



**Diseño y validación de una guía técnica orientadora para la gestión sostenible
de residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia**

Juan Sebastián León Arcia

Fernando Antonio Forero García

David Ricardo Murcia Cortés

Universidad Ean

Facultad de Administración, Finanzas y Ciencias Económicas

Facultad de Ingeniería

Programa de MBA

Programa de Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C., Colombia

23/04/2026

**Diseño y validación de una guía técnica orientadora para la gestión sostenible
de residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia**

Juan Sebastián León Arcia

Fernando Antonio Forero García

David Ricardo Murcia Cortés

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Administración de Empresas - MBA

Magister en Gerencia de Proyectos

Director:

Federico López Muñoz

Modalidad:

Artículo de Investigación.

Universidad Ean

Facultad de Administración, Finanzas y Ciencias Económicas

Facultad de Ingeniería

Programa de MBA

Programa de Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C., Colombia

18/08/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C., 18/08/2026

Dedicatoria:

David Ricardo Murcia Cortés: A mi familia: Mis hijos, motores que me hacen seguir en esta travesía llamada vida; mi esposa, el amor de mi vida; mi madre, raíz de todo.

Fernando Antonio Forero García: A Dios primero que todo, a mi esposa, compañera de cada batalla y cada sueño, que sostuvo este logro con su paciencia; a mi hija, la luz que da sentido a todo esfuerzo; y a mis padres, cimiento de lo que soy.

Juan Sebastian Leon Arcia: A Dios en primer lugar, a mi familia, a mi esposa mayra y a mi hijo Antonio por ser soporte y brindarme motivación en este tiempo de dedicación a mis estudios.

Agradecimientos

A nuestro director de trabajo de grado, Federico López Muñoz, por su paciencia y por guiarnos con precisión y criterio en cada etapa del desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Ean y a su cuerpo docente, por la formación recibida a lo largo de la maestría y por brindarnos las herramientas que hicieron posible este trabajo.

A los siete expertos de los sectores académico, público y privado que conformaron el panel de validación, por su tiempo, su rigor y sus observaciones, que enriquecieron sustancialmente el instrumento propuesto.

Finalmente, a nuestras familias, por su apoyo incondicional durante las largas jornadas que demandó este proceso.

Resumen

Colombia enfrentará en los próximos años un aumento sostenido en la generación de residuos provenientes de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino (c-Si). Aunque el crecimiento del sector ha sido evidente, la gestión de estos residuos todavía no cuenta con una regulación específica que los aborde de forma integral. A esto se suma que muchos gestores autorizados operan con infraestructura pensada para residuos electrónicos convencionales, lo que limita su capacidad para tratar adecuadamente este tipo de equipos. En ese contexto, este trabajo propone una guía técnica orientadora organizada en seis fases, que cubren el proceso completo desde el retiro del módulo hasta la valorización de sus materiales.

La validación de la guía se realizó mediante juicio de expertos, utilizando el coeficiente V de Aiken (Aiken, 1985). Se optó por una escala dicotómica (0 = no cumple / 1 = sí cumple) y por un umbral exigente de $V > 0,90$, considerando el carácter técnico del instrumento. El panel estuvo conformado por siete evaluadores de los sectores académico, público y privado, todos con experiencia en gestión de residuos electrónicos, energía fotovoltaica o normativa ambiental en Colombia.

El instrumento incluyó 20 ítems distribuidos en seis dimensiones, correspondientes a cada fase. Cada ítem fue evaluado en términos de claridad, pertinencia y aplicabilidad técnica. El valor promedio obtenido ($V = 0,96$) indica un alto nivel de acuerdo entre los evaluadores, aunque no exento de observaciones. En particular, dos ítems ($V = 0,86$) evidenciaron limitaciones asociadas a la logística en Zonas No Interconectadas y a la disponibilidad de tecnologías para el tratamiento del laminado. Estas observaciones no se descartaron; por el contrario, sirvieron como base para ajustar varios aspectos de la guía en su versión final.

En conjunto, los resultados sugieren que la guía constituye un referente útil para la gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos en Colombia. No obstante, su implementación deberá leerse a la luz de las condiciones reales del país, especialmente en lo que respecta a infraestructura y acceso territorial. El instrumento se alinea con el Decreto 284 de 2018, la Política Nacional RAEE (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015a) y la Estrategia Nacional de Economía Circular (*Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo [MADS/MinCIT], 2019*)., aunque también deja en evidencia algunos vacíos que todavía requieren desarrollo normativo.

Palabras clave: residuos fotovoltaicos, silicio cristalino, validez de contenido, V de Aiken, gestión RAEE, economía circular, Colombia

Abstract

Colombia will face in the coming years a sustained increase in waste generation from crystalline silicon photovoltaic (c-Si) modules. Although the sector's growth has been evident, the management of this waste still lacks specific regulation that addresses it comprehensively. Adding to this, many authorized waste managers operate with infrastructure designed for conventional electronic waste, which limits their capacity to treat this type of equipment adequately. Against this backdrop, the present work proposes a six-phase technical guidance document covering the complete process from module removal through material valorization.

Validation of the guide was carried out through expert judgment using Aiken's V coefficient (Aiken, 1985). A dichotomous scale (0 = does not comply / 1 = complies) was adopted alongside a strict threshold of $V > 0.90$, given the technical nature of the instrument. The expert panel comprised seven evaluators from the academic, public, and

private sectors, all with experience in electronic waste management, photovoltaic energy, or environmental regulation in Colombia.

The instrument included 20 items distributed across six dimensions corresponding to each phase. Each item was assessed in terms of clarity, relevance, and technical applicability. The mean coefficient obtained ($V = 0.96$) indicates a high level of agreement among evaluators, though not without observations. Notably, two items ($V = 0.86$) revealed limitations related to logistics in Non-Interconnected Zones and to the availability of technologies for laminate treatment. These observations were not set aside; rather, they served as the basis for adjusting several aspects of the guide in its final version.

Taken together, the results suggest that the guide constitutes a useful reference for the post-consumer management of photovoltaic modules in Colombia. Its implementation, however, must be read in light of the country's actual conditions, particularly regarding infrastructure and territorial access. The instrument aligns with Decree 284 of 2018, the National WEEE Policy (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015a), and the National Circular Economy Strategy (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo [MADS/MinCIT], 2019)., while also making evident certain regulatory gaps that still require further development.

Keywords: photovoltaic waste, crystalline silicon, content validity, Aiken's V, WEEE management, circular economy, Colombia

1. Introducción

1.1 Plantamiento del problema y justificación

El crecimiento de la energía solar fotovoltaica en Colombia ha sido particularmente acelerado en los últimos años. Impulsado por marcos normativos como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, el país ha incrementado de forma sostenida su capacidad instalada, en línea con las tendencias globales de transición energética. Sin embargo, este avance trae consigo un efecto menos visible en el corto plazo: el aumento progresivo de módulos que, en una o dos décadas, alcanzarán el final de su vida útil.

El manejo de estos residuos plantea desafíos que no son menores. Un módulo fotovoltaico de silicio cristalino (c-Si) no es un residuo electrónico convencional: combina vidrio templado, aluminio, metales conductores y componentes con potencial riesgo ambiental, como el plomo presente en las soldaduras. Aunque en condiciones normales estos materiales permanecen encapsulados, su liberación tras el deterioro o fragmentación del módulo puede implicar implicaciones ambientales y regulatorias relevantes. A pesar de ello, en Colombia todavía no existe una regulación específica que aborde este flujo de residuos de manera diferenciada, y la infraestructura disponible para su gestión resulta, en muchos casos, insuficiente o poco adaptada a sus particularidades.

En este contexto, surge la necesidad de contar con herramientas que no solo sistematicen el conocimiento técnico disponible, sino que también puedan aplicarse en condiciones reales. La guía técnica orientadora desarrollada en este estudio responde a esa necesidad. Su estructura en seis fases busca cubrir el proceso completo de gestión desde el retiro del módulo hasta la valorización de sus materiales incorporando tanto criterios técnicos como referencias al marco normativo vigente.

Así mismo, es importante distinguir dos tipos de vacío que este trabajo busca tratar; por un lado, existe una brecha regulatoria y operativa, la cual está ampliamente documentada

tanto en la literatura internacional como en la revisión sistemática previa de los autores (León Arcia et al., 2026): la ausencia de normativa colombiana específica para residuos fotovoltaicos y la falta de infraestructura adaptada a sus particularidades. Por otro lado, existe una brecha científica puntual que es la que este estudio atiende directamente: hasta el momento no se disponía de un instrumento técnico operativo documentado que orientara la gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos adaptado al contexto, ni de un proceso replicable de validación de contenido de este tipo de guías mediante juicio de expertos y el coeficiente V de Aiken. En ese sentido, el aporte científico del trabajo tiene un propósito de doble dimensión: la guía como instrumento y el respaldo metodológico de su validación.

Este trabajo parte de la revisión sistemática de literatura desarrollada previamente por los autores (León Arcia et al., 2026), que documentó el estado del conocimiento sobre gestión de residuos fotovoltaicos y estableció la base conceptual para avanzar hacia un instrumento técnico aplicable al contexto colombiano. Partiendo de esa base, se justifica el hecho no solo de diseñar una guía técnica orientadora, sino someterla a un proceso de validación de contenido mediante juicio de expertos empleando el coeficiente V de Aiken (Aiken, 1985), de manera que sus recomendaciones cuenten con respaldo metodológico y no dependan únicamente del criterio de sus autores. Esto es especialmente relevante en un contexto donde la ausencia de estrategias locales para el manejo de estos residuos hace que muchos componentes de valor como lo son el vidrio, aluminio, silicio y otros metales, terminen desaprovechados o tratados como residuos convencionales, limitando tanto la competitividad del sector como el avance hacia un modelo de economía circular que genere oportunidades y desarrollo.

El alcance del proyecto trasciende lo estrictamente técnico. Al incorporar un módulo específico para Zonas No Interconectadas (ZNI), la guía busca ser aplicable también en contextos de menor desarrollo de infraestructura, donde la responsabilidad de la gestión suele recaer en operadores de contratos AOM, de esta forma, el instrumento se plantea como una herramienta de consulta que puede orientar decisiones técnicas, normativas e institucionales sobre la gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos en Colombia.

1.2 Objetivos, pregunta de investigación y estructura del artículo

Objetivo general. Proponer una guía práctica que oriente la gestión adecuada de los residuos de paneles solares fotovoltaicos al final de su vida útil en Colombia, con base en criterios técnicos y de sostenibilidad.

Objetivos específicos. El objetivo general se desagrega en cinco objetivos específicos: (1) analizar la composición y los componentes predominantes de los paneles solares fotovoltaicos utilizados en Colombia, con el fin de comprender sus implicaciones en la gestión de residuos; (2) examinar el marco normativo y las disposiciones existentes en Colombia relacionadas con la gestión de residuos de paneles solares fotovoltaicos, identificando vacíos y oportunidades de mejora desde la sostenibilidad; (3) analizar experiencias internacionales en la gestión y disposición de residuos de paneles solares fotovoltaicos, identificando buenas prácticas aplicables al contexto colombiano; (4) formular una propuesta de guía orientadora que consolide recomendaciones para la gestión sostenible de los residuos de paneles solares fotovoltaicos en Colombia; y (5) validar el contenido de la guía técnica orientadora mediante juicio de expertos empleando el coeficiente V de Aiken como herramienta de cuantificación del nivel de acuerdo entre evaluadores.

Pregunta de investigación. ¿En qué medida una guía técnica orientadora, estructurada en seis fases y validada mediante juicio de expertos utilizando el coeficiente V de Aiken, resulta clara, pertinente y técnicamente aplicable para la gestión sostenible de los residuos de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia?

Para dar respuesta a esta pregunta, el documento se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2 presenta el marco teórico sobre tecnologías fotovoltaicas, gestión posconsumo, modelos internacionales de referencia y el método de validación por juicio de expertos; el capítulo 3 describe la metodología empleada para el diseño y la validación de la guía; el capítulo 4 presenta los resultados del proceso de validación; el capítulo 5 discute estos resultados a la luz de la literatura revisada; y el capítulo 6 expone las conclusiones y las líneas futuras de desarrollo.

2. Marco teórico

2.1 Sistemas fotovoltaicos: tecnologías, composición material y relevancia para la gestión de residuos

El crecimiento acelerado de la energía solar fotovoltaica, hoy central en la transición energética global, ha empezado a mostrar una consecuencia que durante años pasó relativamente desapercibida. Los módulos que actualmente producen electricidad limpia terminarán convirtiéndose, en un horizonte de dos o tres décadas, en uno de los flujos de residuos tecnológicos más voluminosos. Este cambio de enfoque de generación a fin de vida ha ganado atención en la literatura científica, especialmente desde 2020, aunque todavía con vacíos importantes.

Figura 1. *Evolución de la capacidad fotovoltaica instalada global y participación de mercados emergentes (2010–2024)*



Nota. Elaboración propia con base en IEA (2025); IRENA (2023); UPME (2025); EMIS (2025).

En ese sentido, comprender qué contienen estos módulos, cómo están contruidos y qué riesgos pueden representar cuando dejan de operar no es simplemente un detalle técnico. Más bien, es una condición básica para diseñar cualquier estrategia de gestión que realmente funcione en la práctica y no se quede en un plano únicamente conceptual.

2.1.1 Tipos de tecnología fotovoltaica y dominio del silicio cristalino

En el mercado fotovoltaico global coexisten varias familias tecnológicas, aunque con una distribución bastante desigual. El silicio monocristalino (c-Si mono) domina ampliamente: para 2024 concentra cerca del 97,7% de la producción mundial, con eficiencias comerciales alrededor del 22,7% y garantías de rendimiento que suelen situarse entre los 25 y 30 años (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE [Fraunhofer ISE], 2024). Este predominio no responde a una única causa, sino a la combinación de varios factores: décadas de mejora tecnológica, una fuerte concentración de la manufactura principalmente en China, que controla más del 80% de la cadena productiva y un desempeño en campo que ha demostrado ser confiable para inversionistas y financiadores (IEA, 2025). Por su parte, el silicio policristalino, que tuvo un papel dominante hasta aproximadamente 2018, ha ido desapareciendo de la producción reciente, aunque sigue presente en la base instalada y, por lo tanto, en el flujo futuro de residuos.

Las tecnologías de película delgada ocupan un espacio mucho más reducido. Dentro de este grupo, el telururo de cadmio (CdTe) representa cerca del 2–3% del mercado, mientras que el CIGS (selenuro de cobre, indio y galio) tiene una participación inferior al 1%. Aunque su presencia es limitada, estas tecnologías no son irrelevantes, sobre todo por sus implicaciones en términos de manejo al final de la vida útil, ya que incorporan materiales con perfiles toxicológicos distintos a los del silicio cristalino. El silicio amorfo, con eficiencias más bajas (entre 6% y 12%), ha quedado relegado a aplicaciones

específicas, como la integración arquitectónica o ciertos dispositivos de consumo (Das & Sarmah, 2025).

En el caso colombiano, el panorama es mucho más homogéneo. Los proyectos fotovoltaicos de gran escala como Guayepo I y II en el Atlántico o La Loma en el Cesar utilizan de forma prácticamente exclusiva módulos de silicio monocristalino bifacial, generalmente combinados con sistemas de seguimiento de un eje. La capacidad instalada pasó de 676 MW en 2023 a 1.871 MW en 2024, y se proyecta un crecimiento adicional significativo en los próximos años, con cerca de 4,4 GW adjudicados para entrar en operación entre 2027 y 2028 (UPME, 2025). Esta concentración tecnológica simplifica, en cierta medida, los retos asociados al reciclaje, especialmente si se compara con mercados más diversos. Al mismo tiempo, refuerza la decisión de centrar la guía técnica en módulos de silicio cristalino, que son, en la práctica, los que dominarán el flujo de residuos en el país.

2.1.2 Composición material de los módulos de silicio cristalino

Un módulo típico de silicio cristalino de 60 celdas suele tener un peso que oscila entre los 18 y 20 kg. Su configuración responde a una estructura laminada bastante estandarizada: un vidrio templado frontal de bajo contenido de hierro (alrededor de 3,2 mm), dos capas de encapsulante de acetato de etilenvinilo (EVA) que protegen las celdas, una lámina posterior polimérica (backsheets tipo TPT) y un marco perimetral de aluminio (Mao et al., 2024; Ansanelli et al., 2021).

Esta combinación de materiales hace que más del 90% del módulo sea, en principio, reciclable. Sin embargo, en la práctica, su aprovechamiento no es tan directo, ya que la separación de estos componentes exige procesos específicos para evitar contaminación entre las fracciones recuperadas.

La Tabla 1 presenta una síntesis de la composición porcentual del módulo, construida a partir de distintos estudios académicos.

Tabla 1

Composición material de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino

Componente	Porcentaje en peso	Masa aproximada (módulo 22 kg)
Vidrio templado	68–76%	15,0–16,5 kg
Marco de aluminio	10–20%	2,2–4,0 kg
Encapsulante EVA	5–7,5%	1,1–1,5 kg
Celdas de silicio	3–5%	0,7–1,1 kg
Backsheet (PVF/PET)	1–3,5%	0,2–0,4 kg
Cobre (cintas y conectores)	~1%	~200 g
Plata (metalización)	~0,05%	~10–20 g
Soldadura (Sn/Pb)	<0,1%	~10–20 g
Caja de conexiones y otros	1–2%	0,2–0,4 kg

Nota. Elaboración propia con base en Mao et al. (2024); Ansanelli et al. (2021); Lim et al. (2022); IEA-PVPS (2021).

El vidrio y el aluminio representan la mayor parte de la masa de un módulo, con valores que suelen ubicarse entre el 78% y el 96%. Por esa razón, su recuperación es clave para que el reciclaje fotovoltaico sea viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. En condiciones adecuadas, los procesos mecánicos convencionales permiten alcanzar tasas de recuperación superiores al 95% en el caso del vidrio y cercanas al 85% para el aluminio (Cheema et al., 2024; Dias et al., 2021; Goh et al., 2024).

Ahora bien, llegar a esos niveles de recuperación no es automático. Antes es necesario retirar componentes como el marco, la caja de conexiones y los conectores,

pasos que en esta investigación corresponden a las Fases 3 y 4 de la guía técnica propuesta.

