

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.39.1.006.38>

Desarrollo de un contenedor y clasificador automático de material reciclable como estrategia de economía circular en el contexto educativo

Development of an Automatic Container and Sorter for Recyclable Material as a Circular Economy Strategy in the Educational Context

EDNA YAMILE SALINAS OSUNA *
JHONIER DAVID ANACONA ORTIZ **
OSCAR FABIÁN PATIÑO PERDOMO ***
EDWIN EDUARDO MILLÁN ROJAS ****

*Universidad de la Amazonia (UDLA). Facultad de Ingeniería. Estudiante Ingeniería Agroecológica. e.salinas@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8073-6947>

** Universidad de la Amazonia (UDLA). Facultad de Ingeniería. Estudiante Ingeniería de Sistemas. jh.anacona@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9011-9835>

*** Universidad de la Amazonia (UDLA). Docente asistente. Facultad de Ingeniería, programa Ingeniería de Sistemas. Especialista en Gestión de Sistemas y Tecnologías de la Información en la Empresa. o.patino@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6433-0402>

**** Universidad de la Amazonia (UDLA). Docente asociado. Facultad de Ingeniería, programa Ingeniería de Sistemas. Doctor en Ingeniería. Investigador Asociado (I) de Minciencias. e.millan@udla.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4258-4601>

Correspondencia: Edna Yamile Salinas Osuna. Universidad de la Amazonia (UDLA). Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Agroecológica. Teléfono celular: 320-263-5978. Dirección: Barrio Buenos Aires Calle 18ª, Florencia-Caquetá. e.salinas@udla.edu.co



Resumen

El objetivo de esta investigación fue realizar una caracterización de los residuos sólidos reciclables producidos en la Universidad de la Amazonia y desarrollar un contenedor y clasificador automático de este tipo de residuos, para contribuir por medio de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) al proceso de sostenibilidad ambiental ligado al concepto de *economía circular* en el ámbito educativo. La metodología definida se dividió en cinco fases que corresponden al conocimiento del manejo de residuos sólidos de los usuarios de las cafeterías, caracterización de los residuos sólidos, diseño y construcción del contenedor, entrenamiento del sistema de inteligencia artificial (IA) y prueba interna *beta test*, tras lo cual se obtuvo como resultado una generación total de residuos plásticos a la semana de 66 kg, lo que representa un ingreso económico aproximado de \$138.000. Además, se desarrolló un contenedor y clasificador automático capaz de reconocer y almacenar botellas plásticas empleando una red neuronal artificial. Como conclusión, el reciclaje de residuos plásticos en una institución de educación superior (IES) aporta a la sostenibilidad ambiental. Además, el desarrollo de tecnologías como el contenedor y clasificador automático permite optimizar la selección y clasificación de elementos reciclables de forma rápida y segura.

Palabras clave: automatización, desarrollo sostenible, inteligencia artificial, saneamiento.

Abstract

The objective of this research was to characterize the recyclable solid waste produced at the University of the Amazon, and to develop an automatic container and classifier for this type of waste, to contribute through ICT to the process of environmental sustainability linked to the concept of circular economy in education. The defined methodology was divided into five phases that correspond to the knowledge of the solid waste management of the cafeteria users, characterization of solid waste, design and construction of the container, training of the artificial intelligence (AI) system, and internal beta-test. Test. Obtaining, as a result, a total generation of plastic waste per week of 66 Kg, which represents an approximate economic income of \$ 138,000 COP. In addition, an automatic container and sorter, capable of recognizing and storing plastic bottles, was developed using an artificial neural network. In conclusion, the recycling of plastic waste within an educational institution contributes to environmental sustainability, in addition to the development of technologies such as the container and automatic sorter, they allow to optimize the selection and classification of recyclable elements, quickly and safely.

Keywords: artificial intelligence, automation, sanitation, sustainable development.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo socioeconómico de la humanidad se basa principalmente en un sistema lineal [1], el cual ha sido y sigue siendo la principal causa de la degradación de los ecosistemas porque se basa en la fabricación, el consumo y el desecho de productos, para los cuales se emplea materia prima virgen que al final de su ciclo productivo termina como residuo, y se convierte en un sistema insostenible a causa de las pérdidas de recursos y del desaprovechamiento de residuos potencialmente útiles [2]. En atención a que la población mundial se encuentra en aumento y la afectación a ecosistemas acuáticos y terrestres es cada vez mayor debido al incremento en la producción y acumulación de desechos [3], es importante incentivar a las personas desde los centros educativos a contribuir con la disminución de la contaminación poniendo en práctica alternativas como el reciclaje de cierto tipo de residuos que pueden ser empleados como materia prima en la fabricación de productos nuevos para el mercado, y de esta manera generar un beneficio económico y socioambiental para la población [4].

Actualmente, gracias a los avances tecnológicos se han desarrollado diversos instrumentos útiles para el proceso de clasificación y reciclaje de residuos sólidos por medio de la implementación de la técnica de inteligencia artificial (IA) en la economía circular, que es un modelo económico que surge como alternativa al sistema lineal y que, además, busca que la mayor parte de los materiales empleados en la fabricación de bienes de consumo sean biodegradables para que al final de su vida útil puedan volver a la naturaleza sin causar alteraciones, y en los casos que no sea posible, el objetivo es reincorporar los residuos al ciclo de producción para crear nuevos productos [5].

