

**ESTADO ACTUAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS DE
BIODEGRADACIÓN DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET) PARA LA
REMEDIACIÓN AMBIENTAL**



**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN, CAUCA
2023**

**ESTADO ACTUAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS DE
BIODEGRADACIÓN DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET) PARA LA
REMEDIACIÓN AMBIENTAL**

NICOLÁS MONTAÑO FLÓREZ

PAULO CÉSAR RAMÍREZ OCAMPO

Trabajo de investigación en la modalidad de monografía como requisito para optar
al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director

Ing. Esp. CÉSAR RAMÍREZ

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN, CAUCA**

2023

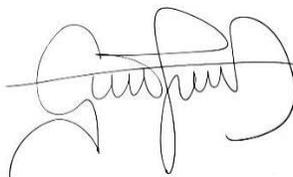
Nota de aceptación

Damos constancia que el presente trabajo de grado titulado "***Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato (PET) para la remediación ambiental***" presentado por **Nicolás Montaña Flórez** y **Paulo César Ramírez Ocampo**, ha sido evaluado y aprobado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario.

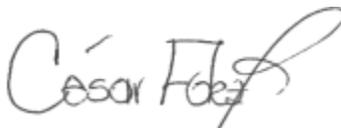


I. Ambiental. Especialista César Ramírez

Director



Ing. Amb. Edwin Sierra



PhD. Cesar Fernández

Popayán, marzo de 2023

Dedicatoria

A nuestros padres y hermanos por el apoyo incondicional y la confianza depositada en nosotros.

A Víctor Manuel Hoyos Caicedo, compañero y amigo quien tras atravesar una dura situación siempre nos dio palabras de aliento.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por hacer todo esto posible, los docentes los cuales fueron parte fundamental en el proceso de formación con su guía para poder culminar la carrera siendo unos profesionales de calidad.

A nuestras familias, amigos y conocidos gracias por haber realizado un pequeño aporte en los últimos cinco años, los cuales han sido muy fructíferos para nosotras dado el aprendizaje que hemos adquirido, todo con el fin de hoy poder estar a un paso de ser Ingenieros ambientales y sanitarios.

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.1 Descripción del problema	19
1.2. Formulación del problema	20
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Justificación	21
CAPITULO 2. BASES TEÓRICAS	23
2.1. Marco conceptual.....	23
2.1.1. Residuos sólidos de polietileno tereftalato	23
2.1.2. Biodegradación del plástico.....	24
2.2. Marco legal	24
2.2.1. Normatividad nacional.....	24
2.2.2. Normatividad departamental	25
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	28
3.1. Enfoque cuantitativo	28
3.2. Investigación descriptiva.....	28
3.3. Técnicas de recolección de información	29
3.4. Procedimiento.....	30
3.4.1. Fase I. Evaluación del estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano.....	30

3.4.2. Fase II. Análisis de los principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET.....	31
3.4.3. Fase III. Determinación de los mecanismos de adaptación de la biodegradación en el territorio caucano	32
3.5. Mapeo sistemático.....	33
CAPITULO 4. RESULTADOS	37
4.1. Evaluación del estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano.	37
4.1.1. Generación de residuos en el Departamento del Cauca.....	37
4.1.2. Generación de residuos sólidos de PET	45
4.1.3. Métodos de manejo de residuos PET en el Departamento del Cauca .	47
4.1.4. Evaluación del contexto político, social y económico caucano del manejo de residuos sólidos aprovechables.....	49
4.2. Principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET.....	57
4.2.1. Investigaciones sobre biodegradación del PET en el ámbito internacional.....	57
4.2.2. Extracción de datos del mapeo sistemático	60
4.2.3. Investigaciones sobre biodegradación del PET en el ámbito nacional .	64
4.2.4. Eficiencia de los microorganismos en la biodegradación del PET	65
4.2.5. Impactos de la biodegradación en la remediación ambiental.....	67
4.3. Determinación de los mecanismos de adaptación de la biodegradación de PET en el territorio caucano	68
4.3.1. Caracterización de la cadena de manejo de residuos aprovechables en el Cauca.....	68
4.3.2. Requerimientos de la Resolución 754 de 2014 del MADS.....	69
4.3.3. Generadores	71

4.3.4. Asociaciones	71
4.3.5. Recicladores de oficio	72
4.3.6. Grupos de investigación	72
4.3.7. Laboratorios de procesamiento de Residuos sólidos	73
4.3.8. Análisis de receptividad de actores de la cadena de manejo de residuos de PET para la implementación de la biodegradación.	73
4.3.9. Definición de mecanismos de implementación de las técnicas de biodegradación al ámbito caucano.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
Conclusiones	82
Recomendaciones	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Normatividad ambiental relacionada con residuos sólidos	26
Tabla 2. Fase de evaluación del estado de la gestión de residuos de PET en el Cauca.....	31
Tabla 3. Fase de análisis de biodegradación del PET	32
Tabla 4. Fase de determinación de mecanismos de adaptación de la biodegradación en el territorio caucano.....	33
Tabla 5. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático de biodegradación del PET mediante bacterias y hongos.....	34
Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos.....	35
Tabla 7. Palabras clave para definir relevancia de las publicaciones sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos	35
Tabla 8. Generación de residuos sólidos en el Departamento del Cauca	37
Tabla 9. Cantidad de residuos aprovechados en el Departamento del Cauca	38
Tabla 10. Cantidad semanal de otros residuos (kg)	43
Tabla 11. Cantidad semanal de residuos sólidos recolectados en Popayán.....	43
Tabla 12. Cantidad de residuos aprovechables según organizaciones (kg).....	44
Tabla 13. Cantidad de PET según organizaciones	46
Tabla 14. Manejo de residuos sólidos por los recicladores	47
Tabla 15. Manejo de residuos sólidos por centrales de acopio	48
Tabla 16. Empleados y proveedores de residuos sólidos	57
Tabla 17. Resultados de la efectividad de bacterias en biodegradación del PET .	61
Tabla 18. Resultados de la efectividad de hongos en biodegradación del PET	63
Tabla 19. Reducción de peso de láminas de PET según microorganismos.....	65
Tabla 20. Imágenes de algunas bacterias biodegradantes del PET	66
Tabla 21. Imágenes de algunos hongos biodegradantes del PET	67
Tabla 22. Autoridades ambientales con jurisdicción en Departamento del Cauca	69
Tabla 23. Requerimientos de la Resolución 754 de 2014 del MADS	70

Tabla 24. Asociaciones y empresas recicladoras del Cauca.....	71
Tabla 25. Grupos de investigación relacionados con los residuos sólidos	73

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Generación de residuos sólidos en el Departamento del Cauca.....	38
Figura 2. Comportamiento de cantidades de residuos aprovechables en Cauca..	39
Figura 3. Tipos de residuos sólidos reciclados.....	40
Figura 4. Cantidad semanal de papel recolectado	40
Figura 5. Cantidad promedio semanal de plástico recolectado	41
Figura 6. Cantidad promedio semanal de vidrio recolectado.....	41
Figura 7. Cantidad promedio semanal de aluminio recolectado.....	42
Figura 8. Cantidad promedio semanal de hierro recolectado	42
Figura 9. Tasa de aprovechamiento promedio por municipios de Colombia	45
Figura 10. Cantidad de PET recolectado semanalmente (kg)	46
Figura 11. Distribución de recicladores según género	51
Figura 12. Distribución de recicladores según edad.....	52
Figura 13. Edades máximas y mínimas de los recicladores según departamento	53
Figura 14. Distribución de los recicladores según estrato socioeconómico.....	53
Figura 15. Distribución de los recicladores según procedencia.....	54
Figura 16. Distribución de los recicladores según experiencia.....	55
Figura 17. Distribución de los recicladores según experiencia.....	55
Figura 18. Estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias	58
Figura 19. Distribución anual de los estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias	58
Figura 20. Distribución por países de los estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias	59
Figura 21. Estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos	59
Figura 22. Distribución anual de los estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos.....	60
Figura 23. Distribución por países de los estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos.....	60
Figura 24. Percepción del nivel de contaminación del PET	74

Figura 25. Métodos de reducción de contaminación por PET conocidos por recicladores.....	74
Figura 26. Métodos de biodegradación del PET conocidos por los recicladores ..	75
Figura 27. Nivel de compromiso para reducir la contaminación por PET	75
Figura 28. Disposición de participación de procesos de biodegradación del PET	76
Figura 29. Razones de participar o no de biodegradación del PET	76
Figura 30. Disposición de participar en taller sobre biodegradación del PET.....	77
Figura 31. Mecanismos de implementación de la biodegradación del PET	78

Lista de anexos

	Pág.
Anexo 1. Formato de encuesta para personas recicladoras de residuos sólidos	110
Anexo 2. Formato de encuesta para organizaciones dedicadas a la actividad de reciclaje de residuos sólidos.....	113
Anexo 3. Formato de encuesta diligenciado con personas recicladoras de residuos sólidos	115
Anexo 4. Formato de encuesta diligenciado con organizaciones recicladoras de residuos sólidos.....	117

Resumen

Este documento presenta los resultados de un proceso de investigación cuyo objetivo es determinar el estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato -PET- como alternativa para la remediación ambiental en el territorio caucano. Para ello se implementó una metodología apoyada el método de mapeo sistemático para la evaluación de la gestión de residuos sólidos en el Departamento del Cauca y principalmente en Popayán, así como para la identificación de procesos de biodegradación a través de bacterias y hongos. También se utiliza la técnica de encuesta para la caracterización de los actores de la cadena de manejo de los residuos, así como para la definición de mecanismos de implementación de la biodegradación con los microorganismos mencionados. Los resultados evidencian la existencia de una cadena de gestión de los residuos compuesta principalmente por recicladores de oficio y centros de acopio, quienes en promedio manejan una cantidad aproximada de 438 toneladas, de las cuales 51,6 corresponden a PET. Así mismo, se identificaron bacterias y hongos con una alta eficiencia en la degradación, sobre todo bacterias de los géneros *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Streptomyces sp.* e *Ideonella skaniensis* que causan pérdidas de peso superiores al 50% a raíz de tratamientos durante 50 a 120 días en promedio, así como en hongos de los géneros *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.* y *Pleorotus ostreatus* que degradan el PET en 30% o más durante 60 a 150 días. Finalmente, se evidencia una baja receptividad de los actores de la cadena frente a la implementación de la biodegradación en tanto supone una amenaza a la recuperación y reciclaje como actividad económica generadora de empleo e ingresos, ante lo cual es necesario implementar estrategias como un programa de sensibilización, un proyecto piloto en el contexto caucano y propuestas de remediación ambiental con base en estas biotecnologías teniendo en cuenta la participación de los actores de la cadena.

Palabras clave: residuos sólidos, PET, biodegradación, bacterias, hongos.

Abstract

This document presents the results of a research process whose objective is to determine the current status of the implementation of biodegradation processes for polyethylene terephthalate -PET- as an alternative for environmental remediation in the Cauca territory. For this, a methodology supported by the systematic mapping method is implemented for the evaluation of solid waste management in Cauca and mainly in Popayán, as well as for the identification of biodegradation processes through bacteria and fungi. The survey technique is also used for the characterization of the actors in the waste management chain, as well as for the definition of mechanisms for implementing biodegradation with the aforementioned microorganisms. The results show the existence of a waste management chain composed mainly of professional recyclers and collection centers, who on average handle an approximate volume of 438 tons, of which 51,6 correspond to PET. Likewise, bacteria and fungi with high efficiency in degradation were identified, especially bacteria of the genera *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Streptomyces sp.* and *Ideonella skaniensis* that cause weight loss of over 50% as a result of treatments for 50 to 120 days on average, as well as in fungi of the genera *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.* and *Pleorotus ostreatus* that degrade PET by 30% or more for 60 to 150 days. Finally, there is evidence of a low receptivity of the actors in the chain against the implementation of biodegradation as it poses a threat to recovery and recycling as an economic activity that generates employment and income, in view of which it is necessary to implement strategies such as a awareness, a pilot project in the Cauca context and proposals for environmental remediation based on these biotechnologies, taking into account the participation of the actors in the chain.

Keywords: solid waste, PET terephthalate, biodegradation, bacteria, fungi

INTRODUCCIÓN

Las actividades antrópicas son responsables de la generación de grandes volúmenes de residuos sólidos, al punto que la capacidad de degradación del medio ambiente ha sido superada y con ello afectaciones significativas sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos [1]. Como estadística más reciente, en Colombia, durante el año 2020 se produjeron 32.580 toneladas, lo que significó un crecimiento del 0.89% con respecto a 2019, siendo aprovechadas aproximadamente el 17% [2], mientras que en el Departamento del Cauca la tasa es del 3.3% del total generado según datos de la CEPAL [3].

De estos residuos, el plástico es quizá el más representativo y sobresale el PET como el que con mayor frecuencia se utiliza por los hogares y empresas para el envasado de alimentos, recubrimiento de materiales y demás [4], razón por la cual es uno de los residuos más comunes y de los que más contamina, sobre todo cuando no se cuenta con una cadena de manejo robusta y eficiente.

En tal sentido, esta investigación se enfocó en determinar el estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno PET como alternativa para la remediación ambiental en el territorio caucano. Esto implica comprender la problemática ambiental que representa este material, ya que genera impactos negativos sobre los ecosistemas. Sin embargo, también tiene un impacto positivo al ser aprovechable, generando una actividad económica que puede generar empleo e ingresos, por lo que es pertinente indagar acerca de aquellos aspectos claves de la cadena de manejo en la región.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se desarrolló en tres fases, siendo la primera la evaluación del estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano, la segunda el análisis de los principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET y la tercera la definición de mecanismos de adaptación de la biodegradación en el territorio. La técnica predominante fue el mapeo sistemático apoyado en bases de datos tales como Dialnet, Redalyc, Scielo, Science Direct y Scopus, de manera que los artículos científicos consultados proveyeron la información secundaria necesaria y se

complementó con la encuesta a actores de la cadena de manejo para obtener datos primarios.

Los resultados permiten señalar que en el Cauca la gestión de los residuos se caracteriza por la existencia de una normatividad ambiental que permite articular acciones de los diferentes actores representados en recicladores de oficio y centros de acopio que contribuyen al aprovechamiento de materiales como el papel, cartón, plástico y entre este el PET, vidrio, aluminio, hierro, tetra pack, poliestireno, aluminio plastificado, entre otros. En cuanto al PET, la generación sobrepasa las 50 toneladas semanales según reportes de los centros de acopio, producto de la recuperación en diferentes municipios del Cauca, cuyo destino es la comercialización nacional y la exportación, así como para la transformación en otras ciudades.

En cuanto a los procesos de biodegradación, tras el proceso de mapeo sistemático, se han identificado 46 publicaciones que demuestran una alta eficiencia al utilizarse consorcios de bacterias y de hongos, algunos estudios muestran degradación significativa del PET al lograrse pérdida de masa del material superior al 60% en bacterias y en hongos del 45%, dependiendo de los pretratamientos y tiempo de realización de los experimentos, siendo microorganismos como las *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Ideonella skaniensis*, entre las bacterias que mejores resultados presentan y *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.* y *Pleurotus ostreatus* en el caso de los hongos.

Frente a los mecanismos de adaptación de la biodegradación del PET, se proponen estrategias tendientes a sensibilizar a los actores de la cadena, siempre que los recicladores de oficio conciben esta alternativa de remediación ambiental como una amenaza a su actividad económica, por lo que se considera necesario generar consensos acerca de cómo implementarla en el Cauca, para lo cual la participación de estos es fundamental.

CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

El uso de plástico ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, principalmente del polietileno tereftalato “PET” que se utiliza en la industria alimenticia [5], ocasionando un aumento en la cantidad de materiales contaminantes en los cuerpos de agua y suelos, así como en los efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud pública [1].

De acuerdo con datos recientes, a finales de 2020 en el mundo se producían 367 millones de plástico, de las cuales cerca del 65% correspondía a polietilenos, representado en Polietileno de Alta (PEAD) y Baja Densidad (PEBD) y en tereftalato PET, mientras que en Colombia la producción de este material se ubicó en 1,2 millones de toneladas [6].

El principal problema del PET está en la acumulación, pues los progresos en términos de reciclaje no han sido suficientes para evitar que lleguen al ambiente y la baja capacidad de degradación hace que se mantenga por largos periodos de tiempo [7]. Hacia el año 2015, en el mundo en promedio se reciclaba el 41% del PET, donde Japón es el líder con el 78% el cual presenta una diferencia significativa si se compara con Colombia que solo recicla el 24% de este material [8]. En el caso del Cauca la generación de residuos de plástico se aproxima a las 20 mil toneladas anuales, de las cuales en el año 2020 solo se aprovecharon 3514 por medio del reciclaje [9].

Los anteriores datos evidencian que la cantidad que se aprovecha o se recicla es insuficiente; por lo que la mayor cantidad se convierte en material contaminante, máxime cuando existen dificultades para consolidar una cultura de gestión de residuos de este material, sobre todo en los países pobres y emergentes [10], con lo cual la problemática ambiental causada por el PET tiende a perpetuarse si no se toman decisiones correctivas oportunamente.

El problema se agrava en tanto el PET queda expuesto a factores físicos (radiación, rozamiento, calor, entre otros) y como químicos (humedad, acidez y demás) que

generan los micro plásticos, consistentes en partículas de máximo 5 mm que dificultan aún más su gestión [11], constituyéndose en una amenaza para la biodiversidad y la salud pública a raíz de los efectos tóxicos en aguas y suelos [12].

Sin embargo, aunque es un problema ambiental que persiste, en la actualidad se han presentado avances tecnológicos entre los cuales está el uso de microorganismos para la biorremediación, tales como hongos [12-17] y bacterias [19-22], además de otros agentes biológicos como las larvas que desempeñan una función óptima [23-25] que han demostrado eficacia en la degradación del PET.

Se trata entonces de procesos que evitan los altos costos económicos y ambientales derivados de la implementación de los de tipo físicoquímico, una razón por la que estos agentes biológicos pueden considerarse como alternativas viables. No obstante, aunque existen avances significativos sobre esta opción, la difusión de este tipo de tecnologías requiere de ejercicios que quizá puedan aportar a impulsarlos para darlos a conocer en los diferentes contextos para una eventual implementación en aras de aportar a la remediación ambiental, por lo que se plantea la siguiente pregunta:

1.2. Formulación del problema

¿Cómo el estado actual de investigaciones sobre la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato (PET) puede ser una alternativa para la remediación de la problemática ambiental en el territorio caucano?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato - PET- como alternativa para la remediación ambiental en el territorio caucano.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano con base en la última caracterización de residuos realizada a nivel departamental.

- Analizar los principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET a nivel mundial y su nivel de eficiencia como alternativas para la remediación ambiental.
- Determinar los mecanismos por los cuales los procesos de biodegradación del PET puedan adaptarse como alternativas para la solución de las problemáticas ambientales causadas por este material en el territorio caucano.

1.4. Justificación

Los procesos de biodegradación del PET pueden contribuir entre otros aspectos al mejoramiento de las condiciones ambientales, sociales, económica y científicas, puesto que:

En lo ambiental, propende por destacar el uso de microorganismos para la biodegradación del PET como alternativas para que las actividades antrópicas que requieren de este tipo de material puedan desarrollarse de manera adecuada en aras de la protección del ambiente, por lo cual es posible evidenciar beneficios importantes derivados de estas tecnologías innovadoras a partir de hallazgos en otros contextos a raíz de proyectos de investigación a escala laboratorio. En ese sentido, propende por destacar experiencias investigativas en las cuales puede comprenderse cómo estas alternativas pueden ayudar a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible propuestos por la ONU [26].