2.1.3 Materiales críticos y peligrosos: implicaciones para el reciclaje

Dentro de un mismo módulo fotovoltaico coexisten dos tipos de materiales que resultan clave desde la perspectiva de su gestión: por un lado, aquellos con alto valor de recuperación, y por otro, los que pueden representar un riesgo ambiental. Esta dualidad no es menor, ya que condiciona directamente la forma en que deben diseñarse los procesos de manejo y tratamiento al final de la vida útil.

Entre los materiales con mayor valor económico, la plata ocupa un lugar destacado. Aunque cada módulo contiene cantidades relativamente pequeñas del orden de 10 a 20 gramos, su aporte al valor total de los materiales recuperables es considerable, cercano al 47%, pese a representar apenas una fracción mínima de la masa total (IEA-PVPS, 2021). A escala global, el consumo de plata en la industria fotovoltaica alcanzó aproximadamente 6.577 toneladas en 2024, lo que equivale a cerca del 18% de la demanda mundial. Esto explica por qué el reciclaje de paneles solares empieza a considerarse una fuente secundaria relevante para este metal (Gahlot et al., 2022).

En contraste, el plomo es el principal elemento de preocupación ambiental en los módulos de silicio cristalino. Se encuentra en las soldaduras que conectan las celdas, en cantidades que suelen oscilar entre 4 y 15 gramos por módulo. Bajo ciertas condiciones por ejemplo, en escenarios de disposición inadecuada este material puede liberarse. Ensayos de lixiviación han mostrado concentraciones de hasta 9,3 mg/L, superando el límite de 5,0 mg/L establecido por el protocolo TCLP, lo que implica su clasificación como residuo peligroso en distintos marcos regulatorios (Li et al., 2024; Deng et al., 2019). En el caso colombiano, esto tiene implicaciones importantes, ya que los módulos dañados o

fragmentados podrían quedar sujetos al Decreto 4741 de 2005, aunque la normativa vigente no lo aborda de manera explícita para este tipo de equipos.

Las tecnologías de película delgada introducen, además, otros elementos de riesgo que no están presentes en el silicio cristalino. Por ejemplo, los módulos de telururo de cadmio (CdTe) contienen entre 5 y 7 gramos de cadmio por metro cuadrado, sustancia clasificada como carcinógena por la IARC. En el caso de los módulos CIGS, se incorporan elementos como selenio e indio, considerados materiales críticos a nivel internacional. Si bien estas tecnologías aún no tienen una presencia significativa en Colombia, su posible incorporación a futuro sugiere que los instrumentos de gestión deberían contemplar, desde ahora, criterios básicos de identificación y separación por tipo de tecnología.

2.2 Gestión de residuos fotovoltaicos al final de la vida útil: procesos técnicos

La gestión de un módulo fotovoltaico al final de su vida útil no empieza realmente en la planta de reciclaje, sino mucho antes. Comienza en el momento en que un técnico llega al sitio de instalación para retirarlo. Ese primer paso, que a simple vista podría parecer menor, termina siendo decisivo: de cómo se manipule el módulo en esta etapa depende en gran medida si sus materiales podrán recuperarse en condiciones adecuadas o si, por el contrario, se degradarán o contaminarán durante el proceso.

"Bošnjaković et al. (2023) describen la separación mecánica del marco y el vidrio; Deng et al. (2019) analizan la viabilidad tecnoeconómica del proceso; Ansanelli et al. (2021) documentan la recuperación de silicio por lixiviación ácida controlada; y Lim et al. (2022), junto con Mao et al. (2024), exploran rutas alternativas para metales preciosos y fracciones poliméricas del laminado. Los rangos coinciden entre estos trabajos: entre 80 % y 95 % de recuperación en masa cuando la ejecución es adecuada, con la plata aportando cerca del 47 % del valor económico total del módulo pese a representar

apenas el 0,05 % de su masa (IEA-PVPS, 2021). Ahora bien, trasladar estos resultados al caso colombiano tiene sus límites: la evidencia disponible proviene de países como China, Alemania, Japón y Estados Unidos, con infraestructura de reciclaje industrial consolidada, marcos regulatorios específicos para residuos fotovoltaicos y volúmenes de procesamiento que un mercado en etapa inicial difícilmente puede replicar (Das & Sarmah, 2025; Mahmoudi et al., 2021). Ese desfase entre las condiciones donde se generó el conocimiento y las condiciones donde queremos aplicarlo es lo que termina condicionando el diseño de un instrumento como el que se propone en este trabajo.

2.2.1 Retiro, verificación técnica y logística inversa

El retiro de un módulo fotovoltaico instalado no puede abordarse de forma uniforme; el procedimiento varía según el estado del equipo, ya sea por fallas eléctricas, daños físicos o simplemente por haber alcanzado el final de su vida útil. Antes de cualquier intervención, es fundamental verificar el estado eléctrico del sistema: desconectar el inversor, comprobar la ausencia de voltaje residual y utilizar equipos de protección personal adecuados. Estas precauciones no son menores, ya que los módulos pueden seguir generando tensiones peligrosas incluso bajo condiciones de baja radiación, lo que la diferencia de otros residuos electrónicos que se vuelven inertes al desconectarse (IEA-PVPS, 2021).

El proceso de desmantelamiento se realiza de manera secuencial. Primero se retira el cableado en corriente continua, luego las cajas de conexión del string y las estructuras de soporte, y finalmente los módulos. Durante esta etapa, cada panel debe manipularse con cuidado, como un elemento frágil: aunque el vidrio templado resiste impactos, es particularmente vulnerable a la flexión. Por ello, se recomienda su almacenamiento en posición vertical, con separadores que reduzcan el riesgo de fractura durante el transporte (Mahmoudi et al., 2021). Cuando un módulo se rompe en campo, no solo se

pierde parte de su valor de recuperación, sino que también aumenta el riesgo de liberación de sustancias como el plomo si las soldaduras quedan expuestas.

A esto se suma la logística inversa, es decir, el traslado de los módulos desde los sitios de instalación hasta los centros de tratamiento. En países con geografía dispersa o con proyectos ubicados en zonas rurales, esta etapa suele convertirse en uno de los principales cuellos de botella (Kabir et al., 2023). Los costos asociados al transporte pueden representar entre el 30% y el 50% del costo total del reciclaje cuando los volúmenes manejados son bajos. Esto explica por qué la viabilidad del sistema depende, en gran medida, de la capacidad para organizar esquemas de recolección que permitan alcanzar economías de escala mínimas.

2.2.2 Pretratamiento: remoción de componentes periféricos

Antes de abordar la separación de los materiales del laminado, los módulos deben pasar por una etapa previa de acondicionamiento en la que se retiran los componentes periféricos. Este pretratamiento suele incluir tres operaciones principales: la remoción del marco de aluminio, la desconexión y extracción de la caja de conexiones incluidos los diodos bypass y, finalmente, el retiro del cableado junto con los conectores tipo MC4.

El marco de aluminio, por ejemplo, se retira generalmente con herramientas de palanca o mediante prensas neumáticas que permiten separar las esquinas sin comprometer la integridad del laminado. Dado que suele estar fabricado en aleaciones como la 6063 T5, el material recuperado en esta etapa presenta un alto grado de pureza, lo que facilita su reincorporación directa en procesos de fundición secundaria con un pretratamiento mínimo (Goh et al., 2024). En el caso de la caja de conexiones, su extracción puede realizarse de forma manual o con herramientas de corte; al contener polímeros, cobre y componentes electrónicos, sus materiales requieren una clasificación diferenciada debido a sus distintas rutas de reciclaje.

La forma en que se ejecute este pretratamiento no es un detalle menor. Si el marco no se retira completamente, puede contaminar el flujo de vidrio en etapas posteriores; de igual manera, cables adheridos al laminado dificultan los tratamientos térmicos o químicos, y una separación inadecuada de la caja de conexiones puede introducir compuestos no deseados en los procesos de tratamiento (Deng et al., 2019; Lim et al., 2022). En conjunto, estas condiciones terminan afectando tanto la eficiencia del proceso como la calidad de los materiales recuperados.

2.2.3 Desensamblaje del laminado: separación de vidrio y capas internas

Una vez retirados los componentes periféricos, el desafío pasa a ser la separación del vidrio templado respecto al encapsulante EVA y las celdas de silicio. Esta etapa suele considerarse la más crítica del proceso porque de ella depende que las fracciones se recuperen sin contaminación cruzada.

Tres enfoques han sido documentados con distinta implicación operativa, el mecánico con cortadoras, fresas o cizallas seguidas de trituración y clasificación granulométrica (Lim et al., 2022), accesible tecnológicamente pero con vidrio de menor pureza; el térmico donde se usan hornos entre 400 °C y 600 °C que descomponen el EVA (Diez-Suarez et al., 2024; Das & Sarmah, 2025), esto son resultados con materiales de mayor calidad pero con gases a controlar; y el químico con solventes como dimetilformamida o acetona (Mao et al., 2024; Ansanelli et al., 2021), con la mejor pureza de silicio pero la mayor complejidad operativa. Los sistemas industriales más avanzados los combinan en secuencias híbridas (Mahmoudi et al., 2021). Para Colombia, el enfoque mecánico es el más viable en el corto plazo por su menor requerimiento de infraestructura especializada, tal como ocurre incluso en economías avanzadas como Alemania y Estados Unidos, decisión que se traduce directamente en la Fase 3 de la guía técnica desarrollada en este trabajo.

2.2.4 Valorización de materiales recuperados

Cada una de las partes recuperadas tiene un valor de mercado distinto y sigue un camino diferente, lo cual determina la viabilidad del proceso en su totalidad y las decisiones técnicas. El vidrio, que compone entre el 68 % y el 76 % de la masa del módulo, puede ser reutilizado para producir paneles nuevos cuando llega a los niveles de pureza necesarios. En caso contrario, se puede usar en aislamiento, abrasivos o materiales de construcción (Bulińska et al., 2025). El aluminio del marco supera el 95 % de recuperación y cuenta con cadenas de reciclaje ya establecidas en Colombia. La plata, aunque está en proporciones mínimas, aporta un peso significativo al valor total recuperable: entre 0,9 y 1,5 kg por tonelada de módulos, lo que justifica procesos específicos para su recuperación (Gahlot et al., 2022). El silicio se reintroduce en la cadena productiva cuando la pureza lo permite, o va a aplicaciones industriales de menor exigencia como aleaciones metálicas.

La viabilidad económica del proceso depende del volumen procesado. Mazzi et al. (2024) sitúan el umbral rentable cerca de las 5.000 toneladas anuales, cifra que los proyectos actualmente adjudicados en Colombia sugieren alcanzable hacia las décadas de 2040 o 2050, cuando los primeros parques de gran escala lleguen al final de su vida útil (UPME, 2025). Esta proyección tiene implicación directa sobre el enfoque de la guía técnica desarrollada en este trabajo, no se trata de responder a una crisis actual de residuos que aún no existe en términos de volumen sino de dejar preparado el marco técnico y normativo para el momento en que ese volumen llegue.

2.3. Economía circular y sostenibilidad en el sector fotovoltaico

La economía circular reemplaza los modelos lineales de producción por enfoques centrados en la reutilización, la recuperación y el reciclaje (IEA, 2022; IRENA, 2023). En el sector fotovoltaico su aplicación es particularmente relevante por la composición de los módulos y su larga vida útil dado que recuperar vidrio, aluminio y silicio reduce residuos y

disminuye la presión sobre la extracción de materias primas. Estos principios no se materializan solos, requieren instrumentos técnicos y regulatorios que los orienten, sobre todo en contextos donde el volumen de residuos aún es bajo pero se proyecta creciente (Ganesan & Valderrama, 2022; Iseri et al., 2025).

La magnitud del desafío se aprecia en las proyecciones globales de aproximadamente 1 millón de toneladas en 2020 se pasaría a cerca de 8 millones en 2030 y entre 60 y 78 millones hacia 2050 (IEA, 2022; IRENA, 2023), como ilustra la Figura 2. Actuar de manera temprana no es una medida preventiva sino una condición necesaria para evitar que el problema desborde la capacidad de respuesta.

Goh et al. (2024) documentan el sistema PV Cycle en Europa como caso maduro, combina procesos mecánicos, térmicos y químicos y recupera cerca del 85 % del vidrio y el 95 % del aluminio. Para Colombia, la lección no está en replicar su arquitectura sino en tres condiciones habilitantes transferibles: financiamiento por productor, articulación con el sector privado del reciclaje y trazabilidad obligatoria. Esas condiciones son las que la guía técnica desarrollada en este trabajo asume como supuestos para el escenario colombiano de mediano plazo.

Figura 2. Proyección global de residuos de módulos fotovoltaicos, 2020–2050

(millones de toneladas)



Nota. Elaboración propia con base en estimaciones de IRENA (2023) e IEA (2022).

2.4. Marco normativo y regulación de RAEE

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) son uno de los flujos de desechos de más rápido crecimiento a nivel mundial, impulsados por el consumo de dispositivos electrónicos y por las tecnologías asociadas a la transición energética. Esta tendencia ha presionado los marcos regulatorios existentes y ha reforzado la necesidad de estrategias de gestión sostenible (IEA-PVPS, 2021; IRENA, 2023).

Los módulos fotovoltaicos presenta matices particulares dentro este flujo. El crecimiento de la capacidad instalada implica que, en las próximas décadas, un número creciente de paneles alcanzará el final de su vida útil. Por su composición y sus condiciones de su manejo como el desmontaje, transporte y tratamiento de residuos electrónicos (Mao et al., 2024; Deng et al., 2019; Bulińska et al., 2025).

En Colombia, el marco normativo actual contempla lineamientos generales para RAEE, con principios como la responsabilidad extendida del productor y los sistemas de

recolección selectiva. Sin embargo, los módulos fotovoltaicos aún no cuentan con una regulación específica que reconozca sus particularidades. En la práctica, se gestionan dentro de categorías amplias que no siempre responden a las exigencias técnicas de su desmontaje, transporte y tratamiento. Para anticipar el crecimiento de este tipo de residuos y facilitar la adopción de esquemas de economía circular enfocados en la recuperación de materiales estratégicos presentes en los módulos solares (IEA, 2022; IRENA, 2023).

La comparación entre marcos regulatorios de la Unión Europea, Estados Unidos, China y Colombia se presenta en el Anexo A. La lectura transversal de esos casos muestra un patrón claro en lo que los países con marcos regulatorios específicos para residuos fotovoltaicos son también los que han desarrollado infraestructura de reciclaje industrial, mientras que aquellos donde los módulos siguen tratándose bajo categorías generales de RAEE, incluida Colombia dependen del sector informal o de esquemas posconsumo genéricos. Este patrón es el que la brecha específica documentada en la sección 2.7 aborda con mayor detalle para el caso colombiano.

2.5. Modelos internacionales de gestión de residuos fotovoltaicos

La Unión Europea contempla explícitamente los paneles solares dentro de la Directiva RAEE, con obligaciones concretas de recolección y reciclaje (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2012), e IRENA (2023) insiste en anticipar el crecimiento de estos residuos mediante políticas preventivas y economía circular. Trasladar estos modelos al contexto colombiano no es automático ni fácil puesto que las diferencias en infraestructura tecnológica, capacidad institucional, cadenas especializadas de reciclaje, madurez del mercado fotovoltaico, cobertura territorial y ausencia de regulación específica exigen cambios grandes y adaptaciones a las condiciones locales. Los avances de países como China, Japón, Estados Unidos, Brasil, Alemania y Singapur nos puede

dar enfoques y mecanismos regulatorios útiles como referencia para contextos emergentes como lo es el colombiano (Goh et al., 2024), y los estudios comparativos disponibles evidencian una brecha clara es decir los países con marcos consolidados pueden alcanzar tasas de recolección superiores al 80 %, mientras que aquellos donde la regulación está en desarrollo enfrentan gestión informal o pérdida de materiales recuperables (Bošnjaković et al., 2023; Wang et al., 2025).

El detalle comparativo de estos seis países en cuanto a métodos de reciclaje, capacidades de infraestructura, marco regulatorio, innovación, ventajas y limitaciones se presenta en el Anexo B, junto con el análisis por país. De ese contraste emergen tres lecciones que orientan directamente el diseño de la guía técnica desarrollada en este trabajo. Primero, el método mecánico es el más extendido incluso en economías avanzadas como Alemania y Estados Unidos, lo que respalda su adopción como ruta principal en Colombia frente a alternativas térmicas o químicas que requieren mayor infraestructura y regulación ambiental específica. Segundo, el caso de Singapur con más del 90 % de RAEE exportados para tratamiento y un mercado nacional reducido, ofrece un paralelo útil con los escenarios de Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia, donde la logística multimodal y el almacenamiento temporal obligatorio son condiciones estructurales, no excepcionales. Tercero, la escala del problema es relevante pero manejable es decir que mientras la IEA proyecta 78 millones de toneladas globales para 2050, la UPME estima 4,4 GW adjudicados en Colombia para 2027-2028, equivalentes a aproximadamente 193 000 módulos con un primer pico de residuos esperado entre 2050 y 2055.

2.6. Validación de instrumentos técnicos mediante juicio de expertos

La validación de contenido mediante juicio de expertos es una estrategia ampliamente utilizada en estudios aplicados orientados al diseño de instrumentos (Aiken, 1985). En

este contexto, el coeficiente V de Aiken permite estimar el nivel de acuerdo entre evaluadores sobre aspectos como la claridad y la pertinencia de los ítems a partir de escalas ordinales. Su aplicación resulta especialmente adecuada en este caso, ya que lo que se busca evaluar no es un fenómeno directamente observable, sino la solidez conceptual y técnica de la herramienta propuesta.

2.6.1. Formulación del coeficiente

El coeficiente V se calcula mediante la expresión propuesta por Aiken (1985):

$$V = \frac{\sum s}{N(c - 1)}$$

donde $\sum s$ es la suma de las puntuaciones asignadas por todos los evaluadores al ítem en cuestión, N es el número total de valoraciones consideradas y c es el número de categorías de la escala de respuesta. Dado que el instrumento empleó una escala dicotómica (0 = no cumple / 1 = sí cumple), el valor de c es 2 y, en consecuencia, el denominador se reduce a $N(1) = N$. Esto significa que el coeficiente equivale directamente a la proporción de acuerdos positivos sobre el total de valoraciones posibles, lo que facilita tanto su cálculo como su interpretación.

