Circular Economy Applied to Electronic Waste Management in Engineering Universities: Sustainable Strategies in Latin America

Abstract– ***Engineering universities generate disproportionately large volumes of waste electrical and electronic equipment (WEEE) compared with other academic institutions, owing to their intensive use of laboratory equipment, computing infrastructure, and specialized electronic instrumentation. However, most Latin American engineering universities lack formal WEEE management systems, which contributes to environmental degradation and to the loss of valuable secondary materials. This paper examines the application of circular economy (CE) principles to WEEE management in Latin American engineering universities through a multi-site study involving 47 institutions in 11 countries, conducted between 2022 and 2024. The study identifies prevailing management practices, quantifies waste generation by equipment category, assesses the applicability of five CE strategies (refuse, reduce, reuse, remanufacture, recycle), and proposes the GREENU framework for sustainable WEEE governance in higher education institutions. Engineering universities generate an average of 4,960 kg of WEEE per year, of which only 18.3% is managed through certified recycling channels. Pilot implementations suggest that combined CE strategies could divert up to 73% of WEEE from landfill (estimated range: 54%–77%) and generate secondary value streams estimated at USD 127,000 per year for a medium-sized institution, subject to the uncertainty discussed in the paper.***

Keywords-- circular economy; e-waste; engineering universities; higher education; Latin America

Economía Circular Aplicada a la Gestión de Residuos Electrónicos en Universidades de Ingeniería: Estrategias Sostenibles en América Latina

Douglas Aguilar[1]; Wendy Martinez[2]
[1,2]*Universidad Evangélica de El Salvador, El Salvador,* douglas.aguilar@uees.edu.sv, wendy.martinez@uees.edu.sv

Resumen*– Las universidades de ingeniería generan volúmenes desproporcionadamente grandes de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en relación con otras instituciones académicas, debido al uso intensivo de equipos de laboratorio, infraestructura informática e instrumentación electrónica especializada. Sin embargo, la mayoría de las universidades de ingeniería latinoamericanas carece de sistemas formalizados de gestión de RAEE, lo que contribuye a la degradación ambiental y a la pérdida de materiales secundarios valiosos. Este artículo analiza la aplicación de los principios de la economía circular (EC) a la gestión de RAEE en universidades de ingeniería de América Latina, a partir de un estudio multisitio con 47 instituciones de 11 países, realizado entre 2022 y 2024. La investigación identifica las prácticas prevalecientes de gestión, cuantifica la generación de residuos por categoría de equipo, evalúa la aplicabilidad de cinco estrategias de EC (rechazar, reducir, reutilizar, remanufacturar y reciclar) y propone el marco GREENU para la gobernanza sostenible de RAEE en instituciones de educación superior. Las universidades de ingeniería generan en promedio 4,960 kg de RAEE al año, de los cuales solo el 18.3% se gestiona a través de canales de reciclaje certificados. Las implementaciones piloto sugieren que la combinación de estrategias de EC podría desviar de los vertederos hasta un 73% de los RAEE (rango estimado: 54%–77%) y generar flujos de valor secundario estimados en USD 127,000 anuales para una institución de tamaño medio, sujetos a la incertidumbre que se discute en el artículo.

Palabras clave*-- economía circular; RAEE; universidades de ingeniería; educación superior; América Latina

I. Introducción

El crecimiento sostenido del consumo de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) ha generado una crisis global de residuos. El Monitor Global de RAEE 2024 reporta que en 2022 se generaron 62 millones de toneladas métricas de RAEE, de las cuales solo el 22.3% fue recolectado y reciclado formalmente de manera documentada [1]. En América Latina la situación es particularmente crítica: el monitor regional estimó que los 13 países analizados generaron alrededor de 1.3 millones de toneladas de RAEE en 2019, y que apenas un 3% fue recolectado y gestionado de forma ambientalmente adecuada [2], lo que refleja marcos regulatorios incipientes, infraestructura técnica limitada y mecanismos débiles de responsabilidad extendida del productor (REP).

Las universidades ocupan una posición singular en este panorama. Por su tamaño y complejidad funcionan como "pequeñas ciudades", con flujos de residuos propios que requieren auditoría, segregación en la fuente y alianzas con gestores externos [3]. Las universidades de ingeniería, en particular, son a la vez grandes generadoras de RAEE, por los ciclos de obsolescencia de sus equipos de laboratorio, infraestructura informática e instrumentación especializada, y potenciales centros para desarrollar y demostrar soluciones de gestión sostenible. La oportunidad pedagógica de institucionalizar prácticas de economía circular dentro de la formación en ingeniería añade una dimensión de valor que va más allá del cumplimiento ambiental.