Al considerar lo anterior, se planteó el interrogante ¿cómo contribuir a la sostenibilidad ambiental desde el reciclaje en un ámbito educativo a través de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC)? Al confrontar el interrogante, se da inicio al proyecto de investigación denominado “Contenedor y clasificador automático de material reciclable basado en inteligencia artificial”, el cual surge en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Amazonia (Florencia, Caquetá) bajo el liderazgo del Semillero de Investigación R3INNOVA y apoyado por el Grupo de Investigación Gestión del Conocimiento, Informática, Electrónica y Comunicaciones (Giecom) y el Grupo de Investigación en Informática, Innovación y Tecnología de la Universidad de la Amazonia (Gitua).

El proyecto se aborda como un estudio de caso socioambiental que tiene como principal objetivo contribuir al proceso de sostenibilidad ambiental ligado al concepto de *economía circular* en el ámbito educativo mediante el uso de las TIC, para lo que se planteó realizar una caracterización de los residuos sólidos reciclables generados en la Universidad de la Amazonia. Además, se propone la construcción de un contenedor y clasificador automático capaz de reconocer y almacenar cierto tipo de residuos

sólidos con viabilidad para el reciclaje, utilizando IA basada en una red neuronal entrenada para la clasificación autónoma de los residuos [6]. El desarrollo del prototipo se realizó en atención a los cinco principios fundamentales de la economía circular: a) el residuo se convierte en recurso, b) el segundo uso, c) la reutilización, d) la reparación y e) el reciclaje [7], los cuales establecen la viabilidad del proceso de tratamiento de residuos.

2. METODOLOGÍA

Se realiza un caso de estudio socioambiental en la Universidad de la Amazonia, institución de educación superior (IES) del orden nacional, situadas sus sedes principales en la zona urbana de Florencia (Caquetá), en el que se analiza el comportamiento de los usuarios, tomando como población objetivo los administradores de las cafeterías en las sedes del campus Porvenir y campus Centro, las cuales cuentan con 12 y 4 cafeterías, respectivamente. La IES está conformada por 11.090 personas a 2020, pertenecientes a los diferentes estamentos en sus condiciones de estudiantes, docentes y administrativos.

El tema de economía circular se abordó en atención al modelo ECO-3, el cual propone soluciones a los problemas de impacto ambiental con énfasis en la reutilización de los residuos sólidos reciclables por medio de la reincorporación en el mercado como productos de segunda vida; de esta forma, se aporta a la gestión económica y socioambiental en empresas o IES, centrados en el desarrollo sostenible para estas comunidades [8].

3. CONOCIMIENTO DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS POR PARTE DE LOS ADMINISTRADORES DE LAS CAFETERÍAS

Para realizar el análisis del comportamiento de los administradores de las 16 cafeterías que funcionan en los campus Centro y Porvenir, se elaboró una encuesta, la cual tuvo como objetivo obtener información para respaldar los requerimientos necesarios y perfiles de cumplimiento acerca de la generación, separación y disposición de residuos sólidos, además de obtener un referente de las cantidades aproximadas de adquisición de productos de bebidas en empaques de vidrio y plástico comercializadas localmente. Las preguntas realizadas en la encuesta se presentan a continuación:

- ¿Tiene conocimiento de los residuos sólidos que se pueden reciclar?
- ¿Cerca del negocio hay contenedores específicos para reciclar cristal, papel, cartón, plásticos y pilas?
- ¿Tiene idea de cómo reciclar los residuos sólidos?
- ¿Qué tan a menudo realiza la compra de bebidas en empaques plásticos?

- ¿Qué tan a menudo realiza la compra de bebidas en empaques de vidrio?
- ¿Cuántas unidades de bebidas en empaque plástico compra y de qué tamaño?
- ¿Cuántas unidades de bebidas en empaque de vidrio compra y de qué tamaño?

Luego de la recolección de información basada en la encuesta, se procedió a la creación del contenedor y todo el desarrollo de la clasificación de residuos sólidos, para lo cual se utilizó la metodología del doctor Kunitoshi Sakurai, desarrollada en 1982 y empleada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis), División de Salud y Ambiente de la Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [9].

Para el diseño del *hardware*, se utilizó la metodología *top-down*, la cual se enfoca en la utilización del uso de lenguajes de descripción de *hardware*, que tiene como objetivo reducir costos en la construcción de las partes electrónicas de circuitos, utilizando la simulación de los componentes antes de ser procesados en la fase de construcción física del prototipo [10]. En atención a estas metodologías, se prosiguió con las siguientes fases para la construcción del contenedor.

Caracterización de residuos sólidos reciclables

Esta fase se basa en la adaptación de la metodología de clasificación de residuos sólidos del doctor Kunitoshi Sakurai [9], establecida en cuatro procesos fundamentales, de los cuales tres se enfocan en el tratamiento estadístico necesario para establecer la muestra representativa del universo de la población y un proceso final orientado al análisis de los residuos sólidos de los puntos de muestreo seleccionados.

Determinación de la muestra

Bajo el análisis de búsqueda de la población, se determina el estamento institucional compuesto por diferentes miembros del organismo académico de la Universidad de la Amazonia: personal administrativo, docentes y estudiantes. Además, haciendo uso de los puntos estratégicos de la IES, se logra identificar todas las unidades muestrales, que corresponden a los puntos de recolección de residuos sólidos.