Un aspecto metodológico relevante de este estudio es que cada evaluador calificó cada ítem considerando tres criterios independientes: claridad, pertinencia y aplicabilidad técnica. Esto permite tratar cada criterio como una valoración individual, por lo que el N efectivo por ítem no corresponde únicamente al número de jueces (7), sino al total de valoraciones realizadas ($7 \times 3 = 21$). Este enfoque es consistente con la propuesta original de Aiken (1985), en la que el coeficiente se interpreta como una proporción de acuerdos respecto al total de valoraciones posibles. Además, este tratamiento permite captar con mayor sensibilidad posibles diferencias entre las distintas dimensiones evaluadas dentro de un mismo ítem.

2.6.2. Interpretación de los resultados

El coeficiente V toma valores en un intervalo entre 0 y 1. Un valor de $V = 1$ indica acuerdo unánime entre todos los evaluadores respecto al criterio analizado, mientras que $V = 0$ refleja ausencia total de consenso. Los valores intermedios representan distintos niveles de acuerdo proporcional entre los expertos. En la literatura se reportan diversos umbrales de aceptación dependiendo del tipo de instrumento y del número de jueces participantes. Aiken (1985), por ejemplo, propone $V \geq 0,70$ como criterio general, mientras que en estudios con aplicaciones técnicas o normativas suelen adoptarse criterios más estrictos, con valores mínimos de $V \geq 0,80$ o incluso $V \geq 0,90$ (Merino-Soto & Livia-Segovia, 2009).

En este estudio se adoptó un umbral de $V > 0,90$ con el propósito de asegurar un nivel de consenso alto entre los expertos participantes. Esta decisión responde al tipo de instrumento desarrollado y a su contexto de aplicación, donde las implicaciones ambientales y la importancia estratégica del sector fotovoltaico en Colombia exigen un proceso de validación particularmente riguroso. En este caso, un ítem ambiguo o poco aplicable dentro de una guía para la gestión de residuos peligrosos no implica únicamente un problema de medición, sino que podría traducirse en procedimientos inadecuados con posibles consecuencias legales, operativas y sanitarias.

2.6.3. Ejemplo ilustrativo del cálculo

La Tabla 4 presenta el cálculo del coeficiente V para un ítem hipotético evaluado por siete jueces en tres criterios, con el propósito de ilustrar el procedimiento.

Tabla 2

Ejemplo de cálculo del coeficiente V de Aiken para un ítem evaluado en tres criterios por siete jueces

Juez	Claridad (0/1)	Pertinencia (0/1)	Aplicabilidad (0/1)
E1	1	1	1
E2	1	1	0
E3	1	1	1
E4	1	1	1
E5	1	1	1
E6	1	1	1
E7	1	1	0
Σ por criterio	7	7	5
Σ total			19

Nota. Escala dicotómica: 0 = no cumple / 1 = sí cumple. N = 21 (7 jueces $\times$ 3 criterios).

Aplicando la fórmula:

El valor obtenido ($V = 0,905$) supera el umbral de 0,90 establecido para el estudio, por lo que el ítem se consideraría válido. No obstante, la inspección desagregada por criterio revela que el consenso sobre claridad y pertinencia es perfecto ($V = 1,000$ en ambos), mientras que la aplicabilidad presenta acuerdo parcial ($V = 5/7 \approx 0,714$). Esta información es cualitativamente relevante, ya que aunque el ítem pasa el filtro global, las observaciones de los evaluadores E2 y E6 sobre su aplicabilidad práctica deben ser analizadas y, de ser pertinentes, traducirse en ajustes específicos al contenido del instrumento.

Este análisis desagregado por criterio constituye una de las principales ventajas del diseño metodológico empleado, ya que permite identificar con mayor precisión el tipo de desacuerdo presente en cada ítem. Por un lado, es posible distinguir aquellos casos en los que el desacuerdo es transversal, lo que sugiere la necesidad de reformular el contenido de manera más profunda. Por otro, también permite detectar ítems que presentan altos niveles de consenso en claridad y pertinencia, pero resultados más bajos

en aplicabilidad técnica, situación que normalmente refleja una diferencia entre la validez conceptual del procedimiento y las condiciones reales de implementación dentro del contexto evaluado.

2.7. Brecha específica en el contexto colombiano

Aunque Colombia ha registrado un crecimiento importante en su capacidad solar instalada en los últimos años (UPME, 2025; Piedrahita et al., 2025), todavía no cuenta con lineamientos técnicos específicos que permitan anticipar la gestión de los residuos fotovoltaicos a futuro. Si se considera la vida útil de los módulos, es razonable prever que en las próximas décadas aumentará de forma progresiva el número de equipos fuera de servicio y, con ello, la generación de este tipo de residuos (IRENA, 2023).

La revisión del marco normativo actual resumida en la Tabla 3 muestra que, si bien existen disposiciones generales aplicables, persisten vacíos importantes en relación con las particularidades de estos sistemas. Esta situación no es exclusiva de Colombia. A nivel regional, América Latina aún presenta un desarrollo limitado tanto en infraestructura de reciclaje fotovoltaico como en regulación específica, lo que sitúa al país dentro de un contexto más amplio de rezago. En ese escenario, avanzar en la construcción de instrumentos técnicos propios se vuelve no solo pertinente, sino necesario (Piedrahita et al., 2025).

Tabla 3

Marco regulatorio colombiano actual para la disposición de paneles solares.

Instrumento Normativo	Alcance Principal	Aplicación a Paneles Solares	Vacío Regulatorio / Limitación Técnica
Ley 1672 de 2013	Establece la política pública para la gestión integral de los RAEE en Colombia.	Los incluye bajo la categoría general de "Aparatos Eléctricos y Electrónicos".	No reconoce las dimensiones y peso volumétrico de los módulos fotovoltaicos frente a un residuo electrónico común (celular/PC).

Instrumento Normativo	Alcance Principal	Aplicación a Paneles Solares	Vacío Regulatorio / Limitación Técnica
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único del Sector Ambiente. Regula la gestión de residuos peligrosos (RESPEL).	Aplicable si los paneles contienen materiales como cadmio o plomo tras su vida útil.	Se enfoca en la peligrosidad química, pero ignora la logística de desmontaje a gran escala en parques solares.
Resolución 0851 de 2022	Clasifica los AEE y define metas de recolección para productores.	Los paneles se clasifican como AEE de consumo masivo o industrial, según su uso.	Las metas de recolección son difíciles de cumplir para paneles, cuya vida útil es de 25–30 años, a diferencia de los RAEE de rotación rápida.
Ley 1715 de 2014 & Ley 2099 de 2021	Promueven la transición energética y el uso de energías renovables.	Fomentan la instalación e incentivos tributarios para sistemas solares.	Se centran en la fase operativa y de fomento, dejando la "fase de fin de vida" (reciclaje) en un segundo plano normativo.
RETIE 2024 (Actualizado)	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.	Regula la seguridad técnica en la instalación y conexión de paneles.	Es un estándar de seguridad eléctrica, no un lineamiento de disposición final o economía circular.

RAEE y regulación aplicable a paneles solares: La literatura ha señalado que los módulos fotovoltaicos presentan características propias (ciclo de vida de 25–30 años, composición material con vidrio, silicio, metales conductores y encapsulante EVA), lo cual justifica la construcción de lineamientos especializados (IEA, 2022; Ganesan & Valderrama, 2022).

Nota. Elaboración propia a partir del marco regulatorio de aparatos eléctricos y electrónicos de Colombia (Ley 1672 de 2013; Ley 1715 de 2014; Ley 2099 de 2021; Resolución 0851 de 2022).

La falta de instrumentos técnicos específicos para la gestión de residuos fotovoltaicos pone en evidencia una desconexión entre el crecimiento del sector y la planificación de su ciclo de vida completo. Los módulos de silicio cristalino no se comportan como un residuo electrónico convencional: por sus características físicas y químicas, requieren cuidados particulares en cada etapa del proceso. Desde el retiro donde es clave

manipular correctamente el vidrio y el marco de aluminio hasta el transporte, que depende del estado del módulo y de las condiciones logísticas, cada paso influye en la posibilidad de recuperar materiales en buenas condiciones.

A esto se suman otras etapas que tampoco son menores: el pretratamiento para retirar cables, conectores y la caja de conexiones; el desensamble para separar aluminio y vidrio; y el tratamiento del laminado, necesario para recuperar materiales como silicio, cobre o plata mediante distintos procesos físicos. En conjunto, estas operaciones configuran una cadena técnica que no está contemplada de forma explícita en los marcos generales de RAEE vigentes en Colombia. De ahí que resulte necesario avanzar hacia guías más específicas que respondan a este tipo de residuos (Deng et al., 2019; Das & Sarmah, 2025).

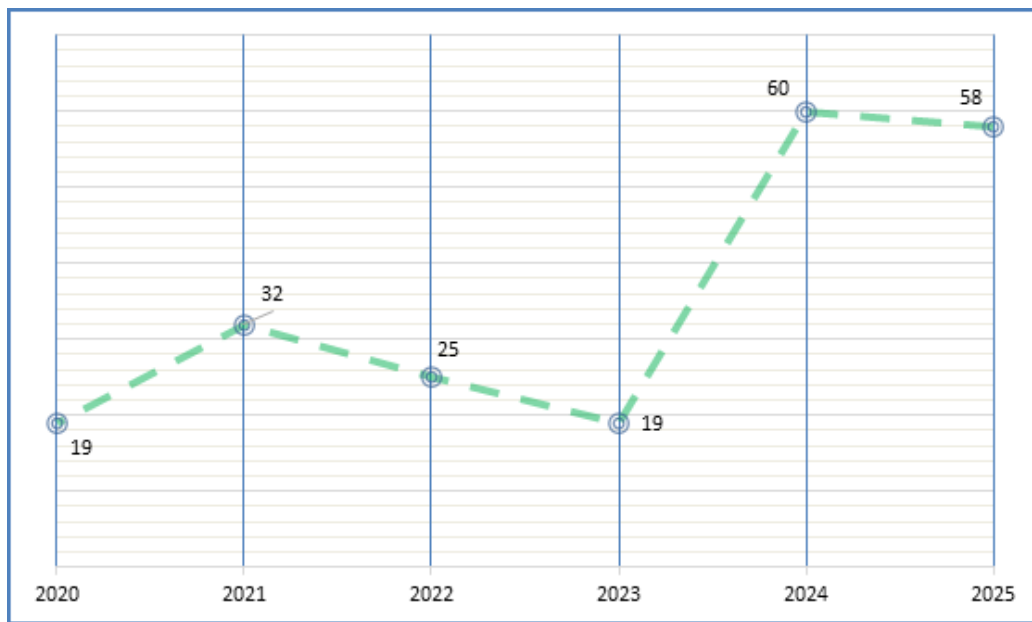
Por otro lado, más allá del reto ambiental, también existe una oportunidad económica clara. La recuperación de materiales permite reincorporar aluminio en procesos de fundición, aprovechar el vidrio como insumo secundario en construcción o aislamiento, y recuperar metales conductores como cobre y plata a través de rutas industriales ya conocidas. En el caso del silicio, su reutilización depende del nivel de pureza alcanzado, pero incluso en escenarios menos exigentes puede emplearse como material de carga en distintos procesos industriales.

En un contexto más amplio, América Latina aún presenta limitaciones tanto en infraestructura de reciclaje fotovoltaico como en regulación específica, lo que sitúa a Colombia dentro de un escenario regional de rezago. Esto refuerza la necesidad de desarrollar instrumentos técnicos propios, adaptados a las condiciones locales y respaldados por procesos de validación rigurosos (Piedrahita et al., 2025; Ganesan & Valderrama, 2022).

2.8. Síntesis crítica de la literatura y posicionamiento del estudio

La investigación sobre la gestión de residuos fotovoltaicos ha crecido de forma notable en los últimos años, especialmente en el periodo 2020–2025. Un análisis bibliométrico reciente, basado en 178 documentos indexados en Scopus® bajo protocolo PRISMA®, muestra que el número de publicaciones prácticamente se duplicó entre 2023 y 2024, con China, Italia y Estados Unidos liderando la producción científica en este campo (León Arcia et al., 2026). Este aumento no es casual: refleja una preocupación cada vez mayor por las implicaciones ambientales de la transición energética, que durante mucho tiempo se evaluó casi exclusivamente en términos de reducción de emisiones, dejando en segundo plano el ciclo de vida completo de los equipos.

Figura 3. *Número de publicaciones sobre gestión de residuos fotovoltaicos detectadas en Scopus (2020–2025)*



Nota. Elaboración propia con base en León Arcia et al. (2026). Los datos corresponden al protocolo de búsqueda PRISMA aplicado sobre la base Scopus.

En términos generales, la literatura reciente tiende a coincidir en algunos puntos clave, aunque con matices. Por un lado, la viabilidad técnica del reciclaje fotovoltaico ya no parece estar en discusión: distintos estudios muestran que es posible recuperar entre el 80% y el 96% de la masa de los módulos mediante combinaciones de procesos mecánicos, térmicos y químicos (Lim et al., 2022; Mao et al., 2024; Das & Sarmah, 2025). Por otro lado, la dimensión económica del reciclaje fotovoltaico continúa siendo uno de los aspectos más inciertos dentro de la gestión de estos residuos. La rentabilidad de estos procesos depende, en buena medida, del volumen de módulos disponibles para tratar. En la práctica, las tecnologías de reciclaje requieren procesar grandes cantidades de paneles para distribuir costos asociados al transporte, desmontaje, clasificación y recuperación de materiales. Esto se vuelve aún más relevante en los métodos avanzados de separación térmica o química, cuyos costos operativos suelen ser elevados.

Bajo este panorama, el tamaño del mercado fotovoltaico termina siendo un factor clave para determinar la viabilidad económica del reciclaje. Países como China, Alemania y Estados Unidos, que cuentan con capacidades instaladas mucho más amplias, proyectan una generación masiva de residuos fotovoltaicos en las próximas décadas. Ese crecimiento favorece la consolidación de economías de escala y hace más justificables las inversiones en infraestructura especializada para reciclaje. En contraste, en países donde la expansión solar todavía es relativamente reciente, los volúmenes actuales de residuos siguen siendo limitados y dificultan la sostenibilidad financiera de cadenas de recuperación altamente especializadas.

En América Latina, aunque el mercado de energías renovables ha mostrado un crecimiento acelerado en los últimos años, la infraestructura vinculada al reciclaje aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. Según EMIS (2025), Colombia alcanzó cerca de 15,4 GW de capacidad renovable instalada al cierre de 2024, de los cuales

aproximadamente 1,4 GW correspondían a energía solar fotovoltaica. Aunque estas cifras reflejan un avance importante para el país, todavía existe una diferencia considerable frente a los principales mercados internacionales. Como consecuencia, el flujo actual de residuos fotovoltaicos aún no parece suficiente para sostener plantas de reciclaje altamente especializadas bajo esquemas completamente autosostenibles.

A esto se suma que el valor económico recuperado depende en gran medida de materiales como aluminio, vidrio, silicio y, especialmente, plata, uno de los componentes de mayor valor dentro de los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, la industria ha reducido progresivamente la cantidad de plata utilizada por panel como parte de las mejoras tecnológicas y las estrategias de reducción de costos. Aunque esto incrementa la eficiencia productiva, también podría disminuir parte del atractivo económico del reciclaje en el largo plazo.

Por ello, la sostenibilidad financiera de esta industria no depende únicamente del valor de los materiales recuperados. También influyen factores como el crecimiento continuo del mercado fotovoltaico, la implementación de políticas de responsabilidad extendida del productor y la capacidad de garantizar flujos constantes de residuos hacia las cadenas de aprovechamiento (Mazzi et al., 2024; Ganesan & Valderrama, 2022).

A esto se suma un tercer elemento que aumenta la complejidad del problema: las limitaciones del marco regulatorio. Incluso en países con alta capacidad tecnológica y con infraestructura de reciclaje más desarrollada, como Alemania, Japón o Estados Unidos, la regulación específica para residuos de módulos fotovoltaicos sigue siendo relativamente reciente y, en muchos casos, todavía presenta vacíos importantes. Además, varias de estas normativas continúan abordando los paneles solares como si fueran residuos electrónicos convencionales, sin considerar completamente sus

características físicas y químicas particulares frente a otros RAEE (Bošnjaković et al., 2023; Kabir et al., 2023).

Esta situación tiene implicaciones importantes para la gestión posconsumo. Cuando no existen regulaciones claras sobre responsabilidades, metas de recuperación o estándares técnicos de tratamiento, gran parte de la gestión termina dependiendo de iniciativas voluntarias impulsadas por la industria. Aunque estas iniciativas pueden generar avances parciales, su alcance y continuidad suelen ser limitados, especialmente en contextos donde todavía no existen incentivos económicos o mecanismos de control suficientemente consolidados.

Desde el punto de vista metodológico, la literatura sobre reciclaje fotovoltaico presenta un panorama bastante diverso. Conviven estudios experimentales de laboratorio, análisis de ciclo de vida, modelaciones tecnoeconómicas y evaluaciones normativas, cada uno desarrollado desde enfoques, métricas e indicadores distintos. Esa diversidad ha permitido ampliar la comprensión del problema desde múltiples dimensiones, aunque también ha dificultado la comparación directa entre resultados.

Por ejemplo, Ansanelli et al. (2021) analizan en condiciones controladas la eficiencia de recuperación de silicio mediante procesos de separación física y química, reportando tasas de recuperación de hasta un 85 % en masa del laminado tratado. En contraste, Deng et al. (2019) abordan el problema desde una perspectiva tecnoeconómica y estiman el punto de equilibrio financiero del reciclaje de módulos c-Si considerando variables como el costo del proceso y el valor de los materiales recuperados. Otros estudios se enfocan más en la proyección futura del problema. Mahmoudi et al. (2021), por ejemplo, desarrollan escenarios cuantitativos para Australia con el fin de estimar la generación futura de residuos y anticipar la presión que estos podrían ejercer sobre la infraestructura de gestión disponible.

