



Volumen II:
**Metodología para el diagnóstico
Nacional de refrigeración y
climatización en Colombia**

Contrato CO - T1663 - P009

Presentado a:

**Banco Interamericano de
Desarrollo (BID) y la Unidad de
Planeación Minero-Energética
(UPME)**



Bogotá D.C, 30 de agosto de 2024



Tabla de contenido

1. Resumen	1
2. Refrigeración	1
2.1. Demanda satisfecha	5
2.1.1. Inventario y demanda energética (eléctrica, combustible y térmica)	6
2.1.2. Demanda de potencia térmica	18
2.1.3. Emisiones equivalentes de CO ₂ generadas.....	20
2.1.4. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera	29
2.2. Demanda no satisfecha.....	32
2.2.1. Inventario y demanda energética (eléctrica, combustible y térmica)	34
2.2.2. Demanda eléctrica y combustible	35
2.2.3. Emisiones equivalentes de CO ₂ generadas.....	36
2.2.4. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera	37
2.3. Proyecciones.....	37
3. Climatización	39
3.1. Demanda satisfecha	43
3.1.1. Inventario y demanda energética (eléctrica y térmica)	43
3.1.2. Emisiones equivalentes de CO ₂ generadas.....	48
3.1.3. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera	48
3.2. Demanda no satisfecha.....	49
3.2.1. Demanda energética no satisfecha (eléctrica y térmica) estimación.	49
3.2.2. Emisiones equivalentes de CO ₂ generadas.....	51
3.2.3. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera	51
3.3. Proyecciones.....	51
4. Referencias	58

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - producción	3
Tabla 2. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - procesamiento	4
Tabla 3. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante.....	4
Tabla 4. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos – administración pública, defensa y educación	4
Tabla 5. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos – transporte refrigerado	5
Tabla 6. Descripción de códigos CIU de procesos industriales.....	5
Tabla 7. Fuentes de consulta para variables en el cálculo de demanda de energía por vía down	7
Tabla 8. Insumos en el cálculo de demanda de energía vía Top down	8
Tabla 9. Fuentes de consulta para variables en el cálculo de número de equipos vía Top down	9
Tabla 10. Tecnologías de cadena de frío - producción.....	10
Tabla 11. Distribución porcentual de g para cadena de frío en alimentos - procesamiento	11
Tabla 12. Promedio de capacidad instalada de TR por sector en 2014.....	11
Tabla 13. Tecnologías de cadena de frío en alimentos - procesamiento	12
Tabla 14. Tecnologías, participación y consumo específico para ventas al por mayor (CIU 46)	13
Tabla 15. Tecnologías, participación y consumo específico para ventas al por menor (CIU 47)	13
Tabla 16. Tecnologías, participación y consumo específico para hoteles (CIU 55) y restaurantes (CIU 56).....	14
Tabla 17. Tecnologías de cadena de frío - procesos industriales	15
Tabla 18. Fuentes de consulta para cálculo de demanda de combustible en refrigeración doméstica	15
Tabla 19. Consumo específico neveras antiguas	16
Tabla 20. Tecnología de neveras nuevas con etiqueta B en el mercado a 2023	16
Tabla 21. Consumo específico neveras nuevas por clima	17
Tabla 22. Especificaciones de equipos de cadena de frío en alimentos - transporte refrigerado	17
Tabla 23. Fuentes de consulta para cálculo de demanda de combustible en transporte refrigerado	17
Tabla 24. Variables en el cálculo de demanda de combustible para transporte refrigerado vía Bottom up	18

Tabla 25. Fuentes de refrigeración para cálculo de las toneladas de refrigeración asociadas a tecnologías	19
Tabla 26. Toneladas de refrigeración asociadas a tecnologías por categoría de aplicación	19
Tabla 27. Toneladas de refrigeración asociadas a empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes - CIU 46 y 47	20
Tabla 28. Fuentes de consulta para cálculo de emisiones equivalente de CO ₂	22
Tabla 29. Potencial de calentamiento global de refrigerantes en tecnologías	23
Tabla 30. Porcentaje de recarga anual de refrigerante y vida útil por tecnología	24
Tabla 31. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - producción	24
Tabla 32. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - procesamiento	25
Tabla 33. Emisiones específicas directas de operación para cadena de frío en alimentos - ventas.....	26
Tabla 34. Emisiones específicas directas de disposición para cadena de frío en alimentos - ventas.....	27
Tabla 35. Emisiones específicas indirectas para cadena de frío en alimentos - ventas	27
Tabla 36. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - refrigeración doméstica	28
Tabla 37. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - transporte refrigerado	29
Tabla 38. Emisiones específicas de refrigerante asociadas a tecnologías por categoría de aplicación.....	30
Tabla 39. Emisiones específicas de refrigerante directas de disposición para ventas	32
Tabla 40. Temperaturas de refrigeración de algunos alimentos.....	33
Tabla 41. Tasa de crecimiento anual de inventario y fuente para sectores de refrigeración	38
Tabla 42. Caracterización de los pisos térmicos en Colombia	41
Tabla 43. Segregación por piso térmico de los departamentos	41
Tabla 44. Clasificación de las actividades económicas, adaptada para Colombia CIU revisión 4.	42
Tabla 45. Especificaciones técnicas promedio de los AC según el refrigerante usado.	44
Tabla 46. Proyección de porcentaje de distribución de AC según tecnología y refrigerante para la subcategoría residencial.	46
Tabla 47. Especificaciones técnicas promedio de los Ventiladores según tecnología.....	47
Tabla 48. Porcentaje anual de pérdidas del refrigerante y vida útil de los AC de acuerdo con la tecnología.	48
Tabla 49. Porcentaje de inventario no satisfecho de los departamentos cálido húmedo, seco y templado.	50
Tabla 50. Tasa de crecimiento anual de inventario para el sector terciario	52
Tabla 51. Importaciones de AC del año 2020 a 2023	53

Tabla 52. Total de unidades instaladas en el sector residencial a 2023 por tecnología.....	54
Tabla 53. Vida útil de recambio asociada a cada piso térmico	54
Tabla 54. Porcentaje de distribución del inventario del sector residencial por piso térmico	55
Tabla 55. Porcentaje de crecimiento anual de equipos de <i>PcNn</i>	56

Índice de figuras

Figura 1. Categorización de los códigos CIU en el NCAP	2
Figura 2. Componentes de la cadena de frío en alimentos según el NCAP	3
Figura 3. Porcentaje de crecimiento anual de equipos nuevos de AC del sector residencial (2023-2050).....	57

1. Resumen

Este documento presenta la metodología propuesta para la refrigeración y climatización en Colombia en los diferentes sectores económicos con demanda de estos servicios. La metodología se basa en tres pilares fundamentales: (a) demanda satisfecha actual, (b) demanda no satisfecha actual, y (c) proyecciones. Los primeros dos abordan el estado actual del país (2022 o 2023, según la información disponible), considerando el cálculo del inventario satisfecho y no satisfecho, acompañado por la demanda energética desde la perspectiva de energía eléctrica y/o combustible, y potencia térmica. Además, se cuantifican las emisiones equivalentes de CO₂ y la cantidad de gases utilizados en estos equipos y emitidos a la atmósfera. Finalmente, las proyecciones se realizan mediante tasas de crecimiento anual, lo que permite estimar estas variables para los años 2030 y 2050.

2. Refrigeración

La refrigeración se define como el proceso de reducción y conservación de temperaturas por debajo del ambiente en un espacio o producto determinado. Este proceso se logra mediante sistemas de enfriamiento que utilizan la compresión de vapor o refrigerantes (Montreal Protocol On Substances That Deplete The Ozone Layer- Technology and Economic Assessment Panel, 2023).

Estos últimos se clasifican en cuatro categorías principales: (a) CFC (actualmente prohibidos); (b) HCFC; (c) HFC; y (d) HC, HFO y otras sustancias naturales (Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021).

Las aplicaciones de refrigeración son diversas, abarcando sectores como la industria manufacturera, servicios, entre otros. Estas aplicaciones son fundamentales para el desarrollo socioeconómico, el confort de la población y la calidad de los alimentos (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021).

En consecuencia, se prevé que países en desarrollo como Colombia experimenten un incremento en la demanda de refrigeración, lo que se traducirá en una mayor adquisición de estas tecnologías (Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer- Technology and Economic Assessment Panel, 2019).

No obstante, este aumento en la demanda de refrigeración conlleva un incremento en el consumo energético (electricidad o combustibles fósiles en transporte refrigerado) y en el uso de refrigerantes nocivos para la capa de ozono y el calentamiento global. Por lo tanto, es imperativo implementar medidas que mitiguen el impacto ambiental asociado a la generación de energía por combustibles fósiles y al uso de refrigerantes.

En el marco de la problemática de refrigeración en Colombia, se han adoptado los lineamientos internacionales propuestos por el National Cooling Action Plan Methodology (NCAP) (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021). Esta metodología, aplicable a nivel global, ofrece un enfoque sistemático para diagnosticar, proyectar y tomar acciones en el ámbito de la refrigeración. El análisis se centra en tres categorías demandantes principales:

- La cadena de frío en alimentos
- La cadena de frío en salud
- Procesos industriales

La metodología del NCAP sugiere iniciar con un mapeo del país basado en datos e información preexistente. Es importante señalar que, en el caso colombiano, la información disponible se encuentra principalmente en estudios realizados para la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) con el fin de apoyar sus planes de eficiencia energética, balance energético y consumo indispensable, entre otros aspectos de su competencia.

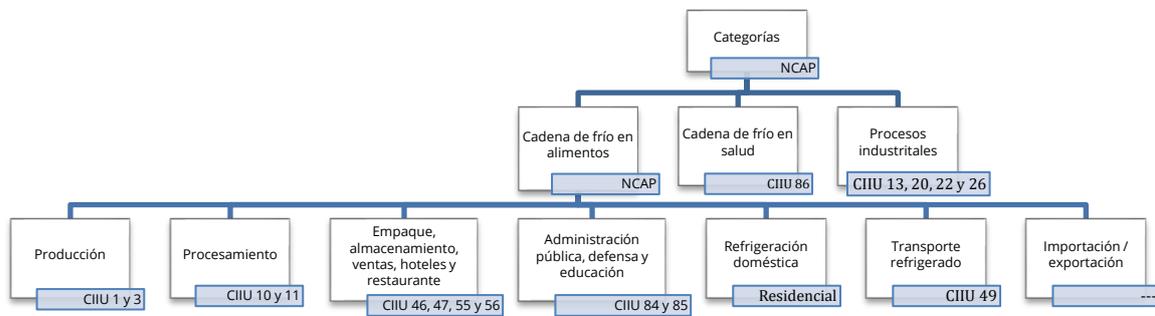
En dichos estudios, los sectores del país se encuentran segregados según las actividades económicas definidas por la Cámara de Comercio de Bogotá para la revisión 4. Estas se clasifican en producción agrícola (CIU 1 al 3), industriales (CIU 10 al CIU 18), manufactureros (CIU 19 al CIU 31), terciarios (CIU 45 al CIU 96), entre otros.

Adicionalmente, se cuenta con estudios de la Unidad Técnica de Ozono (UTO), que abarcan aspectos de eficiencia energética e inventario, divididos en sectores como refrigeración doméstica, refrigeración comercial e industrial, y transporte refrigerado.

En este contexto, se ha optado por priorizar la categorización establecida en el plan internacional, estableciendo una clasificación con los códigos CIU empleados en los estudios a nivel nacional. La Figura 1 sintetiza esta discriminación, donde se puede apreciar la vinculación entre las categorías del NCAP y su correspondiente CIU.

Cabe destacar que la selección de estos códigos CIU no ha sido arbitraria, sino que responde a su significativa participación en el consumo energético asociado a procesos de refrigeración, según lo evidenciado en los estudios realizados por la UPME (Consortio Génesis, 2013; Corporación EMA, 2022, 2024; Incombustion Unión Temporal, 2014). En consecuencia, aquellos códigos CIU que no presentaban un componente sustancial de refrigeración fueron excluidos de este análisis.

Figura 1. Categorización de los códigos CIU en el NCAP

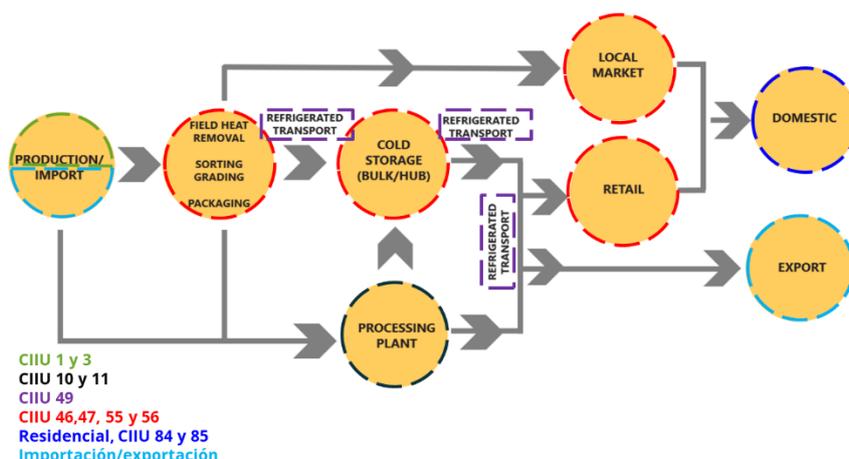


Fuente: Elaboración propia

Por una parte, la cadena de frío en alimentos representa un sistema logístico integral diseñado para la conservación de productos perecederos, a incluir como alimentos, bebidas y lácteos, entre otros. Este sistema opera desde la fase de producción hasta el consumo final, con el objetivo primordial de mantener la calidad de los productos y extender su vida útil.

El NCAP proporciona una estructura detallada de la cadena de frío, ilustrada en la Figura 2. No obstante, en el contexto nacional, se ha adoptado un enfoque de unificación que ha resultado en subcategorías identificadas por colores con el fin de alinearlos a la metodología internacional. Esta representación gráfica tiene como objetivo ilustrar las diversas etapas por las que atraviesan los alimentos, desde su producción en la finca hasta la mesa del consumidor final.

Figura 2. Componentes de la cadena de frío en alimentos según el NCAP



Fuente: Adaptado de (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021)

En la refrigeración en los sectores de producción colombianos, se observa que esta tecnología desempeña un papel fundamental en diversas actividades económicas. En los CIU 1 y 3, correspondientes al sector primario, la refrigeración se aplica en áreas específicas como se detalla en la

Tabla 1. Por ejemplo, en la floricultura se utiliza para prolongar la vida útil de las flores, mientras que en la ganadería se emplea para la conservación de la leche. En la porcicultura, la refrigeración es esencial para la preservación del esperma destinado a la inseminación artificial. Asimismo, en el sector pesquero, el uso de hielo es crucial para mantener la calidad del producto (Corporación EMA, 2024).

Tabla 1. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - producción

División	Grupo clase	Descripción
1	---	Agricultura, ganadería, caza y actividades de servicios conexas
	0125	Cultivo de flor de corte
	0141	Cría de ganado bovino y bufalino
	0144	Cría de ganado porcino
3	---	Pesca y acuicultura
	031	Pesca

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

En cuanto al procesamiento de alimentos, que abarca los CIU 10 y 11 (ver Tabla 2), la refrigeración es indispensable en múltiples etapas, desde la conservación de materias primas hasta el almacenamiento de productos terminados. Esto incluye una amplia gama de alimentos como cárnicos, pescados, frutas, verduras, aceites, lácteos y bebidas, entre otros (Incombustion Unión Temporal, 2014).

Es importante destacar que, para este estudio, se han integrado las etapas de empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes en una sola subcategoría. Esta decisión refleja la realidad del mercado colombiano, donde es común que los comercializadores asuman las funciones de empaque y almacenamiento, o que los productos pasen directamente de los productores a los puntos de venta final, demostrando la integración en el mercado. Esta categoría engloba los CIU 46, 47, 55 y 56, como se especifica en la Tabla 3.

Tabla 2. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - procesamiento

División	Grupo	Descripción
10	---	Elaboración de productos alimenticios
	101	Procesamiento y conservación de carne, pescado, crustáceos y moluscos
	102	Procesamiento y conservación de frutas, legumbres, hortalizas y tubérculos
	103	Elaboración de aceites y grasas de origen vegetal y animal
	104	Elaboración de productos lácteos
	105	Elaboración de productos de molinería, almidones y productos derivados del almidón
	108	Elaboración de otros productos alimenticios
11	---	Elaboración de bebidas

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

Tabla 3. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante

División	Grupo	Descripción
46	---	Comercio al por mayor y en comisión o por contrata, excepto el comercio de vehículos automotores y motocicletas
47	---	Comercio al por menor (incluso el comercio al por menor de combustibles), excepto el de vehículos automotores y motocicletas
55	---	Alojamiento
56	---	Actividades de servicios de comidas y bebidas

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

En el sector terciario, la administración pública, defensa y educación (CIU 84 y 85, Tabla 4) también hacen uso de la refrigeración, principalmente para la conservación de alimentos que se consumen directamente o se utilizan en la preparación de comidas.

Tabla 4. Descripción de códigos CIU de cadena de frío en alimentos - administración pública, defensa y educación

División	Grupo	Descripción
84	---	Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria
85	---	Educación

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

La refrigeración doméstica, si bien no se encuentra clasificada bajo un código CIU específico, desempeña un papel fundamental en la cadena de frío de los alimentos. Esta subdivisión resulta de vital importancia para la preservación de productos perecederos en su etapa final, justo antes del consumo en los hogares.

El transporte refrigerado, clasificado bajo el CIU 49 (ver Tabla 5), es un componente transversal en la cadena de frío de alimentos, presente en múltiples etapas del proceso logístico. Su importancia radica en garantizar el control térmico durante el traslado de productos perecederos.

Tabla 5. Descripción de códigos CIIU de cadena de frío en alimentos – transporte refrigerado

División	Clase	Descripción
49	---	Transporte terrestre; transporte por tuberías
	4923	Transporte de carga por carretera

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

Por otra parte, la categoría de cadena de frío en salud no requiere una subcategorización adicional, aunque es importante señalar que se encuentra clasificada dentro del código CIIU 86, correspondiente a "Actividades de atención de la salud humana". Es fundamental destacar el papel crítico que desempeña la refrigeración en este sector, siendo esencial para la preservación de productos sanitarios y medicamentos (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021).

Finalmente, la categoría de procesos industriales engloba diversos sectores de la industria, excluyendo el de alimentos y bebidas, que ha sido previamente categorizado. Dentro de esta clasificación se incluyen los códigos CIIU 13, 20, 22 y 26, como se detalla en la Tabla 6. Estos sectores presentan una demanda significativa de refrigeración en diversos procesos, tales como el almacenamiento de sustancias, la refrigeración de equipos y maquinaria, así como en aplicaciones específicas como centros de datos, instalaciones tecnológicas y la fabricación de semiconductores (Corporación EMA, 2014).

Tabla 6. Descripción de códigos CIIU de procesos industriales

División	Grupo	Descripción
13		Fabricación de productos textiles
	139	Fabricación de otros productos textiles
20	---	Fabricación de sustancias y productos químicos
22	---	Fabricación de productos de caucho y de plástico
26	---	Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos

Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020)

Para cada una de estas categorías se han analizado la demanda satisfecha y no satisfecha a través de cuatro variables fundamentales: (a) el inventario; (b) la demanda energética; (c) las emisiones equivalentes de CO₂ generadas; y (d) el refrigerante emitido a la atmósfera. El inventario se refiere a la cantidad de equipos existentes por tipo de tecnología. La demanda energética corresponde al consumo de electricidad, combustible en galones y la capacidad térmica en toneladas de refrigeración (TR).

En cuanto a las emisiones, estas se expresan en equivalente de dióxido de carbono (CO₂) y se calculan según el Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) de los refrigerantes utilizados en los equipos. Por último, el refrigerante se refiere a la cantidad de estos compuestos emitidos a la atmósfera durante y al final de la vida útil de los equipos.