Selección y tamaño de la muestra

Para la selección de la muestra, se aplicó la teoría basada en la estratificación poblacional determinada, en que se seleccionaron diez puntos de muestreo por el método aleatorio simple, es decir, se realizó la encuesta a diez administradores de las cafete-

rías de la institución, ya que los datos obedecen a un modelo de distribución normal [11]. Con esta teoría, se asegura que cada uno de los puntos de depósito de basura conservará la misma proporción de probabilidad de ser seleccionado para determinar el estudio de la caracterización.

Validez de la muestra preliminar

Para la muestra, se calculó la varianza y debidamente se realizó la prueba de significación para la media de la población, además, se efectuó una prueba de la comparación media poblacional de los estratos de población a partir del análisis de especificación de la varianza.

Metodología para el análisis de los residuos sólidos

Para el análisis de los residuos sólidos, fue necesario adelantar procedimientos de bioseguridad en la toma de información y garantizar la protección del talento humano encargado de este análisis. Luego, se determinó la generación total diaria de residuos sólidos, la densidad y su composición física basados en la metodología estructurada por el doctor Kunitoshi Sakurai en 1982.

Diseño y construcción del contenedor y clasificador automático

Para esta fase, fue necesario estructurar desde la metodología de diseño de *hardware top-down* [10], en que se plasmó el inicio del diseño de un esquema de alto nivel de abstracción a partir de la idea general que se tiene con respecto al contenedor y clasificador automático de residuos sólidos. Continuamente se ejecutó el segundo esquema, que reflejó en detalle los subcomponentes del sistema para asegurar la trazabilidad hasta llegar a niveles pormenorizados y representó con claridad cada uno de sus componentes y la estructura utilizada para el *hardware* que se puso a prueba [10]. Luego, se generó la descripción del comportamiento y la estructura del prototipo, en que la descripción comportamental empleó el lenguaje de representación de *hardware* VHDL (combinación entre *very high speed integrated circuit* [VHSIC] y *hardware description language* [HDL]), los cuales procedieron a describir el comportamiento del circuito y la descripción estructural, y diseñaron los esquemas que permitieron enumerar los componentes de los circuitos y sus interconexiones.

Construcción de componentes externos del contenedor

Una vez se obtuvieron todos los diseños que detallan la estructura y el comportamiento del contenedor y clasificador automático, se recurrió al taller de mecánica fina de la Universidad de la Amazonia, el cual proporcionó todas las herramientas para la cons-

trucción física del dispositivo, en que fue necesaria la utilización de equipos de trabajo pesado para el moldeamiento de material de aluminio y acrílico. Este trabajo asegura la protección de los componentes electrónicos de los dispositivos, además contendrá los residuos sólidos clasificados para su extracción. A efectos de visualización intuitiva, se adhirieron vinilos adhesivos con diagramación personalizada, se protegió la parte de aluminio y se decoró con ilustraciones basadas en el tema de reciclaje.

Entrenamiento del sistema de IA

Una vez creada la parte física del contenedor, se procedió a realizar el entrenamiento de la red neuronal del perceptrón multicapa aplicado a la IA, con la ejecución del algoritmo Levenberg-Marquardt, el cual presenta un perfil indicado para ser puesto a prueba en el contenedor. Una vez entrenado, este código es agregado a la *main board raspberry*, la cual tendrá el control en la ejecución de clasificado según el diagrama de análisis de residuos.

Para la parte de entrenamiento del sistema de IA, basado en la clasificación automática de los residuos sólidos, se utilizó una red neuronal artificial de tipo perceptrón multicapa [12], el cual contó con una configuración de dos capas: la de entrada y salida. Este entrenamiento neuronal se trabajó con el algoritmo Levenberg-Marquardt en atención a las características que presenta frente a redes de este tipo aplicada a esta configuración [13].

Una vez estructurado todo el proceso, se pusieron a prueba los sistemas del contenedor y clasificador automático, para lo cual se recolectaron residuos aleatorios de las cafeterías, que son generadas comúnmente por los usuarios recurrentes. Posteriormente, se realizaron pruebas de ensayo y error, que emularon a los usuarios frente a las posibles situaciones que presentará día a día el contenedor. Una vez realizada esta prueba, se analizaron las imágenes emitidas por la red neuronal artificial y se verificaron la clasificación y el porcentaje de coincidencia según los parámetros expuestos en el algoritmo de la IA.

Prueba interna beta test

En esta última fase, se puso a prueba el contenedor y clasificador automático, para lo cual se utilizaron residuos aleatorios comunes en las basuras generadas en las cafeterías de la Universidad de la Amazonia y se verificó el modelo de IA. Se garantizó que los porcentajes de reconocimiento visual de los objetos fueran altos y cumplieran con las condiciones sujetas a la neurona artificial. Una vez adquirida esta experiencia, se tuvo como objetivo afinar cada detalle del contenedor antes de pasar a la puesta en producción del usuario final.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El análisis de los resultados de la encuesta permitió evidenciar que el 86 % de los administradores encuestados conocen que los residuos sólidos se pueden reciclar, lo cual es un buen punto de partida en el proceso de transición hacia la economía circular, ya que el 100 % de las personas que participaron en la encuesta saben cómo realizar el proceso de reciclaje, y además el 57 % aseguran tener contenedores específicos cerca de sus establecimientos para reciclar cristal, papel, cartón y plástico, entre otros residuos.