Das & Sarmah (2025) y Li et al. (2024) centran su análisis en el componente regulatorio y evidencian diferencias importantes entre las políticas de responsabilidad extendida del productor y la capacidad real de los sistemas de gestión posconsumo para responder al crecimiento esperado de residuos fotovoltaicos. Esta brecha se vuelve evidente al comparar datos concretos: en Alemania, donde la Directiva RAEE 2012/19/UE exige una tasa de recuperación mínima del 85 % en masa y el sistema de responsabilidad extendida del productor opera desde 2015, la tasa de recolección efectiva de módulos FV supera ese umbral (Bošnjaković et al., 2023). En contraste, en países sin regulación específica como Colombia, donde la Ley 1672 de 2013 clasifica los módulos genéricamente como RAEE, o con marcos fragmentados como Estados Unidos, donde solo el estado de Washington cuenta con legislación propia desde 2023, no existen metas de recuperación definidas ni mecanismos de financiamiento asociados (Das & Sarmah, 2025). A escala global, menos del 10 % de los módulos FV que han llegado al final de su vida útil se gestionan a través de canales formales de reciclaje, lo que ilustra la magnitud de la brecha entre el diseño normativo y la capacidad operativa real (IEA-PVPS, 2021)

Aunque esta diversidad metodológica enriquece el campo de estudio, también introduce varias limitaciones. Las tasas de recuperación reportadas cambian según el método utilizado, la escala experimental y las características del módulo tratado; los horizontes temporales de las proyecciones no siempre coinciden; y muchos marcos regulatorios responden a contextos institucionales difíciles de extrapolar a otros países (Mahmoudi et al., 2021). Como resultado, todavía no existen estándares de evaluación completamente consolidados, lo que refuerza la necesidad de desarrollar instrumentos técnicos ajustados a las condiciones de cada contexto nacional, como ocurre con la propuesta planteada en este trabajo para Colombia.

Bošnjaković et al. (2023) y Gahlot et al. (2022) señalan que los estudios sobre gestión de residuos fotovoltaicos tienden a concentrarse en los procesos de reciclaje propiamente dichos, otorgando menor atención a las etapas operativas previas. Actividades como el retiro de paneles en campo, la manipulación, el embalaje y el transporte influyen directamente tanto en la calidad de los materiales recuperados como en los riesgos asociados al proceso (IEA-PVPS, 2021; Ansanelli et al., 2021). Esta situación adquiere mayor relevancia en contextos como el colombiano, donde la infraestructura de tratamiento todavía es limitada y gran parte del riesgo operativo recae sobre quienes ejecutan las primeras etapas de manejo y movilización de los módulos.

En América Latina, la producción científica sobre gestión de residuos fotovoltaicos sigue siendo escasa y reciente. La ausencia de plantas especializadas, la falta de regulación diferenciada y las debilidades en los esquemas de responsabilidad extendida del productor configuran las principales brechas de la región frente a mercados más maduros (Ganesan & Valderrama, 2022; Piedrahita et al., 2025). Un ejemplo concreto ilustra esta situación: Colombia alcanzó aproximadamente 1,4 GW de capacidad solar fotovoltaica instalada al cierre de 2024, lo que equivale a cerca de 2,8 millones de módulos en operación, sin contar con ninguna planta de reciclaje especializada en módulos fotovoltaicos ni con un marco normativo que diferenciara estos residuos de otros RAEE convencionales (EMIS, 2025; Ganesan & Valderrama, 2022). Esta disparidad entre el volumen instalado y la capacidad de gestión al final de la vida útil refuerza el carácter exploratorio y pionero de este trabajo en el contexto colombiano.

Bajo este escenario, el diseño y validación de una guía técnica orientadora responde a una necesidad concreta. Por un lado, busca traducir parte del conocimiento técnico disponible en herramientas operativas aplicables a condiciones reales. Por otro, pretende

anticipar un problema que, aunque todavía incipiente, probablemente crecerá de manera sostenida durante las próximas décadas (Iseri et al., 2025; Cheema et al., 2024).

3. Metodología

El presente capítulo describe el proceso metodológico mediante el cual se dio respuesta a los objetivos del estudio. Como se trata de diseñar y validar un instrumento técnico, y no de contrastar variables entre grupos ni de medir efectos experimentales, el trabajo se ubica en un diseño no experimental, descriptivo, con un componente cualitativo y otro cuantitativo. El primero cubre la revisión y síntesis documental que dio forma a las seis fases de la guía, y el segundo el proceso de validación con el coeficiente V de Aiken (Aiken, 1985). En ese marco no cabe hablar de hipótesis nula ni alternativa, ya que lo que se pone a prueba no es una relación entre variables, sino la calidad del propio instrumento en tres frentes concretos, es decir claridad, pertinencia y aplicabilidad.

Para hacer esa verificación se recurrió al juicio de expertos porque la guía terminaría aplicándose sobre operaciones técnicas y responsabilidades normativas reales, y en ese escenario tiene más sentido preguntarle a quienes conocen el terreno que apoyarse en pruebas estadísticas que no resolverían el problema de fondo. El coeficiente V de Aiken entró como métrica cuantitativa porque es el estándar más extendido cuando se evalúa contenido con escalas dicotómicas, y se optó por un umbral de V mayor a 0,90, por encima del habitual V mayor o igual a 0,70, dado el riesgo asociado a residuos que en ciertos escenarios pueden clasificarse como peligrosos. . Los subcapítulos que siguen desarrollan cada uno de estos componentes en detalle.

3.1 Diseño de la guía técnica orientadora

La guía se desarrolló a partir de una revisión sistemática de literatura que incluyó fuentes académicas indexadas en Scopus y Web of Science, principalmente publicadas entre 2020 y 2025. Se dio prioridad a artículos de revistas ubicadas en los cuartiles Q1 y Q2, aunque también se mantuvieron referencias de mayor antigüedad cuando su valor técnico lo hacía necesario: los estándares IEC 62446-1:2016+A1:2018 que establece los

requisitos de documentación, pruebas de puesta en servicio e inspección para sistemas FV conectados a la red y el informe IEA-PVPS (2021) que sistematiza el estado del arte de las tecnologías de reciclaje a escala mundial, reporta tasas de recuperación por fracción material y proyecta los volúmenes globales de residuos para los próximos decenios. En paralelo, la normativa colombiana fue revisada directamente en el Diario Oficial, y las normas ISO se contrastaron con los registros disponibles en el catálogo oficial del organismo emisor.

El diseño de la guía descansa sobre tres decisiones metodológicas de fondo que conviene explicitar. La primera fue optar por una revisión sistemática de literatura como base del contenido técnico, y no por un desarrollo exploratorio o por la adaptación directa de un modelo internacional. Esta decisión respondió a la necesidad de garantizar trazabilidad bibliográfica de cada procedimiento incluido en la guía, algo que resulta crítico en un instrumento con implicaciones normativas. La segunda fue estructurar la guía en fases secuenciales y no en una matriz de decisiones o un árbol de procesos, porque el flujo posconsumo de un módulo fotovoltaico sigue una lógica temporal y espacial clara, desde el retiro hasta la disposición final, y esa cadena operativa es la que aparece de forma recurrente en la literatura revisada (Deng et al., 2019; Bošnjaković et al., 2023; Das & Sarmah, 2025). La tercera fue introducir la clasificación operativa A/B/C como eje transversal, decisión que se explica porque el estado físico del módulo condiciona directamente el nivel de riesgo, el tipo de manejo aplicable y el régimen normativo asociado (Decreto 4741 de 2005). Estas tres decisiones fijaron la arquitectura general del instrumento y son las que orientan los desarrollos que se detallan en los subcapítulos siguientes.

3.1.1. Composición y estructura general

La clasificación operativa de los módulos en tres categorías atraviesa toda la estructura de la guía y determina aspectos como el nivel de protección requerido, el tipo de embalaje, los tiempos máximos de almacenamiento y el tratamiento aplicable en cada etapa. Los módulos Clase A corresponden a equipos en buen estado estructural, sin fracturas de vidrio ni perforaciones del backsheet. La Clase B incluye módulos con daños parciales que no comprometen el confinamiento del laminado, como delaminación, deformación del marco o desprendimiento de la caja de conexiones. Finalmente, la Clase C agrupa los módulos con vidrio fracturado o backsheet perforado, condición que obliga a tratarlos como residuos peligrosos (RESPEL) conforme al Decreto 4741 de 2005, debido a la exposición de las celdas de silicio y las trazas de plomo presentes en las soldaduras.

3.1.2. Fundamento de la estructura en seis fases

La secuencia de seis fases se construyó a partir de la operación más recurrente identificada en la literatura revisada y posteriormente se ajustó al marco normativo colombiano aplicable a cada etapa. Aunque cada autor emplea terminologías distintas, Deng et al. (2019), Bošnjaković et al. (2023) y Das & Sarmah (2025) describen una misma cadena operativa: separación eléctrica, acondicionamiento para transporte, remoción de componentes externos, separación de fracciones estructurales, tratamiento del laminado y disposición final de los materiales recuperados. Las seis fases de la guía responden precisamente a esa secuencia, incorporando el nivel de detalle procedimental y normativo requerido para el contexto colombiano.

3.1.3. Descripción detallada de las fases

La Fase 1, correspondiente al retiro del módulo y la verificación técnica inicial, comprende las operaciones de desinstalación desde la estructura de soporte e incorpora una verificación eléctrica obligatoria previa a cualquier manipulación física. Esta comprobación se realiza mediante multímetro con rango mínimo de 0–1 000 V, de

acuerdo con la IEC 62446-1:2016+A1:2018 y la Resolución 40117 de 2024 (RETIE vigente). La medida resulta indispensable porque un módulo expuesto a radiación solar puede seguir generando tensiones de hasta 600 V DC incluso cuando el inversor se encuentra desconectado. La fase finaliza con la clasificación operativa del módulo mediante inspección visual del vidrio frontal, el backsheet, el marco de aluminio y la caja de conexiones.

La Fase 2 aborda el manejo logístico, incluyendo manipulación, embalaje y transporte. El tipo de embalaje cambia según la clasificación del módulo. Los Clase A requieren protección con cartón corrugado doble y lona sobre pallet; los Clase B incorporan además film estirable y transporte obligatorio en posición horizontal; mientras que los Clase C deben ser contenidos inicialmente en bolsas plásticas herméticas para evitar la dispersión de fragmentos de vidrio y polvo proveniente de las celdas.

Además, la guía diferencia cuatro escenarios logísticos: transporte terrestre optimizado, terrestre limitado, multimodal y exclusivamente fluvial o aéreo. Este último caso es especialmente relevante para comunidades ZNI sin acceso por carretera. En dichos contextos, el almacenamiento temporal deja de ser una medida opcional y pasa a ser obligatorio, con tiempos máximos diferenciados según la categoría del módulo.

La Fase 3 corresponde al pretratamiento y contempla la remoción de componentes eléctricos externos antes del desensamble. Aquí se retiran cables DC, conectores MC4 y la caja de conexiones. La desconexión de conectores MC4 requiere herramientas específicas para evitar daños en los contactos y reducir el riesgo de arco eléctrico residual. Una vez retirados, los materiales se segregan según su composición cobre, plásticos y componentes electrónicos debido a que cada fracción sigue rutas de valorización distintas. Además de reducir riesgos eléctricos, esta etapa facilita la

recuperación independiente de materiales con mayor valor económico (Gahlot et al., 2022).

La Fase 4 se centra en el desensamble del módulo, particularmente en la separación del marco de aluminio y el vidrio frontal respecto al laminado fotovoltaico. El desmontaje del marco se realiza retirando tornillos o, cuando existen adhesivos estructurales, mediante herramientas manuales que minimicen daños sobre el vidrio. Posteriormente, el vidrio frontal puede separarse aprovechando la pérdida de adherencia del encapsulante EVA tras calentamiento controlado o fragmentación perimetral.

El aluminio representa entre el 7 % y el 10 % del peso total del módulo y puede alcanzar tasas de recuperación cercanas al 95 % mediante fundición convencional (Bulińska et al., 2025), lo que explica su importancia dentro de la valorización económica del proceso. Debido a la abundancia de documentación técnica disponible para esta etapa, la Fase 4 sirvió además como referencia estructural para el desarrollo metodológico del resto de la guía.

La Fase 5 aborda el tratamiento del laminado fotovoltaico y la separación de sus diferentes componentes: cobre, silicio, EVA y backsheet polimérico. El procedimiento estándar incluye trituración de baja velocidad, separación magnética y separación densimétrica para recuperar las fracciones conductoras y aislar el silicio de los polímeros.

Sin embargo, considerando que muchos gestores no cuentan con infraestructura industrial, la guía también incorpora un procedimiento manual alternativo basado en martillo de goma, escoplo y tamiz de 5 mm, pensado para operaciones de pequeña escala. Los fragmentos de celdas que contienen trazas de plomo son clasificados como RESPEL y deben gestionarse mediante operadores autorizados por el MADS (Decreto 4741 de 2005; Ansanelli et al., 2021).

Finalmente, la Fase 6 corresponde a la gestión de las fracciones recuperadas y su valorización o disposición final. Esta etapa incluye el pesaje, etiquetado y derivación de materiales hacia sus respectivos canales de aprovechamiento: aluminio y cobre hacia recicladores de metales no ferrosos, vidrio hacia la industria vidriera y polímeros hacia procesos de coprocesamiento en plantas cementeras. El silicio con características RESPEL debe ser manejado exclusivamente por gestores autorizados.

La fase también incorpora el diligenciamiento del formulario integral de trazabilidad y, en el caso de generadores jurídicos, el reporte correspondiente al SIUR conforme a la Ley 1672 de 2013. Debido a la limitada disponibilidad de gestores especializados para módulos fotovoltaicos en gran parte del país, la guía plantea además rutas transitorias de gestión que permiten aprovechar ciertas fracciones mediante recicladores convencionales autorizados mientras se consolida una infraestructura especializada (Ganesan & Valderrama, 2022).

3.1.4. Mecanismo de consistencia interna

Con el fin de mantener coherencia entre todas las etapas, la Fase 4 fue utilizada como referencia metodológica durante el desarrollo del instrumento. Su nivel de detalle en procedimientos, requisitos de EPP e indicadores de cumplimiento se tomó como estándar mínimo para fortalecer especialmente las Fases 5 y 6, que en versiones preliminares presentaban menor desarrollo técnico. Esto permitió reducir diferencias de profundidad entre capítulos y evitar cambios abruptos en la densidad de información a lo largo de la guía.

3.2. Instrumento de evaluación y escala V de Aiken

Para la validación, se diseñó un instrumento compuesto por 20 ítems distribuidos en seis dimensiones, correspondientes a cada una de las fases de la guía. Cada ítem se formuló como una proposición evaluable orientada a describir un aspecto técnico o

procedimental específico. Los evaluadores analizaron estos ítems a partir de tres criterios: claridad entendida como la facilidad de comprensión del enunciado, pertinencia relacionada con la capacidad del ítem para evaluar lo que propone y aplicabilidad técnica es decir, su viabilidad en el contexto colombiano. La escala utilizada fue dicotómica: 0 cuando no se cumplía el criterio y 1 cuando sí. Además, se solicitó a los evaluadores que registraran observaciones cuando asignaran una calificación de 0, con el fin de complementar la valoración cuantitativa.

El coeficiente V de Aiken se calculó a partir de su formulación original, donde $V = \Sigma s / (N \cdot (c - 1))$. En este caso, Σs corresponde a la suma de las puntuaciones obtenidas por cada ítem, N al número total de valoraciones y c al número de categorías de la escala. Dado que se empleó una escala dicotómica ($c = 2$), la expresión se simplifica a $V = \Sigma s / N$. Considerando que cada uno de los siete evaluadores calificó tres criterios por ítem, el número total de valoraciones por ítem fue de 21. Este enfoque se alinea con la propuesta de Aiken (1985), en la que el coeficiente se interpreta como una proporción de acuerdo entre evaluadores.

En cuanto al criterio de aceptación, se estableció un umbral de $V > 0,90$. Aunque este valor es más exigente que el mínimo sugerido en la literatura ($V \geq 0,70$), su elección responde al tipo de instrumento desarrollado. Al tratarse de una guía con implicaciones directas en la gestión de residuos potencialmente peligrosos, se consideró necesario asegurar un alto nivel de consenso. En este contexto, un ítem poco claro o difícil de aplicar no solo afectaría la medición, sino que podría traducirse en errores operativos con consecuencias ambientales, legales o incluso sanitarias.

3.3. Selección y caracterización del panel de expertos

La selección de los jueces se realizó con base en tres criterios principales: contar con formación de posgrado o al menos cinco años de experiencia en áreas relacionadas

con la gestión de residuos electrónicos, la energía fotovoltaica o la normativa ambiental colombiana; tener vinculación activa con alguno de los sectores directamente involucrados en la gestión de estos residuos (académico, público o privado); y disponer del tiempo necesario para completar el proceso de evaluación dentro del período establecido. En total, el panel estuvo conformado por siete expertos.

Este tamaño de panel se ubica dentro del rango recomendado por la literatura metodológica sobre validación de contenido por juicio de expertos, que sugiere entre cinco y diez evaluadores como estándar apropiado (Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez, 2008; Skjong y Wentworth, 2001). Paneles con menos de cinco jueces tienden a mostrar inestabilidad en los coeficientes de acuerdo, mientras que por encima de diez los resultados no cambian de manera sustancial. La elección de siete evaluadores buscó además garantizar representación equilibrada de los tres sectores directamente involucrados en la gestión posconsumo de módulos FV en Colombia, tal como se detalla en la Tabla 4 .

Tabla 4

Composición del panel de expertos

ID	Nombre	Perfil	Fecha evaluación	Escala
E1	Alejandra Torres Cerón	Privado - Ing. Ambiental, Esp. Legislación Ambiental	12/04/2026	Dicotómica 0–1
E2	Carlos A. González Cortés	Académico - Docente universitario	13/04/2026	Dicotómica 0–1
E3	Karol E. Cifuentes Thorres	Público - Coord. GIT Convocatorias, Subdirección Energía Eléctrica UPME	Sin registro	Dicotómica 0–1
E4	Manuel A. Hernández Quinchara	Público - Profesional Ambiental	10/04/2026	Dicotómica 0–1

ID	Nombre	Perfil	Fecha evaluación	Escala
E5	Martha I. Gallego Salazar	Privado - Líder Socioambiental TyD	06/04/2026	Dicotómica 0–1
E6	Laura V. Cifuentes Grueso	Público - Profesional Ambiental	15/04/2026	Dicotómica 0–1
E7	Diana Marcela Montaña Silva	Público - Coord. GIT Generación, Subdirección Energía Eléctrica UPME	20/04/2026	Dicotómica 0–1

Nota. La distribución sectorial del panel refleja los actores con responsabilidad directa en la gestión posconsumo de módulos FV en Colombia conforme al Decreto 284 de 2018: sector público (4 jueces), privado (2 jueces) y académico (1 juez). Elaboración propia.

