sus enmiendas en la década de 1990 (SEMARNAT, 2009; Benavides y León, 2007). Entre los sustitutos de los CFC, se encuentran los tres gases sintéticos regulados por el Protocolo de Kioto: HFC, PFC y SF_6 . Estos gases no presentan procesos de agotamiento del ozono como los CFC, pero sí corresponden sustancias absorbentes de radiación infrarroja de alta relevancia, con capacidades miles de veces mayores que el CO_2 para atrapar calor y generar efecto invernadero (Velázquez de Castro, 2005; IPCC, 2007). Esta característica puede explicarse, en parte, porque muchos de ellos absorben energía en la región de longitudes de onda donde la energía no es absorbida por el dióxido de carbono ni el vapor de agua. En la actualidad, sus principales fuentes de emisión están relacionadas con procesos de fundición del aluminio, la fabricación de semiconductores y la transmisión y distribución de energía eléctrica (Benavides y León, 2007)

2.3 Cuantificación, inventarios y factores de emisión de GEI

Posterior a la adopción del Protocolo de Montreal y la creciente preocupación por el aumento en la concentración de GEI en la atmósfera, la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) crearon el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en 1988, para analizar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias ambientales, sociales y económicas, basándose en información científica (Vargas, 2014).

Gracias a los informes sobre el calentamiento global emitidos por el IPCC, en 1992, se crea la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) con el objetivo de “*estabilizar las concentraciones de GEI a niveles que impidan interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, alcanzables en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático y no amenacen la producción sostenible de alimento y el desarrollo económico*” (UNFCCC, 2022a, p. 5). Para lograr este objetivo, la UNFCCC solicita a sus firmantes que se desarrollen, actualicen y publiquen inventarios de sus emisiones antropogénicas, identificando sus respectivas fuentes para todos los GEI no controlados por el Protocolo de Montreal. Para reforzar las intenciones de la UNFCCC, mundialmente se han adoptado acuerdos internacionales como el Protocolo de Kyoto en 1997, la Enmienda de Doha en 2012 y el Acuerdo de París en 2015. Estos acuerdos incluyen la necesidad de generar inventarios de emisiones de GEI, así como disposiciones para limitar y reducir las emisiones cuantificadas, acelerar e intensificar las acciones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono, reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático e informar periódicamente el progreso de las acciones tomadas por cada país en este contexto (SEMARNAT, 2009; Vargas, 2014; UNFCCC, 2022a).

De acuerdo con Frey (2007), los inventarios de GEI pueden entenderse como compilaciones de las contribuciones de fuentes de emisión individuales a las emisiones totales de uno o más GEI, para un período y área geográfica determinada. Por su parte, la norma ISO 14064-1 define un inventario de GEI como una “*lista de fuentes y sumideros de GEI, y sus emisiones*

y remociones de GEI cuantificadas” (ISO, 2018). Estos se utilizan para una amplia variedad de propósitos, incluyendo el desarrollo de estrategias de control para reducir las emisiones, el análisis de tendencias de emisiones y proyecciones de emisiones futuras, las declaraciones de emisión con fines de cobro de tarifas u obtención de reconocimientos por gestiones ambientales, determinación del cumplimiento de modelos de impacto ambiental, pronóstico de la calidad del aire y cumplimiento de requisitos de informes de tratados internacionales, entre muchos otros (Bharvirkar, 1999; Frey, 2007).

De acuerdo con IPCC (1996), para la generación de inventarios que cuantifiquen las emisiones de GEI, la UNFCCC requiere el uso de metodologías homologadas que permitan su comparabilidad y seguimiento en el tiempo para demostrar las reducciones que lograrán alcanzar los niveles pretendidos por la Convención. Estos inventarios deben tener en cuenta las contribuciones de muchos tipos de categorías de fuentes de emisión. La clasificación de alto nivel más utilizada diferencia las fuentes antropogénicas de las biogénicas (naturales), justificado en que las primeras son potencialmente controlables ya que resultan de la actividad humana (Frey, 2007). En general, según las disposiciones de IPCC para cumplir la UNFCCC, los inventarios de GEI se deben presentar dentro de un informe escrito que incluya un conjunto de cuadros estándar que cubren todos los gases, las categorías y los años pertinentes, y así como las metodologías y los datos utilizados para elaborar las estimaciones (IPCC, 2006a). Los lineamientos y buenas prácticas aceptadas para la construcción y garantía de calidad de un inventario nacional de GEI han sido desarrollados y actualizados por el IPCC desde la década de 1990 (IPCC, 1996) y sus bases fueron adoptadas por normas internacionales, como la ISO 14064-1, para definir los requisitos pertinentes aplicables para el diseño, desarrollo y gestión de inventarios de GEI a nivel organizacional (ISO, 2018).

De acuerdo con las normas ISO 14064-1 (ISO, 2018) e INTE B5 (INTECO, 2021), las metodologías de cuantificación de emisiones de GEI (E_i) recomendadas para la construcción de un inventario se clasifican en tres grupos:

- a. *Método indirecto*: basado en datos de actividades (D_i) que generan gases de efecto invernadero, multiplicados por factores de emisión (F_i) publicados por fuentes oficiales, de la forma:

$$E_i = D_i \cdot F_i$$

Los datos de actividad corresponden a medidas cuantitativas de la actividad que da lugar a las emisiones de GEI, mientras que los factores de emisión son coeficientes que relacionan los datos de la actividad con la emisión de GEI respectiva (ISO, 2018).

- b. *Método directo*: basado en mediciones de las cantidades de gas realizadas en las salidas de flujo de los procesos que generan gases de efecto invernadero. Suelen utilizarse estimaciones basadas en promedios, tasas o sumatorias de una serie de datos.
- c. *Balance de masa*: basado en balances de materia a partir de cantidades de partida y ecuaciones de reacciones químicas.

De acuerdo con Bharvirkar (1999) e IPCC (2006a), el abordaje metodológico más simple para realizar la cuantificación de las emisiones individuales (E_i) en un inventario de GEI es mediante métodos indirectos que emplean factores de emisión. En general, se considera que el uso de factores de emisión simplifica enormemente la estimación de las emisiones, ya que los datos de actividad suelen ser fácilmente identificados, recopilados y cuantificados por parte de las organizaciones. Al ser utilizados, se considera que los factores de emisión son representativos de la tasa de emisión promedio de una población de fuentes contaminantes en una categoría específica. Sin embargo, puede haber incertidumbre en las emisiones promedio de la población debido a un error de muestreo aleatorio, un error de medición o variaciones propias de su comportamiento. Esto puede conducir a conclusiones erróneas con respecto a los inventarios de emisiones y la relación entre la calidad del aire ambiente y las emisiones de la fuente individual, haciendo vital la cuantificación de la incertidumbre asociada a estos factores de emisión (Bharvirkar, 1999). Para el caso de Costa Rica, los factores de emisión oficiales y sus respectivas incertidumbres son publicados periódicamente por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2021).

Finalmente, y debido a la diferencia entre las capacidades de absorción de radiación infrarroja de los diferentes GEI que se deben incluir en los inventarios, las emisiones individuales cuantificadas para cada GEI deben ser multiplicadas por parámetros denominados potenciales de calentamiento global (PCG; como variable: PCG_i), de la forma:

$$E'_i = E_i \cdot PCG_i$$

De acuerdo con la norma ISO 14064-1, un PCG corresponde a un “*índice, basado en las propiedades de radiación de los GEI, que mide la fuerza de radiación tras la emisión de un pulso de una unidad de masa de un GEI dado en la atmósfera actual integrado en un período determinado, con relación a la unidad del dióxido de carbono*” (ISO, 2018, p. 11). En general, el período u horizonte de tiempo escogido corresponde a cien años y los GEI que poseen los PCG más altos corresponden a los PFC, seguidos por los CFC, HFC y finalmente el N₂O (Benavides y León, 2007; IPCC, 2006a). Para el caso de Costa Rica, los PCG oficiales y son publicados periódicamente por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2021). De acuerdo con las directrices para la estimación y análisis de la incertidumbre de emisiones y remociones de GEI del PPCN 2.0 (DCC y LCM, 2019), los PCG son tratados como constantes, es decir, no se les asocian incertidumbres que contribuyan la estimación de incertidumbre global del inventario de GEI.

2.4 Carbono neutralidad

De acuerdo con las normas ISO 14064-1 (ISO, 2018) e INTE B5 (INTECO, 2021), la carbono neutralidad se logra cuando el “*balance neto de las emisiones y remociones (E), menos las reducciones (R), menos la compensación (C) es igual a cero*” (p. 10), es decir, se cumple:

$$\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{j=1}^m R_j - \sum_{k=1}^l C_k = 0$$

Así, la carbono neutralidad inicia con cuantificación de la huella de carbono a través de la construcción de un inventario de emisiones de GEI (E). Luego, se deben realizar proyectos o acciones dirigidas de reducción de emisiones (R) y, finalmente, compensar las emisiones que no pudieron ser reducidas mediante mecanismos externos de nivelación generados en forma de créditos de carbono por una tercera parte (C). Estos mecanismos de compensación incluyen iniciativas internacionales como las Reducciones Certificadas de Emisiones (CER, por sus siglas en inglés) (UNFCCC, 2022b) y las Reducciones Voluntarias de Emisiones (VER, por sus siglas en inglés) (DNV, 2022), así como mecanismos nacionales como las Unidades Costarricenses de Compensación (UCC) (FONAFIFO, 2018). Se considera que la carbono neutralidad se alcanza cuando se reduce al máximo las emisiones de GEI y se compensan las emisiones inevitables (Vargas, 2014).

CAPÍTULO III. PROCESOS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

3.1 Generalidades

La incertidumbre de medida se define formalmente como un “*parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos a la magnitud medida*” (JCGM, 2008a, p. 4). Cabe señalar que la definición se basa en la posibilidad de caracterizar una dispersión de valores, ya que, al conocer qué tan grande es la dispersión de estos datos, se puede juzgar la calidad de la medición que los produjo (Bell, 2001).

El término de incertidumbre de medida, o simplemente incertidumbre, suele ser asociado con los errores de medición, aunque representan distintos conceptos. El error de medición corresponde a la diferencia entre el resultado de una medición y el valor *real* (desconocido) de la magnitud de interés que se está tratando de cuantificar a través de dicho proceso de medición (JCGM, 2012). La presencia de estos errores, y el hecho de que sean impredecibles, genera incertidumbre sobre la exactitud de los resultados obtenidos (Hall y White, 2017). Por este motivo, también suele decirse que “*la incertidumbre de medición es la duda sobre el “verdadero” valor de la magnitud medida que queda después de realizar una medición*” (Lafarge y Possolo, 2015, p. 20). De hecho, a la investigación y estudio de los errores de medición se le conoce como análisis de incertidumbre. Este campo de estudio busca “*identificar y evaluar los factores que pueden contribuir a generar errores de medición, así como producir un modelo que describa el comportamiento inherentemente impredecible de la medición y proporcione información estadística sobre la precisión de los resultados que se puede utilizar para una posterior toma de decisiones*” (Hall y White, 2017, p. 30).

De esta manera, debido a la influencia de estos factores que generan errores de medición, no es posible determinar de forma exacta el valor de cualquier magnitud de interés, únicamente puede ser estimado aproximadamente. Para hacerlo, se suele recurrir al uso de modelos (de medición), los cuales describen la relación entre la magnitud de interés (Y) y otras

magnitudes que influyen en el resultado del proceso de medición, denominadas magnitudes de entrada (X_i), de la forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$$

El uso de los modelos de medición es una parte medular del análisis de incertidumbre, ya que permiten evaluar tanto el valor atribuible a Y como su correspondiente incertidumbre (Hall y White, 2017).

La representación y estimación de incertidumbre se facilita, en gran medida, modelando las magnitudes de entrada X_i como variables aleatorias. Esto quiere decir que estas variables “poseen una distribución de probabilidad asociada como un atributo, independientemente de si el valor asignado a dicha variable se observa en una muestra extraída de alguna población, o si pertenece a una magnitud que se conoce sólo de manera imperfecta o incompleta” (Lafarge y Possolo, 2015, p. 21). Estas distribuciones de probabilidad caracterizan el conocimiento disponible sobre las magnitudes de entrada y describen las dudas sobre sus valores, es decir, sus incertidumbres de medición (JCGM, 2008a). Dado que la magnitud de salida Y se expresa en función de las magnitudes de entrada X_i , modeladas como variables aleatorias, puede considerarse que Y es una variable aleatoria en sí misma y su incertidumbre de medición puede ser evaluada en función de las incertidumbres de las magnitudes de entrada (Bell, 2001; JCGM, 2008a; Lafarge y Possolo, 2015).

3.2 GUM y método de Gauss

El marco de trabajo para evaluar y estimar la incertidumbre de una medición se homologó internacionalmente en 1993 con la publicación de la primera edición de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM, por sus siglas en inglés) y sus posteriores revisiones de 1995 y 2008 (JCGM, 2008a). De acuerdo con estos lineamientos internacionales, el proceso general de estimación de la incertidumbre de una magnitud de salida Y puede realizarse mediante la aplicación del método conocido como ley de propagación de incertidumbre, propagación de errores o método de Gauss, implementado en el campo por Kline y McClintock (1953) y actualmente descrito en la GUM (JCGM, 2008a).

El procedimiento general para la aplicación del método de Gauss o ley de propagación de incertidumbre puede ser englobado en las siguientes etapas:

- a. Expresar matemáticamente el modelo de medición $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$. La función f debe contener todas las magnitudes, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección que pueden contribuir significativamente.
- b. Determinar los valores de x_i , valores estimados de las magnitudes de entrada X_i , ya sea a partir del análisis estadístico de una serie de observaciones o por otros métodos aplicables.
- c. Estimar la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de cada valor x_i . Cuando x_i proviene del análisis estadístico de series de observaciones, la incertidumbre $u(x_i)$ se evalúa como una desviación estándar asociadas a los datos replicados (evaluación Tipo A de la incertidumbre). Cuando x_i es estimada a partir de otros medios aplicables, la incertidumbre $u(x_i)$ se evalúa a partir de la suposición de una distribución de probabilidad que describa el comportamiento esperado de X_i (evaluación Tipo B de la incertidumbre). La elección de la distribución de probabilidad aplicable en cada caso debe ser decisión científica basada en toda la información disponible acerca de la variabilidad posible de X_i , y requiere experiencia y en el conocimiento general sobre la magnitud en cuestión.
- d. Evaluar las covarianzas asociadas a todas las estimaciones de entrada que estén correlacionadas.
- e. Calcular el resultado de medición, es decir, la estimación y del mensurando Y a partir de la función f utilizando los valores de x_i obtenidos en etapas anteriores.
- f. Determinar la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ del resultado y , a partir de las incertidumbres $u(x_i)$ y las covarianzas asociadas a las estimaciones de entrada. Para ello, se propone el uso de la serie o polinomio de Taylor (Apostol, 1967) de primer orden, de la forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

Donde los cocientes $\partial f / \partial x_i$, comúnmente denominados coeficientes de sensibilidad, corresponden a las derivadas parciales de la función f con respecto a cada variable x_i y $u(x_i, x_j)$ es la covarianza estimada asociada a x_i y x_j . Cuando todas las magnitudes de

entrada X_i no están correlacionadas, es decir, son independientes entre sí, la estimación de $u_c(y)$ se reduce a la siguiente ecuación:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2$$

En el caso de dos o más magnitudes de entrada X_i que estén correlacionadas o no sean independientes entre sí, la estimación de $u_c(y)$ se realiza siguiendo la siguiente ecuación:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

- g. Calcular una incertidumbre expandida U , cuyo fin es proporcionar un intervalo $[y - U, y + U]$ en el que se espera encontrar la mayor parte de la distribución de valores que podrían, razonablemente, ser atribuidos a la magnitud de salida Y . Para ello, se debe multiplicar la incertidumbre $u_c(y)$ por un factor de cobertura k , normalmente comprendido en un margen de valores entre 2 y 3, de la forma:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

La selección de k debe considerar el nivel de cobertura requerido para el intervalo que desea ser reportado, bajo el supuesto de una distribución normal subyacente para Y . De esta manera, por ejemplo, $k = 2$ para un 95 % de cobertura aproximadamente.

- h. Documentar el resultado de medición y junto con su incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ o su incertidumbre expandida U . Suele reportarse el intervalo obtenido de la forma $Y = [y \pm U]$.

3.3 GUM-S1, método de Monte Carlo y *bootstrapping*

En el año 2008, la GUM fue complementada con su suplemento 1 (GUM-S1), denominado: “Propagación de Distribuciones usando el Método de Monte Carlo” (JCGM, 2008b). De acuerdo con este documento, el proceso de estimación de la incertidumbre de una magnitud de salida Y puede también realizarse mediante la aplicación del método de simulación de Monte Carlo (MMC), cuya aplicación en este campo fue propuesta por Morgan y Henrion (1990) y actualmente descrito en la GUM-S1 (JCGM, 2008b).

El método de Monte Carlo coincide en las primeras etapas con el método de Gauss, pero plantea la asignación de las funciones de distribución de probabilidad atribuibles a cada una de las magnitudes de entrada X_i a partir de su conocimiento e información disponible en lugar de estimar las incertidumbres estándar $u(x_i)$. A partir de esto, se aplica un proceso de propagación de distribuciones de probabilidad (JCGM, 2008b) para lograr resultados comparables con los obtenidos en las últimas etapas del método de Gauss.

La propagación de distribuciones de probabilidad aplicando el método de simulación de Monte Carlo corresponde a uno de los pasos clave para lograr una correcta evaluación de la incertidumbre de medida de una magnitud de interés $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$. Posterior a la definición de la función f , correspondiente al modelo que relaciona las magnitudes Y y X_i , se deben asignar las funciones de distribución de probabilidad atribuibles a cada una de las magnitudes de entrada X_i a partir de su conocimiento e información disponible. La propagación de distribuciones consiste en establecer una aproximación numérica para la función de distribución para la magnitud Y :

$$G_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\eta} g_Y(z) dz$$

donde la función de distribución de probabilidad g_Y está dada por la definición general:

$$g_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_{X_i}(\xi_i) \delta(\eta - f(\xi_i)) d\xi_N \dots d\xi_1$$

La función $\delta(\cdot)$ corresponde a la función delta de Dirac, mientras que η y ξ_i son las variables que describen los posibles valores de la magnitud de salida Y y las magnitudes de entrada X_i , respectivamente. La propagación de las funciones de distribución de probabilidad $g_{X_i}(\xi_i)$ de las magnitudes de entrada X_i mediante el uso del modelo f es la que proporciona la aproximación a la función de distribución de probabilidad $g_Y(\eta)$ de la magnitud de salida Y .

De esta forma, el método de Monte Carlo proporciona una aproximación numérica general para obtener una representación de la función de distribución $G_Y(\eta)$, utilizando un gran número de muestreos aleatorios repetidos a partir de las funciones de distribución de probabilidad $g_{X_i}(\xi_i)$ y evaluando el modelo f en cada caso, para obtener así múltiples valores de Y . Finalmente, dado que $G_Y(\eta)$ contiene toda la información relativa a Y y que es generada

a partir de la información de entrada X_i , se pueden estimar propiedades de Y tales como su esperanza matemática, su varianza y sus intervalos de cobertura, parámetros que son de interés para expresar finalmente el resultado de una medición y su incertidumbre. La Figura 3.1 resume la esquematización de este proceso.

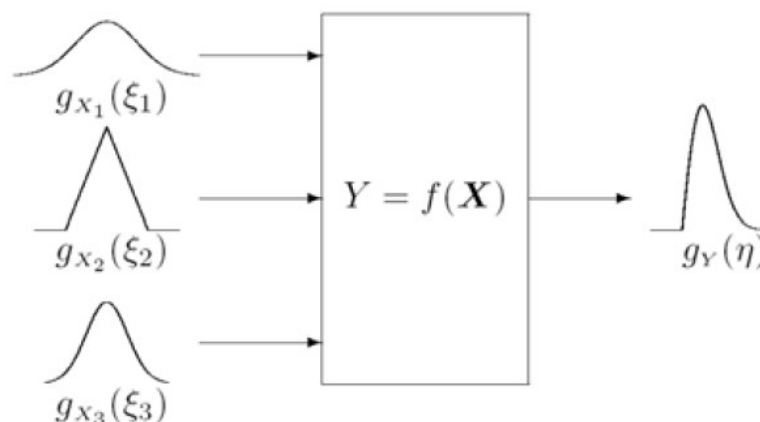


Figura 3.1. Esquematización del proceso de propagación de distribuciones de probabilidad para tres magnitudes de entrada. Fuente: (JCGM, 2008b).

Por otro lado, ante la presencia de una muestra aleatoria Z de tamaño n , proveniente de una distribución de probabilidad desconocida F , la teoría del *jackknife* indica que es posible estimar la distribución de una variable aleatoria R que dependa de Z y F a partir de los datos observados $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ (Efron, 1979). Dentro de este marco conceptual, Efron (1979) introduce el método de *bootstrap* o *bootstrapping*, el cual aproxima la distribución de R a partir de los siguientes pasos:

- a. Se construye la distribución de probabilidad observada \hat{F} , asignando una probabilidad $1/n$ a cada valor de z_1, z_2, \dots, z_n .
- b. De esta distribución \hat{F} se extrae una muestra aleatoria Z^* de tamaño n , conocida como muestra *bootstrap*, utilizando el remuestreo o muestreo con reemplazo.
- c. Se aproxima la distribución de R utilizando la distribución *bootstrap* R^* que dependa de Z^* y \hat{F} , generada mediante alguna de las estrategias disponibles. Si $F = \hat{F}$, teóricamente la distribución aproximada R^* será equivalente a la distribución deseada R .

Dentro de las estrategias para estimar la distribución *bootstrap* R^* , destaca el método de Monte Carlo. La aplicación de dicho método pretende estimar esta distribución mediante el muestreo con reemplazo de forma que la muestra observada Z se trata como una población finita con distribución de probabilidad \hat{F} . De acuerdo con Efron (1979), Gil (2014) y Ramírez-Montoya *et al.* (2016), de forma resumida, la estimación de la distribución *bootstrap* R^* mediante el método de Monte Carlo puede describirse mediante las siguientes etapas, considerando un muestreo aleatorio simple con reemplazo:

- a. Se toma una primera muestra Z_1^* de tamaño n , a partir de la muestra original Z con distribución de probabilidad \hat{F} , y se estima un valor r_1^* para la variable R^* .
- b. Se repite este proceso, generando una gran cantidad de muestras Z^* , todas de tamaño n mediante muestreo con reemplazo de la muestra original Z . A cada una de estas muestras *bootstrap*, se le estima un valor r^* .
- c. Posteriormente, se puede construir la distribución *bootstrap* R^* a partir de todos los valores r^* calculados en las etapas anteriores.
- d. Adicionalmente se puede aproximar el error estándar u otro estadístico de interés de la variable R a partir del cálculo de dicho estadístico en R^* . Este último valor tiene la ventaja de ser aplicable, independientemente de la complejidad de la función matemática que defina la variable R .

En el contexto de estimación de incertidumbre, esta aplicación del método de Monte Carlo puede ser utilizada en aquellos casos en los que se cuenta una magnitud de entrada X_i cuenta con datos de partida y una distribución empírica observada. En estas condiciones, el *bootstrapping* proporciona una alternativa válida que no asume que la muestra haya sido tomada de una población con una distribución estadística concreta. Al contrario, ante la ausencia de otra información sobre la población, se asume que la distribución de una muestra aleatoria es la mejor guía para determinar la distribución de la población (Tineo, 2005).

3.4 Estimación de incertidumbre en inventarios de GEI

Al ser los inventarios de GEI el resultado de la conjunción de una serie de mediciones y estimaciones, es claro que estas herramientas están sometidas a procesos de estimación de incertidumbre. En la actualidad, se considera que las estimaciones de incertidumbre

constituyen un elemento esencial de un inventario exhaustivo de emisiones y remociones de GEI (IPCC, 2006b), especialmente dada la significancia de los cambios o reducciones que son reportados periódicamente en los inventarios (Jonas *et al.*, 2010) y su papel clave para aumentar la confianza en los resultados que son utilizados para implementar estrategias y políticas ambientales (El-Fadel, Zeinati, Ghaddar y Mezher, 2001; Hergoualc'h *et al.*, 2021). Consecuentemente, los resultados de estos análisis de incertidumbre deben ser utilizados como un medio para guiar y mejorar la metodología seleccionada para elaborar el inventario mismo y para priorizar los esfuerzos destinados a reducir la incertidumbre de los inventarios futuros (Ritter, Lev-On y Shires, 2010).

De acuerdo con EPA (1996), Frey (2007), Rypdal y Winiwater (2001) y Van Aardenne (2002), entre otros, dentro de las principales causas potenciales que generan la incertidumbre en los inventarios de GEI destacan:

- a. Conceptualización incompleta del proceso que genera la emisión o remoción considerada, o falta de exhaustividad al considerar los elementos que describen dicho proceso.
- b. Cuantificación de emisiones o remociones mediante el uso de modelos incompletos, modelos que aproximan los valores reales mediante simplificaciones, interpolaciones o extrapolaciones, o existencia de varios modelos distintos aplicables para un mismo caso que difieren en sus resultados.
- c. Falta de datos, uso de datos sustitutos o imputados y uso de datos agrupados (por ejemplo, uso de promedios temporales).
- d. Falta de representatividad de los datos disponibles.
- e. Errores de muestreo aleatorio asociados con el tamaño finito de las bases de datos.
- f. Errores de medición, incluyendo resolución finita y tolerancias de equipos de medición, variabilidad natural de los procesos que se intentan medir, errores humanos, entre otros.

Tanto EPA (1996) como IPCC (2006b) proponen la cuantificación de incertidumbre en inventarios de GEI como un proceso iterativo y recopilan las distintas estrategias recomendadas para la cuantificación de incertidumbre en inventarios de GEI, clasificándolas en tres niveles:

- a. *Análisis cualitativo*: este corresponde al nivel más básico y consiste en el listado y discusión de las principales fuentes de incertidumbre (sesgos e imprecisiones) de los inventarios, de forma narrativa o tabulada.
- b. *Metodologías semi-cuantitativas*: estas buscan clasificar las fuentes de incertidumbre de forma que se puedan comparar y ordenar de las más importantes a las menos relevantes. Su uso se recomienda cuando no se cuenta con datos detallados de las emisiones o remociones. Dentro de esta clasificación, se incluyen el sistema de clasificación o rankings subjetivos basados en la calidad de los datos disponibles, y el sistema DARS, que asigna puntuaciones subjetivas, entre 0 y 1, basándose en el conocimiento disponible sobre los datos utilizados en la construcción del inventario. Esta última metodología es la recomendada por la EPA para las evaluaciones semicuantitativas de incertidumbre (EPA, 1996).
- c. *Metodologías cuantitativas*: estas buscan generar estimaciones numéricas de las incertidumbres basadas en cálculos estadísticos y corresponden a las estrategias más complejas de implementación. En general, se requieren datos detallados de las emisiones o remociones, e involucran la estimación de desviaciones estándar o la asignación de distribuciones de probabilidad a las diversas variables involucradas en la cuantificación del inventario. Dentro de esta clasificación, se incluyen los métodos de propagación de errores (método de Gauss) y MMC, ambos consistentes con los principios definidos en la GUM y GUM-S1.

Estudios como el de Frey (2007) comparan ambos métodos de estimación, señalando que el MMC cuenta con un espectro de aplicación más amplio en inventarios de GEI, especialmente cuando se está ante la presencia de datos con incertidumbres elevadas (mayores al 30 % con respecto a su media), variables con diversas distribuciones de probabilidad asignadas o modelos de diversas formas y complejidades.

Para un mayor detalle de estudios sobre estimación de incertidumbre con alcances de inventarios nacionales de GEI, se recomienda la consulta de trabajos como Fauser *et al.* (2011), Ramírez *et al.* (2008), Monni, Syri y Savolainen (2004), Milne *et al.* (2014) y Wójcik-Gront y Gront (2014), así como estudios con alcances específicos de menor escala como los

trabajos de Bharvikar (1999), Singer y Harley (1996), McMurray, Pearson y Casarim (2017), Cadwallader y VanBriesen (2017), Cho *et al.* (2018), Quilcaille *et al.* (2018), Pouliot *et al.* (2012), entre muchos otros.

A nivel nacional, destaca la guía metodológica nacional para la estimación y análisis de la incertidumbre de emisiones y remociones de GEI (DCC y LCM, 2020). Esta guía plantea el proceso de estimación de incertidumbre para inventarios organizacionales como una sucesión de la aplicación de las siguientes cuatro etapas:

- a. *Comprensión del caso*: etapa en la que debe identificar claramente las fuentes de emisión y remoción que aportan al inventario de GEI y las principales fuentes que generan incertidumbre o variación en los resultados obtenidos para dichas magnitudes de entrada.
- b. *Estimación de incertidumbres individuales*: etapa en la que se realiza la evaluación y cuantificación numérica de las fuentes de incertidumbre para cada una de las magnitudes de entrada del inventario de GEI identificadas en la primera etapa. Para ello, se recurre a la aplicación de metodologías cuantitativas de estimación de incertidumbre, utilizando de la información disponible sobre las magnitudes de entrada y el ajuste de distribuciones de probabilidad.
- c. *Combinación de incertidumbres*: etapa en la que se combinan las incertidumbres individuales estimadas en la segunda etapa hasta obtener una incertidumbre combinada total, utilizando como base los modelos matemáticos que componen el cálculo del propio inventario.
- d. *Expresión del resultado como intervalo*: etapa en la que la incertidumbre combinada total obtenida en la tercera etapa se transforma en un rango de variación para su reporte final, ya que este último corresponde a una medida de dispersión más entendible para los usuarios de la información. Esto se logra mediante el ajuste de una distribución de probabilidad o su cálculo directo a partir de los datos obtenidos de simulaciones numéricas.

Cabe señalar que, para la implementación del proceso anteriormente descrito, la guía aplica la ley de propagación de incertidumbre o el uso del MMC como metodologías para la estimación de incertidumbres.

3.5 Softwares para la estimación de incertidumbre

Gran diversidad de herramientas o *softwares* han sido desarrolladas con la finalidad de facilitar la implementación del proceso de estimación de incertidumbre en áreas diversas. Estas herramientas incluyen desde hojas de cálculo desarrolladas para casos específicos hasta programas complejos capaces de adecuarse a casos generales o específicos de diversa naturaleza. Como base para su funcionamiento, estas herramientas comparten los principios de estimación definidos en la GUM (JCGM, 2008a) o GUM-S1 (JCGM, 2008b), aunque muchas veces cuentan con alcances limitados para su aplicación.

Dentro de las herramientas digitales de libre acceso más conocidas para la estimación de incertidumbre de medición destacan el *GUM Workbench* (Metrodata GmbH, 2017), el *NPLUnc_101* (NPL, 2018) basado en MATLAB, y el *NIST Uncertainty Machine* (Lafarge y Possolo, 2015) basado en programación integrada HTML y R. También puede destacarse la librería de funciones de R denominada *metRology* (Ellison, 2018), que incluye funciones y algoritmos programados que permiten realizar estimaciones de incertidumbre generales.

Por otro lado, es posible encontrar herramientas digitales para la estimación de incertidumbre aplicada en sectores metrológicos específicos. Ejemplos de este tipo de desarrollos incluyen aplicaciones como el *Measurement Uncertainty Kit (MUKit)* (Näykki, Virtanen, Varkonyi y Innovatics Oy, 2021) para laboratorios de ensayos químicos, o desarrollos con alcances más específicos como una hoja de cálculo para estimar incertidumbres de medición en espectrometría de rayos gamma (Ceccatelli, Dybdal, Fajgelj y Pitois, 2017), entre otros.

Específicamente en el área de estimación de incertidumbre para inventarios de GEI, varias herramientas han sido desarrolladas, basadas en las recomendaciones del IPCC para la estimación de incertidumbre en inventarios nacionales. Dentro de las principales opciones destaca el *IPCC Inventory Software* (IPCC, 2020), desarrollado en MS Access y MS Excel. Otras herramientas alternativas incluyen *software* o rutinas programadas que involucran el uso de hojas de cálculo de MS Excel y programación en Visual Basic for Applications (VBA), como el *GHG Protocol Uncertainty Calculation Tool* (GHG Protocol, 2003) o el *NGER Uncertainty Calculator* (Clean Energy Regulator, 2021).

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1 Distribuciones de probabilidad

La técnica convencional descrita para la aplicación del MMC requiere la asignación las funciones de distribución de probabilidad para las distintas magnitudes X_i o variables de interés. Sin embargo, no se requiere necesariamente que dichas distribuciones de probabilidad sean simétricas, asimétricas, continuas, discretas o de un tipo en particular, siendo las distribuciones continuas las más utilizadas en el campo de la estimación de incertidumbre. Por lo tanto, el presente proyecto consideró el uso de distintos tipos de distribuciones de probabilidad continuas, tanto simétricas como asimétricas, de uso generalizado en el campo de la estimación de incertidumbre. Su selección en cada caso dependió de la información disponible sobre la magnitud o variable bajo análisis, y se basó en el principio de máxima entropía descrito en JCGM (2008b) y Jaynes (1957), recomendaciones literarias provenientes de JCGM (2008a; 2008b), IPCC (2006b) y DCC y LCM (2020), o criterio de experto. Dichas distribuciones de probabilidad se ejemplifican en la Figura 4.1 y se detallan a continuación:

Distribución normal (distribución Laplace-Gauss): Distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , cuya función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

Los parámetros de la distribución corresponden a μ (esperanza matemática o media) y σ (desviación estándar). La distribución normal fue considerada para casos donde los valores de la magnitud resultan del efecto aditivo de varias variables aleatorias, cuando la información relativa a la incertidumbre de la magnitud proviene de reportes o certificados de calibración o ensayo, o en el caso de magnitudes con rangos de variación pequeños y simétricos con respecto a la media (IPCC, 2006b; JCGM, 2008a; JCGM, 2008b, DCC y LCM, 2020).

