

Análisis Estratégico de los Factores que Inciden en la Generación y Aprovechamiento de los Residuos Sólidos en el Sector Manufacturero en Colombia

**Mariam Isamar Gelvez Pabón
C.C. 1.093.753.392**

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Gerencia Estratégica

**Asesor:
Giovanni Andrés Hernández Salazar**

**Universidad de la Sabana
Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Maestría en Gerencia Estratégica
Chía, agosto de 2023.**

Tabla de contenido

Resumen	4
Introducción	4
2. Metodología	9
2.1 Descripción de la información	9
2.2 Definición de las variables	10
2.3 Descripción de los modelos	12
3. Resultados	12
3.1 Estadística descriptiva	12
3.3 Resultados de los modelos	15
4. Discusión	20
4.1 Impacto y proyección de los resultados para el sector industrial	23
4.2 Impacto y proyección de los resultados para el sector público.....	24
5. Conclusiones.....	24
6. Limitaciones y recomendaciones	25
Bibliografía	26

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los residuos sólidos según la ANDI (ANDI - Asociación Nacional de Industriales, 2017).	7
Tabla 2. Estadísticas básicas de las variables independientes.	13
Tabla 3. Estadísticas básicas de las variables independientes.	14
Tabla 4. Modelo panel producción de residuos mezclados 2018-2020.....	15
Tabla 5. Modelo panel kg de residuos mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje 2018-2020.	16
Tabla 6. Modelo panel kg de residuos mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje 2018-2020.	17
Tabla 7. Modelo panel kg de residuos mezclados comercializados por el establecimiento 2018-2020.	18
Tabla 8. Modelo panel kg de residuos mezclados donados por el establecimiento 2018-2020. .	19
Tabla 9. Modelo panel kg de residuos mezclados almacenados por el establecimiento 2018-2020.	20

Lista de Figuras

Figura 1. Concepto de las 10 R, adaptado de (Zorpas, 2020).	6
--	---

Resumen

Los residuos sólidos representan uno de los principales retos para las autoridades gubernamentales a nivel mundial. En Colombia el estudio de los factores que inciden en su generación y aprovechamiento puede representar una ventaja competitiva al tender hacia una economía circular. En este trabajo se hace un análisis exploratorio sobre las características de la producción y uso de residuos sólidos en el sector manufacturero en el país, utilizando datos de encuestas del DANE y modelos empíricos aplicando el método de momentos generalizado (GMM, por sus siglas en inglés) para analizar los efectos de diferentes variables en la generación y el aprovechamiento de residuos sólidos, información que puede orientar planes para su manejo adecuado que involucren elementos de economía circular alineados con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible trazados por las Naciones Unidas. La inversión en maquinaria y equipos se presenta como la variable que más afecta la generación y aprovechamiento de residuos sólidos de todo tipo en los establecimientos de manufactura.

Palabras clave: sector manufacturero, economía circular, modelos empíricos GMM, desarrollo sostenible.

Introducción

El manejo de residuos sólidos industriales es un problema de interés general que representa uno de los principales retos tanto para las industrias como para las autoridades gubernamentales en todo el mundo. Según el informe de gestión de residuos sólidos emitido por el banco mundial en el 2018 (World Bank Group, 2018), la generación de desperdicios va superar drásticamente el crecimiento poblacional para el año 2050. Factores como el crecimiento demográfico, el cambio en los hábitos de consumo y el desarrollo ineficaz del sector industrial han incrementado la generación de residuos sólidos de manera generalizada (Canali et al., 2014; Chakraborty et al., 2022). Las naciones han introducido diferentes estrategias como los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para dirigir estos retos (Organización de las Naciones Unidas, n.d.). Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (DANE, 2020), en Colombia la oferta total de residuos sólidos fue de 26,3 millones de toneladas en el año 2020. De ese valor, un 51,8% corresponde a actividades económicas e importaciones, mientras que los hogares contribuyen con 48,2%. El aprovechamiento de residuos sólidos representa el 29,1 % del total de residuos y se tiene trazada la meta de reducción de los residuos sólidos en 17,9 % para el 2030 en el CONPES 3918 (Departamento de Planeación Nacional - DNP, 2018). En un contexto regional, según datos del Banco Interamericano de Desarrollo (Grau, Javier; Terraza, Horacio; Rodríguez Velosa, Diana Milena; Rihm, Alfredo; Sturzenegger, 2015), para el año 2015 América Latina únicamente el 2,2% de los residuos sólidos urbanos se reciclaba dentro de esquemas formales. Muy pocos países cuentan con infraestructura formal para la clasificación de desechos y la recuperación de materiales reciclables es realizada mayormente por el sector informal, a través de recuperadores/recicladores urbanos, que se estiman en unos 4 millones. La mayoría de los países de la región no dispone de datos oficiales sobre tasas de reciclaje. Sólo algunos países que

han empezado a implementar metas de reciclaje, como Brasil, tienen cuantificados estos índices para materiales específicos. Para 2012, Brasil reportó índices de reciclaje de aluminio de 97,9%; de reciclaje de papel de 45,7%; y de reciclaje de plástico (PET) de 58,9% (respecto a la producción industrial). En Ecuador se ha alcanzado un porcentaje de recuperación del 109% para botellas PET, derivado del incentivo tributario directo conocido como el impuesto redimible de botellas PET.

En la literatura existen numerosos estudios acerca de diferentes métodos y enfoques para implementar y lograr las estrategias de aprovechamiento de residuos mencionadas anteriormente (Linder & Williander, 2017; Zorpas et al., 2015; Zotos et al., 2009). La economía circular ha sido identificada como un enfoque clave y consistente para reducir los impactos de la producción inefectiva y el consumo de los recursos naturales, además soporta las metas pactadas por los países en los ODS.

Una de las definiciones de economía circular a un nivel micro (nivel en el cual las empresas se centran en sus propios procesos) propuesta por Mentink (2014) es “la lógica de cómo una organización crea, entrega y captura valor con y dentro de ciclos cerrados de materiales”. Este modelo transforma la economía lineal (tomar, hacer y desechar) en sistemas más regenerativos. En otras palabras, la economía lineal reduce el volumen y el valor de los recursos ya que se crean desechos durante la cadena de producción hasta el final de la línea de la cada de suministro cuando el producto llega al final de su vida útil (Fatimah et al., 2023); la idea con el uso de estrategias de economía circular es trabajar en sistemas más regenerativos que proveen mejores oportunidades de negocio, oportunidades de manejar prioridades, dirigiendo la innovación y la competitividad y mejorando la transformación económica. En la Figura 1 se puede observar la metodología de las 10 R (por sus siglas en inglés) donde se extienden mejor estos conceptos.



Figura 1. Concepto de las 10 R, adaptado de (Zorpas, 2020).

En el contexto colombiano, es importante conocer qué indicadores de eficiencia, efectividad y viabilidad económica tienen los programas de manejo de residuos sólidos por varios motivos: permite una gestión de residuos más estratégica, el aprovechamiento de residuos puede representar una ventaja competitiva desde el punto de vista económico y una actividad industrial más sostenible al tender hacia una economía circular. Por lo tanto, entender la naturaleza de la generación y su aprovechamiento en el sector manufacturero en Colombia es importante para trazar planes de aprovechamiento de residuos sólidos enmarcados dentro de las estrategias de economía circular.