La participación de los sectores público y privado no fue casual. En particular, los profesionales del sector público especialmente aquellos vinculados a entidades como la UPME o las corporaciones autónomas regionales aportan una visión muy cercana a las condiciones reales en las que operan los gestores RAEE en el país. Este tipo de conocimiento, más práctico que teórico, no suele reflejarse con claridad en la literatura internacional. De hecho, su aporte fue clave para identificar varias de las limitaciones de aplicabilidad que se discuten más adelante en los resultados.

3.4. Procedimiento de evaluación

El proceso de evaluación se llevó a cabo entre el 30 de marzo y el 20 de abril de 2026. Durante ese período, cada uno de los jueces recibió la versión inicial de la guía correspondiente al 27 de marzo de 2026, junto con el instrumento de evaluación y sus respectivas instrucciones. También se incluyó la hoja de vida de cada evaluador, con el fin de documentar su idoneidad, y una carta de presentación del proyecto firmada por el director de tesis.

Una vez diligenciados, los formularios se consolidaron en una matriz de cálculo que permitió integrar las respuestas de los siete evaluadores. A partir de esta base, se calcularon los coeficientes V de Aiken, los cuales fueron verificados de forma manual para asegurar que la implementación en la hoja de cálculo coincidiera con lo planteado en la metodología.

Por otra parte, las observaciones cualitativas registradas por los evaluadores fueron revisadas mediante un proceso de síntesis temática. Esto implicó agrupar los comentarios según la fase de la guía y el tipo de ajuste sugerido. Este análisis no solo complementó los resultados cuantitativos, sino que también sirvió como base para definir los nueve ajustes técnicos que se incorporaron en la versión final del instrumento.

4. Resultados

Los resultados de la validación se presentan en tres niveles complementarios: primero, los coeficientes V de Aiken obtenidos para cada ítem; segundo, el análisis cualitativo de los ítems que no superaron el umbral de aceptación; y tercero, los ajustes técnicos incorporados a la versión definitiva de la guía a partir de las observaciones del panel.4.1.

Coeficientes V de Aiken por ítem

La Tabla 5 resume los coeficientes V obtenidos para los 20 ítems evaluados. En conjunto, el valor promedio fue de 0,96 (DE = 0,044), con resultados que oscilan entre 0,86 y 1,00. Doce de los ítems alcanzaron el valor máximo, especialmente en las fases de desensamble (4) y valorización final (6), aunque también aparecen casos en las fases de retiro (1) y pretratamiento (3). Este patrón sugiere un nivel de acuerdo muy alto entre los evaluadores, particularmente en lo relacionado con la claridad, pertinencia y aplicabilidad de estos contenidos.

Tabla 5

Coeficientes V de Aiken por ítem

Fase	Ítem	Enunciado (síntesis)	V de Aiken	≥ 0,90
1	1	Procedimientos de desconexión eléctrica y verificación de ausencia de tensión suficientes para garantizar condiciones seguras de retiro del módulo.	1,00	✓
1	2	Clasificación operativa A/B/C según estado físico del módulo para orientar etapas posteriores de manejo y reciclaje.	1,00	✓
1	3	Criterios de inspección visual aplicables en Colombia sin requerir equipos especializados de diagnóstico.	0,95	✓
2	1	Recomendaciones de manipulación y embalaje suficientes para preservar integridad estructural del módulo durante traslado.	0,95	✓

Fase	Ítem	Enunciado (síntesis)	V de Aiken	≥ 0,90
2	2	Manejo diferenciado A/B/C pertinente para reducir riesgos de daño adicional en el proceso logístico.	1,00	✓
2	3	Condiciones de transporte y almacenamiento temporal aplicables a la infraestructura logística disponible en Colombia.	0,86	X
3	1	Procedimiento de remoción de cables, conectores y caja de conexiones claro y suficiente para orientar el pretratamiento.	0,95	✓
3	2	Segregación inicial de materiales en Fase 3 pertinente para facilitar valorización posterior de componentes eléctricos.	1,00	✓
3	3	Procedimientos de pretratamiento aplicables en instalaciones RAEE autorizadas disponibles en Colombia.	0,95	✓
4	1	Remoción del marco de aluminio clara y técnicamente suficiente para su ejecución en condiciones operativas reales.	1,00	✓
4	2	Tecnologías de separación del vidrio frontal (mecánica, térmica y química) pertinentes y cubren alternativas disponibles.	1,00	✓
4	3	Proceso mecánico como método prioritario aplicable en las condiciones actuales de infraestructura de reciclaje en Colombia.	1,00	✓
4	4	Indicadores de cumplimiento de Fase 4 suficientes para verificar correcta separación de fracciones principales.	1,00	✓
5	1	Reducción de tamaño y separación de fracciones metálicas clara y técnicamente adecuada para tratamiento del laminado.	0,95	✓
5	2	Rutas de recuperación de silicio y gestión de fracciones poliméricas pertinentes en el marco de economía circular.	0,90	✓
5	3	Procesos de tratamiento del laminado aplicables en instalaciones de reciclaje disponibles en Colombia.	0,86	X
5	4	Indicadores de cumplimiento de Fase 5 permiten verificar recuperación efectiva de fracciones del laminado.	1,00	✓
6	1	Rutas de valorización de aluminio, vidrio, metales conductores y silicio claras y cubren adecuadamente fracciones generadas.	1,00	✓
6	2	Rutas de valorización pertinentes en marco de economía circular y gestión sostenible de residuos FV en Colombia.	1,00	✓
6	3	Mecanismos de trazabilidad y control permiten verificar desviación ≥ 80 % del módulo de disposición final.	1,00	✓

Fase	Ítem	Enunciado (síntesis)	V de Aiken	≥ 0,90
V media global	20 ítems evaluados: 18 con V ≥ 0,90 (90 %); 2 con V < 0,90 (10 %)		0,96	18/20

Nota. $V = \sum s / (N \cdot (c-1))$ con $N = 21$ (7 evaluadores × 3 criterios por ítem) y $c = 2$ (escala dicotómica). Umbral de aceptación: $V > 0,90$. Los valores de V corregidos difieren de los de la hoja de cálculo original, donde se dividía por 6 en lugar de 7. (✓) ítem válido; (X) ítem revisado. Elaboración propia.

Los resultados por fase muestran un patrón con cierta consistencia. La Tabla 6 recoge los valores medios, máximos y mínimos por dimensión.

Tabla 6

Resumen de resultados V de Aiken por fase

Fase	Descripción	N ítems	V media	V máx/mín	N < 0,90
1	Retiro del módulo fotovoltaico y verificación técnica inicial	3	0,98	1,00 / 0,95	0
2	Manejo logístico: manipulación, embalaje y transporte	3	0,93	1,00 / 0,68	1 (2.3)
3	Pretratamiento: remoción de cables, conectores y caja de conexiones	3	0,97	1,00 / 0,95	0
4	Desensamble: separación del marco de aluminio y vidrio frontal	4	1,00	1,00 / 1,00	0
5	Tratamiento del laminado: recuperación de materiales	4	0,93	1,00 / 0,86	1 (5.3)
6	Gestión de fracciones residuales y valorización final	3	1,00	1,00 / 1,00	0

Nota. V media calculada como promedio aritmético de los coeficientes V individuales de los ítems de cada fase. Elaboración propia.

Las Fases 4 (Desensamble) y 6 (Valorización final) destacan por haber alcanzado valores promedio de V iguales a 1,00 en todos sus ítems, algo que no se repite en el resto de las fases. En contraste, en las Fases 2 y 5 aparece al menos un ítem que no logra superar el umbral establecido, lo que introduce una diferencia que vale la pena examinar con más detalle.

Más que un resultado aislado, este comportamiento parece estar relacionado con el tipo de procesos que aborda cada fase. En los casos de desensamble y valorización, se trata de procedimientos ampliamente documentados en la literatura internacional como la separación mecánica del marco de aluminio o las rutas de aprovechamiento de materiales secundarios, lo que facilita un mayor consenso entre evaluadores. Por el contrario, las Fases 2 y 5 dependen en mayor medida de condiciones logísticas e infraestructura disponible, aspectos que suelen variar significativamente entre contextos y que la literatura no siempre resuelve con suficiente precisión para países como Colombia.

4.2 Ítems que no superaron el umbral: análisis cualitativo

El ítem 2.3 obtuvo un valor de $V = 0,86$, por debajo del umbral establecido. Este ítem evaluaba si las condiciones de transporte y almacenamiento temporal planteadas en la Fase 2 resultaban aplicables a la infraestructura logística disponible en Colombia. Dos de los siete evaluadores ambos con experiencia en el sector público y en proyectos de energización rural asignaron valoraciones parciales. Sus observaciones coincidieron en varios puntos: la guía asumía el uso de vehículos de carga convencionales que, en la práctica, no llegan a muchas Zonas No Interconectadas; además, no contemplaba alternativas como transporte fluvial, aéreo o mediante medios locales como mulas o

motocargueros. A esto se suma que el almacenamiento temporal se planteaba como una situación excepcional, cuando en estos territorios suele ser parte habitual del proceso.

Un comportamiento similar se observó en el ítem 5.3, que obtuvo un coeficiente de $V = 0,86$. En este caso, la evaluación se centraba en la aplicabilidad de los procesos de tratamiento del laminado en instalaciones disponibles en el país. Los evaluadores del sector privado señalaron que tecnologías como trituradoras industriales de baja velocidad o separadores por corrientes de Foucault superan, en muchos casos, la capacidad técnica y financiera de los gestores RAEE en Colombia. También destacaron la falta de alternativas para operaciones a menor escala y la ausencia de un diagnóstico claro sobre las brechas de infraestructura, junto con posibles rutas de mejora.

Aunque el resto de los ítems superó el umbral ($V \geq 0,90$), varios de ellos también generaron observaciones relevantes. Por ejemplo, en el ítem 4.1 se sugirió incorporar una referencia explícita a la Resolución 909 de 2008 para procesos térmicos del laminado. En los ítems 1.1 y 1.2, se planteó la necesidad de incluir a los operadores AOM como actores responsables en las primeras fases, especialmente en contextos ZNI. De manera transversal, tres evaluadores coincidieron en recomendar la inclusión de un glosario técnico que facilite la comprensión del instrumento para usuarios sin formación especializada en fotovoltaica.

4.3 Ajustes incorporados en la versión definitiva

El análisis de las observaciones realizadas por el panel permitió identificar un conjunto de nueve ajustes técnicos, cuyo detalle se presenta en la Tabla 7. Algunos de estos cambios en particular los ajustes A3, A4 y A9 se orientan directamente a corregir los ítems que no alcanzaron el umbral de aceptación. Los ajustes restantes, en cambio, surgen de comentarios cualitativos asociados a ítems que sí fueron aprobados, pero que ofrecían oportunidades de mejora en términos de claridad, alcance o aplicabilidad.

Tabla 7

Ajustes técnicos incorporados en la versión definitiva de la guía

Ajuste	Ítems de origen	Descripción del ajuste	Ubicación en la guía
A1	B.3 / C.3	Incorporación de rutas alternativas de gestión para escenarios sin gestor RAEE especializado, con protocolos transitorios y referencia explícita a la Política Nacional RAEE (MADS, 2015).	ALCANCE y sección 6.5 (nueva)
A2	D.1	Requisitos normativos para tratamientos térmicos y químicos: exigencia de licencia ambiental y cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 (emisiones). Incluye tabla con límites por tipo de proceso y lista de verificación previa.	Tablas 54 y 55 y nueva tabla 57
A3	E.1 / E.3	Procedimiento manual para gestores de pequeña escala (1–5 módulos/semana) con herramientas de mano. Tabla comparativa por escala operativa. Modelos de alianza con plantas industriales de mayor capacidad.	Sección 5.3 ampliada
A4	E.3	Plan de transición tecnológica en tres horizontes (2025–2030, 2030–2035, 2035+). Diagnóstico de brechas con indicadores de inversión. Tabla de actores responsables del cierre de brechas. Vinculación con la ENEC (MADS/MinCIT, 2019).	ALCANCE (párrafo ENEC), Tabla 49 ampliada, sección 5.1 nueva tabla (Tabla 51), sección 6.5
A5	B.3	Protocolo diferenciado de embalaje y transporte para cinco zonas climáticas colombianas. Tabla 21 revisada con condiciones climáticas por material. Nueva subsección 2.5.A. Tabla de aptitud de vehículos con prohibición de estacas sin cubierta.	Sección 2.3, Tabla 21 ajustada, nueva sección 2.5.1 y tabla de vehículos (Tabla 20)
A6	B.3	Ampliación completa de la sección 2.6: condiciones mínimas del área de acopio (cubierta, suelo, fauna, segregación, temperatura, plazos), tabla de condiciones adversas y medidas correctivas, lista de verificación de nueve criterios.	Sección 2.6 (reemplazada y ampliada)

Ajuste	Ítems de origen	Descripción del ajuste	Ubicación en la guía
A7	Transversal	Glosario de 38 términos técnicos en cuatro categorías: componentes del módulo FV, fallas y condiciones técnicas, procesos de tratamiento y términos normativos con siglas.	Nueva sección GLOSARIO (entre ALCANCE y Fase 1)
A8	Transversal	Operadores AOM como actores explícitos en las Fases 1 y 2 para proyectos ZNI. Tabla de obligaciones contractuales. Tabla de escenarios. Párrafos adicionales en objetivos de Fase 1 y 2.	Introducción, Tabla 2, ALCANCE, objetivos Fases 1 y 2
A9	B.3	Protocolo de transporte para cuatro contextos de acceso (A–D). Fichas técnicas para medios no convencionales: canoa, mula, avioneta, motocarguero. Embalaje reforzado ZNI. Almacenamiento temporal reclasificado como obligatorio en ZNI.	Secciones 2.5.2, 2.5.3 (nuevas) y 2.6.1 (nueva)

Nota. Los ajustes A3 y A4 responden al ítem 5.3; el ajuste A9, al ítem 2.3. Los ajustes A5 y A6 complementan A9 al abordar el embalaje en condiciones climáticas adversas y el almacenamiento temporal en ZNI. Los ajustes A7 y A8 responden a observaciones transversales del panel. Elaboración propia.

El ajuste de mayor alcance fue el A9. Este cambio modificó el tratamiento del almacenamiento temporal, que en versiones previas se consideraba una condición opcional, para incorporarlo como una etapa obligatoria en contextos de Zonas No Interconectadas. Además, se definieron requerimientos mínimos de infraestructura según las condiciones climáticas y se establecieron plazos diferenciados en función del estado del módulo. Como complemento, se incluyeron fichas técnicas para medios de transporte no convencionales como canoas motorizadas, mulas de carga, avionetas de baja

capacidad y motocargueros, con indicaciones específicas sobre embalaje y sujeción adaptadas a cada caso.

El ajuste A8 también implicó cambios importantes. En este caso, se reconoció explícitamente a los operadores AOM (Administración, Operación y Mantenimiento) como actores responsables en las Fases 1 y 2, especialmente en proyectos financiados con recursos públicos en ZNI. Este ajuste no solo define sus funciones, sino que también aclara la responsabilidad compartida con la entidad financiadora ya sea el IPSE o el municipio cuando los contratos de AOM no contemplan de manera explícita la gestión de residuos al final de la vida útil.

5. Discusión

5.1 Sobre el umbral $V > 0,90$ y su justificación

A primera vista, un coeficiente global de 0,96 podría interpretarse como un resultado homogéneo y sin mayores cuestionamientos. Sin embargo, una lectura más detenida muestra que no es así. Ese promedio convive con dos ítems que no alcanzaron el umbral y con otros ocho que, aunque lo superaron, generaron observaciones que evidencian limitaciones concretas del instrumento. En ese sentido, el uso de un umbral exigente cumplió una función importante: permitió hacer visibles tensiones que probablemente habrían pasado desapercibidas con criterios más flexibles, como el valor convencional de 0,70.

Vale la pena detenerse un momento en esta decisión metodológica. Aiken (1985) propuso un umbral de $V \geq 0,70$ para la mayoría de aplicaciones, mientras que Lawshe (1975) desarrolló su índice de validez de contenido con base en criterios de significación estadística. No obstante, estos enfoques no fueron concebidos para instrumentos con implicaciones operativas directas en contextos como la gestión de residuos peligrosos. En este tipo de escenarios, las consecuencias de una formulación imprecisa no se limitan a un problema de medición. Un procedimiento ambiguo por ejemplo, en el retiro eléctrico o en el transporte puede traducirse en riesgos para los trabajadores, incumplimientos normativos ante entidades como las CAR o la ANLA, e incluso impactos ambientales en los territorios donde se generan los residuos. Bajo ese marco, optar por un umbral más estricto no solo es justificable, sino coherente con el nivel de responsabilidad que implica el uso del instrumento.

5.2 La brecha de aplicabilidad como hallazgo central

Más que el valor global del coeficiente, lo realmente relevante es el patrón que aparece en los ítems que no alcanzaron el umbral. Ambos coinciden en un mismo aspecto: la aplicabilidad técnica. En los dos casos, el problema no estaba en la formulación del procedimiento en sí, sino en el supuesto de contexto bajo el cual fue diseñado. Es decir, la guía proponía soluciones técnicamente correctas, pero pensadas para condiciones que no siempre reflejan la realidad operativa de muchos actores en Colombia.

Esto introduce una paradoja interesante. La guía fue concebida precisamente para el contexto colombiano, incorporando revisión normativa nacional y referencias a estudios sobre las condiciones del país (Ganesan & Valderrama, 2022). Sin embargo, aspectos como la logística en Zonas No Interconectadas o la capacidad real de los gestores RAEE no suelen aparecer con suficiente detalle en la literatura científica. En parte, porque no son temas que se documenten con la misma frecuencia en publicaciones académicas indexadas. En este punto, el aporte del panel de expertos resultó decisivo: fueron ellos quienes lograron traducir esas condiciones reales en observaciones concretas que derivaron en ajustes operativos.