La economía circular (EC) ofrece una alternativa sistémica al modelo lineal de "extraer, fabricar y desechar", al enfatizar el diseño que elimina los residuos, la circulación de productos y materiales en su mayor valor y la regeneración de los sistemas naturales [4], [5]. Aplicados a la gestión universitaria de RAEE, estos principios se traducen en políticas que extienden la vida útil de los equipos, facilitan la recuperación y remanufactura de componentes, establecen canales formales de recolección y reciclaje certificado, y generan ingresos a partir de los materiales secundarios recuperados.

Este artículo aborda la escasez de evidencia empírica sobre la aplicación de la EC a la gestión de RAEE en universidades de ingeniería latinoamericanas. Sus aportes son: (1) una línea base cuantitativa de la generación de RAEE por categoría de equipo; (2) la evaluación de las prácticas actuales frente a los principios de EC; (3) la propuesta y validación del marco GREENU con 24 indicadores de autoevaluación institucional; y (4) una estimación, con sus supuestos explícitos, del potencial ambiental y económico de la implementación sistemática de la EC.

II. Antecedentes y Trabajos Relacionados

A. Principios de economía circular y RAEE

La Fundación Ellen MacArthur plantea tres principios fundamentales de la EC: eliminar residuos y contaminación, hacer circular productos y materiales en su mayor valor y regenerar la naturaleza [4]. La literatura ha operacionalizado estos principios en jerarquías de estrategias de retención de valor, conocidas como escaleras "R", que priorizan la extensión de la vida útil del producto (rechazar, reducir, reutilizar) sobre la recuperación de materiales (remanufacturar, reciclar) [6], [7]. Esta jerarquía es coherente con la propuesta de Stahel de una economía basada en el uso prolongado de los bienes y en la conservación de su valor [8].

Los RAEE contienen concentraciones significativas de materiales secundarios valiosos, como oro, plata, paladio, cobre y elementos de tierras raras, junto con sustancias peligrosas como plomo, mercurio, cadmio y retardantes de llama bromados, que representan riesgos ambientales y sanitarios graves cuando se gestionan de forma inadecuada [9], [10]. Por ello, las estrategias que mantienen los equipos en uso y

canalizan los residuos hacia gestores certificados generan beneficios tanto ambientales como económicos.

B. RAEE en instituciones de educación superior

Las instituciones de educación superior (IES) han recibido una atención limitada en la literatura sobre gestión de RAEE, centrada mayoritariamente en flujos municipales o en marcos de política nacional [10]. Los estudios disponibles muestran que las universidades pueden reducir significativamente sus residuos mediante auditorías periódicas, programas de reutilización y donación, infraestructura de segregación y alianzas con gestores autorizados [3], y que las intervenciones institucionales de reciclaje de RAEE reciben una valoración positiva de la comunidad universitaria cuando se acompañan de políticas de responsabilidad compartida [11]. En América Latina, la evidencia específica sobre la gestión de RAEE en universidades es escasa, y el contexto nacional de baja recolección formal [2] sugiere que buena parte de estos residuos se canaliza por vías informales, vacío que este estudio busca cubrir.

III. METODOLOGÍA

A. Diseño del estudio y selección de instituciones

El estudio empleó un diseño transversal multisitio que combina la medición cuantitativa del inventario de RAEE con la evaluación cualitativa de las prácticas institucionales. Participaron 47 universidades con oferta de ingeniería de 11 países latinoamericanos, entre enero de 2022 y diciembre de 2024: Brasil (9), México (8), Colombia (6), Argentina (5), Chile (4), Perú (4), El Salvador (3), Ecuador (3), Bolivia (2), Guatemala (2) y Honduras (1). Las instituciones se seleccionaron mediante describir el procedimiento: p. ej., convocatoria a través de redes universitarias de sostenibilidad, criterios de inclusión (facultad de ingeniería con al menos N laboratorios, unidad de TI centralizada, disposición a permitir auditorías) y número de instituciones invitadas frente a participantes. Al tratarse de una muestra no probabilística, los resultados describen a instituciones con interés previo en sostenibilidad y no deben extrapolarse sin cautela al conjunto de la región.