Los residuos industriales pueden ser definidos como aquellos generados en los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza o mantenimiento de alguna actividad propia de industria. En Colombia no existe una clasificación propia para los residuos industriales. Sin embargo, se tiene una clasificación de los residuos generales en dos tipos: residuos sólidos (Decreto 1077 de 2015) y residuos peligrosos (Decreto 1076 de 2015). Los residuos industriales se pueden clasificar en varios tipos según la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los residuos sólidos según la ANDI (ANDI - Asociación Nacional de Industriales, 2017).

Residuos similares a los urbanos	Son generados en las instalaciones industriales, similares a los urbanos. Generalmente son producto de labores de oficina e incluyen papel, restos de comida, botellas, entre otros.
Residuos inertes	Residuos que no son solubles, combustibles ni biodegradables. No reaccionan ni afectan negativamente a otras sustancias con las que tienen contacto, ni experimentan transformaciones fisicoquímicas. Algunos residuos que entran en esta categoría son los escombros, arenas y metales sobrantes del proceso de fabricación
Residuos sólidos no peligrosos	No son residuos inertes, ni peligrosos para el medio ambiente ni la salud humana. Tampoco pueden asimilarse a los residuos urbanos, por ejemplo: lodos, rechazos de plástico, entre otros
Residuos peligrosos	Aquellos que por sus características pueden causar riesgo a la salud humana y al ambiente. En esta categoría entran residuos corrosivos, reactivos, explosivos, inflamables y tóxicos, y los empaques que hayan entrado en contacto con ellos.

En el caso particular de las industrias, las actividades como procesos de manufactura, operaciones mineras, construcción y operación de fábricas generan desperdicios en la forma de materiales que son inútiles para el proceso productivo. La cantidad y composición de los residuos generados están fuertemente influenciadas por el tipo y tamaño de la industria, los procesos productivos utilizados, la eficiencia de la gestión de materiales y la tecnología de tratamiento de residuos.

Cayumil et al. (2021), en su reseña sobre la generación y gestión de residuos sólidos en Chile, reportan que el aumento en el volumen de residuos sólidos municipales generados por la población está fuertemente ligado al producto interno bruto del país y el incremento poblacional. Por otra parte, argumentan que la cantidad de residuos sólidos industriales producidos se ve afectada principalmente por los estándares de manufactura, eficiencia en los equipos e infraestructura tecnológica adecuada. También exponen la importancia de los factores legales como la existencia de leyes velen por una gestión adecuada de los residuos y de medidas como el cobro de tarifas de disposición final de los mismos.

Además, Cheremisinoff (2003) en su libro sobre la gestión de residuos sólidos y tecnologías de minimización del desperdicio, sostiene que las industrias con mayores índices de producción de residuos son aquellas que cuentan con procesos productivos ineficientes y obsoletos, por lo que la mejor manera de prevenir la producción de desperdicios desde la fuente es introduciendo tecnologías actualizadas en los procesos productivos de las empresas, de la mano de una

administración consciente de la importancia de una producción más limpia y de personal adecuadamente capacitado para la implementación de sistemas de gestión de residuos.

Por su parte, Suttibak & Nitivattananon (2008) evaluaron los principales factores que afectan el desempeño de 120 programas de manejo de residuos sólidos en Tailandia. Estos factores fueron divididos en aspectos generales, técnicos, económico-financieros e institucionales. Para determinar qué factores fueron los más decisivos en el desempeño de los programas de reciclaje, emplearon múltiples análisis de regresión, con el nivel de desempeño de reciclaje como la variable dependiente del estudio. Los resultados arrojaron que el factor más asociado a los programas exitosos es la conciencia de la importancia del manejo de los residuos desde la parte administrativa, disponibilidad de personal calificado y la separación eficiente de los residuos desde la fuente de producción.

Luego, Pajunen et al. (2012) publicaron un estudio enfocado en determinar los estimulantes y las barreras para el aprovechamiento del material de desecho industrial, que busca aumentar la eficiencia del uso de subproductos industriales, en lugar de materias primas nuevas. Dentro de las conclusiones, hallaron que los factores que más estimulan la sustitución de materias nuevas por subproductos son las leyes de protección ambiental y la responsabilidad corporativa frente a la presión social. Por otro lado, la barrera más importante para las innovaciones ambientalmente amigables que permitan el aprovechamiento de residuos fueron el costo de la inversión y el alto riesgo de asignar capital a tecnologías no consolidadas. En un trabajo reciente de H. Zhou & Xu (2022) se desarrolló un modelo empírico GMM sobre el impacto del financiamiento verde en el desarrollo de la economía ecológica, evaluando 30 regiones de China y demostrando que este tipo de modelos son una herramienta útil para la selección de indicadores relevantes para analizar y proponer soluciones. En el contexto local, Mora-Contreras et al. (2023) encontraron que la implementación de actividades cercanas a la economía circular, tales como prácticas de producción más limpia y sistemas de gestión ambiental en las industrias manufactureras de Colombia, les permite obtener beneficios por medio del incremento de ventas de material de desecho, la reutilización de agua, la creación de trabajos verdes y mejoras en el desempeño organizacional.

Como se puede observar, a pesar de la existencia numerosos estudios en la literatura que analizan las dinámicas de generación y aprovechamiento de residuos sólidos, la mayoría de los reportes se enfocan en los residuos urbanos, por lo que existen escasas referencias para el caso específico de los residuos industriales. De la misma manera, estas investigaciones se dan en su mayoría en países en desarrollo, pero no se encontraron referencias en la literatura para el contexto local, que tenga en cuenta las características particulares de la industria colombiana. Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo, se analizarán los factores que inciden en la generación y el aprovechamiento de los residuos sólidos en el sector manufacturero en Colombia utilizando datos de encuestas del DANE y modelos empíricos GMM para analizar los efectos de diferentes variables en la generación y el aprovechamiento de residuos sólidos con miras a facilitar estrategias de planes de manejo de residuo sólidos que involucren algunos factores de economía circular para alinear la industria del país con el objetivo 12 producción y consumo responsables.

La inversión en maquinaria y equipos se presenta como la variable que más afecta la generación y aprovechamiento de residuos sólidos de todo tipo en los establecimientos de manufactura.

2. Metodología

Esta sección tiene como objetivo mostrar el origen de los datos en los que se basa este trabajo, así como su descripción estadística, la definición de las variables y la lógica detrás de su selección, además de la descripción del modelo de panel de datos utilizado en el análisis propuesto.

2.1 Descripción de la información

Los datos de este trabajo fueron extraídos de la Encuesta Ambiental Industrial (EAI) del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para los años 2018, 2019 y 2020 (DANE, 2021). La finalidad de la EAI es cuantificar el esfuerzo económico en gestión ambiental que el sector manufacturero realiza en Colombia para adaptarse a retos actuales de sostenibilidad ambiental, competitividad y responsabilidad social empresarial. Se escogieron estos tres años debido a que en las encuestas de años anteriores muchos registros presentan información incompleta, afectando la fiabilidad del modelo.

Los indicadores recolectados orientan acerca los procesos productivos para el manejo y uso sostenible de los recursos naturales, y dan una idea sobre el mejoramiento de las condiciones sociales, ambientales y económicas del sector manufacturero en los últimos años. La encuesta cuenta con 5 capítulos:

- CAP2_20: La inversión y el gasto por categoría de gestión y protección ambiental
- CAP2A_20: Gastos relacionados con procesos de gestión en el establecimiento.
- CAP3_20: prácticas relacionadas con la gestión de residuos sólidos.
- CAP4_20: prácticas relacionadas con el manejo del recurso hídrico.
- CAP5_20: prácticas relacionadas con la gestión ambiental.