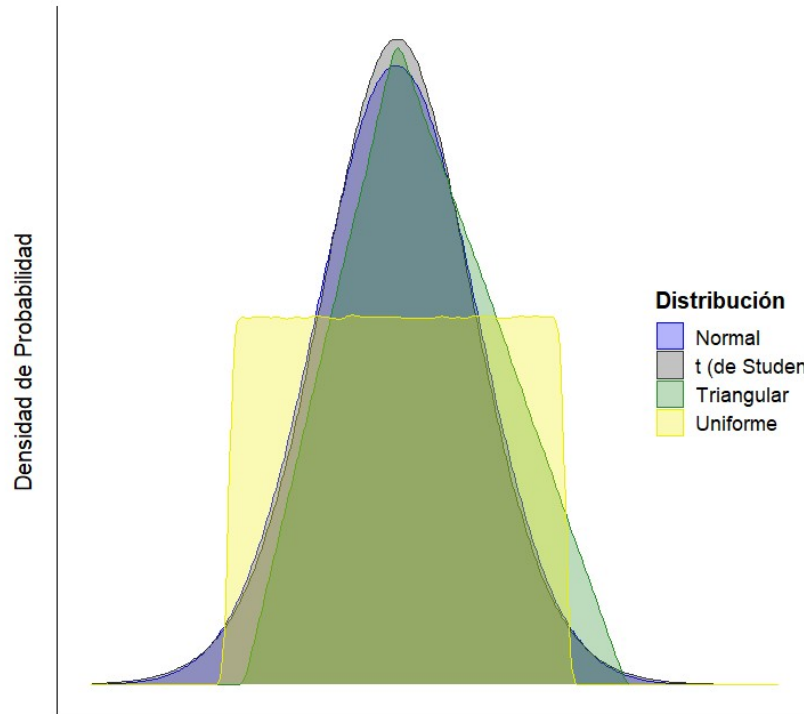
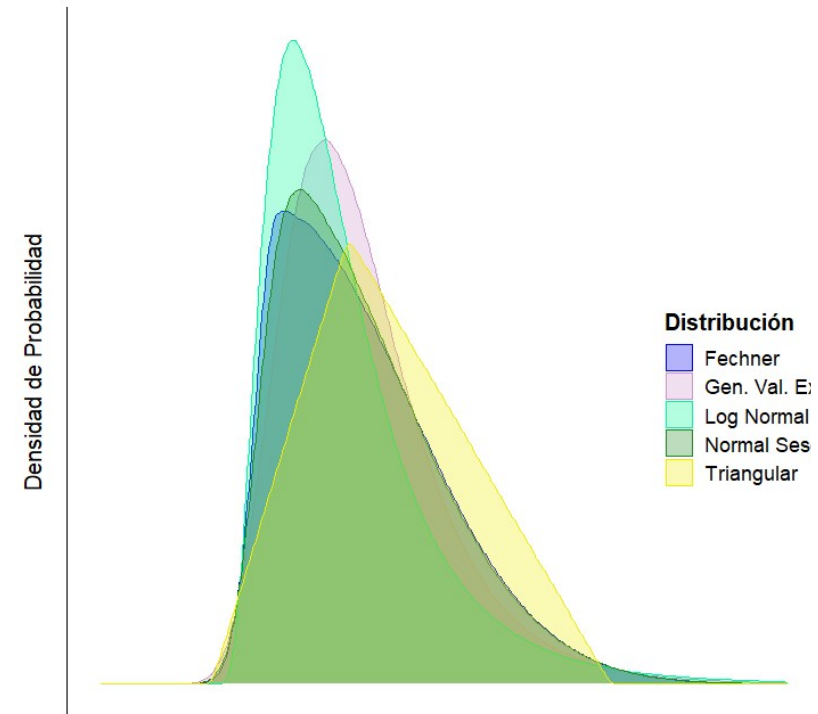
Distribuciones simétricasDistribuciones asimétricas

Figura 4.1. Comparación gráfica de las distribuciones simétricas y asimétricas utilizadas en el presente estudio, ajustadas a casos datos similares para mostrar sus diferencias y similitudes. Fuente: el autor.

Distribución t (de Student): Distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , cuya función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)\sqrt{\nu\pi}} \left(1 + \frac{\xi^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$$

El parámetro de la distribución corresponde a ν (grados de libertad, $\nu > 0$) y Γ corresponde a la función gamma. La distribución t fue considerada para casos similares a la distribución normal, pero con grados de libertad finitos, como puede ocurrir al evaluar una variable descrita por una serie de datos conocida (JCGM, 2008a; JCGM, 2008b).

Distribución rectangular o uniforme continua: Distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , cuya función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , \quad a \leq \xi \leq b \\ 0 & , \quad \xi < a \text{ o } b < \xi \end{cases}$$

Los parámetros de la distribución b y a corresponden a los límites superior e inferior del dominio de la variable ξ . La distribución rectangular se consideró, de forma generalizada, cuando la única información disponible sobre la magnitud X es un límite inferior y un límite superior, así como para evaluar magnitudes delimitadas físicamente entre dos valores, tolerancias de equipos de medición y criterios de expertos sólo enfocados en los valores máximos y mínimos (IPCC, 2006b; JCGM, 2008a; JCGM, 2008b, DCC y LCM, 2020).

Distribución triangular: Distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , cuya función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \begin{cases} \frac{2(\xi-a)}{(b-a)(c-a)} & , \quad a \leq \xi < c \\ \frac{2}{b-a} & , \quad \xi = c \\ \frac{2(b-\xi)}{(b-a)(b-c)} & , \quad c < \xi \leq b \\ 0 & , \quad \text{otro caso} \end{cases}$$

Los parámetros de la distribución b , a y c corresponden a los límites superior e inferior del dominio de la variable ξ y a su moda, respectivamente. La distribución triangular se

consideró, de forma generalizada, cuando la única información disponible sobre la magnitud X es un límite inferior, un límite superior y un valor preferido o más probable, pudiendo ser simétrica o asimétrica respecto a dicho valor modal (IPCC, 2006b; JCGM, 2008a; JCGM, 2008b, DCC y LCM, 2020). Estos escenarios incluyeron factores de emisión asimétricos, tolerancias de equipos o tablas de valores provenientes de literatura, entre otros.

Distribución log-normal: Como su nombre lo indica, esta corresponde a una distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , cuyo logaritmo natural resulta en una distribución normal. Su función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \frac{1}{\sigma \xi \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln \xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

Los parámetros de la distribución son μ y σ , correspondientes a la media y desviación estándar del logaritmo de la variable distribuida normalmente. La distribución log-normal fue considerada para variables con rangos de variación grandes y sesgadas positivamente, como el caso de los factores de emisión asimétricos (IPCC, 2006b; DCC y LCM, 2020).

Distribución de Fechner: También conocida como distribución normal dividida (Wallis, 2014); esta corresponde a una distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X , que consiste en dos medias distribuciones normales con la misma moda, una a la izquierda de la moda y la otra a la derecha de la moda, y con sus respectivas densidades adecuadamente escaladas para que la densidad de probabilidad resultante sea continua (Possolo, Merkatas y Bodnar, 2019). Su función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \begin{cases} \frac{2}{(\sigma_1 + \sigma_2)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma_1^2}\right]}, & \xi \leq \mu \\ \frac{2}{(\sigma_1 + \sigma_2)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma_2^2}\right]}, & \xi \geq \mu \end{cases}$$

Los parámetros de la distribución corresponden a μ (moda), σ_1 (desviación estándar de la primera mitad de la distribución) y σ_2 (desviación estándar de la segunda mitad de la distribución). La distribución de Fechner fue considerada para variables con comportamientos asimétricos, como el caso de algunos factores de emisión.

Distribución normal sesgada: Como su nombre lo indica, esta corresponde a una distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua X que amplía la distribución normal mediante un parámetro de forma adicional que regula su asimetría (Ashour y Abdel-hameed, 2010). Su función de densidad de probabilidad es:

$$g_X(\xi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{\xi^2}{2}\right]} \int_{-\infty}^{\alpha\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{t^2}{2}\right]} dt$$

El parámetro de la distribución es α , correspondiente al parámetro de sesgo que regula la asimetría. Este sesgo permite la presencia de asimetrías hacia la izquierda o hacia la derecha en la distribución normal, dependiendo del signo de α (para la distribución Laplace-Gauss estándar tradicional, $\alpha = 0$) (Ashour y Abdel-hameed, 2010; Azzalini y Capitanio, 2014). Cabe destacar que, para hacer esta distribución aplicable a muchos casos, se requiere ejecutar un cambio de variable con $Y = \mu + \omega\xi$, donde μ corresponde a un parámetro de localización y ω a un parámetro de escala ($\omega > 0$) (Azzalini y Capitanio, 2014). La distribución normal sesgada también fue considerada para factores de emisión con comportamientos asimétricos.

Distribución generalizada de valores extremos: En general, se considera que las distribuciones de valores extremos comprenden tres familias de distribuciones, incluidas las distribuciones Gumbel (tipo 1, $\gamma = 0$), Fréchet (tipo 2, $\gamma > 0$), Gompertz (caso específico de tipo 1) y Weibull inversa (tipo 3, $\gamma < 0$) (Johnson, Kotz y Balakrishnan, 1995). Todas estas distribuciones pueden representarse como miembros de una sola familia de distribuciones generalizadas, con una función de distribución acumulativa común, conocida como distribución generalizada de valores extremos (Possolo, Merktas y Bodnar, 2019). Sus funciones de densidad de probabilidad son:

$$g_X(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \cdot \left[1 + \gamma \left(\frac{\xi - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-(\gamma+1)/\gamma} \cdot e^{-\left[1 + \gamma \left(\frac{\xi - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\gamma}} & , \quad \gamma < 0 \text{ y } \xi \leq \mu - \frac{\sigma}{\gamma} \\ & , \quad \gamma > 0 \text{ y } \mu - \frac{\sigma}{\gamma} \leq \xi \\ \frac{1}{\sigma} \cdot e^{-(\xi - \mu)/\sigma} \cdot e^{-e^{-(\xi - \mu)/\sigma}} & , \quad \gamma = 0 \text{ y } \xi \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Los parámetros de la distribución corresponden a μ (parámetro de localización), σ (parámetro de escala, $\sigma > 0$) y γ (parámetro de forma) (Muraleedharan, Soares y Lucas, 2011). La familia

de distribuciones generalizadas de valores extremos también fue considerada para factores de emisión con comportamientos asimétricos.

4.2 Estimaciones de varianzas de distribuciones de probabilidad asimétricas

Para lograr la estimación de las incertidumbres estándar de los factores de emisión descritos por intervalos de variación asimétricos, se consideró el ajuste de las distribuciones asimétricas descritas en el apartado anterior. De esta forma, y a partir de las respectivas funciones de distribución de probabilidad, se estableció el estimador teórico de la varianza de una variable aleatoria X siguiendo dicha distribución (σ_X^2) y la estrategia para lograr su estimación a partir del conocimiento de tres valores: un valor central (promedio o mediana, denotado como f para facilitar su aplicación en etapas posteriores) y los dos límites de un intervalo de confianza al 95 % (denotados como U_L y U_R , igualmente para facilitar su aplicación posterior). Esta metodología es concordante con la propuesta por Possolo, Merktas y Bodnar (2019), que considera que la variable aleatoria X tiene una distribución de probabilidad asimétrica subyacente y que las probabilidades de ocurrencia de estos tres valores cumplen que $0 < p_L < p_f < p_R < 1$, de forma que $p_L = Prob \{X < f - U_L\}$, $p_f = Prob \{X < f\}$ y $p_R = Prob \{X < f + U_R\}$. De forma coherente con el porcentaje de confianza del intervalo dado, en todos los casos se considera $p_L = 2,5 \%$ y $p_R = 97,5 \%$. Los procesos seguidos en esta etapa se detallan a continuación:

Distribución triangular: De acuerdo con su función de distribución de probabilidad, la varianza asociada a una variable aleatoria X siguiendo esta distribución es:

$$\sigma_X^2 = \frac{a^2 + c^2 + b^2 - ac - cb - ba}{18}$$

De acuerdo con Petty y Dye (2013), es posible lograr la estimación σ_X^2 , es necesario inicialmente estimar los parámetros b y a a partir de $f = c$, U_L y U_R mediante la estimación geométrica del área de los dos triángulos más pequeños generados a ambos lados del punto $f = c$, de la forma:

$$\begin{cases} b - a - (U_L - a)^2 / 0,025(f - a) \\ b - a - (b - U_R)^2 / 0,025(b - f) \end{cases}$$

Para resolver dicho sistema de ecuaciones, se utilizó el método de Broyden y Netwon (Dennis y Schnabel, 1996), implementado a través del uso de las funciones de la librería *nleqslv* (Hasselman, 2018).

Distribución log-normal: De acuerdo con su función de distribución de probabilidad, la varianza asociada a una variable aleatoria X siguiendo esta distribución es:

$$\sigma_X^2 = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$$

Según IPCC (2006b), es posible lograr la estimación σ_X^2 a partir de f , U_L y U_R a través de la desviación estándar geométrica asociada a dicha distribución (σ_g), de la forma:

$$\sigma_X^2 = f^2 \left[e^{(\ln g)^2} - 1 \right]$$

$$\ln \sigma_g = \frac{(\ln U_R + \ln U_L)}{-1,96 \cdot 2}$$

Distribución de Fechner: De acuerdo con su función de distribución de probabilidad, la varianza asociada a una variable aleatoria X siguiendo esta distribución es:

$$\sigma_X^2 = \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) (\sigma_2 - \sigma_1) + \sigma_2 \sigma_1$$

En este caso, la estimación de σ_X^2 requiere la aproximación previa de los parámetros σ_2 y σ_1 a partir de f , U_L y U_R , considerando adicionalmente $p_f = 50\%$. Para ello, se utilizó el código libre facilitado por Possolo, Merktas y Bodnar (2019), que aprovecha las funciones de la librería *fanplot* (Abel, 2015). Según estos mismos autores, la distribución de Fechner puede considerarse adecuada únicamente si se cumple que $0,410 < U_R/U_L < 2,44$.

Distribución normal sesgada: De acuerdo con su función de distribución de probabilidad, la varianza asociada a una variable aleatoria X siguiendo esta distribución es:

$$\sigma_X^2 = \omega^2 \left[1 - \frac{2\alpha^2}{\pi(1 + \alpha^2)} \right]$$

En este caso nuevamente, la estimación de σ_X^2 requiere la estimación previa de los parámetros α y ω a partir de f , U_L y U_R , considerando $p_f = 50\%$. Para ello, se volvió a utilizar el código libre facilitado por Possolo, Merktas y Bodnar (2019), que aprovecha las funciones

de la librería *sn* (Azzalini, 2020). Según estos mismos autores, la distribución normal sesgada puede considerarse adecuada únicamente si se cumple que $0,410 < U_R/U_L < 2,44$.

Distribución generalizada de valores extremos: De acuerdo con su función de distribución de probabilidad, la varianza asociada a la variable aleatoria X siguiendo esta distribución es:

$$\sigma_X^2 = (g_2 - g_1^2) \frac{\sigma^2}{\gamma^2}$$

Donde $g_k = \Gamma(1 - k\gamma)$ y Γ es la función Gamma. En este caso nuevamente, la estimación de σ_X^2 requiere la estimación previa de los parámetros σ y γ a partir de f , U_L y U_R , considerando $p_f = 50\%$. Para ello, se volvió a utilizar el código libre facilitado por Possolo, Merktas y Bodnar (2019), que aprovecha las funciones de la librería *evd* (Stephenson, 2022).

Las varianzas estimadas para las distintas distribuciones de probabilidad resultan de suma importancia para los intereses del proyecto, ya que permite la estimación directa de la incertidumbre estándar (u_X) asociada a la variable de interés X , de la forma $u_X = \sqrt{\sigma_X^2}$. Finalmente, para definir la incertidumbre estándar más adecuada para representar al factor de emisión, el ajuste de cada distribución fue evaluado en función de su capacidad para reproducir el límite superior (U_R) e inferior (U_L) originalmente reportados en la base de datos. Para ello, se recurrió a la simulación de poblaciones con tamaños iguales a 10^6 , usando las varianzas estimadas o los parámetros que les dieron origen, según fuese requerido. Los cuantiles 2,5 % ($q_{2,5\%}$) y 97,5 % ($q_{97,5\%}$) fueron extraídos de cada población y contrastados con U_L y U_R , respectivamente, utilizando un error relativo máximo RE definido como:

$$RE = \max\left(\left|\frac{q_{2,5\%} - U_L}{U_L}\right|, \left|\frac{q_{97,5\%} - U_R}{U_R}\right|\right)$$

4.3 Modelos estadísticos

La correcta aplicación del MMC para la estimación de incertidumbre requiere la definición de un modelo estadístico o función que relacione las magnitudes o variables de entrada con la magnitud de salida o variable de interés. En el presente proyecto, varios modelos estadísticos fueron utilizados para dicho fin. Inicialmente, se consideraron los modelos de estimación de algunos factores de emisión. Estos modelos, mostrados a continuación, fueron

extraídos y derivados de los lineamientos emitidos por IPCC (IPCC, 2006a; IPCC, 2019), permitiendo la estimación de su incertidumbre por medio de la aplicación del MMC como un paso intermedio para completar la información requerida para la herramienta pretendida.

Para los factores de emisión correspondientes a tratamientos y descarga de aguas residuales industriales (F_{ind}), el modelo utilizado fue:

$$F_{ind} = B_o \cdot MCF$$

Las magnitudes de entrada B_o y MCF corresponden a la capacidad máxima y un factor de corrección para la generación de CH_4 en este tipo de agua residual, respectivamente.

Para los factores de emisión correspondientes a tratamientos y descarga de aguas residuales domésticas (F_{dom}), el modelo utilizado fue:

$$F_{dom} = \frac{B_o \cdot MCF \cdot BOD \cdot I \cdot 365}{1000}$$

Las magnitudes de entrada B_o y MCF mantienen su definición con respecto al modelo de agua residual industrial. Se adicionan las magnitudes de entrada BOD y I , correspondientes a la demanda bioquímica de oxígeno per cápita estimada para la región geográfica bajo consideración (América Latina) y a un factor de corrección por la incorporación de demanda bioquímica de oxígeno adicional al agua residual doméstica por su mezcla con agua residual industrial en el proceso de tratamiento, respectivamente.

Para el factor de emisión correspondiente al uso no energético de lubricantes (oxidación) (F_{lub}), el modelo utilizado fue:

$$F_{lub} = \frac{(AW_C + 2AW_O)}{AW_C} \cdot ODU \cdot CC \cdot NCV \cdot \frac{\rho_{r\ lub} \cdot \rho_{H2O}}{1000}$$

Las magnitudes de entrada AW_C y AW_O corresponden a los pesos atómicos del carbono y el oxígeno, respectivamente. Las variables ODU , CC y NCV corresponden a un factor por defecto de la proporción de lubricante que se oxida durante su uso, el contenido de carbono y el valor calorífico neto del lubricante, respectivamente. Por su parte, $\rho_{r\ lub}$ y ρ_{H2O} son la densidad relativa promedio de los lubricantes utilizados en el país y la densidad promedio del agua a 15 °C (punto de referencia para la medición de densidad en lubricantes).

Para el factor de emisión correspondiente al tratamiento de desechos sólidos con relleno sanitario (F_{san}), el modelo utilizado fue:

$$F_{san} = \frac{(AW_C + 4AW_H)}{AW_C} \cdot MCF \cdot \left(\sum_{i=1}^n DOC_i \cdot W_i \right) \cdot DOC_f \cdot FC$$

Las magnitudes de entrada AW_C y AW_H corresponden a los pesos atómicos del carbono y el hidrógeno, respectivamente. Al igual que en los modelos anteriores, MCF mantiene su definición como un factor de corrección para la emisión de CH_4 . La suma dentro del paréntesis representa el carbono orgánico degradable (DOC) total de los desechos en función de su composición, y se estima a partir de cada fracción de DOC en los diferentes tipos de residuos (DOC_i) ponderada por su fracción másica (W_i). Finalmente, las variables DOC_f y FC corresponden a las fracciones por defecto del DOC que se descompone en el relleno sanitario y del CH_4 que compone el gas generado en el relleno sanitario.

Posteriormente, para la estimación de las emisiones E para cada una de las i fuentes a considerar dentro de un inventario de GEI, se definieron dos posibles modelos estadísticos. El primero de ellos, correspondiente a una cuantificación de emisiones de GEI por el método indirecto, fue:

$$E_i = D_i \cdot F_i$$

En este modelo, D_i corresponde al dato cuantificado para la fuente i que genera las emisiones de GEI y F_i corresponde al factor de emisión pertinente a utilizar para dicha fuente. Por su parte, el segundo modelo estadístico considerado corresponde a una cuantificación de emisiones de GEI por el método directo, de la forma:

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{ij}}{n} \cdot \tau + \sum_{z=1}^p \delta_z \quad \text{o} \quad E_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} + \sum_{z=1}^p \delta_z$$

En este modelo, E_{ij} corresponden a emisiones de GEI individuales que serán promediadas o sumadas entre sí, τ corresponde a una variable que permite la estimación de una emisión total a partir de una emisión promedio y δ_z corresponde a variables adicionales que representan fuentes de variaciones que pueden generar incertidumbre en la cuantificación de las E_{ij} (por ejemplo, errores de calibración o tolerancias de equipos).

Finalmente, para lograr la cuantificación total de emisiones (E_{tot}), en un inventario elaborado en el marco de una declaración de carbono neutralidad, el modelo estadístico utilizado como base para los procesos de estimación de incertidumbre respectivos fue:

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot PCG_i$$

En este modelo, E_i corresponde a la emisión de GEI cuantificada para la fuente i y PCG_i corresponde al potencial de calentamiento global para el GEI respectivo.

4.4 Bases de datos

Debido a la complejidad del presente proyecto, fue necesario el uso de distintas bases de datos, según la etapa de desarrollo, como se detalla a continuación. Todas las bases de datos compiladas y utilizadas para el proyecto se presentan en el anexo 1 del presente documento.

Para la etapa inicial de estimación de las incertidumbres estándar para los factores de emisión, se utilizó principalmente la base de datos de factores de emisión nacionales publicada periódicamente por el IMN (IMN, 2021). Esta base contiene los valores centrales (mejores estimados) de los factores de emisión para sectores como combustibles, energía eléctrica, aguas residuales, cultivo, ganadería, entre otros. Adicionalmente, en muchos casos también se incluyen los intervalos de variación esperados para dichos factores, lo que permitió la selección y ajuste de distintas distribuciones de probabilidad para escoger aquellas que se consideren más adecuadas y estimar así sus respectivas incertidumbres estándar. En aquellos casos en los que los intervalos de variación de los factores de emisión no se encontraban disponible dentro de la base de datos del IMN, se recurrió al uso de bases de datos adicionales extraídas de las publicaciones de ASTM (2019), CIAAW (2020), FEDEMUR (2002), IPCC (2006a; 2019), Morales (2016). Estas bases de datos adicionales incluyeron información sobre los intervalos de variación esperada para dichos factores de emisión o sobre las variables de entrada de los modelos utilizados para estimarlos.

Para la validación de la herramienta generada con el presente proyecto, se utilizó como fuente de datos y referencia la guía de estimación de incertidumbre publicada por el PPCN (DCC y LCM, 2020), la cual contiene una serie de ejemplos con sus respectivos datos de partida y

resultados que permiten corroborar la validez de los resultados reportados por la herramienta. Cabe señalar que algunos ejemplos incluidos en esta referencia presentan desactualizaciones con respecto al uso de incertidumbres asociadas con factores de emisión, debido a que dichos ejemplos fueron publicados previo a la última versión de la lista oficial mantenida por el IMN. Sin embargo, se cuenta con la resolución actualizada incluida como parte del material del curso de capacitación titulado “Incertidumbre para inventarios de gases de efecto invernadero” (INTECO, 2023). Adicionalmente, y aunque en principio se pretendía complementar esta validación con el uso una base de datos de un inventario real de alguna organización participante del PPCN, no fue posible acceder a esta base de datos debido a una postergación temporal de la entrada en vigencia del requisito de su estimación por el PPCN. Por esta razón, ninguna organización participante del PPCN contaba con una estimación de incertidumbre de un inventario real al momento de validar la herramienta elaborada.

En su lugar, y ante la limitación de ejemplos aplicables útiles para los propósitos de validación, se utilizaron dos bases de datos correspondientes a ejercicios de resolución del mismo curso de capacitación, que presentan escenarios simulando inventarios reales de organizaciones, los cuales han sido resueltos y confirmados por diferentes profesionales participantes de dicho curso de capacitación. Para efectos de asegurar la exactitud de los resultados generados, se estableció una diferencia máxima de 5 % entre los resultados generados por la herramienta y los valores reportados en las bases de datos de referencia como parámetro de validación. Dicho valor corresponde a la diferencia máxima aceptable por el PPCN entre la información declarada en un inventario organizacional y el resultado de una verificación realizada por una parte independiente (discrepancia material) (DCC, 2021).

Finalmente, para la validación de la robustez de la herramienta, se generaron bases de datos propias, incluyendo hasta un 10 % de valores extremos superiores e inferiores, generados de forma pseudoaleatoria, en una base de datos previamente obtenida de un ejemplo de referencia. La escogencia de este proceso se justifica en el supuesto de que, por la naturaleza del campo de aplicación, las principales causas asociadas a la presencia de valores extremos en los datos son errores en transcripción, cálculo u otro tipo de errores que generen proporciones reducidas de estos valores. Además, se escogió evaluar la robustez únicamente

en las emisiones cuantificadas directamente y no en el dato de actividad de las emisiones cuantificadas indirectamente ya que, en la emisión final de las fuentes indirectas, el efecto de los valores extremos se ve minimizado por las incertidumbres de los factores de emisión.

4.5 Programación y software

Para la ejecución de la totalidad del proyecto, incluyendo los cálculos, simulaciones, manipulación y procesamiento de datos, se utilizó lenguaje de programación R (R Core Team, 2023) a través del uso del *software* RStudio (Posit Team, 2023), adaptando funciones y parámetros auxiliares de otros lenguajes de programación web como html, JavaScript y CSS y recurriendo al uso de múltiples librerías de funciones desarrolladas propiamente en R. En el Cuadro 4.1, se incluyen todas las librerías de funciones en R adicionales utilizadas en el presente proyecto, sus versiones y respectivas referencias bibliográficas, además de las librerías por defecto incluidas en el paquete estándar de R.

Cuadro 4.1. Librerías de funciones de R utilizadas en el presente proyecto

Nombre de librería	Versión	Referencia
boot	1.3-28.1	Canty y Ripley (2022)
dplyr	1.1.3	Wickham <i>et al.</i> (2023a)
evd	2.3-6.1	Stephenson (2022)
formattable	0.2.1	Ren y Russell (2021)
ggplot2	3.4.3	Wickham <i>et al.</i> (2023b)
ggthemes	4.2.4	Arnold <i>et al.</i> (2021)
LaplacesDemon	16.1.6	Hall <i>et al.</i> (2021)
magrittr	2.0.3	Bache, Wickham y Henry (2022)
nleqslv	3.3.4	Hasselman (2018)
readr	2.1.4	Wickham <i>et al.</i> (2023c)
readxl	1.4.3	Wickham <i>et al.</i> (2023d)
reporter	1.4.1	Bosak <i>et al.</i> (2023)
shiny	1.7.5	Chang <i>et al.</i> (2023)
shinycssloaders	1.0.0	Sali, Hass y Attali (2020)
shinydashboard	0.7.2	Chang y Borges (2021)
shinyjs	2.1.0	Attali (2021)
shinyvalidate	0.1.2	Iannone y Cheng (2022)
tidyr	1.3.0	Wickham <i>et al.</i> (2023e)
triangle	1.0.0	Carnell (2022)

Para lograr la adecuada programación de la herramienta pretendida, se consideraron las siguientes características básicas para la definición del concepto del programa y confección de su interfaz del usuario:

- a. Debe existir una diferenciación clara para el usuario entre emisiones cuantificadas de forma directa e indirecta.
- b. Los resultados generados deben ser acordes con los requerimientos incluidos en la guía y directrices del PPCN y presentados en forma gráfica o tabulada.
- c. Los resultados generados deben permitir la identificación de oportunidades de mejora.
- d. Se debe minimizar la información ingresada por el usuario, priorizando selecciones predefinidas o menús desplegados.
- e. El usuario no debe requerir un conocimiento estadístico o técnico profundo para operar la herramienta.
- f. Al pretender ser una herramienta web, la interfaz debe ajustarse automáticamente a la pantalla y ser visualmente atractiva para el usuario.
- g. Se debe incluir un manual de usuario, supuestos utilizados en la estimación y referencias bibliográficas relevantes en el campo.
- h. Siempre que requiera la simulación de una población, se utilizará un tamaño de población por defecto igual a 10^6 . Este tamaño podrá ser definido por el usuario para mejorar la resolución de los resultados o reducir el tiempo de ejecución del programa.

CAPÍTULO V. SOBRE LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN

5.1 Factores de emisión descritos por distribuciones de probabilidad asimétricas

En concordancia con el primer objetivo específico del proyecto, se abordó la estimación de incertidumbre para aquellos factores de emisión, cuya dispersión está caracterizada por un intervalo de variación asimétrico con respecto a su mejor estimado o valor más probable.

Según la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021), este comportamiento es presentado principalmente en factores de emisión por uso y quema de combustibles fósiles, incluidos en el sector energía (Cuadros A1, A3 y A4). La información disponible sobre estos factores de emisión incluía el valor central o más probable (f), así como sus dos límites del intervalo de variación esperable (U_R : límite superior y U_L : límite inferior) (ver Anexo 1). De acuerdo con IPCC (2006a), el intervalo de cobertura delimitado por $f - U_L$ y $f + U_R$ debería incluir, con una confianza del 95 %, al verdadero valor de f . A partir de esta información, y según lo expuesto en el Capítulo 4 del presente documento, fue posible estimar los parámetros asociados a las distribuciones de probabilidad asimétricas elegidas para el presente estudio, permitiendo, a su vez, estimar sus varianzas y desviaciones estándar respectivas, donde estas últimas son las incertidumbres estándar de interés.

Los resultados obtenidos para los factores de emisión por uso y quema de combustibles fósiles se presentan en los Cuadros 5.1 (CO₂), 5.2 (CH₄) y 5.3 (N₂O), junto con sus respectivos estadísticos RE para evaluar su adecuación de uso. Adicionalmente, y para ejemplificar los resultados obtenidos, la Figura 5.1 presenta el comportamiento observado del ajuste de las distribuciones asimétricas para un conjunto común de factores de emisión. Este caso corresponde a los factores por quema de lubricantes en usos comerciales, institucionales, residenciales, agricultura y transporte, los cuales fueron seleccionados debido a su alta representatividad del comportamiento general evidenciado en otros factores.

Cuadro 5.1. Incertidumbres estándar u y errores relativos máximos RE estimados para los factores de emisión de CO₂ por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas. Los valores de u se reportan en kg/L. Los valores de RE se muestran entre paréntesis cuadrados [] y se reportan en porcentaje

Combustible	u (kg/L) [RE (%)]				
	Triangular	Log-Normal	Fechner	Normal Sesg.	Gen. Val. Extr.
Gasolina	0,062 [0,00]	0,059 [0,55]	0,060 [0,01]	0,060 [0,01]	0,060 [0,01]
Diesel	0,043 [0,00]	0,042 [0,01]	0,042 [0,00]	0,042 [0,01]	0,043 [0,01]
Búnker	0,059 [0,00]	0,057 [0,01]	0,057 [0,00]	0,057 [0,01]	0,058 [0,01]
Queroseno	0,053 [0,00]	0,051 [0,08]	0,051 [0,01]	0,051 [0,01]	0,052 [0,01]
LPG	0,074 [0,01]	0,072 [0,09]	0,072 [0,01]	0,072 [0,03]	0,073 [0,02]
Gasolina de avión	0,188 [0,01]	0,167 [6,48]	0,193* [0,58]	0,193* [0,59]	0,189 [0,01]
<i>Jet fuel</i>	0,066 [0,00]	0,064 [0,23]	0,064 [0,01]	0,064 [0,01]	0,064 [0,01]
Lubricante	0,164 [0,01]	0,159 [0,06]	0,159 [0,01]	0,159 [0,04]	0,161 [0,02]

*La distribución podría no ser adecuada según Possolo, Merkatas y Bodnar (2019).

Cuadro 5.2. Incertidumbres estándar u y errores relativos máximos RE estimados para los factores de emisión de CH_4 por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas. Los valores de u se reportan en g/L. Los valores de RE se muestran entre paréntesis cuadrados [] y se reportan en porcentaje

Fuente / Combustible	u (g/L) [RE (%)]				
	Triangular	Log-Normal [§]	Fechner*	Normal Sesg.*	Gen. Val. Extr.
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Diesel	0,0858 [0,10]	0,0785 [8,50]	0,0876 [8,09]	0,0876 [8,09]	0,0848 [0,33]
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Búnker	0,0993 [0,14]	0,1017 [0,65]	0,1013 [0,60]	0,1013 [0,61]	0,0972 [0,50]
Manufactura y construcción/Gasolina	0,0777 [0,10]	0,0713 [8,30]	0,0794 [7,56]	0,0794 [7,66]	0,0768 [0,32]
Manufactura y construcción/LPG	0,0181 [0,10]	0,0173 [4,73]	0,0185 [1,66]	0,0185 [1,70]	0,0178 [0,35]
Manufactura y construcción/Lubricante	0,0695 [0,11]	0,0676 [3,07]	0,0709 [0,08]	0,0709 [0,08]	0,0680 [0,39]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Gasolina	0,2324 [0,10]	0,2217 [4,73]	0,2371 [1,66]	0,2371 [1,68]	0,2279 [0,34]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Diesel	0,2535 [0,10]	0,2395 [5,47]	0,2587 [1,72]	0,2587 [1,82]	0,2487 [0,34]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Búnker	0,2884 [0,10]	0,2764 [4,28]	0,2944 [0,81]	0,2943 [0,78]	0,2826 [0,34]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/LPG	0,0934 [0,10]	0,0891 [4,78]	0,0953 [1,66]	0,0953 [1,70]	0,0916 [0,34]
Comercial, institucional, residencial, agricultura y transporte/Lubricante	0,2168 [0,11]	0,2275 [4,07]	0,2192 [0,08]	0,2168 [0,50]	0,2105 [0,42]
Transporte terrestre/Gasolina sin catalizador	0,8680 [0,12]	0,8126 [6,99]	0,8872 [10,34]	0,8872 [10,37]	0,8598 [0,36]
Transporte terrestre/Gasolina con catalizador	0,6771 [0,12]	0,6298 [7,60]	0,6923 [11,89]	0,6923 [11,90]	0,6721 [0,36]
Transporte terrestre/Diesel sin catalizador	0,0745 [0,06]	0,0714 [2,70]	0,0750 [0,08]	0,0741 [0,36]	0,0722 [0,24]

*La distribución podría no ser adecuada según Possolo, Merkatas y Bodnar (2019). §La distribución podría no ser adecuada por la alta asimetría.

Cuadro 5.3. Incertidumbres estándar u y errores relativos máximos RE estimados para los factores de emisión de N_2O por uso y quema de combustibles fósiles, considerando el ajuste de varias distribuciones asimétricas. Los valores de u se reportan en g/L. Los valores de RE se muestran entre paréntesis cuadrados [] y se reportan en porcentaje

Fuente / Combustible	u (g/L) [RE (%)]				
	Triangular	Log-Normal [§]	Fechner*	Normal Sesg.*	Gen. Val. Extr.
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Diesel	0,0171 [0,10]	0,0157 [8,41]	0,0175 [7,56]	0,0175 [7,63]	0,0169 [0,32]
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Búnker	0,0194 [0,10]	0,0178 [8,39]	0,0198 [7,56]	0,0198 [7,65]	0,0192 [0,34]
Manufactura y construcción/Gasolina	0,0155 [0,10]	0,0142 [8,29]	0,0158 [7,56]	0,0158 [7,66]	0,0153 [0,32]
Manufactura y construcción/LPG	0,0018 [0,10]	0,0018 [7,50]	0,0019 [1,66]	0,0019 [1,70]	0,0018 [0,33]
Manufactura y construcción/Lubricante	0,0140 [0,11]	0,0137 [3,44]	0,0143 [0,08]	0,0143 [0,09]	0,0137 [0,37]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Gasolina	0,0155 [0,10]	0,0142 [8,29]	0,0158 [7,56]	0,0158 [7,66]	0,0153 [0,32]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Diesel	0,0171 [0,10]	0,0157 [8,41]	0,0175 [7,56]	0,0175 [7,63]	0,0169 [0,32]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Búnker	0,0194 [0,10]	0,0178 [8,39]	0,0198 [7,56]	0,0198 [7,65]	0,0192 [0,34]
Comercial, institucional, residencial y agricultura/LPG	0,0018 [0,10]	0,0018 [7,50]	0,0019 [1,66]	0,0019 [1,70]	0,0018 [0,33]
Comercial, institucional, residencial, agricultura y transporte/Lubricante	0,0140 [0,11]	0,0137 [3,44]	0,0143 [0,08]	0,0143 [0,09]	0,0137 [0,37]
Transporte terrestre/Gasolina sin catalizador	0,0797 [0,05]	0,0550 [28,14]	0,0819 [21,81]	0,0818 [21,76]	0,0906 [0,11]
Transporte terrestre/Gasolina con catalizador	0,1847 [0,10]	0,1761 [4,59]	0,1883 [0,09]	0,1884 [0,09]	0,1808 [0,34]
Transporte terrestre/Diesel sin catalizador	0,1010 [0,09]	0,0945 [6,17]	0,1031 [1,91]	0,1031 [1,95]	0,0991 [0,32]

*La distribución podría no ser adecuada según Possolo, Merkatas y Bodnar (2019). §La distribución podría no ser adecuada por la alta asimetría.