Caracterización de residuos sólidos

Al realizar la metodología para el análisis de los residuos sólidos, se identificaron diversos materiales, tales como plástico, vidrio, lata y cartón en que se destacaron los residuos plásticos debido a su abundancia. Por tal motivo, se realizó un análisis de generación de este tipo de residuos, en atención a los datos obtenidos en las encuestas.

En el campus Porvenir, se evidenció una mayor generación de botellas plásticas en comparación con el campus Centro, ya que el primero presenta mayor cantidad de cafeterías y mayor recurrencia de personal, y genera un aproximado anual de 560.112 botellas plásticas, y el campus Centro, 235.728 botellas, distribuidas en diferentes tamaños (figura 1).

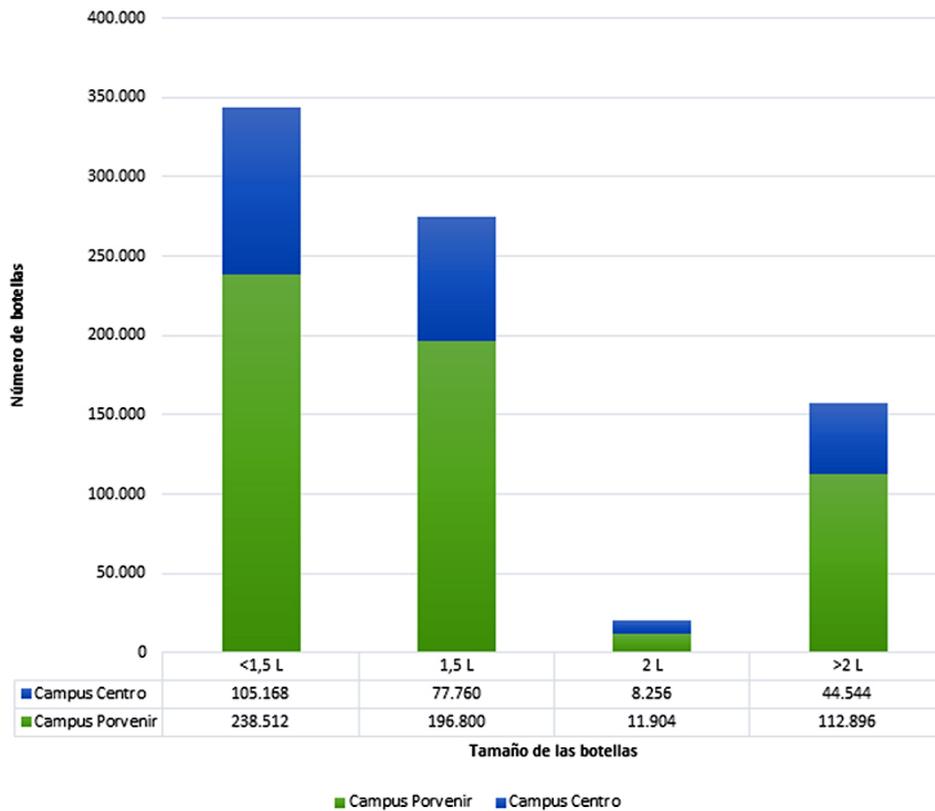


FIGURA 1. GENERACIÓN ANUAL DE RESIDUOS PLÁSTICOS TIPO BOTELLA EN EL CAMPUS PORVENIR Y EN EL CAMPUS CENTRO DE LA UNIVERSIDAD DE LA AMAZONIA

El campus Porvenir produce un aproximado semanal de 327 kg de botellas plásticas y el campus Centro un aproximado de 134 kg, es decir, que la generación semanal en las 10 cafeterías estudiadas es 462 kg, representados en 7.160 unidades de tamaño personal, 5.720 de 1,5 L, 420 de 2 L y 3.280 unidades de más de 2 L. En atención a estos datos, se estimó que la generación diaria de residuos plásticos por parte de los dos campus es de 66 kg, la generación mensual es de 1.846 kg y la generación anual de 22.156 kg (tabla 1).

TABLA 1. GENERACIÓN DE BOTELLAS PLÁSTICAS EN EL CAMPUS PORVENIR Y EN EL CAMPUS CENTRO DE UNIVERSIDAD DE LA AMAZONIA

Campus Porvenir								
	Diario		Semanal		Mensual		Anual	
Tamaño	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg
<1,5 L	710	47	4.969	327	19.876	1.309	238.512	15.710
1,5 L	586		4.100		16.400		196.800	
2 L	35		248		992		11.904	
>2 L	336		2.352		9.408		112.896	
Campus Centro								
	Diario		Semanal		Mensual		Anual	
Tamaño	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg
<1,5 L	313	19	2.191	134	8.764	537	105.168	6.446
1,5 L	231		1.620		6.480		77.760	
2 L	25		172		688		8.256	
>2 L	133		928		3.712		44.544	
Total								
	Diario		Semanal		Mensual		Anual	
Tamaño	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg	Unidades	Kg
<1,5 L	1023	66	7.160	462	28.640	1.846	343.680	22.156
1,5 L	817		5.720		22.880		274.560	
2 L	60		420		1.680		20.160	
>2 L	469		3.280		13.120		157.440	

La cantidad de residuos plásticos generados se puede ver como una oportunidad para la generación de ingresos económicos al ámbito educativo, ya que, al realizar un sondeo entre las diferentes empresas comercializadoras de material reciclable en Florencia (Caquetá), se evidenció que el material plástico es pagado a un valor promedio de \$300 por kilogramo, lo cual significa que a la semana se obtienen ingresos por venta de material reciclable de \$138.475, alrededor de \$550.000 mensuales y \$6.646.700 al año, que pueden ser empleados para cubrir gastos básicos de los estudiantes.