En ese sentido, la validación por juicio de expertos aporta un valor que va más allá de lo que puede lograrse con una revisión sistemática. Mientras esta última organiza y sintetiza conocimiento publicado, los evaluadores introducen una dimensión distinta: el conocimiento práctico del campo, muchas veces no documentado, que permite ajustar el instrumento a condiciones reales de aplicación.

5.3 ZNI: un desafío que la literatura internacional no resuelve.

Los ajustes relacionados con las Zonas No Interconectadas (ZNI) requieren una discusión particular. En Colombia, cerca del 52 % de los municipios se encuentran bajo esta condición, y en muchos de ellos los sistemas fotovoltaicos representan la única

fuentes de energía disponibles para las comunidades. La mayoría de estos proyectos han sido financiados por entidades como el IPSE o mediante instrumentos asociados al FNCE y funcionan bajo esquemas de administración, operación y mantenimiento (AOM) que históricamente no incorporaron de forma explícita la gestión de los equipos al final de su vida útil (Ley 2099 de 2021).

Sin embargo, la magnitud del problema no se explica únicamente por el número de municipios involucrados, sino por la asimetría estructural que existe entre estos territorios y los contextos donde normalmente se desarrollan los marcos de gestión posconsumo. Un sistema fotovoltaico instalado en una comunidad del Vaupés o del litoral Pacífico no es simplemente un sistema ubicado en una zona remota. En muchos casos se trata de infraestructura pública operada por terceros, cuya propiedad sigue siendo estatal y cuya responsabilidad al final de la vida útil no estuvo claramente definida, hasta hace poco, en instrumentos técnicos o contractuales.

Aunque el Decreto 284 de 2018 incorpora el principio de responsabilidad extendida del productor para los RAEE, su aplicación práctica en ZNI sigue enfrentando vacíos importantes. Persisten preguntas que no tienen una respuesta clara dentro de los marcos vigentes: ¿quién debe asumir el retiro de los módulos?, ¿cómo se realiza el transporte en territorios sin acceso carretero?, ¿qué ocurre cuando los contratos AOM no contemplan esos costos? Estas dificultades tampoco aparecen desarrolladas de manera suficiente en la literatura revisada.

Parte del problema radica en que buena parte de los referentes internacionales más influyentes como IEA-PVPS (2021), Bošnjaković et al. (2023) o Deng et al. (2019) fueron contruidos desde contextos muy distintos. En esos escenarios, la electrificación rural no constituye un desafío estructural porque existe cobertura de red prácticamente universal. Los sistemas fotovoltaicos suelen operar como instalaciones comerciales o residenciales

conectadas al sistema interconectado, con acceso terrestre relativamente sencillo y cadenas de gestión ya consolidadas.

Por esa razón, trasladar directamente esas directrices a proyectos comunitarios en regiones como el Amazonas o La Guajira colombiana resulta problemático. No se trata solamente de adaptar procedimientos logísticos; el problema es más profundo, porque el modelo de gestión subyacente supone condiciones institucionales, contractuales y de infraestructura que simplemente no existen en muchos territorios colombianos.

Esta brecha también evidencia una limitación más amplia en la forma en que se produce conocimiento sobre gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos. La literatura suele generalizar a partir de los países con mayor capacidad instalada y mayor producción científica, mientras que los contextos donde la gestión es más compleja precisamente por la precariedad del acceso energético reciben mucha menos atención. Como señalan Das & Sarmah (2025), numerosos modelos de gestión parten del supuesto de que los residuos se generan en entornos con infraestructura disponible. Cuando esa infraestructura no existe, el problema no desaparece; simplemente se traslada hacia formas de almacenamiento informal o abandono progresivo de los equipos dentro de las comunidades.

Desde la perspectiva de política pública, el principal obstáculo no parece ser tecnológico sino institucional y contractual. Los contratos AOM en ZNI fueron diseñados para garantizar continuidad en la prestación del servicio eléctrico, no para gestionar el cierre del ciclo de vida de los equipos. Si no existe una cláusula explícita que asigne responsabilidades sobre retiro, embalaje y transporte, y tampoco un mecanismo financiero que permita cubrir esos costos, el escenario más probable es que los módulos permanezcan almacenados de manera informal o terminen abandonados a la intemperie.

Esto resulta especialmente crítico para módulos clasificados como Clase C bajo los criterios del Decreto 4741 de 2005, debido a los riesgos ambientales asociados.

Además, este escenario no es únicamente una posibilidad teórica. Situaciones similares ya han sido documentadas en programas de electrificación rural en distintos países de América Latina para otros tipos de residuos electrónicos (Kabir et al., 2023).

El ajuste A9 busca responder parcialmente a esa brecha. Aunque no pretende cubrir todas las variaciones territoriales posibles, sí propone un marco operativo basado en cuatro contextos de acceso que permite a los operadores AOM identificar su situación logística y adaptar las acciones correspondientes. Uno de los cambios más relevantes derivados del proceso de validación fue incorporar el almacenamiento temporal como una etapa obligatoria en ZNI, con tiempos diferenciados según la clasificación del módulo y requisitos mínimos de infraestructura de acopio.

Más que una solución provisional frente a las dificultades de transporte, este ajuste reconoce que, en muchos territorios, el almacenamiento temporal forma parte estructural del proceso de gestión posconsumo y no una excepción operativa.

En términos más amplios, este hallazgo sugiere que los instrumentos de gestión posconsumo para países en desarrollo no pueden construirse únicamente a partir de la adaptación de marcos internacionales existentes. Necesitan partir de las condiciones reales del territorio: logística multimodal, ausencia de gestores especializados, dependencia de contratos públicos de operación y diversidad geográfica y climática. La validación mediante juicio de expertos resultó especialmente útil en este punto, ya que fueron precisamente los evaluadores con experiencia directa en proyectos ZNI quienes identificaron varias de estas brechas, muchas de las cuales difícilmente habrían emergido únicamente a partir de la revisión bibliográfica.

5.4 Contribución al estado del arte

El aporte de este trabajo puede leerse desde varios ángulos complementarios, pero su lectura más relevante para el campo es la que conecta la metodología de diseño con la aplicabilidad concreta del instrumento en el contexto colombiano y latinoamericano.

5.4.1. Sobre la metodología de diseño de la guía

La construcción de la guía no partió de la adaptación de un instrumento existente, sino de un proceso de síntesis a partir de fuentes primarias de distinta naturaleza: literatura científica Q1/Q2, estándares técnicos internacionales, normativa colombiana verificada en el Diario Oficial y, de manera determinante, el conocimiento tácito del campo aportado por el panel de expertos. Esta combinación de fuentes no es habitual en los instrumentos técnicos de gestión ambiental disponibles para el contexto latinoamericano, donde tiende a predominar la transposición directa de marcos internacionales sin verificación de aplicabilidad local.

La decisión de estructurar el instrumento en seis fases secuenciales con profundidad procedimental homogénea procedimiento paso a paso, EPP, indicadores de cumplimiento y referencia normativa en cada fase responde a una necesidad identificada en la revisión de literatura: la mayoría de los documentos técnicos disponibles sobre gestión de residuos FV describen con detalle los aspectos tecnológicos del reciclaje, pero ofrecen escasa orientación operativa para quienes deben ejecutar el proceso en condiciones reales de campo (Das & Sarmah, 2025; Gahlot et al., 2022). Una guía que describe la separación magnética como técnica válida de recuperación de metales, pero no especifica el EPP requerido ni el criterio para verificar que la operación fue exitosa, transfiere al operario una responsabilidad que el instrumento debería haber resuelto. La guía propuesta en este trabajo busca cerrar esa brecha mediante indicadores de cumplimiento verificables en campo, sin requerir equipamiento de laboratorio.

Otro aspecto metodológico relevante es el reconocimiento explícito de la heterogeneidad de capacidades entre los potenciales usuarios del instrumento. La guía no supone un gestor RAEE con infraestructura industrial: incluye procedimientos manuales para volúmenes de 1 a 5 módulos por semana, modelos de alianza entre gestores de pequeña escala y plantas de mayor capacidad, y protocolos de logística adaptados a cuatro contextos de acceso territorial. Este enfoque de implementación diferenciada por escala y contexto es coherente con los principios del diseño centrado en el usuario aplicado a instrumentos técnicos (Lawshe, 1975) y constituye una diferencia sustantiva frente a guías que describen el proceso ideal sin considerar las condiciones reales de quien debe ejecutarlo.

5.4.2. Aplicabilidad en el contexto colombiano

La relevancia del instrumento para Colombia se puede entender en tres niveles. En el nivel técnico-operativo, la guía ofrece por primera vez un protocolo integral que cubre el ciclo completo del módulo FV c-Si desde el retiro hasta la valorización, articulado con el marco normativo colombiano vigente. Esto tiene implicaciones directas para los gestores RAEE autorizados que actualmente reciben módulos sin saber con exactitud cómo tratarlos: no existe en el país otro instrumento que defina, por ejemplo, bajo qué condiciones un módulo se clasifica como RESPEL, qué EPP requiere su manipulación o cuánto tiempo puede estar en almacenamiento temporal antes de que sea obligatorio buscar un gestor receptor.

En el nivel institucional, la distribución explícita de responsabilidades entre instaladores, operadores AOM, gestores RAEE y autoridades ambientales llena un vacío operativo que el Decreto 284 de 2018 y la Ley 1672 de 2013 no resuelven para el caso específico de los módulos FV. La responsabilidad extendida del productor existe como principio en la normativa colombiana, pero su traducción en obligaciones concretas para

cada actor de la cadena especialmente en proyectos de electrificación rural con propiedad pública e infraestructura operada por terceros no estaba definida. La guía propone esa articulación de manera operativa, no solo declarativa.

En el nivel de política pública, el instrumento puede funcionar como insumo técnico para el desarrollo de regulación específica que Colombia aún no tiene. El diagnóstico de brechas de infraestructura, el plan de transición tecnológica en tres horizontes y la identificación de los actores responsables del cierre de esas brechas constituyen una base de argumentación para que el MADS, la UPME o el Congreso de la República aborden la gestión posconsumo de módulos FV con la misma especificidad con que otros países han comenzado a hacerlo. En ese sentido, la guía no es solo un instrumento de gestión: es también un argumento para la acción regulatoria.

5.4.3. Potencial de transferencia a América Latina

Más allá del caso colombiano, el instrumento tiene potencial de transferencia a otros países latinoamericanos que comparten condiciones estructurales similares: crecimiento acelerado de la capacidad fotovoltaica instalada, ausencia de regulación específica para residuos FV, redes de gestores RAEE de pequeña escala con infraestructura limitada y presencia de programas de electrificación rural en territorios de difícil acceso. Este perfil corresponde, en mayor o menor medida, a países como Perú, Ecuador, Bolivia, Paraguay y las regiones rurales de Brasil y México.

La estructura modular de la guía seis fases con componentes independientes y ajustables facilita su adaptación a marcos normativos distintos sin necesidad de rediseñar el instrumento completo. Los procedimientos de retiro (Fase 1), pretratamiento (Fase 3) y desensamble (Fase 4) son en gran medida transferibles sin modificación, dado que responden a características físicas del módulo que no varían según el contexto nacional. Las Fases 2 y 6, en cambio logística y valorización final requieren adaptación

local, porque dependen de la infraestructura de transporte disponible y de los mercados de materiales secundarios de cada país.

Este potencial de transferencia no es una aspiración especulativa. La metodología de validación empleada en este trabajo juicio de expertos con coeficiente V de Aiken, umbral $V > 0,90$ y análisis desagregado por criterio puede replicarse en otros contextos nacionales con paneles de expertos locales, generando versiones adaptadas del instrumento que mantengan la estructura común pero reflejen las condiciones específicas de cada territorio. En ese sentido, la guía no solo contribuye al estado del arte como producto técnico, sino también como modelo metodológico replicable para el diseño y validación de instrumentos técnicos de gestión ambiental en países con sistemas de gestión posconsumo en etapa de desarrollo.

El instrumento técnico presentado en este trabajo no constituye un resultado secundario derivado del proceso de validación, sino el eje central de la investigación. La guía técnica orientadora para la gestión sostenible de residuos de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia fue concebida como una herramienta aplicable en condiciones reales de operación, dirigida a usuarios concretos y desarrollada a partir de las necesidades técnicas y normativas identificadas en el contexto colombiano.

Las secciones anteriores describieron el proceso metodológico seguido para su diseño y validación. Sin embargo, más allá de ese proceso, resulta importante analizar el instrumento como propuesta técnica en sí misma: su estructura, su alcance operativo, las limitaciones que todavía presenta y las condiciones necesarias para que pueda trascender el ámbito académico e integrarse eventualmente a esquemas institucionales y operativos de gestión posconsumo. En este mismo sentido es importante mencionar que la estructura operativa completa del instrumento, la cual está constituida por un diagrama de flujo por fase,

componentes estructurales, clasificación operativa Clase A/B/C, procedimientos técnicos, EPP, indicadores de cumplimiento verificables en campo y formularios de trazabilidad, se consolidan en la guía técnica orientadora de 202 páginas que constituye el producto central de este trabajo, por lo que la discusión que sigue no repite esa descripción operativa, sino que se centra en los límites del instrumento y en la ruta necesaria para su consolidación.

5.5 Límites del instrumento

Reconocer los límites de un instrumento técnico no representa una debilidad metodológica; por el contrario, constituye una condición necesaria para garantizar su credibilidad académica y su aplicabilidad práctica. La guía propuesta fue diseñada para responder a las condiciones actuales de gestión de residuos fotovoltaicos en Colombia, pero su alcance sigue condicionado por restricciones estructurales, normativas e institucionales que exceden la capacidad del instrumento en sí mismo.

La Tabla 8 resume las principales limitaciones identificadas durante el proceso de diseño y validación, así como las estrategias incorporadas para reconocerlas o mitigarlas parcialmente dentro de la propia guía. También se incluyen los pasos adicionales que serían necesarios para superar dichas limitaciones en futuras etapas de implementación.

Tabla 8

Limitaciones del instrumento, mitigación interna y pasos para su superación

Limitación identificada	Descripción y alcance	Cómo la guía la reconoce o mitiga	Paso necesario para superarla
Alcance tecnológico del tratamiento del laminado	La guía prioriza el método mecánico como ruta de tratamiento de la Fase 5 por ser el de mayor disponibilidad en Colombia. Los métodos térmicos (pirólisis) e hidrometalúrgico, que permiten tasas de recuperación superiores de silicio y metales preciosos, están documentados como rutas alternativas, pero no como procedimientos detallados.	La guía incluye el plan de transición tecnológica (Ajuste A4) en tres horizontes (2025–2030, 2030–2035, 2035+), que establece cuándo y en qué condiciones los métodos avanzados deberían incorporarse al proceso estándar.	Formulación de protocolos específicos para pirólisis e hidrometalurgia una vez que Colombia cuente con licencias ambientales y gestores habilitados para estos procesos.
Ausencia de datos nacionales sobre generación de residuos FV	La guía no incorpora proyecciones propias de volúmenes de residuos FV para Colombia, dado que no existen series de datos nacionales sistematizadas sobre capacidad instalada por tecnología, vida útil observada ni tasa de retiro. Las referencias disponibles son proyecciones internacionales adaptadas.	Las cifras de la UPME (2025) sobre capacidad adjudicada (4,4 GW para 2027–2028) permiten estimar órdenes de magnitud, pero con incertidumbre significativa sobre el horizonte temporal real de generación de residuos.	Desarrollo de un sistema de registro nacional de instalaciones FV por tecnología y año, articulado con el SIUR del MADS, que permita construir proyecciones de residuos con datos colombianos.
Dependencia de la cadena de gestores RAEE disponibles	La aplicabilidad de las Fases 5 y 6 depende de la existencia de gestores RAEE autorizados con capacidad mínima para recibir y tratar módulos FV. En Colombia, esta red es limitada fuera de las principales ciudades, lo que puede hacer que las rutas de valorización descritas sean inaccesibles para generadores en regiones periféricas.	Los ajustes A1, A3 y A9 introducen rutas transitorias y alternativas manuales para contextos sin gestor especializado. El plan de transición del Ajuste A4 señala las acciones estructurales requeridas para cerrar esta brecha.	Implementación de programas de habilitación de gestores RAEE regionales con capacidad específica para módulos FV, con apoyo del MADS, el IPSE y la cooperación internacional.
Ausencia de validación operativa en campo	La guía fue validada en su contenido mediante juicio de expertos (V de Aiken), pero no ha sido implementada en condiciones reales de operación. No se dispone aún de datos sobre tiempos de ejecución por fase, costos operativos, tasas de recuperación efectivas ni dificultades no anticipadas en el protocolo.	La validación por expertos garantiza la idoneidad conceptual del instrumento; la validación operativa es el siguiente paso necesario para confirmar su aplicabilidad práctica.	Piloto de implementación en al menos dos proyectos FV al final de su vida útil: uno en contexto urbano o periurbano y uno en ZNI, con seguimiento de los indicadores de cumplimiento de cada fase y documentación de desviaciones.
Cobertura limitada a módulos de silicio cristalino (c-Si)	La guía fue diseñada y validada para módulos de silicio cristalino, que representan ~95 % del mercado actual. Las tecnologías de capa delgada (CdTe, CIGS), los perovskitas y los módulos bifaciales tienen composiciones materiales distintas que requieren procedimientos de gestión diferenciados.	Las Fases 1, 2 y 3 son en gran medida transferibles a otras tecnologías. Las Fases 4, 5 y 6 requieren adaptación específica para módulos que no tienen marco de aluminio, vidrio frontal estándar o la misma composición del laminado.	Extensión de la guía a tecnologías de capa delgada y perovskitas a medida que su presencia en el parque instalado colombiano se vuelva relevante; previsiblemente antes de 2035.

Nota. Las limitaciones identificadas no invalidan la utilidad del instrumento; señalan el horizonte de trabajo necesario para su consolidación progresiva. Todas tienen al menos una ruta de superación identificada. Elaboración propia.

Un aspecto que requiere una lectura diferenciada es la relación entre las limitaciones propias del instrumento y las limitaciones del contexto institucional en el que este debe operar. Varias de las restricciones identificadas durante el proceso de validación particularmente la dependencia de gestores RAEE habilitados y la escasez de datos nacionales sobre generación de residuos fotovoltaicos no corresponden necesariamente a fallas de diseño de la guía. Más bien, reflejan brechas estructurales que todavía existen dentro del sistema colombiano de gestión ambiental y de residuos posconsumo.