2.1. Demanda satisfecha

La demanda satisfecha en el mercado de refrigeración colombiano abarca el abastecimiento efectivo de equipos, energía, combustibles y refrigerantes para diversas aplicaciones. Esta sección se desarrolla en dos etapas: primero, se expone la metodología para calcular el inventario y la demanda energética; posteriormente, se generaliza el cálculo de emisiones equivalentes de CO₂ y refrigerantes emitidos a la atmósfera.

2.1.1. Inventario y demanda energética (eléctrica, combustible y térmica)

Las variables del inventario y demanda energética están intrínsecamente relacionadas, ya que el cálculo de una depende directamente de la otra. Para abordar esta interdependencia, se han empleado dos metodologías: (a) top-down; y (b) bottom-up. Por un lado, la metodología top-down parte de la demanda energética conocida para inferir el stock de equipos. Este enfoque resulta particularmente útil cuando se dispone de datos agregados de consumo energético, pero se carece de información detallada sobre el inventario de equipos.

Por otro lado, la metodología bottom-up sigue el camino inverso: se parte del conocimiento del inventario de equipos para calcular la demanda energética asociada. Esta aproximación es especialmente valiosa cuando se cuenta con un registro detallado de los equipos en uso, pero se carece de datos precisos sobre su consumo energético agregado.

La elección entre estas dos metodologías no es arbitraria, sino que se basa en la naturaleza y disponibilidad de la información recopilada en los estudios previamente mencionados. Dependiendo del sector específico y de los datos disponibles, se opta por una u otra metodología.

Top down

La aplicación de la metodología top-down se extiende a diversas subcategorías de la cadena de frío de alimentos, excluyendo específicamente las de refrigeración doméstica y transporte refrigerado. Asimismo, este enfoque metodológico abarca también la cadena de frío en la categoría de salud, así como la de procesos industriales.

El proceso metodológico se inicia con la recolección de datos sobre consumos de energía del Sistema Único de Información (SUI), reportados en la herramienta O3 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024), para el año 2023. De los cuales, se extraen específicamente los datos correspondientes a los sectores industrial y comercial (terciario) de manera independiente seleccionando así los datos según la categorización del CIU.

Sin embargo, para la subcategoría de producción en la cadena de frío, se utilizaron los datos de energía para usuarios no regulados reportados por XM (s.f.) para el año 2022. Partiendo de la necesidad de totalizar la energía (regulada + no regulada), se cuantifica la energía regulada, mediante las porciones cuantificadas para ambos tipos de usuario proporcionadas por el estudio (Corporación EMA, 2024).

Posteriormente, se consultan las participaciones de energía eléctrica de los códigos CIU dentro de los sectores industrial y comercial, según corresponda, así como la participación de la refrigeración en el consumo de energía en diversos estudios realizados para la UPME (Corporación EMA, 2014, 2022, 2024; Incombustion Unión Temporal, 2014). Con estos porcentajes, se actualizan los consumos de energía (demanda) para los años mencionados, asumiendo que estas participaciones han permanecido constantes desde la realización de los estudios hasta las fechas de análisis.

Una vez obtenidas las cifras totales de consumo de energía por refrigeración, se calcularon o se toman directamente los porcentajes de participación de las diferentes tecnologías, reportadas por el estudio para la UPME en el sector agrícola, servicios, el inventario y el estudio de tiendas para la UTO (Consortio Génesis, 2013; Corporación ambiental empresarial, 2017a, 2021; Corporación EMA, 2024).

En este contexto, se utiliza la Ecuación (1) para calcular la demanda energética. Donde E es la demanda de energía eléctrica en un determinado sector (CIU), E_x es el porcentaje de

energía demandada por una división, E_Y es el porcentaje de consumo por grupo, y r es el porcentaje de demanda de refrigeración.

$$Demanda_i [GWh/año] = E[kWh] * \frac{E_X * E_Y * r}{1.000.000} \tag{1}$$

Es importante destacar que el valor de E_Y se requiere específicamente en dos contextos: el procesamiento dentro de la cadena de frío de alimentos y el sector textil (CIU 13) de procesos industriales. En estos casos, E_Y ha sido desagregado en sus respectivos grupos para un análisis más detallado. Para todas las demás categorías y sectores, se asume un valor de E_Y del 100%.

Para estos cálculos se tomaron las referencias de la Tabla 7. Considerando, que, para realizar estas operaciones, se asume que la distribución porcentual de participación energética en el consumo y refrigeración se ha mantenido constante hasta la fecha. Además, estos porcentajes provienen de estudios que aplicaron la metodología bottom-up, en los cuales se realizaron visitas para la recopilación de información del sector mediante muestreos.

Tabla 7. Fuentes de consulta para variables en el cálculo de demanda de energía por vía down

Categoría	Subcategoría	Sector	Fuentes			
			E	E_X	E_Y	r
Cadena de frío en alimentos	Producción	CIU 1	(Corporación EMA, 2024; XM, n.d.)*	NA		(Corporación EMA, 2024)
		CIU 3				
	Procesamiento	CIU 10	Sector industrial (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024)*	(Consortio CMA, 2015)	(Incombustion Unión Temporal, 2014)*	(Incombustion Unión Temporal, 2014)
		CIU 11				
	Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante	CIU 46	Sector comercial (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024)*	(Corporación EMA, 2022)*	NA	(Corporación EMA, 2022)
		CIU 47				
		CIU 55				
		CIU 56				
	Administración pública defensa y educación	CIU 84				
		CIU 85				
Cadena de frío en salud	---	CIU 86				
Procesos industriales	---	CIU 13	Sector industrial (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024)*	(Consortio CMA, 2015)		(Incombustion Unión Temporal, 2014)
		CIU 20				
		CIU 22				
		CIU 26				

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver columnas

Para estos cálculos, se emplearon diversos insumos, correspondientes a cada una de las variables requeridas en las ecuaciones ya mencionadas. Estos, provenientes de las fuentes mencionadas y cuyos valores se han sintetizado en la

Tabla 8. Donde, aquellos valores que no están acompañados de un asterisco han sido extraídos directamente de las fuentes citadas, mientras que los marcados con un asterisco son el resultado de cálculos previos realizados a partir de la información proporcionada por dichas fuentes. Esto aplica para todas las tablas de la presente sección 1.

Tabla 8. Insumos en el cálculo de demanda de energía vía Top down

Categoría	Subcategoría	Sector	E [kWh]	E _x [%]	E _y [%]	r [%]		
Cadena de frío en alimentos	Producción	CIIU 1	---	---	---	---		
		CIIU 0125	2022: 526.926.265*	---	---	15,98		
		CIIU 0141	2022: 54.695.907*	---	---	8,04		
		CIIU 0144	2022: 154.173.489*	---	---	1,48		
		CIIU 3	---	---	---	---		
		CIIU 031	2022: 33.231.309	---	---	0,87		
	Procesamiento	CIIU 10	2021: 15.209.884.412*	2022: 17.914.012.035*	17,8	---	---	
		CIIU 101			---	7*	52	
		CIIU 102			---	2*	30	
		CIIU 103			---	9*	14	
		CIIU 104			---	15*	36	
		CIIU 105			2023: 20.798.654.610*	---	12*	22
		CIIU 108			---	4*	8	
		CIIU 11			2,9	100	23	
	Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante	CIIU 46	2021: 11.718.315.742*	2022: 12.175.579.850*	6,4*	100	19	
		CIIU 47			20,4*	100	19	
		CIIU 55			5,6*	100	10	
		CIIU 56			0,4*	100	10	
		Administración pública, defensa y educación			CIIU 84	24,4*	100	1
					CIIU 85	3,7*	100	6
Cadena de frío en salud	---	CIIU 86	2023: 13.520.449.380*	10,4*	100	5		
Procesos industriales	----	CIIU 13	2021: 15.209.884.412*	9,9	---	---		
		CIIU 139	---	---	2*	1		
		CIIU 20	2022: 17.914.012.035*	10,8	100	1		
		CIIU 22	7,7	100	4			
		CIIU 26	2023: 20.798.654.610*	0,4	100	3		

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de Tabla 7

Para la subcategoría de producción (cadena de frío en alimentos), los valores de demanda corresponden a la energía de cada CIIU específico, calculados mediante los porcentajes de energía proporcionados por el estudio de la UPME (Corporación EMA, 2024). En dicho estudio se señala que el 31% corresponde a la demanda de usuarios no regulados, mientras

que el 69% corresponde a usuarios regulados. Con estas proporciones y los datos de demanda energética de usuarios no regulados de XM, se obtuvo la demanda.

Para el caso particular del CIU 0141 en la producción de la cadena de frío en alimentos, la demanda de refrigeración se determinó a partir del estudio de la (Corporación EMA, 2024), donde el 97,6% de la capacidad instalada corresponde a demanda eléctrica, mientras que el 2,4% utiliza combustible fósil. La demanda de combustible para refrigeración se estimó de la demanda energética calculada, utilizando la relación de 12 kWh/galón de combustible (valor asumido).

La subcategoría del sector de procesamiento y el CIU 139 de procesos industriales se basó en los consumos reportados por (Incombustion Unión Temporal, 2014), cuantificando sus porcentajes respectivos (E_Y).

Para los sectores de empaque, almacenamiento, ventas, hoteles, restaurantes, así como para administración pública, defensa y educación, se utilizaron los datos de consumo de 2022 (Corporación EMA, 2022), determinando así los porcentajes correspondientes a cada división (E_X).

Para la determinación del $Stock_i$ o inventario de tecnologías se utilizó la Ecuación (2), donde, la $Demanda_i$ anual fue calculada previamente, g es el porcentaje por tipo de refrigerante (amoníaco, HCFC o HCF), P_i es el porcentaje de dicha tecnología, y CE_i es el consumo específico de cada tipo de tecnología i .

$$Stock_i \text{ [número de unidades]} = Demanda_i \left[\frac{GWh}{año} \right] * \frac{g * P_i}{CE_i \left[\frac{GWh}{año} \right]} \tag{2}$$

Las fuentes de consulta para los cálculos mencionados se presentan en la Tabla 9. Destacando que la mayoría de los datos están marcados con un asterisco, lo cual indica que fueron calculados previamente. Adicionalmente, el valor de g solo es aplicable en las tecnologías asociadas al procesamiento de la cadena de frío en alimentos; para los demás casos, este valor se toma como 100%, ya que no se dividen las tecnologías por tipo de refrigerante.

Tabla 9. Fuentes de consulta para variables en el cálculo de número de equipos vía Top down

Categoría	Subcategoría	Sector	Fuentes		
			g	P_i	CE_i
Cadena de frío en alimentos	Producción	CIU 1	NA	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*	
		CIU 3			
	Procesamiento	CIU 10	(Incombustion Unión Temporal, 2014)*		
		CIU 11			
	Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante	CIU 46	NA	(Corporación ambiental empresarial, 2021)*	(Corporación ambiental empresarial, 2021)
		CIU 47		(Corporación ambiental empresarial, 2021)*	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*
		CIU 55			
		CIU 56			
	Administración pública, defensa y salud	CIU 84	NA	(Consortio Génesis, 2013)	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*
		CIU 85			
Cadena de frío en salud	---	CIU 86			
Procesos industriales	---	CIU 13	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*		
		CIU 20			
		CIU 22			
		CIU 26			

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver referencias en tabla

Los insumos obtenidos directamente de estas fuentes o calculados de ellas se mencionan a continuación:

Cadena de frío en alimentos - producción

La Tabla 10 presenta un compendio de las tecnologías identificadas en la subcategoría de producción durante el estudio de campo realizado en (Corporación EMA, 2024). Específicamente:

- En el cultivo de flor de corte (CIU 0125) se identificaron cuartos fríos con unidades condensadoras.
- Para la cría de ganado bovino y bufalino (CIU 0141) se observaron tanques de enfriamiento (unidades condensadoras) y plantas de combustión (unidades de refrigeración).
- En la cría de ganado porcino (CIU 0144) se registraron neveras.
- El sector de pesca (CIU 031) mostró la presencia de congeladores y máquinas de hielo, categorizados como equipos autocontenidos.

Tabla 10. Tecnologías de cadena de frío - producción

Tecnología	Refrigerante	Eficiencia promedio	P _i [%]	CE _i anual
Unidad condensadora (CIU 0125 y 0141)	R-22	9,17 BTU/h*W	10*	0,03 GWh*
	R-134 ^a	7,51 BTU/h*W	54*	0,03 GWh*
	R-404 ^a	5,40 BTU/h*W	36*	0,02 GWh*
Unidades móviles (CIU 0141)	R-134 ^a	7.926 BTU/h	0,3*	341 galones*
	R-404 ^a	17.334 BTU/h	99,7*	1.164 galones*
Nevera (CIU 0144)	R-134 ^a	2,07 We/W	82*	0,0004 GWh*
	R-600 ^a	4,44 We/W	18*	0,0002 GWh*
Autocontenido (CIU 031)	R-22	2,19 We/W	1*	0,003 GWh*
	R-134 ^a	1,67 We/W	73*	0,002 GWh*
	R-404 ^a	1,25 We/W	7*	0,004 GWh*
	R-507 ^a	1,5 We/W	1*	0,003 GWh*
	R-290	1,85 We/W	13	0,002 GWh*
	R-600 ^a	2 We/W	1*	0,002 GWh*
	R-744	2 We/W	5*	0,002 GWh*

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2017a)

Cadena de frío en alimentos - procesamiento

En la Tabla 11 se han consolidado los valores utilizados para *g*, considerando refrigerantes de amoníaco, HCFC y HCF. Estos valores fueron calculados utilizando las participaciones en toneladas de refrigeración de la Tabla 12. Esto se hizo descartando los CFC debido a las medidas de prohibición implementadas desde 2007 para estos (Sánchez Segura, 2010), lo cual permite asumir que actualmente no existen equipos operativos que utilicen este tipo de refrigerantes.

Tabla 11. Distribución porcentual de g para cadena de frío en alimentos - procesamiento

Categoría	Subcategoría	Sector CIU	g [%]		
			Amoniaco	HCFC	HFC
Cadena de frío en alimentos	Procesamiento	CIU 10	---	---	---
		CIU 101	70*	26*	4*
		CIU 102	99,2*	0,3*	0,5*
		CIU 103	15*	22*	63*
		CIU 104	94*	6*	0*
		CIU 105	100*	0*	0*
		CIU 108	0*	61*	39*
		CIU 11	98*	2*	0*

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaboración propia con datos de (Incombustion Unión Temporal, 2014)

Tabla 12. Promedio de capacidad instalada de TR por sector en 2014

Sector por códigos CIU revisión 3		Capacidad promedio de refrigeración por sector [TR]			
CIU	Descripción	Amoniaco	CFC	HCFC	HFC
101	Procesamiento y conservación de carne, pescado, crustáceos y moluscos	300	19	112	19
102	Procesamiento y conservación de frutas, legumbres, hortalizas y tubérculos	1200	0	4	6
103	Elaboración de aceites y grasas de origen vegetal y animal	47	0	70	200
104	Elaboración de productos lácteos	73	15	5	0
105	Molinería	510	0	0	0
106	Elaboración de productos de café	6	0	0	0
108	Elaboración de otros productos alimenticios	0	12	123	78
109	Concentrados para animales	0	0	0	3
110	Bebidas	389	40	9	0

Fuente: Adaptado de (Incombustion Unión Temporal, 2014)

Las tecnologías identificadas en la subcategorización se detallan en la Tabla 13. Es crucial señalar que estas pertenecen al sector industrial, lo que llevó a asumir una operación continua de los equipos (24 horas al día). Las tecnologías identificadas son sistemas centralizados de amoniaco (R-717), chillers y unidades condensadoras.

Tabla 13. Tecnologías de cadena de frío en alimentos - procesamiento

Tecnología	Refrigerante	Eficiencia promedio	P_i [%]	CE_i [GWh/año]
Sistema centralizado (CIU 10)	R-717	---	Amoníaco: 100	0,9*
Sistema centralizado (CIU 11)	R-717	---	Amoníaco: 100	1,8*
Chiller	R-22	1,14 kW/TR	HCFC: 49*	0,2*
Unidad condensadora	R-22	9,17 BTU/h*W	HCFC: 51*	0,03*
Chiller	R-123	0,5 kW/TR	HFC: 9*	0,1*
	R-134 ^a	0,75 kW/TR	HFC: 21*	1,5*
Unidad condensadora	R-134 ^a	7,51 BTU/h*W	HFC: 42*	0,03*
	R-404 ^a	5,40 BTU/h*W	HFC: 28*	0,02*

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2017a; Incombustion Unión Temporal, 2014)

Los sistemas centralizados fueron reportados en el estudio y en las visitas realizados por (Incombustion Unión Temporal, 2014), donde se encontró que la potencia promedio para los CIU 10 y 11 fue de 100 kW y 200 kW, respectivamente. Por su parte, los chillers y unidades condensadoras fueron documentados en el inventario para la UTO en el sector industrial, incluyendo sus especificaciones promedio (Corporación ambiental empresarial, 2017a).

Las participaciones fueron determinadas utilizando datos del año 2015, específicamente el número de equipos y sus potencias promedio, según lo reportado por la (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Se optó por este año base debido a que representa el último período con datos consultados directamente, siendo los años posteriores proyecciones. Esta metodología permitió cuantificar la potencia total instalada por tecnología y calcular los porcentajes correspondientes. Es importante señalar que este procedimiento se aplicó consistentemente a lo largo de la sección 1 para diversas participaciones de capacidad instalada, particularmente aquellas referenciadas del inventario de la Unidad Técnica de Ozono (UTO), correspondientes básicamente todas las categorías, a excepción del sector de ventas.

Cadena de frío en alimentos - empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes

Dada la complejidad y amplitud de esta subcategoría, el análisis se estructuró en dos fases principales. En primera instancia, se detallan los insumos empleados para el cálculo de la demanda energética en el sector de ventas, que comprende los códigos CIU 46 y 47. Subsecuentemente, se abordan los insumos asociados a los sectores de hoteles (CIU 55) y restaurantes (CIU 56).

Por una parte, las tecnologías asociadas al sector de ventas, se obtuvieron del estudio realizado por la (Corporación ambiental empresarial, 2021). En dicho estudio, se consideraron tiendas con áreas superiores a 100 m², clasificándolos en cinco tipos según su tamaño comercial:

- Hipermercados (HM): áreas mayores a 5.000 m²
- Supermercados grandes (SG): entre 3.001 m² y 5.000 m²
- Supermercados medianos (SM): entre 1.201 m² y 3.000 m²
- Supermercados pequeños (SP): entre 701 m² y 1.200 m²

- Tiendas de conveniencia (TC): entre 100 m² y 700 m²

Las tiendas se dividieron entre comercio al por mayor (CIU 46) y comercio al por menor (CIU 47). El comercio al por mayor incluye los tipos HM, SG y SM, mientras que el comercio al por menor comprende SP y TC. Debido a esta distinción por tipo de tienda, fue necesario fraccionar la demanda energética para cada categoría. Los resultados muestran que en el comercio al por mayor, las proporciones son: 42% (HM), 32% (SG) y 26% (SM). Para el comercio al por menor, las proporciones son: 85% (SP) y 15% (TC).

A partir de estos valores de consumo anual, se calcularon las participaciones energéticas para cada una de las tecnologías (P_i). Los consumos se tomaron directamente de los promedios diarios de consumo de los equipos (CE_i). Estos datos se resumen en la Tabla 14 para comercio al por mayor y en la Tabla 15 para comercio al por menor.