En consideración a lo anterior, se puede evidenciar que es posible fortalecer el proceso de transición hacia la economía circular en el ámbito educativo, debido a que los objetivos de desarrollo sostenible planteados en esta década han influido en las IES para evaluar y aprovechar su gran potencial para el reciclaje [14]. Además, los administradores de las cafeterías tienen conocimientos básicos sobre la clasificación de los residuos que pueden ser reciclados, y así evitar los plásticos de un solo uso que provocan gran contaminación y representan un obstáculo para el concepto de *economía circular* [15]. Asimismo, la cuantificación y caracterización de los residuos son las bases para una adecuada planificación y, por ende, la metodología empleada en este estudio permitió realizar de manera acertada la creación del contenedor y clasificador automático, el cual contribuirá a disminuir la huella ambiental por parte de la IES, y de este modo fortalecer la economía circular.

El reciclaje de diferentes tipos de residuos es una alternativa que, además de reducir la contaminación ambiental, permite la obtención de dinero [16], entre ellos los residuos plásticos son los de mayor abundancia y potencial en el proceso [14]. Este hecho a su vez contribuye a generar en la IES un ingreso económico extra, dinero que puede ser invertido en grupos deportivos, artísticos o de investigación para cubrir gastos básicos en sus actividades. Lo anterior puede ser impulsado por la IES como una estrategia para que los estudiantes se motiven a realizar la clasificación de los residuos, y de esta forma minimizar el impacto ambiental ocasionado por la IES y la disminución del volumen de residuos producidos que terminan en los rellenos sanitarios. Además, contribuirá al cambio de la mentalidad de la población universitaria relacionado con el proceso de reciclaje e impactará positivamente el comportamiento de estudiantes, profesores y administrativos a la hora de desechar los elementos utilizados en la IES [17].

Diseño del contenedor y clasificador automático

En consideración a la metodología *top-down*, se determinó la salida de componentes necesarios para la parte de *hardware* del contenedor [10], la cual simplificó el nivel de abstracción del esquema, que dio inicio al componente físico para su funcionamiento. Los elementos principales constaron de dos baterías: MA 9-12 12v 9.0Ah, las cuales se encargaron de almacenar la energía canalizada desde los dos paneles solares. Para garantizar la estabilidad del voltaje, se utilizó el módulo control carga batería ácida 12v Xh-m601, y para convertir la energía fue necesario dos convertidores Boost DC-DC de 100W 12v 6A, los cuales enviaron el voltaje necesario a los componentes electrónicos como el concentrador, cuatro puertos y el *ship set*; este último es el encargado de tener las compuertas lógicas para la utilización de la placa base y la *main board raspberry* (figura 2).