Frente a lo social, es un ejercicio que puede evidenciar los beneficios sociales en términos de bienestar de la población a raíz de la remediación ambiental como parte de los planes y programas de saneamiento básico de los entes territoriales, entre ellos el Departamento del Cauca y sus municipios, con lo cual la calidad de vida de las comunidades y de los ambientes naturales de este territorio podrían mejorarse ante la implementación a futuro de procesos de biodegradación del PET.

Al respecto, estudios como el de Garzón, Rodríguez y Hernández [27] plantean que la biorremediación contribuyen a reducir significativamente los impactos de los problemas de contaminación en tanto son tecnologías que al implementarse son

compatibles con el medio ambiente, de manera que los efectos secundarios son prácticamente nulos a diferencia de otros como los físico-químicos.

Desde lo económico, estas alternativas pueden representar procesos de bajo costo para el manejo de residuos de PET, con lo cual los entes territoriales pueden tener un mayor margen de maniobra para financiar los planes y programas de gestión de residuos de este tipo de materiales.

Sobre esto, Chappuis [28], plantea que los procesos de remediación biológica se constituyen en alternativas de bajo costo que permiten a las organizaciones desarrollar actividades para la sostenibilidad ambiental sin el despliegue de proyectos de gran envergadura como tradicionalmente ocurre con los procesos físico-químicos que en gran parte de estos terminan causando alteraciones adicionales en el medio ambiente, como la emisión de gases ante la incineración, por ejemplo.

Desde lo académico, es posible aportar resultados derivados de experiencias investigativas a nivel nacional e internacional que amplíen los conocimientos sobre los procesos de biodegradación del PET a partir del uso de microorganismos capaces de garantizar una biorremediación ambiental. En ese sentido, es una propuesta que establece el punto de partida para la implementación de una o varias alternativas de biodegradación del PET a escala laboratorio para trabajos futuros.

CAPITULO 2. BASES TEÓRICAS

2.1. Marco conceptual

La propuesta se basa en elementos conceptuales relacionados con la generación de residuos plásticos, específicamente del PET, la gestión ambiental en vista de la problemática que implica este tipo de residuos sólidos y la biodegradación como alternativa de remediación ambiental.

2.1.1. Residuos sólidos de polietileno tereftalato

Desde el punto de vista químico, el PET es un polímero obtenido a partir de la reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol, lo que hace que se clasifique dentro del grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres [29].

Es un material de alta resistencia al desgaste y la corrosión, además de resistir a cambios químicos y térmicos, lo que le permite ser un compuesto que actúa como barrera del CO₂ y la humedad, propiedades por las cuales se utiliza de forma masiva para el envase y almacenamiento especialmente de alimentos [30], pero expuesto a las condiciones climáticas adversas pierde esta capacidad y las microparticulas pueden generar afectaciones graves sobre los suelos y los cuerpos de agua, razón principal por la que se convierte en un elemento de preocupación ambiental.

Precisamente, ante el uso excesivo de este material, la gestión ambiental de estos residuos se ha convertido en un desafío que ha sobrepasado las capacidades institucionales, principalmente en los países emergentes y en vías de desarrollo, puesto que no adoptan tecnologías que les permita hacer un aprovechamiento significativo del PET y de otros de la misma familia de compuestos, y aunque el reciclaje es la primera opción, en la mayoría de países no se ha consolidado una cultura al mismo nivel de países como Suecia o Alemania que inclusive importan este tipo de residuos [31].

En ese sentido, la gestión ambiental presenta limitaciones y cuando se implementan mecanismos como la disposición en rellenos sanitarios, la incineración o las alternativas fisicoquímicas se incurre en altos costos en términos financieros y

ambientales que se traducen en un obstáculo para mitigar o controlar los efectos derivados de la contaminación por PET [32].

2.1.2. Biodegradación del plástico

Se constituye como una alternativa de gestión ambiental que debe difundirse para efectos de reducir la contaminación del tereftalato y por ende los efectos negativos sobre el ambiente. La biodegradación consiste en un proceso biológico en el que actúan microorganismos para consumir, destruir o acelerar el proceso de degradación del PET, principalmente por medio del metabolismo de bacterias y hongos de los cuales en algunos casos emanan sustancias que alteran la estructura molecular y demás efectos sobre este material que han comprobado algunos estudios [13-15] [22] entre otros.

De manera más concreta, la biodegradación de los plásticos conlleva, primero la unión de los microorganismos a la superficie del polímero, posteriormente el crecimiento de los microorganismos empleando el polímero como fuente de carbono, a lo que sigue la segregación de enzimas y la degradación final del polímero a CO₂ y agua en el caso que se emplean condiciones aerobias, biogás y agua en condiciones anaerobias [11] [21] [23].

2.2. Marco legal

En Colombia, existe una amplia normatividad representada en leyes, ordenanzas, decretos, resoluciones y acuerdos que se han promulgado para efectos de la gestión de residuos sólidos, de la cual pueden destacarse de manera general, las siguientes figuras legales según cada ámbito territorial.

2.2.1. Normatividad nacional

Como norma superior, la Constitución Política de 1991, establece derechos relacionados con el goce de un ambiente sano por parte de las comunidades, así como deberes de los ciudadanos encaminados a la protección del mismo mediante la prohibición de arrojamiento de sustancias y residuos, que de acuerdo con el Artículo 49 del Capítulo 2, establece que el Estado es responsable de la organización, dirección y reglamentación de los servicios de salud, para lo cual el

saneamiento básico es uno de los campos que debe gestionarse, así como lo establecido en los artículos comprendidos entre el 78 y el 82 del Capítulo III que trata de la gestión de vertimientos y de residuos [33].

En razón a los planteamientos anteriores, se promulgó la Ley 99 de 1993, que en el Título VI, Artículo 31, numeral 12 asigna funciones a las Corporaciones Autónomas Regionales para la evaluación, control y seguimiento de la emisión de residuos sólidos, así como funciones para las entidades territoriales en cuanto a la gestión de este tipo de elementos consagrados en el Artículo 66 de la misma ley [34].

También puede destacarse el Decreto 1713 de 2002, que reglamenta el servicio de aseo el cual se rige por las leyes 142 de 1994, 632 de 2000 y 689 de 2001, además de lo establecido en relación con la gestión integral de residuos sólidos de que tratan el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 [35].

Además, está la Resolución 1045 de 2003, la cual establece los lineamientos para una metodología tendiente al diseño de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) [36], así como la Resolución 0477 de 2004, la cual establece los tiempos para la ejecución de estos [37]. Luego, está la Resolución 754 de 2014, la cual establece los criterios relacionados con la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS [38], siendo por lo tanto la que está vigente hasta la actualidad.

Como normas recientes, están el Decreto 596 de 2016, el cual establece parámetros encaminados a la formalización de recicladores, teniendo en cuenta lo señalado en el Decreto 1077 de 2015 frente al esquema de aprovechamiento de residuos sólidos derivados del servicio público de aseo [39].

2.2.2. Normatividad departamental

Además de la normatividad nacional que es aplicable al Departamento del Cauca, está la emanada de la Asamblea Departamental bajo la figura de ordenanzas y la de la Gobernación del Cauca conforme a decretos y resoluciones de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC).

Sobre ello, la Ordenanza 032 de 2020 en la que se formaliza la adopción del Plan Departamental de Desarrollo para el periodo 2020 – 2023 “42 motivos para avanzar”, se encuentran elementos relacionados con la protección y conservación del medio ambiente, para lo cual se definen programas y proyectos de gestión de residuos sólidos, especialmente a partir de la cobertura del servicio de aseo, privilegiando el reciclaje [40].

A estos programas y proyectos, se suman las diferentes resoluciones de la CRC para efectos del manejo y disposición de los PGIRS de las diferentes organizaciones sociales, empresas y entes territoriales que de manera individual se emiten con fines de velar por el cumplimiento de la normatividad vigente.

A manera de síntesis, la normatividad que rige la gestión de riesgos sólidos en Colombia y el Departamento del Cauca puede sintetizarse en la tabla 1.

Tabla 1. Normatividad ambiental relacionada con residuos sólidos

Norma	Descripción
Constitución Nacional de Colombia 1991	Rescata temas relacionados con la protección del medio ambiente y el derecho de la comunidad de gozar de un ambiente sano. Contiene la prohibición expresa de introducir al territorio Nacional sustancias tóxicas o peligrosas.
Ley 99 de 1993	Ley General Ambiental de Colombia. Crea el Ministerio del Medio Ambiente, reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA.
Decreto 1600 de 1994	Por el cual se reglamenta parcialmente el Sistema Nacional Ambiental (SINA) en relación con los Sistemas Nacionales de Investigación Ambiental y de Información Ambiental.
Decreto 1180 de 2003	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales.
Decreto 1200 de 2004	Por el cual se determinan los instrumentos de planificación ambiental y se adoptan otras disposiciones
Resolución 0643 de 2004	Por medio de la cual se establecen los indicadores mínimos de que trata el artículo 11 del Decreto 1200 de 2004 y se adoptan otras Disposiciones
Decreto 2104 de 1983	Reglamenta parcialmente Decreto - Ley 2811 de 1974 y la Ley 9 de 1979 en cuanto a residuos sólidos. Define la terminología técnica relacionada con residuos sólidos. Contiene normas sanitarias aplicables al almacenamiento, presentación,

	recolección, transporte, transferencia, transformación y disposición sanitaria de los residuos sólidos.
Decreto 1713 de 2002	Establece normas orientadas a reglamentar el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios, en materias referentes a sus componentes, niveles, clases, modalidades, calidad, y al régimen de las personas prestadoras del servicio y de los usuarios. Modificado por el Decreto 1505 del 4 de junio de 2003, en relación con los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS
Decreto 1505 de 2003	Modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión Integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1140 de 2003	Modifica parcialmente el decreto 1713 de 2002, en relación con el tema de las unidades de almacenamiento, y se dictan otras disposiciones. Establece las obligaciones que en materia de sistemas de almacenamiento colectivo de residuos sólidos deben cumplir los multiusuarios del servicio de aseo
Decreto 838 de 2005	Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
Resolución 1045 de 2003	Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones
Resolución 754 de 2014	La cual establece los criterios relacionados con la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS
Decreto 1077 de 2015	Lineamientos para el esquema de aprovechamiento de residuos sólidos derivados del servicio público de aseo
Decreto 596 de 2016	El cual establece parámetros encaminados a la formalización de recicladores
Ordenanza 032 de 2020	adopción del Plan Departamental de Desarrollo para el periodo 2020 – 2023 “42 motivos para avanzar”, en el cual se establecen planes, programas y proyectos sobre gestión de residuos sólidos

Fuente: IDEAM [41]

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

De acuerdo con la naturaleza de los objetivos planteados, en esta investigación prevalece el enfoque cuantitativo, pues el análisis se basa principalmente en datos de tipo numérico y de estadísticas descriptivas.

Así mismo, es un estudio con diseño no experimental y de alcance descriptivo, puesto que se limita a presentar información sobre la gestión de los residuos sólidos, en especial del PET y de los procesos de biodegradación del mismo.

Por otra parte, se apoya en técnicas de recolección de información como la revisión documental de trabajos e informes de la gestión de residuos sólidos; el mapeo sistemático para el acopio de antecedentes investigativos a nivel internacional y nacional sobre el uso de bacterias y hongos como biotecnología de remediación ambiental y la encuesta para levantamiento de datos primarios a partir de las personas dedicadas a la actividad del reciclaje y de organizaciones o empresas que hacen parte de la cadena de manejo de tales residuos.

3.1. Enfoque cuantitativo

Para los análisis tendientes a la comprensión de un problema de investigación requiere de información numérica, la cual es susceptible de tratarse mediante técnicas que permiten medir o cuantificar un fenómeno, de manera que los aspectos objetivos prevalecen para efectos de emitir juicios o conclusiones sobre una realidad observada [42]. En este caso en específico, se llevará a cabo un tratamiento de información a través de la estadística descriptiva relacionada con la generación de residuos, principalmente de plástico PET, de datos resultantes de una encuesta de caracterización del proceso de gestión de residuos sólidos, de la efectividad de las alternativas de biodegradación y biorremediación del PET, así como de la percepción de personas y organizaciones vinculadas al manejo de residuos sólidos.

3.2. Investigación descriptiva

Los alcances descriptivos implican que no se lleva a cabo un proceso de intervención que procura modificar una problemática observada, por lo que se limita a presentar de manera objetiva una realidad en un momento dado [43-44].

Siguiendo los anteriores planteamientos, esta investigación no es de carácter experimental, pero procura establecer elementos de análisis que a futuro contribuirán al diseño e implementación de una propuesta aplicada sobre el posible uso de alternativas de remediación ambiental a partir del uso de microorganismos biodegradantes del plástico PET en cualquier escenario.

3.3. Técnicas de recolección de información

Como ya se mencionó, es una investigación apoyada en la revisión documental que permite obtener información secundaria y en la encuesta que está orientada a obtener datos de fuentes primarias, principalmente personas y organizaciones.

En cuanto a la primera técnica, puede afirmarse que es un proceso de acopio, sistematización y análisis de información que reposa en registros físicos y digitales que conforman un aparato crítico acerca de un tema en particular y de interés por describirlo y aplicarlo a casos nuevos (Rojas, 2011).

La revisión documental en el presente estudio se materializa a partir del método de mapeo sistemático, es decir, mediante la realización de búsqueda de antecedentes investigativos sobre generación y manejo de residuos sólidos en los ámbitos internacional, nacional y regional que ofrezcan datos para una caracterización de la problemática de este tipo de residuos. Además, se realiza revisión de documentos tendientes a identificar y describir normas ambientales al respecto aplicables al Departamento del Cauca. Esta técnica también se implementa para el análisis de la efectividad de los microorganismos degradantes del PET como alternativas de biorremediación ambiental.

Sobre la encuesta, se trata de una técnica cuantitativa muy utilizada para efectos de recolectar información, principalmente numérica o escalar que según Meneses y Rodríguez [45], ante los últimos desarrollos metodológicos y, especialmente, en el tratamiento estadístico de los datos, se ha convertido en una de las alternativas más frecuentemente utilizadas recientemente en investigación social para efectos de obtener datos numéricos y de modo que permite el diseño de instrumentos (aparentemente) sencillos de construir, basado en el autoinforme como método para recolectar datos y, en consecuencia, permite el ahorro de tiempo y costos en el

trabajo de campo. Se considera como la técnica cuantitativa más comúnmente usada para la obtención de información primaria, de manera que a partir de preguntas cerradas es viable obtener datos cuantitativos o escalares precisos sobre un tema o problema de investigación, cuya sistematización es ágil [46].

En este caso, se implementan dos encuestas destinadas a la caracterización de la gestión de los residuos sólidos, por lo que una se implementa con personas que realizan actividades de recolección y venta de los materiales aprovechables; mientras que la otra está dirigida a empresas. En ambos casos se formulan preguntas de tipo cerrado con opciones múltiples, que según Matas [47], facilitan el suministro de información con una mayor precisión, a la vez que agilizan la sistematización. Los formatos de las encuestas son los anexos 1 y 2.

3.4. Población y muestra

En la actualidad se desconoce el número de recicladores que existen en el Departamento del Cauca y en cuanto a organizaciones, el número es de aproximadamente 20 que reciben los residuos, principalmente de papel, plástico, hierro, aluminio, entre otros [36]. En el caso de Popayán, según la Alcaldía Municipal el número asciende a 326 [37]. Sin embargo, para efectos de conocer algunos aspectos relacionados con este eslabón de la cadena de manejo, se han encuestado a 46 personas. En ese sentido, se trata de una muestra intencionada, la cual se basa en la disposición de participar por las personas involucradas en un hecho o proceso social [38].

3.5. Procedimiento

Conforme a los objetivos planteados, la investigación se desarrolla siguiendo tres fases con sus respectivas actividades, indicadores, métodos y criterios, tal como se describen a continuación:

3.5.1. Fase I. Evaluación del estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano

Involucra un conjunto de actividades cuyos resultados permiten comprender el estado de la gestión de los residuos sólidos en el Departamento del Cauca, para lo

cual se implementan técnicas de recolección primaria y secundaria como se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Fase de evaluación del estado de la gestión de residuos de PET en el Cauca

Actividad	Indicadores	Método	Criterios de inclusión
Búsqueda de información de caracterizaciones de residuos no peligrosos en el Cauca.	<ul style="list-style-type: none"> Estadísticas de la generación de residuos sólidos, especialmente de PET. 	Mapeo sistemático	<ul style="list-style-type: none"> Artículos de revistas indexadas de estudios regionales de residuos sólidos -RS. Informes de autoridades ambientales regionales. Publicaciones desde 2010 en adelante. Palabras clave como residuos sólidos.
Análisis de los métodos de manejo de residuos de PET en el Cauca	<ul style="list-style-type: none"> Listado de métodos de manejo de residuos sólidos – RS. Tablas, gráficos y diagramas de métodos de manejo de RS. 	Revisión documental	
Evaluación del contexto político, social y económico caucano sobre el manejo de residuos sólidos - RS aprovechables	<ul style="list-style-type: none"> Listado de normas ambientales aplicables al Cauca sobre gestión de RS. Número de personas y organizaciones vinculadas a la gestión de RS en el Cauca. Programas y proyectos de manejo de RS vigentes en el Cauca. 	Revisión documental	<ul style="list-style-type: none"> Artículos de revistas indexadas de estudios regionales de residuos sólidos. Informes de autoridades ambientales regionales. Publicaciones desde 2010 en adelante. Palabras clave como residuos sólidos, recicladores
	<ul style="list-style-type: none"> Número de personas u organizaciones de reciclaje Datos de volúmenes de manejo de RS aprovechables. Número de empleos generados en el manejo de RS aprovechables. 	Encuesta	<ul style="list-style-type: none"> Personas mayores de edad. Personas u organizaciones vinculadas a la cadena de manejo de RS. Personas u organizaciones que vivan en el Cauca.

Fuente: elaboración propia

3.5.2. Fase II. Análisis de los principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET.

Como se muestra en la tabla 3, esta fase está orientada a un análisis de los resultados de aquellos estudios que han implementado microorganismos para la

degradación del PET, así como a la identificación de la efectividad de estos en aras de la remediación de la problemática ambiental causada por este tipo de residuos.