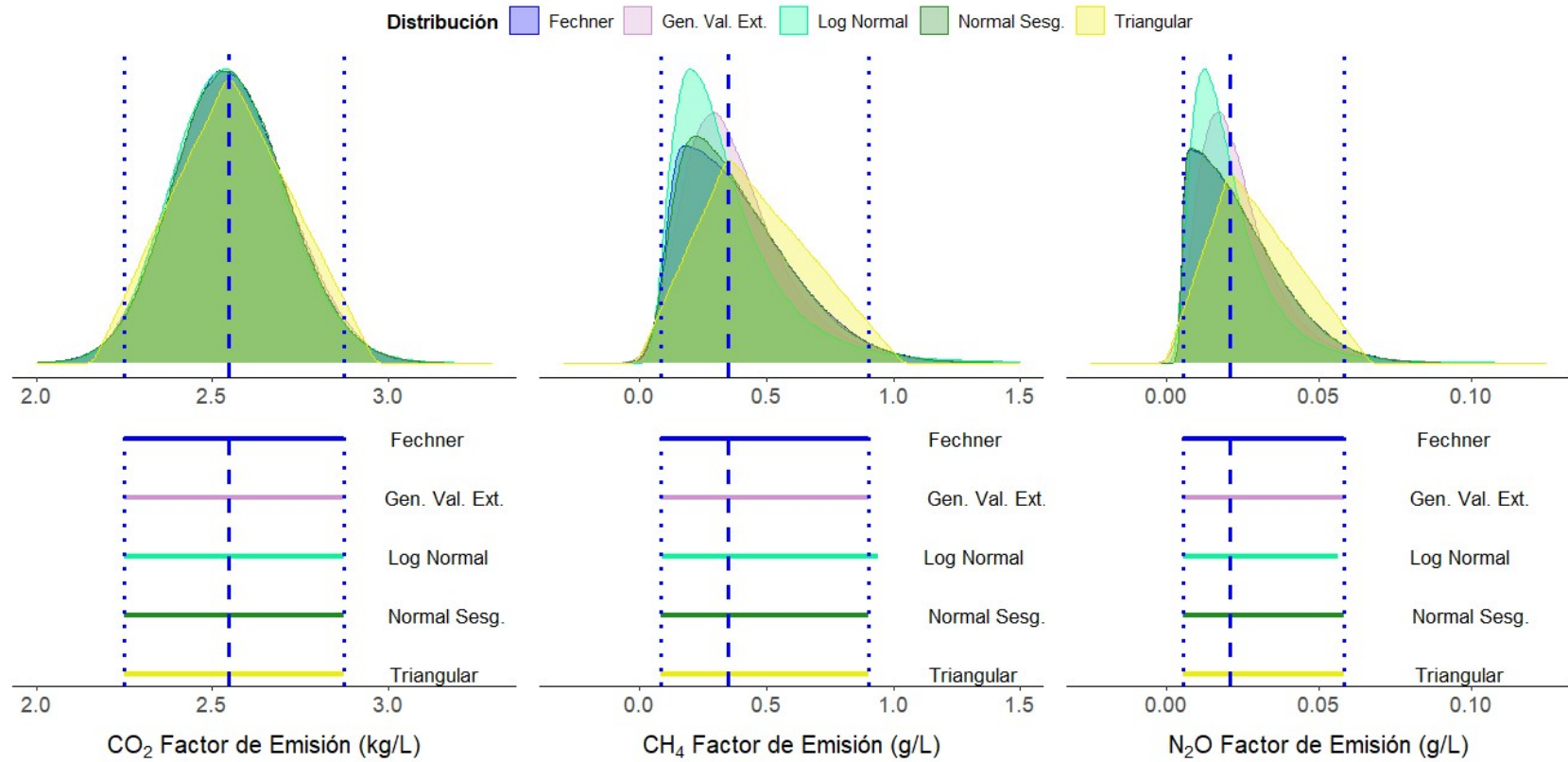


Figura 5.1. Comparación gráfica del ajuste de las distribuciones de probabilidad asimétricas consideradas en el presente estudio para los factores de emisión de CO₂, CH₄ y N₂O por quema de lubricante en usos comerciales, institucionales, residenciales, agricultura y transporte. La columna izquierda corresponde a los resultados para el factor de emisión de CO₂, la columna central a CH₄ y la columna derecha a N₂O. La sección superior contiene las distribuciones ajustadas y la sección inferior contiene los intervalos estimados con un 95 % de cobertura. Las líneas discontinuas representan los valores de f y las líneas punteadas los valores de $f - U_L$ y $f + U_R$, todos provenientes de la base de datos del IMN (IMN, 2021). Fuente: el autor.

Los resultados correspondientes a los factores de emisión de CO₂ (Cuadro 5.1) cuentan con la particularidad de presentar los intervalos menos asimétricos de toda la base de datos analizada. Por esta razón, todas las distribuciones presentan valores de incertidumbre estándar similares entre sí. La distribución triangular asimétrica mostró sistemáticamente las mayores incertidumbres estándar, mientras que las demás distribuciones presentaron resultados similares. Las mayores diferencias entre las incertidumbres estándar se evidenciaron en el factor de emisión de la gasolina de aviación, correspondiente al intervalo más asimétrico de dicho cuadro. Debe tenerse en cuenta que las incertidumbres estimadas para este factor con las distribuciones de Fechner y normal sesgada pueden no ser adecuadas para la asimetría del intervalo, debido al incumplimiento del criterio $0,410 < U_R/U_L < 2,44$ en ambos casos, según Possolo, Merkatas y Bodnar (2019). Al evaluar el ajuste de las distribuciones a través de los valores de *RE* para las poblaciones simuladas, se observa que el mejor ajuste se obtiene para las distribuciones triangular asimétrica y generalizada de valores extremos con $RE < 0,03$ % en todos los casos. Posteriormente, las distribuciones de Fechner y normal sesgada mostraron un $RE < 0,05$ % en todos los casos, excepto para el factor de gasolina de avión mencionado anteriormente ($RE = 0,58$ % y $RE = 0,59$ %, respectivamente). Por último, la distribución log-normal presentó los *RE* mayores en todos los casos ($RE \leq 6,48$ %).

Los resultados correspondientes a los factores de emisión de CH₄ (Cuadro 5.2) y N₂O (Cuadro 5.3) mostraron intervalos de variación porcentual similares entre sí, con asimetrías mayores que los factores de CO₂. Las menores incertidumbres estándar se evidenciaron para la distribución log-normal. Esta distribución corresponde a una de las principales utilizadas en el campo, ya que su imposibilidad de contar con valores negativos es consecuente con la naturaleza de los factores de emisión, los cuales deben ser estrictamente mayores a 0 (IPCC, 2006a). Sin embargo, de acuerdo con IPCC (2006b), esta distribución puede resultar en subestimaciones de incertidumbres cuando se presenta una asimetría importante en el intervalo de variación, por lo que sus resultados deben ser tomados con cautela. Por otro lado, las demás distribuciones consideradas (asimétrica triangular, de Fechner, normal sesgada y generalizada de valores extremos) presentan resultados similares entre sí, siendo la distribución generalizada de valores extremos la que obtuvo los valores de incertidumbre

estándar más pequeños. Este grupo de distribuciones poseen una característica común, ya que comparten la posibilidad de presentar teóricamente resultados negativos, lo que, en principio, podría contradecir la naturaleza física de un factor de emisión. Sin embargo, las proporciones de valores negativos o iguales a 0, obtenidas en las poblaciones simuladas, se consideraron insignificantes ($< 0,2 \%$). Por lo tanto, no se descarta su adecuación para describir el comportamiento de los factores de emisión en cuestión.

Las mayores diferencias entre las incertidumbres estándar para los factores de emisión de CH_4 (Cuadro 5.2) y N_2O (Cuadro 5.3) se evidenciaron para el consumo de gasolina en transporte terrestre, debido a la poca similitud entre los resultados obtenidos con la distribución log-normal y las distribuciones de Fechner y normal sesgada. Cabe señalar que estos casos corresponden a los factores con mayor asimetría, como ocurrió con los factores de emisión de CO_2 . Se resalta que la mayoría de las incertidumbres estimadas a partir de las distribuciones de Fechner y normal sesgada pueden no ser adecuados, debido al incumplimiento del criterio $0,410 < U_R/U_L < 2,44$ recomendado por Possolo, Merkatas y Bodnar (2019). También cabe destacar las incertidumbres estimadas con la distribución log-normal podrían subestimarse debido a sus elevados niveles de asimetría, por lo que estos valores deben ser tomados con cautela, como se menciona en IPCC (2006b).

Al evaluar el ajuste de las distribuciones en los factores de emisión de CH_4 y N_2O a través de los valores RE para las poblaciones simuladas, se observa de nuevo que el mejor ajuste se obtuvo para la distribución triangular asimétrica ($RE < 0,2 \%$) y la distribución generalizada de valores extremos ($RE \leq 0,5 \%$), respectivamente. Es preciso señalar el caso del factor de emisión de N_2O para gasolina sin catalizador en el transporte terrestre en el que estas distribuciones parecen ajustarse adecuadamente ($RE = 0,05 \%$ y $RE = 0,11 \%$, respectivamente), pero sus incertidumbres estándar difieren en más de un 9 %. Esta situación no se da en ningún otro factor de emisión para CO_2 , CH_4 o N_2O , donde los valores RE y las incertidumbres estándar entre ambas distribuciones parecen ser coherentes entre sí de forma consistente. En el caso de las distribuciones Fechner y normal sesgada, se evidenciaron ajustes aceptables en algunos casos y no tan adecuados en otros ($0,08 \% \leq RE \leq 21,81 \%$ y

0,08 % $\leq RE \leq 21,76$ %, respectivamente). Por último, y de forma general, la distribución log-normal presentó los peores niveles de ajuste (0,65 % $\leq RE \leq 28,14$ %).

Así, aunque la mayoría de las distribuciones asimétricas propuestas pueden utilizarse para estimar las incertidumbres estándar de los factores de emisión incluidos en la base de datos utilizada, se considera que las distribuciones triangular asimétrica y generalizada de valores extremos obtuvieron los mejores ajustes en el presente estudio. Para efectos prácticos, cualquiera de estas dos distribuciones de probabilidad podría ser escogida para estimar la incertidumbre estándar de los factores de emisión asociados con el uso y quema de los combustibles en Costa Rica, con poca diferencia en los resultados en la mayoría de los casos. Su uso también puede recomendarse para abordar la estimación de incertidumbres estándar para otros factores de emisión, siempre que la probabilidad de obtener valores negativos no sea alta (por ejemplo, factores de emisión con valores U_L cercanos a 0). En estos últimos casos, se recomienda el uso de una distribución log-normal o explorar el uso de variantes truncadas o ajustadas de las distribuciones evaluadas en el presente estudio que eviten la ocurrencia de valores negativos.

Una ampliación sobre los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto se presenta en Molina-Castro y Calderón-Jiménez (2021). Adicionalmente, los mismos fueron incorporados por el IMN para actualizar la base de datos oficial de factores de emisión utilizada en Costa Rica (IMN, 2023).

5.2 Otros factores de emisión con información faltante

Para complementar el primer objetivo específico del proyecto, se finalizó con el abordaje de la estimación de incertidumbre para los factores de emisión más utilizados, e incluidos en la base de datos oficial del IMN (2021), pero no abordados en la primera etapa. Esta segunda lista de factores de emisión incluyó aquellos relacionados con aguas residuales, desechos sólidos, oxidación de lubricantes y fermentación entérica y manejo de excretas de ganado (Cuadros A5, A6 y A7).

La mayor limitación para esta segunda lista de factores, a diferencia de los factores anteriores, fue la falta de información relacionada con sus intervalos de variación en la base de datos. Esta limitante hizo necesario un cambio en el enfoque inicialmente aplicado de ajuste de las distribuciones de probabilidad. Para completar dicho vacío, fue requerido llevar a cabo un proceso previo de recopilación de información literaria y aplicación del MMC en algunos casos. Con el fin de optimizar la ejecución de este paso previo, los factores de emisión de esta segunda lista fueron clasificados en tres grupos, como se detalla a continuación.

Grupo 1: En este grupo, se incluyeron factores de emisión cuyos valores e intervalos de variación fueron encontrados directamente de la literatura, concretamente de IPCC (2006a; 2006b; 2019). Los factores de emisión asociados a la fermentación entérica del ganado (distinto del vacuno), al manejo de excretas del ganado y al tratamiento biológico de residuos sólidos (compostaje y digestión anaeróbica) figuran dentro de este primer grupo (Cuadro A5). Estos factores fueron ubicados en el nivel más básico de estimación de emisiones propuesto por el IPCC (*Tier 1*), recomendándose su uso cuando no se dispone de estudios nacionales relacionados. Según dichas referencias, los intervalos de variación reportados corresponden a un 95 % de confianza, aproximadamente, por lo cual se utilizó la misma interpretación y aplicación de esta información para definir los valores de f , U_L y U_R y lograr el ajuste de distribuciones de probabilidad para estimar sus incertidumbres estándar.

Al considerar las aplicaciones de las distribuciones de probabilidad expuestas en el Capítulo 4 del presente documento, así como los resultados discutidos anteriormente para los factores de emisión asociados con combustibles fósiles y las recomendaciones de las mismas referencias de IPCC, la distribución normal y la distribución triangular asimétrica fueron escogidas para ser ajustadas a los factores de emisión de este primer grupo, caracterizados por intervalos simétricos y asimétricos, respectivamente. Para el caso de los factores de emisión de CH_4 asociados con el compostaje y la digestión anaeróbica de residuos sólidos, debido a la cercanía del U_L al 0, se requirió hacer un ajuste en la interpretación de U_L y U_R , representado en su lugar los percentiles 0 % y 95 % (Molina-Castro, 2022a). Los resultados obtenidos para los factores de emisión del grupo 1 se presentan en el Cuadro 5.4, incluyendo sus incertidumbres estándar, las distribuciones de probabilidad ajustadas y sus respectivos

estadísticos RE para evaluar su adecuación de uso. Las distribuciones de probabilidad incluidas corresponden a aquellas recomendadas para describir el comportamiento de estos factores de emisión en las futuras aplicaciones requeridas por la herramienta. Cabe mencionar que los valores RE estimados para las poblaciones simuladas coinciden en un 100 % para aquellos factores de emisión descritos mediante una distribución normal, mientras que el mayor valor de RE se presentó para el factor de emisión de CH_4 por compostaje de residuos sólidos. En general, estos resultados permiten concluir la adecuación de estas distribuciones escogidas para describir el comportamiento variable de estos factores de emisión, a pesar del ajuste requerido para la distribución triangular asimétrica.

Cuadro 5.4. Incertidumbres estándar u , errores relativos máximos RE estimados y distribuciones de probabilidad ajustadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 1. Los valores de u se reportan en las unidades indicadas en cada proceso de emisión. Los valores de RE se muestran entre paréntesis cuadrados [] y se reportan en porcentaje

Proceso de emisión	Fuente	u [RE (%)]	Distribución ajustada
Fermentación entérica de ganado no vacuno (kg CH_4 /cabeza·año)	Búfalos	17,0 [0,00]	Normal
	Ovejas	1,25 [0,00]	
	Cabras	1,25 [0,00]	
	Caballos	4,50 [0,00]	
	Cerdos	0,25 [0,00]	
Manejo de excretas (kg CH_4 /cabeza·año)	Ganado vacuno	0,150 [0,00]	Normal
	Caballos	0,246 [0,00]	
	Cabras	0,026 [0,00]	
	Cerdos	0,150 [0,00]	
	Aves de corral	0,003 [0,00]	
Tratamiento biológico de residuos sólidos (g/kg)	Compostaje (CH_4)	1,973 [4,95]	Triangular asimétrica*
	Compostaje (N_2O)	0,141 [0,47]	
	Digestión Anaeróbica (CH_4)	5,78 [0,07]	

*Se requirió un ajuste en la interpretación de los límites del intervalo de variación U_L y U_R

Grupo 2: En este grupo, se incluyeron factores de emisión cuyos valores provienen de modelos multiplicativos simples que involucran no más de tres variables de entrada. Estos modelos se incluyen en el Capítulo 4 del presente documento. La información relativa a las variables de entrada de dichos modelos fue encontrada en la literatura, concretamente en las guías de IPCC (2006a; 2006b; 2019), o requirió el criterio de expertos para ser definida. Los factores de emisión asociados al tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales figuran dentro de este segundo grupo (Cuadro A6). Estos factores fueron ubicados en el segundo y tercer nivel de estimación de emisiones propuesto por el IPCC (*Tier 2* o *3*), recomendándose su uso sobre el nivel 1 (*Tier 1*) cuando no se dispone de estudios nacionales.

Para el caso de los factores de emisión asociados con el tratamiento y vertido de aguas residuales industriales (reactor anaeróbico, laguna anaeróbica profunda, laguna anaeróbica poco profunda y descarga a ríos), los valores e intervalos de variación al 95 % de confianza de las magnitudes de entrada B_o y MCF fueron consultados de las referencias literarias. Solamente se presentó una ausencia de información para el caso del intervalo de variación del MCF , que fue completado gracias al criterio de tres expertos técnicos nacionales en el tratamiento de aguas residuales, quienes coincidieron en que intervalos de $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ y $\pm 50\%$ podían ser asumidos según el caso. Una vez disponibles los valores e intervalos de variación asociados, se procedió al ajuste de distribuciones de probabilidad, incluidas en el Capítulo 4 del presente documento, para estas variables. Al mantener la consistencia de criterios para la elección de distribuciones de probabilidad, se definió el uso de distribuciones normales para ambas variables de entrada. Así, aplicando el MMC, se simularon poblaciones con tamaños de 10^6 para las variables de entrada y se combinaron siguiendo el modelo matemático utilizado para estimar el factor de emisión respectivo. A partir de esta población resultante, fue posible extraer la información relativa a la variación asociada con dichos factores de emisión, incluyendo su desviación estándar (incertidumbre estándar) y percentiles 2,5 % y 97,5 % (límites del intervalo de cobertura de interés al 95 %). Los resultados obtenidos para los factores de emisión asociados con aguas residuales industriales se presentan en el Cuadro 5.5, incluyendo sus incertidumbres estándar, sus intervalos de variación al 95 % y las distribuciones de probabilidad recomendadas para describir su comportamiento en las futuras aplicaciones requeridas por la herramienta.

Seguidamente, para el caso de factores de emisión asociados con el tratamiento y vertido de aguas residuales domésticas (lagunas, tanques sépticos y descarga a ríos), las variables de entrada incluyen a B_o , MCF , BOD e I . Sus respectivos valores e intervalos de variación al 95 % de confianza fueron nuevamente consultados y extraídos en su totalidad de las referencias literarias antes mencionadas. Cabe señalar que, según lo recomendado en estas referencias, el factor de corrección I fue considerado como una constante igual a 1; es decir, I no se consideró como una variable de entrada con aporte de incertidumbre. Nuevamente, y manteniendo la consistencia de criterios para la elección de distribuciones de probabilidad, se definió el uso de distribuciones normales para describir todas las variables de entrada, se simularon poblaciones con tamaños de 10^6 para estas variables y se combinaron siguiendo el modelo matemático utilizado para estimar el factor de emisión respectivo, siguiendo el MMC. Al igual que para el caso anterior, de los resultados obtenidos se logró extraer la información relativa a la variación asociada con dichos factores de emisión, incluyendo su desviación estándar (incertidumbre estándar) y percentiles 2,5 % y 97,5 % (límites del intervalo de cobertura de interés al 95 %). Los resultados obtenidos para los factores de emisión asociados con aguas residuales domésticas también se presentan en el Cuadro 5.5, incluyendo sus incertidumbres estándar, sus intervalos de variación al 95 % y las distribuciones de probabilidad recomendadas para describir su comportamiento.

Del Cuadro 5.5 es claro que, en todos los casos, se recomienda el uso de una distribución generalizada de valores extremos para describir los factores de emisión del grupo 2. Esto se justifica en el hecho de que, al ser todos estos factores producto de modelos multiplicativos de variables descritas por distribuciones normales, el resultado esperado es la obtención de intervalos asimétricos con respecto a los valores promedio de las poblaciones simuladas. Aunque algunas referencias, como IPCC (2006a), recomiendan el uso de distribuciones log-normales para describir estas poblaciones, se prefiere el uso de las distribuciones generales de valores extremos debido al mejor ajuste evidenciado previamente en el presente estudio. Finalmente, se debe aclarar que, dado que no se cuenta con valores previos (teóricos) de los límites del intervalo de variación, no es posible estimar valores de RE para los resultados mostrados en el Cuadro 5.5, y evaluar así la adecuación de los resultados obtenidos.

Cuadro 5.5. Incertidumbres estándar u , intervalos de variación obtenidos con un 95 % de cobertura y distribuciones de probabilidad recomendadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 2. Los valores de u y los límites de los intervalos se reportan en las unidades indicadas en cada proceso de emisión

Proceso de emisión	Tipo de tratamiento	u	Intervalo de cobertura al 95 % [Inf; Sup]	Distribución recomendada
Tratamiento y vertido de aguas residuales industriales (kg CH ₄ /kg DQO)	Reactor anaeróbico	0,0317	[0,1380; 0,2620]	Generalizada de valores extremos
	Laguna anaeróbica profunda	0,0317	[0,1380; 0,2620]	
	Laguna anaeróbica poco profunda	0,0107	[0,0310; 0,0730]	
	Descarga a ríos	0,0081	[0,0129; 0,0446]	
Tratamiento y vertido de aguas residuales domésticas (kg CH ₄ /persona·año)	Laguna	0,460	[0,964; 2,768]	Generalizada de valores extremos
	Tanque séptico	0,960	[2,672; 6,439]	
	Descarga a ríos	0,321	[0,424; 1,677]	

Grupo 3: Este grupo incluyó dos factores de emisión cuyos valores provienen de modelos multiplicativos más complejos, involucrando más de tres variables de entrada. Estos modelos se incluyen en el Capítulo 4 del presente documento. La información relativa a las variables de entrada de dichos modelos requirió la consulta de varias fuentes literarias y estudios previos realizados en el país, incluyendo en las guías de IPCC (2006a; 2006b; 2019), CIAAW (2020), FEDEMUR (2002), ASTM (2019) y Morales (2016). Los factores de emisión asociados a los procesos oxidativos de lubricantes y al tratamiento de residuos sólidos por medio de rellenos sanitarios figuran dentro de este tercer grupo (Cuadro A7). Estos factores se ubican en el tercer nivel de estimación de emisiones del IPCC (*Tier 3*), recomendándose su uso sobre los niveles 1 y 2 (*Tier 1* o *2*) cuando se dispone de estudios nacionales.

Para el caso del factor de emisión asociado con la oxidación de lubricantes, los valores e intervalos de variación al 95 % de confianza relacionados con los pesos atómicos de los elementos AW_C y AW_O fueron consultados de la base de datos oficial de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés) (CIAAW, 2020), donde se recomienda expresamente el ajuste de una distribución rectangular o uniforme para describir su variabilidad (Possolo, Van der Veen, Meija y Hibbert, 2018). La información relativa a las variables ODU , CC y NCV fue tomada de las guías de IPCC (2006a), donde se recomienda el ajuste de distribuciones log-normales en las variables con comportamientos asimétricos (CC y NCV) y normal para la variable simétrica (ODU). Para el caso de la densidad del agua ρ_{H_2O} , la norma de referencia recomienda el uso de un valor según la temperatura nominal del lubricante (15 °C) y el ajuste de una distribución normal, cumpliendo las disposiciones de un reporte estandarizado de mediciones de acuerdo con la norma ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (ISO/IEC, 2017). Además, para la variable $\rho_{r\ lub}$, se decidió utilizar un valor promedio y ajustar una distribución t, según las recomendaciones de JCGM (2008a), dado que el estudio de referencia consultado reporta una población de veintiún datos de los lubricantes utilizados a nivel nacional. A partir de esta información recopilada, se simularon poblaciones con tamaños de 10^6 para las variables de entrada y se combinaron siguiendo el modelo matemático respectivo, de acuerdo con el MMC. Los resultados obtenidos se

presentan en el Cuadro 5.6, incluyendo su incertidumbre estándar, su intervalo de variación al 95 % y la distribución de probabilidad recomendada para describir su comportamiento.

Por último, para el caso del factor de emisión asociado con el tratamiento de desechos sólidos a través del uso de rellenos sanitarios, un proceso similar fue ejecutado. Los valores, intervalos de variación y distribuciones de los pesos atómicos AW_C y AW_H fueron extraídas de las mismas referencias. Para las variables de entrada DOC_1 , DOC_2 , DOC_f y F , sus respectivos valores e intervalos de variaciones fueron extraídos de las guías de IPCC (2006a; 2019), recomendándose en todos los casos el ajuste de distribuciones normales dada su simetría. La variable MCF , cuyos valores fueron extraídos de las guías de IPCC (2019), fue la única con un comportamiento asimétrico identificado, y se decidió el ajuste de una distribución triangular asimétrica al tener un valor máximo igual al valor más probable (Molina-Castro, 2022a). Luego, las fracciones másicas W_1 (alimentos) y W_2 (papel) fueron definidas a partir de los datos reportados en el estudio nacional realizado por FEDEMUR (2002) y se decidió ajustar nuevamente distribuciones normales debido a su simetría esperada. A partir de esta información recopilada, se simularon poblaciones con tamaños de 10^6 para las variables de entrada y se combinaron siguiendo el modelo matemático respectivo, de acuerdo con el MMC. Los resultados obtenidos para este factor de emisión se presentan en el Cuadro 5.6, incluyendo su incertidumbre estándar, su intervalo de variación al 95 % y la distribución de probabilidad recomendada para describir su comportamiento.

Al igual que para el segundo grupo, se recomienda el uso de una distribución generalizada de valores extremos para describir los factores de emisión incluidos en el Cuadro 5.6. Esto debido a que se presenta la misma justificación, esperándose obtener intervalos asimétricos resultantes de la multiplicación de variables con distribuciones de probabilidad normales. Finalmente, no se omite mencionar que para este grupo tampoco es posible estimar valores de RE dada la ausencia de valores previos (teóricos) de los límites del intervalo de variación.

Una ampliación sobre los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto se presenta en Molina-Castro (2022b). Adicionalmente, los mismos fueron incorporados por el IMN para actualizar la base de datos oficial de factores de emisión utilizada en Costa Rica (IMN, 2023).

Cuadro 5.6. Incertidumbres estándar u , intervalos de variación obtenidos con un 95 % de cobertura y distribuciones de probabilidad recomendadas para los factores de emisión incluidos en el grupo 3. Los valores de u y los límites de los intervalos se reportan en las unidades indicadas en cada proceso de emisión

Proceso de emisión	Tipo de tratamiento	u	Intervalo de cobertura al 95 % [Inf; Sup]	Distribución recomendada
Oxidación de lubricante (kg CO ₂ /L)	-	0,1337	[0,2592; 0,7880]	Generalizada de valores extremos
Tratamiento de residuos sólidos (kg CH ₄ /kg)	Relleno sanitario	0,0086	[0,0343; 0,0680]	Generalizada de valores extremos

CAPÍTULO VI. SOBRE LA CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

6.1 Generalidades

La herramienta desarrollada fue denominada GEISER, que corresponde a un acrónimo de las siglas de **S**oftware de **E**stimación **R**obusta de incertidumbre para inventarios de **G**ases de **E**fecto **I**vernadero. En concordancia con el segundo objetivo específico del proyecto, a continuación, se presentan los aspectos más importantes sobre la elaboración y funcionamiento de esta herramienta estadística generada.

6.2 Interfaz del usuario (objeto *ui*)

Para cumplir las características estructurales del concepto del diseño, se recurrió al uso de las funciones de la librería *shinydashboard* (Chang y Borges, 2021). Esta permitió la generación de una interfaz adaptada y ajustable a un ambiente web, con un título superior, un menú lateral con cuatro pestañas y dos subpestañas que permite al usuario acceder a las diferentes secciones de la herramienta, un espacio central amplio para desplegar los resultados, y un menú superior para mostrar mensajes o notificaciones. La estructura básica de la herramienta se presenta en la Figura 6.1, y el contenido de cada pestaña se describe a continuación.

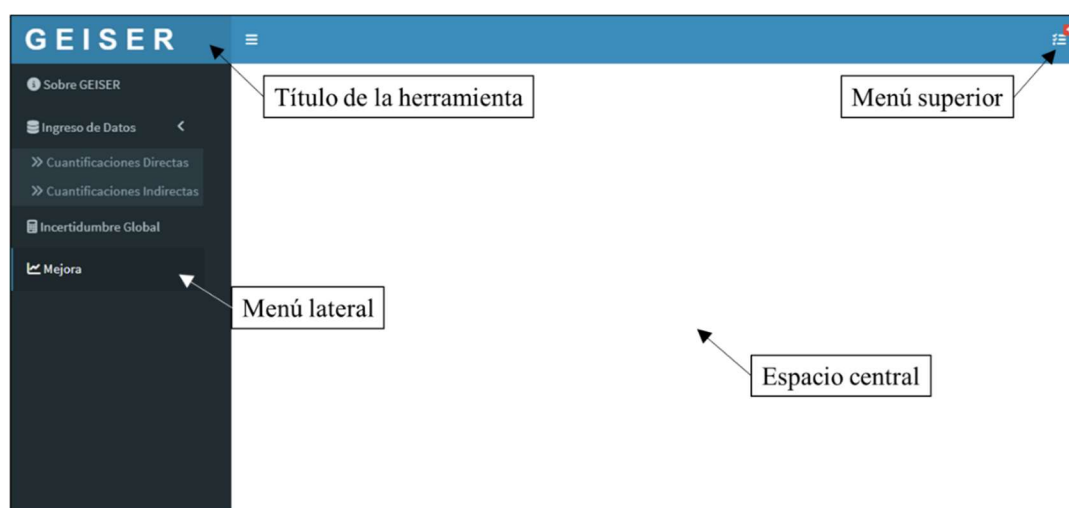


Figura 6.1. Estructura básica creada para la interfaz del usuario de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes. Fuente: el autor.

Primera pestaña - Sobre GEISER: Corresponde a la pestaña mostrada por defecto al iniciar GEISER. Por este motivo, su contenido incluye una breve presentación de la herramienta, su objetivo y características principales. En concordancia con el concepto de la interfaz, esta sección incorpora las instrucciones generales para el uso de GEISER y las instrucciones específicas para interpretar y completar la información requerida en cada sección de la herramienta. Adicionalmente, se muestran los supuestos considerados en las estimaciones y simulaciones realizadas por la herramienta (discutidos en el apartado 6.3 de este capítulo), sus principales limitaciones y las referencias bibliográficas más relevantes que pueden permitir un mayor entendimiento de la temática al usuario. Finalmente, se aprovechó el espacio para agregar los respectivos apartados de control de versiones de la herramienta, el medio de contacto para la comunicación de errores o sugerencias de los usuarios, y los créditos y agradecimientos a quienes colaboraron con el proyecto. El contenido de esta pestaña inicial se presenta en la Figura 6.2.

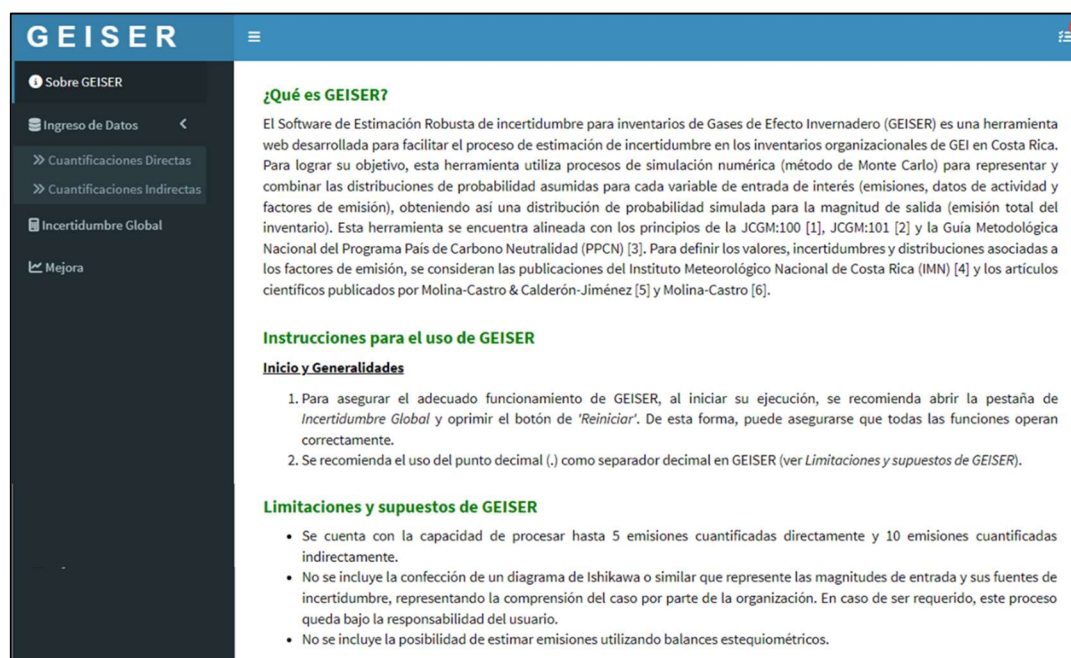


Figura 6.2. Extracto del contenido de la pestaña *Sobre GEISER* de la herramienta GEISER. Fuente: el autor.

Segunda pestaña – Ingreso de Datos: Aunque la selección de esta pestaña no corresponde a ninguna sección de la herramienta, esta incluye las dos subpestañas en las que el usuario debe

ingresar la información de entrada de la herramienta, requerida para generar sus principales resultados. Es importante destacar que la interfaz generada para ambas subpestañas se encuentra dividida por fuente de emisión e indica claramente al usuario cuál información será utilizada para hacer las correspondientes evaluaciones de incertidumbre Tipo A y Tipo B, así como las unidades de medida en la que deben ser reportados los datos. En todos los casos, se especificó en la interfaz que los datos relacionados con evaluaciones de incertidumbres Tipo B deban ser reportados en porcentaje (%), justificado en que, según las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019) y los documentos guía del IPCC (IPCC, 2006a), este es el formato requerido para las incertidumbres en inventarios de GEI, por lo que esta unidad es usada de forma generalizada por los potenciales usuarios de esta herramienta. Finalmente, la interfaz para ambas subpestañas incluye elementos de validación de los datos ingresados por el usuario provistas por las funciones de la librería *shinyvalidate* (Iannone y Cheng, 2022), para controlar que la información ingresada sea adecuada para su posterior procesamiento en la herramienta.