Tabla 14. Tecnologías, participación y consumo específico para ventas al por mayor (CIU 46)

Tecnología	P_i [%]			CE_i [GWh/año]		
	HM	SG	SM	HM	SG	SM
Autocontenido	15*	13*	20*	0,003	0,003	0,004
Sistema centralizado	85*	86*	80*	0,290	0,169	0,126
Unidad condensadora	---	0,2*	0,4*	---	0,009	0,012

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

Tabla 15. Tecnologías, participación y consumo específico para ventas al por menor (CIU 47)

Tecnología	P_i [%]		CE_i [GWh/año]	
	SP	TC	SP	TC
Autocontenido	23*	31*	0,005	0,004
Sistema centralizado	77*	69*	0,099	0,048
Unidad condensadora	0,5*	---	0,015	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

Por otra parte, en los sectores de hoteles (CIU 55) y restaurantes (CIU 56), se identificaron dos categorías principales de tecnologías de refrigeración: equipos autocontenidos (dispensadoras, vitrinas, congeladores, neveras y botelleros) y unidades condensadoras (principalmente cuartos fríos). La distribución y porcentajes de estas tecnologías fueron documentados por el (Consortio Génesis, 2013). Para alinear esta información con los datos de la UTO, los porcentajes (P_i) se consolidaron en estas dos tecnologías.

Los consumos específicos (CE_i) se calcularon basándose en los datos de equipos comerciales reportados por la UTO, según la (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Se asumieron 10 horas de operación para autocontenidos, basado en la media de operación de un refrigerador (AirFrisco, s.f.), y 24 horas para unidades condensadoras, considerando su operación continua en entornos industriales. La Tabla 16 sintetiza estas tecnologías y sus especificaciones clave.

Tabla 16. Tecnologías, participación y consumo específico para hoteles (CIU 55) y restaurantes (CIU 56)

Tecnología	Refrigerante	Eficiencia promedio	P_i [%]	CE_i anual
Autocontenido	R-22	2,19 We/W	1*	0,003 GWh*
	R-134 ^a	1,67 We/W	73*	0,002 GWh*
	R-404 ^a	1,25 We/W	7*	0,004 GWh*
	R-507 ^a	1,5 We/W	1*	0,003 GWh*
	R-290	1,85 We/W	13*	0,002 GWh*
	R-600 ^a	2 We/W	1*	0,003 GWh*
	R-744	2 We/W	5*	0,003 GWh*
Unidad condensadora	R-22	9,17 BTU/h*W	41*	0,03 GWh*
	R-134 ^a	7,51 BTU/h*W	30*	0,03 GWh*
	R-404 ^a	5,40 BTU/h*W	28*	0,02 GWh*

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Consortio Génesis, 2013; Corporación ambiental empresarial, 2017a)

Cadena de frío en alimentos - administración pública, defensa y educación

En los sectores de administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria (CIU 84) y educación (CIU 85), las tecnologías de refrigeración fueron identificadas mediante el estudio (Consortio Génesis, 2013). Ambos sectores reportaron equipos autocontenidos (dispensadoras, vitrinas, congeladores, neveras y botelleros), mientras que las unidades condensadoras (cuartos fríos) se registraron exclusivamente en el sector CIU 84.

Consecuentemente, la distribución tecnológica para el CIU 84 se estableció en 76% autocontenidos y 24% unidades condensadoras, mientras que el CIU 85 presentó un 100% de equipos autocontenidos. Estos factores de distribución energética deben aplicarse previamente a la utilización de la Ecuación (2). Las participaciones (P_i) y consumos específicos promedio (CE_i) de cada tecnología corresponden a los detallados en la Tabla 16.

Cadena de frío en salud

El estudio de campo realizado por el (Consortio Génesis, 2013) en el sector de salud (CIU 86) reveló la presencia exclusiva de equipos autocontenidos. Específicamente, se identificaron dispensadoras, vitrinas, congeladores, neveras y botelleros, representando el 100% de las tecnologías de refrigeración en este sector. Las especificaciones técnicas de estos equipos se detallan en la Tabla 16.

Procesos industriales

La categoría de procesos industriales, que comprende los sectores textiles (CIU 13), químicos (CIU 20), caucho y plástico (CIU 22), e informáticos y electrónicos (CIU 26), incorpora dos tipos principales de tecnologías de refrigeración: chillers y unidades condensadoras, como se detalla en la Tabla 17. Por una parte, para el CIU 13 se emplean unidades condensadoras, mientras que el CIU 20 utiliza ambas tecnologías. Por otra parte, los CIU 22 y 26 emplean exclusivamente chillers, según lo documentado por (Consortio Génesis, 2013; LOXAM, 2023; ROCA, n.d.).

Las participaciones (P_i) y los consumos específicos (CE_i) de estas tecnologías, sintetizados en la Tabla 17, se calcularon mediante una distribución de potencia instalada. Este cálculo se basó en los datos de equipos nacionales de 2015 y la potencia promedio reportada por la (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Estimando con esto, la potencia total y con ello, un porcentaje de participación.

Tabla 17. Tecnologías de cadena de frío - procesos industriales

Tecnología	Refrigerante	Eficiencia promedio	P _i [%]		CE _i [GWh/año]
			CIU13 y 20	CIU22 y 26	
Chiller	R-22	1,14 kW/TR	6*	19*	0,2*
	R-123	0,5 kW/TR	8*	24*	0,1*
	R-134 ^a	0,75 kW/TR	19*	57*	1.5*
Unidad condensadora	R-22	9,17 BTU/h*W	7*	---	0,03*
	R-134 ^a	7,51 BTU/h*W	36*	---	0,03*
	R-404 ^a	5,40 BTU/h*W	24*	---	0,02*

*Datos calculados previamente

Fuente: Adaptado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2017a)

Bottom up

La metodología bottom-up se implementó para las subcategorías de refrigeración doméstica y transporte refrigerado, pertenecientes a la cadena de frío en alimentos, dado que se dispone de inventarios detallados de estos. Dentro de las encuestas de calidad de vida del DANE y el inventario realizado para la UTO en 2017.

Cadena de frío en alimentos – refrigeración doméstica

El análisis del sector residencial se basó en la Encuesta de Calidad de Vida del DANE (2023), que permitió cuantificar el inventario de neveras en tres categorías según su tamaño (pequeña, mediana y grande)¹. Para el cálculo de la demanda energética, se aplicó la Ecuación (3), donde el Stock_a corresponde al inventario por departamento del DANE y el CE_i representa el consumo específico, detallado en la Tabla 18.

$$Demanda_i \left[\frac{GWh}{año} \right] = \sum_{i=1}^n Stock_a \text{ [número de unidades]} * CE_i \left[\frac{GWh}{año} \right] \tag{3}$$

Tabla 18. Fuentes de consulta para cálculo de demanda de combustible en refrigeración doméstica

Categoría	Subcategoría	Sector	Fuentes para CE _i
Cadena de frío en alimentos	Refrigeración doméstica	---	Neveras antiguas: (UPME et al., 2018)
			Neveras nuevas: (USAENE & Corporación EMA, 2023) y equipos comerciales de (Éxito Colombia, n.d.-a, n.d.-c, n.d.-b)

Fuente: Ver columna

La cuantificación inicial de neveras se basó en el inventario del DANE. Sin embargo, para un cálculo preciso de la demanda, fue necesario establecer los consumos específicos y la proporción de neveras nuevas y antiguas.

Con este fin, para las neveras (antiguas), se consultó el consumo específico promedio según la antigüedad de los equipos, fundamentado en el estudio de la (UPME et al., 2018) calculadas mediante el promedio de consumo de las neveras reportadas en la ECV de 2015,

¹ Tipo de neveras según el (DANE, 2023): pequeña (menor o igual a 1,7 metros de altura), mediana (mayor a 1,7 metros de altura) y grande (mayor a 1,7 metros de altura y con 2 puertas laterales o 2 puertas y gavetas).

cuyos valores se presentan en la Tabla 19. En complemento, la antigüedad promedio de las neveras se obtuvo de la Encuesta de Calidad de Vida del (DANE, 2019b).

Es importante señalar que estos consumos corresponden a tecnologías vigentes en 2018. Para actualizar la antigüedad de las neveras al año 2023, se añadió un período de 4 años. No obstante, considerando la evolución normativa en Colombia respecto a etiquetado y eficiencia energética, estos consumos se asociaron a neveras antiguas, es decir, aquellas que no han sido reemplazadas y mantienen consumos elevados.

Tabla 19. Consumo específico neveras antiguas

Antigüedad de la nevera	CE _i por tamaño [kWh/mes]		
	Pequeña	Mediana	Grande
< 1 año	50	68	87
1-5 años	56	75	96
6-10 años	61	82	106
11-15 años	67	90	115
16-20 años	72	97	124
> 20 años	79	106	137

Fuente: Adaptado de (UPME et al., 2018)

La estimación de neveras nuevas o reemplazadas se fundamentó en el estudio de mercado de la (Cámara del Sector de Electrodomésticos, 2023), que proporciona datos de ventas para el período 2019-2022². Para el año 2023, se realizó una proyección basada en el promedio anual de los años anteriores. En este análisis, se asumió que todas las neveras nuevas corresponden a la etiqueta energética B, cuyos consumos específicos se obtuvieron de las fuentes detalladas en la Tabla 20.

Tabla 20. Tecnología de neveras nuevas con etiqueta B en el mercado a 2023

Tipo de nevera	Altura [m]	Capacidad [litros]	Número de puertas	Consumo [kWh/mes]	Fuente
Pequeña	1,24	220	1	19,8	(Éxito Colombia, n.d.-b)
Mediana	1,78	313	1	32,1	(Éxito Colombia, n.d.-c)
Grande	1,78	628	2	53,7	(Éxito Colombia, n.d.-a)

Fuente: Ver columna

Dada la variabilidad climática de Colombia, la distribución de estas neveras nuevas se realizó según la segmentación departamental del DANE, considerando los tres tipos de clima predominantes: frío, templado y cálido. Esta distinción es crucial, ya que el consumo energético de las neveras varía significativamente según las condiciones climáticas.

Para abordar esta variabilidad, se adoptó la metodología propuesta en (USAENE & Corporación EMA, 2023). De allí, se tomaron como referencia los valores de consumo para clima frío, aplicando factores de ajuste para climas templados y cálidos, con incrementos del 10% y 20% respectivamente. Los resultados de estos cálculos, junto con los valores iniciales, se sintetizan en la Tabla 21.

² La decisión de considerar "nuevas" las neveras a partir de 2019 se basa en la disponibilidad de datos de consumo para equipos del año 2018.

Tabla 21. Consumo específico neveras nuevas por clima

Tipo de nevera	CE _i etiqueta B [kWh/mes]		
	Frío	Templado	Cálido
Pequeña	19,8	21,8	23,8
Mediana	32,1	35,3	38,5
Grande	53,7	59,1	64,4

Fuente: Tomado y elaborado con datos de (Éxito Colombia, n.d.-a, n.d.-c, n.d.-b; USAENE & Corporación EMA, 2023)

Finalmente, con base en las neveras vendidas entre 2019 y 2023 en Colombia, y el total reportado por el DANE para 2023, se estima que un 36% de las neveras poseen etiquetas nuevas (B), mientras que el 64% restante aún se categoriza como antiguas, a pesar de sus altos consumos energéticos.

Cadena de frío en alimentos - transporte refrigerado

En lo que respecta a la subcategoría de transporte refrigerado, se empleó el inventario desarrollado para la UTO (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Este documento proporciona las características promedio de los equipos, incluyendo datos cruciales como su consumo y eficiencia. En la Tabla 22 se presenta una síntesis de las tecnologías consideradas y sus especificaciones relevantes, las cuales comprenden unidades condensadoras y contenedores refrigerados.

Tabla 22. Especificaciones de equipos de cadena de frío en alimentos - transporte refrigerado

Tecnología	Refrigerante	Eficiencia [BTU/h*W]	Capacidad térmica promedio [BTU/h]
Unidades de refrigeración	R-134 ^a	7,51	7.926
	R-404 ^a	5,40	17.334
Contenedores refrigerados	R-134 ^a	7,51	35.000

Fuente: Ver referencias en tabla

Una vez establecidas las proyecciones para el período 2016-2023, según lo estipulado por la UTO, se procedió a aplicar la Ecuación (4) para la estimación de la demanda de combustible, expresada en galones de combustible. En esta ecuación, el término CE_i representa el consumo específico, cuyo cálculo se fundamenta en las fuentes detalladas en la Tabla 23.

$$Demanda_i \left[\frac{l \text{ de gasolina}}{\text{año}} \right] = \sum_{i=1}^h Stock_i [\text{número de unidades}] * CE_i \left[\frac{gal}{\text{año}} \right] \tag{4}$$

Tabla 23. Fuentes de consulta para cálculo de demanda de combustible en transporte refrigerado

Categoría	Subcategoría	Sector	Fuentes para CE _i
Cadena de frío en alimentos	Transporte refrigerado	CIIU 4923	(ABC Motor, 2020; Corporación ambiental empresarial, 2017a; Ministerio de Transporte, 2012)*

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver columna

Los resultados del cálculo del consumo específico promedio se presentan de manera resumida en la Tabla 24. Para la obtención de estos valores, se consideraron los siguientes parámetros:

- Un tiempo de operación diaria de 12 horas, según lo reportado por el (Ministerio de Transporte, 2012)
- Un factor de conversión energética de 12 kWh por galón de combustible, asumidos.
- Los valores promedio de consumo y eficiencia extraídos del inventario para la UTO (Corporación ambiental empresarial, 2017a).

Tabla 24. Variables en el cálculo de demanda de combustible para transporte refrigerado vía Bottom up

Tecnología	Refrigerante	Consumo específico representativo [gal/año]
Unidades de refrigeración	R-134 ^a	341
	R-404 ^a	1.164
Contenedor refrigerado	R-134 ^a	1.701

Fuente: Adaptado con fuentes de Tabla 23

2.1.2. Demanda de potencia térmica

La demanda de potencia térmica se refiere a las toneladas de refrigeración (TR) instaladas necesarias para satisfacer la demanda de frío del inventario existente. Para su cálculo, se ha empleado la Ecuación (5), donde $Stock_i$ representa el inventario de la tecnología i y TRE_i la capacidad térmica promedio específica de dicha tecnología.

$$Potencia\ térmica[TR] = \sum_{i=1}^h Stock_i [número\ de\ unidades] * TRE_i[TR] \tag{5}$$

En la Tabla 25 se han sintetizado las referencias consultadas para el cálculo de las toneladas de refrigeración. Es crucial destacar que los datos originales se presentaban en diversas unidades, incluyendo BTU/h, We y kWh/litro. Para lograr una comparación adecuada, se procedió a convertir estas unidades mediante sus eficiencias, litros promedio y horas de operación, las cuales fueron reportadas en las mismas referencias. Para el caso específico de los sistemas centralizados, se asume una relación de 1 kW/TR debido a la falta de información precisa sobre su eficiencia.

Utilizando esta información como base, se llevó a cabo los cálculos correspondientes. Los resultados obtenidos han sido consignados en la Tabla 26. En esta, se presentan las toneladas de refrigeración para las diversas tecnologías aplicables a tres categorías principales: cadena de frío en alimentos, cadena de frío en salud y procesos industriales. Aunque, la única subcategoría que no se encuentra en esta tabla es la de empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes para los CIU 46 y 47, correspondientes a comercio al por mayor y menor, respectivamente; debido a la diferencia de fuente. Para abordar esta particularidad, se decidió organizar las toneladas de refrigeración para esta subcategoría en la Tabla 27, clasificándolas por tipo de tienda.

Tabla 25. Fuentes de refrigeración para cálculo de las toneladas de refrigeración asociadas a tecnologías

Tecnología	Refrigerante	Fuente
Unidad condensadora	R-22	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*
	R-134 ^a	
	R-404 ^a	
Unidades móviles	R-134 ^a	
	R-404 ^a	
Nevera	R-134 ^a	
	R-600 ^a	
Autocontenido	R-22	
	R-134 ^a	
	R-404 ^a	
	R-507 ^a	
	R-290	
	R-600 ^a	
Sistema centralizado	R-717	(Incombustion Unión Temporal, 2014)*
	R-717	
Chiller	R-22	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)*
	R-123	
	R-134 ^a	
Contenedor refrigerado	R-134 ^a	
Autocontenido	NA	(Corporación ambiental empresarial, 2021)*
Sistema centralizado		
Unidad condensadora		

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver referencias en tabla

Tabla 26. Toneladas de refrigeración asociadas a tecnologías por categoría de aplicación

Tecnología	TRE _i [TR]	Categoría de aplicación		
		Cadena de frío en alimentos	Cadena de frío en salud	Procesos industriales
Unidad condensadora R-22	2,9*	Producción: CIIU 0125 y 0141 Procesamiento: CIIU 10 y 11 Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes: CIIU 55 y 56 Administración pública, defensa y salud: CIIU 84 y 85	NA	CIIU 13 y 20
Unidad condensadora R-134 ^a	2,0*			
Unidad condensadora R-404 ^a	1,3*			

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaborado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2017a)

Tabla 26. Toneladas de refrigeración asociadas a tecnologías por categoría de aplicación (continuación)

Tecnología	TRE _i [TR]	Categoría de aplicación		
		Cadena de frío en alimentos	Cadena de frío en salud	Procesos industriales
Nevera R-134 ^a	0,06*	Producción: CIU 0144 Refrigeración doméstica	NA	NA
Nevera R-600 ^a	0,06*			
Autocontenido R-22	0,5*	Producción: CIU 031 Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes: CIU 55 y 56 Administración pública, defensa y salud: CIU 84 y 85	CIU 86	
Autocontenido R-134 ^a	0,3*			
Autocontenido R-404 ^a	0,4*			
Autocontenido R-507 ^a	0,4*			
Autocontenido R-290	0,3*			
Autocontenido R-600 ^a	0,4*			
Autocontenido R-744	0,4*			
Sistema centralizado R-717	100*	Procesamiento: CIU 10	NA	
Sistema centralizado R-717	200*	Procesamiento: CIU 11		
Chiller R-22	17	Procesamiento: CIU 10 y 11		
Chiller R-123	549			
Chiller R-134 ^a	229			
Contenedor refrigerado R-134 ^a	2,9*	Transporte refrigerado	NA	

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaborado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2017a)

Tabla 27. Toneladas de refrigeración asociadas a empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes - CIU 46 y 47

Tecnología	TRE _i [TR]				
	CIU 46			CIU 47	
	HG	SG	SM	SP	TC
Autocontenido	0,1*	0,1*	0,1*	0,2*	0,1*
Sistema centralizado	9,4*	5,5*	4,1*	3,2*	1,6*
Unidad condensadora	---	0,3*	0,4*	0,5*	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaborado con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

2.1.3. Emisiones equivalentes de CO₂ generadas

La metodología empleada para el cálculo de las **emisiones equivalentes de CO₂ y cantidad de refrigerantes emitidos a la atmosfera** presentan una estructura genérica aplicable a

todos las categorías y subcategorías analizados en este estudio (cadena de frío en alimentos, cadena de frío en salud y procesos industriales).

Por su parte, las **emisiones equivalentes de CO₂** se realiza mediante el método del impacto total equivalente de calentamiento (TEWI, por sus siglas en inglés), conforme a la Ecuación (6) (Corporación ambiental empresarial, 2021). Este método descompone las emisiones en tres categorías principales: (a) emisiones directas por operación; (b) emisiones directas por disposición; y (c) emisiones indirectas.