Tabla 3. Fase de análisis de biodegradación del PET

Actividad	Indicadores	Método	Criterios de inclusión
Búsqueda de información de investigaciones en biodegradación del PET a nivel internacional.	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos de investigación internacional sobre biodegradación del PET 	Mapeo sistemático	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos de revistas indexadas. • Artículos desde 2015 en adelante. • Palabras clave: microorganismos de biodegradación del PET. Biorremediación ambiental del PET. • Bacterias, hongos y larvas de biodegradación del PET.
Búsqueda de información de investigaciones de biodegradación del PET a nivel nacional y regional.	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos de investigación nacional sobre biodegradación del PET. 	Mapeo sistemático	<ul style="list-style-type: none"> • Artículos de revistas indexadas. • Artículos desde 2015 en adelante. • Palabras clave: microorganismos de biodegradación del PET. Biorremediación ambiental del PET. • Bacterias, hongos y larvas de biodegradación del PET.
Determinación de estado de implementación de investigaciones de biodegradación del PET	<ul style="list-style-type: none"> • Listado de tipos de microorganismos biodegradantes del PET. • Estadísticas de eficiencia de la biodegradación del PET según tipo de microorganismo. • Estadísticas sobre biorremediación según tipo de microorganismo. 	Revisión documental	

Fuente: elaboración propia

3.5.3. Fase III. Determinación de los mecanismos de adaptación de la biodegradación en el territorio caucano

Conforme al tercer objetivo específico, se busca plantear de manera exploratoria la posibilidad de implementar la biodegradación del PET a partir de microorganismos como alternativa para la remediación ambiental en el Departamento del Cauca, por lo que entonces, se implementan las actividades descritas en la tabla 4:

Tabla 4. Fase de determinación de mecanismos de adaptación de la biodegradación en el territorio caucano

Actividad	Indicadores	Método	Criterios de inclusión
Clasificación y definición por sectores de los actores en la cadena de manejo de residuos aprovechables en el Cauca	<ul style="list-style-type: none"> Listado de autoridades con jurisdicción en el Cauca. Listado de requerimientos de Resolución 754 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS (2014) y el Decreto 596 de 2016 Listado de generadores, gestores, asociaciones, recicladores de oficio, bodegueros o chatarreros. Listado de grupos de investigación. Listado de laboratorios de procesamiento de RS. 	Revisión documental	<ul style="list-style-type: none"> Documentos relacionados con Resolución 754 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS (2014) y el Decreto 596 de 2016
Análisis de receptividad de los actores de la cadena de manejo de residuos aprovechables de PET para la implementación de métodos de biodegradación en sus procesos	<ul style="list-style-type: none"> Número de personas u organizaciones de la cadena de manejo de RS dispuestas a participar de procesos de biodegradación del PET. 	Encuesta de percepción	<ul style="list-style-type: none"> Personas mayores de edad. Personas u organizaciones vinculadas a la cadena de manejo de RS. Personas u organizaciones que vivan en el Cauca.
Definición de mecanismos de implementación de las técnicas de biodegradación por sectores en el territorio caucano	<ul style="list-style-type: none"> Listado y análisis de mecanismos de implementación de procesos de biodegradación del PET en el Cauca. Formas de participación de los actores de la cadena de manejo de RS en el Cauca para implementar procesos de biodegradación del PET. 	Taller de capacitación	<ul style="list-style-type: none"> Personas mayores de edad. Personas u organizaciones vinculadas a la cadena de manejo de RS. Personas u organizaciones que vivan en el Cauca.

Fuente: elaboración propia

3.6. Mapeo sistemático

Para la implementación del mapeo, se sigue la propuesta de Petersen [48] cuyos pasos son los que se describen a continuación:

- **Definición de preguntas:** es decir, el planteamiento de preguntas acerca de los procesos de biodegradación del PET por medio del uso de bacterias y hongos.
- **Realización de la búsqueda:** es la consulta de bases de datos como de acceso libre, tales como Dialnet, Redalyc, Reserachgate y Scielo, además de Scopus y ScienceDirect, que son de acceso exclusivo.
- **Revisión de documentos:** consistente en la lectura para identificar los que son relevantes para la presente investigación.
- **Revisión de resúmenes y palabras clave:** que permite una clasificación de las publicaciones conforme a las variables relevantes del estudio.
- **Extracción de datos:** que es la síntesis de información con la que se da respuesta a las preguntas que se han planteado.

En este caso, inicialmente se formulan cuatro preguntas orientadoras para la búsqueda de estudios sobre biodegradación, las cuales corresponden a las que se enumeran en la tabla 5.

Tabla 5. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático de biodegradación del PET mediante bacterias y hongos

Pregunta	Propósito
1. ¿Qué estudios existen sobre biodegradación del PET a nivel internacional mediante el uso de bacterias y hongos?	Identificar publicaciones relacionadas con el uso de bacterias y hongos para la biodegradación del PET.
2. ¿En términos anuales, cómo están distribuidos los estudios sobre biodegradación del PET mediante el uso de bacterias y hongos durante el periodo 2010-2022?	Determinar la periodicidad de las publicaciones sobre sobre biodegradación del PET mediante el uso de bacterias y hongos.
3. ¿En qué países se han realizado los estudios sobre biodegradación del PET mediante el uso de bacterias y hongos?	Identificar los países más prolíficos en estudios relacionados con la biodegradación del PET mediante el uso de bacterias y hongos.
4. ¿Cuál es la efectividad de las bacterias y hongos en la biodegradación del PET?	Describir los resultados sobre efectividad (pérdida de peso) de los hongos y bacterias utilizados en la biodegradación del PET.

Fuente: elaboración propia

Si bien las preguntas son las que orientan el inicio del proceso de búsqueda, para que esta sea exitosa y eficaz, se definen criterios de inclusión y exclusión como los de la tabla 6, los cuales permiten identificar estudios pertinentes con el objetivo planteado en la presente investigación.

Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos.	Publicaciones en otros sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos.
Publicaciones desde al año 2010 a 2022.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de resultados de investigaciones aplicadas completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos de revisión u otros que no sean de resultados de investigaciones aplicadas.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Estudios con acceso al menos al resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.
Estudios con indicadores de efectividad en la biodegradación (pérdida de peso o masa) del PET.	Estudios con indicadores de efectividad en la biodegradación (reducción) del PET.

Fuente: elaboración propia

Así mismo, para efectos de una delimitación más precisa de los estudios relacionados con la biodegradación del PET, se establecen como palabras clave las que indica la tabla 7.

Tabla 7. Palabras clave para definir relevancia de las publicaciones sobre biodegradación del PET mediante bacterias y hongos

Palabras clave	Keywords
Biodegradación, PET	Biodegradation, PET terephthalate.
Biodegradación del PET con hongos,	Biodegradation of PET terephthalate with fungi
biodegradación del PET con bacterias	Biodegradación of PET terephthalate whit bacteria)
Consortio de hongos para biodegradación del PET	Consortia fungi biodegradation PET terephthalate
Consortio de bacterias para biodegradación del PET	Consortia bacteria biodegradation PET terephthalate

Fuente: elaboración propia

Dadas las anteriores fases y los lineamientos del mapeo sistemático, en el capítulo 4 se presentan los resultados de la investigación.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. Evaluación del estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano.

La generación de residuos sólidos ocurre principalmente por las actividades antrópicas que tienen lugar en los hogares a raíz del consumo de productos, la industria debido a la utilización de insumos en la producción de bienes y servicios, los establecimientos de comercio y las instituciones que hace uso de materiales que se desechan [49]. En el caso del Departamento del Cauca, los residuos sólidos generalmente se entregan a las empresas encargadas del servicio de aseo en los distintos municipios, las cuales los depositan en los rellenos sanitarios, aunque existen esfuerzos de personas y organizaciones por reciclar los aprovechables.

Así, para evaluar el estado de la gestión de residuos a nivel departamental, se ha realizado una revisión de trabajos e informes cuyos resultados se complementan con los obtenidos de la implementación de una encuesta a 46 recicladores que permite comprender la generación de residuos, entre ellos los de PET. Además, se presenta información política, social y económica del manejo de residuos sólidos.

4.1.1. Generación de residuos en el Departamento del Cauca

Con base en estadísticas del Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI) [50] que se indican en la tabla 8, puede inferirse que los volúmenes de residuos sólidos en el Cauca superan las 100 mil toneladas anuales desde el año 2018, lo que evidencia crecimientos significativos durante los últimos seis años, al menos para los tres principales municipios por tamaño de población.

Tabla 8. Generación de residuos sólidos en el Departamento del Cauca

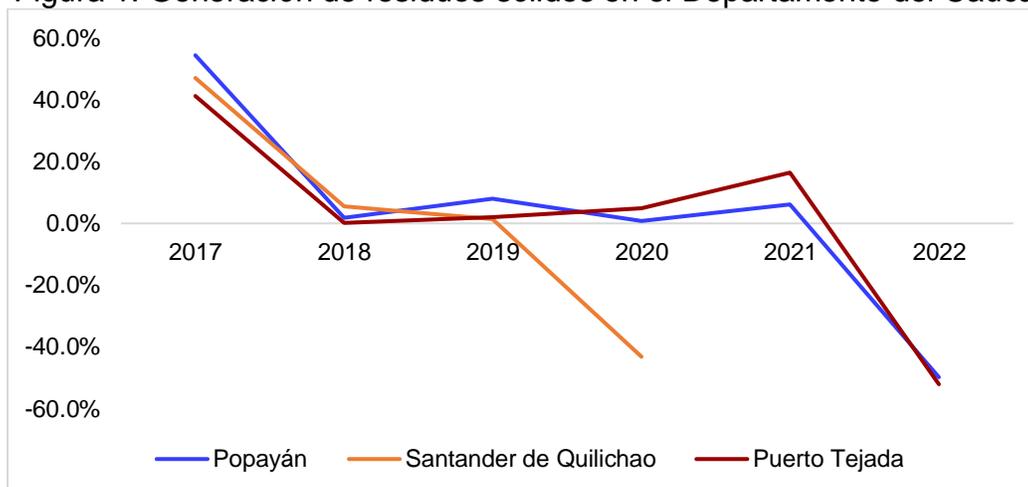
Municipio	Generación anual en toneladas						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Popayán	50264,52	77619,25	79047,83	85298,28	85983,54	91339,08	45848,28
S. Quilichao	8243,83	12125,13	12786,15	12976,02	7374,9	n.d.	n.d.
Puerto Tejada	6793,32	9595,08	9612,94	9815,76	10289,5	11987,46	5745,45

n.d.: información no disponible. Fuente: SUI [50].

En la figura 1 se observa que, en los tres municipios hasta 2021 se presentó crecimiento en la cantidad de residuos sólidos y a excepción de 2017 cuando el

crecimiento fue de 41% y 54%, en el resto de los años se estabilizó en tasas inferiores a dos dígitos, aunque para Santander de Quilichao se presenta información parcial en 2020, que no necesariamente implica tasas negativas con respecto a cada año anterior, al igual que en 2022 para Popayán y Puerto Tejada.

Figura 1. Generación de residuos sólidos en el Departamento del Cauca



Fuente: SUI [50]

Así mismo, durante el periodo comprendido entre abril de 2016 a marzo de 2022, el total de toneladas aprovechadas en cuanto a residuos sólidos ha sido de 15347,4, siendo en 2020 cuando se logró una mayor cantidad (3471,31 toneladas), además de un valor promedio mensual superior al resto de los años (ver tabla 9).

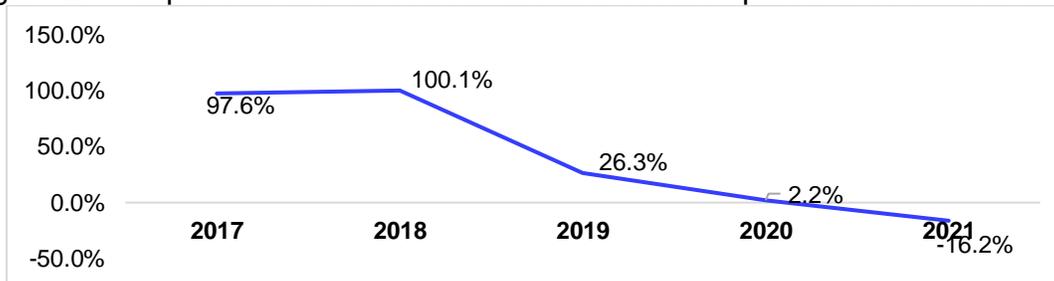
Tabla 9. Cantidad de residuos aprovechados en el Departamento del Cauca

Mes	Año	Cantidad anual de residuos aprovechables en toneladas						
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 _p
Enero	n.d.	55,3	237,6	266,2	259,8	281,3	275,5	
Febrero	n.d.	115,5	237,1	265,7	342,8	200,0 _{pr}	280,8	
Marzo	n.d.	104,1	222,9	147,0	206,2	295,9	298,6	
Abril	66,6	88,6	259,7	311,3	231,5	243,4	s.i.	
Mayo	68,7	105,2	290,0	358,6	282,9	81,2	s.i.	
Junio	57,7	131,5	235,9	304,2	274,5	311,8	s.i.	
Julio	48,1	87,3	210,8	313,4	338,1	200,1 _{pr}	s.i.	
Agosto	103,8	113,0	233,5	304,2	249,2	262,9 _{pr}	s.i.	
Septiembre	71,7	78,6	220,6	300,1	340,3	295,0 _{pr}	s.i.	
Octubre	79,0	150,4	214,4	283,0	307,6	175,2 _{pr}	s.i.	
Noviembre	92,9	114,4	163,8	245,2	363,3	271,9 _{pr}	s.i.	
Diciembre	91,9	200,4	163,0	298,6	275,0	290,9 _{pr}	s.i.	
Total		680,4	1344,3	2689,4	3397,5	3471,3	2909,7	854,9
Media mensual		75,6	112,0	224,1	283,1	289,3	242,5	285,0

n.d.: información no disponible; p: información parcial; pr: información provisional; s.i.: sin información. Fuente: SUI [50]

Dadas las anteriores cantidades, como se observa en la figura 2, al principio del periodo se observa un crecimiento en el volumen aprovechado de residuos, ya que en los dos primeros años se duplicó el tonelaje, mientras que para 2019 se presentó una desaceleración en el comportamiento, al punto que a 2021 se redujo en 16.2%, cuya explicación está en que para febrero y los últimos seis meses se presentan datos preliminares, es decir, que no se presentan datos, lo que no significa que no se hayan dejado de generar. Cabe señalarse que las tasas de variación son con respecto al año inmediatamente anterior.

Figura 2. Comportamiento de cantidades de residuos aprovechables en el Cauca



Fuente: SUI [50]

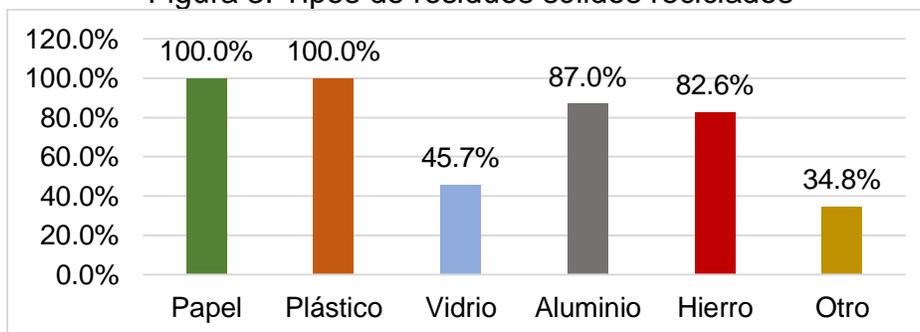
Estas son estadísticas que permiten comprender que a nivel departamental se vienen realizando labores tendientes a aprovechar los residuos sólidos, lo cual en principio representa no solo la existencia de una cadena de gestión de este tipo de residuos, sino de una actividad que puede repercutir en términos ambientales, sociales y económicos. Los anteriores indicadores demuestran que la gestión de residuos sólidos es una actividad que en el departamento se ha desacelerado en su crecimiento, quizá en parte porque la labor de registro no se ha logrado implementar de manera permanente a fin de crear una cultura de la información, sobre todo porque la mayoría de las personas que la desarrollan están en la informalidad.

Sin embargo, como producto de un trabajo de campo consistente en la implementación de una encuesta (ver Anexo 1) en la ciudad de Popayán se han logrado encuestar a algunas personas y organizaciones cuya información ha permitido hacer una aproximación a datos sobre los materiales reciclados y los promedios semanales en términos de kilogramos (kg) que recolectan en la ciudad.

Sobre esto, a partir de la implementación de la encuesta del Anexo 3 y específico de los datos de la pregunta 9, en la figura 3, pueden observarse que los tipos de

residuos sólidos que las personas recolectan y venden a centrales de acopio son el papel representado en cartón, papel bond y otros, al igual que el plástico el material que todos los encuestados reciclan, mientras que el aluminio lo recolectan el 87%, seguidos de hierro que lo reciclan el 82,6% y otros materiales entre los que están las bolsas de aluminio recubiertas para almacenar alimento (“bolsa chillona” llamada por los recicladores), icopor, cubetas de huevos y *tetra pak*, las recogen el 16%.

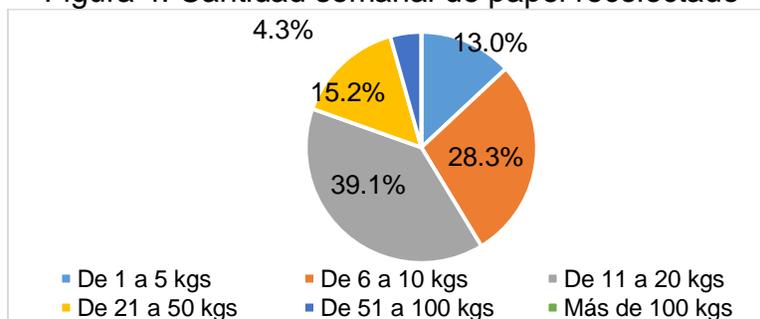
Figura 3. Tipos de residuos sólidos reciclados



Fuente: datos de los recicladores encuestados.

Al respecto de las cantidades según cada tipo de residuo, los datos de la figura 4 muestran los datos que se indagaron en la pregunta 11 de la encuesta del mismo anexo, resultando que el 13% de los recicladores recolectan entre 1 y 5 kg a la semana, el 28,3% entre 6 y 10 kg, el 39,1% entre 11 y 20 kg, el 15,2% entre 21 y 50 kg y una minoría (4,3%) supera esta cantidad, sin pasar de 100 kg.

Figura 4. Cantidad semanal de papel recolectado



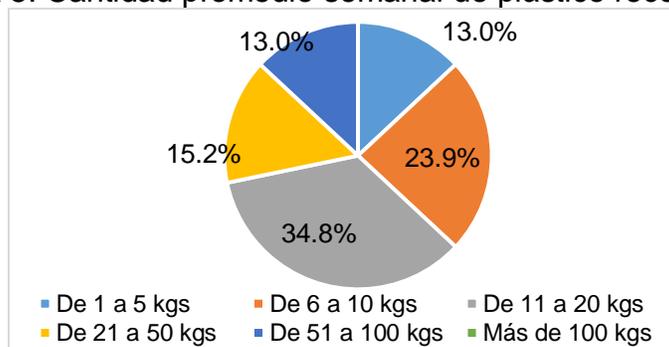
Fuente: datos de los recicladores encuestados.

De acuerdo con los datos anteriores, puede inferirse que son trabajadores por cuenta propia que aportan a la gestión de los residuos mediante una actividad que les permite obtener ingresos, a la vez que contribuyen a la gestión de residuos sólidos con una cantidad individual relativamente baja semanalmente, pero que, si

se multiplica por el número de personas que pertenecen según cada rango peso, la cantidad total aprovechable se aproxima a 875 kg de papel.

Siguiendo la misma pregunta, en cuanto al plástico, según los resultados representados en la figura 5, el 13% de los recicladores recolectan entre 1 y 5 kg, el 23,9% de 6 a 10 kg, la mayoría que constituye el 34,8% recolectan entre 11 y 20 kg, el 15,2% de 21 a 50 kg y solo el 13% entre 50 y 100.