Subpestañas – Cuantificaciones Directas e Indirectas: Corresponden a las secciones de la herramienta en la que el usuario puede ingresar información sobre fuentes de emisión de un inventario. Para la primera subpestaña (*Cuantificaciones Directas*), su contenido está estructurado de manera que el usuario inicie escogiendo parámetros descriptivos de la fuente, como el tipo de fuente y el gas cuantificado. Para la segunda subpestaña (*Cuantificaciones Indirectas*), su estructura de interfaz se divide en dos partes: el factor de emisión y el dato de actividad. En este caso, los parámetros descriptivos de la fuente se encuentran asociados al factor de emisión. En ambos casos, los parámetros descriptivos fueron incorporados como menús desplegables con contenido predefinido, acorde con las fuentes, gases, sectores y demás clasificaciones incluidas en la lista oficial del IMN (IMN, 2021) y comúnmente encontrados en los inventarios organizaciones del PPCN, según la experiencia del autor.

Dado que los datos requeridos para la cuantificación de las emisiones y sus incertidumbres de medida están determinados por la metodología de cuantificación utilizada, se incorporó un menú con los siguientes cuatro tipos de metodologías para las emisiones cuantificadas

directamente y para los datos de actividad de las emisiones cuantificadas indirectamente, cuya elección actualiza la interfaz para ingresar los datos pertinentes:

- a. *Mediciones internas (datos procesados)*: requiere que el usuario previamente posea un resumen estadístico descriptivo de los datos de emisión de la fuente o datos de actividad, incluyendo el promedio, desviación estándar y cantidad total de datos, así como información relativa a las características metroológicas del instrumento de medición utilizado para cuantificar dichos datos.
- b. *Mediciones internas (datos crudos)*: requiere que el usuario posea un archivo en formato “.csv” con los datos de emisión de la fuente o datos de actividad, así como información relativa a las características metroológicas del instrumento de medición utilizado para cuantificar dichos datos.
- c. *Reporte externo (incertidumbre)*: requiere que el usuario posea un valor final de la emisión total de esta fuente o del dato de actividad y la información aplicable del instrumento de medición que se incluye en un certificado de calibración tradicional.
- d. *Reporte externo (tolerancia)*: requiere que el usuario posea un valor final de la emisión total de esta fuente o del dato de actividad y la información aplicable del instrumento de medición que se incluye en una especificación de fabricante tradicional.

Cabe señalar que estas cuatro metodologías fueron definidas por el autor con base en su experiencia en los procesos de estimación de incertidumbre según los documentos de referencia del PPCN (DCC y LCM, 2020) y responden a las bases de datos encontradas en los ejemplos de aplicación que permitieron la subsecuente validación de la herramienta (discutida en el Capítulo 7 del presente documento; ver Anexo 1). En las Figuras 6.3 y 6.4 se presentan el contenido por defecto de cada subpestaña, así como sus principales secciones.

Se destaca que las unidades de ingreso escogidas para los datos relacionados con las emisiones directas fueron los kilogramos (kg). Esta elección se justifica en que, aunque la unidad oficial de reporte de emisiones en el PPCN es la tonelada (t) (DCC, 2021), la mayor parte de los equipos utilizados en este tipo de cuantificaciones poseen rangos menores (kilogramos, kg, o gramos, g), según la necesidad particular. Para el caso de las emisiones indirectas, las unidades de medida se adaptan dinámicamente según la elección de los

parámetros descriptivos de los factores de emisión y corresponden a las unidades requeridas en los datos de actividad para ser coherentes con los factores de emisión incluidos en la lista oficial del IMN (IMN, 2021). Estas unidades incluyen litros (L), kilowatts por hora (kWh), kilogramos (kg), hectáreas (ha), cabezas de ganado y personas, según corresponda.

Finalmente, la interfaz propuesta para ambas subpestañas permite la incorporación de nuevas fuentes de emisión mediante el uso de botones dinámicos. Para la primera subpestaña, se permite la incorporación de hasta cinco fuentes de emisión cuantificadas de forma directa, mientras que la segunda subpestaña permita incorporar hasta diez fuentes de emisión cuantificadas indirectamente. Estas cantidades fueron definidas por el autor de forma consecuente con la frecuencia de uso de estos tipos de cuantificaciones de emisiones, ya que las cuantificaciones indirectas se encuentran de forma predominante en los inventarios de GEI según lo observado en las bases de datos utilizadas para la validación de la herramienta (ver Anexo 1).

Figura 6.3. Contenido de la subpestaña *Cuantificaciones Directas* de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes. Fuente: el autor.

Figura 6.4. Contenido de la subpestaña *Cuantificaciones Indirectas* de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes. Fuente: el autor.

Tercera pestaña – Incertidumbre Global: Corresponde a la primera y principal pestaña que muestra los resultados del procesamiento llevado a cabo por la herramienta. Su interfaz incluye los siguientes tres botones dinámicos para el funcionamiento de la herramienta:

- Configurar:* Permite al usuario definir la cantidad de iteraciones a utilizar en los procesos de simulación y un valor semilla para la generación pseudoaleatoria de valores a partir de las distintas distribuciones de probabilidad. Al fijar un valor semilla, se permite la replicación de resultados obtenidos en las simulaciones.
- Estimar:* Activa la lectura de la información de entrada incorporada por el usuario y de bases de datos requeridas, así como el procesamiento de los datos, incluyendo la simulación de poblaciones a partir de funciones de distribución de probabilidad, y la estimación final de una población simulada de emisiones totales del inventario a partir de los modelos incluidos en la herramienta y la aplicación del método de Monte Carlo. El detalle de este proceso se describe en el apartado 6.3 de este capítulo.
- Reiniciar:* Borra toda la información incorporada por el usuario y los resultados generados por la herramienta, retornando a la pestaña inicial de *Sobre GEISER*.

Al finalizar el procesamiento de los datos, en esta pestaña se muestra un resumen estadístico de la población simulada de emisiones totales del inventario, incluyendo la mediana de la población como emisión total estimada, su respectiva desviación estándar relativa como la incertidumbre combinada estándar estimada y el intervalo relativo delimitado por los cuantiles 2,5 % y 97,5 % de la población como el intervalo de confianza al 95 % de cobertura. Estos parámetros fueron escogidos debido a la obligatoriedad de su reporte en los inventarios de GEI según las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019). Adicionalmente, la distribución de población obtenida por el MMC es mostrada gráficamente gracias a las funciones de las librerías *ggplot2* (Wickham *et al.*, 2023b) y *ggthemes* (Arnold *et al.*, 2021). Se destaca que las emisiones totales se muestran en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂e), correspondiente a la unidad oficial de reporte de emisiones en el PPCN (DCC, 2021). Finalmente, se tiene la inclusión de un elemento temporal dinámico (*spinner*) que se activa al ejecutar el botón de *Estimar*, de forma que el usuario pueda identificar que la herramienta se encuentra ejecutando el procesamiento de los datos. En la Figura 6.5, se presenta el contenido final de esta pestaña posterior a la ejecución al procesamiento de datos, así como sus principales secciones.

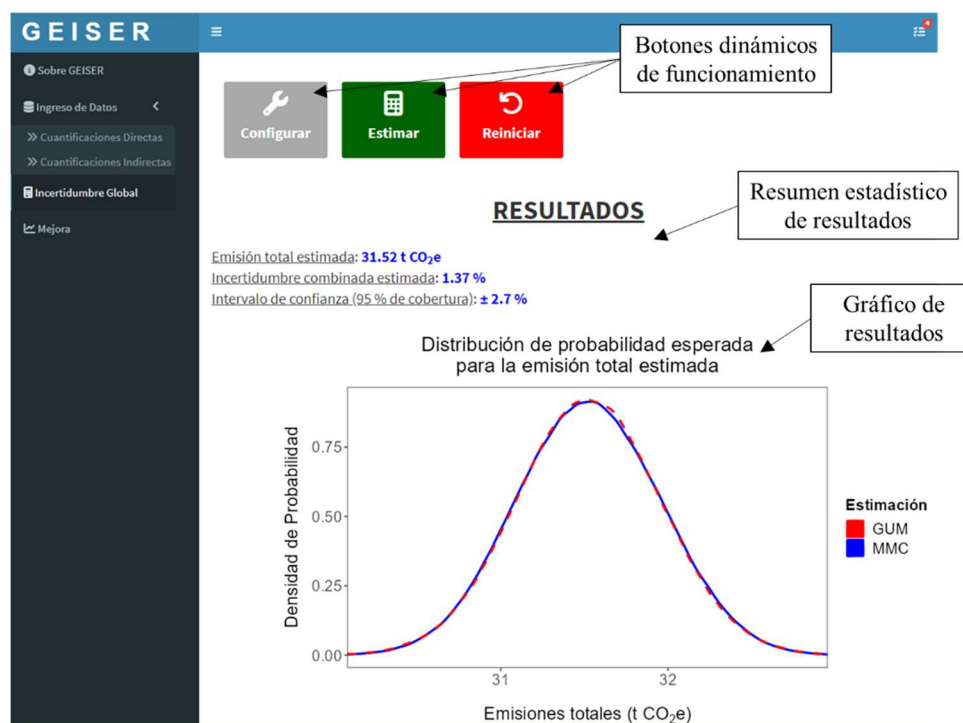


Figura 6.5. Contenido final de la pestaña *Incertidumbre Global* de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes. Fuente: el autor.

Cuarta pestaña – Mejora: Corresponde a la segunda pestaña, que muestra resultados del procesamiento de datos y la última pestaña de la herramienta. Su interfaz, por defecto, se presenta en blanco y únicamente muestra resultados luego de la ejecución del procesamiento de datos. Una vez procesados los datos, y gracias a las funciones de la librería *formattable* (Ren y Russell, 2021), se muestran dos tablas con las emisiones totales para cada fuente de emisión (t CO₂e), su respectiva incertidumbre estándar porcentual y su contribución porcentual tanto a la emisión total como a la incertidumbre global del inventario. Estos parámetros también fueron escogidos debido a la obligatoriedad de su reporte en los inventarios de GEI según las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019). La identificación de los porcentajes de contribución, incluyendo gráficas con barras proporcionales a sus valores, pretende ayudar al usuario a identificar fácilmente aquellas las fuentes que, al implementar acciones de mejora en su mitigación o cuantificación, podrían generar los mayores impactos en el inventario final. En la Figura 6.6, se presenta el contenido final de esta pestaña posterior a la ejecución al procesamiento de datos, así como sus principales secciones.

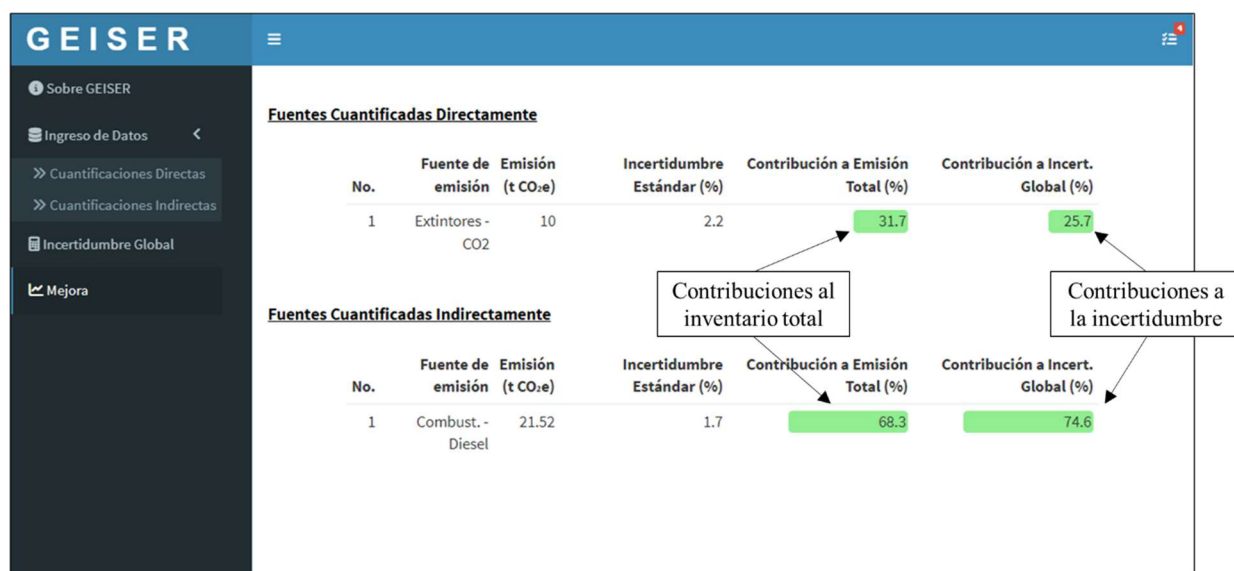


Figura 6.6. Contenido final de la pestaña *Mejora* de la herramienta GEISER y sus secciones más importantes. Fuente: el autor.

6.3 Procesamiento de información (objeto *server*)

El código requerido para el procesamiento de información de la herramienta fue desarrollado abarcando tres áreas claves para garantizar la adecuación y correcto funcionamiento de la herramienta: lectura de información de entrada (variables de entrada ingresadas por el usuario y bases de datos externas), procesamiento de datos para generar resultados (variables de salida) a partir de simulaciones y la aplicación del MMC, y funciones auxiliares para brindar dinamismo a la herramienta.

Lectura de información de entrada:

En el caso de la lectura de las variables de entrada, estas corresponden a información que es ingresada por el usuario a través de la interfaz. Debido a la naturaleza del lenguaje de programación y las funciones de la librería *shiny* (Chang *et al.*, 2023), su lectura únicamente requirió una inequívoca referencia al objeto de ingreso (Input) utilizado por el usuario para ingresar dicha información. De esta forma, cada dato ingresado por el usuario es almacenado automáticamente como una variable con una identificación única asociada con el objeto que permitió su ingreso.

Para el caso de la lectura de bases de datos externas, se estableció la necesidad de una única base de datos que debe ser consultada por la herramienta previo al procesamiento de la información ingresada por los usuarios. Esta corresponde a un archivo anexo titulado “Base_IMN.xlsx”, el cual contiene los valores de los factores de emisión e información de sus incertidumbres (incertidumbre estándar o intervalos de cobertura, según se considere pertinente), así como los valores de los PCG de los diferentes GEI incluidos en la herramienta (ver Anexo 1). Este archivo fue estructurado de forma que cada pestaña cuenta con la información pertinente para un área de emisión, ya sea combustible, agricultura, generación de electricidad, tratamiento de residuos sólidos, entre otros, y una última pestaña con los PCG. Los datos en este archivo deben ser idénticos a la última versión de la lista oficial publicada por el IMN. Su lectura se realiza a través de funciones de la librería *readxl* (Wickham *et al.*, 2023d) y su almacenamiento dentro de la herramienta se da a través de la creación de distintas variables reactivas al inicio de la ejecución del programa. El uso de esta estrategia permite que la información almacenada pueda ser utilizada a través de todo el

programa tantas veces como sea necesario. Dado que la lista oficial del IMN es actualizada anualmente, el administrador de la herramienta debe ser responsable de garantizar la adecuada actualización periódica del archivo con esta base de datos, como parte de las labores de mantenimiento de la herramienta.

Procesamiento de datos y resultados:

Luego de incorporadas las variables de entrada y demás información requerida de la base de datos externa, el procesamiento de estos datos en la herramienta inicia tras la ejecución del botón *Estimar* por parte del usuario. Para garantizar este aspecto, las variables intermedias creadas para almacenar las poblaciones de emisiones simuladas fueron incorporadas en el programa mediante la ejecución de eventos reactivos (*eventReactive*), definiendo la ejecución del botón como su “disparador”.

El flujo general de las etapas del procesamiento de datos se resume gráficamente en las Figuras 6.7 a 6.10, considerando la metodología de cuantificación por *Mediciones internas (datos procesados)*. Las figuras correspondientes que describen las etapas del procesamiento de datos para las demás metodologías de cuantificación (*Mediciones internas (datos crudos)*, *Reporte externo (incertidumbre)* y *Reporte externo (tolerancia)*), tanto para las emisiones cuantificadas directamente como indirectamente, se presentan el Anexo 2 del presente documento, pudiendo sustituir a las Figuras 6.7 y 6.9, respectivamente, de acuerdo con la elección de las metodologías de cuantificación por parte del usuario.

Para facilitar el seguimiento de estas figuras, es importante aclarar que los nombres dentro de las casillas corresponden al nombre de las variables dentro del programa, las cuales se procesan o combinan para generar nuevas variables. Por su parte, el texto sobre llaves o flechas continuas indica la distribución de probabilidad o método estadístico utilizado para simular una población de datos y las flechas discontinuas hacen referencia a una continuidad condicionada del proceso según la elección del usuario mostrada como un texto sobre la misma flecha.

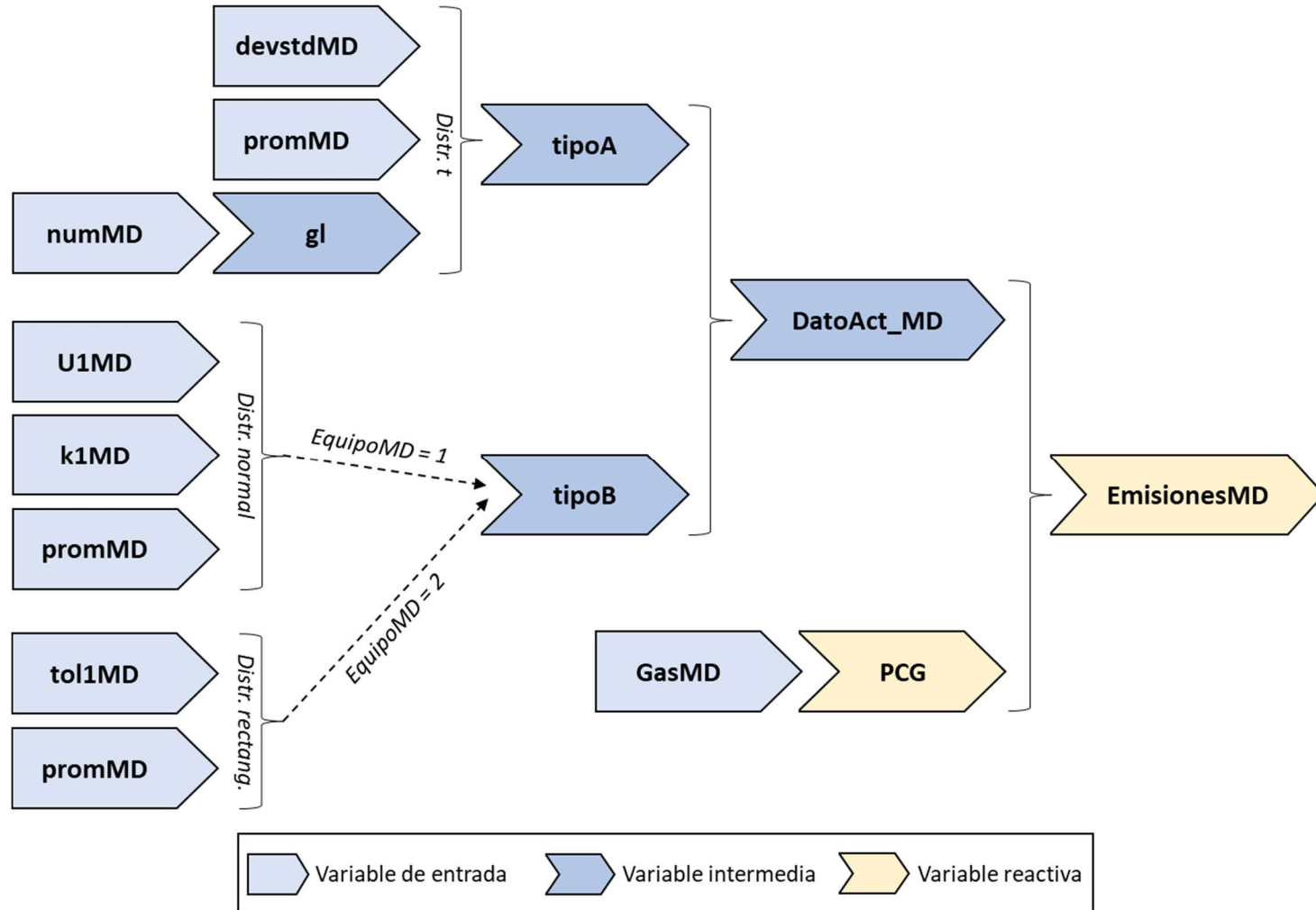


Figura 6.7. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa mediante la metodología de mediciones internas con datos ya procesados. Fuente: el autor.

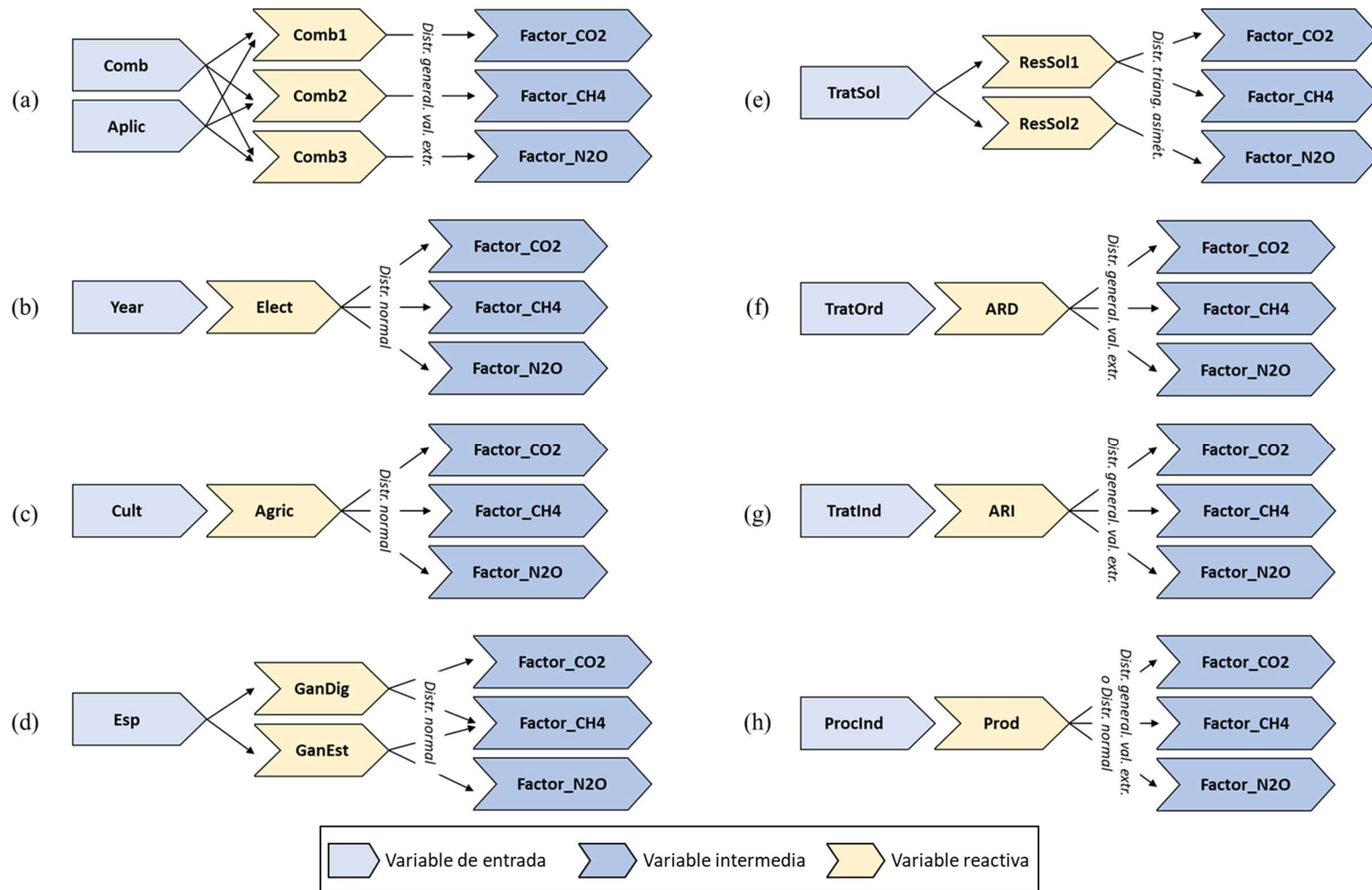


Figura 6.8. Diagramas de las etapas para la simulación de las poblaciones asociadas a los factores de emisión requeridos para las fuentes cuantificadas de forma indirecta para los sectores (a) combustibles, (b) electricidad, (c) agricultura, (d) ganadería, (e) residuos sólidos, (f) aguas residuales ordinarias, (g) aguas residuales industriales y (h) procesos industriales. Fuente: el autor.

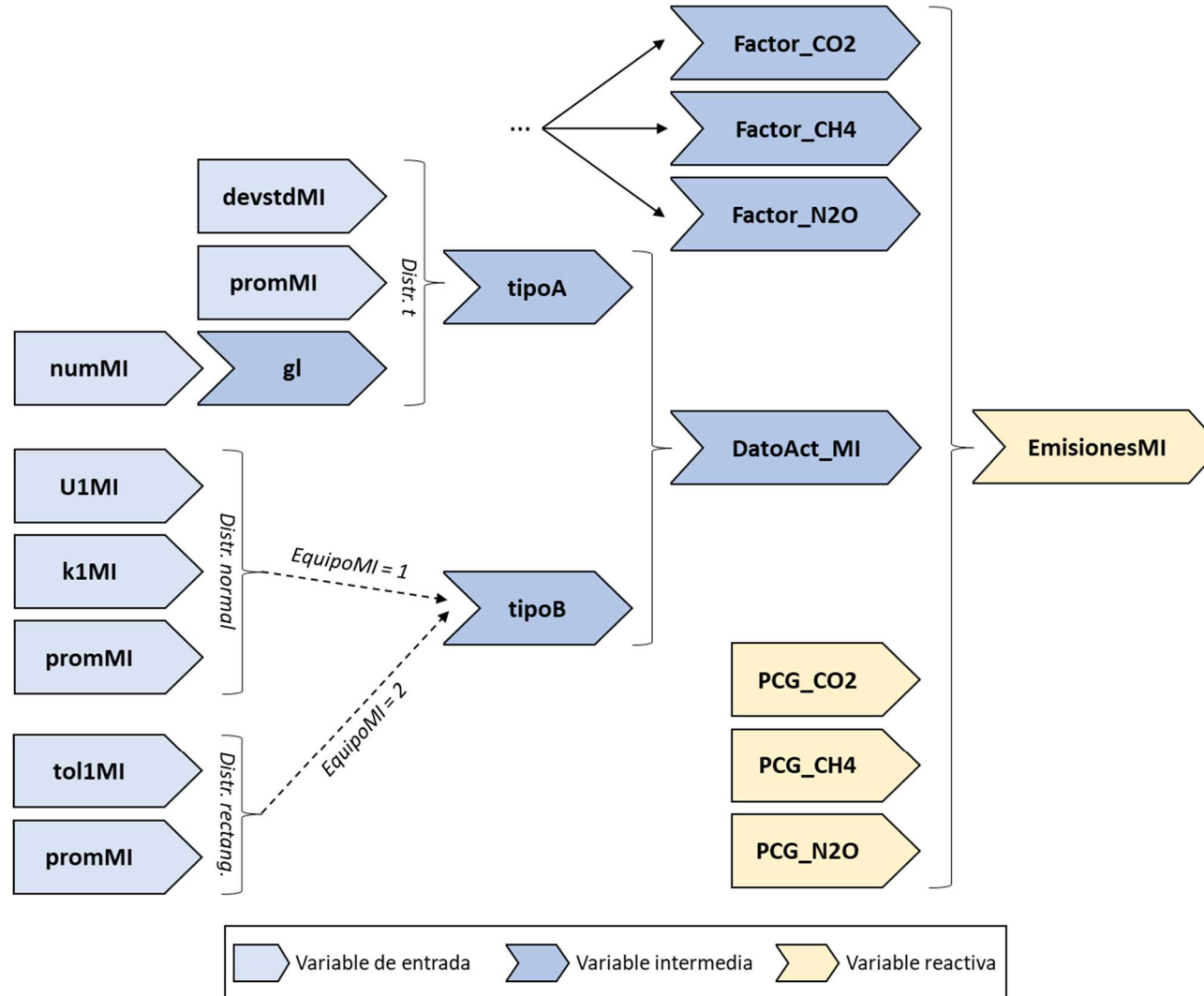


Figura 6.9. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante la metodología de mediciones internas con datos ya procesados. Fuente: el autor.

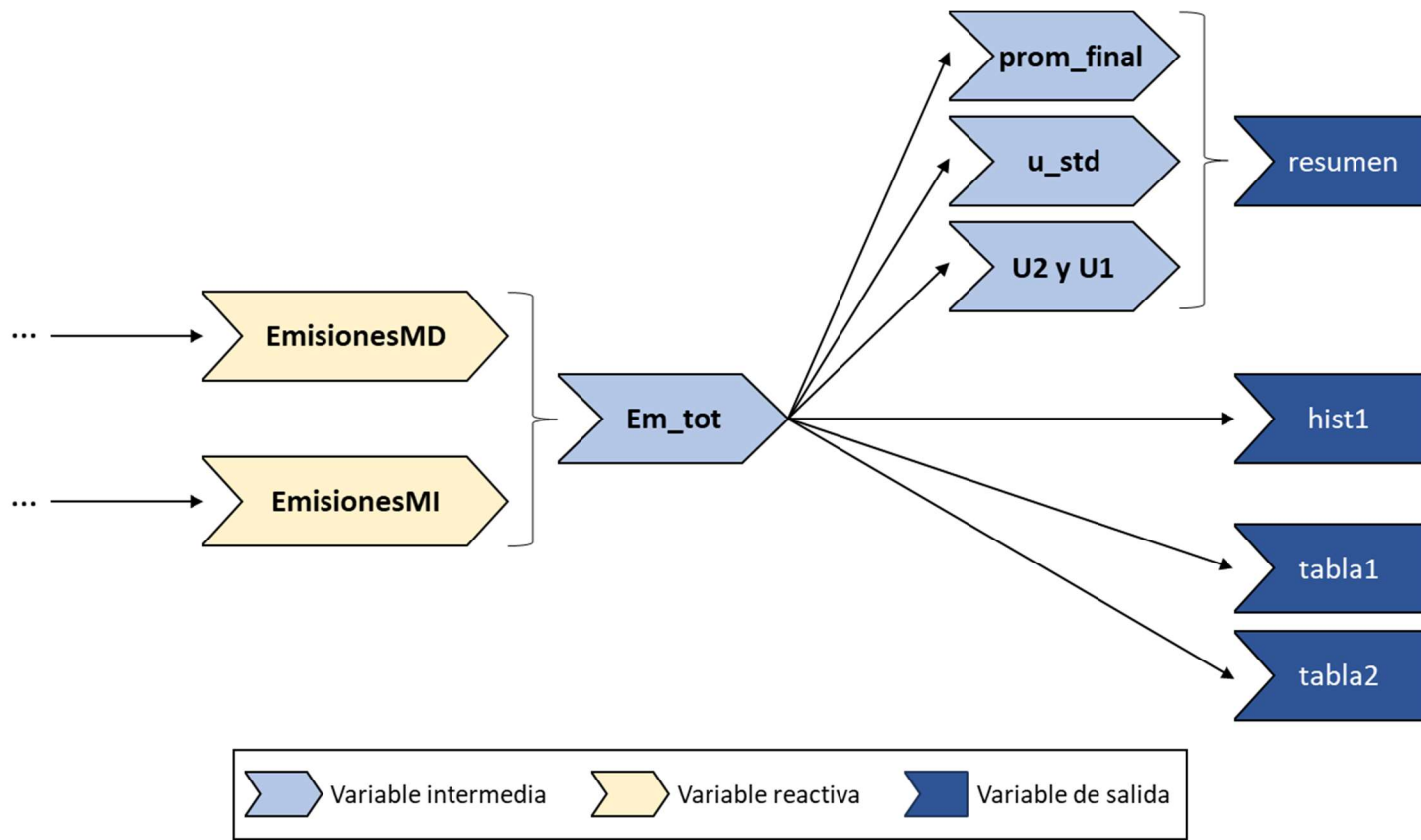


Figura 6.10. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos realizado para estimar la emisión total del inventario y la generación de las variables de salida de la herramienta. Fuente: el autor.

Inicialmente, y como se muestra en las figuras anteriores, el procesamiento de datos comienza con la generación de poblaciones simuladas a partir de las variables de entrada ingresadas por el usuario, partiendo de las funciones de probabilidad atribuidas a estas dentro de la herramienta, de acuerdo con lo expuesto en los Capítulos 4 y 5 del presente documento. En todos los casos, las poblaciones simuladas poseen un tamaño de 10^6 , sea por el ajuste de una distribución de probabilidad o la aplicación de estrategias de *bootstrapping* a datos ingresados por el usuario, a menos que el usuario cambie dicho valor por defecto en el menú de configuración de la herramienta (botón dinámico *Configurar*).

Para el caso de las emisiones cuantificadas directamente (Figuras 6.7, A2.1 y A2.2), el proceso de estimación de incertidumbre se realiza en dos etapas. En la primera etapa, hasta tres posibles poblaciones requieren ser simuladas. La primera población simulada corresponde a la componente de incertidumbre de la emisión asociada con una evaluación tipo A, que, como se mencionó en el Capítulo 3 del presente documento, busca describir la variabilidad asociada con el análisis estadístico de series de observaciones o datos replicados incorporados por el usuario únicamente bajo las metodologías de *Mediciones internas (datos procesados)* y *Mediciones internas (datos crudos)*. Bajo la primera metodología (Figura 6.7), se cuenta con una cantidad limitada de información sobre el comportamiento de los datos, resumida en estadísticos descriptivos de localización, dispersión y tamaño. Por este motivo, y siguiendo las recomendaciones de GUM (JCGM, 2008a), GUM-S1 (JCGM, 2008b) y la guía del PPCN (DCC y LCM, 2020), se asume que esta población tendrá una distribución de probabilidad simétrica, con grados de libertad finitos, al provenir de una serie de datos conocidos. Así, se procede a simular dicha población ajustando una distribución t (de Student) considerando el promedio, desviación estándar y número de datos (convertidos a grados de libertad) ingresados por el usuario.

Por otro lado, bajo la segunda metodología (Figura A2.1), la cantidad de información no se encuentra limitada a estadísticos descriptivos, por lo que no se considera necesaria la suposición de una distribución de probabilidad en particular. En su lugar, se prefiere aproximar la distribución de probabilidad mediante el método de *bootstrap*, generando la población simulada a partir del remuestreo y cálculo iterativo del promedio o mediana de los

datos, según elección del usuario. La inclusión de estos dos estadísticos de localización se justifica en el uso generalizado del primero para describir una serie de datos en el campo de emisiones, mientras que el segundo pretende brindar un mayor blindaje y robustez en presencia de posibles valores atípicos dentro del archivo de datos incorporado por el usuario. Cabe señalar que la herramienta también brinda la posibilidad al usuario de combinar todos los datos del archivo ingresado como una suma total (caso en emisiones provenientes de fuentes de igual naturaleza, pero cuantificadas individualmente y acumuladas en el inventario final). En dicho caso, no se considera pertinente la inclusión de una evaluación tipo A, ya que la serie de datos inicial se convierte en un valor único y se pierde la variabilidad asociada con el análisis estadístico de datos replicados.