En ese sentido, el alcance del instrumento también tiene límites definidos por las capacidades reales del entorno donde pretende aplicarse. La guía puede establecer procedimientos, criterios de trazabilidad y rutas de gestión técnicamente consistentes, pero no puede suplir por sí sola la ausencia de infraestructura especializada, la limitada cobertura territorial de gestores autorizados o la falta de sistemas consolidados de información sobre residuos FV.

Sin embargo, precisamente allí radica parte de su valor. Más que resolver directamente esas brechas, el instrumento permite hacerlas visibles de manera operativa y sistemática. Al traducir problemas estructurales en necesidades concretas de gestión capacidad de almacenamiento, cobertura logística, vacíos contractuales o ausencia de canales de valorización, la guía ofrece un diagnóstico técnico que puede servir como base para la toma de decisiones institucionales.

Esto resulta especialmente relevante para actores con capacidad regulatoria, financiera o de planificación, como el MADS, el IPSE, MinCIT o incluso el sector privado vinculado a proyectos de electrificación y transición energética. En otras palabras, el instrumento no solo organiza procedimientos técnicos; también ayuda a identificar con mayor precisión cuáles son las condiciones estructurales que todavía deben fortalecerse para que una gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos sea realmente viable a escala nacional.

5.6 Ruta de desarrollo: pasos necesarios para consolidar el instrumento

El trabajo descrito en este artículo es un punto de partida, no un punto de llegada. La Tabla 9 presenta seis líneas de acción concretas, organizadas por horizonte temporal y prioridad relativa, que definen la ruta de desarrollo necesaria para que la guía trascienda su condición actual de instrumento validado y se convierta en referente operativo del sistema de gestión posconsumo de módulos FV en Colombia y, eventualmente, en América Latina.

Tabla 9

Líneas de acción para la consolidación y expansión del instrumento técnico

N.º	Línea de acción	Descripción y alcance	Actores clave	Horizonte y prioridad
1	Validación operativa en campo	Implementar la guía en al menos dos proyectos FV reales al final de su vida útil: uno urbano y uno en ZNI. Documentar tiempos de ejecución, costos, desviaciones del protocolo y tasas de recuperación efectivas.	IPSE, gestores RAEE autorizados, empresa EPC u operador AOM del proyecto piloto.	Corto plazo (2025–2027). Prioritario para confirmar la aplicabilidad operativa del instrumento.
2	Desarrollo de regulación específica para residuos FV en Colombia	Utilizar la guía como insumo técnico para fundamentar una actualización del Decreto 284 de 2018 o la expedición de una resolución específica del MADS que defina metas de recolección, estándares de tratamiento y responsabilidades diferenciadas para módulos FV.	MADS, IPSE, MinEnergía, gremios del sector FV (SER Colombia, ANDESCO).	Mediano plazo (2026–2029). Requiere voluntad política y coordinación interinstitucional.
3	Construcción de un sistema de información sobre residuos FV en Colombia	Articular el registro de instalaciones FV con el SIUR del MADS para generar proyecciones nacionales de generación de residuos por tecnología, región y año. Esto permitiría dimensionar la demanda futura de infraestructura de gestión con datos propios.	UPME, MADS, DNP. Apoyo técnico de universidades y centros de investigación.	Mediano plazo (2026–2030). Condición habilitante para la planificación de infraestructura de reciclaje.
4	Habilitación de gestores RAEE regionales con capacidad específica para módulos FV	Diseñar e implementar un programa de habilitación técnica y financiera de gestores RAEE en regiones con alta concentración de proyectos FV (Costa Atlántica, Llanos, Eje Cafetero), incluyendo acceso a financiamiento verde (Bancóldex, GCF) para adquisición de equipos.	MADS, MinCIT, Bancóldex, CAR regionales. Operadores privados del sector RAEE.	Mediano-largo plazo (2027–2032). Eje del plan de transición tecnológica del Ajuste A4.
5	Extensión de la guía a tecnologías FV emergentes	Adaptar las Fases 4, 5 y 6 para módulos de capa delgada (CdTe, CIGS), perovskitas y módulos bifaciales, cuya composición material requiere procedimientos de gestión diferenciados,	Grupos de investigación en ciencia de materiales y gestión de residuos. Fabricantes e	Largo plazo (2030–2035). Pertinente cuando estas tecnologías alcancen presencia significativa

N.º	Línea de acción	Descripción y alcance	Actores clave	Horizonte y prioridad
		particularmente en relación con el cadmio y el telurio en CdTe.	importadores de tecnologías emergentes.	en el parque instalado colombiano.
6	Transferencia del modelo a otros países de América Latina	Adaptar la metodología de diseño y validación por V de Aiken a contextos nacionales de Perú, Ecuador, Bolivia, Paraguay y regiones rurales de Brasil, partiendo de la estructura modular de la guía y realizando validaciones locales con paneles de expertos nacionales.	Redes académicas latinoamericanas (CLACSO, OLADE), organismos de cooperación (BID, CAF, GIZ), ministerios de energía y ambiente de los países receptores.	Largo plazo (2028–2035). Dependiente de la disponibilidad de expertos y de la existencia de marcos normativos mínimos en cada país.

Nota. Prioridad relativa: líneas 1–2 = alta (condicionan la utilidad práctica del instrumento a corto plazo); líneas 3–4 = media (habilitan la escala del sistema de gestión); líneas 5–6 = largo plazo (amplían el alcance del instrumento). Elaboración propia.

La línea de acción más inmediata y prioritaria es la validación operativa en campo. Aunque el proceso de validación mediante V de Aiken permitió confirmar la pertinencia técnica y la coherencia conceptual del instrumento, todavía no existe evidencia suficiente sobre su desempeño en condiciones reales de implementación. En otras palabras, la guía ha demostrado ser metodológicamente consistente, pero su eficacia práctica solo podrá evaluarse cuando sea utilizada por operarios reales en escenarios reales de gestión.

En este sentido, un piloto de implementación en dos contextos contrastantes uno urbano, con acceso relativamente cercano a gestores RAEE especializados, y otro en ZNI con logística multimodal permitiría obtener información fundamental para fortalecer el instrumento. Aspectos como tiempos reales de operación, costos asociados, dificultades logísticas no previstas o vacíos procedimentales suelen emerger únicamente durante la aplicación práctica y difícilmente pueden identificarse por completo mediante validaciones de contenido o revisión documental.

La segunda línea de desarrollo corresponde al fortalecimiento regulatorio. La existencia de una regulación específica para residuos fotovoltaicos constituye, en gran medida, una condición necesaria para que este tipo de instrumentos pueda escalar y consolidarse. Mientras no existan metas de recolección, estándares técnicos de tratamiento y responsabilidades claramente asignadas para cada actor de la cadena, la guía seguirá funcionando principalmente como una herramienta de adopción voluntaria, dependiente de la iniciativa individual de gestores, operadores o instaladores.

La experiencia internacional sugiere además que el desarrollo de infraestructura especializada suele estar precedido por marcos regulatorios sectoriales claros. Casos como Alemania o Japón muestran que la secuencia regulación - infraestructura - eficiencia técnica ha sido determinante para consolidar sistemas de gestión posconsumo más robustos (Bošnjaković et al., 2023; Das & Sarmah, 2025). Cuando la regulación no existe o permanece fragmentada, el crecimiento de capacidades técnicas tiende a producirse de manera lenta y dispersa.

En conjunto, el instrumento desarrollado en esta investigación no se limita a organizar procedimientos técnicos para la gestión de residuos fotovoltaicos. También contribuye a cerrar vacíos operativos identificados durante el proceso de análisis, propone una distribución de responsabilidades que anteriormente no estaba claramente definida y documenta brechas estructurales que requieren atención institucional. Por ello, su aporte no radica únicamente en las operaciones que describe, sino en la capacidad que ofrece para orientar futuras decisiones técnicas, regulatorias e institucionales en torno a la gestión posconsumo de módulos fotovoltaicos en Colombia.

6. Conclusiones

El presente capítulo presenta las conclusiones del estudio en línea directa con los objetivos planteados en el subcapítulo 1.2., en donde cada objetivo específico se aborda en su propio apartado de conclusiones, y el objetivo general se consolida al finalizar el bloque correspondiente al diseño y validación de la guía. Así mismo es importante mencionar que el capítulo cierra con las líneas de desarrollo futuro derivadas del trabajo.

En relación con el análisis de la composición y componentes predominantes de los paneles fotovoltaicos (objetivo específico 1), el análisis de la composición material de los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino evidenció que más del 90 % de su masa es técnicamente recuperable mediante procesos mecánicos convencionales. Sin embargo, la presencia de trazas de plomo en las soldaduras tiene implicaciones normativas directas: cuando el módulo se fragmenta, su clasificación como residuo peligroso modifica completamente el protocolo de manejo, los costos de gestión y las responsabilidades de los actores involucrados. Este hallazgo fundamentó la clasificación operativa A/B/C adoptada en la guía como eje transversal de todas sus fases.

Respecto al examen del marco normativo colombiano (objetivo específico 2), se confirmó que el país carece de regulación específica para residuos de módulos fotovoltaicos. La normativa vigente los clasifica genéricamente como RAEE sin reconocer sus dimensiones, composición ni vida útil diferenciada, y no operacionaliza las responsabilidades de los actores en proyectos de electrificación rural con propiedad pública. Esta brecha no solo justifica el desarrollo de la guía como instrumento técnico orientador, sino que señala una necesidad concreta de regulación diferenciada que deberá atenderse a medida que aumente la capacidad instalada en el país.

En cuanto al análisis de experiencias internacionales (objetivo específico 3), se logró identificar que la viabilidad de la gestión posconsumo depende tanto de la infraestructura técnica disponible como del marco regulatorio que la respalde. De estas experiencias se derivó la decisión de priorizar el método mecánico como ruta principal en la guía, por corresponder al proceso con mayor disponibilidad en Colombia y la menor barrera de entrada para gestores RAEE en etapa de desarrollo.

Respecto a la formulación de la propuesta de guía orientadora (objetivo específico 4, que se articula con el objetivo general del estudio), el estudio alcanzó su objetivo general al desarrollar una guía técnica orientadora estructurada en seis fases que cubre el proceso completo de gestión de residuos de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino en Colombia, desde el retiro del módulo hasta la valorización final de sus materiales. El instrumento integra criterios técnicos, normativos y operativos, y fue diseñado para ser aplicable en las condiciones reales del contexto colombiano, incluyendo escenarios de Zonas No Interconectadas y gestores de pequeña escala.

En cuanto a la validación del contenido de la guía técnica orientadora mediante juicio de expertos empleando el coeficiente V de Aiken (objetivo específico 5), se destaca que la guía técnica orientadora desarrollada en este estudio alcanzó un nivel alto de validez de contenido, con un coeficiente V de Aiken medio de 0,96, superando el umbral exigente definido inicialmente ($V > 0,90$). La mayoría de los ítems fueron validados desde la primera evaluación, y en varios casos se logró un consenso completo entre los expertos, lo que refuerza la consistencia interna del instrumento.

Sin embargo, más allá del valor global, los resultados más relevantes emergen al analizar los casos donde ese consenso no se alcanzó plenamente. Los ítems con menor puntuación pusieron en evidencia una brecha importante entre la solidez técnica de los procedimientos propuestos y las condiciones reales en las que estos deberían aplicarse, especialmente en lo relacionado con la logística en Zonas No Interconectadas y la disponibilidad de infraestructura para el tratamiento del laminado. Este tipo de limitaciones no aparecía con claridad en la revisión de literatura y fue precisamente el panel de expertos quien permitió identificarlas y traducirlas en ajustes concretos.

Los cambios introducidos a partir de la validación fortalecieron la guía en varios aspectos clave. Por un lado, se mejoró su adaptación a contextos territoriales complejos, incorporando soluciones logísticas más acordes con la realidad de las ZNI. Por otro, se hizo explícita la necesidad de cerrar brechas de infraestructura mediante un enfoque gradual, y se clarificaron las responsabilidades de actores como los operadores AOM, que hasta ahora no estaban plenamente integrados en este tipo de instrumentos. La inclusión de un glosario técnico también amplía el alcance de la guía, facilitando su uso por parte de perfiles no especializados.

En conjunto, estos resultados muestran que la validación por juicio de expertos no debe entenderse únicamente como un filtro de calidad. En este caso, funcionó también como un mecanismo para incorporar conocimiento práctico que difícilmente aparece en la literatura académica, pero que resulta determinante para la aplicabilidad del instrumento en condiciones reales.

A partir de este trabajo se abren varias líneas de desarrollo. Una de ellas es la actualización de la guía en función de futuros avances normativos en Colombia, donde aún no existe una regulación específica para residuos fotovoltaicos. Otra línea relevante es la validación en campo de los ajustes propuestos, particularmente en proyectos ubicados en Zonas No Interconectadas, donde se podrá evaluar su funcionamiento bajo condiciones reales. Finalmente, será necesario extender este tipo de instrumentos a otras tecnologías fotovoltaicas emergentes, a medida que su presencia en el país aumente y empiecen a generar flujos significativos de residuos.

Referencias bibliográficas

- Aiken, L. R. (1985). Three coefficients for analyzing the reliability and validity of ratings. *Educational and Psychological Measurement*, 45(1), 131–142.
<https://doi.org/10.1177/0013164485451012>
- Akram Cheema, H., Ilyas, S., Kang, H., & Kim, H. (2024). Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic

panels. Waste Management, 174, 187–202.

<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.11.025>

al Zaabi, B., & Ghosh, A. (2024). Managing photovoltaic waste: Sustainable solutions and

global challenges. Solar Energy, 283, 112985.

<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2024.112985>

American National Standards Institute / International Safety Equipment Association. (2020).

ANSI/ISEA Z87.1-2020: American national standard for occupational and
educational personal eye and face protection devices. ISEA.

Ansanelli, G., Fiorentino, G., Tammaro, M., & Zucaro, A. (2021). A life cycle assessment of

a recovery process from end-of-life photovoltaic panels. Applied Energy, 290,

116727. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>

Bošnjaković, M., Galović, M., Kuprešak, J., & Bošnjaković, T. (2023). The end of life of PV

systems: Is Europe ready for it? Sustainability, 15(23), 16466.

<https://doi.org/10.3390/SU152316466>

Bulińska, S., Sujak, A., & Pyzalski, M. (2025). Sustainable management of photovoltaic

waste through recycling and material use in the construction industry. Materials,

18(2), 284. <https://doi.org/10.3390/MA18020284>

Colombia, Congreso de la República. (2013). Ley 1672 de 2013: Por la cual se establecen

los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de
residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Diario Oficial N.º 48857.

Colombia, Congreso de la República. (2014). Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se

regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema
Energético Nacional. Diario Oficial N.º 49150.

Colombia, Congreso de la República. (2021). Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se

dictan disposiciones para la transición energética. Diario Oficial N.º 51753.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 4741 de 2005: Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Diario Oficial N.º 46137.

Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). Política nacional para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). MADS.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. MADS.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Decreto 284 de 2018: Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos — RAEE. Diario Oficial N.º 50525.

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular. MADS/MinCIT.

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas — RETIE. Diario Oficial N.º 52.716. <https://www.minenergia.gov.co>

- Colombia, Ministerio de Salud y Trabajo. (2019). Resolución 0312 de 2019: Por la cual se definen los estándares mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. Ministerio de Salud y Trabajo.
- Colombia, Ministerio de Trabajo. (1979). Resolución 2400 de 1979: Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.
- Colombia, Ministerio de Transporte. (2002). Decreto 1609 de 2002: Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera. Diario Oficial N.º 44893.
- Contreras Lisperguer, R., Muñoz Cerón, E., de la Casa Higuera, J., & Martín, R. D. (2020). Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: Open and closed-loop material flow scenarios. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 157–173. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.05.008>
- Das, H. J., & Sarmah, N. (2025). Photovoltaic module recycling: A review on material recovery methods and waste management approach. *Solar Energy*, 299, 113708. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113708>
- Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
- Dias, P., Schmidt, L., Monteiro Lunardi, M., Chang, N. L., Spier, G., Corkish, R., & Veit, H. (2021). Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination: Technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105241. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105241>

- Diez-Suarez, A. M., Martínez-Benavides, M., Manteca Donado, C., Blanes-Peiró, J. J., & Martínez Torres, E. J. (2024). Recycling of silicon-based photovoltaic modules: Mediterranean region insight. *Energies*, 17(23), 6015. <https://doi.org/10.3390/EN17236015>
- Escobar-Pérez, J., y Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en Medición*, 6(1), 27-36.
- EMIS. (2025). Colombia energy sector: Market intelligence report 2025. EMIS Insights. <https://www.emis.com>
- European Committee for Standardization. (2004). EN 12195-2: Load restraining on road vehicles — Safety — Part 2: Web lashing made from man-made fibres. CEN.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2024). Photovoltaics report (actualizado noviembre 2024). Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- Gahlot, R., Mir, S., & Dhawan, N. (2022). Recycling of discarded photovoltaic solar modules for metal recovery: A review and outlook for the future. *Energy and Fuels*, 36(24), 14554–14572. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.2C02847>
- Ganesan, K., & Valderrama, C. (2022). Anticipatory life cycle analysis framework for sustainable management of end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels. *Energy*, 245, 123207. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.123207>
- IEA. (2022). Special report on solar PV global supply chains. International Energy Agency. <https://www.iea.org>
- IEA. (2025). Renewables 2025: Analysis and forecast to 2030. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>

- IEA-PVPS. (2021). End-of-life management of photovoltaic panels: Trends in PV module recycling technologies (Report T12-10:2018, updated 2021). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://iea-pvps.org>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Atlas climatológico de Colombia. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). NTC 2775: Residuos sólidos. Terminología. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). NTC 2396: Calzado de protección. Requisitos y métodos de ensayo (3.^a actualización). ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (s.f.). NTC 1523: Cascos de seguridad industrial. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (s.f.). NTC 2037: Arnéses de seguridad. Requisitos. ICONTEC.
- International Electrotechnical Commission. (2018a). IEC 60900:2018: Live working — Hand tools for use up to 1 000 V AC and 1 500 V DC (4.^a ed., con corrigenda COR1:2019 y COR2:2020). IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/27266>
- International Electrotechnical Commission. (2018b). IEC 62446-1:2016+A1:2018: Photovoltaic (PV) systems — Requirements for testing, documentation and maintenance — Part 1: Grid connected systems (ed. consolidada). IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/22275>
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 6780:2003: Flat pallets for intercontinental materials handling — Principal dimensions and tolerances. ISO. <https://www.iso.org/standard/36079.html>