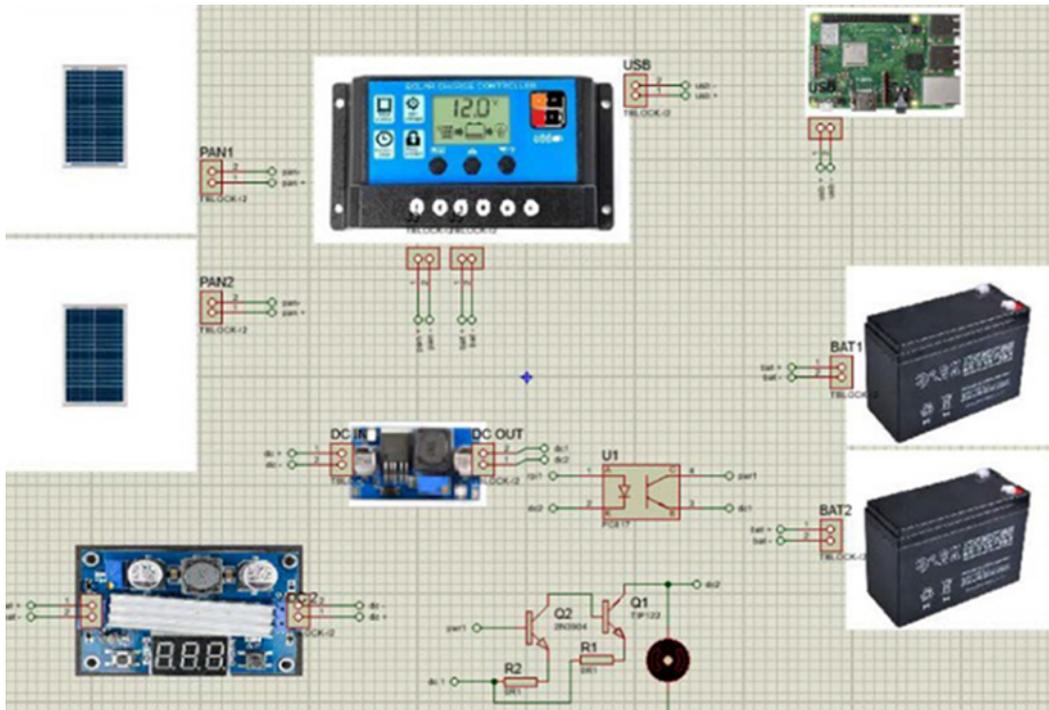


FIGURA 2. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Analizando el contexto de fabricación del *hardware*, se expone un problema exógeno que presenta las grandes industrias, ya que en su cotidianidad muchas no están orientadas a la optimización y planificación de los recursos utilizados para sus tecnologías; parte de las empresas productoras de *hardware* no estiman costos o materiales a la hora de producir productos electrónicos. Respecto de este problema, la metodología de *hardware top-down* concuerda con los principios fundamentales en las políticas de energía renovable, en concordancia con la utilización del principio de mitigación de carbono, transacción y regulación de energía, ya que el contenedor no trabaja con energía eléctrica tradicional o fuente de energía producida por crudo o los destilados, sino que es impulsada por paneles solares encargados de suministrar la energía necesaria para el procesamiento de *hardware* y *software* [18].

La utilización de la metodología de *top-down* puede ser encontrada en los procesos de implementación utilizados en el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés); una de las características es la reducción de componentes debido a la depuración que este presenta. En concordancia con esta idea, se utilizaron dos pautas del IoT plasmadas desde la metodología *top-down* en la creación del contenedor: la primera consistió en el estudio del entorno enfocada en el tema y la segunda en la determinación de las características del diseño. Esta toma de decisión enfatiza en suprimir factores que

no aportan a la optimización y confiabilidad de los componentes para el desarrollo de las tareas clave en la sinergia del sistema [19].

Los proyectos de aula basados en energía solar contribuyen con la concientización y el uso de este tipo de energía renovables en los estudiantes, por tanto, es de vital importancia darles a conocer esta información e incentivar la utilización y sofisticación sobre nuevas tecnologías [20]. En consideración a esa motivación, el contenedor y clasificador aborda dos medidas esenciales a la hora de cautivar la atención de los estudiantes: una impulsada por la utilización de energía renovable para su funcionamiento y la segunda es la contribución al medio ambiente, generada por la separación de residuos sólidos.

Construcción del contenedor y clasificador automático

El diseño estructural en aluminio permite proteger los dispositivos electrónicos y presenta firmeza para almacenar los residuos sólidos. Estos internamente se agrupan en costales de carga tipo pesado y se asegura la protección del contenedor, la capacidad máxima aproximada de almacenamiento de botellas abarca entre 304 y 310 según el tipo (PET, por sus siglas en inglés), las medidas finales del contenedor son de 90 cm de ancho por 90 cm de fondo y 1,60 cm de alto. Trabajar el recubrimiento de aluminio permite su traslado a cualquier lugar y fácil acceso a los componentes internos (figura 3).



FIGURA 3. ESTRUCTURA EN ALUMINIO Y RECUBRIMIENTO EN PVC

Los elementos decorativos del vinilo tienen la funcionalidad de atraer la atención de las personas y dejar un punto de retentiva, el cual tiene como finalidad relacionar los puntos de recolección de basura y su separación, así como aportar al rendimiento de recolección en las instalaciones de la IES [21].

Debido a la implementación de la metodología *top-down*, se disminuyeron los costos de producción del equipo a un valor total de \$ 3.152.000, distribuidos entre los componentes físicos del contenedor, transportes y mano de obra.

Entrenamiento del sistema de IA

Para el entrenamiento neuronal de la IA, fue necesario la distinción de puntos específicos en el reconocimiento de las imágenes y los sensores que actúan, la obtención del peso, ancho, alto y canales (tamaño del canal de la imagen captada a la conversión RGB) y aumento de datos utilizados en el algoritmo Levenberg-Marquardt. Tras estabilizar estos puntos, se obtienen los parámetros que se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. PARÁMETROS INTERNOS DEL ALGORITMO LEVENBERG-MARQUADT

Puntos específicos	Parámetro	Valor
Ancho, altura, canales	Width	416
	Height	413
	Channels	3
Tasa de aprendizaje, pasos, escalas, quemadura (warm-up)	Learning rate	0,0001
	Policy: Steps	3.800
	Scales	1
	Burn-in	400
Aumento de datos	Angle	0
	Saturation	1,5
	Exposure	1,5
	Hue	1
	Max_batches	5.200

Estos puntos específicos dieron paso al algoritmo general de análisis de residuos del contenedor (figura 4), en que este inicia a partir de la obtención de la imagen captada desde el residuo sólido. Esta fotografía es enviada a la *main board raspberry*, la cual

con su red neuronal evalúa el residuo. El algoritmo determina la decisión de aceptar el objeto captado o rechazarlo: si es rechazado mostrará un mensaje de alerta “El residuo no corresponde al contenedor” y si es aceptado se activarán los motores para el ingreso del residuo en el contenedor pasando a ser registrado en la base de datos en red diseñado en CouchDB. Una vez aceptado y clasificado con éxito, se mostrará un mensaje de salida con la alerta “Residuo ingresado con éxito”. Al guardar los datos de cuántas botellas se están almacenando, se puede validar la cantidad y tener el control para poder retirarlas en el momento indicado.