B. Auditorías de inventario

Los datos de generación de RAEE se recolectaron mediante auditorías de inventario físico realizadas por asistentes de investigación capacitados, durante periodos estandarizados de seis meses en cada institución, siguiendo el protocolo adaptado de las directrices de medición del WEEE Forum (indicar la referencia exacta del protocolo) y los criterios de clasificación de las guías estadísticas internacionales de RAEE [12]. Cada auditoría registró el número de unidades y la masa de los equipos dados de baja o almacenados en espera de disposición, y la masa semestral se anualizó multiplicando por dos. Indicar el número de asistentes, la capacitación recibida (horas) y el procedimiento de control de calidad de los registros.

El protocolo clasificó los equipos en seis categorías: computadoras y laptops; dispositivos móviles y tabletas; impresoras y periféricos; equipos de laboratorio y científicos; equipos de red y telecomunicaciones; y cables, baterías y accesorios. Para la categoría de equipos de red y telecomunicaciones solo fue posible registrar el número de unidades y su destino final, pero no la masa, porque estos equipos se retiran mediante contratos de reemplazo con los proveedores; por ello, el total en masa de la Tabla I corresponde a las cinco categorías con registro de masa.

C. Entrevistas y revisión documental

La evaluación de las prácticas institucionales empleó entrevistas estructuradas con responsables de sostenibilidad, gerentes de TI, coordinadores de laboratorio y responsables de adquisiciones (n = __ entrevistas en total; entre __ y __ por institución; duración media de __ min), complementadas con la revisión de políticas de gestión de residuos, registros de adquisiciones y documentación de disposición final. Las entrevistas se analizaron mediante codificación abierta y axial siguiendo los procedimientos de la teoría fundamentada [13].

D. Implementaciones piloto

La aplicabilidad de las estrategias de EC se evaluó mediante implementaciones piloto en 12 instituciones que se ofrecieron voluntariamente (indicar los países, la duración del piloto en meses y qué estrategias implementó cada institución). En cada piloto se midió la masa de RAEE evitada o desviada de la disposición informal y del vertedero con respecto a la línea base de la propia institución. La puntuación de aplicabilidad de la Tabla II (escala de 1 a 5) corresponde al promedio de la valoración de los responsables institucionales de los pilotos sobre viabilidad técnica, costo y aceptación.

E. Desarrollo del marco GREENU

El marco GREENU (Gobernanza, Reducción, Extensión, Educación, Red y Valorización) se desarrolló en tres etapas: (1) síntesis de la literatura sobre marcos de EC aplicables a RAEE institucionales; (2) análisis de los datos cualitativos de las entrevistas; y (3) un taller participativo de validación con responsables de sostenibilidad de 18 universidades participantes, celebrado en Lima, Perú, en 2024. El marco se operacionalizó como un instrumento de autoevaluación institucional de 24 indicadores (cuatro por dimensión), con consistencia interna adecuada (alfa de Cronbach = 0.87) [14] y confiabilidad interevaluador buena (CCI = 0.82) [15].

IV. RESULTADOS

A. Línea base de generación de RAEE

TABLA I
Generación de RAEE por categoría en universidades de ingeniería (kg/año, n=47)

Categoría	**Media (kg/año)**	**Desv. est.**	**% del total**	**% reciclaje formal**
Computadoras y laptops	1,840	±620	37.1%	24.3%
Equipos de lab. y científicos	1,120	±480	22.6%	16.8%
Impresoras y periféricos	950	±310	19.2%	12.1%
Dispositivos móviles y tabletas	620	±195	12.5%	8.4%
Cables, baterías y accesorios	430	±210	8.7%	14.7%
Equipos de red y telecom.*	—	—	—	11.2%
Total (cinco categorías)	4,960	±1,815	100%	18.3%

* Categoría registrada solo en unidades y destino final; no se incluye en el total en masa. La desviación estándar del total debe calcularse sobre los totales por institución (no como suma de las desviaciones por categoría), y el % ponderado por masa de las cinco categorías resulta 17.5%; verificar ambos valores.

La Tabla I presenta la línea base de generación de RAEE en las 47 universidades participantes. La generación anual promedio de 4,960 kg por institución supera las estimaciones disponibles para IES no técnicas (aproximadamente 1,800 kg/año; indicar la fuente), lo que confirma la mayor carga de RAEE asociada a la formación en ingeniería. Las computadoras y laptops constituyen la mayor categoría (37.1% de la masa total), lo que refleja los ciclos de obsolescencia impulsados por los requisitos de software y de rendimiento computacional.