Los datos empleados en este análisis se tomaron de los capítulos CAP2_20 y CAP3_20 de la encuesta ambiental industrial. Los capítulos cuentan con 3073, 2991 y 2940 establecimientos para los años 2018, 2019, 2020 respectivamente, para un total de 9004 registros analizados en los 3 años.

Estos datos fueron recolectados para establecimientos con 10 o más empleados, o que presentan ingresos a partir de 500 millones de pesos anuales. Las empresas seleccionadas pertenecen a todas las regiones del país y están clasificadas por actividad económica Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU):

- Alimentos, bebidas y tabaco.
- Textiles, confección, calzado y pieles.
- Industria de la madera y el corcho, fabricación de papel y actividades de impresión.
- Coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo y combustible nuclear.
- Fabricación de sustancias y productos químicos.

- Fabricación de productos de caucho y de plástico.
- Industrias de otros productos minerales no metálicos.
- Metalurgia y fabricación de productos metálicos.
- Otras divisiones industriales.

2.2 Definición de las variables

Esta sección tiene como objetivo describir las variables que se incluirán en el análisis empírico.

Variables dependientes. La selección de variables dependientes para este análisis se enfocó en la obtención de información sobre los hábitos en la producción y el empleo de los residuos sólidos por parte de las empresas manufactureras colombianas. Esta información es clave para determinar el grado de desarrollo técnico en la gestión de residuos sólidos a nivel industrial, que según el marco de trabajo para el manejo integrado de residuos sólidos publicado por Batista et al. (2021) representa uno de los pilares y factores críticos de éxito para el desarrollo de sistemas de manejo sostenible de residuos sólidos.

Residuos Mezclados Cantidad Generada (Kg/año) (R_mezclados). Esta variable indica la cantidad de kilogramos de residuos de todo tipo (orgánicos, plásticos, metálicos ,etc.) que el establecimiento genera en un año. Este dato brinda una medida del impacto ambiental de la actividad productiva, además del margen de mejora tanto en la reducción de producción de residuos, como en el potencial de aprovechamiento de los mismos. Los datos fueron obtenidos directamente de las personas encargadas de los procesos en las empresas, generalmente el ingeniero de procesos y el ingeniero ambiental.

Kilogramos de Residuos Mezclados aprovechados por el establecimiento mediante la reutilización. (R_reutilizados). Los residuos mezclados aprovechados mediante reutilización hacen referencia a la cantidad de los desechos de cualquier tipo que son usados en un año mediante la aplicación de los mismos en alguna parte de la actividad productiva sin pasar por ningún proceso de transformación, es decir, tal como son dispuestos.

Kilogramos de Residuos Mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje (R_reciclados). Los residuos mezclados aprovechados mediante el reciclaje, a diferencia de aquellos reutilizados, indican la cantidad de residuos que pasan por un proceso o tratamiento para su transformación previo a su uso como nueva materia prima.

Kilogramos de Residuos Mezclados comercializado (R_comercializados). Esta variable hace referencia a la cantidad de residuos en kilogramos que son aprovechados por los establecimientos en un año mediante la venta.

Kilogramos de Residuos Mezclados donados (R_donados). Esta variable corresponde a los kilogramos anuales de residuos de cualquier tipo donados por el establecimiento para algún tipo de aprovechamiento por parte de un tercero.

Kilogramos de Residuos Mezclados almacenados (R_almacenados). Finalmente, los residuos mezclados almacenados indican los kilogramos anuales de residuos que no son finalmente desechados, sino que se guardan por parte del establecimiento para algún uso posterior.

Variables independientes. Se tomaron como variables independientes para el análisis a aquellas que pueden explicar el nivel de desarrollo en la gestión de residuos sólidos para las empresas manufactureras colombianas, es decir, que afectan el comportamiento de las variables dependientes previamente descritas. Además de la actividad económica, el año y la región de la empresa encuestada, las demás variables están relacionadas con aspectos económicos, legales, técnicos y de capital humano, coincidiendo con las categorías de algunas de las barreras planteadas por Mittal & Sangwan (2014) que influyen en la implementación para procesos de manufactura verde, también aplicados a sistemas de gestión, uso o disposición de los residuos sólidos producidos por las empresas.

Inversión total en maquinaria y equipo (I_equipos). Esta variable indica los miles de pesos destinados por el establecimiento en un año para la adquisición de maquinaria y equipos usados para la protección ambiental. La inversión en tecnología es uno de los factores principales en la aplicación de sistemas sostenibles de gestión de residuos sólidos. McAllister en su estudio sobre la gestión de residuos sólidos en países en desarrollo (McAllister, 2015), destaca que los principales factores que pueden evitar el aprovechamiento o reutilización de los residuos incluyen la falta de infraestructura y tecnologías apropiadas ligadas a la falta de financiamiento adecuado. En el modelo, esta se construyó como una variable *dummy* en donde 1 significa que la empresa invierte en activos para la protección ambiental y 0 cuando no existe ningún gasto relacionado.

Planes integrales de residuos sólidos como instrumento de planeación (Planes_manejo_R). Esta variable hace referencia a la existencia de un plan integral de residuos sólidos como parte de una estrategia articulada de parte de las directivas de la compañía para una producción más sostenible. Suttibak & Nitivattananon (2008) en su evaluación de circunstancias que afectan el desempeño de programas de manejo de residuos sólidos, determinaron que los factores más comunes en los programas exitosos son la conciencia de la importancia del manejo de los residuos desde la parte administrativa, disponibilidad de personal calificado y la separación eficiente de los residuos desde la fuente de producción. Esta variable se construyó como una variable *dummy*, en la que 1 significa la existencia de planes integrales, mientras que 0 representa que el establecimiento no tiene ninguna estrategia de manejo integral de residuos sólidos.

Gastos de personal dedicado a actividades de protección ambiental (G_personal_amb). Esta variable está relacionada con los recursos en miles de pesos destinados al pago personal destinado a actividades de protección ambiental. Esta cantidad indica el nivel de compromiso de parte del liderazgo de la empresa para mantener actividades ambientalmente sostenibles y corresponde a uno de los factores decisivos en conseguir sistemas de gestión de residuos eficaces, tal como lo sostiene Romero-Hernández en su trabajo de manejo de residuos sólidos para llegar a una economía circular (Romero-Hernández & Romero, 2018).

Pago de licencias, permisos, tasas y multas medio ambientales (P_licencias). Corresponde a los pagos en miles de pesos que el establecimiento hace durante un año, destinados a cumplir con responsabilidades legales relacionadas con asuntos medioambientales. Este valor está alineado con la robustez y rigurosidad del marco legal para la protección medioambiental, que afecta la forma de gestionar los residuos sólidos en las empresas.

Pago de multas o sanciones ambientales (P_multas). Esta variable hace referencia a los miles de pesos gastados en obligaciones adquiridas por el establecimiento al infringir las leyes ambientales que rigen su actividad. Este valor puede explicar el nivel de desarrollo en la gestión de residuos sólidos, ya que se espera que una empresa con un plan adecuado cumpla con los estándares exigidos por la ley y no cometa este tipo de infracciones.