Las dos primeras categorías están asociadas a las liberaciones de refrigerante, ya sea por recargas anuales debido a fugas o por la carga inicial del sistema. Por otro lado, las emisiones indirectas se derivan del consumo energético necesario para la operación del equipo, ya sea en forma de electricidad o de combustible en el caso de sistemas de transporte.

$$TEWI_t[tCO_2 - eq] = ID_{operación-t} + ID_{disposición-t} + II_t \quad (6)$$

Las emisiones directas específicas por operación se cuantifican mediante la Ecuación (7), donde *GWP* representa el potencial de calentamiento global del refrigerante, *m* corresponde a la recarga del refrigerante expresada en toneladas, y *L* denota el porcentaje anual de pérdidas de refrigerante.

$$ID_{operación}[tCO_2 - eq] = GWP * m [toneladas] * L \quad (7)$$

Las emisiones directas específicas por disposición se cuantifican mediante la Ecuación (8), bajo el supuesto de una distribución homogénea de la carga a lo largo de la vida útil del equipo. En esta ecuación, *n* representa la vida útil del equipo expresada en años, *GWP* denota el potencial de calentamiento global del refrigerante, y *m* corresponde a la recarga del refrigerante en toneladas.

$$ID_{disposición}[tCO_2 - eq] = \frac{GWP * m [toneladas]}{n [años]} \quad (8)$$

Las emisiones indirectas específicas se cuantifican mediante la Ecuación (9), donde *Demanda_i* representa la **demanda energética** anual de la tecnología *i*, expresada en MWh/año, y *β* corresponde al factor de emisión para la energía producida, según lo establecido por la UPME (UPME, 2022) para la energía producida por equipos de inventario (0,112 tCO₂-eq/MWh).

$$II[tCO_2 - eq] = CE_i \left[\frac{MWh}{año} \right] * \beta \left[\frac{tCO_2 - eq}{MWh} \right] \quad (9)$$

El cálculo de las emisiones equivalentes de CO₂ totales por tecnología se realiza mediante la multiplicación del número de unidades por sus emisiones específicas correspondientes. Posteriormente, se procede a la sumatoria de las emisiones totales de cada tecnología para obtener el total por sector, como se evidencia en las Ecuaciones (10), (11) y (12). Para determinar las emisiones totales, se efectúa la suma de las emisiones directas por operación, las emisiones directas por disposición y las emisiones indirectas, tal como se expresa en la Ecuación (13).

$$Emisiones\ directas\ por\ operación\ [tCO_2 - eq] = \sum_{t=1}^h Stock_t * ID_{operación-t} \tag{10}$$

$$Emisiones\ directas\ por\ disposición\ [tCO_2 - eq] = \sum_{t=1}^h Stock_t * ID_{disposición-t} \tag{11}$$

$$Emisiones\ indirectas\ [tCO_2 - eq] = \sum_{t=1}^h Stock_t * II_t \tag{12}$$

$$\begin{aligned} Emisiones\ totales\ [tCO_2 - eq] &= Emisiones\ directas\ por\ operación\ [tCO_2 - eq] \\ &+ Emisiones\ directas\ por\ disposición\ [tCO_2 - eq] \\ &+ Emisiones\ indirectas\ [tCO_2 - eq] \end{aligned} \tag{13}$$

Los insumos necesarios para la cuantificación de las emisiones equivalentes de CO₂ se obtuvieron de diversas fuentes, las cuales se presentan de manera detallada en la Tabla 28. Es importante resaltar que todos estos valores fueron extraídos directamente de las fuentes originales, sin requerir cálculos adicionales. Adicionalmente, los valores de energía para emisiones indirectas se tomaron de las previamente calculadas en la demanda energética.

Tabla 28. Fuentes de consulta para cálculo de emisiones equivalente de CO₂

Categoría	Subcategoría	Sector	GWP	m	L	n	β
Cadena de frío en alimentos	Producción	CIU 1	(Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)	(Corporación ambiental empresarial, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2021)	(UPME, 2022)
		CIU 3				(Corporación ambiental empresarial, 2021)	
	Procesamiento	CIU 10				(Corporación ambiental empresarial, 2021; Guía Do Ar Condicionado, 2023)	
		CIU 11				(Corporación ambiental empresarial, 2021)	
	Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante	CIU 46	(Corporación ambiental empresarial, 2021; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2021)		(Corporación ambiental empresarial, 2021)	
		CIU 47					
		CIU 55	(Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)	(Corporación ambiental empresarial, 2021)		
		CIU 56					
	Administración pública, defensa y educación	CIU 84	(Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)	(Corporación ambiental empresarial, 2021)		
		CIU 85					

Fuente: Ver referencias en tabla

Tabla 29. Fuentes de consulta para cálculo de emisiones equivalente de CO₂

Categoría	Subcategoría	Sector	GWP	m	L	n	β
	Refrigeración doméstica	---	(Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)	(Corporación ambiental empresarial, 2017a)		(Corporación ambiental empresarial, 2021)	(UPME, 2022)
	Transporte refrigerado	4923					
Cadena de frío en salud	---	CIIU 86					
Procesamientos industriales	---	CIIU 13				(Corporación ambiental empresarial, 2021)	
		CIIU 20					
		CIIU 22					
		CIIU 26					

Fuente: Ver referencias en tabla

En lo que concierne al potencial de calentamiento global de los refrigerantes empleados en las diversas tecnologías de las categorías analizadas, se ha elaborado una síntesis de los valores correspondientes en la Tabla 30. Asimismo, los datos referentes a la recarga de refrigerante (L) y los años de vida útil (n) se presentan de manera detallada en la Tabla 31. Es pertinente señalar que estos parámetros tienen una aplicación más amplia, extendiéndose a otras tecnologías relacionadas. En particular, la categoría de autocontenidos abarca tanto neveras como contenedores refrigerados, mientras que la denominación de unidades condensadoras incluye las unidades refrigerantes.

Tabla 30. Potencial de calentamiento global de refrigerantes en tecnologías

Refrigerante	GWP
R-22	1.810
R-123	77
R-134 ^a	1.430
R-404 ^a	3.922
R-717	0
R-507	3.300
R-290	3
R-600 ^a	4
R-744	1
R-744/R-404 ^a	1.177
R-744/R-507	1.196

Fuente: Adaptado de (Corporación ambiental empresarial, 2021; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021)

Tabla 31. Porcentaje de recarga anual de refrigerante y vida útil por tecnología

Tecnología	L [%]	n [Años]
Autocontenido	3,4	11
Unidad condensadora	34,6	17
Sistema centralizado	44,9	15
Chiller	8	18

Fuente: Adaptado de (Corporación ambiental empresarial, 2021; Drake Refrigeration Inc, 2022; Guia Do Ar Condicionado, 2023)

Las emisiones específicas para estimar las emisiones equivalentes de CO₂ de cada categoría se presenta a continuación:

Cadena de frío en alimentos – producción

En lo que respecta a la subcategoría de producción en la cadena de frío en alimentos, se han sintetizado los datos necesarios en la Tabla 32, presentando las emisiones específicas correspondientes.

Tabla 32. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - producción

Tecnología	Refrigerante	Emisiones específicas [tCO ₂ -eq]		
		Directa operación	Directa disposición	Indirectas
Unidad condensadora (CIU 0125 y 0141)	R-22	2,5*	0,4*	3,7*
	R-134 ^a	3,2*	0,5*	3,1*
	R-404 ^a	3,4*	0,6*	2,8*
Unidades móviles (CIU 0141)	R-134 ^a	0,6*	0,1*	0,5*
	R-404 ^a	3,4*	0,6*	1,6*
Nevera (CIU 0144)	R-134 ^a	0,005*	0,01*	0,04*
	R-600 ^a	0,00001*	0,00002*	0,02*
Autocontenido (CIU 031)	R-22	0,1*	0,3*	0,3*
	R-134 ^a	0,03*	0,1*	0,2*
	R-404 ^a	0,07*	0,2*	0,5*
	R-507 ^a	0,2*	0,4*	0,4*
	R-290	0,00002*	0,00005*	0,2*
	R-600 ^a	0,000004*	0,00001*	0,3*
	R-744	0,00002*	0,00004*	0,3*

*Datos calculados previamente

Fuente: *Elaboración propia con datos de* (Corporación ambiental empresarial, 2017a; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021; UPME, 2022)

Es importante señalar que los valores de carga de refrigerante (*m*) se obtuvieron de los promedios establecidos por la (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Por otra parte, tanto la recarga anual de refrigerante (*L*) como los años de vida útil (*n*) se extrajeron del promedio calculado para estas tecnologías según el informe de la (Corporación ambiental empresarial, 2021).

Cadena de frío en alimentos - procesamiento

En la Tabla 33 se presentan las emisiones específicas correspondientes al procesamiento en la cadena de frío de alimentos. Para la obtención de estos datos, se recurrió a las mismas fuentes empleadas en la subcategoría de producción. Sin embargo, en el caso de los chillers, los valores de recarga anual de refrigerante (*L*) y los años de vida útil (*n*) se obtuvieron de fuentes adicionales, específicamente de (Drake Refrigeration Inc, 2022; Guia Do Ar Condicionado, 2023).

Tabla 33. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - procesamiento

Tecnología	Refrigerante	Emisiones específicas [tCO ₂ -eq]		
		Directa operación	Directa disposición	Indirectas
Sistema centralizado	R-717	0*	0*	98*
Chiller	R-22	1,4*	1*	19*
	R-123	1,5*	1,1*	11*
	R-134 ^a	25*	17*	169*
Unidad condensadora	R-22	2,5*	0,4*	4*
	R-134 ^a	3,2*	0,5*	3*
	R-404 ^a	3,4*	0,6*	3*

*Datos calculados previamente

Fuente: *Elaboración propia con datos de* (Corporación ambiental empresarial, 2021; Drake Refrigeration Inc, 2022; Guia Do Ar Condicionado, 2023; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021; UPME, 2022)

Cadena de frío en alimentos - empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes

La subcategoría en cuestión se ha estructurado en dos componentes principales: (a) ventas y (b) hoteles y restaurantes. El componente de ventas abarca tanto las ventas al por mayor (CIU 46) como al por menor (CIU 47), mientras que el componente de hoteles y restaurantes corresponde a los códigos CIU 55 y 56, respectivamente.

En lo que concierne al sector de ventas, las tiendas clasificadas como HM, SG y SM se incluyen en la categoría de ventas al por mayor, en tanto que las tiendas SP y TC se enmarcan en el comercio al por menor. Para una presentación clara y sistemática de los datos, se han elaborado tres tablas: la Tabla 34, que recoge las emisiones directas por operación; la Tabla 35, que presenta las emisiones por disposición; y la Tabla 36, que detalla las emisiones

indirectas. Es importante destacar que para la elaboración de estas tablas se han utilizado los datos promedio de cada tipo de tienda, según lo establecido en el estudio de la (Corporación ambiental empresarial, 2021).

Tabla 34. Emisiones específicas directas de operación para cadena de frío en alimentos - ventas

Tecnología	Refrigerante	Emisiones específicas directas de operación [kgCO ₂ -eq]				
		HM	SG	SM	SP	TC
Autocontenido	R-22	0,2*	0,1*	2*	0,5*	0,1*
	R-134 ^a	12*	0,8*	5*	2*	2*
	R-404 ^a	22*	0,6*	5*	3*	28*
	R-507	0,2*	0,02*	---	0,03*	0,2*
	R-290	0,01*	0,001*	0,005*	0,002*	0,02*
	R-600 ^a	0,0004*	---	---	---	---
	R-717	---	0*	---	0*	---
	R-744	0,0001*	0.000004*	0,0001*	0,00002*	0,0001*
Sistema centralizado	R-22	99.579*	41.759*	36.265*	17.500*	235*
	R-134 ^a	---	---	2.063*	1.046*	---
	R-404 ^a	66.317*	8.514*	5.658*	11.365*	8.135*
	R-507	20.959*	---	---	804*	1.925*
	R-744/R-404 ^a	---	---	---	---	36*
	R-744/R-507	5.031*	---	---	---	---
Unidad condensadora	R-22	---	3.171*	2.261*	---	---
	R-404 ^a	---	6.870*	14.696*	25.512*	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaboración propia con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

Tabla 35. Emisiones específicas directas de disposición para cadena de frío en alimentos - ventas

Tecnología	Refrigerante	Emisiones específicas directas de disposición [kgCO ₂ -eq]				
		HM	SG	SM	SP	TC
Autocontenido	R-22	0,3*	2*	8*	6*	0,2*
	R-134 ^a	19*	21*	18*	22*	4*
	R-404 ^a	34*	17*	18*	36*	53*
	R-507	0,3*	1*	---	0,3*	0,4*
	R-290	0,02*	0,02*	0,02*	0,02*	0,03*
	R-600 ^a	0,0007*	---	---	---	---
	R-717	---	0*	---	0*	---
	R-744	0,0002*	0,0001*	0,0004*	0,0002*	0,0002*
Sistema centralizado	R-22	10.881*	6.628*	5.955*	3.145*	85*
	R-134 ^a	---	---	339*	188*	---
	R-404 ^a	7.246*	1.351*	929*	2.042*	2.964*
	R-507	2.290*	---	---	145*	701*
	R-744/R-404 ^a	---	---	---	---	13*
	R-744/R-507	550*	---	---	---	---
Unidad condensadora	R-22	---	453*	384*	---	---
	R-404 ^a	---	983*	2.499*	5.424*	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaboración propia con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

Tabla 36. Emisiones específicas indirectas para cadena de frío en alimentos - ventas

Tecnología	Emisiones específicas indirectas [kgCO ₂ -eq]				
	HM	SG	SM	SP	TC
Autocontenido	347*	376*	482*	585*	454*
Sistema centralizado	32.500*	18.887*	14.144*	11.038*	5.396*
Unidad condensadora	---	989*	1.341*	1.692*	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaboración propia con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

En lo que respecta a los sectores de hoteles y restaurantes, se ha optado por utilizar las especificaciones previamente calculadas y presentadas en la Tabla 32. Estas especificaciones corresponden a las tecnologías de autocontenidos y unidades condensadoras, que son particularmente relevantes para estos sectores.

Cadena de frío en alimentos – administración pública, defensa y educación.

Para los sectores de administración pública y defensa (CIU 84) y educación (CIU 85), se ha realizado una diferenciación en cuanto a las tecnologías aplicables. Para el sector de administración pública y defensa, se consideran tanto los autocontenidos como las unidades condensadoras. En contraste, para el sector educativo, únicamente se han contemplado los autocontenidos. Es importante señalar que, para ambos casos, las emisiones específicas correspondientes se encuentran detalladas en la Tabla 32.

Cadena de frío en alimentos – refrigeración doméstica

En el contexto de la subcategoría de refrigeración doméstica dentro de la cadena de frío en alimentos, es importante señalar que para el cálculo de las emisiones equivalentes de CO₂ no se ha realizado una discriminación de las neveras según su tamaño, debido a que se consideran solo como neveras nuevas, las cuales se categorizaron según clima únicamente. Sin embargo, se han considerado las tecnologías establecidas en el inventario para la UTO (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Estas tecnologías se han categorizado en dos tipos de neveras, diferenciadas según el tipo de refrigerante empleado.

Las emisiones específicas correspondientes se han sintetizado en la Tabla 37. Las emisiones por operación están directamente relacionadas con la tecnología particular por tipo de gas, mientras que las emisiones por disposición dependen de la vida útil del equipo. Este último parámetro se ha definido asumiendo clima cálido en todos los casos con una vida útil de 7 años, dado que este es el caso más crítico.

Adicionalmente, en el proceso de cálculo de las emisiones indirectas, se ha considerado si estas son catalogadas como antiguas o nuevas, utilizando como referencia los consumos especificados en la Tabla 21. Las neveras nuevas se calculan asumiendo una homogeneidad de medianas, las cuales presentan la mayor participación, en clima cálido, bajo la premisa de importancia ya mencionada.

Por otra parte, para las neveras consideradas antiguas se define un valor único de consumo (90 kWh/mes). La selección de este valor se fundamenta en el siguiente análisis: se cuenta la antigüedad media de las neveras para el 2023 (14 años) y, en consecuencia, se elige el consumo correspondiente a una nevera de tamaño mediano con una edad entre 11 y 15 años, según los datos presentados en la Tabla 19.

Tabla 37. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - refrigeración doméstica

Tecnología	Refrigerante	Clima	Emisiones específicas [kgCO ₂ -eq]		
			Directa operación	Directa disposición	Indirectas
Nevera etiqueta B (nuevas)	R-134 ^a	Cálido	5*	22*	52*
	R-600 ^a		0,006*	0,03*	
Nevera (antiguas)	---	---	---	---	121*

*Datos calculados previamente

Fuente: *Elaboración propia con datos de* (Corporación ambiental empresarial, 2021; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021; Ministerio de Transporte, 2012)

Cadena de frío en alimentos – transporte refrigerado

En lo que respecta al transporte refrigerado dentro de la cadena de frío en alimentos, se ha elaborado la Tabla 38, la cual presenta de manera detallada las emisiones específicas asociadas a este sector. Es importante señalar que las tecnologías consideradas para este análisis se circunscriben a dos categorías principales: las unidades de refrigeración y los contenedores refrigerados.

Tabla 38. Emisiones específicas para cadena de frío en alimentos - transporte refrigerado

Tecnología	Refrigerante	Emisiones específicas [tCO ₂ -eq]		
		Directa operación	Directa disposición	Indirectas
Unidades móviles	R-134 ^a	0,6*	0,1*	0,5*
	R-404 ^a	3,4*	0,6*	1,6*
Contenedores refrigerados	R-134 ^a	0,4*	1,1*	2,3*

*Datos calculados previamente

Fuente: *Elaboración propia con datos de* (Corporación ambiental empresarial, 2021; Plan Nacional Para La Gestión de Bancos de SAO/HFC, 2021; Ministerio de Transporte, 2012)

Cadena de frío en salud

Para el sector de actividades de atención de la salud humana, clasificado bajo el código CIIU 86, se ha optado por utilizar las emisiones específicas correspondientes a las tecnologías de autocontenidos. Estos datos se encuentran detallados en la Tabla 32.

Procesos industriales

Los procesos industriales, emplean las emisiones específicas calculadas y presentadas en la Tabla 33. No obstante, es importante señalar que se han establecido algunas diferenciaciones según el sector industrial específico. En el caso de los sectores textil con CIIU 13 se ha considerado los valores asociados a unidades condensadoras, mientras que el sector químico bajo el CIIU 20 además de estos, cuenta con chillers. Por otro lado, para los sectores de caucho, plástico e informáticos, correspondientes a los códigos CIIU 22 y 26, el análisis se ha limitado exclusivamente a las tecnologías de chillers.

2.1.4. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera

La **cantidad de refrigerantes emitidos a la atmosfera** se efectúa de manera individualizada para cada tecnología. Este cálculo comprende tanto las emisiones generadas durante la operación por fugas como aquellas asociadas a la disposición final de los equipos, por mal manejo de este. Esta metodología integral se encuentra representada matemáticamente en la Ecuación (14).

$$\text{Refrigerante emitido [kg]} = IR_{operación}[kg] + IR_{disposición}[kg] \tag{14}$$

La Ecuación (15) presenta el cálculo de las emisiones de refrigerante por operación (fugas de refrigerante anual), donde *m* representa la carga del refrigerante en kg y *L* el porcentaje de pérdidas de refrigerante anual. Esta formulación permite una cuantificación precisa de las emisiones operativas para cada sistema de refrigeración.

$$IR_{operación}[kg] = m [kg] * L \tag{15}$$

La Ecuación (16) proporciona el método de cálculo para las emisiones específicas de refrigerante por disposición. En esta ecuación, *m* representa la carga de refrigerante en kg y *n* la vida útil del equipo en años.

$$IR_{disposición} [kg] = \frac{m [kg]}{n [años]} \tag{16}$$

El cálculo de las emisiones totales por refrigerante se realiza multiplicando el número de unidades por sus emisiones específicas correspondientes. La sumatoria de las emisiones totales de cada refrigerante proporciona el total por refrigerante, las ecuaciones de dicha cuantificación se observan en la Ecuaciones (17).

$$\text{Emisiones emitidos [kg]} = \sum_{t=1}^h Stock_t * (IR_{operación}[kg] + IR_{disposición} [kg]) \tag{17}$$

Para cada una de las categorías: cadena de frío en alimentos, cadena de frío en salud y procesos industriales, se utilizó las fuentes previamente mencionadas en la Tabla 28. Estas fuentes proporcionarán información crucial para los cálculos. Además, se empleó los valores de recarga de refrigerante (*L*) y los años de vida útil (*n*) que se habían definido previamente en la Tabla 30 y la Tabla 31.

Con base en esta información recopilada, se procedió a calcular las emisiones específicas de refrigerante tanto por operación como por disposición. Los resultados de estos cálculos fueron registrados en la Tabla 39. En esta, se categorizaron los resultados para cada tipo de tecnología y considerando las acotaciones mencionadas en la sección "Emisiones equivalentes de CO2 generadas".