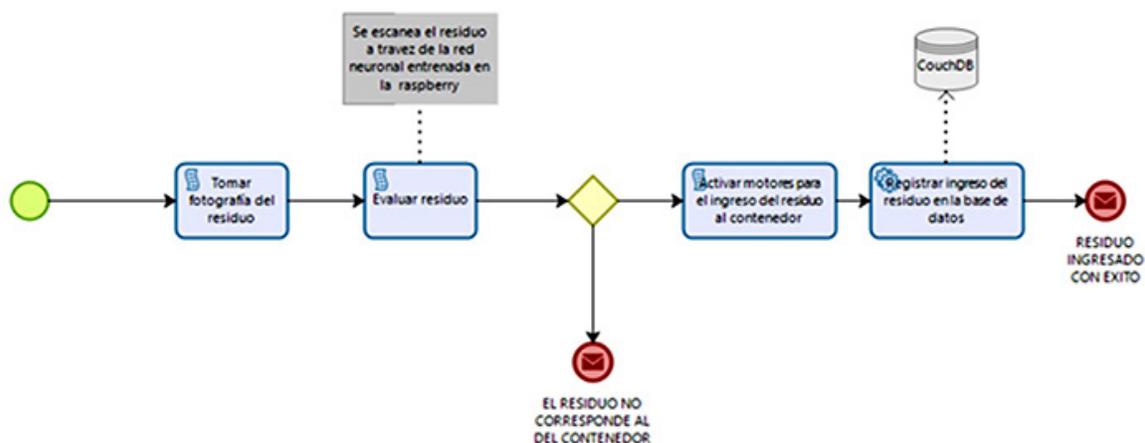


FIGURA 4. DIAGRAMA DE ANÁLISIS DE RESIDUOS

El uso de IA para la recolección está siendo implementado en muchas partes del mundo, a partir de la necesidad de contribuir al medio ambiente. Debido a la contaminación gradual que presenta el mundo en este momento, la optimización de esta tarea diaria se puede gestionar desde los procesos de avances tecnológicos. El aprendizaje automático que ofrece este tipo de tecnología respalda la iniciativa de reducir, reutilizar y reciclar, ya que hace eficiente la separación de las basuras generadas al mejorar la precisión [22].

Prueba interna beta test

El algoritmo de la neurona artificial toma como parámetros de reconocimiento aspectos principales de la botella como cabeza o corona, cuello, hombros, cuerpo y base, ya que la mayoría de las presentaciones de bebidas en botellas de plástico o vidrio presentan las mismas formas en su estructura externa (figura 5). Así, se permite su fácil reconocimiento en comparación con otro tipo de residuos sólidos [23].



FIGURA 5. RECONOCIMIENTO DEL MODELO DE IA

Los modelos de neuronas artificiales basados en IA están adecuados para que aprendan por sí solos. Se considera que los patrones de programación del algoritmo propuesto pueden extrapolar cifras, basado en la recolección de información, utilizando la estimación de intervalos de tiempo y cantidad para la obtención de resultados confiables, para planificar e implementar el destino de la recolección [24].

5. CONCLUSIONES

El uso de las TIC contribuye a la sostenibilidad ambiental en la Universidad de la Amazonia. El desarrollo de equipos inteligentes hace más eficiente los procesos relacionados con la caracterización y clasificación de residuos sólidos y genera un beneficio económico y socioambiental para la comunidad académica.

El clasificador automático es una máquina capaz de reconocer y almacenar por medio de IA residuos plásticos tipo botella, y de esta forma genera un beneficio socioambiental al estar ligado al concepto de *economía circular*, en la cual se busca la reutilización de los residuos, afianzar el proceso de sostenibilidad ambiental de la Universidad de la Amazonia y contribuir a generar cultura ambiental entre los usuarios, debido a que es un medio innovador de reciclaje que hace uso de las TIC.

Los estudiantes pueden llevar a cabo tareas y objetivos para impulsar el reciclaje, trazar metas a partir de los datos obtenidos y convertir el proceso de reciclaje en un modelo de vida, aspecto fundamental en lo establecido en la economía circular.

Como trabajo futuro, se espera realizar un mejoramiento al contenedor y clasificador automático. Debido al uso de la IA, esta podrá ser entrenada para recibir otro tipo de residuos sólidos, además ampliar la red neuronal para mejorar el tiempo de respuesta enfocada en la clasificación de los elementos a procesar.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo de los programas de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Agroecológica de la Universidad de la Amazonia, por su ayuda incondicional en la elaboración de este proyecto, fruto del esfuerzo y dedicación de un trabajo en equipo.

REFERENCIAS

- [1] G. Micheline, R. N. Moraes, R. N. Cunha, J. Costa y A. R. Ometto, “From linear to circular economy: PSS conducting the transition”, *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 2-6, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.012>
- [2] J. Buchmann-Duck y K. F. Beazley, “An urgent call for circular economy advocates to acknowledge its limitations in conserving biodiversity”, *Sci. Total Environ.*, vol. 727, p. 138602, jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138602>
- [3] Z. Fu y J. Wang, “Current practices and future perspectives of microplastic pollution in freshwater ecosystems in China”, *Sci. Total Environ.*, vol. 691, pp. 697-712, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.167>
- [4] F. Wagner, J. R. Peeters, J. D. Keyzer, K. Janssens, J. R. Dufloy y W. Dewulf, “Towards a more circular economy for WEEE plastics - Part A: Development of innovative recycling strategies”, *J. Waste Manag.*, vol. 100, pp. 269-277, dic. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.026>
- [5] E. Uçar, M. A. Le Dain y I. Joly, “Digital technologies in circular economy transition: evidence from case studies”, *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 133-136, ag. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.058>
- [6] M. Abdallah, M. Abu Talib, S. Feroz, Q. Nasir, H. Abdalla y B. Mahfood, “Artificial intelligence applications in solid waste management: a systematic research review”, *J. Waste Manag.*, vol. 109, pp. 231-246, my. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.057>