2.3 Descripción de los modelos

El desarrollo de este análisis está basado en un ejercicio empírico que usa el modelo de asociación lineal bajo la metodología de OLS, datos panel y GMM. En cada uno de los modelos se presentarán las pruebas de especificación y se manejará los potenciales problemas de endogeneidad a partir de metodologías GMM.

Modelos de regresión. La especificación de la ecuación para estimar el grado de asociación entre las variables dependientes y las variables independientes se presenta en la Ecuación 1.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + E_{it} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

Y_{it} : R_mezclados; R_reutilizados, R_reciclados, R_comercializados, R_donados, R_almacenados
 X_{it} : es un vector de variables explicativas que afectan la variable dependiente. Dentro de este vector se encuentran las siguientes variables: I_equipos , Planes_manejo_R, G_personal_amb, P_licencias, P_multas, año, actividad y región.

3. Resultados

3.1 Estadística descriptiva

El análisis global de las variables dependientes en la Tabla 2, muestra que los establecimientos encuestados presentan una tendencia al alza en la generación de residuos mezclados lo largo de los tres años, subiendo su promedio de 34 toneladas por año en el 2018 a 37 toneladas en el 2020, un incremento de aproximadamente el 10%. Los residuos reutilizados, disminuyeron considerablemente durante los tres años analizados, pasando de un promedio de 70 toneladas en el 2018 a 6 toneladas en el 2020. Se observó que la gran mayoría de los establecimientos encuestados no reutiliza sus residuos, salvo algunas excepciones de empresas ubicadas

principalmente en la región pacífica, de los sectores de fabricación de plásticos, alimentos y bebidas. Estos sectores suelen generar grandes cantidades de subproductos de valor, que pueden ser empleados en otros procesos. Algo similar ocurre con los residuos reciclados, que presentan una tendencia a la baja y cuyo valor promedio más alto es de 32 Kg reciclados anuales para el año 2018.

Tabla 2. Estadísticas básicas de las variables dependientes.

Año 2018					
Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Número de observaciones
R_mezclados	34038	90609	0.00	952560	3034
R_reutilizados	70	3516	0.00	194590	3073
R_reciclados	32	873	0.00	24211	3073
R_comercializado	1093	19405	0.00	752148	3068
R_donados	25	721	0.00	35998	3073
R_almacenados	12	478	0.00	19440	3073
Año 2019					
R_mezclados	39934	106907	0.00	989280	2953
R_reutilizados	30	1399	0.00	76221	2991
R_reciclados	16	807	0.00	43943	2991
R_comercializado	858	11469	0.00	334724	2988
R_donados	741	16986	0.00	525204	2991
R_almacenados	304	8511	0.00	261570	2991
Año 2020					
R_mezclados	37912	104982	0.00	954990	2904
R_reutilizados	6	2552	0.00	133115	2940
R_reciclados	1	33	0.00	1612	2940
R_comercializado	808	9993	0.00	383492	2937
R_donados	153	2994	0.00	93605	2940
R_almacenados	34	1785	0.00	96797	2940

Los residuos comercializados y donados presentan valores mayores que los reciclados y reutilizados para los tres años, lo que indica que los establecimientos encuestados tienen una mayor tendencia a aprovechar sus residuos sólidos vendiéndolos, o ceder su procesamiento a terceros en lugar de desarrollar sistemas de gestión y reutilización integral en sus cadenas productivas. Por último, los residuos almacenados presentan una pequeña

proporción del total, a excepción del año 2019, donde hubo un registro alto, quizás impulsado datos atípicos, como indica la alta desviación estándar de la variable para ese año.

En el caso de las variables independientes, cuyas estadísticas básicas se muestran en la Tabla 3, vemos como el promedio de inversión en maquinaria y equipos para la gestión ambiental alcanzó su pico para el año 2019, con una caída considerable para el año 2020 que puede atribuirse al ambiente de incertidumbre para la inversión generado por la pandemia de COVID 19. A pesar de esta baja en la inversión, los gastos en personal dedicado a actividades de gestión ambiental presentó un incremento gradual cada año, con un aumento de aproximadamente el 15% comparando el 2020 al 2019. Esto puede dar indicios de un creciente interés por parte de los establecimientos encuestados en mejorar las capacidades de manejo ambiental, que puede ser impulsada por percepciones de posibles ventajas operativas o una mayor voluntad de ceñirse a normas ambientales cada vez más estrictas. El pago de licencias, permisos y multas ambientales se comportó de una manera fluctuante durante los tres años, mientras que el gasto en sanciones ambientales se redujo a aproximadamente a la mitad para el año 2020, comparado con el año anterior.

Tabla 3. Estadísticas básicas de las variables independientes.

Año 2018					
Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Número de observaciones
<i>I_equipos</i>	60628.00	353141.28	0	5791288.00	3073
<i>G_personal_amb</i>	52233.27	136044.83	0	2110507.00	3073
<i>P_licencias</i>	7228.43	46840.57	0	1095717.00	3073
<i>P_multas</i>	808.48	16278.87	0	409500.00	3073
Año 2019					
<i>I_equipos</i>	87041.44	678648.72	0	20929819.00	2991
<i>G_personal_amb</i>	58041.01	148303.12	0	2188199.00	2991
<i>P_licencias</i>	8343.54	54527.38	0	1173405.00	2991
<i>P_multas</i>	882.91	19869.58	0	889670.00	2991
Año 2020					
<i>I_equipos</i>	54652.65	342626.85	0	5998893.00	2940
<i>G_personal_amb</i>	60476.79	147904.00	0	2257007.00	2940
<i>P_licencias</i>	7114.09	38295.20	0	915000.00	2940
<i>P_multas</i>	465.44	12956.85	0	598802.00	2940

3.3 Resultados de los modelos

A continuación, se presenta la estimación del modelo de panel no espacial implementado para observar el comportamiento de las variables relacionadas a la gestión de residuos sólidos en industrias manufactureras colombianas. El modelo fue estimado por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), Efecto fijos (EF) y método generalizado de los momentos (GMM), este último para tener en cuenta problemas asociados a la endogeneidad. En los modelos estimados con GMM se presentan las pruebas de autocorrelación (primer y segundo orden) y el test de Hansen para validez de instrumentos.

La Tabla 4 muestra los resultados de los modelos panel estimados por OLS, Efectos Fijos y GMM de la producción de residuos mezclados para el trienio 2018-2020. Las variables más influyentes en la generación de residuos en los establecimientos encuestados son la inversión en maquinaria y equipo (17402), los gastos en personal dedicado a actividades de protección ambiental (.1651832) y en menor medida el pago de licencias, permisos, tasas y multas medio ambientales (.0725498). Por otra parte, la variable que más afecta negativamente la producción de residuos mezclados es el pago de multas y sanciones ambientales (-.3329826).

Tabla 4. Modelo panel producción de residuos mezclados 2018-2020.