La segunda y tercera población simuladas para las emisiones cuantificadas directamente corresponden a la componente de incertidumbre asociada con una evaluación tipo B, en este caso, específicamente ligada a las características del equipo de medición utilizado, que, por su naturaleza imperfecta, aporta variabilidad en sus indicaciones. Según lo expuesto en la GUM (JCGM, 2008a) y muchas otras referencias sobre procesos de estimación de incertidumbre de medida (por ejemplo, Hall y White (2017), Bell (2001), entre otros), es claro que existen múltiples fuentes de incertidumbre que podrían generar variabilidad y que pueden ser abordadas mediante evaluaciones tipo B, como la resolución y deriva del instrumento, la influencia de las condiciones ambientales, la pericia técnica del operador, entre otros. Sin embargo, en concordancia con lo requerido por las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019) y con el afán de simplificar el abordaje de la herramienta para el usuario sin perder la rigurosidad técnica, se decidió incluir únicamente una componente con evaluación tipo B asociada con el correcto funcionamiento del equipo. De esta forma, el comportamiento variable de un equipo funcionando correctamente puede ser descrito por su tolerancia o error máximo permitido especificado por su fabricante o de los resultados incluidos en un certificado de calibración emitido por un laboratorio competente.

En concordancia con lo expuesto en el Capítulo 4 del presente documento, para el primer caso, se asume que cualquier desvío presentado por el equipo dentro del intervalo de tolerancia tiene la misma probabilidad de ocurrencia, por lo que se procede a simular dicha

población ajustando una distribución rectangular o uniforme considerando los límites de dicho intervalo. Para el segundo caso, y dado que la mayor parte de los laboratorios de calibración utilizan métodos basados en la GUM para realizar sus estimaciones de incertidumbre, se asume que los resultados de sus certificados se basan en el cumplimiento del teorema del límite central (JCGM, 2008a) y en el ajuste de una distribución normal, por lo que se procede a simular dicha población ajustando una distribución normal, considerando el intervalo (incertidumbre expandida) y factor de cobertura incluidos en el certificado. Es importante destacar que solamente una de estas dos poblaciones será simulada para cada fuente de emisión, de acuerdo con la elección del usuario sobre la fuente de información disponible (variables *EquipoMD* y *Equipo2MD*). Adicionalmente, es relevante señalar que la garantía del correcto funcionamiento del equipo en cuestión es una responsabilidad que se traslada al usuario y cuya garantía es esperable si el usuario cumple con las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019) y requisitos de la norma de referencia (ISO, 2018) asociadas con la gestión de equipos de medición.

Una vez simuladas las poblaciones asociadas con las evaluaciones tipo A y tipo B de la emisión cuantificada (identificadas como variables *tipoA* y *tipoB* en las figuras), se pasa a la segunda etapa del proceso de estimación. En esta, la herramienta procede con la combinación y propagación de estas para obtener una única distribución de probabilidad, siguiendo los lineamientos del MMC. En este punto, es requerido el supuesto de que ambas poblaciones son independientes y no poseen ningún tipo de correlación, lo cual se considera razonable dado que la primera proviene de los datos replicados de las emisiones y la segunda de las características del equipo de medición. Bajo dicho supuesto, y de acuerdo con las directrices y guía del PPCN, el modelo matemático que permite la combinación de componentes de incertidumbre tipo A y tipo B asociadas a una misma variable es una suma simple (JCGM, 2008a), por lo que se procede a sumar ambas poblaciones simuladas para obtener una única población de datos resultante (variable *DatoAct_MD* en las figuras) (JCGM, 2008b). Es importante destacar que esta población de datos, en este punto del procesamiento, corresponde a los valores atribuibles a la emisión cuantificada, en unidades de kilogramos del GEI respectivo.

Luego, y de acuerdo con la elección del GEI cuantificado por el usuario (variable *GasMD* en las figuras), la herramienta extrae el PCG asociado a dicho GEI de la base de datos externa y multiplica dicho valor (un escalar) por el vector que almacena la población de los valores de la emisión cuantificada, obteniendo la población final de datos asociados con la fuente de emisión cuantificada directamente (variable *EmisionesMD* en las figuras, según el modelo matemático descrito en el Capítulo 4 del presente documento). Esta multiplicación permite convertir los valores de esta variable a otra unidad de medida, en este caso, kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂e), de forma que puedan ser combinados con valores de otras emisiones del inventario, independientemente del GEI cuantificado. Al finalizar este proceso de estimación, las unidades de medida asociadas con la emisión de la fuente son convertidas a toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂e), unidad oficial de reporte del PPCN (DCC, 2021).

Todo el proceso descrito anteriormente se repite para cada fuente de emisión de cuantificación directa ingresada por el usuario, pudiendo generarse hasta cinco poblaciones distintas de *EmisionesMD* en cada ejecución de la herramienta. Se destaca que, en aquellos casos en los que el usuario escoge el uso de las metodologías de *Reporte externo (incertidumbre)* y *Reporte externo (tolerancia)* para una fuente de emisión (Figura A2.2), la herramienta omite la simulación de la población de datos asociada con la evaluación tipo A por no contar con observaciones replicadas y únicamente trabaja con la población de datos relacionada con la evaluación tipo B, siguiendo los mismos supuestos descritos anteriormente.

Para el caso de las emisiones cuantificadas indirectamente (Figuras 6.8, 6.9, A2.3 y A2.4), el procesamiento de datos sigue un proceso muy similar al descrito anteriormente, con algunas diferencias clave que se detallan a continuación. Inicialmente, los procesos de estimación de incertidumbre aplicados para este tipo de emisiones incluyen tres etapas. A diferencia de las emisiones cuantificadas directamente, aquí se cuenta con elementos adicionales que aportan variabilidad al valor de la emisión, como lo son los factores de emisión. Así, en la primera etapa de este proceso, se inicia con la simulación de las poblaciones asociadas con estos factores (Figura 6.8). Según el sector y demás información ingresada por el usuario sobre el factor de emisión pertinente para la fuente, puede ser requerido simular hasta tres poblaciones

de datos (variables *Factor_CO2*, *Factor_CH4* y *Factor_N2O* en la Figura 6.8). En concordancia con lo expuesto en los Capítulos 5 y 6 del presente documento, para simular estas tres poblaciones, se recurre al uso de las distribuciones de probabilidad normal, generalizada de valores extremos y triangular asimétrica, ajustando la distribución respectiva de acuerdo con sus características de asimetría y cercanía al cero. Es importante destacar que, en algunos casos (por ejemplo, la emisión por consumo de electricidad) únicamente se requiere el uso de uno o dos de los tres factores de emisión definidos como variables (en el caso de la emisión por consumo de electricidad, solamente se requiere el factor de emisión de CO₂). En dichos casos, la información requerida para la simulación de las poblaciones asociadas con dichos factores es extraída de la base de datos externa leída por la herramienta, según la información ingresada por el usuario. Para los factores no requeridos (en el caso de la emisión por consumo de electricidad, no se requieren los factores de emisión de CH₄ y N₂O), son definidas como vectores nulos (solamente con valores igual a cero) de tamaño 10⁶. Esta disposición permite utilizar un único modelo en la combinación final de variables, como se describe más adelante, independientemente del sector elegido por el usuario. En esta etapa, las unidades de medida asociadas a cada factor son de kilogramo de GEI por unidad del dato de actividad.

La segunda etapa del proceso de estimación de incertidumbre para las emisiones cuantificadas indirectamente corresponde a la estimación de la incertidumbre asociada con el dato de actividad (Figuras 6.9, A2.3 y A2.4). Esta es idéntica a la combinación de las dos etapas del proceso de estimación de las emisiones cuantificadas directamente descrito antes, generando poblaciones asociadas a los componentes de evaluación Tipo A y B y combinándolos para obtener una única población final de valores asociados con el dato de actividad (variable *DatoAct_MI* en las figuras).

Una vez simuladas las poblaciones asociadas con los factores de emisión y el dato de actividad (identificadas como variables *Factor_CO2*, *Factor_CH4*, *Factor_N2O* y *DatoAct_MI* en las Figuras 6.9, A2.3 y A2.4) se pasa a la tercera etapa del proceso de estimación. En esta, la herramienta procede con la combinación y propagación de estas para obtener una única distribución de probabilidad, siguiendo los lineamientos del MMC. Para

ello, se extraen los PCG asociados con el CO₂, CH₄ y N₂O de la base de datos externa y se multiplican dichos valores (escalares) por el vector de cada factor de emisión correspondiente. Posteriormente, combina estas poblaciones mediante una suma simple y multiplica la población resultante por el vector del dato de actividad, obteniendo la población final de datos asociados con la fuente de emisión cuantificada indirectamente (variable *EmisionesMI* en las figuras, según el modelo matemático descrito en el capítulo 4 del presente documento). Esta sucesión de operaciones matemáticas, aunque no tradicionalmente utilizada en el cálculo de inventarios, permite eliminar un potencial problema de dependencia entre las variables combinadas (DCC y LCM, 2020) que violaría el supuesto de independencia de las variables requerido para la correcta aplicación del MMC (JCGM, 2008b). Adicionalmente, con la incorporación de los PCG, se logra la conversión de los valores de estas variables a otra unidad de medida, en este caso, kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂e), de forma que puedan ser combinados con valores de otras emisiones del inventario, independientemente del GEI cuantificado. Al finalizar este proceso de estimación, las unidades de medida asociadas con la emisión de la fuente son convertidas a toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂e), unidad oficial de reporte del PPCN (DCC, 2021).

Todo el proceso descrito anteriormente se repite para cada fuente de emisión de cuantificación indirecta ingresada por el usuario, pudiendo generarse hasta diez poblaciones distintas de *EmisionesMI* en cada ejecución de la herramienta. Se destaca que, en aquellos casos en los que el usuario escoge el uso de las metodologías de *Reporte externo (incertidumbre)* y *Reporte externo (tolerancia)* para un dato de actividad, la herramienta omite la simulación de la población de datos asociada con la evaluación tipo A por no contar con observaciones replicadas y únicamente trabaja con la población de datos relacionada con la evaluación tipo B.

Como último paso en el procesamiento de datos realizado por la herramienta, se procede con la combinación de las poblaciones de cada fuente de emisión ingresada por el usuario (Figura 6.10), sean cuantificadas directa o indirectamente, para obtener la cuantificación total de emisiones del inventario (variable *Em_tot* en la Figura 6.10), según el modelo matemático descrito en el Capítulo 4 del presente documento. Así, la herramienta procede con la

combinación y propagación de estas para obtener una única distribución de probabilidad, siguiendo los lineamientos del MMC. La población de datos obtenida tras la combinación final se utiliza para generar todas las salidas de la herramienta.

La primera salida (variable *resumen* en la Figura 6.10), correspondiente al resumen descriptivo de la población, se encuentra conformada por su mediana (como medida de localización), la desviación estándar relativa (como medida de dispersión) y un intervalo de cobertura del 95 % (como otra medida de dispersión). La elección de la mediana en lugar del promedio, comúnmente utilizado en la aplicación tradicional del MMC, se justifica en la presencia mayoritaria de distribuciones de probabilidad asimétricas ajustadas por la herramienta, las cuales pueden provocar que la distribución de probabilidad final también sea asimétrica. Dado que la mediana mostró un mejor rendimiento para representar el valor central de los factores de emisión con distribuciones asimétricas (ver Capítulo 5 del presente documento), se priorizó su estimación sobre el promedio para representar el valor central de la distribución final de la emisión total del inventario de forma robusta. Adicionalmente, en caso de que la distribución de probabilidad final resulte simétrica, la mediana de los datos sería equivalente al promedio, lo que hace de la mediana la opción más adecuada para estimar y reportar al usuario el valor central de la emisión total del inventario.

En el caso de las medidas de dispersión, la desviación estándar de la población final de datos fue escogida como la opción más adecuada para estimar y reportar al usuario la incertidumbre estándar de la emisión total del inventario, basado en las recomendaciones de la GUM-S1 (JCGM, 2008b). Para la estimación del intervalo de cobertura al 95 %, se identificaron y restaron los percentiles 97,5 % y 2,5 % de la población final de datos, basado en las recomendaciones de la GUM-S1 (JCGM, 2008b). Se reconoce la existencia de otros métodos aplicables para el caso, como la estimación del intervalo más pequeño que contiene al 95 % de los datos utilizado en la herramienta *NIST Uncertainty Machine* (Lafarge y Possolo, 2015). Sin embargo, para lograr una definición más simple para el usuario, coherencia con las bases de estimación de la GUM (JCGM, 2008a) y una equivalencia conceptual con la definición de la incertidumbre expandida en el caso de distribuciones simétricas, se priorizó el uso de los percentiles. Tanto la incertidumbre estándar como el intervalo de cobertura al 95 % fueron

relativizados con respecto a la mediana para reportarlos de manera porcentual, como es requerido por las directrices del PPCN (DCC y LCM, 2019) y como es la práctica común utilizada en el campo de inventarios de GEI.

La segunda salida (variable *hist1* en la Figura 6.10) corresponde a un gráfico que muestra dos funciones de densidad de probabilidad asociadas con la población. La primera es generada a partir de una estimación de densidad de núcleos (*kernel*) con aproximación normal, con parámetros de estimación definidos por defecto por la función *density* incluida en R. La segunda corresponde a una función de densidad de probabilidad normal, utilizando los parámetros descriptivos de la población mostrados al usuario en el resumen (mediana y desviación estándar), que sería equivalente a la distribución de probabilidad obtenida al estimar una incertidumbre expandida según los lineamientos de la GUM (JCGM, 2008a). Este gráfico tiene como objetivo mostrar al usuario las diferencias o similitudes que podrían obtenerse al aplicar el MMC de la GUM-S1 o la metodología tradicional de la GUM, para el inventario bajo análisis.

La tercera salida (variables *tabla1* y *tabla2* en la Figura 6.10) corresponde al desglose individual de las fuentes incluidas en el inventario, divididas según su metodología de cuantificación (directa o indirecta), incluyendo sus emisiones individuales, incertidumbres estándar relativas y contribuciones porcentuales tanto la emisión total del inventario como en su incertidumbre estándar. Al igual que para la emisión total, los primeros valores corresponden a las respectivas medianas y desviaciones estándar relativas de cada distribución individual asociada con la emisión de cada fuente (variables *EmisionesMD* y *EmisionesMI* de la Figura 6.10). Por su parte, las contribuciones porcentuales son estimadas como la razón entre la emisión de cada fuente y la emisión total del inventario (contribución a la emisión total) y como la razón entre el cuadrado de la incertidumbre estándar de cada fuente y el cuadrado de la incertidumbre estándar del inventario total (contribución a la incertidumbre). Esta última razón se realiza de esta forma ya que, según los lineamientos de la GUM (JCGM, 2008a), la comparación entre incertidumbres siempre debe realizarse en forma de varianzas, correspondientes al cuadrado de las incertidumbres estándar de las variables.

Funciones auxiliares:

Finalmente, las funciones auxiliares incluidas en la construcción del programa abordaron los siguientes aspectos secundarios de su funcionamiento:

- a. Creación automática de nuevas variables y menús de interfaz en función de la inclusión de nuevas fuentes de emisión o uso general de la herramienta por parte del usuario.
- b. Actualización automática de las unidades de medida mostradas en los encabezados de la interfaz.
- c. Despliegue de ventanas, actualización de valores y ejecución de acciones en función del uso de los botones dinámicos por parte del usuario.
- d. Inclusión de criterios y ejecución de rutinas de validación de los datos ingresados por el usuario.

Todas las funciones anteriores fueron incorporadas en el programa mediante la ejecución de eventos pasivos (*observe* y *observeEvent*), permitiendo una ejecución adecuada según el uso de la interfaz por parte del usuario. Adicionalmente, se generó un archivo auxiliar titulado “functions.R”, el cual contiene la lectura de todas las librerías requeridas por el programa, las funciones utilizadas para la estimación de los parámetros de las distribuciones de probabilidad triangular asimétrica y generalizada de valores extremos, las funciones de estimación utilizadas por el algoritmo *bootstrap* y los parámetros gráficos del elemento temporal dinámico (*spinner*) que se activa al ejecutar el botón de *Estimar*. El administrador de la herramienta también debe ser responsable de garantizar la actualización y disponibilidad de este archivo auxiliar, como parte de las labores de mantenimiento de la herramienta.

CAPÍTULO VII. SOBRE LA VALIDACIÓN Y PUBLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA

7.1. Validación de funcionamiento y exactitud

En concordancia con el tercer objetivo específico del proyecto, una vez finalizada la programación de la herramienta, se procede a iniciar con la validación de su funcionamiento y validez de su exactitud.

En relación con el primer aspecto, se verificaron aspectos generales de su operabilidad, como el adecuado funcionamiento de sus botones y menús dinámicos (incluyendo las opciones de configuración), el despliegue de la información correcta en cada menú desplegable, la concordancia entre las unidades de medida mostradas en la interfaz y la selección de información por parte del usuario, la correcta aplicación de los mensajes de validación de entradas, la coherencia entre la información de entrada ingresada por el usuario y las salidas mostradas por la herramienta. En todos los casos, las pruebas resultaron positivas según el funcionamiento esperado. Para la validación del efecto esperado en el cambio de las opciones de configuración de la herramienta (cantidad de iteraciones y valor semilla), se definió una base de datos de referencia (Cuadro A9) y se ejecutó la herramienta con valores de configuración por defecto (valor semilla: 19 870 y 10^6 iteraciones). Posteriormente, se cambiaron los valores de configuración (valor semilla: 100 y 10^4 iteraciones) y se compararon los resultados obtenidos. Según lo esperado, al modificar el valor semilla, las iteraciones inician en un punto distinto (aleatorio) y los resultados finales variaron levemente; al reducir la cantidad de iteraciones, las poblaciones contaron con una menor cantidad de datos, y sus curvas de distribuciones de probabilidad pueden apreciarse con una menor definición. Ambos fenómenos fueron observados, con los cambios mostrados en las Figuras A3.1, A3.3 y A3.4 de los anexos.

En relación con el segundo aspecto, y según lo descrito en el Capítulo 4 del presente documento, la exactitud de la herramienta se validó utilizando tres bases de datos de referencia (Cuadros A9, A10 y A11). Estas bases de datos fueron ingresadas a la herramienta

GEISER y también fueron procesadas mediante el uso de una herramienta programada en Excel, facilitada en el curso de capacitación de INTECO (2023), que permite la estimación de las emisiones individuales por fuente, la emisión total de inventario, sus respectivas incertidumbres estándar y la incertidumbre expandida final. Estos archivos pueden ser accedidos a través de un repositorio web mantenido por el autor con [el siguiente enlace](#). Los resultados obtenidos se muestran en los Cuadros 7.1, 7.2 y 7.3, respectivamente. Adicionalmente, en el Anexo 3, se muestran las salidas obtenidas con la herramienta GEISER al incorporar estas bases de datos (Figuras A3.1, A3.2, A3.5, A3.6, A3.7 y A3.8). En estos cuadros, se incluye, además, la diferencia relativa calculada entre los resultados de la herramienta GEISER y los datos de referencia, cuyo valor de aceptación para la validación corresponde a un 5 % (criterio de materialidad definido en el PPCN).

Según el contenido los Cuadros 7.1, 7.2 y 7.3, se evidencia claramente que la herramienta GEISER tiene un excelente desempeño en relación con su exactitud, cumpliendo con diferencias porcentuales menores al 5 % en prácticamente todos los casos. Se señala únicamente el caso de la incertidumbre estándar de la fuente 1 de la tercera base de datos (Cuadro 7.3), donde la diferencia obtenida fue de -5,24 %. Esta diferencia, aunque al ser redondeada al entero más cercano sería igual al límite de aceptación y por tanto aceptable, se justifica en la distribución utilizada para simular las poblaciones de los factores de emisión asociado con el tratamiento de residuos sólidos. Como se explicó en el Capítulo 5 del presente documento, por la cercanía de sus intervalos de variación al cero, se decidió ajustar una distribución triangular asimétrica para describir dichos factores de emisión, siendo los únicos casos en los que se utiliza esta distribución en toda la base de datos de factores de emisión. Debido a que el uso de la mediana puede tener sesgos para describir el valor más probable en este tipo de distribuciones, se decidió hacer un ajuste adicional que reduce el sesgo del estimador de localización, pero aumenta la dispersión de la población simulada. Esto se considera un aspecto clave que podría mejorarse en una próxima actualización de la herramienta. Ahora bien, dado que el criterio de materialidad del PPCN es aplicado en la práctica a la estimación del inventario final y no por fuente de emisión, este incumplimiento no se considera crítico para la validación, ya que en el valor final se presentó una diferencia del 0,63 % en la incertidumbre estándar.

Cuadro 7.1. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia del primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9)

Fuente	Estimación	GEISER	Referencia	Diferencia (%)
Fuente 1: Electricidad	Emisión (t CO ₂ e)	0,10	0,10	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,76	0,75	1,33
Fuente 2: Lubricante	Emisión (t CO ₂ e)	0,04	0,04	0,00
	Incert. Estándar (%)	6,30	6,50	-3,08
Fuente 3: Gasolina	Emisión (t CO ₂ e)	1,44	1,44	0,00
	Incert. Estándar (%)	2,70	2,80	-3,57
Inventario global	Emisión (t CO ₂ e)	1,58	1,57	0,64
	Incert. Estándar (%)	2,47	2,54	-2,76

Cuadro 7.2. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia del segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10)

Fuente	Estimación	GEISER	Referencia	Diferencia (%)
Fuente 1: Electricidad	Emisión (t CO ₂ e)	0,04	0,04	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,72	0,72	0,00
Fuente 2: Lubricante	Emisión (t CO ₂ e)	0,05	0,05	0,00
	Incert. Estándar (%)	6,30	6,50	-3,08
Fuente 3: Gasolina	Emisión (t CO ₂ e)	2,70	2,70	0,00
	Incert. Estándar (%)	2,70	2,80	-3,57
Fuente 4: Extintores	Emisión (t CO ₂ e)	0,01	0,01	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,58	0,58	0,00
Fuente 5: Recarga AC	Emisión (t CO ₂ e)	61,18	61,18	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,58	0,58	0,00
Fuente 6: ARO	Emisión (t CO ₂ e)	2,30	2,30	0,00
	Incert. Estándar (%)	22,00	22,00	0,00
Inventario global	Emisión (t CO ₂ e)	66,30	66,30	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,943	0,942	0,11

Cuadro 7.3. Principales resultados de la validación de exactitud de la herramienta GEISER, utilizando los datos de referencia actualizados de la guía del PPCN (Cuadro A11)

Fuente	Estimación	GEISER	Referencia	Diferencia (%)
Fuente 1: Resid. Sol.	Emisión (t CO ₂ e)	0,26	0,25	4,00
	Incert. Estándar (%)	36,00	38,00	-5,26
Fuente 2: Recarga AC	Emisión (t CO ₂ e)	178,50	178,50	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,12	0,12	0,00
Fuente 3: Diesel	Emisión (t CO ₂ e)	21,57	21,56	0,05
	Incert. Estándar (%)	1,70	1,70	0,00
Fuente 4: Chimenea	Emisión (t CO ₂ e)	149,43	149,43	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,63	0,63	0,00
Fuente 5.1: Aguas Resid.	Emisión (t CO ₂ e)	10,89	10,89	0,00
	Incert. Estándar (%)	16,00	15,90	0,63
Fuente 5.2: Aguas Resid.	Emisión (t CO ₂ e)	0,87	0,87	0,00
	Incert. Estándar (%)	29,00	29,00	0,00
Fuente 6: Electricidad	Emisión (t CO ₂ e)	83,14	83,14	0,00
	Incert. Estándar (%)	0,76	0,76	0,00
Inventario global	Emisión (t CO ₂ e)	444,70	444,60	0,02
	Incert. Estándar (%)	0,48	0,48	0,63

Otra diferencia relevante, aunque por debajo del límite de aceptación del 5 %, corresponde a la emisión de la fuente 1 de la tercera base de datos (4 %, tratamiento de residuos sólidos, Cuadro 7.3), cuya causa puede ser atribuible al mismo tema relacionado con el ajuste de la distribución triangular asimétrica. Las demás diferencias presentadas en los cuadros anteriores que resultaron superiores al 0 % pero menores al 5 % se consideran diferencias por concepto de redondeo o por los procesos aleatorios propios de la aplicación del MMC.

Cabe señalar que, aunque el intervalo de cobertura al 95 % reportado por la herramienta GEISER también es un resultado de alta relevancia, este no fue validado directamente, debido a que las bases de datos de referencia incluyen únicamente una incertidumbre expandida (equivalente a un intervalo simétrico), mientras que la herramienta GEISER reporta un

intervalo simétrico o asimétrico, según corresponda, de acuerdo con la distribución de probabilidad resultante para la emisión total del inventario. Sin embargo, dado que el intervalo de cobertura corresponde a un estimador de la dispersión de la población y este se encuentra estrechamente asociado con la incertidumbre estándar (estimador de dispersión cuya exactitud sí fue validada satisfactoriamente), no se consideró necesario ejecutar alguna validación adicional para el intervalo. En cualquier caso, al comparar visualmente los intervalos reportados por la herramienta GEISER (figuras del Anexo 3) con las incertidumbres expandidas de los datos de referencia (cuadros del Anexo 1), es evidente que existe una alta similitud entre ambos. De esta manera, se concluye que la herramienta GEISER presenta una exactitud adecuada para su uso en la estimación de incertidumbre de inventarios de GEI en el marco de aplicación del PPCN.

Finalmente, en relación con la operabilidad general de la herramienta, se evaluó el tiempo de procesamiento de datos y generación de salidas. Para ello, se consideró el tiempo de ejecución requerido para la resolución de los inventarios utilizados en la validación de exactitud, presentándose un tiempo máximo de 3 min para la tercera base de datos. Este comportamiento responde a lo esperado, ya que la implementación del método *bootstrap* requiere un mayor tiempo de procesamiento. En este sentido, se decidió someter a la herramienta a un escenario demandante extremo, en el que un inventario cuente con quince fuentes de emisión y todas requieran la ejecución de métodos *bootstrap*, incorporando el mismo archivo utilizado para la tercera base de datos (emisiones de chimenea, Cuadro A12). Bajo estas condiciones extremas, la herramienta GEISER presentó un tiempo de procesamiento cercano a los 25 min, el cual se considera elevado y que podría mejorarse en una próxima actualización de la herramienta. En el Anexo 3, se presentan las salidas de la herramienta obtenidas con la evaluación de este escenario extremo (Figuras A3.9 y A3.10).

7.2. Validación de robustez

En concordancia con el cuarto objetivo específico del proyecto, la robustez de la herramienta ante la presencia de heterogeneidades no observadas fue validada. Para abordar este aspecto, es necesario aclarar que, al inicio de la conceptualización de la herramienta, se plantearon las posibilidades de que el usuario o la misma herramienta escogiese la distribución de

probabilidad a ser ajustada, basándose en su experiencia o en un algoritmo de ajuste según patrones observados en los datos para cada caso requerido (datos de actividad, factores de emisión o emisiones en general). Por este motivo, en la conceptualización del proyecto, se consideró relevante la validación exhaustiva de la robustez de la herramienta para minimizar la influencia de heterogeneidades no captadas por las estrategias definidas para la elección y ajuste de la distribución de probabilidad respectiva.

Sin embargo, durante la construcción de la herramienta, al evaluar las recomendaciones literarias sobre las posibles distribuciones de probabilidad aplicables en el campo e identificar una posible falencia de bases técnicas sólidas por parte de los potenciales usuarios en el tema de estimación de incertidumbre, se concluyó que la estrategia más adecuada para la herramienta era preestablecer las distribuciones de probabilidad a ser ajustadas para cada caso, siempre que fuese posible. Esta consideración fue precisamente la que impulsó el desarrollo y publicación de los dos artículos científicos incluidos en el Capítulo 5 del presente documento, de forma que los usuarios y la misma herramienta no tuviesen que evaluar la distribución de probabilidad a ser ajustada para los factores de emisión. Para el caso de los datos de actividad y las emisiones cuantificadas directamente, se implementaron estrategias que minimizarán la cantidad de datos a ser incorporados por el usuario, con el fin de simplificar el uso de la herramienta. Esto permitió a su vez, delimitar las distribuciones de probabilidad a ser ajustadas para dichos casos. De esta manera, y buscando la aplicabilidad de la herramienta en escenarios donde los usuarios efectivamente cuentan con archivos de datos que describen el comportamiento de una variable de entrada del inventario, únicamente se habilitó la opción de incorporar datos bajo la metodología de *Mediciones internas (datos crudos)*, por lo que la validación de robustez de la herramienta fue realizada únicamente para el escenario en que se incorpore una emisión o dato de actividad bajo esta metodología.

De acuerdo con la experiencia del autor, la revisión literaria realizada y las bases de datos de referencia utilizadas, los datos incorporados por los usuarios pueden utilizarse de dos formas: para estimar un promedio o una suma total. En ambos casos, la presencia de heterogeneidades no observadas o valores extremos puede ocasionar un aumento o disminución drásticos en las estimaciones, por lo que se buscó brindar robustez a la herramienta ante estos casos. En

primer lugar, y para evitar problemas de ajuste de distribuciones de probabilidad, se priorizó el uso de métodos *bootstrap* para la simulación de una “población observada” asociada con el promedio, evitando la necesidad de partir de supuestos sobre el comportamiento esperado que puedan verse afectados por heterogeneidades en los datos y distorsionen la dispersión de la población simulada. Ahora bien, las características del promedio hacen que su uso como estimador de localización sea vulnerable a posibles valores extremos. Por lo tanto, en segundo lugar, se incorporó la posibilidad de que el usuario escoja la estimación de la mediana en lugar del promedio, siendo el primero un estimador más robusto a la presencia de valores extremos. De esta manera, mediante la incorporación del método *bootstrap* y de la mediana como estimador de localización, se proporcionó la robustez buscada.

Para validar este aspecto, primero se partió de la base de datos asociada con las emisiones de chimenea (Cuadro A12) para estimar valores promedio y mediana de referencia y, posteriormente, se sustituyeron hasta un 10 % de valores extremos superiores e inferiores (cuatro datos generados de forma pseudoaleatoria) para evaluar el impacto en la emisión estimada y su incertidumbre. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 7.4. En el Anexo 1 se incluyen las bases de datos con los valores extremos (Cuadros A13, A14, A15 y A16) y, en el Anexo 3, se presentan algunas de las salidas de la herramienta GEISER para este proceso de validación de robustez (Figuras A3.11, A3.12, A3.13, A3.14, A3.15 y A3.16).

Cuadro 7.4. Principales resultados de la validación de la robustez de la herramienta GEISER incorporando hasta un 10 % de valores extremos en los datos utilizados para la estimación de una emisión cuantificada de forma directa

Escenario	Estimador	Emisión (t CO₂e)	Incert. Estándar (%)
Ningún valor extremo	Promedio	149,44	0,264
Ningún valor extremo	Mediana	150,03	0,218
Dos valores extremos superiores	Mediana	150,05	0,200
Cuatro valores extremos superiores	Mediana	150,08	0,227
Dos valores extremos inferiores	Mediana	149,98	0,259
Cuatro valores extremos inferiores	Mediana	149,98	0,260

De acuerdo con el contenido del Cuadro 7.4, es evidente que el uso de la mediana le brinda robustez tanto a la estimación de la emisión como a su incertidumbre estándar ante la presencia de valores extremos en los datos, siendo la primera prácticamente igual en todos los casos, y la segunda ligeramente menor en la mediana que en el promedio. De esta manera, se concluye que la herramienta GEISER presenta una robustez adecuada ante valores extremos o heterogeneidades no observadas por el usuario en los datos ingresados.

Para el caso de la suma de datos, la última versión trabajada de la herramienta no incorporó estrategias específicas para minimizar la influencia de valores extremos, ya que su presencia no tendría impacto en la estimación de la incertidumbre de la variable (principal objetivo de la herramienta) al no aplicar una evaluación de tipo A. Se espera abordar esta situación en una próxima actualización de la herramienta.

7.3. Validación de uso

Previo a su publicación, y por recomendación del comité asesor del proyecto, la herramienta GEISER fue sometida a un proceso breve de validación de uso por parte de un usuario potencial. Para ello, se solicitó la colaboración de un profesional con experiencia en la implementación y verificación de inventarios de GEI en el marco del PPCN, con conocimiento básico en las directrices y guía metodológica de estimación de incertidumbre del PPCN. El objetivo pretendido de este proceso fue identificar posibles mejoras que faciliten el lanzamiento e implementación inicial de los usuarios, así como corregir errores en una etapa temprana.

De acuerdo con los comentarios de este primer usuario, quien recibió una breve introducción a la herramienta previo a su uso, la versión final de la herramienta cuenta con varias oportunidades de mejora, destacándose:

- a. La inclusión de la cuantificación de emisiones por el método de balances de masa o estequiometría, un método particular de cuantificación indirecta de las emisiones a partir de la cantidad de reactivos o entradas consumidas (dato de actividad) y los factores estequiométricos y eficiencias de los procesos de conversión (factores de emisión) de estas entradas en GEI.

- b. La inclusión de instrucciones adicionales para la instalación de R y RStudio, *softwares* necesarios para la ejecución de GEISER y que podrían ser desconocidos para los usuarios potenciales. Estas instrucciones también podrían incluir indicaciones para realizar la corrida inicial de GEISER y la descarga y lectura de las librerías requeridas.
- c. La inclusión de más factores de emisión, más GEI con sus respectivos potenciales de calentamiento global (PCG) y más fuentes de emisión por metodología de cuantificación, para que la herramienta GEISER pueda ser implementada en una variedad más amplia de inventarios ya desarrollados por las organizaciones nacionales y regionales.

De las mejoras recopiladas gracias a este ejercicio adicional, fue posible implementar la generación de instrucciones adicionales relacionadas con R y RStudio previo a la publicación de la herramienta, como se detalla a continuación. Las otras mejores fueron incluidas dentro de las recomendaciones del proyecto (ver Capítulo 8 del presente documento).

7.4. Publicación

En concordancia con el quinto y último objetivo específico del proyecto, la herramienta GEISER fue publicada en una plataforma de libre acceso para todos los usuarios interesados en utilizarla y aplicarla para estimar la incertidumbre de medida asociada con sus inventarios de GEI. Aunque al inicio de la conceptualización de la herramienta se pretendía generar y publicar una aplicación web disponible en línea para los usuarios, aprovechando los beneficios de las interfases web creadas en *shiny* (Chang *et al.*, 2023), su implementación se vio limitada por aspectos presupuestarios. Esto ya que los servidores requeridos, para garantizar la continua disponibilidad web de la herramienta y su adecuada ejecución en presencia de múltiples usuarios simultáneos, poseen costos de mantenimiento periódicos que se salen de las posibilidades actuales del desarrollador, y las versiones gratuitas probadas no cumplieron con las características de disponibilidad y ejecución pretendidas.

Ante este panorama, se decidió generar [el siguiente enlace de descarga](#) a través un repositorio web mantenido por el autor, desde donde los usuarios pueden acceder a la versión final de la

herramienta GEISER generada con este proyecto (versión 0.9, primera versión publicada como versión de prueba). De esta manera, los usuarios podrán descargar un paquete de archivos que incluye:

- a. *GEISER 0.9.R*: archivo principal de la herramienta GEISER.
- b. *functions.R*: archivo secundario que incluye las funciones auxiliares requeridas para la ejecución de la herramienta GEISER.
- c. *Base_IMN.xlsx*: Base de datos con factores de emisión y potenciales de calentamiento global tomados de IMN (2023) y requeridos para la ejecución de GEISER.
- d. *READ ME – Inicio de GEISER.txt*: Archivo de instrucciones adicionales a considerar previo a la primera ejecución de GEISER, incluyendo instalaciones de softwares (R y RStudio) y librerías requeridas para la ejecución de GEISER.

Al momento de la redacción del presente documento, la herramienta se encuentra en proceso de ser incorporada para su descarga a través del sitio web del Laboratorio Costarricense de Metrología (LCM o LACOMET, www.lcm.go.cr), institución que ha mostrado interés en su desarrollo, mantenimiento y publicación para la comunidad metrológica del país. Para una próxima versión de la herramienta, se buscarán otras instituciones interesadas en su desarrollo para lograr su publicación como aplicación web y facilitar así su uso por parte de todos los usuarios, sin requerir la instalación o conocimientos de R o RStudio.