- [7] G. I. González Ordaz y J. G. Vargas Hernández, “La economía circular como factor de la responsabilidad social”, *Economía Coyuntural*, vol. 2, no. 3, pp. 105-130, jul. 2017.
- [8] C. H. Balboa C. y M. Domínguez Somonte, “Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3”, *Informador técnico*, vol. 78, no. 1, pp. 82-90, en.-jun. 2014 [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4881026.pdf>
- [9] L. Sandoval, *Evaluación de la gestión integral de residuos sólidos con énfasis en la disposición final en el municipio de Cobija Pando - Bolivia*. Organización Panamericana de la Salud, 2004 [En línea]. Disponible en: <https://1library.co/document/yjkd5m2q-evaluacion-gestion-integral-residuos-solidos-enfasis-disposicion-municipio.html>
- [10] J. Tisza, M. Chauca y A. Castillo, “Learning methodology for education in electronic engineering electronic-devices based on the inductive method *top-down*”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 172, pp. 729-734, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.104>
- [11] M. Ließ, “At the interface between domain knowledge and statistical sampling theory: conditional distribution-based sampling for environmental survey (CODIBAS)”, *Catena*, vol. 187, p. 104423, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104423>
- [12] M. Wei-Lung, C. Wei-Chun, W. Chien-Tsung y L. Yu-Hao, “Recycling waste classification using optimized convolutional neural network”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, p. 105132, en. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105132>
- [13] B. S. Sathish, P. Ganesan, L. M. I. Leo Joseph, K. Palani y R. Murugesan, “A two-level approach to color space-based image segmentation using genetic algorithm and feed-forward neural network”, *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 1133, pp. 67-78, ag. 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3514-7_6
- [14] O. Owojori, J. N. Edokpayi, R. Mulaudzi y J. O. Odiyo, “Characterisation, recovery and recycling potential of solid waste in a university of a developing economy”, *Sustainability*, vol. 12, no. 12, pp. 1-17, jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12125111>
- [15] Y. Chen, A. K. Awasthi, F. Wei, Q. Tan y J. Li, “Single-use plastics: production, usage, disposal, and adverse impacts”, *Sci. Total Environ.*, vol. 752, p. 141772, en. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- [16] M. Saleh, M. Yalvac y M. A. Mazmanci, “Characterization of solid waste in Mersin University: main campus and development of solid waste management plan”, *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 29, no. 8, pp. 6386-6392, my. 2020.
- [17] Y. Hao, L. O. Wang, X. S. Chen y L. Wang, “The determinants of waste-sorting intention and behavior among Chinese undergraduate students: a case study in Beijing”, *Singapore Economic Review*, vol. 65, no. 3, pp. 627-652, my. 2020. <https://doi.org/10.1142/S0217590817410077>

- [18] A. S. Vieira, R. A. Stewart, R. Lamberts y C. D. Beal, “Renewable energy and energy conservation area policy (REECAP) framework: a novel methodology for bottom-up and top-down principles integration”, *Energy Strategy Rev.*, vol. 32, pp. 2-17, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100544>
- [19] F. B. Yahya, C. J. Lukas y B. H. Calhoun, “A top-down approach to building battery-less self-powered systems for the internet-of-things”, *J. Low Power Electron. Appl.*, vol. 8, pp. 21-34, jun. 2018. <https://doi.org/10.3390/jlpea8020021>
- [20] J. J. Kim, “Action-based solar education in architecture”, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 60, pp. 102-185, sept. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102185>
- [21] Q. Jiang, T. Izumi, H. Yoshida, D. Dilixiati, N. Leeabai, S. Suzuki y F. Takahashi, “The effect of recycling bin design on PET bottle collection performance”, *J. Waste Manag.*, vol. 95, pp. 32-42, jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.054>
- [22] K. H. Yu, Y. Zhang, D. Li, C. E. Montenegro Marin y P. M. Kumar, “Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence”, *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 86, pp. 106-492, en. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106492>
- [23] Y. Wang, Y. Gu, Y. Wu, G. Zhou, H. Wang, H. Han y T. Chang, “Performance simulation and policy optimization of waste polyethylene terephthalate bottle recycling system in China”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 162, pp. 105-114, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105014>
- [24] G. Coskuner, M. S. Jassim, M. Zontul y S. Karateke, “Application of artificial intelligence neural network modeling to predict the generation of domestic, commercial and construction wastes”, *Waste Manag. Res.*, pp. 1-12, jun. 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20935181>
- [25] B. Molina Serrano, N. González-Cancelas y F. Soler-Flores, “Inteligencia artificial para determinar si el empleo de gas natural licuado en el *short sea shipping* es una apuesta social”, *Ing. Desarro.*, vol. 36, no. 2, pp. 418-436, jul. 2018. <https://doi.org/10.14482/inde.36.2.10458>