Figura 5. Cantidad promedio semanal de plástico recolectado

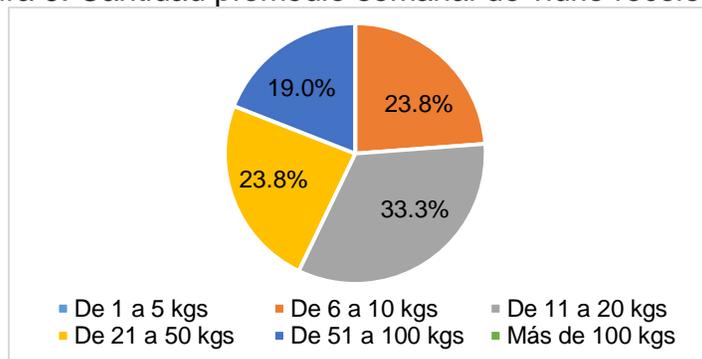


Fuente: datos de los recicladores encuestados.

Sobre el plástico, los datos suministrados por los recicladores encuestados permiten señalar que semanalmente se generan 1155 kg, lo que significa que solo a partir de un total de 46 personas se logran recolectar más de cuatro toneladas mensuales.

Al igual que los anteriores materiales, el vidrio, que es otro de los materiales aprovechables, la figura 6 muestra que cerca de un cuarto los encuestados recolecta cantidades que oscilan entre 6 y 10 kg, un tercio recoge entre 11 a 20 kg y la misma proporción entre 21 y 50 kg, además de cerca de un quinto (19,1%) entre 50 y 100 kg.

Figura 6. Cantidad promedio semanal de vidrio recolectado

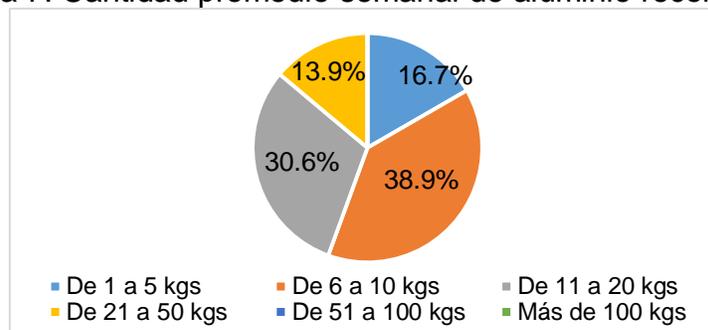


Fuente: datos de los recicladores encuestados.

De acuerdo con los datos obtenidos, la cantidad semanal de vidrio recolectado es de 766 kg, lo que evidencia que es un residuo que no solo se utiliza en altas cantidades, sino que también se aprovecha.

Frente a la cantidad de aluminio, los datos de la figura 7 muestran que el 16,7% de los recicladores recolectan entre 1 y 5 kg, la mayoría de estos (38,9%) recogen entre 6 y 10 kg, el 30,6% entre 11 y 20 kg y el 13,9% entre 21 y 50 kg.

Figura 7. Cantidad promedio semanal de aluminio recolectado

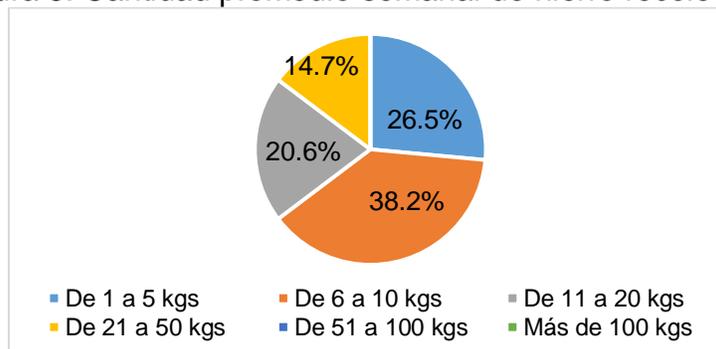


Fuente: datos de los recicladores encuestados.

En cuanto a la cantidad total que reciclan las personas encuestadas, semanalmente alcanzan los 985 kg, es decir, cerca de cuatro toneladas mensuales al hacer inferencia.

Sobre el hierro, en la figura 8 puede observarse que el 26,5% de los recicladores recolectan entre 1 y 5 kg semanales, el 38,2% entre 6 y 10 kg, 20,6% entre 11 y 20, así como un 14,7% que recogen cantidades entre 21 y 50 kg.

Figura 8. Cantidad promedio semanal de hierro recolectado



Fuente: datos de los recicladores encuestados.

A partir de los datos suministrados por los encuestados sobre las cantidades recolectadas semanalmente, se reciclan 407 kg, lo que significa que en la ciudad de Popayán se recuperan cerca de 1,6 toneladas como promedio a lo largo del mes

Sobre otros residuos, a raíz de la implementación de la encuesta se identificaron bolsas de aluminio recubiertas con plástico, los panales para almacenar huevos e icopor y de acuerdo con los resultados que muestra la tabla 10, puede señalarse que semanalmente se recolecta un promedio de 113 kg.

Tabla 10. Cantidad semanal de otros residuos (kg)

Encuestados	Bolsa aluminio		Panal huevo		Icopor	
	1 a 5 kg	6 a 10 kg	1 a 5 kg	6 a 10 kg	1 a 5 kg	6 a 10 kg
1	3	10	3	10	5	8
2	5	8	5	8	3	0
3	0	8	0	10	0	0
4	0	10	0	10	0	0
5	0	0	0	7	0	0
Promedio kg	4	9	4	9	4	8
Cantidad total	8	36	8	45	8	8

Fuente: elaboración propia

Cabe aclararse que de los 46 encuestados, la bolsa de aluminio es reciclada por 2 personas en el rango de 1 a 5 kg y 4 en el de 6 a 10 kg; mientras que residuos de panal de huevos, dos reciclan entre 1 y 5 kg, así como 5 entre 6 y 10 kg. En el caso del icopor, dos recolectan entre 1 y 5 kg y solo y en el rango de 6 a 10 kg.

Los resultados anteriores, producto de la implementación de la encuesta, permiten señalar que en Popayán se genera una cantidad aproximada de 4301 kg, destacando que solo se han encuestado a un número de 46 personas dedicadas a la actividad de recolección de los materiales descritos.

La tabla 11 resume las cantidades promedio de recolección de residuos identificados a raíz de la implementación de la encuesta a 46 recicladores y revisten importancia al constituirse en una aproximación a la generación de residuos, al menos en la ciudad de Popayán por el primero de los eslabones de la cadena.

Tabla 11. Cantidad semanal de residuos sólidos recolectados en Popayán

Residuos sólidos	Cantidad promedio/semanal (kg)
Papel	875
Plástico	1155
Vidrio	766
Aluminio	985
Hierro	407
Otros	113

Fuente: elaboración propia

No obstante, a partir de información de las centrales de acopio, entre las que pueden destacarse a ASERHI, EKO RED, BRASOC, AREMARPO y Chatarrería La Mayorista de Occidente, puede afirmarse que la cantidad es mucho mayor, destacando que prácticamente la totalidad de los recicladores de la ciudad venden los materiales recuperados a estos centros de acopio. De acuerdo con algunos datos suministrados por estos establecimientos, las cantidades mensuales promedio según cada tipo de material son las que se describen en la tabla 12.

Tabla 12. Cantidad de residuos aprovechables según organizaciones (kg)

Organización	Papel	Plástico	Vidrio	Aluminio	Hierro	Otros
ASERHI-ECORPOL	0	65.000	0	0	0	0
BRASOC	18.000	20.000	5.000	8.000	5.500	3.500
Mayorista de Occidente	8.000	3.500	1.200	700	500	4.000
AREMARPO	20.500	25.000	0	2.000	1.200	5.500
EKORED	0	87.255	0	0	0	0
RECINPAYAN	2.500	2.200	200	600	350	1.250
ASOCAMPO	3.000	2500	300	200	100	1.000
Chatarrería Brisas del Rio	550	700	100	100	50	300
Chatarrería El Uvo	3.500	2.500	500	900	400	2.000
Chatarrería Aleida	1.500	2.800	200	200		1.200
Chatarrería El Abuelo	700	850	200	50	50	400
Chatarrería San Antonio	3.450	6.500	0	500	200	2.000
Chatarrería La 12	4.200	6.000	500	250	300	1.200
Chatarrería El Desvare	15.000	12.000	1.000	2.000	1.500	2.000
Éibar Mulato	3.400	4.200	0	650	200	800
Chatarrería Guevara	1.600	2.300	150	300	0	600
Víctor Orozco	5.500	9.500	400	1400	500	900
La Favorita	8000	10000	1000	2000	1500	3500
Chatarrería Las Palmas	500	1.100	500	200	0	700
Total	99.900	263.905	11.250	20.050	12.350	30.850

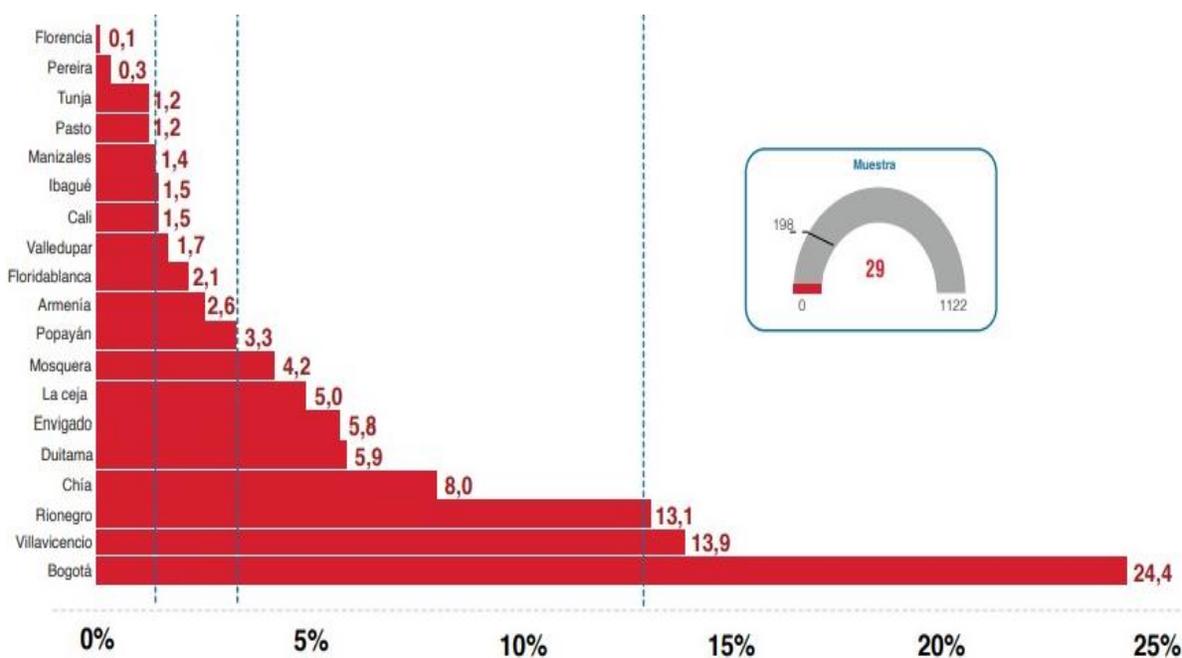
Fuente: datos de organizaciones gestoras de acopio.

Según los datos anteriores, estas cinco organizaciones son responsables de la gestión de 284.355 kg de residuos sólidos aprovechables. Cabe destacarse que estas organizaciones, acopian materiales no solo de Popayán, sino de otros municipios del Cauca, principalmente Timbío, El Tambo, Patía y otros. Esto demuestra que en Popayán y en el Cauca se presenta una actividad que propende por la gestión de los residuos sólidos.

Como evidencia de la gestión de residuos sólidos domiciliarios, pueden destacarse los resultados de la encuesta realizada por la CEPAL [3] en 2019 en 198 municipios, entre los cuales se tuvo en cuenta a siete del Cauca (Bolívar, Caldon, Florencia,

Guachené, Jambaló, Miranda, Popayán). De acuerdo con los indicadores obtenidos, puede observarse que la tasa de aprovechamiento de residuos para Popayán es del 3.3% (figura 9), el cual puede considerarse como un porcentaje bajo si se compara con los niveles de ciudades intermedias como Villavicencio y Rionegro que presentan un nivel de aprovechamiento superior al 13% y más aún si se tiene en cuenta que en Bogotá se aprovecha la cuarta parte (24,4%) de los residuos.

Figura 9. Tasa de aprovechamiento promedio por municipios de Colombia



Nota: solo se muestran los municipios con tasas mayores a 0,1

Fuente: CEPAL [3]

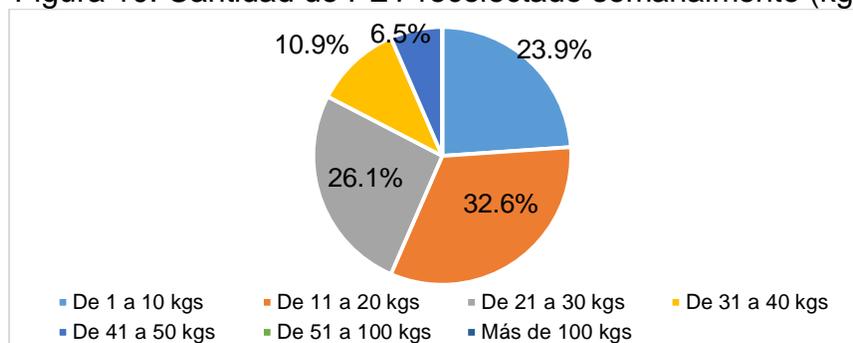
Luego, si se parte de las tasas de aprovechamiento de países líderes como Suecia, Suiza, Austria, Alemania, Bélgica y Holanda donde se aprovechan más del 50% de los residuos sólidos [51], no solo las tasas de Popayán son ampliamente inferiores, sino las de Bogotá y de las otras ciudades que lideran esta actividad en Colombia.

4.1.2. Generación de residuos sólidos de PET

Como producto de las actividades antrópicas, entre los residuos sólidos generados está el PET que se considera como uno de los plásticos de mayor uso en el mundo y por tanto uno de los que más impactos ambientales negativos genera [52]. Sobre este material, a raíz de la pregunta 13 de la encuesta del Anexo 1, los datos de la figura 10 permiten comprender que el 23,9% de los recicladores recolectan

cantidades que oscilan entre 1 y 10 kg de PET, la mayoría que representan el (32,6%) recolectan entre 11 y 20 kg, el 26,1% entre 21 y 30 kg, el 10,9% entre 31 y 40 kg y el 6,5% entre 41 y 50 kg.

Figura 10. Cantidad de PET recolectado semanalmente (kg)



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Al sumarse las cantidades indicadas por los encuestados, semanalmente recolectan una cantidad de 826 kg. Luego, al tener en cuenta la información de los centros de acopio obtenida a partir de la pregunta 13 del Anexo 2 de la cual se muestra evidencia en el Anexo 4, se puede afirmar que se recolectan alrededor de 26,5 toneladas de PET como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Cantidad de PET según organizaciones

Organización	PET (kg)
ASERHI-ECORPOL	500
BRASOC	2.200
Mayorista de occidente	1.500
AREMARPO	2.550
EKORED	20.000
RECINPAYAN	1.200
ASOCAMPO	1.000
Chatarrería Brisas del Rio	400
Chatarrería El Uvo	900
Chatarrería Aleida	1.300
Chatarrería El Abuelo	350
Chatarrería San Antonio	2.000
Chatarrería La 12	1.500
Chatarrería El Desvare	5.000
Éibar Mulato	1.200
Chatarrería Guevara	700
Víctor Orozco	4.500
La Favorita	4.500
Chatarrería Las Palmas	350
Total	51.650

Fuente: datos de organizaciones de acopio.

4.1.3. Métodos de manejo de residuos PET en el Departamento del Cauca

En el Cauca, actualmente se desarrollan tres métodos de manejo de los residuos PET. El primero corresponde a la recolección por las empresas de aseo y que finaliza con la disposición en los rellenos sanitarios de manera controlada por las autoridades ambientales. El segundo consiste en la recolección de los residuos para su comercialización con fines de transformación en un eslabón superior de la cadena. El tercero, es la incineración y aunque es una forma no autorizada por los organismos ambientales, se sigue presentando.

En gran parte de los municipios del Cauca, el manejo históricamente se ha hecho bajo la forma de recolección y disposición a cielo abierto, tal es el caso de municipios como López de Micay [53], en Sotará y Suárez [54], Popayán [55] [56], Puerto Tejada [57], entre otros; en los que solo en los últimos años a raíz de las obligaciones que ha establecido la normatividad ambiental y el surgimiento de empresas dedicadas al aprovechamiento, se ha comprendido la importancia del PET como recursos que puede transformarse y con ello la obtención de nuevos productos e ingresos para quienes conforman la cadena de gestión.

En ese sentido, de acuerdo con los datos recolectados a partir de la formulación de la pregunta 9 de la encuesta del Anexo 2 y que se presentan en la tabla 14, puede señalarse que el manejo que realizan los recicladores está enfocado en la recolección y comercialización, pero no es objeto de transformación alguna, ya que solo se orienta al suministro a las centrales de acopio.

Tabla 14. Manejo de residuos sólidos por los recicladores

Finalidad del reciclaje	Número	Porcentaje
Recolección y venta	46	100%
Transformación	0	0%
Ambas	0	0%
Otra	0	0%

Fuente: datos de los recicladores encuestados

En cuanto a los centros de acopio, en la tabla 15 se destaca que los métodos de manejo consisten en la recepción de las cantidades recolectadas por los recicladores, la clasificación según tipo de PET, el almacenaje y embalaje, a lo que sigue la actividad de comercialización a depósitos mayoristas de Cali, Bogotá y de

ahí, se exportan a países de Europa, tales como Alemania, Bélgica y Suecia, pero por otros centros mayoristas, más no los de Popayán.

Tabla 15. Manejo de residuos sólidos por centrales de acopio

Organización	Comercio nacional	Transformación
ASERHI-ECORPOL	Si	No
BRASOC	Si	No
Mayorista de occidente	Si	No
AREMARPO	Si	No
EKORED	Si	Si
RECINPAYAN	Si	No
ASOCAMPO	Si	No
Chatarrería Brisas del Rio	Si	No
Chatarrería El Uvo	Si	No
Chatarrería Aleida	Si	No
Chatarrería El Abuelo	Si	No
Chatarrería San Antonio	Si	No
Chatarrería La 12	Si	No
Chatarrería El Desvare	Si	No
Éibar Mulato	Si	No
Chatarrería Guevara	Si	No
Víctor Orozco	Si	No
La Favorita	Si	No
Chatarrería Las Palmas	Si	No

Fuente: datos de organizaciones de acopio.

En tal sentido, el manejo inicialmente comienza con la disposición de los residuos de PET en los hogares, los cuales quedan expuestos para la recolección por los recicladores en calidad de personas o de organizaciones, como AREMARPO que cuenta con vehículos y personal para la recolección, además de aquellos residuos que son recolectados por las empresas de servicio de aseo como Urbaser en Popayán, EMQUILICHAO E.S.P., Empresa de Servicios Públicos de Acueducto Alcantarillado y Aseo Multiservicios S.A.S. de Puerto Tejada, EMCASERVICIOS que opera a nivel departamental y las del resto de municipios.

De acuerdo con el PGIRS de 2015 [58], en los centros urbanos principales la gestión de los residuos ha mejorado ostensiblemente en la última década, pero en los municipios alejados del relleno sanitario regional y especialmente en las zonas rurales el manejo se dificulta a causa de la incultura de la clasificación y los problemas para el transporte hasta sitios de acopio.