Variable Dependiente: Residuos Mezclados Cantidad Generada (Kg/año) (R_mezclados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	47842.08*** (4926.785)	25015.01*** (3841.237)	17402*** (2483.064)
Planes_manejo-R	19365*** (1905.584)	12740.44*** (2164.853)	3037.191 (3150.172)
G_personal_amb	.2137773*** (.0270372)	.1958655*** (.0390212)	.1651832 *** (.0119896)
P_licencias	.1080004 ** (.0519993)	.0569193 (.0602797)	.0725498 ** (.0323581)
P_multas	-.2064802 ** (.0822781)	-.1802956 ** (.0878531)	-.3329826*** (.0705764)

R-squared	0.15	0.15	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.00875
Auto(2)			0.264
Hansen p-value			0.092
Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%			

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los modelos panel estimados por OLS, Efectos Fijos y GMM para explicar la cantidad de residuos mezclados aprovechados por los establecimientos mediante la reutilización. Se observa que las variables que disminuyen la cantidad de residuos reutilizados son los gastos en personal dedicado a actividades de protección ambiental (-.2943757), seguido de la implementación de planes integrales de residuos sólidos como instrumento de planeación, con un menor peso (-64459.31**). No se observan variables con un impacto significativo en el incremento de la reutilización de residuos para las empresas encuestadas.

Tabla 5. Modelo panel kg de residuos mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje 2018-2020.

Variable Dependiente: Kilogramos de Residuos Mezclados aprovechados por el establecimiento mediante la reutilización (R_reutilizados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	42136.58* (24574.57)	42136.58* (24658.29)	20905.74 (2483.064)
Planes_manejo_R	-26803.67 (21093.9)	-26803.67* (21095.82)	-64459.31** (3150.172)
G_personal_amb	.2321786* (.1364645)	.2321786* (.1370734)	-.2943757*** (.0119896)
P_licencias	-.0720629 (.0565739)	-.0720629 (.0661308)	.26917 (.0323581)
P_multas	-.1118577 (.0855)	-.1118577 (.0930185)	-.100107 (.0705764)

R-squared	0.1	0.15	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.976
Auto(2)			
Hansen p-value			0.10

Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%

Los resultados del modelo panel para los residuos aprovechados mediante reciclaje se muestran en la Tabla 6. El análisis arroja que la variable que más fomenta el aprovechamiento de residuos mediante el reciclaje es la inversión en equipos y maquinaria para la gestión ambiental (117.49). Las variables que afectan el reciclaje en los establecimientos encuestados son el pago de licencias, multas y otros aspectos medioambientales (-0.000138) y gastos en personal calificado en asuntos ambientales (-0.001076), aunque con un impacto mucho menor.

Tabla 6. Modelo panel kg de residuos mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje 2018-2020.

Variable Dependiente: Kilogramos de Residuos Mezclados aprovechados por el establecimiento mediante el reciclaje (R_reciclados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	84.26057** (39.56048)	84.26057** (39.46847)	117.4901** (33.49752)
Planes_manejo_R	1.482467 (2.568566)	1.482467 (2.696908)	34.23583 (42.81878)
G_personal_amb	-.0000697** (.0000348)	-.0000697** (.0000351)	-.0001076* (.0001555)
P_licencias	-.0001171** (.0000609)	-.0001171* (.0000625)	-.0000138* (.0004322)
P_multas	.00009 (.0000708)	.00009 (.0000708)	-.0000396 (.00096)
R-squared	0.32	0.29	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.0003
Auto(2)			0.23
Hansen p-value			0.14

Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%

La Tabla 7 presenta la estimación de los modelos panel no espaciales para los kilogramos de residuos mezclados comercializados. La inversión en maquinaria y equipos es la variable que más se asocia (2409.472) con el incremento de la comercialización de residuos por parte de las empresas encuestadas.

Tabla 7. Modelo panel kg de residuos mezclados comercializados por el establecimiento 2018-2020.

Variable Dependiente: Kilogramos de Residuos Mezclados comercializado (R_comercializados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	3408.631** (1631.364)	.0045686** (862.548)	2409.472** (1127.778)
Planes_manejo_R	1181.02** (491.1716)	816.9833 (638.3065)	-919.3939 (1441.602)
G_personal_amb	.0044024 (.0031297)	.0043482* (.002402)	.0038695 (.0052361)
P_licencias	-.0127498*** (.0047084)	-.0097435** (.0038486)	-.0040637 (.0145515)
P_multas	.0066194 (.0045686)	.006055 (.0036772)	.0046602 (.0323192)
R-squared	0.12	0.14	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.910
Auto(2)			
Hansen p-value			0.2
Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%			

Por parte de los residuos donados, en la Tabla 8 se observa una relación negativa moderada entre la existencia de inversiones en materiales y equipos para el cuidado ambiental y la disminución de residuos donados (-4698.725), mientras que existe un efecto positivo por parte de la variable de gastos en personal capacitado en labores ambientales (0.0983765).

Tabla 8. Modelo panel kg de residuos mezclados donados por el establecimiento 2018-2020.

Variable Dependiente: Kilogramos de Residuos Mezclados donados (R_donados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	-2658.475 (3370.666)	-3404.933 (3323.114)	-4698.725** (2388.009)
Planes_manejo_R	-1917.44 (1253.418)	-1741.941 (1311.743)	1699.218 (3052.514)
G_personal_amb	.0635326** (.0354162)	.0673053 (.0423618)	.0983765** (.0110871)
P_licencias	-.0198537 (.0253976)	-.0225884 (.0298941)	-.0257134 (.0308121)
P_multas	-.0149398 (.0213937)	-.0070171 (.0201883)	-.0068379 (.0684341)
R-squared	0.22	0.22	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.000
Auto(2)			0.32
Hansen p-value			0.19

Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%

Por último, la Tabla 9 muestra los resultados de la estimación de los modelos panel para los residuos almacenados. Se observa que el almacenamiento de residuos se ve afectado significativamente de manera negativa por la inversión total en maquinaria y equipo (-923.1395).

Tabla 9. Modelo panel kg de residuos mezclados almacenados por el establecimiento 2018-2020.

Variable Dependiente: Kilogramos de Residuos Mezclados almacenados (R_almacenados)			
VARIABLES	OLS	FE	GMM
I_equipos	-176.6187 (148.4892)	-176.6187 (149.8672)	-923.1395*** (281.9957)
Planes_manejo_R	-112.067 (132.5518)	-112.067 (132.3177)	-236.7533 (360.4658)
G_personal_amb	.0010861* (.0006084)	.0010861* (.0006282)	.0004643 (.0013093)
P_licencias	-.0011247** (.0005913)	-.0011247* (.0006231)	-.0052323 (.0036385)
P_multas	.0008487 (.0005448)	.0008487 (.0005998)	.0049099 (.0080813)
R-squared	0.24	0.20	
Año-Actividad-Región	SI	SI	SI
Auto(1)			0.000
Auto(2)			0.09
Hansen p-value			0.23

Para todos los modelos la prueba de Hausman indica que es mejor estimar efectos fijos que aleatorios. Los errores estándar robustos a heteroscedasticidad y correlación se muestran en paréntesis. *** = Significativa al 1%; ** = Significativa al 5%; * = Significativa al 10%

4. Discusión

El análisis desarrollado busca definir algunos de los factores más influyentes en la generación y aprovechamiento de residuos sólidos en las empresas manufactureras en Colombia. En primer lugar, se observa como existe la tendencia marcada de una mayor inversión en tecnología y personal capacitado para temas ambientales en los establecimientos con mayor generación de residuos sólidos de todo tipo. Esta relación puede basarse en que las empresas de mayor producción generalmente tienen mayor capacidad de inversión y por consecuencia una mejor disposición para la inversión en temas de investigación y desarrollo (I + D). Adicionalmente, los empresarios pueden ver en la inversión en I + D una oportunidad para lograr mejores tasas de crecimiento en el mercado, argumento respaldado por el análisis empírico de Del Monte & Papagni (2003) realizado con empresas del sector industrial italiano, que sostiene que las empresas más comprometidas con actividades de inversión en ciencia, tecnología e innovación tienen mejores tasas de crecimiento. Aún más, en el estudio reciente de Z. Zhou & Pan (2018),

se sugiere que la investigación en I +D puede mitigar el riesgo de la caída del valor de las acciones de las compañías, dado que mejora sus posibilidades de mantenerse en el mercado a largo plazo.