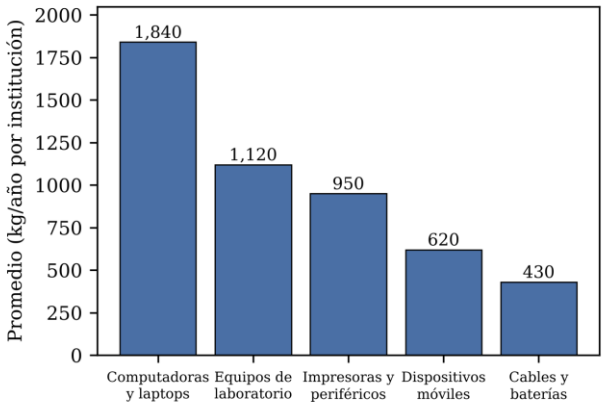


Fig. 1. Generación promedio de RAEE por categoría en universidades de ingeniería (kg/año por institución, n=47)

Los equipos de laboratorio y científicos (22.6%) constituyen la segunda categoría, con una alta variación entre instituciones (±480 kg/año). Los dispositivos móviles (12.5%) y los accesorios (8.7%) presentan tasas bajas de reciclaje formal (8.4% y 14.7%, respectivamente), probablemente porque su tamaño reducido y su circulación informal dificultan su seguimiento en los sistemas institucionales. En conjunto, solo el 18.3% de los RAEE generados ingresa a canales formales de reciclaje certificado; el resto se elimina por canales informales (42.1%), se dispone como residuo general (28.7%) o se acumula en almacenamiento en espera de disposición (10.9%).

B. Evaluación de estrategias de EC

TABLA II
Evaluación de estrategias de EC para la gestión de RAEE universitarios (pilotos, n=12)

Estrategia de EC	**Reducción potencial**	**Costo de implementación**	**Aplicabilidad (1–5)**
Rechazar (política de compras)	15–25%	Bajo	4.2
Reducir (extensión de vida útil)	20–35%	Bajo–medio	4.0
Reutilizar (redistribución interna)	25–40%	Bajo	4.5
Remanufacturar (recuperación de componentes)	10–20%	Alto	2.8
Reciclar (canales certificados)	Fracción residual	Medio	3.9

La Tabla II resume la evaluación de las cinco estrategias a partir de las implementaciones piloto. La reutilización, que comprende programas formalizados de redistribución interna de equipos, bases de datos de intercambio intrauniversitario y programas estructurados de donación a centros de educación básica y media, obtiene la mayor puntuación de aplicabilidad (4.5/5.0) por su bajo costo y sus beneficios ambientales inmediatos. El rechazo, entendido como políticas de adquisición que favorecen equipos duraderos, reparables y actualizables de fabricantes con compromisos de REP, logra una prevención en la fuente del 15–25% con un costo mínimo.

Las estrategias de reducción en la fuente actúan sobre fracciones sucesivas del flujo de residuos, por lo que su efecto combinado no es aditivo. La reducción combinada se estimó de forma multiplicativa como

$$R = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2)(1 - r_3)(1 - r_4) \quad (1)$$

donde r_i es la reducción atribuible a rechazar, reducir, reutilizar y remanufacturar, respectivamente; la fracción remanente se canaliza hacia el reciclaje certificado. Con los límites inferior, central y superior de los rangos de la Tabla II, (1) arroja reducciones de 54%, 67% y 77%, respectivamente. El valor de 73% reportado en este estudio corresponde a la reducción observada en las instituciones piloto que implementaron las cinco estrategias de forma completa (indicar cuántas) y se encuentra dentro del rango teórico; debe interpretarse como un potencial alcanzable en condiciones favorables y no como un valor esperado para cualquier institución.

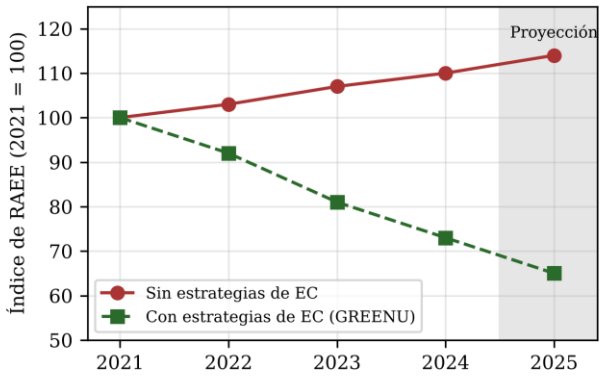


Fig. 2. Tendencia del índice de generación de RAEE con y sin implementación de estrategias de EC (2021 = 100)