4.1.4. Evaluación del contexto político, social y económico caucano del manejo de residuos sólidos aprovechables

Los aspectos de tipo político son los relacionados con la normatividad ambiental referente a la gestión de residuos sólidos, tanto del orden nacional como departamental. Así mismo, son importantes los elementos de tipo social y económico que permiten comprender la importancia de los residuos sólidos, no solo en lo relacionado con los beneficios ambientales, sino las repercusiones sobre la población y su calidad de vida en cuanto son fuentes de ingresos.

4.1.4.1. Aspectos políticos

Los primeros elementos de tipo político son las normas que se describen en la tabla 1, las cuales son transversales a todos los planes y proyectos de la gestión de residuos sólidos, entre los cuales están los de PET.

Conforme a tal normatividad, en Colombia se ha establecido la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos [59], cuyo objetivo es implementar la gestión integral de los mismos, entendiendo que es de interés social, económico, ambiental y sanitario para el país, a la vez que es la forma de contribución al fortalecimiento de la economía circular, el desarrollo sostenible; además de constituirse en una estrategia de adaptación y mitigación del cambio climático en el territorio nacional.

Esta política considera aspectos de la economía circular que en el país se empieza a consolidar no solo como una forma de contribuir a la recuperación y aprovechamiento de residuos sólidos, sino que implica la obtención de riqueza en el país en vista de la generación de ingresos para los distintos eslabones de la cadena manejo (recicladores, comercializadores, transformadores, exportadores).

Por lo anterior, en el Documento CONPES 3874 que describe la mencionada política, se destaca la necesidad del abandono del modelo lineal de consumo que ha predominado para avanzar hacia el circular, caracterizado por [60]:

- **Ecoconcepción:** conciencia de los impactos medioambientales durante el ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.

- **Ecología Industrial y territorial:** generación de la industria en función del territorio que permite optimizar la producción, principalmente de los flujos de insumos, energía y servicios necesarios.
- **Segundo uso:** consistente en la reintroducción de un bien que ya cumplió con su segundo uso, al circuito económico a fin de mermar su impacto medio ambiental, no solo del, sino por la necesidad de generar uno nuevo.
- **Reutilización:** hacer uso de bienes o partes aún funcionales y susceptibles de aprovechamiento para nuevos productos.
- **Preparación:** identificar un segundo uso a los bienes utilizados.
- **Aprovechamiento:** los residuos cuentan con materiales que son aprovechables, por lo tanto, en la economía circular se procura extraerlos, transformarlos y generar nuevos.
- **Valorización:** relacionada con el aprovechamiento energético de aquellos residuos que no pueden reciclarse.

Conforme a la normatividad nacional, la política descrita y las características de la economía circular, en los entes territoriales se han formulado los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) que paulatinamente han avanzado hacia el fortalecimiento de una cultura de manejo racional de los residuos. En el Departamento del Cauca, algunos de estos planes que pueden destacarse son los de los municipios de Popayán del año 2015 [58], Argelia de 2016 [61], Guachené de 2015 [62], Caloto de 2016 [63], entre otros.

Además, como parte de los propósitos que persigue la política, se han definido acciones en aras de la formalización de un eslabón fundamental de la gestión de residuos sólidos: los recicladores. Esto se refiere a un conjunto de herramientas para que estos actores de la cadena de manejo sean reconocidos como parte activa de la economía circular en razón a que desempeñan una actividad económica que repercute positivamente en el desarrollo sostenible en los territorios [64].

En el caso de Popayán, la formalización se ha gestado a partir de asociaciones de recicladores, entre las cuales se destacan Armac, Asocampo, Recinpayán, Aremarpo y Brazoc, que han vinculado grupos de personas dedicadas a esta actividad en calidad de socios y de proveedores, buscando dignificar la labor y procurando un mejor bienestar.

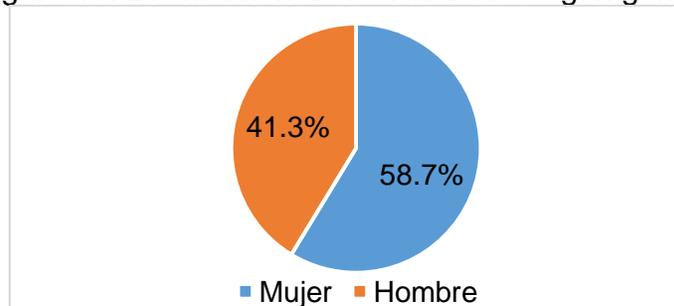
Luego, como producto de los esfuerzos de las organizaciones mencionadas en torno al reciclaje, mediante el Acuerdo Municipal 020 de 2012 [65] y la modificación del mismo por medio del Acuerdo 10 de 2021, se creó el Fondo de Reciclaje, orientado a fortalecer la gestión de residuos sólidos aprovechables y la generación de valor en los eslabones de la cadena de manejo. A raíz de este fondo, en el año 2021 desde la Alcaldía Municipal de Popayán se desembolsaron importantes recursos (600 millones de pesos) destinados a la formalización y al mejoramiento de las condiciones de prestación del servicio complementario de aseo en la ciudad [66], constituyéndose en un esfuerzo para cumplir con la política nacional.

De manera general, en Colombia y a nivel local existen políticas, planes y programas mediante los cuales no solo se procura un manejo de los residuos sólidos, sino crear las condiciones para que los actores que componen la cadena desarrollen una gestión eficiente en los territorios a fin de lograr el desarrollo sostenible con base en la economía circular.

4.1.4.2. Aspectos sociales

Según los datos obtenidos a partir de la formulación de la primera pregunta de la encuesta (Anexo 1) realizada a persona que hacen parte de la cadena de gestión de los residuos sólidos, los cuales se sintetizan en la figura 11, puede comprenderse que en la actualidad la mayoría de las personas que se dedican a la actividad de recolección de este tipo de materiales son las mujeres, las cuales representan el 58,7%, mientras que los hombres constituyen el 41.3%.

Figura 11. Distribución de recicladores según género



Fuente: datos de los recicladores encuestados

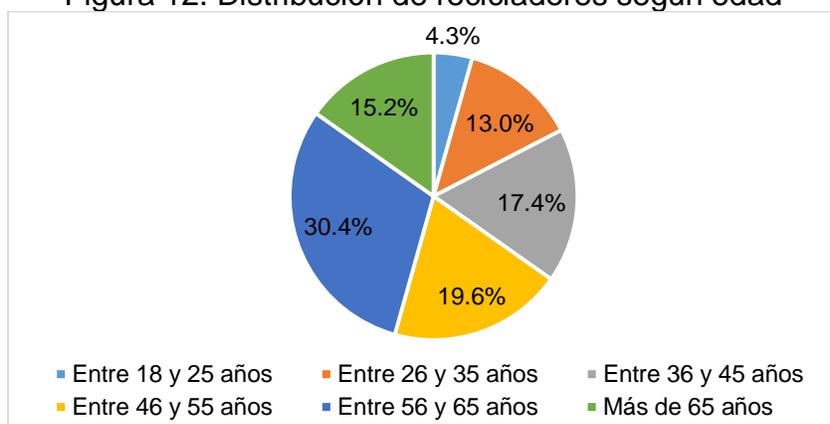
Esta es una característica que se replica en otros contextos nacionales, como en el caso del municipio de Vergara Cundinamarca [67], en donde la participación de las

mujeres ha sido fundamental para la gestión de residuos y son ellas quienes lideran actividades de los procesos de recolección y aprovechamiento como parte de la economía circular que se persigue en la política nacional de gestión de residuos sólidos.

De acuerdo con Ogando [68], la gestión de residuos sólidos se considera una actividad en la que la inclusión de género ha sido más significativa que otras, principalmente porque las mujeres sin importar su nivel educativo u otra condición social son las que lideran organizaciones dedicadas a este tipo de labores en regiones pobres de África y América Latina, al punto que el 76% de las personas que trabajan en este sector son femeninas, aún a pesar de la informalidad que caracteriza a este sector.

En cuanto a la edad de las personas vinculadas en la cadena de gestión de residuos sólidos, los resultados obtenidos a raíz de la segunda pregunta, permiten señalar que la mayoría (30,4%) están en una edad entre los 56 y 65 años, seguida del 19,6% que tienen entre 46 y 55 años, un 17,4% entre 36 y 45 años. Se destaca además que, un 15,2% superan los 65 años y 4,3% son jóvenes entre los 18 y 25 años, como muestra la figura 12.

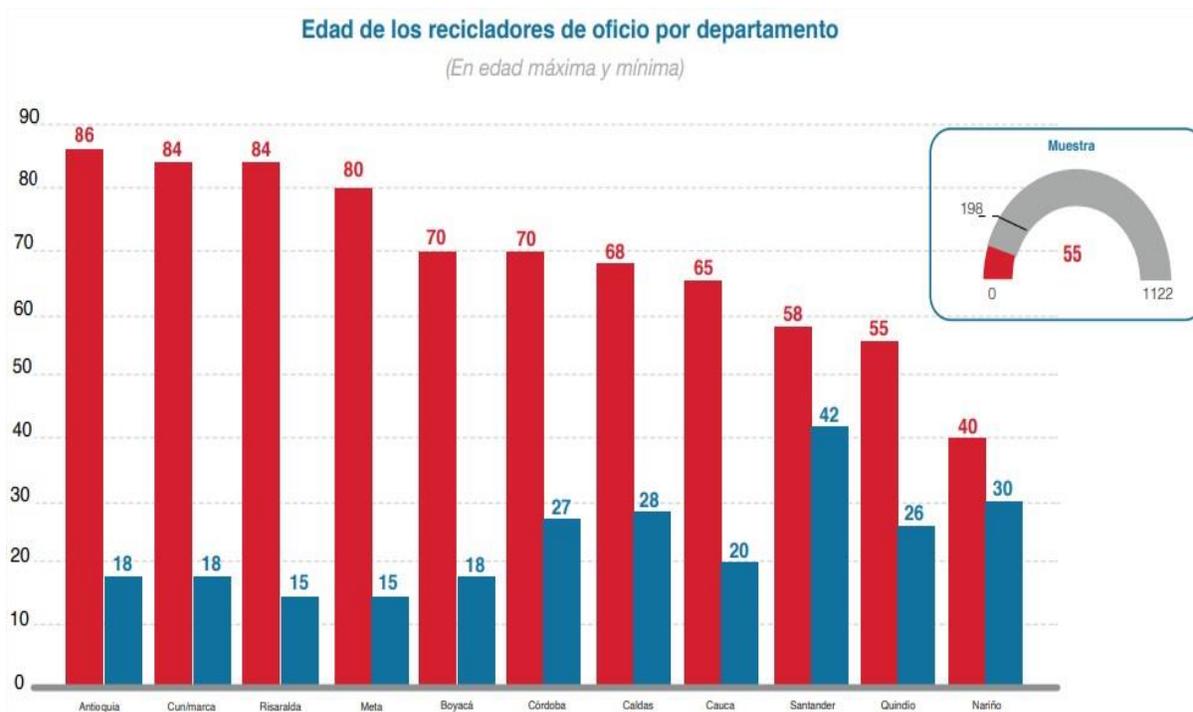
Figura 12. Distribución de recicladores según edad



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Estos datos guardan correspondencia con los que presenta la figura 13 que corresponden a los obtenidos en la encuesta de la CEPAL [3], en la cual la edad promedio máxima es de 65 años y de 20 para el promedio mínimo en el Departamento del Cauca.

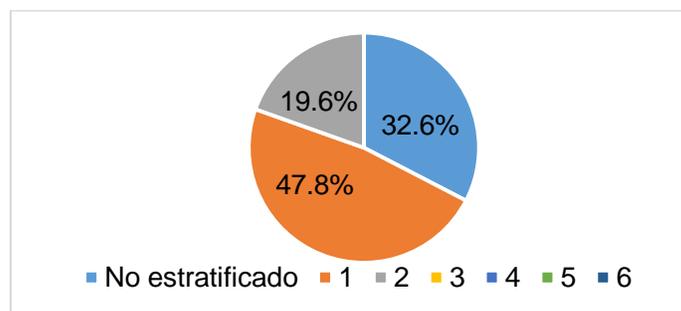
Figura 13. Edades máximas y mínimas de los recicladores según departamento



Fuente: CEPAL [3]

Desde el punto de vista del estrato socioeconómico, los datos de la figura 14 que resultaron de la tercera pregunta permiten señalar que los recicladores pertenecen a los más bajos, pues de acuerdo con los resultados de la encuesta, ninguno supera el estrato 2 al cual pertenecen el 19,6%, el 47,8% al estrato 1 y el 32,6% que vive en zonas no estratificadas, las cuales son de las zonas rurales o suburbios.

Figura 14. Distribución de los recicladores según estrato socioeconómico



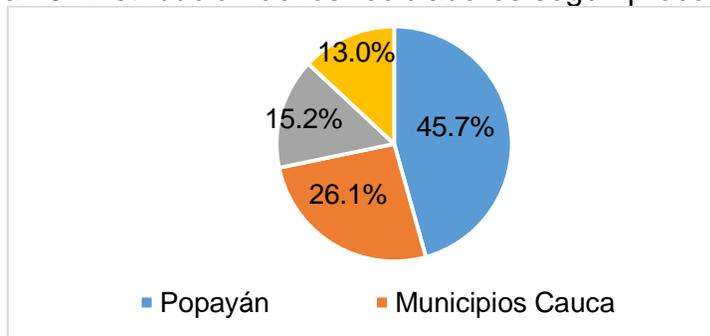
Fuente: datos de los recicladores encuestados

Al respecto de esta condición socioeconómica, estudios como los de Velandia [69] señalan que las personas de los estratos bajos son quienes desempeñan labores de recolección y venta a las grandes centrales de acopio y sus ingresos son

relativamente bajos, principalmente por la informalidad que los caracteriza. Sin embargo, para Parra y Abizaid [4] aunque se trata de personas de bajos ingresos, a raíz de los procesos de formalización como los ocurridos en Bogotá, los ingresos han mejorado y en muchos casos han superado su situación de pobreza, siendo el reciclaje una actividad económica que promueve mejores condiciones de vida.

Otro aspecto social que puede destacarse es la alta participación de personas que provienen de otros lugares distintos a Popayán, pues los resultados arrojados al formularse la cuarta pregunta muestran que el 45,7% son de otros municipios del Cauca y de Colombia, mientras que el 54.3% son oriundas de la capital caucana, tal como se indica en la Figura 15. Algunos estudios señalan que en las ciudades colombianas predominan personas de otras regiones en calidad de recicladores debido al fenómeno del desplazamiento forzado, pues ante las dificultades para vincularse a un trabajo formal deben recurrir a una fuente, que, aunque les genera ingresos bajos es quizá de las únicas que es incluyente sin importar las condiciones educativas, de edad, género u otra [70-71].

Figura 15. Distribución de los recicladores según procedencia



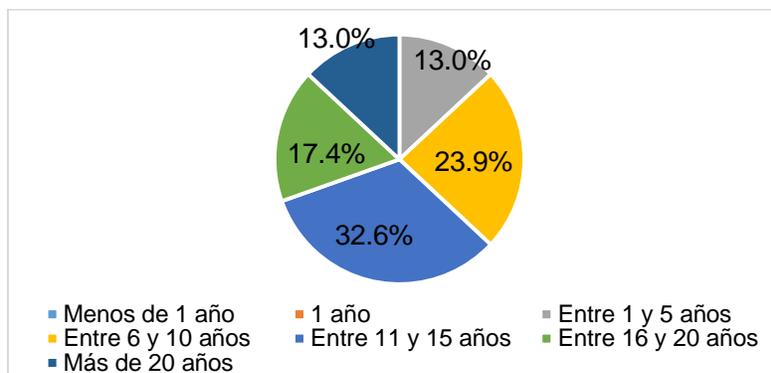
Fuente: datos de los recicladores encuestados

En el caso de la población inmigrante que corresponde al 13%, está representada en personas de origen venezolano, que desde hace aproximadamente una década ha ingresado a Colombia de forma masiva y que al igual que gran parte de la población desplazada colombiana ha encontrado en el recolección y venta de residuos aprovechables una fuente de ingresos [72].

En cuanto a la experiencia de las personas desarrollando la labor de reciclaje (pregunta 5), los datos de la figura 16 muestran que solo el 13% llevan entre 1 y 5

años, el 23.9% entre 6 y 10 años, el 32.6% entre 11 y 15 años, 17.4% entre 16 y 20 años y 13% más de dos décadas en la actividad.

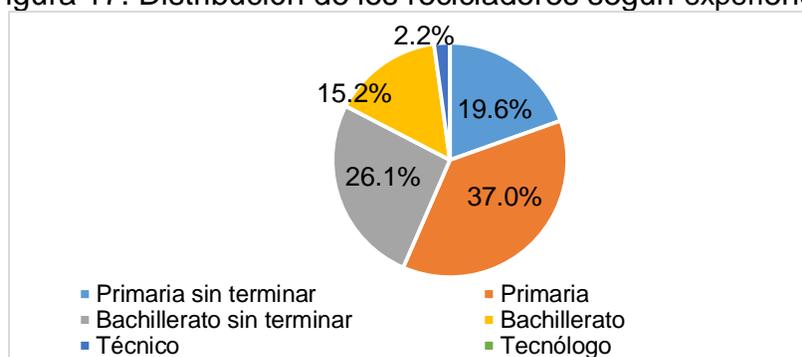
Figura 16. Distribución de los recicladores según experiencia



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Acerca del nivel educativo de los recicladores, como producto de la pregunta 6, a partir de la figura 17 se comprende que la mayoría se caracteriza por una formación primaria sin terminar para el 19,6% de las personas dedicadas a la actividad, seguido del 37% que culminó el grado quinto, 26,1% que no terminó el bachillerato, 15, 2% que es bachiller y solo el 2,2% cuenta con título técnico.

Figura 17. Distribución de los recicladores según experiencia



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Algunos estudios señalan que al ser una actividad que no demanda mano de obra especializada, se convierte en una de las que mayor inclusión hace de población analfabeta inclusive o de aquella con bajo niveles de escolaridad, pues las labores no requieren de conocimientos especializados y cualquier persona puede desempeñarlas [73].

Los anteriores hallazgos muestran que la gestión de residuos sólidos repercute en la generación de empleo para personas que en la actualidad pertenecen a estratos

socioeconómicos bajos, cuyos niveles educativos no les permite ser una mano de obra calificada, pero es a la vez una de las actividades que propicia la inclusión social, no solo en cuanto a género donde las mujeres tienen una alta participación, sino en la capacidad de ofrecer ingresos para personas que han migrado de otras regiones y países como en el caso de los venezolanos. Son hallazgos que evidencian que los residuos sólidos si bien generan impactos negativos sobre el medio ambiente, se convierten en un importante recurso para el trabajo de quienes desarrollan las labores de recolección y venta.

4.1.4.3. Aspectos económicos

De acuerdo con el MADS [74], en 2018 Colombia contaba con 30.500 recicladores, de los cuales 21.200 desarrollaban esta actividad en Bogotá, lo que demuestra que existe una población considerable para quienes el reciclaje es una fuente de ingresos. Si se tiene en cuenta las metas del país que buscan lograr que a 2030 se alcance los 3,2 millones de toneladas de residuos aprovechables y una tasa de reciclaje del 17,9%, se espera que se generen entre 1800 y 14000 nuevos puestos de trabajo [75]. En 2020, la gestión de residuos sólidos arrojó en el país tasas de reciclaje del 53,57% en papel y cartón, 26% en plástico, 12,53% en metales y 7% en vidrio [76], siendo indicadores que demuestran avances que, aunque son inferiores a los de países como Alemania o los nórdicos, evidencian un crecimiento.