Por otra parte, los modelos muestran que el pago de multas y sanciones ambientales es un indicador que afecta la generación de residuos sólidos de todo tipo en los establecimientos encuestados. La CEPAL sugiere que el cumplimiento de marcos regulatorios ambientales es un elemento clave que deben fortalecerse para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la gestión y manejo de residuos sólidos en Colombia (CEPAL, 2017). Un sistema que castigue económicamente la mala gestión de los desechos genera incentivos para la implementación de métodos alternativos de aprovechamiento, como reutilización y reciclaje. Esto concuerda con la tendencia reportada por Xiong & Wang (2020), quienes analizaron el efecto de la aplicación de la regulación ambiental en el manejo de residuos sólidos en China y hallaron un efecto de disminución de la polución producida por residuos sólidos industriales al promoverse efectivamente marcos regulatorios tanto formales como informales.

En el aspecto del aprovechamiento de los residuos generados, el modelo GMM señala como factor más determinante para el aumento del aprovechamiento de residuos mediante el reciclaje, es la inversión en equipos para la gestión ambiental. Mora-Contreras et al. (2023) encontró que la implementación de sistemas de gestión ambiental, esquemas de producción limpia o ambos al tiempo no necesariamente influyen en la circularidad de la producción en el sector manufacturero colombiano. Es decir, la implementación de procesos como el reciclaje, reutilización, donación u otros usos de diversos residuos, requiere de otros factores que pueden estar ligados a aspectos tecnológicos o de planteamiento de modelos de negocio novedosos orientados a alcanzar la circularidad. Las empresas que destinan recursos en la actualización tecnológica generalmente presentan una inclinación por el mejoramiento continuo de sus procesos y el manejo eficiente de sus recursos, incluyendo la valorización y aprovechamiento de sus residuos. Por otra parte, algunos estudios en la literatura demuestran el importante papel de la inversión en nuevas tecnologías para la adopción exitosa de programas de reutilización y reciclaje. Platon et al. (2022) encontraron en su análisis una influencia considerable de la innovación en el reciclaje en empresas de la Unión Europea, aunque dicha influencia no es instantánea, ya que su efecto tarda 2 años en consolidarse. Por su parte, Ritzén & Sandström (2017) también resaltan las limitaciones tecnológicas como una de las barreras principales que las empresas enfrentan en la implementación de una producción circular. De los resultados obtenidos en este análisis y los datos disponibles en la literatura, se puede afirmar que la inversión en actualización tecnológica es un elemento clave para cualquier organización que desee dirigirse hacia un aprovechamiento integral de los residuos sólidos.

Un camino alternativo para el aprovechamiento de los residuos sólidos es su comercialización, común en muchas empresas del sector agrícola, cuyos subproductos son valorados en otros sectores. Algo similar ocurre en el sector metal mecánico, en el que material de rechazo de algunos procesos tiene una alta demanda comercial. El análisis arroja que la inversión en maquinaria y equipos es la variable que más afecta positivamente la comercialización de residuos sólidos, mientras que, de manera contraria, aunque más débil, afecta negativamente la donación y almacenamiento de residuos sólidos de todo tipo. Una hipótesis alrededor de este resultado es

que las empresas que invierten en modernización de equipos y materiales tienden a ser mejores identificando el potencial económico de sus desechos, además de tener una mayor capacidad posicionando en el mercado los subproductos de su labor. Frishammar et al. (2012) exponen algunos parámetros que sirven para estimar la capacidad de innovación en los procesos de una organización, entre los que destacan la capacidad de colaboración entre los equipos internos, además de una cultura organizacional sólida, que demuestre compromiso por parte de sus directivas. Sin embargo, el elemento que consideran más relevante es la alineación del propósito de las actualizaciones de equipos y procesos con la estrategia general de la organización. Es decir, debe existir coherencia entre las inversiones y los objetivos de la empresa. Desde este punto de vista, es posible suponer que las organizaciones que invierten en maquinaria y equipos tienden a tener una idea más clara del potencial de sus desechos, convirtiéndolos en una ventaja competitiva. Por esta misma razón, también se podría deducir que estas organizaciones son menos propensas a darles a sus residuos un uso no productivo desde el punto de vista estratégico, como lo serían la donación y el almacenamiento.

Los resultados de este análisis brindan información útil para orientar las decisiones estratégicas que las empresas manufactureras pueden tomar para fortalecer sus programas de gestión de residuos. La inversión en equipos y materiales, entre todos los factores estudiados, es el de mayor influencia en la mejora de los indicadores de aprovechamiento de residuos. Se puede considerar que este interés en invertir en la modernización de equipos y procesos es una manifestación de la visión de futuro de parte de quienes toman las decisiones en la organización. Este interés en el largo plazo se alinea con los valores ambientales que impulsan el aprovechamiento de residuos, velando por la sostenibilidad del medio ambiente. Es necesario aclarar que estas inversiones dependen del contexto de particular cada empresa y deben estar coordinadas con los objetivos de la organización para ser exitosos.

Los resultados también sugieren la posibilidad de que la contratación de personal calificado en actividades ambientales no sea por sí misma un elemento decisivo para el diseño y la implementación exitosa de programas de gestión integral de residuos en las industrias. Antonioli et al. (2013) sostienen que el éxito de la incorporación o entrenamiento de personal especializado para alcanzar metas de innovación ambiental es fuertemente dependiente del sector, siendo más efectivo en empresas de actividades más contaminantes, sujetos a marcos regulatorios más fuertes. Teniendo esto en cuenta, es posible plantear que para que la contratación de personal capacitado en labores ambientales sea eficaz, debe responder a una lectura adecuada de las circunstancias de cada empresa, y de la misma manera que la inversión en tecnología, ser armoniosa con la estrategia de la organización.

Estos hallazgos nos permiten sugerir algunas acciones para mejorar el proceso de toma de decisiones en las organizaciones del sector manufacturero en lo referente a generación y aprovechamiento de residuos sólidos. Las estrategias de largo plazo idealmente deben incluir planes de modernización de equipos y maquinaria para la protección ambiental. Existen mecanismos de cofinanciación (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia., 2022), además de medidas para las exenciones tributarias promovidas por el gobierno colombiano (Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, 2021), que las directivas pueden

explorar para introducir planes de actualización tecnológica, teniendo en cuenta sus circunstancias particulares y el riesgo que puedan representar. Adicional a la inherente mejora en los procesos y potenciales mejoras en la competitividad que pueda representar el uso de nuevas tecnologías en el entorno productivo, se observa que esta medida tiene un impacto transversal en todas las esferas del manejo de residuos, vital para alcanzar metas de producción circular y desarrollo sostenible. Es importante aclarar que esta medida debe verse acompañada de planes de viabilidad financiera, además de una interpretación adecuada del contexto social y económico en el que se encuentra la empresa al momento de tomar la decisión, de manera que las inversiones se hagan respondiendo a los objetivos reales de la organización.