Tabla 39. Emisiones específicas de refrigerante asociadas a tecnologías por categoría de aplicación

Tecnología	IR _{operación} / IR _{disposición} [kg]	Categoría de aplicación		
		Cadena de frío en alimentos	Cadena de frío en salud	Procesos industriales
Unidad condensadora R-22	1,4/ 0,2	Producción: CIIU 0125 y 0141 Procesamiento: CIIU 10 y 11 Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes: CIIU 55 y 56	NA	CIIU 13 y 20
Unidad condensadora R-134 ^a	2,2/ 0,4			
Unidad condensadora R-404 ^a	0,9/ 0,1			

		Administración pública, defensa y salud: CIU 84 y 85		
--	--	--	--	--

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver referencias en Tabla 25

Tabla 38. Emisiones específicas de refrigerante asociadas a tecnologías por categoría de aplicación

Tecnología	IR _{operación} / IR _{disposición} [kg]	Categoría de aplicación			
		Cadena de frío en alimentos	Cadena de frío en salud	Procesos industriales	
Unidades móviles R-134 ^a	0,4/ 0,1	Producción: CIU 0141 Transporte refrigerado.	NA	NA	
Unidades móviles R-404 ^a	0,9/ 0,1				
Nevera R-134 ^a	0,004/ 0,01	Producción: CIU 0144			
Nevera R-600 ^a	0,001/ 0,004				
Nevera R-134 ^a	0,004/0,015	Refrigeración doméstica			
Nevera R-600 ^a	0,001/ Cálido:0,006 Templado: 0.004 Frío: 0.004				
Autocontenido R-22	0,05/ 0,14	Producción: CIU 031 Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes: CIU 55 y 56 Administración pública, defensa y salud: CIU 84 y 85			CIU 86
Autocontenido R-134 ^a	0,02/ 0,06				
Autocontenido R-404 ^a	0,02/ 0,05				
Autocontenido R-507 ^a	0,05/ 0,13				
Autocontenido R-290	0,01/ 0,02				
Autocontenido R-600 ^a	0,001/ 0,003				
Autocontenido R-744	0,01/ 0,04				
Sistema centralizado R-717	23/ 3	Procesamiento: CIU 10 y 11	NA	CIU 13, 20, 22 y 26	
Chiller R-22	1/ 1	Procesamiento: CIU 10 y 11			
Chiller R-123	20/ 14				
Chiller R-134 ^a	17/ 12				
Contenedor refrigerado R-134 ^a	0,3/ 0,7	Transporte refrigerado		NA	

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver referencias en Tabla 25

Además, las emisiones específicas de refrigerante correspondientes a los códigos CIU 46 y 47, pertenecientes a la subcategoría de empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurantes dentro de la cadena de frío en alimentos, se detallan en la Tabla 40. Esta tabla presenta una estructuración basada en la tecnología empleada y el tipo de tienda.

Tabla 40. Emisiones específicas de refrigerante directas de disposición para ventas

Tecnología	IR _{operación} /IR _{disposición} [g]				
	HM	SG	SM	SP	TC
Autocontenido R-22	0,1/0,1	0,04/1,1	1,2/4,6	0,3/3,3	0,1/0,1
Autocontenido R-134 ^a	8,4/13,4	0,5/15	3,3/12,4	1,2/15	1,6/3
Autocontenido R-404 ^a	5,5/8,8	0,2/4,3	1,2/4,6	0,7/9	7,1/134
Autocontenido R-507	0,1/0,1	0,01/0,2	---	0,01/0,1	0,1/0,1
Autocontenido R-290	4,1/6,6	0,2/5,2	1,6/5,9	0,5/7	5,6/11
Autocontenido R-600 ^a	0,1/0,2	---	---	---	---
Autocontenido R-717	---	0,004/0,1	---	0,01/0,1	---
Autocontenido R-744	0,1/0,2	0,004/0,1	0,1/0,4	0,02/0,2	0,1/0,2
Sistema centralizado R-22	55.016/6.011	23.071/3.662	20.036/3.290	9.669/1.737	130/47
Sistema centralizado R-134 ^a	---	---	1.443/237	731/131	---
Sistema centralizado R-404 ^a	16.909/1.848	2.171/345	1.443/237	2.898/521	2.074/756
Sistema centralizado R-507	6.351/694	---	---	244/44	583/212
Sistema centralizado R-744/R-404 ^a	---	---	---	---	31/11
Sistema centralizado R-744/R-507	4.207/460	---	---	---	---
Unidad condensadora R-22	---	1.752/250	1.250/212	---	---
Unidad condensadora R-404 ^a	---	1.752/250	3.747/637	6.505/1.383	---

*Datos calculados previamente

Fuente: Elaboración propia con datos de (Corporación ambiental empresarial, 2021)

2.2. Demanda no satisfecha

La demanda no satisfecha de refrigeración en Colombia representa un desafío significativo, particularmente en el sector de alimentos. Este aspecto merece especial atención debido a su considerable volumen de demanda. Es imperativo señalar que, según datos del

Departamento Nacional de Planeación (DPN, 2016), en 2016 se registraron pérdidas de 9,76 millones de toneladas de alimentos, equivalentes al 34% de la disponibilidad alimentaria nacional. Estas pérdidas se atribuyen a diversas causas, incluyendo la mortalidad animal, derrames, desperdicios y degradación.

La degradación de alimentos, en particular, podría mitigarse mediante la implementación de procesos de refrigeración más eficientes, que prolongan la vida útil de los productos y mejoren su calidad hasta llegar al consumidor final. Esta problemática no es exclusiva de Colombia; a nivel global, países como India están desarrollando estrategias para optimizar la cadena de frío en el sector alimentario (NCCD, 2015).

Dichas estrategias buscan múltiples beneficios como: incrementar los ingresos de los agricultores, reducir las pérdidas de alimentos por interrupciones en la cadena de frío, preservar la calidad de los productos y satisfacer la demanda regional, entre otros. En este contexto, se han propuesto soluciones que incluyen la creación de centros de acopio con temperatura controlada, ubicados estratégicamente cerca de los centros de consumo.

Para dimensionar adecuadamente la potencia refrigerante necesaria en estos centros y el transporte refrigerado, es fundamental realizar estudios detallados sobre la demanda de alimentos, zonas de producción, centros de consumo, temperaturas óptimas de almacenamiento, entre otros. La estrategia india, por ejemplo, sugiere temperaturas específicas para diversos productos (ver Tabla 41) y con esto prolongar la vida útil entre 7 días y 10 meses según el alimento. Aunque los demás requisitos deben ajustarse a las particularidades de cada país.

Tabla 41. Temperaturas de refrigeración de algunos alimentos

Refrigerante	Rango	Alimentos
Frío	0 °C a 10 °C	Frutas frescas y vegetales, leche, mantequilla, huevos, frutos y chiles secos.
Frío leve	10 °C a 20 °C	Frutas subtropicales, lácteos como leche en polvo, chocolate y semillas.
Congelado	Menores a -18 °C	Verduras congeladas, pulpa de frutas, helado, mantequilla, pescado y productos cárnicos.
Ambiente	Mayores a 20 °C	Cebolla, deshidratados, alimentos tostados, deshidratados, encurtidos, mermeladas, aceites y extractos.

Fuente: Adaptado de (NCCD, 2015)

En este sentido, para cuantificar con precisión la demanda no satisfecha de refrigeración, se requieren estudios exhaustivos que analicen la oferta y demanda, permitiendo no solo estimar las necesidades de potencia refrigerante y otros parámetros relevantes (como inventario, demanda energética, emisiones de CO₂ y liberación de refrigerantes a la atmósfera), sino también proponer soluciones a la problemática de pérdidas de alimentos.

Sin embargo, dadas las circunstancias, en las que no se cuentan con estos estudios. Para esta consultoría, se realiza un aproximado, partiendo de los alimentos perdidos por refrigeración en el sector de postcosecha y almacenamiento (19.8% del total de pérdidas), reportados por el (DPN, 2016).

No obstante, ante la ausencia de estudios específicos para Colombia, en la presente investigación se ha optado por realizar una aproximación basada en los datos disponibles.

Se parte de las pérdidas de alimentos atribuidas a deficiencias en refrigeración durante las etapas de postcosecha y almacenamiento (19,8% del total de pérdidas), según lo reportado por el (DPN, 2016). Es importante destacar que, se ha asumido que estas necesidades de potencia refrigerante (entendidas como demanda de potencia térmica) son extrapolables al sector de transporte refrigerado, considerando que este es un eslabón crucial para garantizar la integridad de la cadena de frío en todo el proceso de distribución alimentario.

Además, se ha cuantificado la demanda no satisfecha de neveras domésticas en Colombia, utilizando como base el porcentaje de hogares sin estas, según la Encuesta de Calidad de Vida (DANE, 2023a). A partir de estos datos, se han realizado estimaciones del inventario, demanda energética, emisiones de CO₂ equivalentes y cantidad de refrigerantes emitidos a la atmósfera.

2.2.1. Inventario y demanda energética (eléctrica, combustible y térmica)

Esta sección se estructura en tres componentes fundamentales: (a) cálculo vía top-down de la demanda de potencia térmica e inventario para postcosecha y almacenamiento, así como transporte refrigerado; (b) cálculo vía Bottom up del inventario y demanda de potencia térmica para refrigeración doméstica; y (c) cálculo integral de la demanda eléctrica y de combustible para los tres sectores mencionados.

Top down – demanda de potencia térmica e inventario

La metodología top-down permite iniciar el análisis partiendo de la demanda térmica, expresada en Toneladas de Refrigeración (TR), para posteriormente calcular el inventario requerido. Esta aproximación es particularmente útil en los contextos de postcosecha y almacenamiento, así como transporte refrigerado.

Para ello, se parte de las pérdidas de alimentos durante la postcosecha y el almacenamiento, específicamente en frutas, vegetales, raíces y tubérculos que representan el 87% de los alimentos perdidos en Colombia, según datos del Departamento Nacional de Planeación (DPN, 2016), estas pérdidas alcanzaron 1.836.147 toneladas en 2016. Pesé a que se desconoce la cifra actual, se ha realizado una proyección basada en el incremento del abastecimiento de alimentos en Colombia entre 2016 y 2023. Utilizando datos del (DANE, 2024b), estimando un aumento del 39%, lo que elevaría la cifra a 2.560.161 toneladas de estos alimentos perdidos.

Para determinar la demanda equivalente de potencia térmica en toneladas de refrigeración, se aplica la Ecuación (18). Donde T_a representa las toneladas de alimentos calculadas para 2023. El factor de conversión de m³ a toneladas de alimento (3,4) se obtuvo del plan de refrigeración de la India (NCCD, 2015), mientras que el factor de m³ a TR (15) se calculó considerando un cuarto frío estándar de 100 m³ a 29°C de temperatura ambiente, utilizando la herramienta en línea (Intarcon, n.d.), que arrojó un resultado de 6.655 TR (asumiendo una eficiencia de 1 kW/TR).

$$Potencia\ térmica\ [TR] = \frac{T_a * 3,4 \left[\frac{m^3}{toneladas\ de\ alimento} \right]}{15 \left[\frac{m^3}{TR} \right]} \quad (18)$$

La demanda de potencia térmica calculada es esencial para mantener la cadena de frío desde la producción hasta el acopio. Para dimensionar la infraestructura de almacenamiento, se consideraron cuartos fríos estándar de 100 m³ con unidades condensadoras. El número necesario se estima mediante la Ecuación (19). Donde, T_a son las

toneladas de alimentos calculadas para el 2023, que son convertidas en el espacio total en m³ de refrigeración de estos alimentos perdidos.

$$Cuartos\ fríos\ [número\ de\ unidades] = \frac{T_a * 3,4 \left[\frac{m^3}{toneladas\ de\ alimento} \right]}{100\ m^3} \quad (19)$$

En cuanto al transporte refrigerado, crucial para el traslado de alimentos desde los centros de acopio hasta los puntos de consumo, se seleccionó la tecnología con menor impacto en términos de GWP entre las opciones proporcionadas por la UTO (Corporación ambiental empresarial, 2017a). Específicamente, unidades de refrigeración que utilizan el refrigerante R-134^a, cuyas características se detallan en la Tabla 22.

Para cuantificar el inventario de unidades móviles en transporte refrigerado, se empleó la Ecuación (20), considerando la demanda de potencia térmica calculada previamente y la capacidad específica de refrigeración de la tecnología seleccionada ($TRE_i=0,6$ TR), como se indica en la Tabla 26.

$$Unidades\ móviles\ [número\ de\ unidades] = \frac{Potencia\ térmica[TR]}{TRE_i[TR]} \quad (20)$$

Bottom up – inventario y demanda de potencia térmica

La metodología bottom-up se ha aplicado a las subcategorías de refrigeración doméstica y transporte refrigerado dentro de la cadena de frío de alimentos, aprovechando los inventarios detallados disponibles en las encuestas de calidad de vida del DANE y el inventario de la UTO de 2017.

Para la refrigeración doméstica, se parte del stock de neveras y los porcentajes de tenencia a nivel nacional, obtenidos del DANE según lo descrito en la sección “Cadena de frío en alimentos – refrigeración doméstica”. Se aplica la Ecuación (21), donde $Stock_{ns}$ es el stock no satisfecho, $Stock$ es el número de neveras reportadas por el DANE para el 2023 y k es el porcentaje de tenencia del país para ese mismo año. Este proceso se realiza para cada uno de los departamentos de Colombia y finalmente se cuantifica el total, mediante una sumatoria.

$$Stock_{ns}\ [número\ de\ unidades] = \sum_{d=1}^h Stock_d * \frac{(1 - k)}{k} \quad (21)$$

Posteriormente, el stock no satisfecho ($Stock_{ns}$) se reemplaza en la Ecuación (5), asumiendo que todas las neveras emplean la tecnología de refrigerante R-600^a, seleccionada por su menor GWP entre las tecnologías reportadas por la UTO. Para este refrigerante, se considera un $TRE_i=0,06$ TR, valor previamente calculado y presentado en la Tabla 26.

2.2.2. Demanda eléctrica y combustible

La cuantificación de la demanda energética se divide en función del tipo de aplicación dentro de la cadena de frío. Específicamente, la demanda eléctrica es relevante para los segmentos de postcosecha y almacenamiento, así como refrigeración doméstica. En cambio, la demanda de combustible se circunscribe al ámbito del transporte refrigerado.

Postcosecha y almacenamiento

Para la cuantificación de la demanda de energía eléctrica en los procesos de postcosecha y almacenamiento, se implementó la Ecuación (22). En esta, $Demanda_i$ representa la demanda de energía eléctrica anual, $Demanda\ térmica$ fue previamente calculada, ef es el factor de eficiencia energética asumido en 1 kW/TR, y t es el tiempo de operación anual, donde se asumen como 12 horas en un total de 365 días.

$$Demanda_i \left[\frac{GWh}{año} \right] = \frac{Potencia\ térmica\ [TR] * ef * t}{1.000.000} \quad (22)$$

Refrigeración doméstica

Para determinar la demanda energética asociada a la refrigeración doméstica, se procede de la siguiente manera: una vez establecido el inventario de neveras no satisfechas, se emplea la Ecuación (3). En este cálculo, se utilizan los consumos específicos correspondientes a las neveras con etiqueta B, los cuales se encuentran detallados en la Tabla 21. Es importante destacar que en este proceso se toman en consideración las condiciones climáticas particulares de los diversos departamentos en los que se ha realizado el cálculo del inventario.

Transporte refrigerado

Para el cálculo de la demanda de combustible en el ámbito del transporte refrigerado, se empleó la Ecuación (4). Este proceso implica la aplicación del consumo específico de 341 galones de combustible por año, dato que se encuentra detallado en la Tabla 24. Es importante señalar que este cálculo se fundamenta en la cuantificación del inventario que considera las tecnologías de unidades de refrigeración que utilizan Refrigerante R-134^a.

2.2.3. Emisiones equivalentes de CO₂ generadas

Para la cuantificación de las emisiones equivalentes de CO₂, se ha seguido estrictamente la metodología descrita en la sección 2.1.3. En este proceso, se ha aplicado de manera uniforme la Ecuación (13) a todos los casos analizados. Partiendo de las tecnologías previamente evaluadas, para las cuales ya se disponía de cálculos de emisiones específicas. Aunque, el único caso que requirió una nueva estimación fue el correspondiente a las emisiones indirectas asociadas a los procesos de postcosecha y almacenamiento.

Postcosecha y almacenamiento

En relación con el uso de la tecnología de unidad condensadora que emplea el refrigerante R-134^a, se han utilizado las emisiones directas específicas detalladas en la Tabla 33. Estas corresponden a 3,2 tCO₂-eq para las emisiones por operación y 0,5 tCO₂-eq para las emisiones por disposición. No obstante, para el caso de las emisiones indirectas, se ha aplicado un proceso de cuantificación basado en la Ecuación (9).

Para este cálculo, el consumo específico se ha determinado considerando la demanda de potencia térmica previamente establecida y un número equivalente de unidades. En este contexto, se ha asumido que cada cuarto frío (unidad condensadora) posee un volumen de 100 m³. Como resultado de este análisis, se ha obtenido un consumo específico de 29 MWh/año.

Cadena de frío en alimentos – refrigeración doméstica

En el análisis de la tecnología correspondiente a neveras que utilizan el refrigerante R-600^a, se han empleado los valores específicos de emisiones equivalentes de CO₂ que se encuentran detallados en la Tabla 37. Sabiendo que estos valores se han diferenciado según el tipo de clima.

Cabe reiterar, como se ha mencionado previamente, que en este estudio se han considerado las neveras con etiqueta B, las cuales la tecnología actualmente disponible en el mercado. Por consiguiente, en este contexto, solo se aplica la tecnología designada como "nevera etiqueta B" de la tabla mencionada.

Cadena de frío en alimentos – transporte refrigerado

En lo que, respecto al sector de transporte refrigerado, se ha considerado la tecnología basada en unidades de refrigeración que utilizan el refrigerante R-134^a, por ser el de menor impacto ambiental de los proporcionados por la UTO. Para esta tecnología, se han realizado cálculos previos de las emisiones específicas, cuyos resultados se encuentran detallados en la Tabla 38.

Estos valores, que son fundamentales para nuestro análisis, se desglosan de la siguiente manera:

- Emisiones específicas directas por operación: 0,6 tCO₂-eq
- Emisiones específicas por disposición: 0,1 tCO₂-eq
- Emisiones específicas indirectas: 0,7 tCO₂-eq

2.2.4. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera

La cuantificación de la cantidad de refrigerantes emitidos a la atmósfera se realiza mediante la aplicación de la Ecuación (17) y siguiendo la metodología detallada en la sección 2.2.4. Partiendo de las tecnologías previamente mencionadas para las subcategorías analizadas, se encuentran compiladas en la Tabla 38, junto con sus respectivas emisiones de refrigerante específicas.

En el caso de postcosecha y almacenamiento con unidades condensadoras que utilizan R-134^a, se han determinado emisiones específicas de 2,2 kg por operación y 0,4 kg por disposición.

Para el sector de refrigeración doméstica, se ha establecido un valor de 0,001 kg de emisiones específicas por operación. En cuanto a las emisiones por disposición, estas varían según el clima del departamento: para clima cálido se estiman en 0,006 kg, mientras que para climas templados y fríos se calculan en 0,004 kg.

En lo que, respecto al sector de transporte refrigerado, las emisiones específicas se han cuantificado en 0,4 kg por operación y 0,1 kg por disposición.

2.3. Proyecciones

Las proyecciones del inventario de equipos de refrigeración hasta 2050 se realizaron con el objetivo de analizar el comportamiento futuro del sector en los diversos ámbitos de demanda. Para este propósito, se implementó una metodología basada en el cálculo de una tasa de crecimiento anual constante, la cual se aplicó para incrementar anualmente el

número de equipos en cada sector. Es importante destacar que estas estimaciones asumen la continuidad de las tecnologías actuales y no contemplan intervenciones externas, como nuevas políticas o cambios disruptivos en el mercado. Lo que permite, cuantificar otras variables relacionadas como la demanda y las emisiones.