- International Organization for Standardization. (2015a). ISO 9001:2015: Quality management systems — Requirements (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- International Organization for Standardization. (2015b). ISO 14001:2015: Environmental management systems — Requirements with guidance for use (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001:2018: Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use (con Amendment 1:2024). ISO. <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- International Organization for Standardization. (2024). ISO 13997:2024: Protective clothing — Mechanical properties — Determination of resistance to cutting by sharp objects. ISO. <https://www.iso.org/standard/89073.html>
- International Organization for Standardization / Commission Internationale de l'Éclairage. (2025). ISO/CIE 8995-1:2025: Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor. ISO/CIE. <https://www.iso.org/standard/76342.html>
- International Renewable Energy Agency. (2023). Renewable power generation costs in 2022. IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- Iseri, F., Iseri, H., Iakovou, E., & Pistikopoulos, E. N. (2025). A circular economy systems engineering framework for waste management of photovoltaic panels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 64(30), 14986–14997. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.5C00588>
- Kabir, S. E., Mondal, M. N. I., Islam, M. K., Alnaser, I. A., Karim, M. R., Ibrahim, M. A., Sopian, K., & Akhtaruzzaman, M. (2023). Adoption and implementation of extended producer responsibility for sustainable management of end-of-life solar photovoltaic

- panels. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(Special Issue), 251–270. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2023.09.SI.15>
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel Psychology*, 28(4), 563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x>
- León Arcia, J. S., Forero García, F. A., & Murcia Cortés, D. R. (2026). Análisis bibliométrico de la gestión de residuos de paneles solares fotovoltaicos: tendencias, vacíos y perspectivas para Colombia [Manuscrito en revisión]. Universidad EAN.
- Li, J., Zhu, Q., Xu, X., & Liu, H. (2024). End-of-life management of solar photovoltaic panels: A review of strategies, challenges, and emerging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113914>
- Lim, M. S. W., He, D., Tiong, J. S. M., Hanson, S., Yang, T. C. K., Tiong, T. J., Pan, G. T., & Chong, S. (2022). Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130796. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130796>
- Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2021). Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126252>
- Mao, D., Yang, S., Ma, L., Ma, W., Yu, Z., Xi, F., & Yu, J. (2024). Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140320. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.140320>
- Mazzi, A., Barbiero, C., Miserocchi, F., Nisato, F., Tassinato, G., & Cerchier, P. (2024). Life cycle assessment of Al-Cu-Ag-Si recycling process from photovoltaic waste.

Resources, Conservation and Recycling, 211, 107885.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2024.107885>

Merino Soto, C., & Livia Segovia, J. (2009). Intervalos de confianza asimétricos para el índice la validez de contenido: Un programa Visual Basic para la V de Aiken. *Anales de Psicología*, 25(1), 159–161. <https://revistas.um.es/analesps/article/view/71631>

National Institute for Occupational Safety and Health. (1996). NIOSH guide to the selection and use of particulate respirators certified under 42 CFR 84 (DHHS/NIOSH Publication No. 96-101). CDC/NIOSH. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-101>

National Renewable Energy Laboratory. (2021). Solar futures study (NREL/TP-6A20-77901). U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77901.pdf>

Oteng, D., Zuo, J., & Sharifi, E. (2021). A scientometric review of trends in solar photovoltaic waste management research. *Solar Energy*, 224, 545–562.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.06.036>

Oteng, D., Zuo, J., & Sharifi, E. (2023). An evaluation of the impact framework for product stewardship on end-of-life solar photovoltaic modules: An environmental lifecycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137357.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137357>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 197, 38–71.

Piedrahita, A., Cárdenas, L. M., & Zapata, S. (2025). Solar panel waste management: Challenges, opportunities, and the path to a circular economy. *Energies*, 18(7), 1844. <https://doi.org/10.3390/EN18071844>

Skjong, R., y Wentworth, B. H. (2001). Expert judgment and risk perception. *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 537-544.

Unidad de Planeación Minero Energética. (2025). Plan de expansión de referencia — Generación y transmisión 2025. UPME. <https://www.upme.gov.co>

Wang, Q., Wang, Y., Huang, B., Wang, Y., Wang, X., Long, Y., & Dou, Y. (2025). Techno-economic and environmental assessment of closed-loop photovoltaic recycling in China. *Sustainable Production and Consumption*, 56, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/J.SPC.2025.02.025>

ANEXO

Anexo A. Comparación internacional de regulación de RAEE para residuos fotovoltaicos

Tabla A1

Comparación internacional de regulación para residuos de paneles fotovoltaicos

Región / País	Marco regulatorio aplicable	Enfoque de gestión	Nivel de desarrollo regulatorio
Unión Europea	Directiva RAEE 2012/19/EU actualizada y políticas de economía circular	Incluye explícitamente módulos fotovoltaicos dentro de los RAEE y establece responsabilidad extendida del productor (REP) para su recolección y reciclaje	Alto
Estados Unidos	Regulación ambiental descentralizada (principalmente estatal)	Algunos estados han desarrollado programas específicos para reciclaje de paneles solares y gestión de residuos fotovoltaicos	Medio
China	Políticas nacionales de reciclaje de tecnologías energéticas y programas piloto de recuperación de paneles solares	Desarrollo progresivo de programas de reciclaje asociados al crecimiento del mercado fotovoltaico	Medio
Colombia	Marco general de gestión de RAEE (programas posconsumo y responsabilidad extendida del productor)	Los paneles solares se incluyen dentro de categorías generales de residuos electrónicos, sin regulación específica diferenciada	Bajo

Nota. Elaboración propia con base en estudios sobre gestión de residuos fotovoltaicos y regulaciones internacionales (Mao et al., 2024; Bulińska et al., 2025; International Energy Agency, 2022).

El análisis comparativo presentado en la Tabla 1A permite ver con claridad que no todos los contextos regulatorios han avanzado al mismo ritmo. Mientras que algunas

regiones han incorporado de forma explícita los módulos fotovoltaicos dentro de sus marcos de gestión de residuos electrónicos, caso Unión Europea, otros países aún los abordan desde categorías más generales de RAEE, como en Estados Unidos y China. En el caso de la Unión Europea, por ejemplo, los paneles solares están incluidos dentro de la directiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, lo que implica obligaciones concretas para los productores en términos de recolección y reciclaje al final de su vida útil, por ello se clasifica en un nivel regulatorio alto. En el caso de Estados Unidos y China, la regulación referente a paneles solares existe, pero está en regulaciones descentralizadas y políticas públicas que no desarrollan al detalle lo referente al tema, por ello se clasifican en la Tabla 1A como nivel de desarrollo medio.

En contraste, en varios países donde la regulación sigue en proceso de consolidación como ocurre en buena parte de América Latina, incluido Colombia, estos equipos suelen gestionarse bajo esquemas más amplios que no siempre contemplan sus particularidades, por lo que como se puede ver en la Tabla 1A, se clasifica su nivel de desarrollo como bajo. Esto puede dificultar la implementación de estrategias específicas de tratamiento y recuperación de materiales. En ese sentido, avanzar hacia lineamientos regulatorios más diferenciados no solo permitiría anticipar el crecimiento de este flujo de residuos, sino también facilitar la incorporación efectiva de principios de economía circular en su gestión.

Anexo B. Comparación internacional de tecnologías de disposición y aprovechamiento de residuos fotovoltaicos.

Tabla 1B

Comparación de las tecnologías para la disposición y aprovechamiento de los residuos de los paneles solares.

Aspecto	China	Japón	EE. UU.	Brasil	Alemania	Singapur
Capacidad de reciclaje e infraestructura	Infraestructura robusta; capacidad instalada proyectada de 10–15 Mt/año para 2030. Domina >80 % de la cadena productiva mundial de módulos FV (IEA, 2025).	Centros especializados con tecnologías mecánicas, térmicas y químicas. Costo promedio de reciclaje: USD 150–400/módulo (Bošnjaković et al., 2023).	Instalaciones dispersas; sin sistema nacional integrado. Generación proyectada: ~1 Mt de residuos FV para 2050 (NREL, 2021).	Capacidad instalada FV: 25 GW (2024). Infraestructura de reciclaje incipiente; ausencia de gestores especializados en módulos FV.	Infraestructura madura. Tasa de recuperación exigida: ≥ 85 % en masa (Directiva RAEE 2012/19/UE). REP operativo desde 2015.	Capacidad limitada por superficie (<730 km ²). >90 % de RAEE exportados para procesamiento regional (Das & Sarmah, 2025).
Métodos de tratamiento predominantes	Mecánico (principal) + químico (hidrometalúrgico) con láser. Recuperación de Si, Ag y Cu a escala industrial.	Mecánico + térmico (pirólisis, 400–600 °C) + químico (lixiviación ácida). Mayor diversidad metodológica a escala comercial.	Mecánico predominante. Métodos térmicos y químicos en fase piloto. Sin estándar nacional de proceso.	Mecánico (desmontaje manual) + térmico (incineración para recuperación de metales). Limitada automatización.	Mecánico avanzado con separación magnética y por corrientes de Foucault. Recuperación de Al ≥ 95 % (Bulińska et al., 2025).	Mecánico básico en asociación con plantas regionales. Sin capacidad propia de pirólisis o hidrometalurgia.
Marco regulatorio e instrumentos de política	Sin regulación específica para residuos FV. Marco general de RAEE en desarrollo; dependencia de iniciativas voluntarias del sector.	Regulación específica para reciclaje FV desde 2016 (Ley de Energías Renovables). Financiamiento por fondo sectorial (~¥ 5 000/módulo).	49 estados sin regulación específica; Washington es el único con ley estatal (2023). Sin estándar federal de fin de vida.	Ley 12.305/2010 (PNRS) marco general; sin regulación diferenciada para módulos FV. Sector en proceso de estructuración.	Directiva RAEE 2012/19/UE con REP obligatoria. Módulos incluidos desde 2014; metas de recolección definidas por volumen instalado.	Programa nacional de RAEE (NEA, 2021). Módulos FV incluidos en regulación general; sin metas cuantitativas específicas.
I+D y economía circular	I+D activo en recuperación de Si de alta pureza y Ag. Foco en reducción de costos de proceso. Inversión pública + privada.	I+D orientado a eficiencia de ciclo cerrado; liderazgo en pirólisis a escala. Alianzas entre gobierno, universidades e industria.	I+D significativo (NREL, MIT, universidades). Énfasis en perovskitas y reciclaje de tercera generación. Financiación federal (IRA, 2022).	I+D incipiente; enfoque en adaptación de tecnologías internacionales al contexto local. Rol creciente de universidades públicas.	Fuerte I+D industrial y académico. Promotor activo de la Economía Circular europea; liderazgo en ecodiseño de módulos.	Inversión selectiva en I+D orientada a sostenibilidad urbana. Alianzas con Malasia y Australia para procesamiento compartido.

Aspecto	China	Japón	EE. UU.	Brasil	Alemania	Singapur
Ventajas principales	Escala industrial, apoyo gubernamental, integración vertical de la cadena productiva, alta concienciación pública.	Marco regulatorio estricto, tecnologías avanzadas, alianzas público-privadas consolidadas, recuperación de ciclo cerrado.	Innovación tecnológica, capital privado abundante, iniciativas de economía circular en expansión.	Creciente concienciación, potencial de creación de valor económico local, volumen instalado en rápido crecimiento.	Marco regulatorio integral (REP + Directiva RAEE), infraestructura madura, liderazgo en ecodiseño.	Enfoque estratégico en sostenibilidad, colaboración internacional, alta eficiencia en uso del territorio.
Limitaciones y brechas	Riesgo de contaminación en procesos de gran volumen, opacidad normativa, presión sobre recursos hídricos en hidrometalurgia.	Alto costo de reciclaje (USD 150–400/módulo), dependencia de importaciones de materiales, limitada escala para módulos FV específicamente.	Fragmentación regulatoria (49 estados), infraestructura dispersa, baja concienciación del consumidor final.	Tecnologías de reciclaje aún no rentables a escala local, baja participación en programas posconsumo, brecha de infraestructura.	Altos costos iniciales de inversión, regulación compleja para operadores pequeños, dependencia de exportaciones para ciertos materiales.	Mercado nacional muy reducido, pequeña escala de operación, alta dependencia de exportación de RAEE para su tratamiento.
Plantas de Reciclaje	Plantas con procesos químicos y mecánicos láser avanzados.	Centros de reciclaje especializados (reciclaje convencional y con tecnología avanzada).	Instalaciones especializadas.	Métodos electroquímicos.	Infraestructura de reciclaje robusta (métodos avanzados).	Probable colaboración con plantas regionales o en desarrollo.
Tratamiento Térmico	N/A	Utiliza altas temperaturas para descomponer paneles (pirólisis e incineración).	N/A	Incineración utilizada para recuperar metales valiosos y silicio (lixiviación ácida y extracción por solventes).	N/A	N/A
Tratamiento Químico	N/A	Utilizado para extraer metales valiosos (lixiviación ácida).	N/A	N/A	N/A	N/A
Tratamiento Mecánico	N/A	Trituración y separación mecánica (molienda).	N/A	Desmontaje mecánico para separar componentes (trituration, técnica de molienda).	N/A	N/A
Alianzas Público-Privadas	Colaboraciones comunes.	N/A	Colaboraciones comunes.	Colaboraciones comunes.	Colaboraciones con el sector privado.	Trabaja estrechamente con empresas privadas.

Aspecto	China	Japón	EE. UU.	Brasil	Alemania	Singapur
Iniciativas de Economía Circular	Promoviendo una economía circular.	Promoviendo una economía circular.	Iniciativas implementadas.	Iniciativas implementadas.	Promueve activamente principios de economía circular.	Interés en el modelo de economía circular.
Minería Urbana	Siendo explorada.	N/A	N/A	N/A	N/A	Adaptada para encajar en la densidad urbana.
Colaboración Internacional	Participa en colaboraciones internacionales.	Colabora con socios internacionales.	Participa en asociaciones.	Participa en asociaciones.	Participa en cooperación.	Conocida por colaboraciones internacionales.
Investigación y Desarrollo	I+D en curso para reciclaje eficiente.	I+D para reciclaje eficiente.	Actividad significativa de I+D.	N/A	Fuerte enfoque en I+D.	Inversión en I+D.
Educación y Concienciación	Esfuerzos implementados.	Campañas de concienciación pública.	Campañas para aumentar concienciación.	Campañas para aumentar concienciación.	Esfuerzos educativos.	Campañas educativas.
Ventajas	Infraestructura de reciclaje robusta, fuerte apoyo gubernamental, colaboración extensa, alta concienciación pública.	Tecnologías de reciclaje avanzadas, regulaciones estrictas, recuperación de ciclo cerrado, alianzas público-privadas.	Impulsada por la innovación, alianzas público-privadas, iniciativas de economía circular, alta concienciación pública.	Reduciendo impacto ambiental y residuos de vertederos. Creando valor económico a través de recuperación de material.	Marco regulatorio integral, infraestructura avanzada, REP, apoyo público.	Enfoque estratégico en sostenibilidad, inversión en tecnología, concienciación pública, colaboración internacional.
Limitaciones	Contaminación potencial, falta de transparencia, gestión de grandes volúmenes de residuos electrónicos.	Alto costo de reciclaje, dependencia de importaciones.	Falta de políticas estandarizadas, infraestructura fragmentada, complejidad de la gestión de residuos electrónicos.	Desarrollo de tecnologías de reciclaje rentables. Aumento de concienciación y participación en programas de reciclaje.	Altos costos de inversión inicial, panorama regulatorio complejo, dependencia de exportaciones.	Mercado nacional limitado, pequeña escala de operaciones, dependencia de importaciones.

Nota. Adaptada de Goh et al. (2024).

Se destacan varios aspectos de la Tabla 1B. En primer lugar, en cuanto a la brecha de costos y escala, Japón, el país con el sistema de reciclaje FV más maduro entre las economías analizadas, registra costos de USD 150–400 por módulo un rango que contrasta con la ausencia de sistemas equivalentes en Colombia y América Latina. Este dato es útil para contextualizar por qué la guía técnica propuesta en el artículo adopta un enfoque de implementación progresiva y no exige infraestructura de pirólisis desde la etapa inicial.

En cuanto a la disparidad regulatoria como variable explicativa, La presencia de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) diferencia claramente a Alemania y Japón del resto: ambos tienen metas cuantitativas de recuperación ($\geq 85\%$ en Alemania; fondo por módulo en Japón), mientras que EE. UU. y Brasil carecen de regulación federal específica condición que Colombia comparte. Esta comparación refuerza la pertinencia de la guía como instrumento técnico en ausencia de regulación sectorial.

Por otro lado, respecto a la convergencia metodológica en el tratamiento mecánico, el método mecánico es el más extendido en todos los países analizados, incluyendo economías avanzadas como Alemania y EE. UU. Esta convergencia respalda la decisión metodológica del artículo de priorizar el proceso mecánico como ruta principal en la guía técnica para Colombia, frente a alternativas térmicas o químicas que requieren mayor infraestructura y regulación ambiental específica.

También es relevante destacar el caso de Singapur, con más del 90 % de RAEE exportados para tratamiento y un mercado nacional muy reducido, ilustra las limitaciones de los sistemas de reciclaje en contextos geográficos o económicos restringidos un paralelismo útil con los escenarios de Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia, donde la logística multimodal y el almacenamiento temporal obligatorio son condiciones estructurales, no excepcionales.

Por último, resaltar la proyección de más o menos 1 millón de toneladas métricas de residuos FV en EE. UU. para 2050 (NREL, 2021) y la estimación de la IEA de 78 Mt globales para el mismo año establecen la escala del problema. Para Colombia, la UPME proyecta 4,4 GW adjudicados para 2027–2028; con un peso promedio de 22 kg/módulo y 500 W de potencia pico, esto equivale a ~193 000 módulos, con un primer pico de residuos esperado entre 2050 y 2055.