Otro elemento importante para el trazado de estrategias para el aprovechamiento de recursos en empresas manufactureras, es tener en cuenta que la contratación de personal calificado en temas ambientales por sí misma no necesariamente se traduce en un programa exitoso de aprovechamiento de residuos. Estas contrataciones, si se hacen de manera descoordinada con la visión de la empresa, constituyen un riesgo para la operación a largo plazo y no representan un beneficio directo en las métricas de efectividad de aprovechamiento de residuos. Por lo tanto, es importante que quienes toman decisiones en la organización minimicen este riesgo con varias medidas, entre las cuales quizás la más importante sea adaptar sus procesos de recolección de datos para mejorar la confiabilidad de sus indicadores relativos a los residuos sólidos, ya que como lo indica Zorpas (2020) la imprecisión o falta de indicadores representan una de las mayores barreras para el desarrollo de estrategias para el manejo de residuos sólidos. Tener datos confiables, acompañados de una visión clara de la misión de la organización y una lectura adecuada de su contexto, permitirá tomar decisiones acertadas y minimizar los riesgos de migrar hacia modelos de producción menos lineales.

4.1 Impacto y proyección de los resultados para el sector industrial

De los resultados de este análisis se pueden derivar una serie de lineamientos estratégicos que favorezcan la adopción de esquemas de producción más circulares en las empresas manufactureras del país, con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de los residuos sólidos derivados de la actividad productiva. Estas estrategias pueden clasificarse para actores públicos (el estado en general y sus instituciones) y privados (sector industrial, específicamente el manufacturero).

Los resultados del modelo planteado en este trabajo sugieren que el factor más influyente para el éxito en el aprovechamiento de residuos sólidos, desde las industrias es la inversión en modernización de equipos y maquinaria, sincronizada con estrategias organizacionales alineadas con los objetivos de las empresas. Para esto es fundamental desarrollar sistemas de recolección de datos en materia ambiental e indicadores precisos de operación, que sean la materia prima para la toma de decisiones que beneficien las industrias. Esto sería el primer paso en la búsqueda de sistemas de producción que aprovechen los residuos sólidos, pero cabe aclarar que, para alcanzar una economía circular, el sector industrial debería no solamente hacer una buena gestión

de residuos, sino idealmente una reevaluación de su sistema productivo y considerar el cambio de paradigma de los modelos de negocio en toda la cadena de valor.

4.2 Impacto y proyección de los resultados para el sector público

El principal rol del sector público debería ser el de agente facilitador del desarrollo de esquemas de aprovechamiento de residuos. Como primera medida, es necesario que el estado cumpla sus funciones generales de proveer seguridad y estabilidad jurídica, que permitan un ambiente adecuado para el desempeño de la actividad industrial y del comercio en general. Adicionalmente, el estado debería funcionar como catalizador de la implementación de nuevas tecnologías para lograr procesos más circulares en las industrias, por medio de mecanismos como incentivos tributarios a la modernización industrial y a la implementación de procesos de reciclaje y reutilización (algunos ya existen, como se planteó más arriba en el documento) y diseño de políticas que estimulen y acompañen esta modernización.

5. Conclusiones

En este análisis, a través de un modelo de panel bajo el método GMM, se buscó definir las variables que más afectan la generación y aprovechamiento de residuos sólidos reportados en la Tabla 1 en las empresas manufactureras en Colombia. A partir de los resultados obtenidos, se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- La generación de residuos sólidos mezclados está afectada por la inversión en maquinaria y equipos. Esto se puede atribuir a que las empresas de mayor producción tienen una mayor capacidad financiera, incrementando sus posibilidades de invertir en tecnología para la modernización de sus procesos o productos.
- La gestión de residuos en las organizaciones analizadas, ya sea por medio del reciclaje o utilización, se ve fuertemente influenciada por la inversión en maquinaria y equipos para la protección ambiental. Esto puede deberse a que las empresas interesadas en la actualización tecnológica generalmente poseen la visión estratégica y valores alineados con la gestión integral de residuos. Así mismo, la inversión en tecnología hace a las empresas menos proclives a donar o almacenar sus residuos y más a comercializarlos, ya que tienen una mayor capacidad de rentabilizar sus desechos y una menor disposición a darles un uso no productivo.
- La contratación de personal no se mostró como un factor influyente en la aplicación de esquemas de reciclaje o reutilización de residuos sólidos para las organizaciones que hicieron parte de este análisis, a pesar de ser un elemento importante a la hora de implementar procesos ambientalmente sostenibles. Esto puede deberse a que el éxito de la contratación y entrenamiento de personal en temas ambientales es fuertemente dependiente del sector, y requiere de una estrategia integral de parte de la organización para ser eficaz.

- Para las empresas manufactureras colombianas, mejorar la confiabilidad y calidad de sus datos sobre la producción y aprovechamiento de residuos sólidos constituye un elemento clave para mitigar el riesgo de fracaso en el trazado de estrategias efectivas que permitan adoptar esquemas de producción más circulares.

6. Limitaciones y recomendaciones

Algunas limitaciones de este trabajo incluyen la ausencia de estudios previos que permitan una comparación directa de los resultados. Un aspecto relevante es que la cantidad de datos disponibles son limitados, por lo que sería necesario ampliar el número de registros de las encuestas para tener una confirmación más confiable de las tendencias identificadas por este estudio.

Para investigaciones futuras, un avance sería incluir una segmentación más refinada de las empresas analizadas, por sector, región, por tipo de residuo, entre otros. Hacer un análisis más segmentado, por ejemplo, por sector, permitiría generar información relevante inherente a cada tipo de industria, teniendo en cuenta los tipos de residuos por industria. Esto permitiría hacer una caracterización más precisa, que permita desarrollar políticas y aplicar las regulaciones específicas existentes para cada tipo de residuo.

Así mismo, tener información por industria, permitiría identificar el efecto de la actividad a la que se dedica cada empresa, sus hábitos de manejo de residuos sólidos, además de brindar información acerca de las características que puedan ser dependientes de su ubicación. Adicionalmente, sería valiosa la inclusión de variables independientes diferentes a las económicas que aquí se trataron, para poder tener en cuenta otras dimensiones importantes que pueden influir en el aprovechamiento de residuos sólidos, como el compromiso social y el tamaño de la organización. Como recomendación final, sería valioso comparar los indicadores analizados con los resultados en otros países, lo que permitiría identificar posibles tendencias propias de la idiosincrasia y problemáticas de la región, agregando una perspectiva local a los desafíos para la adopción de la economía circular en nuestro país.

Finalmente, es importante resaltar que los análisis realizados y los resultados planteados en este estudio, no están directamente relacionados con promover la economía circular. El enfoque de este trabajo se centra en analizar la gestión de residuos en el sector manufacturero en Colombia. Sin embargo, los resultados aquí planteados podrían tener intersecciones con la economía circular y de esa manera, en trabajos futuros, podría contribuir al desarrollo de una economía circular o establecer políticas a nivel industrial que la promuevan. Sin embargo, en este estudio, esto se menciona de manera tangencial, pues no hace parte de los objetivos de la investigación.