En el caso caucano y específicamente en Popayán, siguiendo datos obtenidos de la pregunta 2 de la encuesta descrita en el Anexo 2, el número aproximado de recicladores en calidad de asociados y/o recolectores proveedores es de 326, quienes pertenecen a cinco asociaciones, lo que significa que son personas que han logrado su formalización o están en proceso, aunque también están aquellos que trabajan de manera independiente son aproximadamente 176 [77], los cuales recogen residuos que luego venden a las centrales de acopio como BRASOC, AREMARPO, La Mayorista de Occidente, entre otras.

De acuerdo con personal de centrales de acopio encuestadas y como respuesta a la pregunta 5 de la encuesta del Anexo B, se ha logrado identificar un número de personas en calidad de empleados y proveedores (recolectores) de residuos sólidos

que alcanzan un número aproximado de 326 personas solo en Popayán, como se indica en la tabla 16.

Tabla 16. Empleados y proveedores de residuos sólidos

Empresa	Empleados	Proveedores
ASERHI		
BRASOC	12	151
Mayorista de occidente	6	130
AREMARPO	16	45
EKORED		
Total	34	326

Fuente: datos de organizaciones

Estos datos demuestran que en una ciudad como Popayán genera más de 300 puestos de trabajo, que se constituyen en fuente de ingresos de personas de bajos recursos, principalmente en los estratos socioeconómicos más bajos.

4.2. Principales resultados de investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación del PET.

El PET, es un plástico que se utiliza frecuentemente, razón por la que es uno de los residuos sólidos que más se genera en las industrias y en los hogares y a su vez es uno de los que mayores problemas ambientales presenta si no se cuenta con programas de gestión adecuados [1] [52].

No obstante, en los últimos años se han venido implementando alternativas de biorremediación, entre las cuales está el uso de bacterias y de hongos para biodegradar este material [13] [21]. Por ello, a continuación, se presentan los resultados de un mapeo sistemático el cual tiene como finalidad identificar la efectividad de estos microorganismos para la biodegradación del PET como remediación ambiental según algunos estudios internacionales y nacionales.

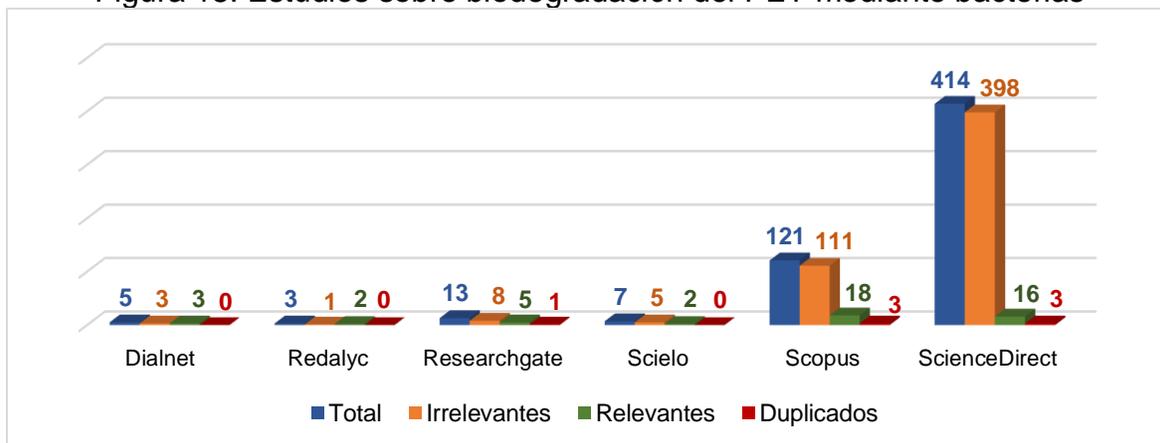
4.2.1. Investigaciones internacionales sobre biodegradación del PET

Los siguientes resultados son producto de la implementación de la propuesta de Petersen [48] acerca de un mapeo sistemático, el cual siguió los lineamientos de búsqueda planteados en la metodología conforme a las preguntas orientadoras de la tablas 5, 6 y 7. Con base en las preguntas y los criterios de inclusión y exclusión, la búsqueda arrojó un total de 563 publicaciones sobre el uso de bacterias y 315

sobre hongos. Luego, se filtraron aquellos estudios cuyas palabras clave en español e inglés fueron las siguientes:

Dados los resultados de la búsqueda y filtros conforme a las palabras clave, la figura 18 muestra que, del total de 563 publicaciones sobre uso de bacterias, se identificaron 46 relevantes, de los cuales 18 se encuentran en la base de datos Scopus, seguida de ScienceDirect con 16 y Researchgate con 5.

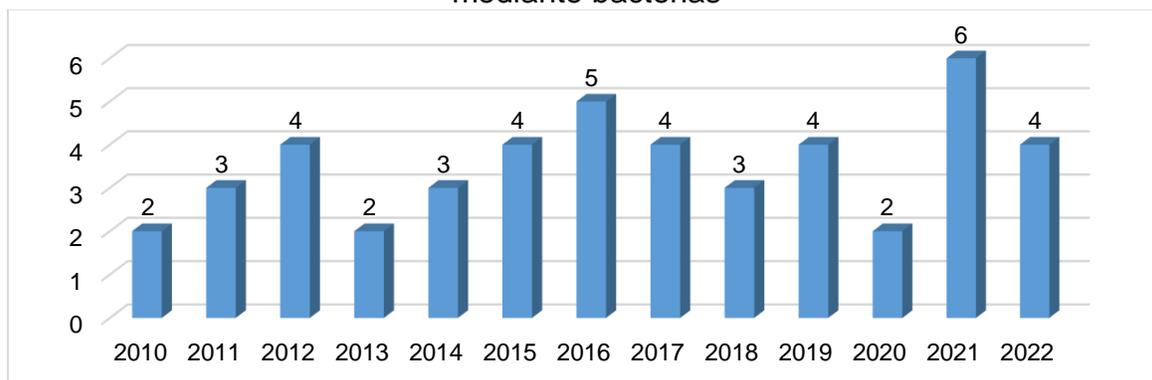
Figura 18. Estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias



Fuente: elaboración propia

Son artículos que en su mayoría (60%) se han publicado desde 2016 a 2022, lo que significa que en los años recientes ha sido un tema de alto interés, pues al menos eso indican los resultados de la figura 19.

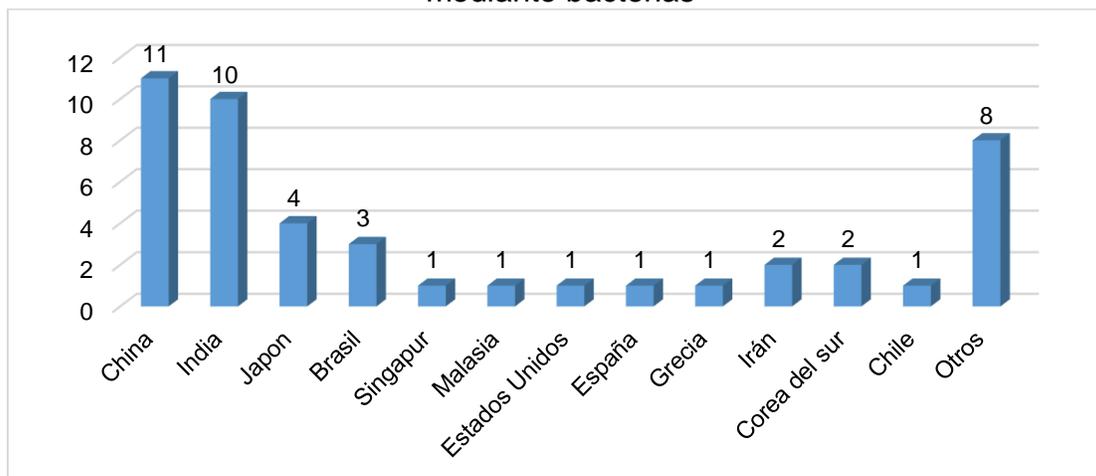
Figura 19. Distribución anual de los estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias



Fuente: elaboración propia

Además, como se parecía en la figura 20, es destacable que países como China con el 11 publicaciones e India con 10 son los más prolíficos sobre estudios relacionados con la biodegradación del PET a través del uso de bacterias.

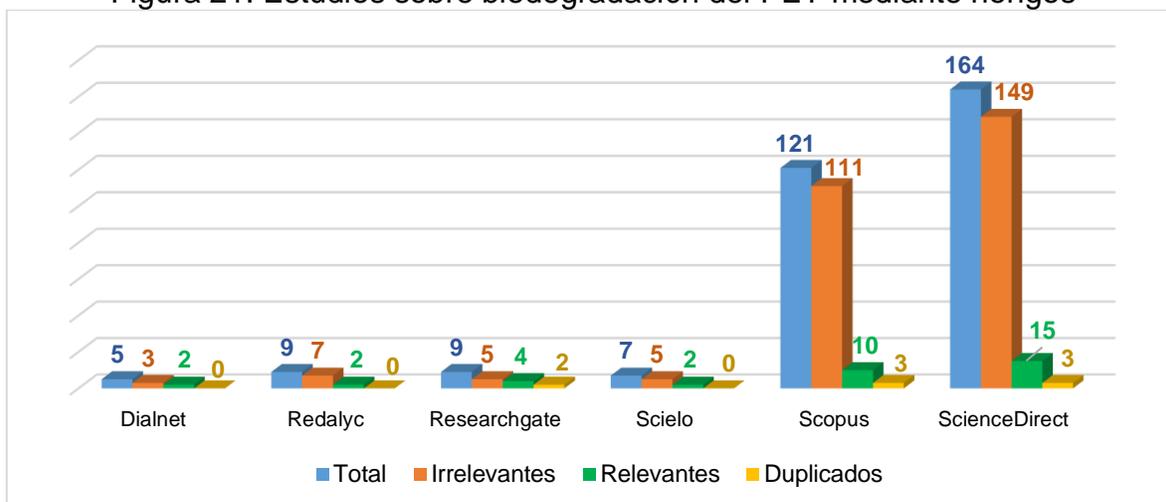
Figura 20. Distribución por países de los estudios sobre biodegradación del PET mediante bacterias



Fuente: elaboración propia

En cuanto a las publicaciones sobre biodegradación del PET por medio de hongos, la figura 21 indica que la búsqueda arrojó un total de 315 estudios, de los cuales 35 se consideran relevantes. De esto, 15 se encuentran en ScienceDirect, 10 en Scopus y en menor cantidad en las bases de acceso libre como Researchgate (4), Dialnet (2), Scielo (2) y Redalyc (2).

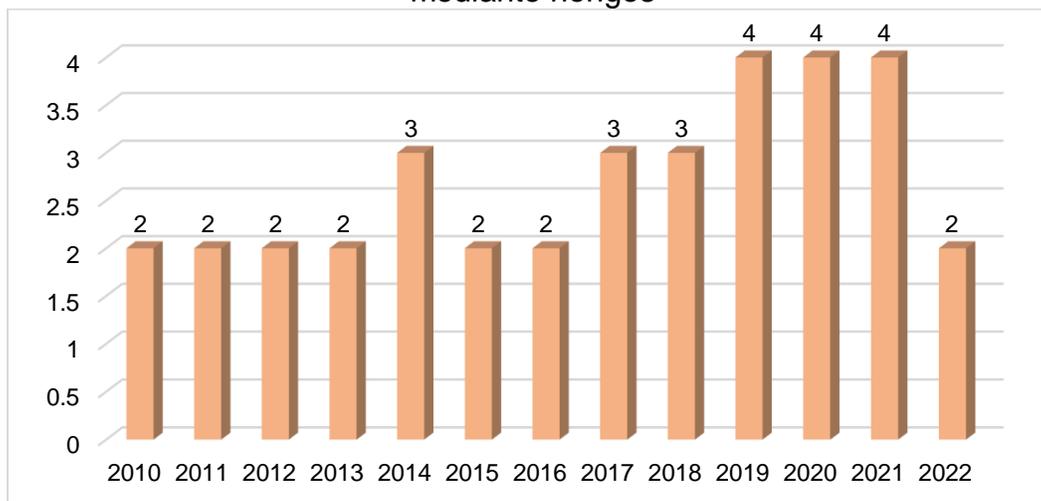
Figura 21. Estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos



Fuente: elaboración propia

Así mismo, de acuerdo con los indicadores de la figura 22, son artículos que en su mayoría (60%) se han publicado desde 2016 a 2022, que al igual que como sucede con el uso de bacterias ha venido adquiriendo un interés importante en aras de aportar a la biorremediación ambiental a raíz de la contaminación por PET.

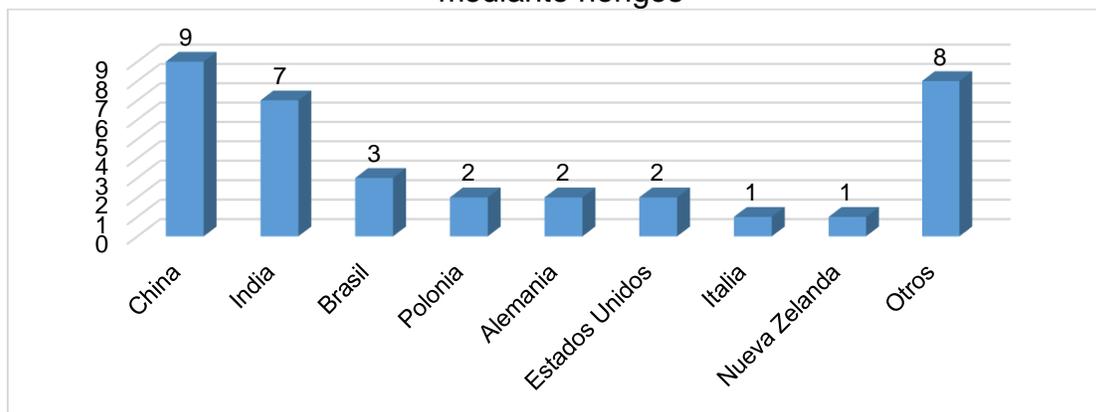
Figura 22. Distribución anual de los estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos



Fuente: elaboración propia

Además, es destacable que países como China con el 9 publicaciones e India con 7 son los que más estudios presentan en cuanto al uso de hongos para biodegradar el PET y a nivel latinoamericano es destacable el aporte de Brasil con 3 estudios (ver figura 23).

Figura 23. Distribución por países de los estudios sobre biodegradación del PET mediante hongos



Fuente: elaboración propia

4.2.2. Extracción de datos del mapeo sistemático

Tras el mapeo sistemático, la tabla 17 muestra algunos de los resultados más relevantes en cuanto a los procesos de biodegradación del PET muestran que al utilizarse bacterias, las pérdidas de masa o peso de este material son significativas

según el tiempo de realización y tipos de bacterias con las que se desarrollaron las investigaciones.

Tabla 17. Resultados de la efectividad de las bacterias en biodegradación del PET

Referencia	Efectividad en la biodegradación del PET	Tiempo	Tipo de bacteria utilizado
[78]	Pérdida de peso con dos primeras bacterias del 13,6 %.	50 días	<i>Pseudomonas sp</i>
[79]	Pérdida de peso del PET del 75 ± 2 , 55 ± 2 , 60 ± 3 , and $43 \pm 3\%$.	120 días	<i>Bacillus vallismortis bt-dsce01</i> , <i>Psuedomonas protegens bt-dsce02</i> , <i>Stenotrophomonas sp. bt-dsce03</i> , and <i>Paenibacillus sp.bt-dsce04</i> by 16S rDNA
[80]	Pérdida de 75% de 5 gr de PET	5-25 horas	Bacterias género <i>Delftia</i>
[81]	Pérdida de 24.3% del PET	30 días	<i>Ideonella sakaiensis</i>
[82]	Pérdida de peso $58,21 \pm 2$, $46,6 \pm 3$ y $56,3 \pm 2$ % con cuatro bacterias.	140 días	<i>Aneurinibacillus sp.</i>
[83]	Pérdida del 68.8% en partículas de $212 \mu\text{m}$	18 días	<i>Streptomyces sp</i>
[84]	Pérdida de peso entre 33 % y 27%	150 días	<i>Rhodobacterales</i> , <i>Oceanospirillales</i> y <i>Burkholderiales</i> y los géneros <i>Bacillus</i> y <i>Pseudonocardia</i>
[21]	Pérdida de peso de 14.7%	60 días	<i>Bacillus sp. Paenibacillus sp.</i>
[85]	Pérdida de peso 18.3%	45 días	<i>Rizobio sp. I. sakaiensis</i>
[86]	Pérdida de peso $15,25 \pm 1$ % y $21,72 \pm 2,1$ %	10 semanas	<i>Alcaligenes faecalis</i>
[87]	Pérdida de peso del PET del 23,2%		<i>Pseudomonas spp. Bacillus sp.</i>
[88]	Pérdida de peso del 20.54% en PET	30 días	<i>Pseudomonas putida.</i>
[89]	Pérdida de peso del PET del 16.3%	45 días	<i>Ideonella sakaiensis</i>
[90]	Pérdida de peso del 19.6 – 45.4%/%	3 meses	<i>Pseudomonas spp. Bacillus sp.</i>
[91]	Pérdida de peso del $64,25 \pm 2$ % y $63,00 \pm 2$ % hacia películas de LDPE y PP	160 días	<i>Enterobacter sp nov. bt DSCE01</i> , <i>Enterobacter cloacae nov. bt DSCE02</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa nov. bt DSCE-CD03</i> ,
[92]	Pérdida de 60% de películas del PET (50 mg)	14 días	<i>Clostridium thermocellum</i>
[93]	≈50% de pérdida de peso en botella PET	55 días	<i>Thermobifida fusca DSM43793</i>
[21]	Pérdida de peso $47,07 \pm 6,67\%$	120 días	<i>Paenibacillus</i> , <i>Shewanella</i> , <i>Rheinheimera</i> y <i>Bacillus</i>
[22]	Pérdida de peso 18%	90 días	<i>Bacillus sp, Pseudomonas sp, Staphylococcus sp</i>
[94]	Pérdida de peso 20,1% (sin agua) y un 49,5 % (con agua)	12 meses	<i>Bacillus spp. , Pseudomonas spp. Bacillus sp. & Paenibacillus sp.</i>
[95]	Pérdida de peso del $51,25 \pm 2$ %	60 días meses	<i>Pseudomonas sp Bacillus sp,</i>
[96]	Pérdida de peso del PET del 45 ± 1.5 , 46 ± 2 , 550 ± 3 , and $43 \pm 3\%$	120 días	<i>Pseudomonas putida</i>
[97]	Pérdida de 62% de 7.5 gr de PET	7 días	Bacterias género <i>Delftia</i>