La Fig. 2 compara las trayectorias de generación de RAEE con y sin estrategias de EC. El año base 2021 se construyó a partir de los registros institucionales de inventario y bajas del año previo al inicio del estudio; los valores de 2022 a 2024 corresponden a las mediciones de las instituciones piloto (con EC) y de las instituciones sin intervención (sin EC), y el valor de 2025 es una proyección basada en la tendencia observada y en factores de reducción tomados de la literatura. Sin intervención, la generación crece un 14% hacia 2025 debido a la mayor adopción tecnológica y al aumento de la matrícula; con la implementación de EC alineada con GREENU, la generación se reduce un 35% respecto a la línea base, lo que equivale a evitar aproximadamente 1,740 kg de RAEE por institución al año. Cabe distinguir ambos indicadores: el 35% se refiere a la reducción de la generación total, mientras que el 73% se refiere a la fracción de RAEE que deja de llegar a vertederos o a canales informales, al sumarse el reciclaje certificado de la fracción remanente.

C. El marco GREENU

TABLA III
Dimensiones e indicadores del marco GREENU

Dimensión	Propósito	Ejemplos de indicadores
Gobernanza	Responsabilidades y normas institucionales	Política de RAEE aprobada; responsable designado; registro de bajas; contratos con gestores certificados
Reducción	Prevenir la generación en la fuente	Criterios de durabilidad y reparabilidad en compras; cláusulas de REP; consolidación de equipos
Extensión	Prolongar la vida útil	Vida útil media por categoría; tasa de reparación; actualización de componentes
Educación	Integrar la EC en la formación	Asignaturas o proyectos con contenido de RAEE; estudiantes en recuperación de equipos
Red	Cooperación interinstitucional	Convenios de intercambio de equipos; donaciones; participación en redes de gestión
Valorización	Recuperar valor económico	% en reciclaje certificado; ingresos por materiales; costos de disposición evitados

Verificar que los ejemplos de indicadores coincidan con los 24 ítems del instrumento validado.

La Tabla III presenta las seis dimensiones del marco GREENU. Su aporte consiste en traducir los principios generales de la EC en un instrumento de autoevaluación que permite a cada universidad diagnosticar su nivel de madurez en la gestión de RAEE, priorizar acciones y medir su progreso. Cada indicador se valora en una escala ordinal, y el puntaje por dimensión orienta la secuencia de implementación: las dimensiones de Gobernanza y Reducción, de bajo costo, constituyen el punto de partida recomendado, mientras que la Valorización requiere alianzas con gestores certificados y mercados de materiales secundarios.

V. Discusión

Los hallazgos ofrecen una base de evidencia para la adopción sistemática de la EC en las universidades de ingeniería latinoamericanas. Que solo el 18.3% de los RAEE generados ingrese a canales formales de reciclaje, pese a la creciente legislación nacional en la materia, revela una brecha de cumplimiento y gobernanza que expone a las instituciones a riesgos regulatorios y contribuye a la contaminación asociada a la disposición inadecuada [9], [2].

El análisis económico sugiere que la implementación integral de la EC puede generar un valor neto positivo. El beneficio estimado de USD 127,000 anuales para una universidad de ingeniería de tamaño medio se compone de (a) ingresos por recuperación de materiales secundarios: USD __; (b) costos de disposición evitados: USD __; (c) ahorro en adquisiciones por extensión de vida útil y reutilización: USD __; y (d) incentivos fiscales: USD __. Estos valores se calcularon con indicar la fuente de los precios de materiales, el tipo de cambio y el año de referencia, y la definición de "tamaño medio", p. ej., matrícula de ingeniería y número de laboratorios. La estimación está sujeta a una incertidumbre considerable: los precios de los metales recuperables son volátiles, los costos de disposición y los incentivos fiscales varían entre países, y el ahorro en adquisiciones depende de la política de renovación de cada institución. Por ello, el valor debe leerse como un orden de magnitud para una institución con las características descritas y acompañarse de un rango de sensibilidad, por ejemplo con precios de materiales ±30%.

Las universidades de ingeniería poseen ventajas particulares para implementar la EC: la experiencia docente en ciencia de materiales, ingeniería ambiental y ecología industrial aporta capacidad de asesoría interna; los estudiantes constituyen un recurso formable para la evaluación de equipos, la recuperación de componentes y la remanufactura; y la infraestructura de investigación permite desarrollar tecnologías de gestión de RAEE aplicables al contexto regional. La aplicabilidad del marco es mayor en instituciones con una unidad de TI centralizada y con registros de inventario, y menor en aquellas donde la adquisición de equipos está descentralizada por facultad o depende de proyectos con financiamiento externo.