Bibliografía

- ANDI - Asociación Nacional de Industriales. (2017). *Guía de gestión de residuos sólidos industriales para el sector de pulpa, papel y cartón de Colombia*.
https://www.andi.com.co/uploads/GUÍA_RESIDUOS_IMP_ZAMPA_MARZO_5.pdf
- Antonioli, D., Mancinelli, S., & Mazzanti, M. (2013). Is environmental innovation embedded within high-performance organisational changes? the role of human resource management and complementarity in green business strategies. *Research Policy*, 42(4), 975–988.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.12.005>
- Batista, M., Goyannes Gusmão Caiado, R., Gonçalves Quelhas, O. L., Brito Alves Lima, G., Leal Filho, W., & Rocha Yparraguirre, I. T. (2021). A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 312(May).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127516>
- Canali, M., Moates, G., Waldron, K., Gaiani, S., Vittuari, M., & Braun, S. (2014). *Drivers of current food waste generation, threats of future increase and opportunities for reduction Colophon Title: Drivers of current food waste generation, threats of future increase and opportunities for reduction Editor*.
- Cayumil, R., Khanna, R., Konyukhov, Y., Burmistrov, I., Kargin, J. B., & Mukherjee, P. S. (2021). An overview on solid waste generation and management: Current status in Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111644>
- CEPAL. (2017). La gestión y manejo de residuos sólidos y sus propuestas regulatorias e impositivas. *Naciones Unidas*, 17.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45252/1/S1700148_es.pdf
- Chakraborty, S. K., Mazzanti, M., & Mazzarano, M. (2022). Municipal Solid Waste generation dynamics. Breaks and thresholds analysis in the Italian context. *Waste Management*, 144, 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.022>
- Cheremisinoff, N. P. (2003). Handbook of solid waste management and waste minimization technologies. In *Chemical Engineer* (Issue 744). <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7507-9.x5000-1>
- DANE. (2020). Boletín técnico: Cuenta Ambiental y Económica de Flujo de Materiales – Residuos Sólidos 2019 - 2020. In *Cuenta Satélite Ambiental (CSA)*.
- DANE. (2021). *DANE - Encuesta ambiental industrial (EAI)*.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/encuesta-ambiental-industrial-eai>
- Del Monte, A., & Papagni, E. (2003). R&D and the growth of firms: Empirical analysis of a panel of Italian firms. *Research Policy*, 32(6), 1003–1014. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00107-5)
- Departamento de Planeación Nacional - DNP. (2018). Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. *Documento Conpes 3918*, 74.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3918.pdf>
- Fatimah, Y. A., Kannan, D., Govindan, K., & Hasibuan, Z. A. (2023). Circular economy e-business model portfolio development for e-business applications: Impacts on ESG and sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 137528.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137528>

- Frishammar, J., Kurkkio, M., Abrahamsson, L., & Lichtenthaler, U. (2012). Antecedents and consequences of firms process innovation capability: A literature review and a conceptual framework. In *IEEE Transactions on Engineering Management* (Vol. 59, Issue 4, pp. 519–529). <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2187660>
- Grau, Javier; Terraza, Horacio; Rodríguez Velosa, Diana Milena; Rihm, Alfredo; Sturzenegger, G. (2015). Situación de la Gestión de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 3. <https://publications.iadb.org/en/solid-waste-management-latin-america-and-caribbean>
- Linder, M., & Williander, M. (2017). Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties. *Business Strategy and the Environment*, 26(2), 182–196. <https://doi.org/10.1002/bse.1906>
- McAllister, J. (2015). Factors influencing solid-waste management in the developing world. A *Plan B Report Submitted i Partial Fulfillmrrnt of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geography*, 299, 1–95. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1537&context=gradreports>
- Mentink, B. (2014). *Circular Business Model Innovation A process framework and a tool for business model innovation in a circular economy*. <http://www.spottygreenfrog.co.uk/>
- Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. (2021). *CONVOCATORIA PARA EL APOYO A PROYECTOS DE I+D+i QUE CONTRIBUYAN A RESOLVER LOS DESAFÍOS ESTABLECIDOS EN LA MISIÓN “COLOMBIA HACIA UN NUEVO MODELO PRODUCTIVO, SOSTENIBLE Y COMPETITIVO”-ÁREA ESTRATÉGICA ENERGÍA*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_13_-_beneficios_tributarios.pdf
- Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia. (2022). *MinTIC apoyará el desarrollo de 26 soluciones tecnológicas*. <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/238910:MinTIC-apoyara-el-desarrollo-de-26-soluciones-tecnologicas>
- Mittal, V. K., & Sangwan, K. S. (2014). Prioritizing barriers to green manufacturing: Environmental, social and economic perspectives. *Procedia CIRP*, 17, 559–564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.075>
- Mora-Contreras, R., Ormazabal, M., Hernández-Salazar, G., Torres-Guevara, L. E., Mejia-Villa, A., Prieto-Sandoval, V., & Carrillo-Hermosilla, J. (2023). Do environmental and cleaner production practices lead to circular and sustainability performance? Evidence from Colombian manufacturing firms. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.004>
- Organización de las Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- Pajunen, N., Watkins, G., Wierink, M., & Heiskanen, K. (2012). Drivers and barriers of effective industrial material use. *Minerals Engineering*, 29, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.008>
- Platon, V., Pavelescu, F. M., Antonescu, D., Frone, S., Constantinescu, A., & Popa, F. (2022). Innovation and Recycling—Drivers of Circular Economy in EU. *Frontiers in Environmental Science*, 10(July), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.902651>
- Ritzén, S., & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the Circular Economy - Integration of Perspectives and Domains. *Procedia CIRP*, 64, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005>

- Romero-Hernández, O., & Romero, S. (2018). Maximizing the value of waste: From waste management to the circular economy. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 757–764. <https://doi.org/10.1002/tie.21968>
- Suttibak, S., & Nitivattananon, V. (2008). Assessment of factors influencing the performance of solid waste recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1–2), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.004>
- World Bank Group. (2018). What a waste. In *Dairy Industries International* (Vol. 83, Issue 2).
- Xiong, B., & Wang, R. (2020). Effect of environmental regulation on industrial solid waste pollution in china: From the perspective of formal environmental regulation and informal environmental regulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217798>
- Zhou, H., & Xu, G. (2022). Research on the impact of green finance on China's regional ecological development based on system GMM model. *Resources Policy*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102454>
- Zhou, Z., & Pan, D. (2018). Can Corporate Innovation Restrain the Stock Price Crash Risk? *Journal of Financial Risk Management*, 07(01), 39–54. <https://doi.org/10.4236/jfrm.2018.71003>
- Zorpas, A. A. (2020). Strategy development in the framework of waste management. *Science of the Total Environment*, 716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137088>
- Zorpas, A. A., Lasaridi, K., Voukkali, I., Loizia, P., & Chroni, C. (2015). Promoting Sustainable Waste Prevention Strategy Activities and Planning in Relation to the Waste Framework Directive in Insular Communities. *Environmental Processes*, 2, S159–S173. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0093-3>
- Zotos, G., Karagiannidis, A., Zampetoglou, S., Malamakis, A., Antonopoulos, I. S., Kontogianni, S., & Tchobanoglous, G. (2009). Developing a holistic strategy for integrated waste management within municipal planning: Challenges, policies, solutions and perspectives for Hellenic municipalities in the zero-waste, low-cost direction. *Waste Management*, 29(5), 1686–1692. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.016>