[98]	Pérdida de 26.3% del peso de películas de PET	30 días	<i>Oceanospirillales</i> y <i>Burkholderiales I. sakaiensis</i>
[99]	Pérdida de peso 58,21 ± 2, 46,6 ± 3 y 56,3 ± 2 % con cuatro bacterias.	140 días	<i>Paenibacillus</i> sp. <i>Aneurinibacillus</i> sp.
[100]	Reducción del peso del PET (envases) en 34.5%	30 días	<i>Arthrobacter sulfonivorans</i> y <i>Serratia plymuthica</i>
[101]	Pérdida de peso de partículas de PET entre 36.4% y 42.3 %	130 días	<i>Actinobacterias</i> , <i>Proteobacterias</i> y <i>Bacteroidetes</i>
[102]	Reducción del peso de PET del 18.3% ± 3.2.	50 días	<i>Bacillus</i> sp. <i>Paenibacillus</i> sp.
[103]	Pérdida de material particulado de PET del 28.3%	60 días	<i>Rizobio</i> sp. <i>I. sakaiensis</i>
[104]	Pérdida de peso 21,5%	60 días	<i>Oceanospirillales</i> <i>Alcaligenes faecalis</i>
[105]	Pérdida de peso del PET del 23,2%	60 días	<i>S. plymuthica</i> IV-11-34
[23]	Pérdida de peso con dos primeras bacterias del 14,6 %. Pérdida de 32.4% con tres bacterias	7 días con 2 bacterias. 3 días con 3 bacterias	<i>B. subtilis</i> y <i>Pseudomonas putida</i> . <i>Rhodococcus jostii</i> , <i>Pseudomonas putida</i> y dos <i>Alcaligenes faecalis</i>
[10]	Pérdida de peso 23.2% (seco) y un 45,2 % (húmedo)	9 meses	<i>Bacillus</i> spp. <i>Pseudomonas</i> spp. <i>Bacillus</i> sp. & <i>Paenibacillus</i> sp.
[22]	Pérdida de peso del 54,25 ± 2.5 %	8 meses	<i>Pseudomonas</i> sp <i>Bacillus</i> sp,
[106]	Pérdida de peso del 32.5%	75 días	<i>Halomonas boliviensis</i> , <i>Halomonas campisalis</i> B-1027
[14]	Pérdida de peso del 83,89% 4,08%	21 días	<i>Pseudomonas</i> sp. MP3a y MP3b, <i>Penicillium</i> sp. MP3a, <i>Rhodotorula</i> sp. MP3b
[107]	Pérdida de 24.3% del PET	35 días	<i>Rhodococcus jostii</i> , <i>Pseudomonas putida</i>
[108]	Degradación de un 99% de poli (etilentereftalato) en un tiempo de una hora	60 minutos	<i>Aneurinibacillus</i> sp.
[109]	Pérdida del 63.2%	18 días	<i>Streptomyces</i> sp
[110]	Pérdida de PET 21.5 ± 2. %	50 días	<i>Ideonella sakaiensis</i>
[111]	Pérdida de peso de 17%	168 días	<i>Bacillus cereus</i> , <i>agromyces mediolanus</i> PNP3
[112]	Pérdida de peso 21.4%	55 días	<i>Rizobio</i> sp. <i>I. sakaiensis</i>
[113]	Pérdida de peso 16,5%	40 días	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
[114]	Pérdida de 6 ± 0,5 mg y 18 ± 1,8 mg con cultivo sin purificar y purificado	60 días	<i>E. coli</i> y <i>Ideonella sakaiensis</i>
[115]	Pérdida de peso del 91,4% luego de la degradación posterior por <i>Thermobifida fusca cutinasa</i> (TfC).	8 días	<i>Stenotrophomonas pavanii</i> JWG-G1, <i>Comamonas koreensis</i> CG-2 and <i>Fulvimonas soli</i> GM-1
[116]	Pérdida de peso 19.4%	65 días	<i>Bacillus subtilis</i> sp. <i>I. sakaiensis</i>

Fuente: artículos consultados

Por su parte, los hongos también muestran una alta efectividad en la degradación del PET y en algunos casos la eficacia se asemeja a la de las bacterias, siendo también una importante alternativa de remediación ambiental, como puede comprenderse a partir de los estudios que se han considerado relevantes que aparecen en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados de la efectividad de hongos en biodegradación del PET

Referencia	Efectividad en la biodegradación del PET	Tiempo	Tipo de hongo utilizado
[13]	Pérdida de peso del 57.9%	96 horas	<i>Aspergillus flavus</i> and <i>Aspergillus oryzae</i>
[117]	Pérdida de peso del 60%	4 meses	<i>Rhizopus oryzae</i> y <i>Aspergillus spp</i>
[118]	Pérdida de peso del 26.15%	55 días	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> and <i>Aspergillus oryzae</i>
[15]	Pérdida de peso del 7.7% (270 días consorcio mixto; 100 días individuales y 30 días con agua	<i>Penicillium simplicissimum</i>
[119]	Pérdida de peso del 3,11 %	28 días	<i>Penicillium sp</i> <i>Penicillium simplicissimum</i>
[120]	Pérdida de peso del 5.26%	21 días	Consortios de suelo y alcantarillado
[121]	Pérdida de peso del 5 a 10%	60 días	<i>Pleurotus ostreatus</i>
[122]	Pérdida de peso del 5,5%	84 días	<i>Penicillium funiculosum</i>
[18]	Pérdida de peso del 28,2%	93 días	<i>Aspergillus spp</i>
[123]	Pérdida de peso del 0.21%	84 horas	<i>Aspergillus spp</i> <i>Penicillium raperi</i> ,
[124]	Pérdida de 21,3%	6 meses	<i>Consortium M. giganteus. L. laccatapresion. Aspergillus sp.</i>
[125]	Pérdida de peso del 26,02 ± 0,2 %	120 días	<i>Pleurotus ostreatus</i>
[126]	Pérdida de peso del 8,4 ± 3% y del 60% en la resistencia.	4 meses	<i>Rhizopus oryzae</i> y <i>Aspergillus spp</i>
[127]	Pérdida del ~3.5%	180 días	<i>Penicillium sp.</i> <i>Rhizopus arrhizus</i>
[128]	Pérdida de peso del 29.5%	126 días	<i>Aspergillus niger</i> & <i>Lysinibacillus xylanilyticus XDB9</i>
[129]	Pérdida de peso del 43.76%	90 días	<i>Curvularia lunata SG1</i>
[130]	Pérdida de peso DE 20,28 ± 2,30 %	45 - 90 días	<i>Aspergillus</i>
[13]	Pérdida de peso del 27,09 %	28 días	<i>Penicillium restrictum.</i> <i>Penicillium simplicissimum</i>
[131]	Pérdida de peso del 35%	90 días	<i>Aspergillus clavatus</i>

[132]	Pérdida de peso del 17.5%	25 días	<i>Aspergillus terreus</i> <i>Aspergillus fumigatus</i> .
[133]	Pérdida de peso del 9% <i>aspergillus spp</i> , 8% <i>fusarium</i> y 7% ambos	60 días	<i>Aspergillus spp</i> <i>Fusarium sp.</i>
[134]	Pérdida de peso de 8 <i>A. niger</i> y 12% <i>A. japonicus</i>	30 días	<i>Aspergillus niger</i> , <i>A. japonicus</i>
[135]	Pérdida de peso del 43.4%	80 días	<i>Aspergillus sp</i> y <i>Penicillium sp</i>
[136]	Pérdida de 27,6%	60 días	<i>Chaetomium sp.</i> <i>Aspergillus flavus.</i>
[137]	Pérdida de 13.2%	20 días	<i>Mucor rouxii</i> NRRL 1835. <i>Aspergillus flavus</i>
[138]	Pérdida de peso del 37,5%	135 días	<i>Penicillium simplicissimum</i> <i>Aspergillus niger</i>
[139]	Pérdida de peso de 17,06 %, 48,00 %, 58,598 % con NS10. Pérdida de peso de 24,18%, 43,73%, 55,34% con NS4	45 días	<i>Penicillium chrysogenum</i> NS10 <i>Penicillium oxalicum</i> NS4
[140]	Pérdida de peso de 0,001 grs (7 días) y 0,023 grs (17 días) con SB. Pérdida de peso de 0,014 grs (7 días) y 0,018 grs (17 días) con SD.	7 a 14 días	<i>Aspergillus versicolor</i> (SB) <i>Aspergillus sp</i> (SD)
[141]	Pérdida de peso del 22,2%	90 días	<i>Aspergillus sp.</i> , <i>Paecilomyces lilacinus</i> H. <i>H. brunonis</i> y <i>Lasiodiplodia theobromae</i>
[142]	Pérdida de peso del 3.44% y 61 % en la resistencia a la tracción del polietileno	30 días	<i>Aspergillus niger</i> (ITCC no. 6052)
[143]	Pérdida de 62,79 % al 52,02 % en cristalinidad del PET. La pérdida aumentó en 9 veces a los 120 días	28 días – 120 días	<i>A. alternata</i>
[144]	Pérdida del 5%	96 horas	<i>Humicola insolens</i> <i>Fusarium solani pisi</i> <i>Fusarium oxysporum</i>
[145]	Despolimerización del 2 al 3% equivalente a 20 ppm o 3 a 6 mg.		<i>Microsphaeropsis</i> , <i>Mucor</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Westerdykella</i> y <i>Pycnidioophora</i>
[146]	Pérdida de 3.09% de masa de PET	28 días	<i>Penicillium restrictum</i> <i>P. simplicissimum</i>

Fuente: artículos consultados.

4.2.3. Investigaciones sobre biodegradación del PET en el ámbito nacional

De acuerdo con la búsqueda realizada en las bases de datos revisadas para las investigaciones internacionales, no se encontraron artículos que describan resultados sobre la implementación es estas biotecnologías en Colombia. Sin embargo, a nivel de estudios de pregrados existen dos que permiten comprender el

potencial que ofrecen estos microorganismos. El primer trabajo corresponde a Castro y Avendaño [147], el cual utilizó bacterias (*Bacillus Cereus* y *Aeromonas Hydrophila*) y hongos (*Penicillium sp* y *Aspergillus sp*) extraídos del lixiviado de relleno sanitario. Los datos permiten señalar que, tras 4 meses de tratamiento de láminas de PET con los microorganismos descritos, el proceso de biodegradación es más eficiente si se apoyan en algunos tratamientos, siendo la aclimatación la que mejores resultados ofrece, como puede observarse en la tabla 19.

Tabla 19. Reducción de peso de láminas de PET según microorganismos

Microorganismo	Tratamiento	Pérdida de masa (%)
<i>Bacillus Cereus</i>	Radiación UV	19.97
	Aclimatación	22.21
	Termodegradación	18.40
	Blanco (Sin tratar)	8.35
<i>Aeromonas Hydrophila</i>	Radiación UV	9.12
	Aclimatación	15.27
	Termodegradación	10.24
	Blanco (Sin tratar)	9.64
<i>Penicillium sp</i>	Radiación UV	14.54
	Aclimatación	17.88
	Termodegradación	17.03
	Blanco (Sin tratar)	9.51
<i>Aspergillus sp</i>	Radiación UV	8.47
	Aclimatación	16.29
	Termodegradación	13.99
	Blanco (Sin tratar)	10.71

Fuente: Castro y Avendaño [147]

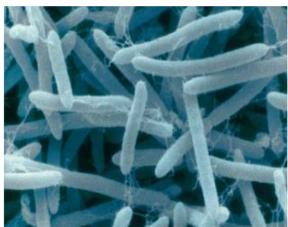
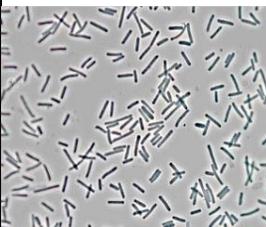
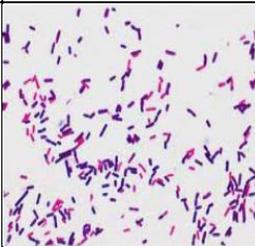
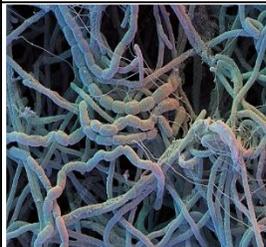
El otro trabajo es el realizado por Rodríguez y Velandia [148] para la degradación de pitillos utilizando el hongo *Phanerochaete sp* CMPUJH123. Se hizo observación a los 7, 18, 44 y 75 días sobre el crecimiento del microorganismo, para lo cual la degradación se evidenció a partir de la disminución en la rugosidad que evidencia desgaste y debilitamiento de los pitillos.

4.2.4. Eficiencia de los microorganismos en la biodegradación del PET

Los resultados del uso de microorganismos para la biodegradación del PET a nivel internacional y nacional permiten afirmar que son alternativas que contribuyen a la remediación ambiental de uno de los principales residuos sólidos.

Al establecer un comparativo, puede comprenderse que dependiendo de los tratamientos que cada estudio ha realizado, tanto del PET como de las bacterias y hongos, la efectividad en la biodegradación es diferente, inclusive si se trata del mismo microorganismo. Sin embargo, en el caso de las bacterias, aquellas como *Aneurinibacillus sp*, *Paenibacillus*, *Bacterias género Delftia*, *Actinobacterias*, *Pseudomonas sp*, *Bacillus sp*, *Streptomyces sp* e *Ideonella sakaiensis* que se presentan en la tabla 20, ofrecen una alta eficiencia, que según algunos de los estudios provocan pérdida de peso en el material de PET (láminas, botellas) entre el 25% y 35% [21] [85] [93] [103]. Pero los mejores resultados no son mediante el uso de estas de manera individual, por lo que los consorcios son los que caracterizan a prácticamente todos los estudios, alcanzando porcentajes de pérdida superiores al 40% del peso de los materiales sometidos a biodegradación [21-22] [79] [91] [93-95] [99] [115].

Tabla 20. Imágenes de algunas bacterias biodegradantes del PET

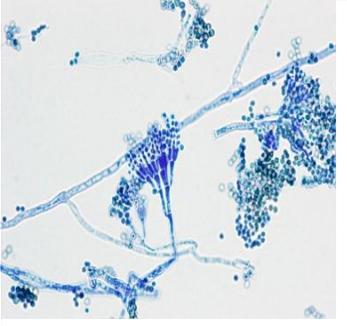
<i>Aneurinibacillus sp</i> [149]	<i>Paenibacillus</i> [150]	<i>Delftia</i> [151]	<i>Actinobacterias</i> [152]
			
<i>Pseudomonas sp</i> [153]	<i>Bacillus sp</i> [154]	<i>Streptomyces sp</i> [155]	<i>Ideonella sakaiensis</i> [156]
			

Fuente: elaboración propia

En el caso de los hongos, la mayoría de los estudios encontrados utilizaron los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* en sus diferentes especies (ver tabla 21), que al igual que como sucede con las bacterias, dependiendo del tratamiento del PET y de los microorganismos ofrecen una eficiencia que oscila entre el 5% y el 15% [121]

[122] [18] [127] [144], siempre y cuando se usen individualmente, pero en consorcios la biodegradación del material puede alcanzar reducciones del peso de las láminas o botellas superiores al 30% [13] [117] [131] [143]. También es destacable la eficiencia del hongo *Pleurotus ostreatus* superior al 10% [121] [125].

Tabla 21. Imágenes de algunos hongos biodegradantes del PET

<i>Aspergillus niger</i> [157]	<i>Penicillium sp</i> [158]	<i>Pleurotus ostreatus</i> [159]
		

Fuente: elaboración propia

4.2.5. Impactos de la biodegradación en la remediación ambiental

La implementación de bacterias y hongos para biodegradar el PET provoca diferentes impactos, especialmente en la descontaminación de los espacios, la salud de las personas y la prevención de accidentes en los animales.

Sobre la descontaminación, algunos estudios señalan que la biodegradación representa la oportunidad de corregir y controlar problemas ambientales, no solo por cuanto se reduce la presencia de residuos sólidos de PET, sino porque los métodos son compatibles con los ecosistemas en tanto son microorganismos los principales responsables de la destrucción y eliminación de un material que es el que mayor contaminación genera en el mundo [13] [28] [83].

En tal sentido, son procesos cuyos efectos secundarios adversos son prácticamente nulos, ya que, a través del metabolismo, la secreción de lipidasas, ácidos y otros compuestos no generan mayor contaminación como ocurre con métodos como la incineración o métodos químicos [88] [114].

Frente a la salud de las personas, al reducirse el PET a través de microorganismos se evitan problemas de tipo respiratorio y de contacto que resultan al exponerse a

los métodos de incineración y químicos que son peligrosos [10] [54] [133]. Sobre esto, los principales beneficios están sobre el personal operativo que se dedica a la eliminación de residuos de PET, así como de aquellas comunidades que se ubican en zonas aledañas a los rellenos sanitarios y otros espacios en donde se gestiona este tipo de materiales que pueden ser causa del deterioro de la calidad del agua y del suelo [27] [107] [145].

Frente a la diversidad, se ha comprobado y evidenciado que, en los hábitats naturales, al quedar dispuestos los residuos sólidos de plástico, entre los que está el PET, varias especies como tortugas, aves, anfibios y otros, ingieren este tipo de materiales, causándoles deterioro en su salud y problemas de asfixia y demás formas que atentan contra la vida, sobre todo en ecosistemas marinos [38] [56] [85].

Quizá uno de los principales impactos radica en la posibilidad de acelerar el proceso de degradación de un material que debido a sus enlaces de carbono es altamente resistente, pero que la acción de las bacterias y hongos provoca modificaciones en sus estructuras que al final terminan en la mineralización del PET, ante lo cual los factores abióticos como la luz, el aire y la oxidación logran destruirlo y lo hacen asimilable por el ambiente [135] [147].

4.3. Determinación de los mecanismos de adaptación de la biodegradación de PET en el territorio caucano

En la región, existe una cadena de manejo de residuos con una antigüedad aproximada de 25 años en promedio, principalmente por la existencia de varios centros de acopio a los cuales los recicladores de oficio o informales llevan los materiales recolectados. Para ello, en la mayoría de los casos, sobre todo en las personas que recolectan no están presentes las normas y requerimientos de tipo ambiental, simplemente lo hacen como fuente de ingresos, pero las centrales de acopio son conscientes de la normatividad.

4.3.1. Caracterización de la cadena de manejo de residuos aprovechables en el Cauca

La cadena de manejo implica reconocer las autoridades que vigilan y controlan el manejo de residuos en el Cauca, los requerimientos que implica la Resolución 754

de 2014 del MADS y el Decreto 596 de 2016, además de la identificación de generadores, asociaciones dedicadas a la gestión de residuos, los grupos de investigación y laboratorios de procesamientos.

4.3.1.1. Autoridades con jurisdicción en el Cauca

Conforme a la normatividad establecida constitucionalmente para la vigilancia, protección y conservación del medio ambiente, en el Departamento del Cauca tienen jurisdicción las autoridades que se describen en la tabla 22.

Tabla 22. Autoridades ambientales con jurisdicción en el Departamento del Cauca

Nombre	Función
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones para la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.
Agencia Nacional de Licencias Ambientales	Es una unidad administrativa especial encargada de vigilar que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible
Parques Nacionales Naturales de Colombia	Se encarga de la administración y manejo del Sistema de Parques Nacionales Naturales y la coordinación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.
Corporación Autónoma Regional del Cauca	Administrar, dentro del área de su jurisdicción el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del MADS.
Gobernación del Cauca	Diseñar, coordinar, articular e implementar el plan de desarrollo departamental conforme a los ejes ambiental y de salud para efectos de la gestión integral de residuos sólidos.
UMATA (municipios)	En los municipios son la UMATA desempeña la función de cuidado y protección del medio ambiente y los recursos, por lo que es la encargada de formular los planes de manejo de residuos sólidos.