Para el cálculo del porcentaje o tasa de crecimiento anual de la demanda satisfecha, se utilizaron datos proporcionados por el DANE. Se seleccionó el período comprendido entre 2011 y 2019 para la mayoría de los sectores, evitando el uso de datos posteriores catalogados como "provisionales" o "preliminares", lo cual podría comprometer la confiabilidad de las proyecciones. Cabe destacar que para el sector de refrigeración doméstica se empleó un rango temporal diferente, a incluir desde 2012 hasta 2023.

La información base para los cálculos proviene de diversas fuentes:

- Producto Interno Bruto (PIB): Se utiliza como indicador principal para la mayoría de los sectores, expresado en billones de pesos colombianos (COP) (DANE, 2023b).
- Producción sectorial específica: Para ciertos sectores se emplearon indicadores más representativos:

CIIU 0141 (Cría de ganado bovino y bufalino): Se tomó la producción de leche en millones de litros, dado que la refrigeración en este sector se limita principalmente a la conservación láctea (Fedegan, n.d.).

Sector de refrigeración doméstica: Se empleó el número de viviendas nuevas en el país, bajo la premisa de que estos adquieran equipos de refrigeración nuevos (DANE, 2024a).

Para el cálculo de la tasa de crecimiento anual, se aplicó la Ecuación (23). Donde x_i es el valor del último año del período considerado, x_j es el valor del primer año del período considerado, n es el número de años entre el último y el primer año (8 años para el período 2011-2019). Los resultados obtenidos mediante esta metodología se presentan de manera sintetizada en la Tabla 42, incluyendo las tasas de crecimiento para cada categoría y sector asociado, así como las respectivas fuentes de datos utilizadas.

$$Tasa\ de\ crecimiento\ anual\ [\%] = \frac{x_i - x_j}{x_j * n} * 100\% \tag{23}$$

Tabla 42. Tasa de crecimiento anual de inventario y fuente para sectores de refrigeración

Categoría	Subcategoría	Sector	Grupo o clase	Tasa de crecimiento anual [%]	Fuente
Cadena de frío en alimentos	Producción	CIIU 1	---	---	---
		---	CIIU 0125	4,2*	(DANE, 2023b)
		---	CIIU 0141	1,8*	(DANE, 2019a)
		---	CIIU 0144	6,9*	
	Procesamiento	CIIU 3	CIIU 031	0,8*	(DANE, 2023b)
		CIIU 10	---	---	
		---	CIIU 101	2,9*	
		---	CIIU 102	2,1*	
		---	CIIU 103	2,9*	
		---	CIIU 104	1,8*	
		---	CIIU 105	1,7*	
		---	CIIU 108	2,1*	

		CIIU 11	---	2,7*		
Empaque, almacenamiento, ventas, hoteles y restaurante		CIIU 46	---	4,1*		
		CIIU 47	---			
		CIIU 55	---	4,5*		
		CIIU 56	---			
Administración pública, defensa y educación		CIIU 84	---	7*		
		CIIU 85	---	4,1*		
Refrigeración doméstica		---	---	3,7*	(DANE, 2024a)	
Transporte refrigerado		CIIU 49	CIIU 4923	2,3*	(DANE, 2023b)	
Cadena de frío en salud		---	CIIU 86	---		6,3*
Procesamientos industriales		CIIU 13	---	0,5*		
		CIIU 20	---	2,1*		
		CIIU 22	---	1,9*		
		CIIU 26	---	2,1*		

*Datos calculados previamente

Fuente: Ver referencias en tabla

Una vez definidos los inventarios proyectados y aplicación las metodologías y ecuaciones de la sección 2.1 para cuantificar la demanda de energía eléctrica (ver Ecuación (3)) combustible (ver Ecuación (4)) y potencia térmica, así como las emisiones equivalentes de CO2 (ver Ecuación (12)) y cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera (ver Ecuación (17)).

En complemento a los anterior, para observar el efecto de satisfacer parcialmente la demanda no cubierta en el sector de refrigeración doméstica se proyecta un aumento en el porcentaje de tenencia de las neveras. Partiendo de un 89% actual, se supone un incremento al 93% para 2030 y al 97% para 2050. Además, para cuantificar la demanda de energía eléctrica de este sector, se utilizó la misma tasa de crecimiento dada en el inventario (3,7%). Esta decisión metodológica se fundamenta en la complejidad al cálculo base del año 2023, el cual requeriría considerar una diversidad de factores como los tamaños de las neveras, las condiciones climáticas y los patrones de consumo (diferenciando entre neveras denominadas antiguas y nuevas).

3. Climatización

La climatización de espacios es una necesidad a nivel mundial, ya que permite crear confort térmico adecuado para las personas y ciertos procesos realizados en centros de datos, hospitales, entre otros. Esta, se puede realizar a través del uso de equipos que permitan controlar o modificar variables ambientales como temperatura, humedad, calidad de aire o renovación del mismo (Facility Managers, n.d.).

En Colombia, los equipos usados para climatización son el aire acondicionado (AC) y los ventiladores, instalados en edificaciones residenciales, comerciales, educativas, hospitalarias, administrativas, entre otras. Por una parte, el AC enfría el aire eliminando el calor y adecuando la humedad mediante sistemas de refrigeración y circulación. Estos funcionan utilizando energía eléctrica y gases refrigerantes que pueden ser altamente contaminantes, pues, generan emisiones directas e indirectas de Gases de Efecto

Invernadero (GEI) y presentan altos consumos de energía, específicamente en ciudades con pisos térmicos cálido húmedo y cálido seco. Por ejemplo, una evaluación realizada en Barranquilla, Cartagena y Montería, muestra un consumo energético del 45% del total por climatización (Carbon Trust & UNAL, 2023).

Por otro lado, los ventiladores se usan especialmente en el sector residencial para mitigar los efectos de las altas temperaturas. Estos realizan una circulación de aire forzada sin cambiar sus propiedades. Por lo tanto, implica que la temperatura y la humedad, propias de cada clima, se mantienen constantes. Por lo tanto, son equipos que no enfrían el aire ni eliminan la humedad. En cuanto a su funcionamiento, solamente necesitan energía eléctrica para ello, por ende, solo generan emisiones indirectas de GEI.

La demanda de energía eléctrica a nivel mundial requerida en climatización está impulsada por el crecimiento económico y poblacional en las partes más cálidas, especialmente en el hemisferio sur. Dicho proceso se lleva a cabo en edificaciones del sector residencial, industrial y terciario. Sin embargo, a nivel mundial, solo el sector residencial tiene potencial de triplicar su demanda para el año 2050. Lo cual implica, un inminente aumento en las emisiones de GEI, por lo que se requieren acciones, que mitiguen el impacto negativo. Asimismo, será necesario adaptar los sistemas eléctricos para soportar el aumento de la demanda energética, si es preciso (International Energy Agency, 2018).

En este contexto, es indispensable la identificación de vías que permitan integrar acciones para reducir el consumo, las emisiones de GEI y se detecten oportunidades de mejora en el acceso a climatización, y así, abordar los Objetivos de Desarrollo Sostenible³ (ODS) como el N°3, N°8, N°11 Y N°13 (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021).

Para abordar este desafío e identificar acciones integrales, aplicaremos la metodología propuesta en el NCAP, centrada en la categoría de edificaciones. Las edificaciones se dividen en residencial y comercial, siendo esta última la relacionada con las actividades económicas del sector terciario. Con el fin de realizar el mapeo del contexto del país y la evaluación de la demanda de climatización actual y futura, se tendrán en cuenta aspectos cualitativos y cuantitativos, bases de datos gubernamentales, estudios de mercado, conocimiento de organizaciones multilaterales y análisis del comportamiento de la demanda.

La metodología propuesta en el NCAP brinda orientación sobre la recopilación y análisis de datos, con el objetivo de establecer una línea base y estimación del crecimiento de la demanda de climatización (Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, 2021).

En Colombia se hace uso de bases de datos del DANE, para obtener la tenencia de equipos en el sector residencial, así como estudios desarrollados por la UPME y la UTO, donde se realizan balances energéticos, inventario de equipos de aire acondicionado y caracterización de consumo de los sectores económicos, los cuales permiten establecer el comportamiento de la demanda y uso de tecnologías.

Para el sector residencial, se realiza una división por estrato socioeconómico y piso térmico, mientras el sector terciario, se discrimina de la misma manera mencionada en la sección 1 (código CIIU), en la cual se incluyen todos los códigos relacionados al sector terciario, que a su vez se dividen por piso térmico.

³ ODS: N°3 Salud y Bienestar; N°8 Trabajo decente y crecimiento económico; N°11 Ciudades y comunidades sostenibles; N°13 Acción por el clima.

La división realizada por piso térmico en los sectores (residencial y terciario) es indispensable, ya que el país cuenta con una diversidad climática relacionada con la altitud, la presencia de cordilleras, corrientes oceánicas, vientos alisios y humedad relativa. Dicha variedad representa diferentes necesidades de climatización en los usuarios; en concordancia con ello, se tomó como referencia la clasificación de las cuatro zonas climáticas establecidas en (Resolución 0549 - 10 de Julio de 2015, 2015).

En la Tabla 43 se puede observar la caracterización de los pisos térmicos según su temperatura, altitud sobre el nivel del mar y humedad relativa. Esta última, es determinante para clasificar los pisos térmicos cálido húmedo y seco.

Tabla 43. Caracterización de los pisos térmicos en Colombia

Piso térmico	Temperatura promedio [C°]	Altitud [msnm]	Humedad relativa [%]
Frio	12-18	2.000 - 2.999	---
Templado	18-24	1.000 - 1.999	---
Cálido Seco	>24	<1.000	>75%
Cálido Húmedo	>24	<1.000	<75%

Fuente: Adaptado de (Resolución 0549 - 10 de Julio de 2015, 2015)

Algunas ciudades representativas de los pisos térmicos mencionados en la Tabla 41 son: Bogotá, con una temperatura promedio de 12°C y una altitud de 2.640 m (clima frío); Medellín, con 20°C y 1.405 m (clima templado); Barranquilla, con 34°C, 24 m de altitud y 80% de humedad relativa (clima cálido húmedo); y Cali, con 31°C, 926 m de altitud y 80% de humedad relativa (clima cálido seco)

Teniendo en cuenta que la información de tenencia de equipos dada por el DANE, está especificada por departamento, la UPME propone una identificación de los departamentos por piso térmico previamente definida en (Corporación EMA, 2022). En la Tabla 44 se puede observar dicha segregación, la cual se realizó con base en (Resolución 0549 - 10 de Julio de 2015, 2015), en la que se encuentra la caracterización de los municipios con respecto a la población y altitud. Estas dos variables fueron analizadas para determinar los pisos térmicos característicos de cada departamento.

Tabla 44. Segregación por piso térmico de los departamentos

Departamento	Piso térmico	Departamento	Piso térmico
Amazonas	Cálido Húmedo	Huila	Cálido Seco
Arauca		La Guajira	
Atlántico		Magdalena	
Bolívar		Sucre	
Caquetá		Bogotá	Frio
Casanare		Boyacá	
Choco		Cundinamarca	
Guainía		Nariño	Templado
Guaviare		Antioquia	
Meta		Caldas	
Putumayo		Cauca	
San Andrés		Norte De Santander	

Valle Del Cauca		Quindío	
Vaupés		Risaralda	
Cesar	Cálido Seco	Santander	
Córdoba		Tolima	

Fuente: Adaptado de (Corporación EMA, 2022)

En cuanto al sector terciario, se seleccionaron los CIU correspondientes, previamente definidos en (Corporación EMA, 2022), donde se relacionan las actividades económicas clasificadas por sección y división CIU. En la Tabla 45, se encuentran consignadas las actividades económicas, teniendo en cuenta que es necesario un confort en las edificaciones donde se ofrecen servicios. Adicionalmente, también se tuvieron en cuenta las mencionadas en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 45. Clasificación de las actividades económicas, adaptada para Colombia CIU revisión 4.

Sección CIU	División	Descripción
Comercio al por Mayor y al por Menor; Reparación de Vehículos y Motocicletas	45	Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas, sus partes, piezas y accesorios
Información y Comunicaciones	58	Actividades de edición
	59	Actividades cinematográficas, de video y producción de programas de televisión, grabación de sonido y edición de música.
	60	Actividades de programación, transmisión y/o difusión
	61	Telecomunicaciones
	62	Desarrollo de sistemas informáticos (planificación, análisis, diseño, programación, pruebas), consultoría informática y actividades relacionadas
	63	Actividades de servicios de información
Actividades Financieras y Seguros	64	Actividades de servicios financieros, excepto las de seguros y de pensiones
	65	Seguros (incluso el reaseguro), seguros sociales y fondos de pensiones, excepto la seguridad social
	66	Actividades auxiliares de las actividades de servicios financieros
Actividades Inmobiliarias	68	Actividades Inmobiliarias
Servicios profesionales, científicos y técnicos	70	Actividades de administración empresarial; actividades de consultoría de gestión
	71	Actividades de arquitectura e ingeniería; ensayos y análisis técnicos
	72	Investigación científica y desarrollo
	73	Publicidad y estudios de mercado
	74	Otras actividades profesionales, científicas y técnicas
Actividades de servicios administración y apoyo	77	Actividades de alquiler y arrendamiento
	79	Actividades de las agencias de viajes, operadores turísticos, servicios de reserva y actividades relacionadas
	80	Actividades de seguridad e investigación privada
	81	Actividades de servicios a edificio y paisajismo
	82	Actividades administrativas y de apoyo de oficina y otras actividades de apoyo a las empresas
Actividades de Atención de la Salud Humana y Asistencia Social	86	Actividades de atención de la salud humana
	87	Actividades de atención residencial medicalizada
	88	Actividades de asistencia social sin alojamiento
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación	90	Actividades creativas, artísticas y de entretenimiento
	91	Actividades de bibliotecas, archivos, museos y otras actividades culturales
	92	Actividades de juegos de azar y apuestas

	93	Actividades deportivas y actividades recreativas y de esparcimiento
Otras actividades de servicios personales	94	Actividades de asociaciones
	96	Otras actividades de servicios personales

Fuente: Adaptado de (Corporación EMA, 2022)

Con esta categorización de las edificaciones entre residencial y terciario, se realiza un análisis de contexto y diagnóstico aplicado a AC y ventilador, similar al planteado para refrigeración en la sección 2.1.

3.1. Demanda satisfecha

La estimación de la demanda satisfecha de climatización se realiza siguiendo la metodología propuesta para refrigeración en la sección 2.1. La cual se adaptó a los sectores mencionados en esta sección y consistió en la cuantificación de:

- Inventario y demanda energética (eléctrica y térmica).
- Emisiones equivalentes de CO₂ y refrigerantes emitidos a la atmósfera.

3.1.1. Inventario y demanda energética (eléctrica y térmica)

Según la variable analizada, ya sea para establecer el inventario o la demanda anual, se necesitan metodologías de análisis diferentes debido a la información general o específica disponible en cada una.

Por un lado, en el sector terciario se implementó top-down, determinando primero la demanda anual de energía y consecuente a ella el inventario. Por otro lado, para el sector residencial, se utilizó bottom-up estableciendo primero el inventario de equipos y posteriormente la demanda anual de energía.

Sector terciario

Siguiendo el enfoque top down, en el sector terciario, se parte de la demanda de energía eléctrica anual del 2023, con base en información del SUI (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024). De los últimos estudios de caracterización del sector terciario se obtiene la fracción de demanda de energía para AC, dentro de cada piso térmico y división CIIU. En Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 45 se encuentran relacionadas las actividades económicas seleccionadas del sector (Corporación EMA, 2022)

Ya establecidas las fracciones indicadas, se aplicó la Ecuación (1) para obtener la demanda desglosada en el 2023. En esta sección, E_x es el porcentaje de energía demandada según su segmentación, y r es el porcentaje de demanda de climatización. No se tiene en cuenta E_y , ya que E_x esta desagregado por piso térmico, división y sección CIIU.

Para la determinar el inventario de tecnologías de AC ($Stock_i$), fue necesario el estudio (Consorcio Génesis, 2013). Este establece las tecnologías (minisplit, split, pared/ventana, chiller por agua y chiller por aire) usadas en el sector terciario, las horas de uso y el consumo de energía eléctrica mensual de cada equipo, según la discriminación mencionada; dicha información permitió determinar la distribución de las distintas tecnologías según su consumo energético. Cabe destacar que, debido al año de realización del estudio, la clasificación por CIIU era la revisión 3.1 (anterior). Por lo tanto, fue necesario realizar una

comparación entre esta y la actual (revisión. 4), para asignar correctamente el consumo de las secciones según la nueva distribución (ver Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 43).

Para ello, se utilizó la Ecuación (2), donde la demanda anual ($Demanda_i$) fue calculada previamente, g es el porcentaje de distribución de cada tecnología, CE_i es el consumo específico de cada tipo de tecnología i , y P_i es la distribución de la tecnología en el refrigerante usado.

Respecto al consumo específico por tipo de tecnología, este se relaciona con el valor promedio de potencia estipulados en (Corporación ambiental empresarial, 2017a), donde se tipifica además de esta, la eficiencia promedio, capacidad térmica y otras características técnicas, las cuales están consignadas la Tabla 46.

Tabla 46. Especificaciones técnicas promedio de los AC según el refrigerante usado.

Tipo de equipo	Refrigerante	Capacidad térmica	Potencia promedio	Eficiencia promedio	Índice de carga de refrigerante	Carga de refrigerante
		[BTU/h]	[W]	---	[kg/TR]	[kg]
Pared / Ventana	R-22	9.297	992	9 BTU/h*W	0,6	0,5
	R-410 ^a	9.994	1.100	9 BTU/h*W	0,6	0,6
Minisplit	R-22	14.748	1.636	9 BTU/h*W	0,8	1
	R-410 ^a	15.279	1.389	11 BTU/h*W	0,7	0,9
Central	R-22	43.987	4.718	9 BTU/h*W	0,5	2
	R-410 ^a	74.261	6.098	12 BTU/h*W	0,9	5
Split	R-22	43.987	4.718	9 BTU/h*W	0,5	2
	R-410 ^a	74.261	6.098	12 BTU/h*W	0,9	5
Chiller	R-22	204.000	19.916	1 kW/TR	0,5	10
	R-123	6.588.000	274.412	0,5 kW/TR	0,4	249
	R-134 ^a	2.748.000	172.282	0,7 kW/TR	0,9	218
	R-410 ^a	816.000	75.344	1 kW/TR	0,9	67

Fuente: Adaptado de (Corporación ambiental empresarial, 2017b; MGM Innovagroup, 2017)

Como se evidencia en la Tabla 46, todas las tecnologías, excepto el chiller, están distribuidas en dos refrigerantes, el R-22 y el R-410^a, los cuales tienen una mayor participación en el sector terciario con 38% y 32%, respectivamente. En cuanto a los dos adicionales usados solamente en los chiller, estos tienen una distribución de 5% (R-123) y 9% (R-134^a) (Corporación ambiental empresarial, 2017a).

Sector residencial

En este sector se aplica la metodología bottom up, donde se partió de las encuestas realizadas por el DANE, que permitieron cuantificar la tenencia de AC y ventilador en el año 2023. Estas se seleccionaron de acuerdo con la información que proporcionaban como ubicación geográfica, estrato socioeconómico, tenencia de electrodomésticos en los hogares, horas de uso y tenencia de distintas tecnologías presentes en cada electrodoméstico. Se eligieron las encuestas de los siguientes años:

- Encuesta de Calidad de Vida (ECV) -2023
- Encuesta de Calidad de Vida (ECV) -2019

De la ECV-2023, se realizó un filtrado, extracción y tratamiento de datos a través del software R Studio, esto permitió obtener el porcentaje de las viviendas que cuentan con AC y ventilador, según el tipo de tecnología, segregado por grupos de estratos socioeconómicos⁴ en cada departamento. Para ello, se cruzó la información dada por la población, relacionada con los módulos “Condiciones de vida del hogar” y “Tenencia de bienes” de los microdatos (DANE, 2023a).