El estudio presenta limitaciones. La muestra es no probabilística y está sesgada hacia instituciones con interés previo en sostenibilidad; la anualización de auditorías semestrales puede no captar la estacionalidad de las bajas de equipos; los pilotos se realizaron en instituciones voluntarias, lo que puede sobreestimar la reducción alcanzable; y las proyecciones a 2025 dependen de supuestos sobre el crecimiento de la matrícula y la adopción tecnológica.

VI. Conclusiones

Este artículo presentó una evaluación empírica de la generación y gestión de RAEE en 47 universidades de ingeniería latinoamericanas y propuso el marco GREENU para su gobernanza institucional basada en la EC. Los hallazgos principales son: (1) las universidades de ingeniería generan en promedio 4,960 kg de RAEE al año; (2) solo el 18.3% ingresa a canales formales de reciclaje; (3) la combinación de estrategias de EC puede desviar de los vertederos hasta un 73% de los RAEE, dentro de un rango estimado de 54% a 77%; y (4) la implementación integral de la EC podría generar un beneficio económico neto del orden de USD 127,000 anuales para una institución de tamaño medio, sujeto a la variabilidad de precios y de contexto discutida.

Las prioridades de investigación futura incluyen realizar análisis de ciclo de vida de la implementación de GREENU en contextos institucionales diversos; desarrollar mercados regionales de materiales secundarios que mejoren la viabilidad económica de la recuperación de componentes; crear plataformas de intercambio de equipos entre instituciones; y conformar una red latinoamericana de universidades para la gestión de RAEE. La armonización regional de la legislación sobre RAEE y de los marcos de responsabilidad extendida del productor será una condición habilitadora para acelerar la adopción de la EC en las universidades.

REFERENCIAS

[1] C. P. Baldé *et al.*, *The Global E-waste Monitor 2024*. Geneva, Switzerland/Bonn, Germany: International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024.

[2] M. Wagner, C. P. Baldé, V. Luda, I. C. Nnorom, R. Kuehr, and G. Iattoni, *Regional E-waste Monitor for Latin America: Results for the 13 Countries Participating in Project UNIDO-GEF 5554*. Bonn, Germany: UNU/UNITAR SCYCLE, 2022.

[3] R. Giurea, M. Carnevale Miino, V. Torretta, and E. C. Rada, "Approaching sustainability and circularity along waste management systems in universities: An overview and proposal of good practices," *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, Art. no. 1363024, 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1363024.

[4] Ellen MacArthur Foundation, "Completing the picture: How the circular economy tackles climate change," Ellen MacArthur Foundation, Cowes, U.K., 2019.

[5] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, pp. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[6] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, and A. Hanemaaijer, *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*. The Hague, The Netherlands: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.

[7] D. Reike, W. J. V. Vermeulen, and S. Witjes, "The circular economy: New or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 135, pp. 246–264, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.

[8] W. R. Stahel, "The circular economy," *Nature*, vol. 531, no. 7595, pp. 435–438, 2016, doi: 10.1038/531435a.

[9] V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr, and G. Bel, *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential*. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR SCYCLE, ITU, and ISWA, 2020.

[10] A. Kumar, M. Holuszko, and D. C. R. Espinosa, "E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 32–42, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.01.018.

[11] F. A. Galleto Jr., M. G. Dayaday, and F. G. De Leon, "E-waste management in higher education institutions: Insights and policy recommendations," *Int. J. Public Health Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 919–926, 2025, doi: 10.11591/ijphs.v14i2.25020.

[12] V. Forti, K. Baldé, and R. Kuehr, *E-waste Statistics: Guidelines on Classification, Reporting and Indicators*, 2nd ed. Bonn, Germany: United Nations University, ViE-SCYCLE, 2018.

[13] A. Strauss and J. Corbin, *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*, 2nd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE, 1998.

[14] L. J. Cronbach, "Coefficient alpha and the internal structure of tests," *Psychometrika*, vol. 16, no. 3, pp. 297–334, 1951, doi: 10.1007/BF02310555.

[15] T. K. Koo and M. Y. Li, "A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research," *J. Chiropr. Med.*, vol. 15, no. 2, pp. 155–163, 2016, doi: 10.1016/j.jcm.2016.02.012.