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como principales conclusiones obtenidas tras el desarrollo del presente proyecto se destacan:

- a. Se elaboraron y publicaron dos propuestas de estimación de incertidumbre de medida para los factores de emisión con distribuciones asimétricas y otros factores de emisión incluidos en la lista nacional oficial mantenida por el IMN. Estas propuestas fueron adoptadas por el IMN para ser incluidas como las incertidumbres de medida de los factores de emisión oficiales en Costa Rica.
- b. Se construyó la herramienta GEISER como una herramienta estadística de libre acceso que permite estimar la incertidumbre de medida para las emisiones de un inventario de gases de efecto invernadero mediante la propagación de distribuciones de probabilidad aplicando el método de simulación de Monte Carlo. Para ello, se recurrió a su programación en lenguaje de programación R, adaptando funciones y parámetros auxiliares de otros lenguajes de programación web mediante el uso de las librerías asociadas con *RShiny*.
- c. Se validó satisfactoriamente la exactitud de los resultados producidos por la herramienta GEISER, específicamente las estimaciones de emisiones por fuente y emisión total del inventario, así como sus incertidumbres de medida respectivas, al obtener diferencias menores que el criterio de materialidad definido en el PPCN entre los resultados de la herramienta y las bases de referencia consideradas.
- d. Se validó satisfactoriamente la robustez de la herramienta GEISER ante la presencia de heterogeneidades no observadas o valores extremos en las posibles bases de datos que son incorporadas por los usuarios mediante la implementación de métodos *bootstrap* y el uso de la mediana como estimador de localización.
- e. Se validó el uso de la herramienta GEISER por parte de un potencial usuario previo a su publicación, permitiendo asegurar su funcionalidad e implementación por parte de los futuros usuarios e identificar mejoras en próximas versiones de la herramienta.
- f. Se publicó la herramienta GEISER a través de un enlace de descarga asociado con un repositorio web mantenido por el autor, desde donde los usuarios pueden acceder a la versión final de la herramienta GEISER generada con este proyecto.

Posterior a la validación y publicación de la herramienta, se identifican varias posibles recomendaciones de mejoras a ser implementadas en futuras versiones, a raíz de sus limitaciones actuales. A continuación, se detallan las principales limitaciones y recomendaciones de mejora a considerar:

- a. Se reconoce que la herramienta no considera un tipo de cuantificación indirecta relevante y utilizado en los inventarios de GEI, como lo es el balance de masa o balance estequiométrico. Esta metodología se basa en la estimación de una cantidad generada de un producto de interés (un GEI) a partir del conocimiento de la reacción química que lo produce, la cantidad de reactivos o materia prima consumida en el proceso (dato de actividad) y la eficiencia del proceso. Debido a la amplia variedad de posibles reacciones generadoras de GEI y su especificidad según cada inventario organizacional, se optó por excluir esta metodología de cuantificación en la primera versión de la herramienta y se plantea la posibilidad de recopilar las reacciones más utilizadas en los inventarios nacionales para incluirlas en una próxima actualización de la herramienta.
- b. Se reconoce que la capacidad actual de la herramienta (cinco fuentes de cuantificación indirecta y diez fuentes de cuantificación directa) es limitada y puede ser insuficiente para inventarios de GEI de organizaciones grandes y complejas (tipo D según el PPCN) o con muchas fuentes de emisión identificadas (más de quince), por lo que se plantea la posibilidad de ampliar la capacidad de la herramienta en una próxima actualización de la misma. Para la implementación de esta mejora, es necesario considerar un balance entre la ampliación de la capacidad de la herramienta y su tiempo de procesamiento de datos.
- c. En relación con el tiempo de procesamiento, se reconoce que, ante escenarios extremos que requieran un alto uso de los métodos *bootstrap*, el tiempo requerido para la generación de las salidas de la herramienta puede ser muy extenso (hasta 25 min según las pruebas realizadas). Por lo tanto, se plantea la posibilidad de rediseñar y optimizar el código programado de la herramienta en una próxima actualización de esta, para reducir su tiempo de procesamiento, principalmente relacionado con la cantidad de iteraciones requeridas para la ejecución de métodos *bootstrap*.

- d. La definición de cada emisión estimada por fuente como un elemento reactivo dentro del código de la herramienta generó una limitación en su uso posterior para la estimación de la emisión total del inventario, el cual debe ser estimado múltiples veces (una vez para cada elemento de salida) en cada ejecución de la herramienta. Se reconoce que esta situación corresponde a un error conceptual en la programación de la herramienta y genera un procesamiento excesivo de los datos, especialmente en escenarios de inventarios con muchas fuentes de emisión. Por lo tanto, se plantea la posibilidad de rediseñar y optimizar el código programado de la herramienta en una próxima actualización de esta, para que la emisión total del inventario, y no las emisiones individuales por fuente, sea el elemento reactivo estimado, de manera que solo deba ser procesado una vez para generar todas las salidas de la herramienta.
- e. Aunque las salidas actuales generadas por la herramienta pueden ser copiadas por el usuario e incorporadas en hojas de cálculo o procesadores de texto, se reconoce la limitación del usuario para acceder a las salidas de la herramienta de forma directa y práctica. Por lo tanto, se plantea la posibilidad de incorporar, una próxima actualización de la herramienta, la opción de descargar todas sus salidas como un archivo en un formato conveniente para su uso subsecuente. Esta opción podría considerar además las entradas de información ingresadas por el usuario, garantizando la transparencia y trazabilidad de la información en los reportes de resultados generados.
- f. Durante el proceso de validación de la herramienta, se requirió realizar procesos repetitivos de incorporación de las mismas entradas de información a la herramienta, haciendo los cambios requeridos hasta obtener los resultados deseados. Se reconoce que el proceso cuidadoso de la incorporación individual de los datos de entrada es necesario para el correcto funcionamiento de la herramienta. Sin embargo, su repetición puede facilitarse mediante la incorporación, una próxima actualización de la herramienta, de una opción para descargar las entradas ingresadas como un archivo de datos que pueda ser incorporado posteriormente por el usuario, de forma que se carguen automáticamente dichos datos como información de entrada en la herramienta. Esta opción ha sido observada en otros *softwares* de naturaleza similar a la herramienta generada en el presente proyecto, como es el caso del *NIST*

Uncertainty Machine (Lafarge y Possolo, 2015). Esta mejora podría facilitar y hacer más práctico el uso repetitivo de la herramienta en los procesos de capacitación para su uso y en procesos de validación y verificación de los inventarios de GEI a los que son sometidos continuamente las organizaciones, usuarias potenciales de la herramienta, como parte del mantenimiento de su declaración de carbono neutralidad en el marco del PPCN.

- g. Aunque se realizó un trabajo extenso para dotar de incertidumbres a los factores de emisión de la lista oficial del IMN, aún quedan factores de emisión con dicha información pendiente de estimar. Adicionalmente, aunque el PPCN prioriza el uso de factores de emisión incluidos en esta lista oficial, también permite el uso de factores de emisión obtenidos de otras fuentes con validez técnica (por ejemplo: IPCC, 2006a) o estimados por cada organización. Considerando estas opciones, se reconoce que la herramienta tiene la limitación de contar con una base de datos de factores de emisión reducida, y que no puede ser ampliada por el usuario para incorporar otros factores de emisión no considerados de forma predefinida dentro de la herramienta. Por lo tanto, en una próxima actualización de la herramienta, se plantea la posibilidad de ampliar la base de datos de factores de emisión utilizada por la herramienta e incorporar la opción de que el usuario introduzca su propio factor de emisión a utilizar, con su debida incertidumbre estándar.
- h. Para los factores de emisión asociados con el tratamiento de residuos sólidos, caracterizados por intervalos de variación cercanos a cero y para los cuales se definió el uso de una distribución de probabilidad triangular asimétrica, la herramienta actualmente utiliza un ajuste adicional para reducir el posible sesgo de la mediana como estimador de localización, aumentando levemente la dispersión de dicha población. Se reconoce la necesidad de implementar una mejora estrategia en una próxima actualización de la herramienta para evitar problemas de sesgos en el procesamiento de datos asociados con estas distribuciones de probabilidad.
- i. Para las cuantificaciones directas, se reconoce que la cantidad de GEI incorporados para selección el usuario es limitada y no contiene la totalidad de gases con PCG incluidos en la lista oficial del IMN. Adicionalmente, y al igual que para los factores de emisión, el PPCN permite la inclusión de otros gases con sus respectivos PCG de

ser necesario, dependiendo de su pertinencia para el inventario de cada organización. Por lo tanto, en una próxima actualización de la herramienta, se plantea la posibilidad de ampliar la base de datos de gases (y sus respectivos PCG) utilizada por la herramienta e incorporar la opción de que el usuario introduzca su propio gas a utilizar, con su debido PCG.

- j. Para fortalecer la robustez de la herramienta, en una próxima actualización, se valorará la inclusión de alguna estrategia que le permita al usuario minimizar la influencia de posible valores extremos o heterogeneidades no observadas en datos combinados mediante una suma.
- k. Aunque los lineamientos de la Guía del PPCN (DCC y LCM, 2020) no consideran la inclusión de correlaciones entre las variables utilizadas en la estimación de la incertidumbre global de un inventario de GEI, estudios como los publicados recientemente por Marujo *et al.* (2022) y Cox, Merlone y Gardiner (2022) señalan la necesidad de reconsiderar este supuesto. Por lo tanto, se considera pertinente ampliar el estudio de la existencia de estas correlaciones y covarianza entre las variables y su impacto en las estimaciones finales de las incertidumbres combinadas de los inventarios de GEI.
- l. Para facilitar el uso generalizado por parte de los usuarios menos familiarizados con los *softwares* R o RStudio, en una próxima actualización de la herramienta, se plantea la posibilidad de buscar nuevas organizaciones o instituciones interesadas en el desarrollo, mejora e implementación de GEISER para lograr su publicación como una aplicación web disponible en línea para los usuarios.

Finalmente, se destaca la gran relevancia y potencial impacto que la herramienta generada en el presente proyecto puede tener en la cuantificación de la incertidumbre de inventarios de GEI en Costa Rica y el mundo. Aunque se cuenta con literatura y guías de estimación que abordan esta temática, en la actualidad persisten dificultades y retos en su comprensión e implementación debido a su alto nivel técnico y especificidad de aplicación. Con este proyecto, los esquemas de certificación y declaración de carbono neutralidad (como el PPCN de Costa Rica) y todos sus actores involucrados (organizaciones, profesionales, entes fiscalizadores, entre otros) ahora cuentan con una herramienta novedosa que cierra brechas

existentes en el cumplimiento de los requisitos internacionalmente establecidos para la cuantificación confiable de los inventarios de GEI, aportando insumos de calidad para una mejor toma de decisión en el combate contra el cambio climático. De esta manera, Costa Rica mantiene su posicionamiento internacional como pionero y referente en el ámbito ambiental y mejora sus capacidades metrológicas al incursionar e innovar en la cuantificación y estimación de incertidumbre de sus emisiones de GEI. Se invita a la comunidad científica nacional e internacional a utilizar, fortalecer y mejorar la herramienta GEISER, y a seguir desarrollando estudios que permitan una mayor comprensión del comportamiento y fuentes de variabilidad asociadas con la cuantificación de las emisiones de GEI, su modelamiento estadístico mediante funciones de distribución de probabilidad y la construcción de nuevas y mejores herramientas que se adapten a las necesidades siempre cambiantes de la ciencia de las mediciones.

CAPÍTULO IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abel, G. (2015). fanplot: an R package for visualizing sequential distributions. *The R Journal*, 7(1), 15-23.
- Apostol, T. (1967). *Calculus Volume 1 – One-Variable Calculus with an Introduction to Linear Algebra* (2nda ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Arnold, J., Daroczi, G., Werth, B., Weitzner, B., Kunst, J., Auguie, B., . . . Talbot, J. (2021). *ggthemes: Extra Themes, Scales and Geoms for 'ggplot2'* [version 4.2.4]. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggthemes/index.html>
- Ashour, S., y Abdel-hameed, M. (2010). Approximate skew normal distribution. *Journal of Advanced Research*, 1(4), 341-350. doi:10.1016/j.jare.2010.06.004
- ASTM. (2019). *Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter*. ASTM.
- Attali, D. (2021). *shinyjs: Easily Improve the User Experience of Your Shiny Apps in Seconds* [version 2.1.0]. <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyjs/index.html>
- Azzalini, A. (2020). *The Skew-Normal and Related Distributions Such as the Skew-t* [version 1.6-2]. <http://azzalini.stat.unipd.it/SN>
- Azzalini, A., y Capitanio, A. (2014). *The skew-normal and related families*. Cambridge University Press.
- Bache, S., Wickham, H., y Henry, L. (2022). *magrittr: A Forward-Pipe Operator for R* [version 2.0.3]. <https://cran.r-project.org/web/packages/magrittr/index.html>
- Bastidas, G., y Hernández, R. (2019). Cambio climático algunos aspectos a considerar para la supervivencia del ser vivo: revisión sistemática de la literatura. *Revista Cuidarte*, 10(3), e664. <http://dx.doi.org/10.15649/cuidarte.v10i3.664>
- Bell, S. (2001). *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement – Measurement Good Practice Guide No. 11*. National Physical Laboratory [NPL]. <https://www.npl.co.uk/gpgs/corrosion-control-checklist>

Benavides, H. O., y León, G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

Benkovitz, C. (1985). *EPA/600/7-85/036: Framework for the uncertainty analysis of NAPAP emissions inventory*. U.S. Environmental Protection Agency. <http://cfpub.epa.gov/si/ntislink.cfm?dirEntryID=44809>

Bharvirkar, R. (1999). *Quantification of Variability and Uncertainty in Emission Factors and Emissions Inventories* [Tesis para optar por el grado de Master en Ingeniería Ambiental]. North Carolina State University, USA. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/885>

Bosak, D., Kramer, K., Tran, D., y Huang, R. (2023). *reporter: Creates Statistical Reports [version 1.4.1]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/reporter/index.html>

BSCS Science Learning. (2022). *Unit 1: Carbon & Climate*. Carbon Connections: The Carbon Cycle and the Science of Climate. <https://carbonconnections.bscs.org/>

Cadwallader, A., y VanBriesen, J. (2017). Incorporating Uncertainty into Future Estimates of Nitrous Oxide Emissions from Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 143(8), 04017029. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001231

Canty, A., y Ripley, B. (2022). *boot: Bootstrap R (S-Plus) Functions [version 1.3-28.1]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/boot/index.html>

Carnell, R. (2022). *triangle: Distribution Functions and Parameter Estimates for the Triangle Distribution [version 1.0]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/triangle/index.html>

Ceccatelli, A., Dybdal, A., Fajgelj, A., y Pitois, A. (2017). Calculation spreadsheet for uncertainty estimation of measurement results in gamma-ray spectrometry and its validation for quality assurance purpose. *Applied Radiation and Isotopes*, 124, 7-15. doi:10.1016/j.apradiso.2017.03.002

Chang, W., y Borges, B. (2021). *shinydashboard: Create Dashboards with 'Shiny' [version 0.7.2]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/shinydashboard/index.html>

Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Sievert, C., Schloerke, B., Xie, Y., . . . Borges, B. (2023). *shiny: Web Application Framework for R [version 1.7.5]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/shiny/index.html>

Cho, C., Kang, S., Kim, M., Hong, Y., y Jeon, E. (2018). Uncertainty Analysis for the CH₄ Emission Factor of Thermal Power Plant by Monte Carlo Simulation. *Sustainability*, 10(10), 3448. doi:10.3390/su10103448

CIAAW. (2020). *Atomic Weights of the Elements 2020*. CIAAW. Consultado en enero de 2022. <https://www.ciaaw.org/atomic-weights.htm>

Clean Energy Regulator. (2021). *NGER Uncertainty Calculator*. Clean Energy Regulator. <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/Forms-and-resources/Calculators>

Cox, M., Merlone, A., y Gardiner, T. (2022). *Accounting for covariance in emissions' inventories*. Metrology for Climate Action. <https://bipmwmo22.org/submissions/submission/169>

DCC. (2015). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/resumen-plan-de-accion-estrategia-nacional-de-cambio-climatico.pdf>

DCC. (2021). *Programa País Carbono Neutralidad de Costa Rica*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/05/PPCN%20Folleto%20general.pdf?t=1618521827>

DCC y LCM. (2019). *Directrices para la estimación y análisis de la incertidumbre de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PPCN-directricesIncertidumbre.pdf>

DCC y LCM. (2020). *Guía metodológica para la estimación y análisis de la incertidumbre de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (GEI)*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PPCN-GuiaIncertidumbre.pdf?x64720>

- Dennis, J., y Schnabel, R. (1996). *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. SIAM.
- DNV. (2022). *Voluntary Emission Reduction*. Det Norske Veritas Group (DNV). <https://www.dnv.co.uk/services/voluntary-emission-reduction-45634>
- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1-26. doi:10.1214/aos/1176344552
- Eggleston, H. (1993). Uncertainties in the estimates of VOCs Emissions from Motor cars. *Proceedings of TNO/EURASAP working on the reliability of VOC Emission databases*. TNO.
- El-Fadel, M., Zeinati, M., Ghaddar, N., y Mezher, T. (2001). Uncertainty in Estimating and Mitigating Industrial Related GHG Emissions. *Energy Policy*, 29(12), 1031–1043. doi:10.1016/S0301-4215(01)00033-7
- Ellison, S. (2018). *metRology: Support for Metrological Applications*. LGC .<https://r-forge.r-project.org/projects/metrology/>
- EPA. (1996). *Evaluating the uncertainty of emission estimates. Final Report*. Emission Inventory Improvement Program. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/vi04.pdf>
- Estrada, M. (2001). *Cambio climático global: causas y consecuencias*. Universidad para la Cooperación Internacional de Costa Rica. <https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGTS/MGTS15/MGTSV15-02/SEMANA3/climatico.pdf>
- Fausser, P., Sørensen, P., Nielsen, M., Winther, M., Plejdrup, M., Hoffmann, L., . . . Nielsen, O. (2011). Monte Carlo (Tier 2) uncertainty analysis of Danish Greenhouse gas emission inventory. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(3-4), 145-160. doi:10.1080/20430779.2011.621949
- FEDEMUR. (2002). *Estudio de caracterización de desechos que ingresan al relleno sanitario de Río Azul*. Federación Municipal Regional de Este.
- FONAFIFO. (2018). *Créditos de carbono marca UCC*. Desarrollo y Comercialización FONAFIFO. <https://www.fonafifo.go.cr/es/servicios/desarrollo-y-comercializacion/>

- Frey, C. (2007). *Quantification of Uncertainty in Emission Factors and Inventories*. Emission Inventory Conference. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei16/session5/frey.pdf>
- Galindo, L., Samaniego, J., Alatorre, J., Carbonell, J., Reyes, O., y Sánchez, L. (2015). *Ocho tesis sobre el cambio climático y el desarrollo sostenible en América Latina*. Estudios del Cambio Climático en América Latina - CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39840-ocho-tesis-cambio-climatico-desarrollo-sostenible-america-latina>
- GHG Protocol. (2003). *GHG Protocol Uncertainty Calculation Tool*. World Resources Institute. <https://ghgprotocol.org/calculation-tools>
- Gil, S. (2014). *Bootstrap en poblaciones finitas*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Granada. https://masteres.ugr.es/moea/pages/tfm1314/tfm_samuel_gil_abreu/
- Gobierno de Costa Rica. (2019). *Plan Nacional de Descarbonización*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf>
- Gobierno de Costa Rica. (2022). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía. https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP_Documento-2022-2026_VC.pdf
- González, Y., Fernández, Y., y Gutiérrez, T. (2013). El cambio climático y sus efectos en la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 51(3), 331-337.
- Hall, B., y White, D. (2017). *An Introduction to Measurement Uncertainty*. Measurement Standards Laboratory of New Zealand. doi:10.5281/zenodo.3872590
- Hall, B., Hall, M., Brown, E., Hermanson, R., Charpentier, E., Laurent, S., y Singmann, H. (2021). *LaplacesDemon: Complete Environment for Bayesian Inference [version 16.1.6]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/LaplacesDemon/index.html>

- Hasselman, B. (2018). *nleqslv: Solve Systems of Nonlinear Equations [version 3.3.4]*. Consultado en octubre de 2020. <https://cran.r-project.org/web/packages/nleqslv/index.html>
- Hergoualc'h, K., Mueller, N., Bernoux, M., Kasimir, A., van der Weerden, T., y Ogle, S. (2021). Improved Accuracy and Reduced Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories by Refining the IPCC Emission Factor for Direct N₂O Emissions from Nitrogen Inputs to Managed Soils. *Global Change Biology*, 21. doi:10.1111/gcb.15884
- Iannone, R., y Cheng, J. (2022). *shinyvalidate: Input Validation for Shiny Apps [version 0.1.2]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyvalidate/index.html>
- IMN. (2021). *Factores de emisión*. Programa de Cambio Climático del IMN: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/category/publications/factores-de-emision/>
- IMN. (2023). *Factores de emisión*. Programa de Cambio Climático del IMN: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/category/publications/factores-de-emision/>.
- INTECO. (2011). *Sistema de gestión para demostrar la carbono neutralidad (Norma INTE 12-01-06, Cor.2/2013)*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. [https://www.ucipfg.com/repositorio/ALIARSE/Temas/T4/Lectura%202020INTE%2012-01-06-2011%20\(se%20comparte%20con%20fines%20didacticos\).pdf](https://www.ucipfg.com/repositorio/ALIARSE/Temas/T4/Lectura%202020INTE%2012-01-06-2011%20(se%20comparte%20con%20fines%20didacticos).pdf)
- INTECO. (2016). *Norma para demostrar la Carbono Neutralidad. Requisitos (Norma INTE B5:2016)*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. <https://www.inteco.org/shop/inte-b5-2016-norma-para-demostrar-la-carbono-neutralidad-requisitos-163>
- INTECO. (2021). *Norma para demostrar la Carbono Neutralidad. Requisitos (Norma INTE B5:2021)*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. <https://www.inteco.org/shop/inte-b5-2021-norma-para-demostrar-la-carbono-neutralidad-requisitos-9659?product=9659#attr=>
- INTECO. (2023). *Incertidumbre para inventarios de gases de efecto invernadero*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. <https://capacitaciones.inteco.org/>
- IPCC. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC Publications. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- IPCC. (2006a). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC Publications. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

- IPCC. (2006b). *Volume 1: General Guidance and Reporting - Chapter 3: Uncertainties*. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf
- IPCC. (2007). *Global Climate Projections*. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter10-1.pdf>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC Publications. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- IPCC. (2020). *IPCC Inventory Software [version 2.691]*. IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/index.html>
- ISO. (2006). *Gases de efecto invernadero — Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (Norma ISO 14064-1:2006)*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-1:ed-1:v1:es>
- ISO. (2018). *Gases de efecto invernadero — Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (Norma ISO 14061-1:2018)*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-1:ed-2:v1:es>
- ISO/IEC. (2017). *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (Norma ISO/IEC 17025:2017)*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v2:es>
- Jaynes, E. T. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Physical Review Journal*, 106, 620-630. doi:10.1103/PhysRev.106.620
- JCGM. (2008a). *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement GUM: 1995 with minor corrections. JCGM:100*. Buró Internacional de Pesas y Medidas [BIPM]. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- JCGM. (2008b). *Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the GUM: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. JCGM:101*. Buró Internacional de Pesas y

Medidas

https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_101_2008_E.pdf

JCGM. (2012). *International vocabulary of metrology VIM – Basic and general concepts and associated terms JCGM:200*. Buró Internacional de Pesas y Medidas [BIPM]. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1

Johnson, N., Kotz, S., y Balakrishnan, N. (1995). *Continuous univariate distributions* (2nda ed., Vol. 2). John Wiley & Sons Inc.

Jonas, M., White, T., Marland, G., Lieberman, D., Nahorski, Z., y Nilsson, S. (2010). Dealing with uncertainty in GHG inventories: How to go about it? *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 633, 229-245. doi:10.1007/978-3-642-03735-1_11

Kline, S., y McClintock, F. (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.

Lafarge, T., y Possolo, A. (2015). The NIST Uncertainty Machine. *NCSLI Measure Journal of Measurement Science*, 10(3), 20-27. doi:10.1080/19315775.2015.11721732

Marujo, E., Rodrigues, G., Amaral, W., Leonardis, F., y Covatti, A. (2022). A procedure to estimate variances and covariances on GHG emissions and inventories. *Carbon Management*, 13(1), 310-320. doi:doi.org/10.1080/17583004.2022.2086486

McMurray, A., Pearson, T., y Casarim, F. (2017). *Guidance on applying the monte carlo approach to uncertainty analyses in forestry and greenhouse gas accounting*. Winrock International. <https://winrock.org/wp-content/uploads/2018/03/UncertaintyReport-12.26.17.pdf>

Metrodata GmbH. (2017). *GUM Workbench [version 1.4]*. Metrodata GmbH. http://www.metrodata.de/ver14_en.html

Milne, A., Glendining, M., Bellamy, P., Misselbrook, T., Gilhespy, S., Rivas-Casado, M., . . . Whitmore, A. (2014). Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture. *Atmospheric Environment*, 82, 94-105. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.012

- MINAE. (2012). *Oficialización del Programa País de Carbono Neutralidad*. Dirección de Gestión de Calidad Ambiental DIGECA. http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/acuerdo_36-2012_minaet_oficializa_programa_pais_carbono_neutralidad.pdf
- Molina-Castro, G. (2022a). Evaluación de factores de corrección para estimar incertidumbres de distribuciones triangulares con intervalos de cobertura del 95 %. *Ingeniería*, 32(2), 14-28. doi:doi.org/0.15517/ri.v32i2.49699
- Molina-Castro, G. (2022b). A Monte Carlo Method for Quantifying Uncertainties in the Official Greenhouse Gas Emission Factors Database of Costa Rica. *Frontiers in Environmental Science*, 10. doi:doi.org/10.3389/fenvs.2022.896256
- Molina-Castro, G., y Calderón-Jiménez, B. (2021). Evaluating Asymmetric Approaches to the Estimation of Standard Uncertainties for Emission Factors in the Fuel Sector of Costa Rica. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 662052. doi:doi.org/10.3389/fenvs.2021.662052
- Monni, S., Syri, S., y Savolainen, I. (2004). Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory. *Environmental Science & Policy*, 7(2), 87-98. doi:10.1016/j.envsci.2004.01.002
- Morales, M. (2016). *Evaluación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en automóviles generado por el uso no energético de lubricantes/aceites de motor) en el Gran Área Metropolitana* [Tesis final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química]. Repositorio Institucional Kérwá - UCR.
- Morgan, M., y Henrion, M. (1990). *Uncertainty – A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press.
- Muraleedharan, G., Soares, C., y Lucas, C. (2011). Characteristic and moment generating functions of generalized extreme value distribution (GEV). En *Sea Level Rise, Coastal Engineering, Shorelines and Tides* (pp. 269-276). Nova Science Publishers.
- NASA. (2022). *Cambio climático: ¿Cómo sabemos lo que sabemos?* Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/evidencia/>

NASA GISS. (2022). *GISS Surface Temperature Analysis*. Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA Earth Sciences Division. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

NASA SVS. (2020). *Sources of Methane*. NASA Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/4799>

Näykki, T., Virtanen, A., Varkonyi, E., y Innovatics Oy. (2021). *MUkit: Measurement Uncertainty Kit*. ENVICAL SYKE, Finland. https://www.syke.fi/en-US/Services/Quality_and_laboratory_services/Calibration_services_and_contract_laboratory/MUkit_Measurement_Uncertainty_Kit#About%20the%20program

NOAA. (2022). *Trends in Atmospheric Methane: Global CH₄ Monthly Means*. Global Monitoring Laboratory - Earth System Research Laboratories. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

NPL. (2018). *NPLUnc_101: Software for measurement uncertainty evaluation*. NPL.: <https://www.npl.co.uk/resources/software/measurement-uncertainty-evaluation>

ONU. (2022a). *¿Qué es el cambio climático?* Naciones Unidas, Acción por el Clima. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

ONU. (2022b). *El Acuerdo de París*. Naciones Unidas, Acción por el Clima. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

Petty, N., y Dye, S. (2013). *Notes on Triangular Distributions*. Statistics Learning Center. Consultado en Octubre de 2020. <https://learnandteachstatistics.files.wordpress.com/2013/07/notes-on-triangle-distributions.pdf>

Posit Team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Posit Software. PBC: <http://www.posit.co/>

Possolo, A., Merkatas, C., y Bodnar, O. (2019). Asymmetrical uncertainties. *Metrologia*, 56, 045009. doi:10.1088/1681-7575/ab2a8d

- Possolo, A., Van der Veen, A., Meija, J., y Hibbert, D. (2018). Interpreting and Propagating the Uncertainty of the Standard Atomic Weights (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem*, 90(2), 395–424. doi:doi.org/10.1515/pac-2016-0402
- Pouliot, G., Wisner, E., Mobley, D., y Hunt, W. (2012). Quantification of emission factor uncertainty. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(3), 287–298. doi:10.1080/10473289.2011.649155
- Quilcaille, Y., Gasser, T., Ciais, P., Lecocq, F., Janssens-Maenhout, G., y Mohr, S. (2018). Uncertainty in Projected Climate Change Arising from Uncertain Fossil-Fuel Emission Factors. *Environmental Research Letters*, 13, 044017. doi:10.1088/1748-9326/aab304
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez, A., De Keizer, C., Van der Sluijs, J., Olivier, J., y Brandes, L. (2008). Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990–2004. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8263–8272. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.059
- Ramírez-Montoya, J., Osuna-Vergara, I., Rojas-Mora, J., y Guerrero-Gómez, S. (2016). Bootstrap and Jackknife resampling in reliability: case exponential and Weibull. *Revista Facultad De Ingeniería*, 25(41), 55–62. doi:10.19053/01211129.4137
- Ren, K., y Russell, K. (2021). *formattable: Create 'Formattable' Data Structures [version 0.2.1]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/formattable/index.html>
- Ritter, K., Lev-On, M., y Shires, T. (2010). *Understanding uncertainty in greenhouse gas emission estimates: Technical considerations and statistical calculation methods*. 19th Annual International Emission Inventory Conference. <https://www3.epa.gov/ttn/chief/conference/ei19/session3/shires.pdf>
- Rypdal, K., y Winiwater, W. (2001). Uncertainties in greenhouse gas emission inventories – evaluation, comparability and implications. *Environmental Science & Policy*, 4, 107–116. doi:10.1016/S1462-9011(00)00113-1

Sali, A., Hass, L., y Attali, D. (2020). *shinycssloaders: Add Loading Animations to a 'shiny' Output While It's Recalculating* [version 1.0.0]. <https://cran.r-project.org/web/packages/shinycssloaders/index.html>

Sánchez, C. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*, 33(1), 128-138. doi:10.17843/rpmesp.2016.331.2014

SEMARNAT. (2009). *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cambio_climatico.pdf

Singer, B., y Harley, R. (1996). A Fuel-Based Motor Vehicle Emission Inventory. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(6), 581-593. doi:10.1080/10473289.1996.10467492

Singh, N., Damassa, T., Alarcón-Díaz, S., y Sotos, M. (2014). *Exploring linkages between national and corporate/facility greenhouse gas inventories*. World Resources Institute: https://files.wri.org/d8/s3fs-public/wri_ghg_inventories_final.pdf

Stephenson, A. (2022). *evd: Functions for Extreme Value Distributions* [version 2.3-6.1]. <https://cran.r-project.org/web/packages/evd/index.html>

Tineo, F. (2005). *Estimación de Kaplan Meier Bootstrap de la curva de supervivencia* [Tesis para optar por el grado de Licenciado en Estadística]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

UNEP. (2019). *Costa Rica - Policy Leadership*. UNEP Champions of the Earth. <https://www.unep.org/championsofearth/laureates/2019/costa-rica>

UNFCCC. (2022a). *Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>

UNFCCC. (2022b). *The Clean Development Mechanism*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>

- Van Aardenne, J. (2002). *Uncertainties in emission inventories* [Tesis para optar por el grado de Doctor en Filosofía (PhD)]. Wageningen University, Netherlands. <https://edepot.wur.nl/198412>
- Vargas, L. (2014). *Sistema de gestión para alcanzar la C-Neutralidad del Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica* [Tesis para optar por el grado de Master en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, CR. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3293>
- Velázquez de Castro, F. (2005). Cambio climático y protocolo de Kyoto. Ciencia y estrategias: compromisos para España. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 191-201.
- Wallis, K. (2014). The two-piece normal, binormal, or double Gaussian distribution: Its origin and rediscoveries. *Statistical Science*, 29(1), 106-112. doi:10.1214/13-STS417
- Wickham, H., Bryan, J., Kalicinski, M., Valery, K., Leitiene, C., Colbert, B., . . . Miller, E. (2023d). *readxl: Read Excel Files [version 1.4.3]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html>
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Lin Pedersen, T., Takahashi, K., Wilke, C., . . . Yutani, H. (2023b). *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics [version 3.4.3]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., y Vaughan, D. (2023a). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation [version 1.1.3]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>
- Wickham, H., Hester, J., François, R., Bryan, J., Bearrows, S., y Jylänki, J. (2023c). *readr: Read Rectangular Text Data [version 2.1.4]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/readr/index.html>
- Wickham, H., Vaughan, D., Girlich, M., y Ushey, K. (2023e). *tidyr: Tidy Messy Data [version 1.3.0]*. <https://cran.r-project.org/web/packages/tidyr/index.html>
- Wójcik-Gront, E., y Gront, D. (2014). Assessing Uncertainty in the Polish Agricultural Greenhouse Gas Emission Inventory Using Monte Carlo Simulation. *Outlook on Agriculture*, 43(1), 61-65. doi:10.5367/oa.2014.0155

ANEXO I. DATOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO

Cuadro A1. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de CO₂, por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (*f*: valor central, *U_R*: límite superior y *U_L*: límite inferior)

Combustible	<i>f</i> (kg/L)	<i>U_L</i> (%)	<i>U_R</i> (%)
Gasolina	2,231	4,59	5,89
Diesel	2,613	3,12	3,19
Búnker	3,101	3,57	3,65
Queroseno	2,541	3,83	4,10
LPG	1,611	8,41	9,16
Gasolina de avión	2,227	7,94	23,50
<i>Jet fuel</i>	2,505	4,68	5,32
Lubricante	2,549	11,74	12,74

Cuadro A2. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para otros factores de emisión. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021; IMN, 2023) (*f*: valor central, *U_R*: límite superior y *U_L*: límite inferior)

Proceso de emisión	Fuente	<i>f</i>	<i>U_L</i> (%)	<i>U_R</i> (%)
Uso de electricidad	Emisión 2021 (kg CO ₂ /kWh)	0,0400	13	13
	Emisión 2020 (kg CO ₂ /kWh)	0,0282	6,4	6,4
	Emisión 2019 (kg CO ₂ /kWh)	0,0365	1,4	1,4
Uso no energético de productos	Cemento (kg CO ₂ /kg)	0,5101	8,12	8,12
	Cal (kg CO ₂ /kg)	0,785	8,06	8,06
	Vidrio (kg CO ₂ /kg)	0,21	10,44	10,44
Agricultura (cultivos)	Arroz inundado (kg CH ₄ /(ha·día))	4,94	11	11
	Caña de azúcar (kg N ₂ O/(ha·año))	4,81	36	36
	Café sin sombra (kg N ₂ O/(ha·año))	2,92	4,5	4,5
	Banano (kg N ₂ O/(ha·año))	4,85	10,8	10,8
	Kikuyo con fert. (kg N ₂ O/(ha·año))	2,43	2,1	2,1
	Kikuyo sin fert. (kg N ₂ O/(ha·año))	1,22	1,6	1,6

Cuadro A3. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de CH₄, por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (*f*: valor central, *U_R*: límite superior y *U_L*: límite inferior)

Fuente / Combustible	<i>f</i> (g/L)	<i>U_L</i> (%)	<i>U_R</i> (%)
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Diesel	0,122	71	191
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Búnker	0,138	78	191
Manufactura y construcción/Gasolina	0,111	71	190
Manufactura y construcción/LPG	0,027	71	191
Manufactura y construcción/Lubricante	0,104	73	177
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Gasolina	0,346	72	179
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Diesel	0,382	71	177
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Búnker	0,433	72	177
Comercial, institucional, residencial y agricultura/LPG	0,139	72	179
Comercial, institucional, residencial, agricultura y transporte/ Lubricante	0,348	75	159
Transporte terrestre/Gasolina sin catalizador	1,176	74	201
Transporte terrestre/Gasolina con catalizador	0,907	74	204
Transporte terrestre/Diesel sin catalizador	0,149	62	126

Cuadro A4. Valores centrales y límites del intervalo de variación esperable para los factores de emisión de N₂O, por uso y quema de combustibles fósiles, en el sector energía. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2021) (*f*: valor central, *U_R*: límite superior y *U_L*: límite inferior)

Fuente / Combustible	<i>f</i> (g/L)	<i>U_L</i> (%)	<i>U_R</i> (%)
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Diesel	0,024 42	71	190
Generación de electricidad, manufactura y construcción/Búnker	0,027 69	71	190
Manufactura y construcción/Gasolina	0,022 11	71	190
Manufactura y construcción/LPG	0,002 745	72	179
Manufactura y construcción/Lubricante	0,021	73	177
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Gasolina	0,022 11	71	190
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Diesel	0,024 42	71	190
Comercial, institucional, residencial y agricultura/Búnker	0,027 69	71	190
Comercial, institucional, residencial y agricultura/LPG	0,002 745	72	179
Comercial, institucional, residencial, agricultura y transporte/ Lubricante	0,021	73	177
Transporte terrestre/Gasolina sin catalizador	0,116	48	204
Transporte terrestre/Gasolina con catalizador	0,283	71	173
Transporte terrestre/Diesel sin catalizador	0,154	70	175

Cuadro A5. Información disponible para los factores de emisión incluidos en el Grupo 1, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas

Proceso de emisión	Fuente	Información disponible		
		Valor central	Interv. Conf. al 95 %	Referencias
Fermentación entérica de ganado no vacuno (kg CH ₄ /cabeza·año)	Búfalos	68	± 50 %	(IMN, 2021); (IPCC, 2019)
	Ovejas	5		
	Cabras	5		
	Caballos	18		
	Cerdos	1		
Manejo de excretas (kg CH ₄ /cabeza·año)	Ganado vacuno	1	± 30 %	(IMN, 2021); (IPCC, 2006a)
	Caballos	1,64		
	Cabras	0,17		
	Cerdos	1		
	Aves de corral	0,02		
Tratamiento biológico de residuos sólidos (g/kg)	Compostaje (CH ₄)	4	[0,03; 8,00]	(IMN, 2021); (IPCC, 2006a)
	Compostaje (N ₂ O)	0,24	[0,06; 0,60]	
	Digestión Anaeróbica (CH ₄)	2	[0,0; 20,0]	

Cuadro A6. Información disponible para las magnitudes de entrada requeridas para la estimación de los factores de emisión incluidos en el Grupo 2, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas

Proceso de emisión	Fuente	Magnitud de entrada	Información disponible		
			Valor central	Interv. Conf. al 95 %	Referencias
Tratamiento y vertido de aguas residuales industriales	Reactor anaeróbico	B_o (kg/kg)	0,25	± 30 %	(IMN, 2021); (IPCC, 2006a); (IPCC, 2019)
		MCF (1)	0,8	± 10 % [§]	
	Laguna anaeróbica profunda	B_o (kg/kg)	0,25	± 30 %	
		MCF (1)	0,8	± 10 % [§]	
	Laguna anaeróbica poco profunda	B_o (kg/kg)	0,25	± 30 %	
		MCF (1)	0,2	± 30 % [§]	
	Descarga a ríos	B_o (kg/kg)	0,25	± 30 %	
		MCF^* (1)	0,11	± 50 % [§]	
Tratamiento y vertido de aguas residuales domésticas	Laguna	B_o (kg/kg)	0,6	± 30 %	(IMN, 2021); (IPCC, 2006a); (IPCC, 2019)
		MCF (1)	0,2	± 30 %	
		BOD (g/(persona·día))	40	± 30 %	
	Tanque séptico	B_o (kg/kg)	0,6	± 30 %	
		MCF (1)	0,5	± 10 %	
		BOD (g/(persona·día))	40	± 30 %	
	Descarga a ríos	B_o (kg/kg)	0,6	± 30 %	
		MCF (1)	0,11	± 50 %	
		BOD (g/(persona·día))	40	± 30 %	

[§]Los intervalos fueron tomados como idénticos a los valores respectivos para aguas residuales domésticas, según criterio de tres expertos técnicos nacionales consultados.