De la misma manera, con la ECV-2019 se caracterizó las horas de uso de cada equipo, cruzando la información dada por la población, relacionada con los módulos “Datos de la vivienda” y “Uso de energéticos del hogar” de los microdatos (DANE, 2019b).

Según la ECV-2023, se estableció que las viviendas contaban con tres tecnologías de AC, correspondientes a: minisplit, pared/ventana (o autocontenidos) y central (o unidad condensadora) y cuatro de ventilador (mesa, pared, pedestal y techo).

Una vez establecidos los porcentajes de tenencia de AC en cada tecnología con la discriminación propia del sector, se hace uso de la Ecuación (24) para calcular el inventario correspondiente. Donde (*T*) es el porcentaje de viviendas que cuenta con el equipo según tecnología y (*C_v*) es la cantidad de viviendas que hay en el país.

$$Stock_i \text{ [número de unidades]} = T * C_v \text{ [número de unidades]} \quad (24)$$

Haciendo uso de la Ecuación (25) y con el inventario previamente calculado se realizó la sumatoria de las unidades por piso térmico, según la clasificación dada en la Tabla 44.

$$Stock_j \text{ [número de unidades]} = \sum_{i=1}^n Stock_i \quad (25)$$

De manera similar a como se realizó el cálculo en el sector terciario, se hace necesario la caracterización del inventario de AC por refrigerante. Como se observa en la Tabla 46, cada una de las tecnologías está distribuida en dos refrigerantes, el R-22 y el R-410^a, este último tienen la mayor participación. A nivel nacional en el 2015, la distribución de R-22 fue de 65% en el sector residencial y 35% en el no residencial, en cuanto al R-410^a, está fue de 70% y 30% respectivamente (Corporación ambiental empresarial, 2017b).

⁴ Grupo N°1: 11.835.305 viviendas de estrato 1 y 2; Grupo N°2: 3.455.445 viviendas de estrato 3; Grupo N°3: 1.709.475 viviendas de estrato 4, 5 y 6

⁵ TR: Tonelada de refrigeración (unidad de capacidad térmica)

Debido a que las sustancias HCFC son agotadoras de la capa de ozono, en Colombia se establecieron medidas para eliminar el uso de estas (resolución 239 de 2012). Asimismo, en la fase II del plan de gestión, la meta a 2020, fue la prohibición de importaciones y fabricación de AC tipo paquete con capacidad inferior a 5 TR⁵ y en 2022 las unidades divididas (Corporación ambiental empresarial, 2017a).

A raíz de estas medidas, no se conservan en la misma medida el uso de los refrigerantes, por ello, se tuvo en cuenta la proyección realizada para la UTO de (Corporación ambiental empresarial, 2017a). En 2023, el estudio definió una participación de 0% de R-22 en los AC, pero, en (MGM Innova Energy Services, 2023), se demuestra que en Colombia todavía hay viviendas con AC funcionando con este (R-22), aunque la proporción fue menor al 20%. Por lo cual, se emplearon las cantidades instaladas de AC en 2017, distribuidas por tecnologías y refrigerante, para obtener el porcentaje y posteriormente realizar la proyección a 2018, asumiendo que de este año a la fecha se mantienen las mismas tecnologías. En la Tabla 47 se puede observar de 2016 a 2018 la evolución de la presencia de refrigerantes.

Tabla 47. Proyección de porcentaje de distribución de AC según tecnología y refrigerante para la subcategoría residencial.

Tipo de equipo	Refrigerante	2016 [%]	2017 [%]	2018 ⁶ [%]
Pared	R-22	60	45	28
	R-410 ^a	39	54	71
Minisplit	R-22	14	8	2
	R-410 ^a	8	92	97
Central	R-22	0	0	0
	R-410 ^a	100	100	100

Fuente: Adaptado de (MGM Innovagroup, 2017)

Con los datos de la Tabla 47, se hace uso de la Ecuación (26), para calcular el $Stock_i$ por refrigerante (l), donde d es el porcentaje de distribución.

$$Stock_l \text{ [número de unidades]} = Stock_i * d \tag{26}$$

En lo referente a la demanda de energía eléctrica de AC, una vez establecidas las cantidades determinadas con la Ecuación (26), se calculó la demanda de energía diaria empleando la Ecuación (27), donde H son las horas de uso obtenidas de la ECV-2019 y P_t es la potencia de cada equipo, consignada en Tabla 46. Dicha potencia y demás características técnicas como eficiencia, carga de refrigerante y otros valores promedio, son tomadas del estudio realizado por CAEM, (Corporación ambiental empresarial, 2017a).

⁵ TR: Tonelada de refrigeración (unidad de capacidad térmica)

⁶ Proyección realizada a partir de la distribución de años anteriores.

$$DemandaE_i [kWh/día] = \frac{Stock_i * H * Pt[W]}{1.000} \tag{27}$$

Para un mejor análisis se hizo una extrapolación anual de la demanda de energía calculada anteriormente, haciendo uso de la Ecuación (28) y asumiendo la siguiente equivalencia:

- 1 año = 365 días
- 1 GW=1x10⁹ W

$$DemandaR_i [GWh/año] = 365 * \sum_{i=1}^n \frac{DemandaE_i}{1.000.000} \tag{28}$$

Con respecto al ventilador, se empleó el método de cálculo realizado en el equipo AC para establecer la demanda de energía diaria y anual. En ellas, la variable de potencia unitaria promedio fue seleccionada con base en los valores estipulados en el balance de energía útil de la UPME (UPME et al., 2018), al igual que la especificidad del rendimiento, el cual asocian a la categoría D (ver Tabla 48).

Tabla 48. Especificaciones técnicas promedio de los Ventiladores según tecnología.

Tipo de equipo	Potencia promedio [W]	Rendimiento [m ³ /s]
Techo	109	0,01
Pared	64	0,03
Mesa	47	0,03
Pedestal	69	0,03

Fuente: Adaptado de (UPME et al., 2018)

Demanda de potencia térmica

En cuanto a la demanda de potencia térmica, se calcula usando la potencia eléctrica promedio, el inventario de equipos previamente calculado, el EER⁷ y el FLV⁸ . (ver Tabla 46). Con base en ello, se calculó la demanda de potencia aplicando la Ecuación (5), donde TRE_i corresponde a la eficiencia de cada equipo.

Debido a la diferencia en unidades de las eficiencias, se tienen en cuenta las equivalencias establecidas en la Ecuación (29) y (30) cuando se tiene el EER y FLV respectivamente.

$$TRE_i = \frac{Pt * EER}{12.000 BTU/h} \tag{29}$$

⁷ EER: energy efficiency ratio.

⁸ FLV: full load value.

$$TRE_i = \frac{Pt}{FLV} \tag{30}$$

3.1.2. Emisiones equivalentes de CO2 generadas

Empleando la metodología de la sección 2.1 en correlación a las emisiones equivalentes directas (operación y disposición) e indirectas, para el AC se calculan todas y en el ventilador solamente las indirectas.

En la Tabla 30 y la Tabla 49 se encuentran los insumos necesarios para determinar las emisiones de los AC (GWP, vida útil y porcentaje anual de pérdidas), ligadas a las tecnologías de cada sector. Adicional a ello, se tiene en cuenta el GWP del refrigerante R-410a que corresponde a 2.088. Con la información recopilada, se aplican las Ecuaciones (7), (8) y (9) que permiten cuantificar las emisiones específicas de cada tecnología de AC. Mientras que, las Ecuaciones (10), (11) y (12) se aplican con el propósito de obtener las emisiones de todo el inventario. Finalmente se totalizan las emisiones GEI aplicando la Ecuación (13).

Tabla 49. Porcentaje anual de pérdidas del refrigerante y vida útil de los AC de acuerdo con la tecnología.

Tecnología	Vida útil [Años] ⁹	Porcentaje anual de pérdidas del refrigerante [%] ¹⁰
Minisplit	4	3%
Pared/Ventana	10	6%
Central	12	3%
Split ¹¹	10	12%
Chiller de agua	25	3%
Chiller de aire	17	3%

Fuente: Adaptado de (Corporación ambiental empresarial, 2017b; MGM Innovagroup, 2017)

A fin de establecer las emisiones indirectas causadas por ventilación, se aplica la Ecuación (9), con el factor de emisión para la energía generada usado anteriormente (0,112 tCO₂-eq/MWh).

3.1.3. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera

Consecuente con la metodología de la sección 2.1, se calcula la **cantidad de refrigerante liberado a la atmosfera** por cada unidad de tecnología de AC a través de la Ecuación (15), con la cual se determinan las emisiones específicas debido a fugas generadas en la operación y mantenimiento. En cuanto a las relacionadas a la disposición final del equipo, se obtienen mediante la aplicación de la Ecuación (16).

⁹ Aplica para cada tecnología independiente del refrigerante (MGM INNOVAGROUP, 2017)

¹⁰ Aplica para cada tecnología independiente del refrigerante (Annual leakage rate (%) for the refrigeration/air-con/HVAC, 2024)

¹¹ Característica obtenidas de (GIZ, 2020)

Por último, se cuantifica el total de refrigerante emitido a la atmósfera por el inventario establecido, recurriendo a la Ecuación (17).

3.2. Demanda no satisfecha

La demanda no satisfecha de climatización está concentrada únicamente en la subcategoría residencial, como se menciona en (International Energy Agency, 2018), además, dado el aumento de las temperaturas y la presencia frecuente de olas de calor, se requiere de AC, tal manera que permitan mantener el confort térmico en las viviendas y mejorar la calidad de vida de las personas.

Sin embargo, en la ECV-2023 se demuestra según la tenencia de equipos, que el acceso a sistemas de aire acondicionado sigue siendo limitado, con una penetración desigual entre los diferentes estratos socioeconómicos, debido al poder adquisitivo de cada uno de estos. Dado que todas las personas tienen las mismas necesidades fisiológicas, como la protección contra temperaturas extremas y la estimulación sensorial, es fundamental disponer de equipos que satisfagan dichas necesidades.

En línea con los ODS N° 11, 12 y 13, que proponen que las ciudades, comunidades y edificaciones sean sostenibles, resilientes y seguras al año 2023, y en concordancia con la Estrategia 2025 para promover viviendas sostenibles y mejores prácticas en los hogares, con el objetivo de lograr que entre el 70% y 90% de estos, al 2025, adopten medidas en pro de la sostenibilidad de las viviendas, se plantea la evaluación de la demanda no satisfecha de climatización mediante sistemas de aire acondicionado en los estratos bajos (1, 2 y 3), asumiendo que en los estratos superiores esta necesidad ya está cubierta.

En lo que respecta al sector terciario se asume que la necesidad se encuentra atendida al 100%.

3.2.1. Demanda energética no satisfecha (eléctrica y térmica) estimación.

La presente sección estima el inventario, la demanda de energía eléctrica y la demanda de potencia térmica actualmente no satisfecha.

Sector residencial

Partiendo de la ECV-2023, que permitió discriminar la tenencia de AC en las viviendas por departamento y estrato socioeconómico. Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros con respecto a dichos equipos:

- Cantidad de viviendas que tienen ambos equipos
- Cantidad de viviendas que no tienen ninguno de los dos equipos
- Cantidad de viviendas que tienen solamente AC
- Cantidad de viviendas que tienen solamente ventilador.

En este contexto, se estima que aproximadamente 3.280.000 viviendas en los estratos 1, 2 y 3, no cuentan con sistemas de aire acondicionado para lograr un confort térmico adecuado, además, alrededor de la mitad tampoco dispone de ventiladores que cubran esta necesidad. Como se mencionó anteriormente, estas necesidades son inherentes a todas las personas y se tienen metas establecidas relacionadas a la sostenibilidad de las viviendas; por lo tanto, se estima que los hogares en estos estratos tengan un acceso equitativo a sistemas de aire acondicionado comparable al que tienen actualmente los estratos 4, 5 y 6.

Para ello, se calculó el porcentaje de viviendas que actualmente no cuentan con AC (Pte_i) en los estratos 1, 2 y 3 (ver Tabla 50), aplicando la Ecuación (31). Donde Pts es el porcentaje de tenencia de AC en los estratos 4, 5 y 6 y Pac en los estratos 1, 2 y 3 en cada departamento i , perteneciente a los pisos térmicos templado, cálido húmedo, seco y frío (solo se tiene en cuenta el departamento de Cundinamarca).

$$Pte_i = Pts[\%] - Pac[\%] \tag{31}$$

Tabla 50. Porcentaje de inventario no satisfecho de los departamentos cálido húmedo, seco y templado.

Departamentos	Porcentaje de tenencia no satisfecha	
	1 y 2 [%]	3 [%]
Amazonas	21	12
Antioquia	0	0
Arauca	92	56
Atlántico	67	34
Bolívar	70	32
Caldas	0	---
Caquetá	42	25
Casanare	35	23
Cauca	1	---
Cesar	78	39
Córdoba	74	25
Cundinamarca ¹²	8	7
Huila	62	36
La guajira	53	16
Magdalena	68	31
Meta	32	16
Norte de Santander	36	15
Quindío	5	5
Risaralda	2	1
San Andrés	58	30
Santander	15	14
Sucre	83	59
Tolima	7	3
Valle del cauca	27	25

Fuente: Adaptado de (DANE, 2023a).

Ya establecidos los porcentajes de tenencia de AC en cada tecnología, con la discriminación propia del sector (ver sección 3.1), se empleó la Ecuación (24) para calcular el inventario correspondiente. Donde (T) es Pte_i (porcentaje de inventario no satisfecho) y (C_v) es la cantidad de viviendas que hay según el estrato socioeconómico.

¹² Se considera debido a que el estrato 4, 5 y 6 presenta demanda de climatización superior a 5% en este departamento de clima frío.

Con el inventario previamente calculado, se asume que los hogares instalaran AC tipo minisplit, al ser la tecnología más usada en el sector residencial (DANE, 2023a). Este equipo usará el refrigerante R-410^a y tendrá una capacidad térmica promedio de 1 TR con una eficiencia de 1kW/TR. Con ello, la demanda de energía eléctrica es obtenida aplicando la Ecuación (27) y (28) donde $P_t=1$ kW y las horas de uso corresponden a las obtenidas en la ECV-2019 de los estratos 4, 5 y 6. Es importante tener en cuenta que la demanda máxima de potencia para los sistemas de aire acondicionado en el país se presentará entre las 18:00 y las 22:00 horas.

Demanda de potencia térmica

En cuanto a la demanda de potencia térmica, se obtiene siguiendo el procedimiento de la sección 3.1. Las variables usadas son: potencia eléctrica y eficiencia promedio asumidas anteriormente (capacidad térmica promedio=1 TR, FLV = 1 kW/TR), y el inventario de equipos calculado. Con base en ello, se determinó la demanda de potencia aplicando la Ecuación (5), donde TRE_i es previamente calculado con la Ecuación (30).

3.2.2. Emisiones equivalentes de CO₂ generadas

Para la cuantificación de las emisiones equivalentes de CO₂, se ha seguido la metodología descrita en la sección 3.1, aplicando las Ecuaciones (7), (8) y (9) para determinar las emisiones específicas de una unidad de AC y las Ecuaciones (10), (11) y (12) con el propósito de obtener las de todo el inventario. Finalmente se totalizan las emisiones GEI aplicando la Ecuación (13).

3.2.3. Cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera

Consecuente con la metodología de la sección 3.1, se calcula la **cantidad de refrigerante liberado a la atmosfera** por cada unidad de tecnología de AC a través de la Ecuación (15), con la cual se determinan las emisiones específicas debido a fugas generadas en la operación y mantenimiento. En cuanto a las relacionadas a la disposición final del equipo, se obtienen mediante la aplicación de la Ecuación (16).

Por último, se cuantifica el total de refrigerante emitido a la atmósfera por el inventario establecido, recurriendo a la Ecuación (17).

3.3. Proyecciones

Las proyecciones del inventario de equipos de los dos sectores analizados en esta sección de climatización se realizaron del año 2023 a 2050. Estas proporcionan una perspectiva sobre la evolución de la tenencia de equipos de AC y consecuente a ella, el comportamiento en la demanda de energía eléctrica, demanda de potencia térmica, emisiones de GEI y cantidad de refrigerante que se emite a la atmósfera.

Por ende, este pronóstico anual de crecimiento se basa en un escenario "Business As Usual" (BAU), el cual es tendencial y no considera cambios significativos (debido a políticas públicas, cambios de las tecnologías, entre otros). Por lo tanto, las tasas calculadas se asumieron constantes a lo largo del tiempo, ya que no se contemplan variaciones derivadas de intervenciones, sino únicamente tendencias naturales o estructurales.

Debido a las fuentes de información disponible, las tendencias naturales son diferentes, para el sector terciario se basan en el crecimiento económico del PIB, y el residencial en las importaciones de AC realizadas durante los últimos 7 años.

Edificaciones - sector terciario

En el sector terciario, siguiendo el método descrito en la sección 1.1.3. usado para obtener las proyecciones relacionadas a las actividades económicas de comercio al por mayor y por menor, alojamiento, servicios de comidas, entre otras, se calcularon las tasas de crecimiento de las actividades adicionales del sector (ver Tabla 45), teniendo en cuenta el indicador del PIB (desde el año 2011 hasta 2019) y empleando la Ecuación (23). En la Tabla 51 se pueden observar las tasas calculadas.

A partir de las tasas de crecimiento previamente calculadas se proyecta el inventario anteriormente calculado en la sección 3.1., manteniendo la división de este (por piso térmico). Posteriormente, se obtiene la demanda de energía eléctrica, demanda de potencia térmica, emisiones equivalentes de CO₂ y cantidad de refrigerante emitido a la atmosfera (ver metodología de la sección 3.1 para cada etapa de cálculo relacionado al sector terciario). Para esto, se consideran las especificaciones promedio de las tecnologías definidas previamente en el inventario de la demanda satisfecha (ver Tabla 46).

Tabla 51. Tasa de crecimiento anual de inventario para el sector terciario

Sección CIU	División	Tasa de crecimiento anual [%]
Comercio al por Mayor y al por Menor; Reparación de Vehículos y Motocicletas	45	3,5*
Información y Comunicaciones	58	2,9*
	59	2,9*
	60	2,9*
	61	2,9*
	62	2,9*
Actividades Financieras y Seguros	63	2,9*
	64	8,5*
	65	8,5*
Actividades Inmobiliarias	66	8,5*
	68	3,7*
Servicios profesionales, científicos y técnicos	70	2,6*
	71	2,6*
	72	2,6*
	73	2,6*
	74	2,6*
Actividades de servicios administración y apoyo	77	3,8*
	79	3,8*
	80	3,8*
	81	3,8*
	82	3,8*
Actividades de Atención de la Salud Humana y Asistencia Social	87	6,3*
	88	6,3*
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación	90	6,7*
	91	6,7*
	92	6,7*
	93	6,7*

Otras actividades de servicios personales	94	6,7*
	96	6,7*

*Datos calculados previamente

Fuente: elaboración propia con datos de (DANE, 2023b)

Edificaciones - sector residencial

La proyección realizada para el sector residencial a 2050, fue basada en los datos de importaciones de AC desde 2017 hasta 2023, suministrada por Legiscomex. De 2017 a 2019, proporcionaron específicamente la relacionada al sector residencial; en años posteriores, está fue discriminada por capacidad térmica en BTU/h sin segregación por sector económico. Dado que se necesita específicamente la información relacionada al sector residencial, se establece que dado que este sector está compuesto aproximadamente por un 80% de equipos minisplit según la ECV-2023, se asume que los equipos importados de capacidad inferior a 30.000BTU/h son destinados al sector residencial, entendiendo que estos se encuentran dentro de la misma capacidad (ver Tabla 46).