Cuadro A7. Información disponible para las magnitudes de entrada requeridas para la estimación de los factores de emisión incluidos en el Grupo 3, considerando sus valores centrales, intervalos de confianza al 95 % y referencias utilizadas

Proceso de emisión	Fuente	Magnitud de entrada	Información disponible		
			Valor central	Interv. Conf. al 95 %	Referencias
Uso no energético de productos	Oxidación de lubricante	AW_C (g/mol)	12,0106	[12,0096; 12,0116] [#]	(CIAAW, 2020)
		AW_O (g/mol)	15,9994	[15,999 03; 15,999 77] [#]	
		ODU (1)	0,2	± 50 %	(IPCC, 2006a)
		CC (kg/GJ)	20	[-2,0 %; +2,5 %]	(IPCC, 2006a)
		NCV (TJ/Gg)	40,2	[-16,7 %; +5,2 %]	
		$\rho_{r\ lub}$ (1)	0,8807 [¥]	[0,8744; 0,8873] [¥]	(Morales, 2016)
		ρ_{H_2O} (kg/L)	0,999 103	[0,997 843; 1,000 363] [§]	(ASTM, 2019)
Tratamiento de residuos sólidos	Relleno sanitario	AW_C (g/mol)	12,0106	[12,0096; 12,0116] [#]	(CIAAW, 2020)
		AW_H (g/mol)	1,007 975	[1,007 84; 1,008 11] [#]	
		MCF (1)	1	[-10 %; +0 %]	(IPCC, 2019)
		DOC_1 (kg/kg)	0,15	± 20 %	(IPCC, 2006a); (IPCC, 2019)
		DOC_2 (kg/kg)	0,4	± 20 %	
		W_1 (1)	0,529	± 30 %	(FEDEMUR, 2002); (IPCC, 2019)
		W_2 (1)	0,19	± 30 %	
		DOC_f (1)	0,5	± 20 %	(IPCC, 2019)
F (1)	0,5	± 5 %			

[§]El intervalo fue estimado con base en la precisión y sesgo del método de medición.

[#]Los intervalos corresponden a intervalos de cobertura al 100 %.

[¥]El valor central y el intervalo presentado fueron estimados a partir de datos crudos.

Cuadro A8. Valores de los potenciales de calentamiento global para los principales GEI. Información tomada de la base de datos oficial para los factores de emisión (IMN, 2023) y utilizada en la herramienta GEISER

GEI	PCG (1)
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310
HFC 134a	1300
HFC 152a	140
R22	1500
R141b	600
R402a	2447
R402b	2150
R410	1725
R507	3300
SF6	23900

Cuadro A9. Datos del primer ejercicio de aplicación que simula un inventario real, tomado de INTECO (2023) y utilizados para la validación del funcionamiento y exactitud de la herramienta GEISER

Fuente de emisión	Datos de actividad	Información sobre incertidumbre
Consumo eléctrico	Tres medidores con consumos anuales de (1000, 500 y 1200) kWh. Año de reporte: 2019	Tolerancias de medidores: (0,2, 0,3 y 0,5) %.
Quema de lubricante	Consumo de 10 recipientes con volúmenes nominales de 1,5 L. Uso agrícola.	Tolerancia del volumen nominal: 1,5 %, según RTCA 01.01.11:06.
Consumo de gasolina	Consumo de 640 L según facturas de gasolineras. Uso agrícola.	Tolerancia del surtidor: 0,5 %, según reglamento N° 26425-MEIC
Total del inventario	1,57 t CO ₂ e	u = 2,54 % U = 5,1 %

Cuadro A10. Datos del segundo ejercicio de aplicación que simula un inventario real, tomado de INTECO (2023) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Fuente de emisión	Datos de actividad	Información sobre incertidumbre
Consumo eléctrico	Dos medidores con consumos anuales de (650 y 500) kWh. Año de reporte: 2019	Tolerancias de medidores: (0,2, y 0,3) %.
Quema de lubricante	Consumo de 10 recipientes con volúmenes nominales de 2 L. Uso agrícola.	Tolerancia del volumen nominal: 1,5 %, según RTCA 01.01.11:06.
Consumo de gasolina	Consumo de 1200 L según facturas de gasolineras. Uso agrícola.	Tolerancia del surtidor: 0,5 %, según reglamento N° 26425-MEIC
Recarga de extintores	Recarga de 15 kg de CO ₂ , pesados por diferencia con balanza calibrada.	Balanza bajo control metrológico, con tolerancia de 1 %.
Recarga de aires acondicionados	Recarga de 25 kg de R402a, pesados por diferencia con balanza calibrada.	Balanza bajo control metrológico, con tolerancia de 1 %.
Tratamiento de aguas residuales	Registros indican permanencia de 25 personas. Uso de tanques sépticos para tratamiento.	Registros indican variación máxima de ± 1 persona
Total del inventario	66,3 t CO ₂ e	u = 0,942 % U = 1,9 %

Cuadro A11. Datos del ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (DCC y LCM, 2020), actualizados en INTECO (2023) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Fuente de emisión	Datos de actividad	Información sobre incertidumbre
Compostaje de residuos sólidos	Registros indican un total de 1560 kg residuos sólidos, pesados con balanza calibrada	Incertidumbre estándar de 3,73 % tomando información del certificado de calibración
Recarga de aires acondicionados	Recarga total de 119 kg de R22, pesados por diferencia con balanza calibrada.	Balanza bajo control metrológico, con tolerancia de 0,2 %.
Consumo de diesel	Consumo de 8200 L según facturas de gasolineras. Uso para generación de electricidad	Tolerancia del surtidor: 0,5 %, según reglamento N° 26425-MEIC
Emisiones en chimenea	Promedio de 36 mediciones de emisión másica por hora, multiplicado por un tiempo anual laborado de 6760 h.	Tolerancia del equipo: 1 %
Tratamiento de aguas residuales industriales	Tratamiento de 37 034 m ³ de agua residual con reactor anaeróbico que reduce su DQO de 110 mg/L a 40 mg/L	Incertidumbre estándar de 1,595 %, (tolerancia de 1 % en caudal e incertidumbre estándar de 0,65 % para DQO)
Descarga de aguas residuales industriales	Descarga a río de 37 034 m ³ de agua residual con DQO de 40 mg/L	Incertidumbre estándar de 1,333 %, (tolerancia de 1 % en caudal e incertidumbre estándar de 0,65 % para DQO)
Consumo eléctrico	Un medidor con consumo anual de 2 277 911 kWh. Año de reporte: 2019	Tolerancia de medidor: 0,5 %.
Total del inventario	444,6 t CO ₂ e	u = 0,48 % U = 1,0 %

Cuadro A12. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea, tomados de la guía del PPCN (DCC y LCM, 2020) y utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)
1	21,7	13	22,3	25	22,4
2	22,2	14	22,2	26	23,0
3	22,1	15	21,6	27	21,3
4	21,5	16	22,1	28	22,2
5	22,0	17	22,2	29	22,2
6	22,3	18	22,7	30	22,4
7	22,2	19	22,0	31	21,8
8	22,5	20	22,4	32	21,9
9	21,6	21	22,3	33	22,1
10	22,0	22	22,1	34	22,2
11	21,9	23	22,3	35	21,4
12	22,3	24	22,2	36	22,2

Cuadro A13. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con dos valores extremos superiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)
1	21,7	13	22,3	25	22,4
2	22,2	14	22,2	26	23,0
3	22,1	15	21,6	27	21,3
4	21,5	16	22,1	28	22,2
5	22,0	17	22,2	29	22,2
6	22,3	18	22,7	30	22,4
7	22,2	19	22,0	31	21,8
8	22,5	20	22,4	32	21,9
9	21,6	21	22,3	33	22,1
10	22,0	22	22,1	34	22,2
11	21,9	23	22,3	35	98
12	22,3	24	22,2	36	58

Cuadro A14. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con cuatro valores extremos superiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)
1	21,7	13	22,3	25	22,4
2	22,2	14	22,2	26	23,0
3	22,1	15	21,6	27	21,3
4	21,5	16	22,1	28	22,2
5	22,0	17	22,2	29	22,2
6	22,3	18	22,7	30	22,4
7	22,2	19	22,0	31	21,8
8	22,5	20	22,4	32	21,9
9	21,6	21	22,3	33	98
10	22,0	22	22,1	34	58
11	21,9	23	22,3	35	71
12	22,3	24	22,2	36	83

Cuadro A15. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con dos valores extremos inferiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO ₂ /h)
1	21,7	13	22,3	25	22,4
2	22,2	14	22,2	26	23,0
3	22,1	15	21,6	27	21,3
4	21,5	16	22,1	28	22,2
5	22,0	17	22,2	29	22,2
6	22,3	18	22,7	30	22,4
7	22,2	19	22,0	31	21,8
8	22,5	20	22,4	32	21,9
9	21,6	21	22,3	33	22,1
10	22,0	22	22,1	34	22,2
11	21,9	23	22,3	35	6
12	22,3	24	22,2	36	4

Cuadro A16. Datos de emisiones promedio por hora en chimenea con cuatro valores extremos inferiores, utilizados para la validación de la exactitud de la herramienta GEISER

Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO₂/h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO₂/h)	Consecutivo de dato	Emisión promedio (kg CO₂/h)
1	21,7	13	22,3	25	22,4
2	22,2	14	22,2	26	23,0
3	22,1	15	21,6	27	21,3
4	21,5	16	22,1	28	22,2
5	22,0	17	22,2	29	22,2
6	22,3	18	22,7	30	22,4
7	22,2	19	22,0	31	21,8
8	22,5	20	22,4	32	21,9
9	21,6	21	22,3	33	6
10	22,0	22	22,1	34	4
11	21,9	23	22,3	35	2
12	22,3	24	22,2	36	3

ANEXO II. OTROS DIAGRAMAS DE VARIABLES

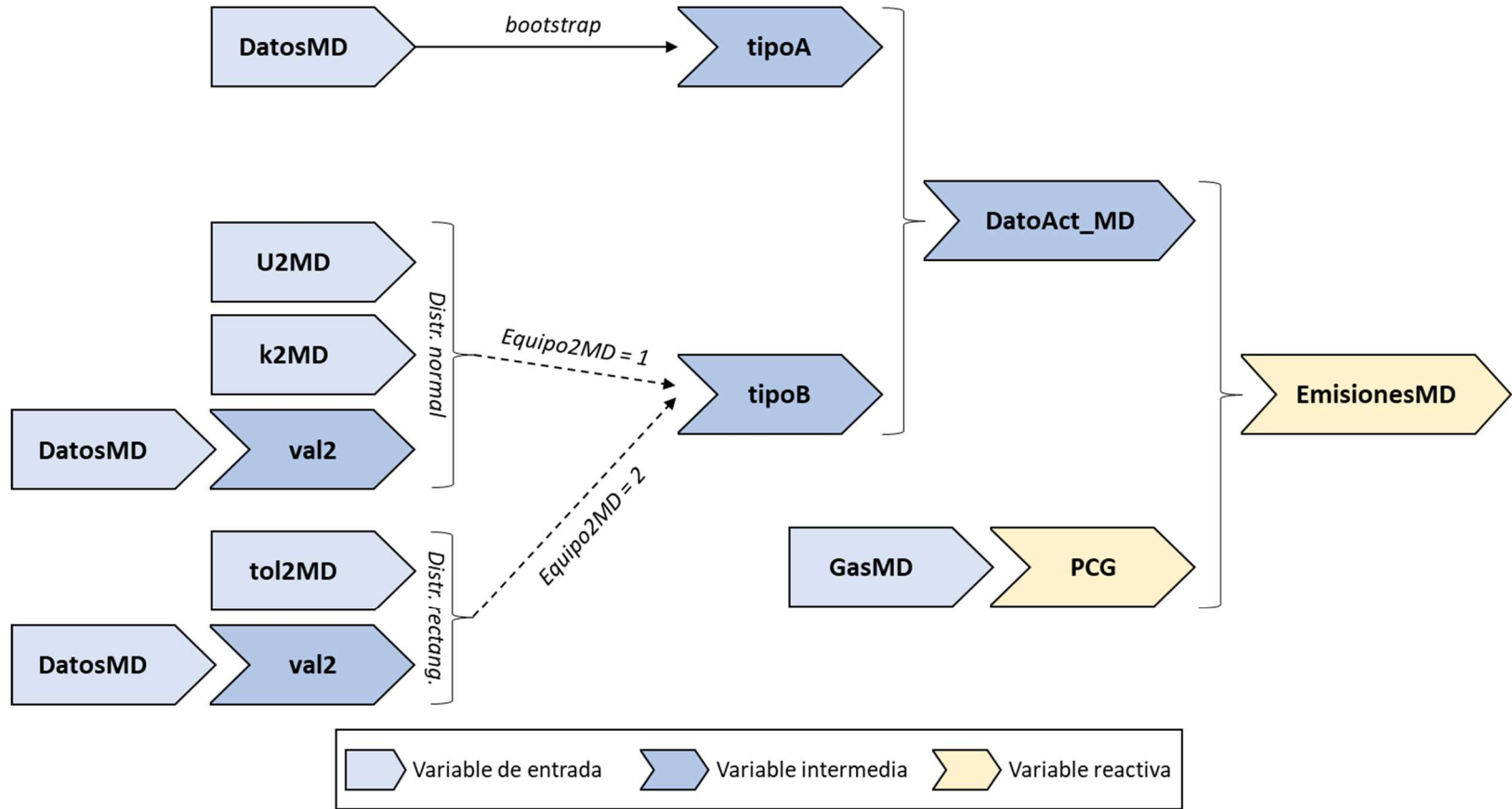


Figura A2.1. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa, mediante la metodología de mediciones internas con datos crudos. Fuente: el autor.

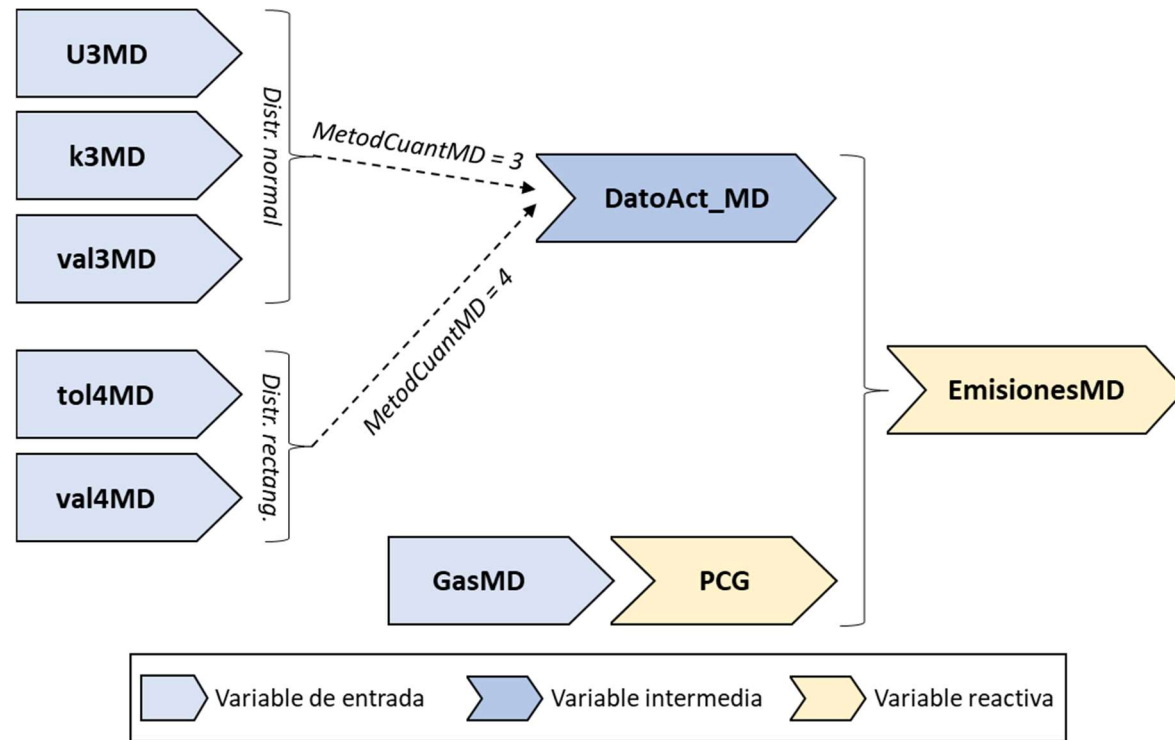


Figura A2.2. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma directa, mediante las metodologías de reporte externo con incertidumbre ($MetodCuantMD = 3$) y reporte externo con tolerancia ($MetodCuantMD = 4$). Fuente: el autor.

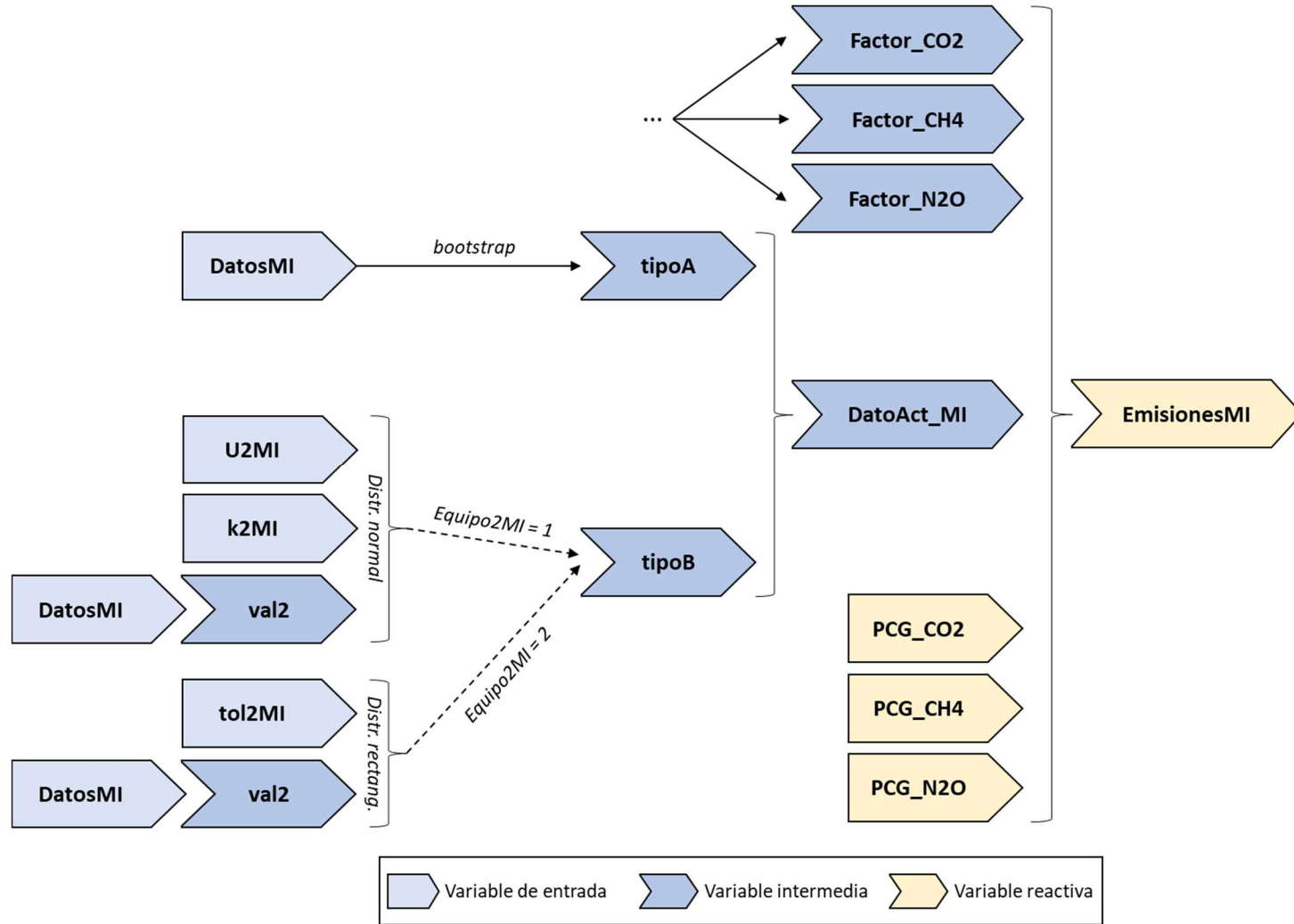


Figura A2.3. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante la metodología de mediciones internas con datos crudos. Fuente: el autor.

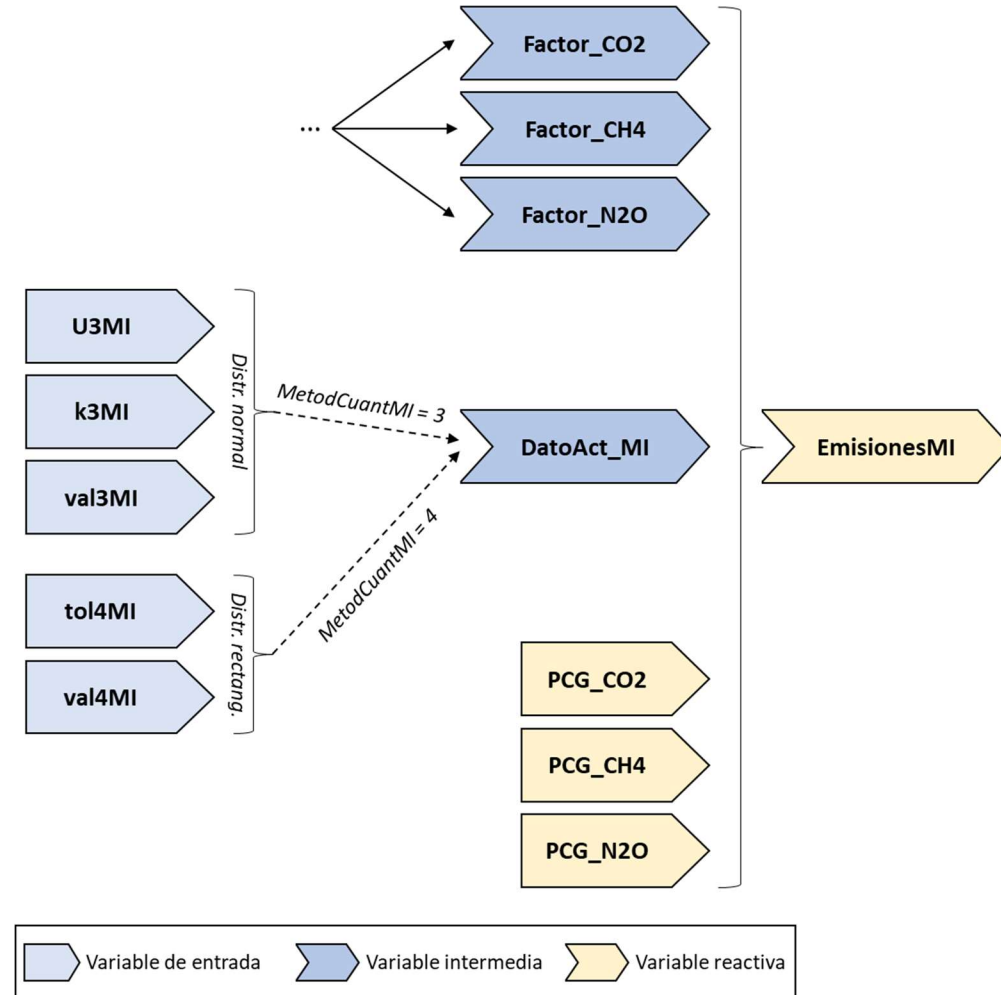


Figura A2.4. Diagrama de las etapas del procesamiento de datos, realizado para estimar la emisión de una fuente cuantificada de forma indirecta, mediante las metodologías de reporte externo con incertidumbre ($MetodCuantMI = 3$) y reporte externo con tolerancia ($MetodCuantMI = 4$). Fuente: el autor.

ANEXO III. FIGURAS DE LA VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

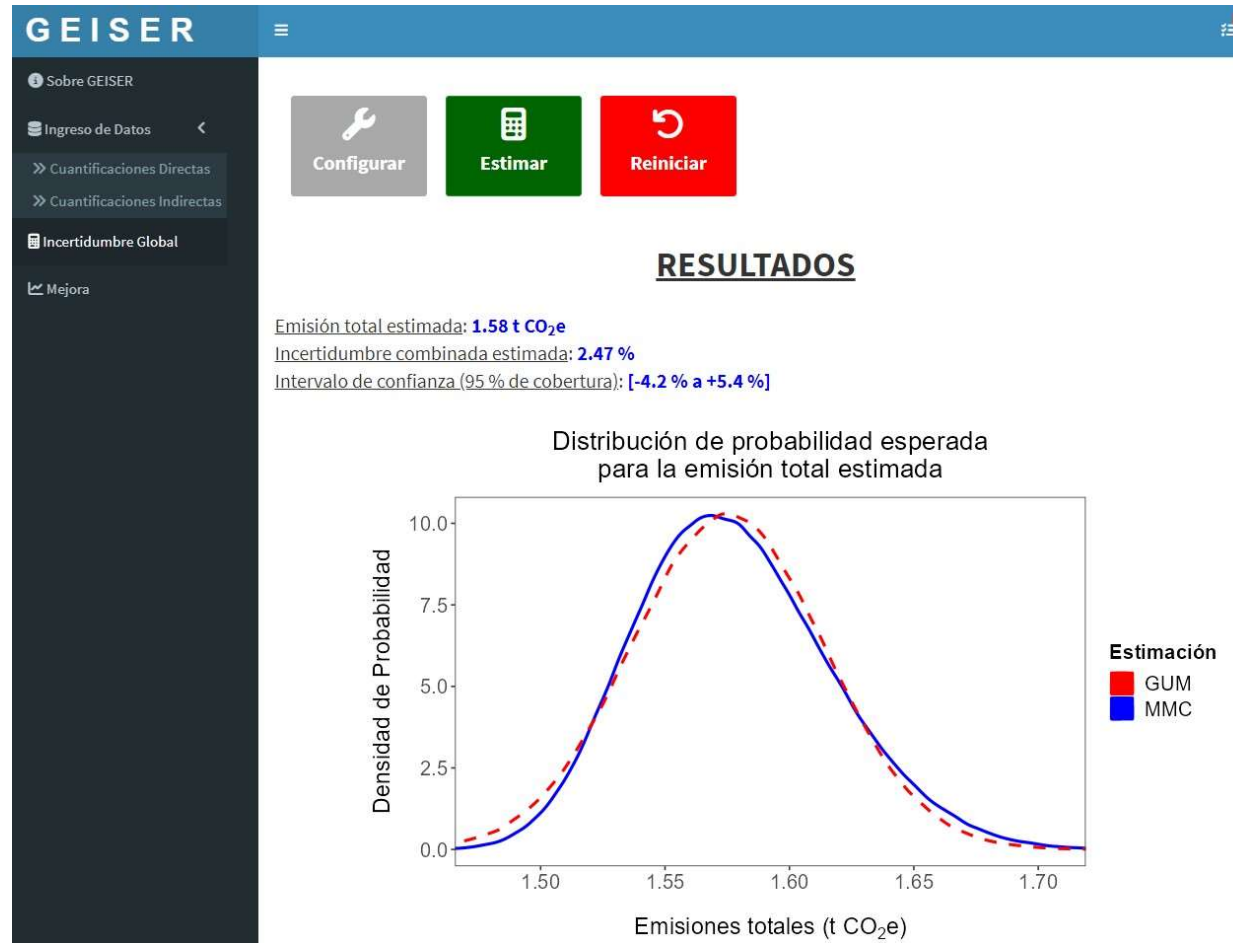


Figura A3.1. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

GEISER

Sobre GEISER

Ingreso de Datos

>> Cuantificaciones Directas

>> Cuantificaciones Indirectas

Incertidumbre Global

Mejora

Fuentes Cuantificadas Indirectamente

No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Elect. - 2019	0.1	0.76	6.3	0
2	Combust. - Lubricante	0.04	6.3	2.4	0.4
3	Combust. - Gasolina	1.44	2.7	91.3	99.6

Figura A3.2. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

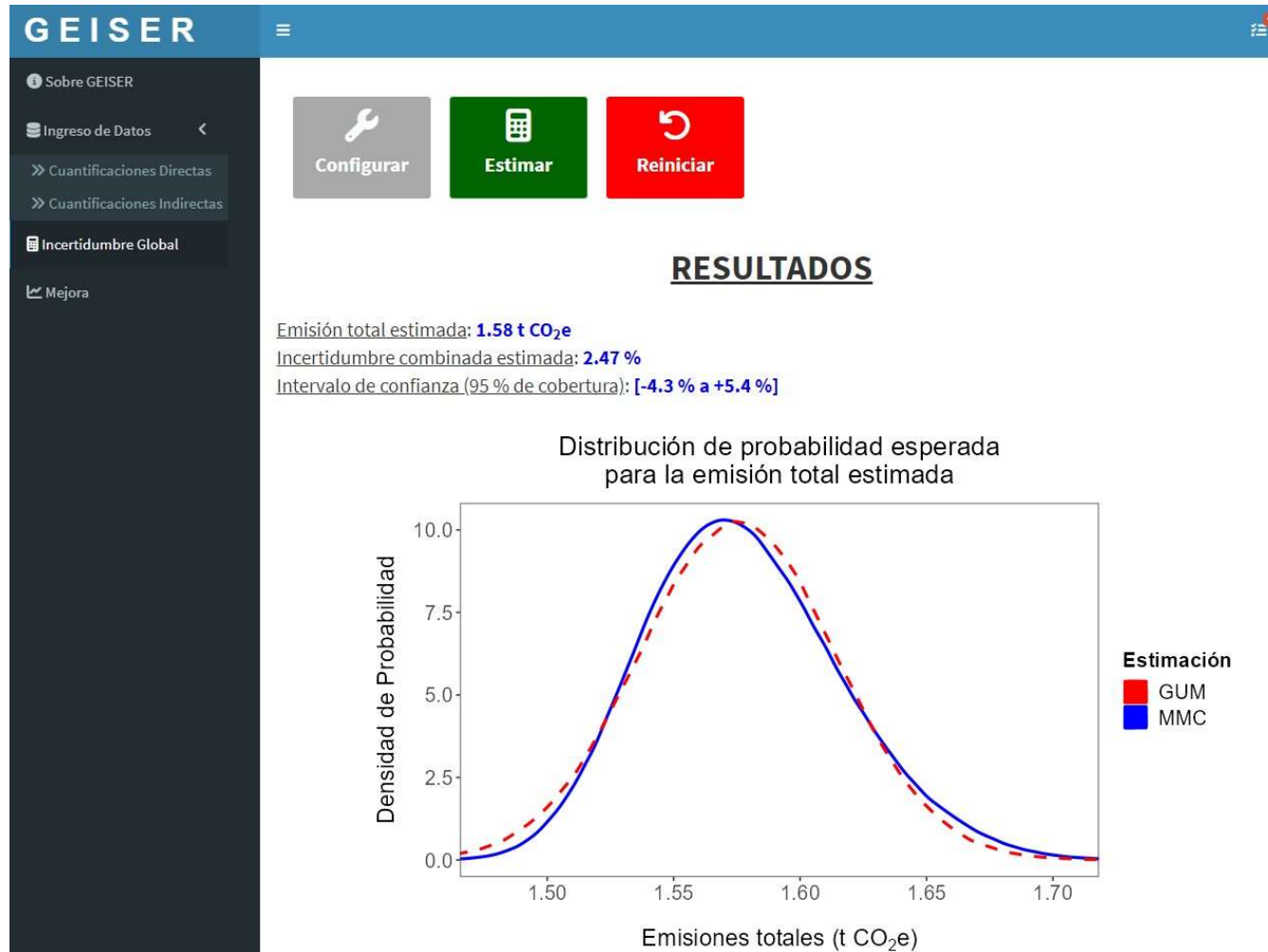


Figura A3.3. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando un valor semilla de 100 y una cantidad de iteraciones de 10^6 . Fuente: el autor.