En la Tabla 52, se detallan las unidades importadas en los últimos cuatro años. Con base en ella, y teniendo en cuenta el criterio anteriormente mencionado, se calcula el porcentaje de AC destinados al sector residencial, aplicando la Ecuación (32). Donde $AC_{30BTU/h}^n$ son los AC importados en los últimos 4 años de capacidades inferiores a 30.000BTU/h y AC^n es el total de lo equipos. De ello resulta que el 96% de los equipos son destinados a este sector (residencial).

$$Sr[\%] = \frac{\sum AC_{30BTU/h}^n}{\sum AC^n} \tag{32}$$

Tabla 52. Importaciones de AC del año 2020 a 2023

Designación de la Mercancía	2020	2021	2022	2023
Máquinas y aparatos para acondicionamiento de aire que comprendan un ventilador con motor y los dispositivos adecuados para modificar la temperatura y la humedad, aunque no regulen separadamente el grado higrométrico, de pared o para ventanas < 30.000 BTU/h.	438.075	379.026	427.043	517.269
Los demás acondicionadores de aire para ser montados sobre una ventana, pared, techo o suelo, formando un solo cuerpo, con equipo de enfriamiento superior a 30.000 BTU/hora, pero inferior o igual a 60.000 BTU/h	5.434	6.392	10.556	12.783
Los demás acondicionadores de aire para ser montados sobre una ventana, pared, techo o suelo, formando un solo cuerpo, con equipo de enfriamiento superior a 60.000 BTU/hora	619	726	1.134	1.263
Demás máquinas y aparatos para acondicionamiento de aire, con equipo de enfriamiento >30.000 BTU/h	9.376	8.666	4.858	7.581
Las demás máquinas y aparatos para acondicionamiento de aire, con equipo de enfriamiento superior a 30.000 BTU/h, pero inferior o igual a 60.000 BTU/h	944	1.061	850	871
Las demás máquinas y aparatos para acondicionamiento de aire, con equipo de enfriamiento superior a 60.000 BTU/h e inferior o igual a 240.000 BTU/h	267	266	255	1.294
Total	454.715	396.137	444.696	541.061

Fuente: Tomado de (Legiscomex, 2017-2023)

Con la información de importaciones (2017-2023), se realiza la proyección de esta al año 2050, calculando la tasa de crecimiento anual promedio a través de la Ecuación (33). Donde I_p^n es la importación total del año actual y I_p^{n-1} del año anterior. Realizado este procedimiento, se determinó una tasa de crecimiento del 12,16%.

$$Tp[\text{tasa de crecimiento \%}] = \frac{\sum \frac{I_p^n - I_p^{n-1}}{I_p^{n-1}}}{6} \tag{33}$$

Considerando que cierta fracción de los equipos importados para uso del sector residencial, son destinados a la reposición de los que finalizan su vida útil, y puesto que la proyección de la demanda satisfecha está relacionada a equipos nuevos que ingresan al mismo, es indispensable hacer esta discriminación (equipos de reposición y equipos nuevos) con base en la vida útil de los mismos. Esta difiere según la tecnología de AC (ver Tabla 49), y se ve afectada por variables como humedad, salinidad en el aire, entre otros; por ello, se establece un periodo de recambio diferente para cada piso térmico.

De acuerdo con lo anterior, inicialmente se establece un periodo promedio ponderado de recambio, teniendo en cuenta el inventario por tecnología a nivel nacional calculado en la sección 3.1 a 2023 (ver Tabla 53) y su respectiva vida útil (ver Tabla 49).

Tabla 53. Total de unidades instaladas en el sector residencial a 2023 por tecnología.

Tecnología	Unidades de AC a nivel nacional
Minisplit	631.645
Pared/Ventana	130.965
Central	37.033

Fuente: Elaboración propia con datos de (DANE, 2023a).

La Ecuación (34) permitió calcular los años de vida útil de referencia, donde $StockT_j$ corresponde al inventario nacional de cada tecnología j y n_j su respectiva vida útil. De ello se determinó una periodicidad promedio ponderada de 5 años de recambio para todas las tecnologías.

$$Ref[\text{años}] = \frac{\sum StockT_j * n_j}{\sum StockT_j} \tag{34}$$

Según las consideraciones mencionadas, la duración de un equipo depende entre otras cosas, de las condiciones climáticas donde se encuentra funcionando, por ello, en la Tabla 54 se detalla la discriminación por pisos térmicos de la vida útil. Teniendo en cuenta lo anterior, se asume una variación que contempla estas diferencias, en donde cálido húmedo y cálido seco se les asigna un porcentaje del 60% del valor promedio ponderado encontrado previamente para la vida útil del equipo (Ref); y respectivamente, para clima templado se asume un 80% y para frío un 100%.

Tabla 54. Vida útil de recambio asociada a cada piso térmico

Tecnología	Años de vida útil
Cálidos (húmedo y seco)	3
Templado	4

Frio	5
------	---

Fuente: Elaboración propia con datos de (DANE, 2023a).

Una vez realizada la proyección de las importaciones a 2050 con la tasa de crecimiento anual calculada con la Ecuación (33), se realiza la distribución por piso térmico haciendo uso de la Ecuación (35), tal que Ipt_i^n es la importación del sector residencial discriminada por piso térmico, PT es el porcentaje de distribución del inventario por piso térmico calculado en la sección 3.1 (Tabla 55) y P_i^n son las importaciones proyectadas con la tasa de crecimiento Tp .

Tabla 55. Porcentaje de distribución del inventario del sector residencial por piso térmico

Tecnología	Porcentaje de distribución PT[%]
Cálido húmedo	51
Cálido seco	30
Templado	14
Frio	5

Fuente: Elaboración propia con datos de (DANE, 2023a).

$$Ipt_i^n[\text{número de unidades}] = 96\%^{13} * PT[\%] * P_i^n[\text{número de unidades}] \tag{35}$$

Definidas las importaciones por piso térmico y la periodicidad de recambio establecido previamente, se calculan las unidades nuevas proyectadas (IpN_i^n) empleando la Ecuación (36), la cual tiene en cuenta las unidades destinadas a reposición y las totales por piso térmico (P_i^n).

$$IpN_i^n[\text{número de unidades}] = Ipt_i^n - Ipt_i^{n-n_j} \tag{36}$$

Basado en lo anterior, se totalizan los equipos nuevos año a año, de 2023 a 2050 y se calcula el porcentaje de crecimiento anual mediante la Ecuación (37), donde $\sum IpN_i^n$ es la sumatoria de todos los equipos nuevos discriminados por piso térmico, previamente determinados, y Ip_i^n las importaciones proyectadas del sector residencial con el fin de obtener PcN^n que será el porcentaje de crecimiento anual de los equipos nuevos de AC del sector residencial.

$$PcN^n[\%] = \frac{\sum IpN_i^n}{Ip_i^n} \tag{37}$$

En la

Tabla 56 están consignados los resultados referentes al total de equipos nuevos calculados anteriormente, y su respectivo porcentaje de crecimiento anual. A partir de ello, se realiza la gráfica del porcentaje de crecimiento anual de equipos nuevos, con la finalidad de encontrar la tasa de crecimiento del inventario satisfecho a través de la pendiente de esta.

Como se evidencia en la

¹³ Porcentaje de importaciones totales correspondientes al sector residencial

Figura 3, el crecimiento anual promedio de equipos nuevos de AC del sector residencial tiene una tasa de 2,2%, la cual es la aplicada para realizar la proyección a 2050 del inventario satisfecho 2023 calculado en la sección 3.1. a través de la Ecuación (38), donde $Pstock_i^{n-1}$ es el inventario del año anterior.

Tabla 56. Porcentaje de crecimiento anual de equipos de PcN^n

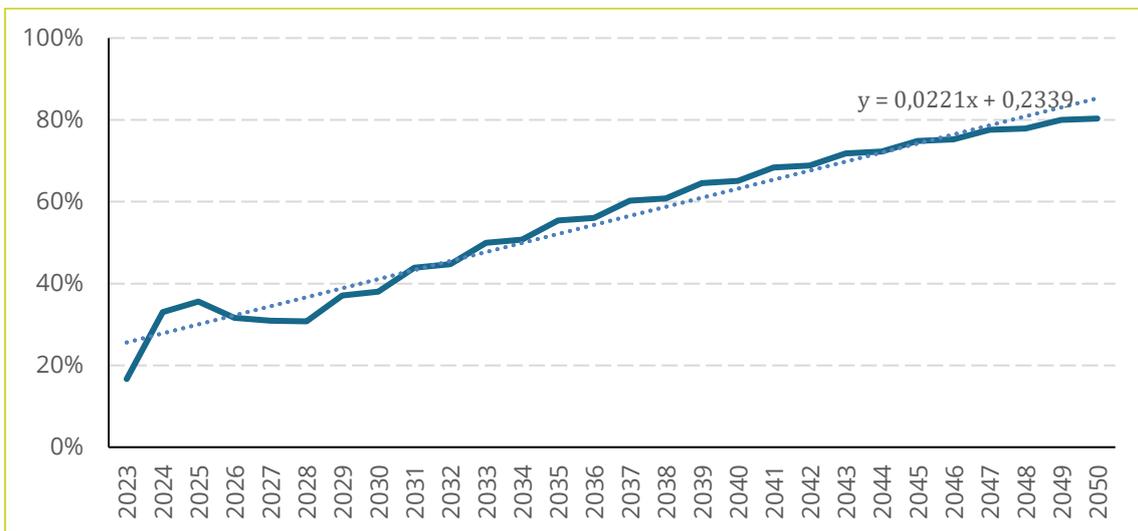
Año	Total de equipos nuevos $\sum IpN_i^n$ [número de equipos]	Crecimiento anual de equipos nuevos PcN^n [%]
2023	86.571	17
2024	192.236	33
2025	232.560	36
2026	231.530	32
2027	254.043	31
2028	283.372	31
2029	383.221	37
2030	440.799	38
2031	570.780	44
2032	652.496	45
2033	817.500	50
2034	930.708	51
2035	1.139.950	55
2036	1.294.039	56
2037	1.559.134	60
2038	1.766.069	61
2039	2.101.651	65
2040	2.376.654	65
2041	2.801.160	68
2042	3.163.574	69
2043	3.700.228	72
2044	4.174.601	72
2045	4.852.652	75
2046	5.470.107	75
2047	6.326.387	78
2048	7.126.350	78
2049	8.207.232	80
2050	9.239.602	80

Fuente: Elaboración propia con datos de (Legiscomex, 2017-2023)

Finalmente se realiza la distribución de la proyección del inventario por piso térmico, teniendo en cuenta el porcentaje de participación de estos, consignados en la Tabla 55 logrando así, obtener la cantidad de equipos de AC del sector residencial por cada piso térmico para el periodo 2023-2050.

$$Pstock_i^n [\text{número de unidades}] = Pstock_i^{n-1} * (1 + 2,2\%) \tag{38}$$

Figura 3. Porcentaje de crecimiento anual de equipos nuevos de AC del sector residencial (2023-2050)



Fuente: Elaboración propia con datos de (Legiscomex, 2017-2023)

4. Referencias

- ABC Motor. (2020, June 2). *Eléctricos vs combustión: diferencias de consumo, rendimiento y coste por kilómetro*. https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-electricos-combustion-diferencias-consumo-rendimiento-y-coste-kilometro-202006020150_noticia.html?ref=https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-electricos-combustion-diferencias-consumo-rendimiento-y-coste-kilometro-202006020150_noticia.html
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2020). *Códigos CIIU Revisión 4 adaptada para Colombia*. <https://linea.ccb.org.co/descripcionciiu/>
- Cámara del Sector de Electrodomésticos. (2023). *Mercado aparente*.
- Carbon Trust, & UNAL. (2023). *Análisis de la demanda de enfriamiento y de su potencial de flexibilidad en Colombia*.
- Consortio CMA. (2015). *GEF/PNUD/COL/76979 - Normalización y Etiquetado de Eficiencia Energética en Colombia (N & E Colombia)*. http://www.etiquetaenergetica.gov.co/wp-content/uploads/2017/01/Estudio_Estructura_y_Transformacion_del_Mercado_Equipos_RETIQ.pdf
- Consortio Génesis. (2013). *Determinación del Potencial de Reducción del Consumo Energético en el Sector Servicios en Colombia*.
- Corporación ambiental empresarial. (2017a). *Producto 3: Informe Final*.
- Corporación ambiental empresarial. (2017b). *Producto 4: Informe Final*.
- Corporación ambiental empresarial. (2021). *Estrategia Nacional para la Implementación de Medidas y Alternativas que Mejoren la Eficiencia Energética y el Impacto Ambiental Directo de los Sistemas y Equipos de Refrigeración Comercial del Subsector de Tiendas de Colombia*.
- Corporación EMA. (2014). *Determinación y Priorización de Alternativas de Eficiencia Energética para los Subsectores Manufactureros Códigos CIIU 19 a 31 en Colombia a Partir de la Caracterización del Consumo Energético para sus Diferentes Diferentes Procesos, Usos y Equipos de Uso*.
- Corporación EMA. (2022). *Caracterizar el consumo energético del sector terciario para fortalecer las estrategias y medidas de eficiencia energética, descritas en el reciente PAI PROURE*.
- Corporación EMA. (2024). *Caracterización del consumo final de energía en los sectores agropecuario y agroindustrial, identificando los principales usos, equipos o tecnologías y energéticos; como insumo para la formulación de las estrategias y medidas de eficiencia* Contenido. 63.
- DANE. (2019a). *Encuesta nacional agropecuaria (ENA)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>
- DANE. (2019b). *Encuesta nacional de calidad de vida (ECV) 2019*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2019>
- DANE. (2023a). *Encuesta nacional de calidad de vida (ECV) 2023*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2023>
- DANE. (2023b). *Producto Interno Bruto (PIB)*.

- <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/historicos-producto-interno-bruto-pib>
- DANE. (2024a). *Vivienda VIS y no VIS*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/vivienda-vis-y-no-vis/vivienda-vis-y-no-vis#anexos-6>
- DANE. (2024b, June). *Componente abastecimientos*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/componente-abastecimientos-1>
- DPN. (2016). Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. *Departamento Nacional de Planeación*, 39, 116.
- Drake Refrigeration Inc. (2022). *¿Cómo la elección de los chillers industriales correctos nos puede ahorrar dinero y detener fugas?* Froztec. <https://blog.froztec.com/seleccion-chiller-ahorro-deteccion-fugas>
- Montreal Protocol On Substances That Deplete The Ozone Layer- Technology and Economic Assessment Panel, (2023). <https://ozone.unep.org/system/files/documents/TEAP-May2023-Progress-Report-Supplementary.pdf>
- Éxito Colombia. (n.d.-a). *Nevecón Samsung side by side 628 Lts RS22T5200B1/CO gris oscuro*. Retrieved July 15, 2024, from <https://www.exito.com/nevecon-649litros-brutos-black-samsung-rs22t5200b1co-3034390/p>
- Éxito Colombia. (n.d.-b). *Nevera Haceb congelador superior 220 Lts 9002739*. Retrieved July 15, 2024, from <https://www.exito.com/nevera-haceb-congelador-superior-220-lts-9002739-3132375/p>
- Éxito Colombia. (n.d.-c). *Nevera Mabe no frost congelador superior 313 Lts. brutos RMA300FJCG*. Retrieved July 15, 2024, from <https://www.exito.com/nevera-no-frost-300-l-grafito-mabe-rma300fjcg-3037854/p>
- Facility Managers. (n.d.). *Las Diferencias entre la Climatización y la Ventilación en Edificios*. Retrieved August 5, 2024, from <https://facility-managers.com/diferencia-entre-climatizacion-y-ventilacion/>
- Fedegan. (n.d.). *006-Producción leche y sacrificio de bovinos en Colombia*. Retrieved August 8, 2024, from <https://estadisticas.fedegan.org.co/DOC/drawStatWidgetFilter.jsp?pldStat=7&plIndexX=0>
- GIZ. (2020). *Estudio de fugas en equipos de Aire Acondicionado tipo split en Costa Rica*. www.giz.de/en,
- Guia Do Ar Condicionado. (2023, February 1). *¿Qual a vida útil de um Chiller?* Guia Do Ar Condicionado. <https://guiadoarcondicionado.com.br/qual-a-vida-util-de-um-chiller/>
- Incombustion Unión Temporal. (2014). *Determinación del Potencial de Reducción del Consumo Energético en los Subsectores Manufactureros Códigos CIU 10 a 18 en Colombia*.
- Intarcon. (n.d.). *Tecfrinor - Calculadora frigorífica*. Retrieved July 31, 2024, from <https://www.tecfrinor.com/calculadora/calc.html>
- International Energy Agency, I. (2018). *The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable*. www.iea.org/t&c/
- LOXAM. (2023, June 7). *Sistemas de refrigeración industrial: chillers - LoxamHune*. LOXAM. <https://www.loxamhune.com/calidad-y-eficiencia-la-importancia-de-los-sistemas-de-refrigeracion-industrial/>

- MGM Innova Energy Services. (2023). *Caracterización del uso de energía eléctrica por sistemas de aire acondicionado en proyectos VIS, en cuatro (4) ciudades colombianas.*
- MGM Innovagroup. (2017). *Formulación de una NAMA para el sector de AA en Distritos Térmicos en Colombia.*
- Plan Nacional para la Gestión de Bancos de SAO/HFC, (2021). www.giz.de/proklima
- Ministerio de Transporte. (2012). *Costo por movilización y por tiempos logísticos - Septiembre 2012 - Definitivo: Vol. ministerio.* <https://mintransporte.gov.co/descargar.php?id=1143>
- Resolución 0549 - 10 de julio de 2015, (2015). [https://camacol.co/sites/default/files/Resolución 549 de 2015 con Anexos.pdf](https://camacol.co/sites/default/files/Resolución%20549%20de%202015%20con%20Anexos.pdf)
- NCCD. (2015). *All India cold-chain infrastructure capacity assessment of status & gap.*
- ROCA. (n.d.). *Aplicaciones Versátiles del Chiller en la Industria: Enfriamiento Eficiente para Diversos Sectores.* Ingeniería de Climatización. Retrieved July 4, 2024, from <https://rocaingenieria.com/2023/08/17/aplicaciones-versatiles-del-chiller-en-la-industria-enfriamiento-eficiente-para-diversos-sectores/>
- Sánchez Segura, J. E. (2010). Se inicia la eliminación de los HCFC en Colombia. *Boletín Ozono*, 24(0), 1–23. https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/boletin_ozono_24.pdf
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024). *Energía Portal SUI.* SUI. <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>
- Holistic Methodology for Developing a National Cooling Action Plan, (2021). <https://www.unescap.org/kp/2021/national-cooling-action-plan-methodology-holistic-methodology-developing-national-cooling>
- Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer-Technology and Economic Assessment Panel, (2019).
- UPME. (2022). *Factores de emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) en Colombia para el 2022.* https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2022v2.pdf
- UPME, IREES, TEP, & CORPOEMA. (2018). Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética Resumen Ejecutivo BEU Sector Transporte. In *Unidad de Planeación Minero-Energética* (Vol. 1). https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Transporte.pdf
- USAENE, & Corporación EMA. (2023). *Estudio para definir el nivel de consumo indispensable que requieren usuarios en condiciones socioeconómicas vulnerables de los estratos 1 y 2 , considerando las condiciones climáticas de las zonas en las que habitan y las buenas prácticas para el consumo.*
- XM. (n.d.). *Históricos de demanda.* Retrieved July 25, 2024, from https://sinergox.xm.com.co/dmnd/Paginas/Historicos/Historicos.aspx?RootFolder=%2Fdmnd%2FHistoricos%2FDemandaComercial&FolderCTID=0x01200039E2A7EBA7248245AD25FA272270BCE5&View=%7B8DBA930A-8AE6-48F6-8D6A-F206C89DC868%7D#InplviewHash8dba930a-8ae6-48f6-8d6a-f206c89dc868=Paged%3DTRUE-PagedPrev%3DTRUE-p_SortBehavior%3D0-p_FileLeafRef%3DDemanda%255fComercial%255fNo%255fRegulada%255fPor%255fCI

IU%255fTRI4%255f2022%252exlsx-p_ID%3D376-PageFirstRow%3D61