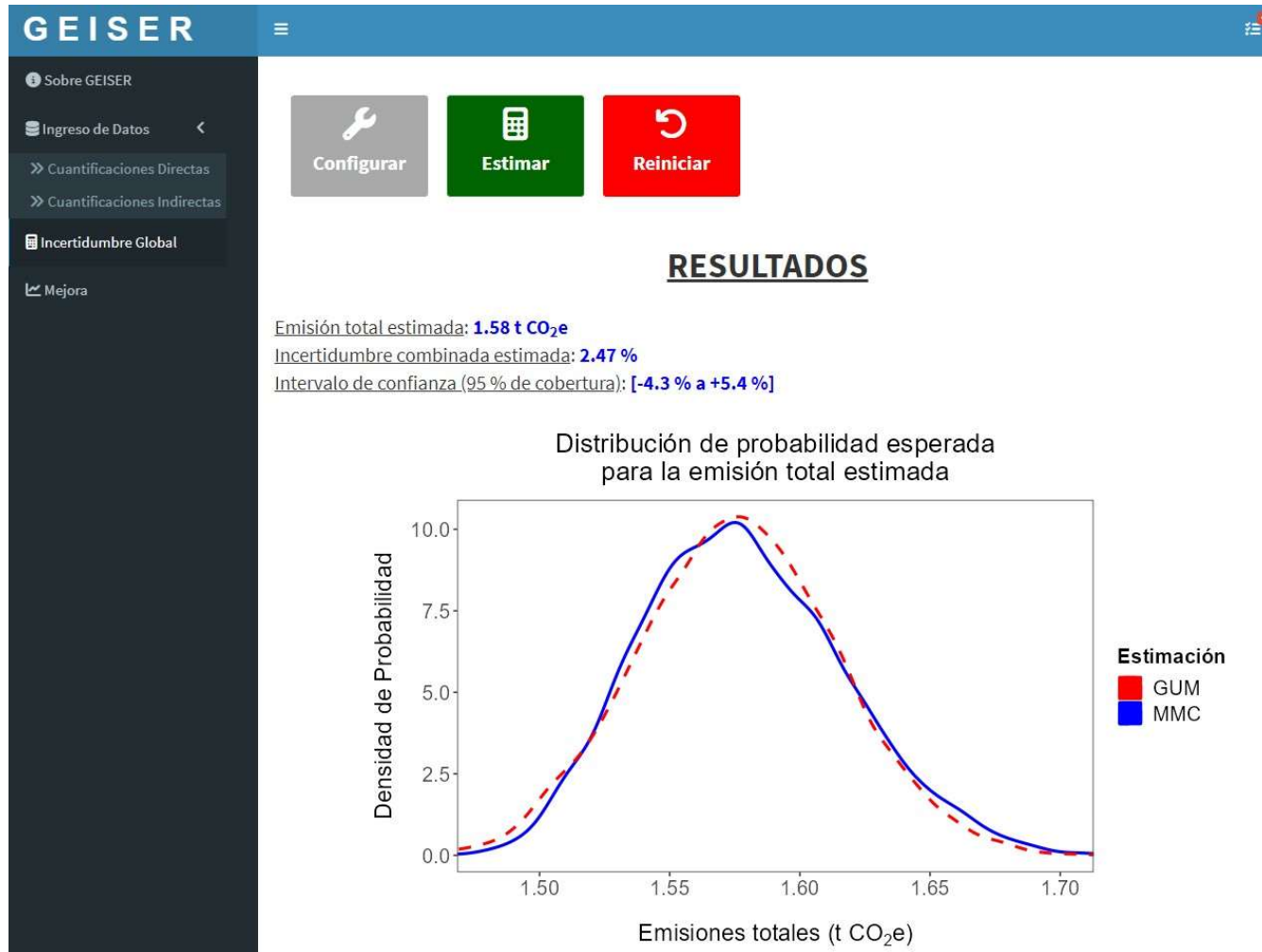


Figura A3.4. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el primer ejemplo de aplicación (Cuadro A9), utilizando un valor semilla de 100 y una cantidad de iteraciones de 10^4 . Fuente: el autor.



Figura A3.5. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

GEISER

Sobre GEISER

Ingreso de Datos

>> Cuantificaciones Directas

>> Cuantificaciones Indirectas

Incertidumbre Global

Mejora

Fuentes Cuantificadas Directamente

No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Extintores - CO2	0.01	0.58	0	0
2	Recarga AC - R402a	61.18	0.58	92.3	31.9

Fuentes Cuantificadas Indirectamente

No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Elect. - 2019	0.04	0.72	0.1	0
2	Combust. - Lubricante	0.05	6.3	0.1	0
3	Combust. - Gasolina	2.7	2.7	4.1	1.4
4	A.R.O. - Tanques sépticos	2.3	22	3.5	66.7

Figura A3.6. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el segundo ejemplo de aplicación (Cuadro A10), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

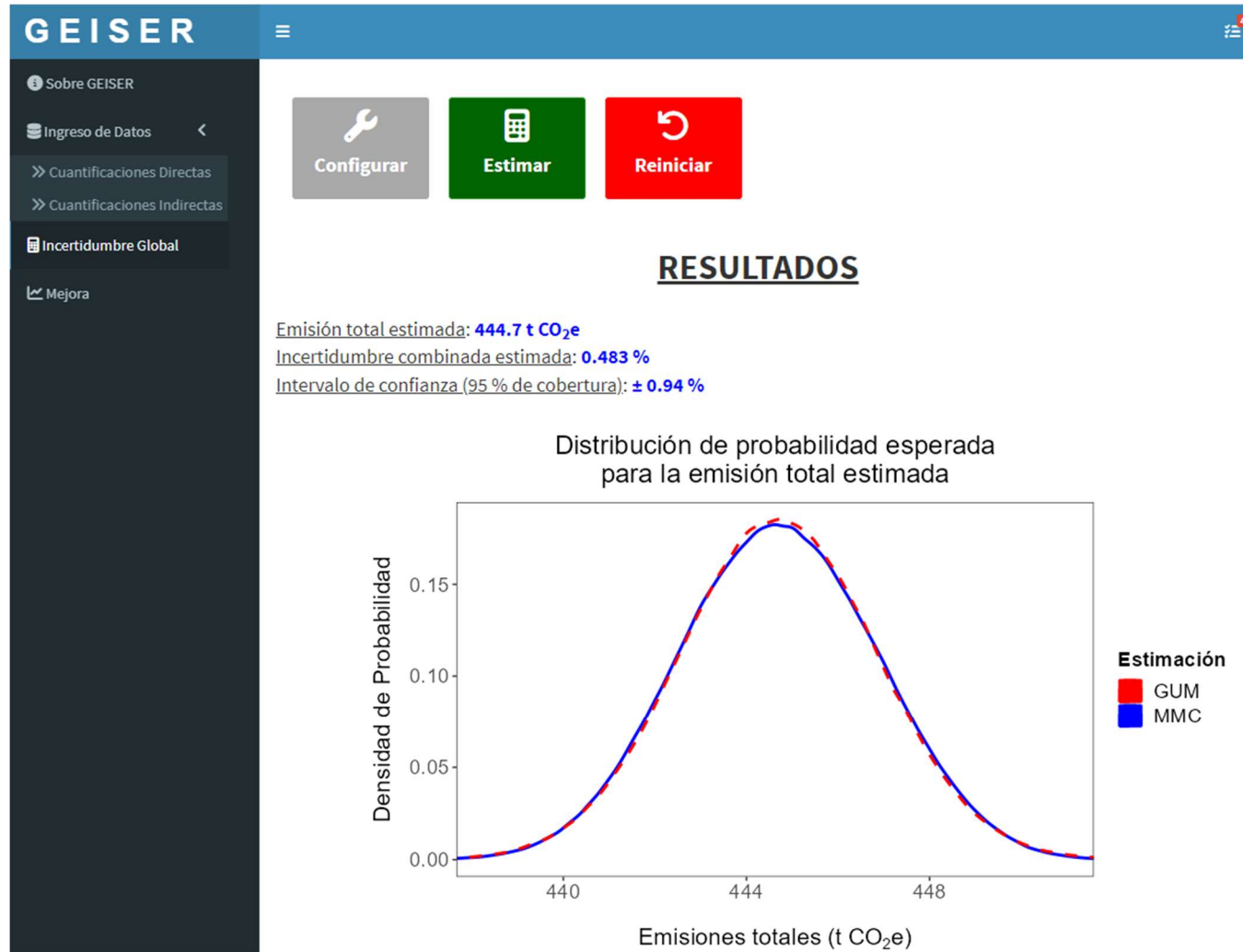


Figura A3.7. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (Cuadro A11), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

GEISER

Sobre GEISER

Ingreso de Datos

>> Cuantificaciones Directas

>> Cuantificaciones Indirectas

Incertidumbre Global

Mejora

Fuentes Cuantificadas Directamente

No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Otros - CO ₂	149.43	0.63	33.6	19.4
2	Recarga AC - R22	178.5	0.12	40.1	0.9

Fuentes Cuantificadas Indirectamente

No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Resid. - Compost	0.26	36	0.1	0.2
2	Combust. - Diesel	21.57	1.7	4.9	2.8
3	A.R.I. - Reactor anaeróbico	10.89	16	2.4	66.7
4	A.R.I. - Descarga a ríos	0.87	29	0.2	1.4
5	Elect. - 2019	83.14	0.76	18.7	8.6

Figura A3.8. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al resolver el ejemplo de aplicación incluido en la guía del PPCN (Cuadro A11), utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

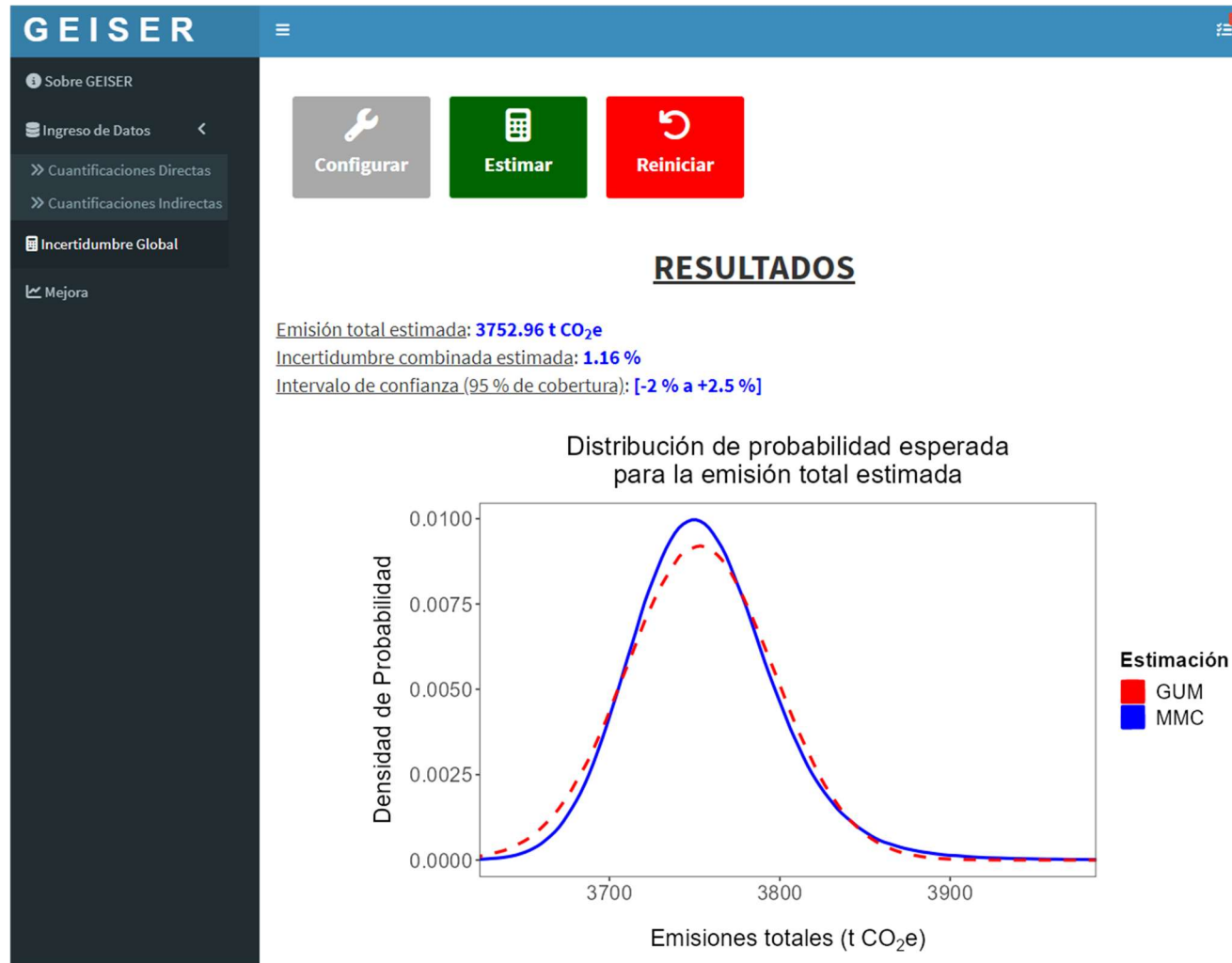


Figura A3.9. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar el escenario extremo de tiempo de procesamiento de datos, utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

GEISER					
Fuentes Cuantificadas Directamente					
No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Recarga AC - CO ₂	149.89	1.5	4	0.3
2	Extintores - CO ₂	149.43	1.8	4	0.4
3	Refrigeración - CO ₂	149.43	1	4	0.1
4	Otros - CO ₂	149.44	2.3	4	0.6
5	Extintores - CO ₂	149.43	2	4	0.5

Fuentes Cuantificadas Indirectamente					
No.	Fuente de emisión	Emisión (t CO ₂ e)	Incertidumbre Estándar (%)	Contribución a Emisión Total (%)	Contribución a Incert. Global (%)
1	Combust. - Gasolina	335.02	2.9	8.9	4.9
2	Combust. - Diesel	393.38	3.4	10.5	9.6
3	Elect. - 2019	5.45	2	0.1	0
4	Combust. - Queroseno	380.89	2.5	10.1	5
5	Combust. - Búnker	466.8	2.4	12.4	6.7
6	Combust. - Gasolina avión	332.85	8.6	8.9	43.1
7	Combust. - LPG	241.68	5.4	6.4	9
8	Combust. - Jet fuel	374.42	4	10	11.7
9	Pr.Ind. - Cemento	76.21	4.2	2	0.6
10	Combust. - Diesel	393.4	3	10.5	7.4

Figura A3.10. Tabla de resultados por fuente de emisión obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar el escenario extremo de tiempo de procesamiento de datos, utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

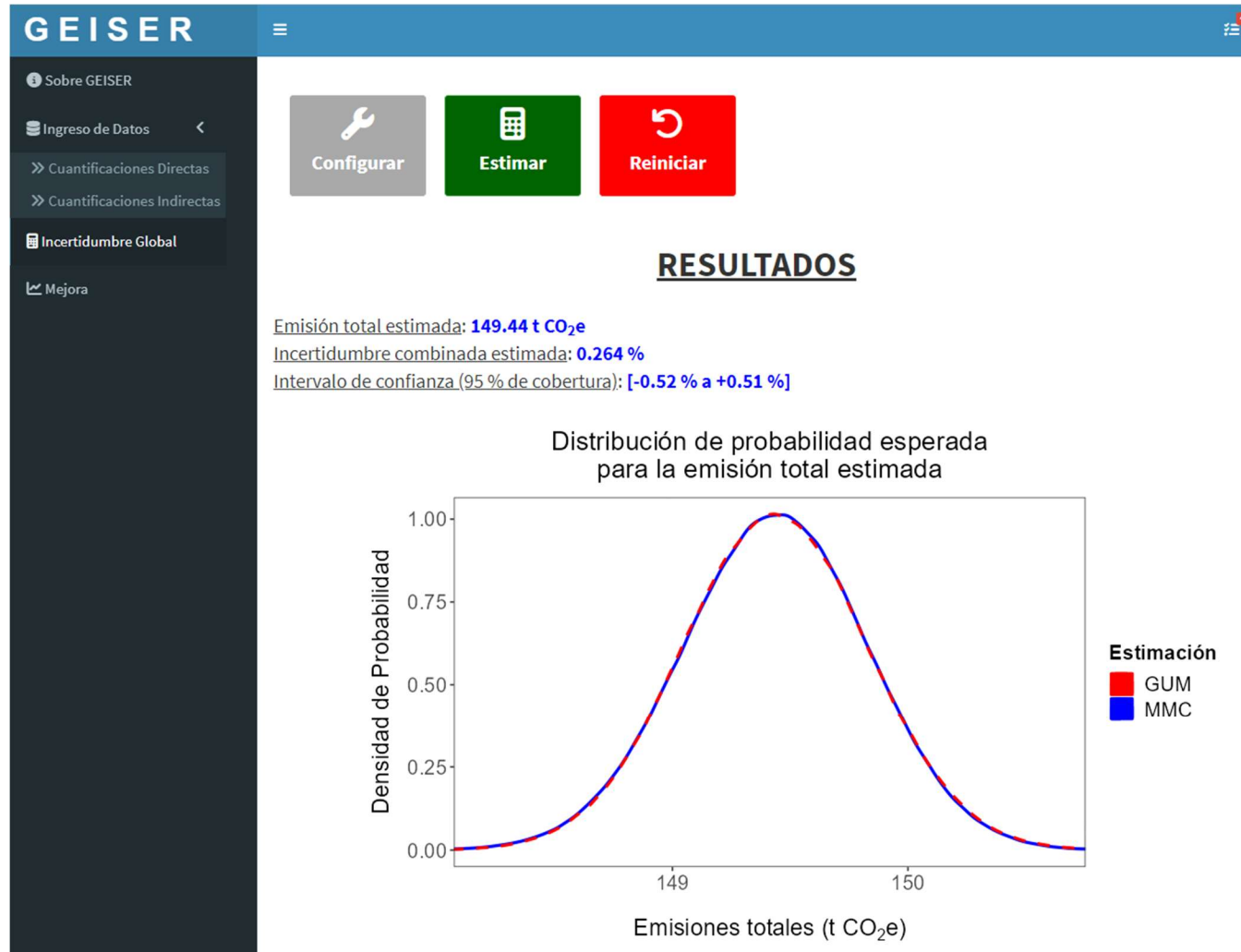


Figura A3.11. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea (Cuadro A12), estimado mediante el promedio simple y utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

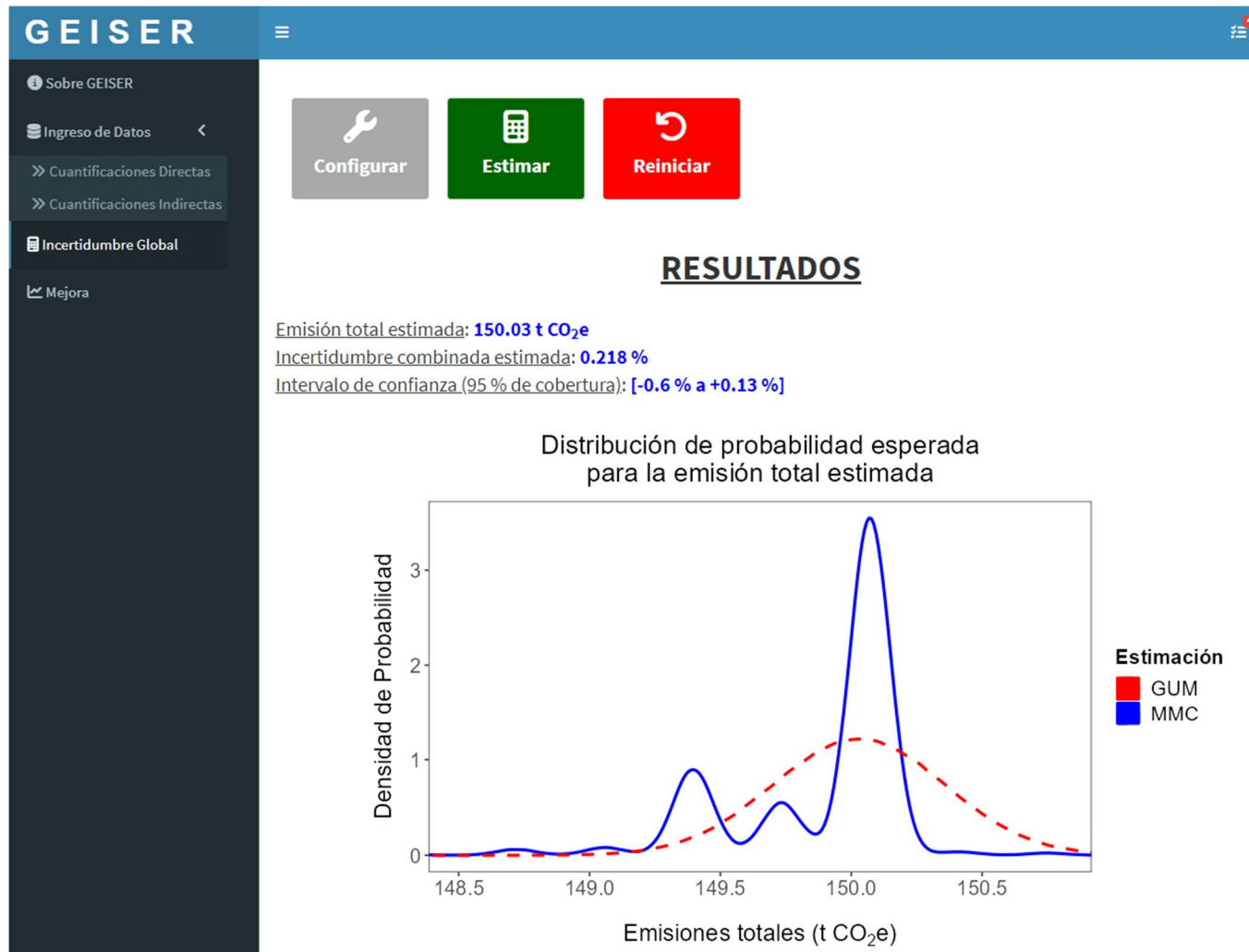


Figura A3.12. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea (Cuadro A12), estimado mediante la mediana y utilizando los valores de configuración por defecto. Fuente: el autor.

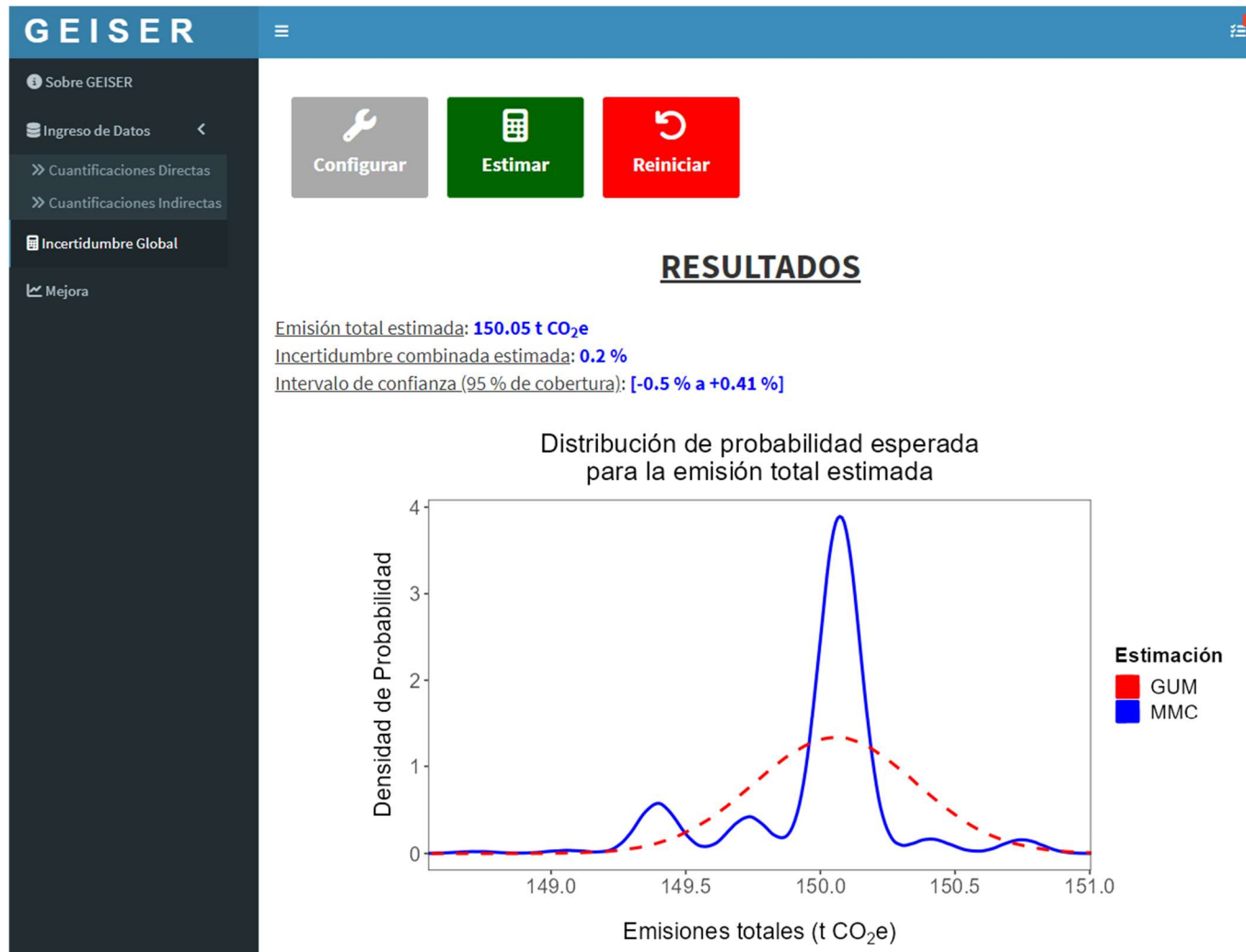


Figura A3.13. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con dos valores extremos superiores (Cuadro A13), estimado mediante la mediana. Fuente: el autor.

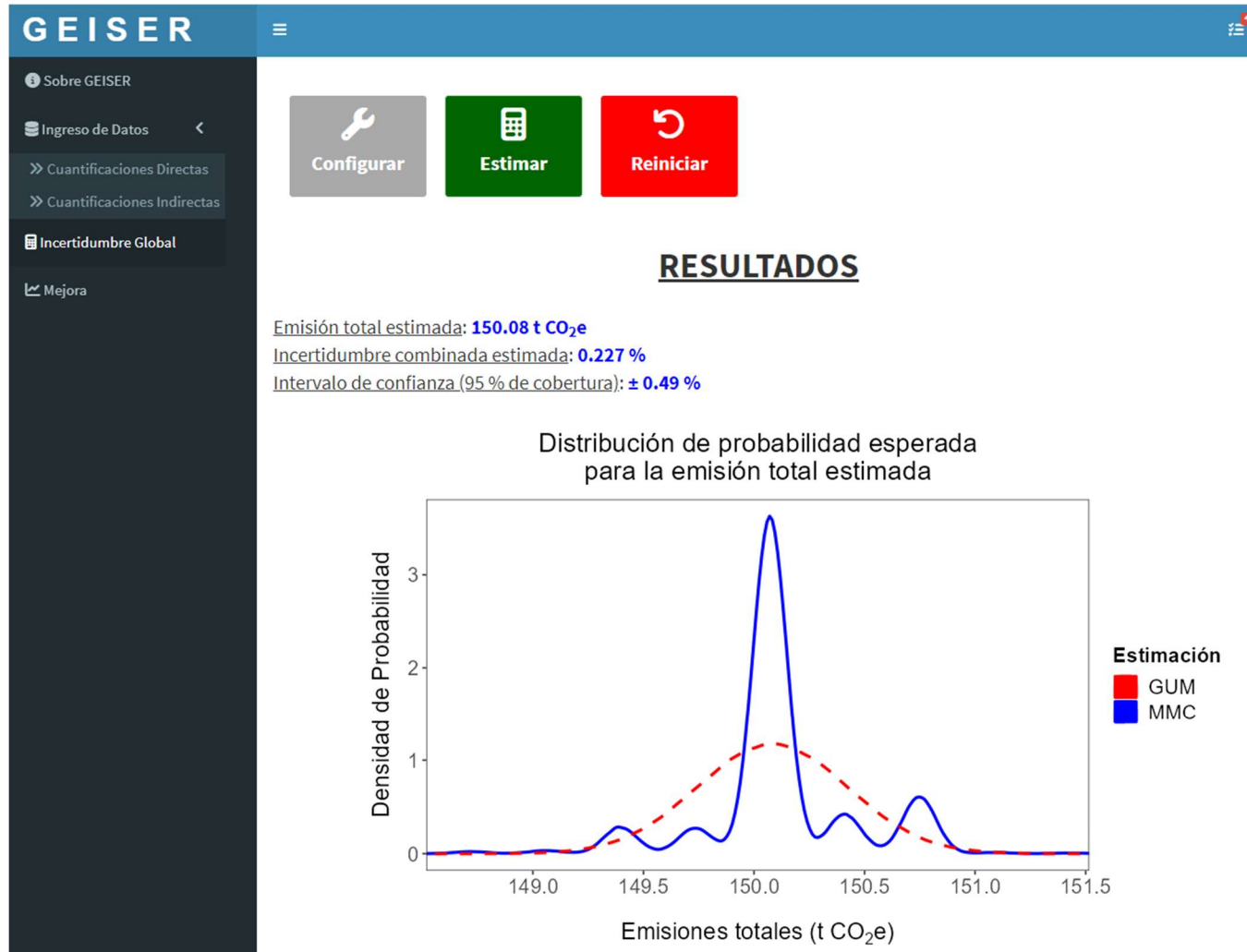


Figura A3.14. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con cuatro valores extremos superiores (Cuadro A14), estimado mediante la mediana. Fuente: el autor.



Figura A3.15. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con dos valores extremos inferiores (Cuadro A15), estimado mediante la mediana. Fuente: el autor.

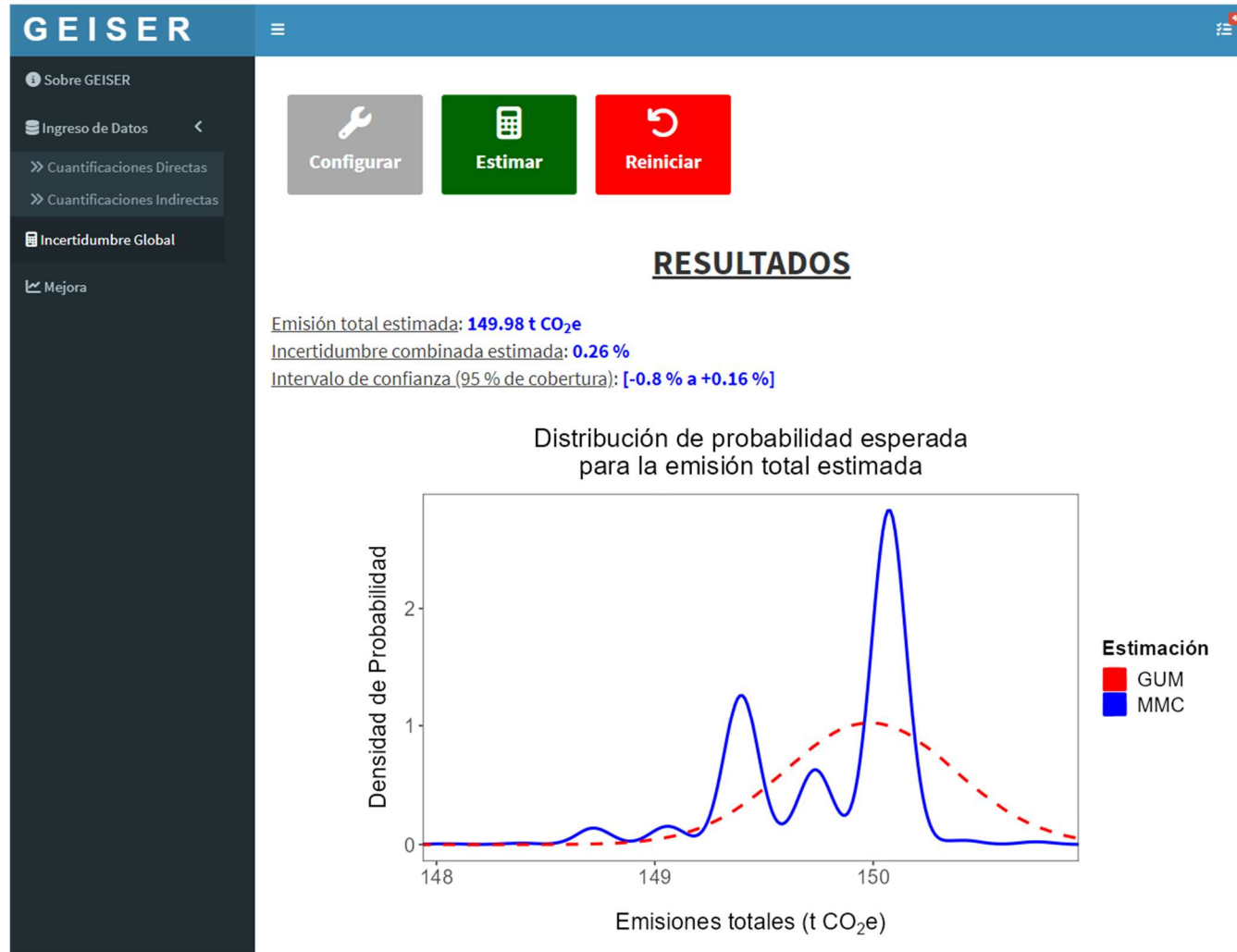


Figura A3.16. Resultados principales obtenidos con la herramienta GEISER al evaluar la base de datos de emisión por chimenea con cuatro valores extremos inferiores (Cuadro A16), estimado mediante la mediana. Fuente: el autor.