Fuente: IDEAM [160]

4.3.2. Requerimientos de la Resolución 754 de 2014 del MADS

La gestión de residuos sólidos implica el cumplimiento de requerimientos como los que se describen en la tabla 23, con lo cual las autoridades nacionales y regionales pueden tener unos lineamientos para efectos de lograr cumplir con la normatividad.

Tabla 23. Requerimientos de la Resolución 754 de 2014 del MADS

Requisitos	Descripción
Análisis de la normatividad vigente	Consiste en revisar los cambios y actualizaciones en materia ambiental que desde el ordenamiento jurídico nacional se han establecido.
Análisis de la situación diagnóstica	Es la línea base que permite identificar las condiciones bajo las cuales se hace la gestión de residuos sólidos en un momento dado.
Caracterización de recolección y acopio de residuos sólidos	Se refiere a la identificación de la cadena de gestión, básicamente los recicladores y centros de acopio, así como los diferentes residuos que se manejan en un lugar o región en específico conforme a las condiciones sociales.
Diagnóstico de tratamiento	Corresponde a la identificación de las condiciones y características mediante las cuales se realiza el manejo de los residuos sólidos, Para ello es necesario el diseño, implementación, seguimiento y evaluación de los programas que se describen a continuación.
Programa de educación y sensibilización	Es el conjunto de actividades orientadas a generar conciencia por la gestión de los residuos para la protección y conservación del medio ambiente y la salud de las comunidades.
Programa de minimización	Representa las estrategias con las que las autoridades, hogares y empresas pueden hacer uso mínimo de productos que generan residuos sólidos.
Programa de separación en la fuente	Son las acciones por las cuales los hogares y las distintas organizaciones deben clasificar y separar los residuos a fin de facilitar la gestión de los mismos.
Programa de recolección y transporte	Las empresas dedicadas a la recolección y transporte deben determinar las condiciones que les permita hacer una gestión eficiente y segura.
Programa de recuperación y aprovechamiento	Es un programa destinado al aprovechamiento de los residuos sólidos, por lo que las empresas conforme a la normatividad deben establecer los métodos y fines para los cuales se recuperan.
Programa de almacenamiento	Implica contar con lugares seguros habilitados para el acopio y disposición de los residuos mientras se destinan a la comercialización o transformación.
Programa de transformación	En vista del carácter aprovechable de los residuos sólidos, algunas empresas generan otros productos, por lo que deben cumplir con normas para tales efectos, tales como uso de suelo, entre otros.
Gestión de capacitación	Dado que existen las cadenas de gestión de los residuos sólidos, es necesario que se diseñen acciones de capacitación para los diferentes actores, tanto desde el punto de vista normativo como de la gestión según cada eslabón de la misma.

Fuente: MADS [38]

4.3.3. Generadores

De acuerdo estadística del censo de población y vivienda del 2018 realizadas por el DANE [161], en el Departamento del Cauca existen 432.493 hogares, que en principio representan el mayor número de fuentes generadoras de residuos sólidos. A estos se suman 9015 empresas formalizadas [162], las cuales en el ejercicio de sus actividades económicas generan residuos sólidos, tales como cartón, plástico, hierro, aluminio, vidrio, entre otros.

4.3.4. Organizaciones dedicadas al reciclaje

En la actualidad, en el Departamento del Cauca existen 20 asociaciones dedicadas a la gestión de residuos sólidos (ver tabla 24), las cuales corresponde a grupos de recicladores que en calidad de cooperativas o asociaciones han venido desarrollando la actividad de recolección, recuperación y comercialización principalmente. Así mismo, existen empresas de particulares que se han constituido como centros de acopio a los cuales los recicladores de oficio surten, creando una cadena de abastecimiento que en algunos casos llega a más de 200 personas que acuden a estos sitios para vender los materiales recuperados.

Tabla 24. Asociaciones y empresas recicladoras del Cauca

Municipio	Asociación/empresa
Popayán	<ul style="list-style-type: none"> • Asociación de Recuperadores de Material Aprovechable del Cauca -ARMAC • Asociación de Recolectores de Materiales Reciclables de Popayán -AREMARPO • RECINPAYAN EAT • Asociación de Recicladores de Oficio del Suroccidente Colombiano • Asociación de Recicladores de Oficio Goleros - AROG • ASERHI-ECORPOL • BRASOC SAS • Chatarrería La Mayorista de Occidente • Recicladora del sur • Servicios Ambientales de Colombia –SAMCOL • ASOCAMPO • Chatarrería Brisas del Rio • Chatarrería Aleida • Chatarrería El Uvo • La Favorita • Chatarrería San Antonio

	<ul style="list-style-type: none"> • Chatarrería el Desvare • Chatarrería La 12 • Chatarrería Guevara • Eibar Mulato • Chatarrería El Abuelo • Chatarrería Las Palmas • Víctor Orozco
Santander de Quilichao	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales Quilichao ZOMAC S A S • Reciclajes Integrados del Pacífico Colombiano E.U. • RCC y Asociados SAS
Puerto Tejada	<ul style="list-style-type: none"> • Asociación De Reciclaje Brisas Del Puerto
Villa Rica	<ul style="list-style-type: none"> • Soluciones Integrales de Procesos Ecológicos SAS E.S.P
Guachené	<ul style="list-style-type: none"> • Reciclajes Industriales Del Cauca Ltda
Miranda	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosostenible SAS
Argelia	<ul style="list-style-type: none"> • Asociación Para Protección Reciclaje y Recuperación del Medio Ambiente de Argelia Cauca
Bolívar	<ul style="list-style-type: none"> • Asociación de Reciclaje del Municipio de Bolívar Cauca

Fuente: elaboración propia

4.3.5. Recicladores de oficio

En la actualidad no se conoce con precisión el número de recicladores de oficio, pero según cifras de la Alcaldía de Popayán, en la ciudad, actualmente existen alrededor de 326 personas dedicadas a la recolección y comercialización de residuos sólidos recuperados [54]. Sin embargo, el número puede superar los 500 que son proveedores de las asociaciones y empresas descritas en la tabla 24, a los que se deben sumar los que surten a las empresas del resto de municipios del Departamento del Cauca.

4.3.6. Grupos de investigación

Los grupos de investigación en la actualidad se han conformado a partir de campos del conocimiento afines, por lo que en la mayoría de los casos no son exclusivos de un programa académico, lo que significa que han procurado que los productos del ejercicio investigativo contengan elementos multi e interdisciplinarios, sobre todo cuando el tema del desarrollo sostenible es transversal a prácticamente todas las disciplinas del conocimiento. En el caso del Cauca y en las instituciones de educación superior localizadas en el departamento, los grupos son los que se indican en la tabla 25:

Tabla 25. Grupos de investigación relacionados con los residuos sólidos

Institución	Grupo	Línea relacionada con residuos sólidos	Clasificación
Corporación Universitaria Autónoma Cauca [163]	Grupo de Investigación en Tecnologías y Ambiente (GITA)		B
	Grupo de Estudios en Sistemática y Conservación- GESC	Biorremediación - Ingeniería Ambiental y Sanitaria	B
	Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental – GISA	Contaminación de suelos y residuos solidos	
Universidad del Cauca [164]	Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental	Ingeniería ambiental	C
Corporación Universitaria de Comfacauca [165]	Grupo Cadenas de Valor	Sostenibilidad Ambiental	B
Fundación Universitaria de Popayán	Grupo de Investigación en Ecología	Gestión de Residuos Sólidos	

Fuente: información de universidades

4.3.7. Laboratorios de procesamiento de Residuos sólidos

De acuerdo con el proceso de investigación, no se encontraron laboratorios de esta naturaleza en el Cauca.

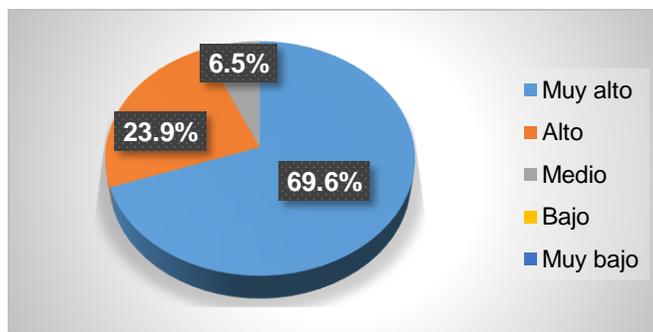
4.3.8. Análisis de receptividad de actores de la cadena de manejo de residuos de PET para la implementación de la biodegradación.

En aras de identificar la disposición de los actores de la cadena de manejo de residuos sólidos para participar en los procesos de biorremediación ambiental mediante bacterias y hongos, se implementaron preguntas que permiten comprender una baja receptibilidad, principalmente porque la actividad económica de reciclaje se veía amenazada. En ese sentido, los resultados son los que se muestran a continuación:

En la pregunta 14 de la encuesta del Anexo 1, se indagó sobre cómo califican el nivel de contaminación del PET, ante lo cual, en la figura 24 se observa que el 69.6% lo consideran que es muy alto, el 23,9% alto y solo el 6.5% lo califica de medio. Esto significa que son personas conscientes de los altos impactos negativos de este

material sobre el medio ambiente a raíz de los residuos que quedan dispuestos en el medio ambiente.

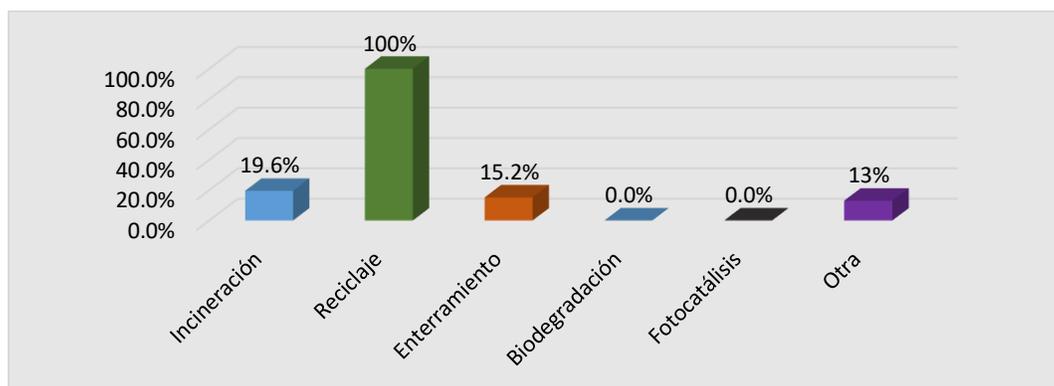
Figura 24. Percepción del nivel de contaminación del PET



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Luego, en la pregunta 15 también se preguntó sobre métodos que los actores de la cadena de manejo de residuos conocen para efectos de reducir la contaminación por PET y los resultados descritos en la figura 25 permiten señalar que la totalidad identifican el reciclaje como una alternativa, seguido de la incineración con el 19.6% y el enterramiento con el 15.2%.

Figura 25. Métodos de reducción de contaminación por PET conocidos por recicladores



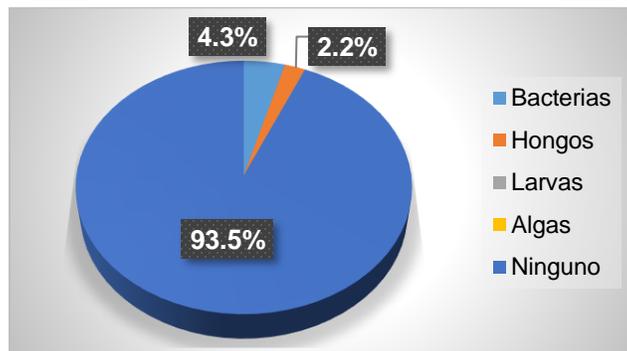
Fuente: datos de los recicladores encuestados

Además, se señalan otras, entre las cuales los encuestados plantean la reducción del PET como material utilizado para la fabricación de envases, el uso de materiales biodegradables, disminuir el consumo de productos empaquetados.

Al tratarse de la opción de biodegradación como método de reducción del PET, en la pregunta 16 se preguntó sobre el conocimiento del uso de microorganismos para tal efecto y de acuerdo con los resultados indicados en la figura 26, solo el 4.3%

conoce del uso de bacterias, el 2.2% de hongos, mientras que ninguna de las opciones planteadas la señalaron el 93.5%, lo que significa un alto número de personas que desconocen de tales alternativas para reducir la contaminación por el material mencionado.

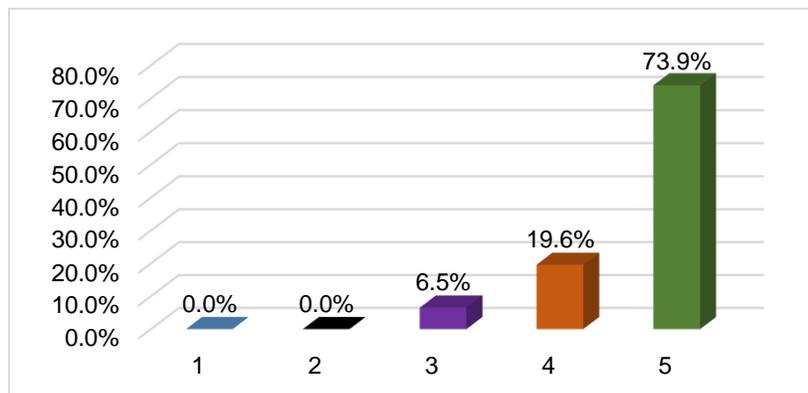
Figura 26. Métodos de biodegradación del PET conocidos por los recicladores



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Luego en la pregunta 17 se indagó sobre la percepción de los encuestados acerca de su nivel de compromiso para contribuir a reducir la contaminación por PET, para lo cual se pidió autoevaluarse en una escala de 1 a 5, siendo 1 nada comprometido y 5 totalmente comprometido. Los resultados mostrados y que corresponden a los de la figura 27 permiten afirmar que, el 73.9% de los encuestados manifiestan tener un nivel de compromiso de 5, el 19.6% lo califican de 4 y 6.5% en 3. Además, los descriptivos estadísticos señalan que el nivel promedio es de 4.82, lo que significa que es muy alto para el grupo de 46 personas que diligenciaron la encuesta.

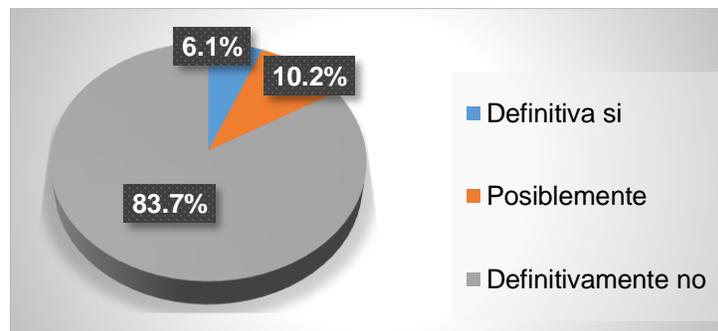
Figura 27. Nivel de compromiso para reducir la contaminación por PET



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Con base en lo anterior, en la pregunta 18 se buscó conocer acerca de la disposición de participar de procesos de biodegradación del PET a través del uso de bacterias y hongos, ante lo cual se evidencia que solo el 6,1% estaría de acuerdo, mientras que el 83,7% no, así como un 10,2% que contestó la opción “posiblemente” (ver figura 28).

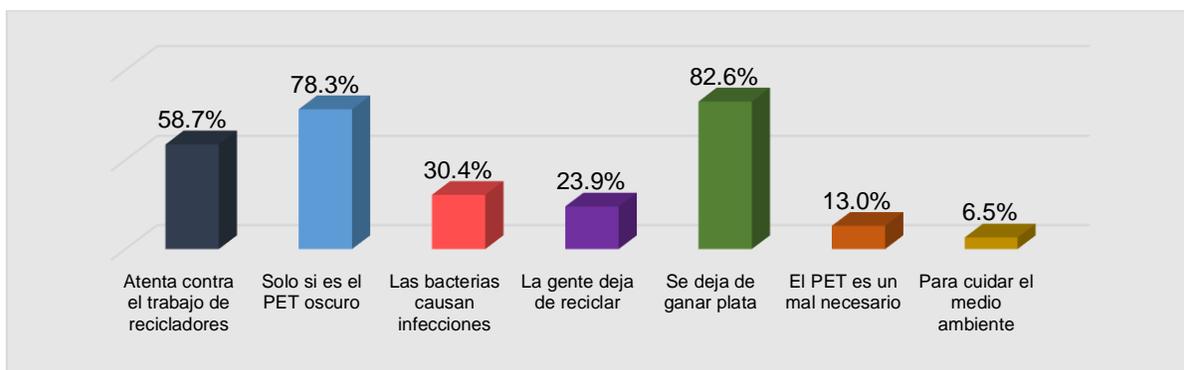
Figura 28. Disposición de participación de procesos de biodegradación del PET



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Para efectos de comprender los resultados anteriores, en la pregunta 19 se solicitó a los recicladores plantear las razones por las cuales participarían o no de este tipo de procesos. Estas son las que se presentan en la figura 29 y de los que están de acuerdo, solo tres manifiestan que es necesario para cuidar el medio ambiente, mientras que el resto lo conciben como un proceso que amenaza el empleo, el carácter infeccioso de las bacterias, participar solo si es para PET oscuro, pérdida de ingresos y algunos reconocen que es un mal necesario.

Figura 29. Razones de participar o no de biodegradación del PET

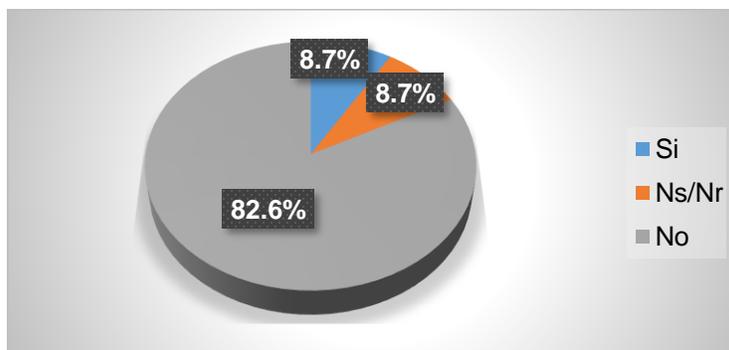


Fuente: datos de los recicladores encuestados

Posteriormente, en la pregunta 20, se preguntó acerca de la disposición de participar de un taller de capacitación sobre procesos de biodegradación del PET

mediante el uso de bacterias y hongos, ante lo cual los datos de la figura 30 señalan que solo el 8,7% afirma estarlo, mientras que 82,6% no lo estaría.

Figura 30. Disposición de participar en taller sobre biodegradación del PET



Fuente: datos de los recicladores encuestados

Al respecto de la disposición o no de participar, se indagó sobre las expectativas o razones que les generaba la posible realización del taller sobre procesos de biodegradación del PET por medio de hongos y bacterias. En tal sentido, las razones expuestas están relacionadas con que se da por hecho la implementación de este tipo de tratamientos al PET, el “gobierno va a usar bacterias”, la participación implica acabar con el trabajo de los recicladores, entre otras como las siguientes:

- Significa que ya se va a hacer, sino no nos invitarían a capacitaciones.
- sea que el gobierno va a usar bacterias ahora.
- Si voy vamos a hacer que se acabe el trabajo de reciclaje.
- Porque nos quedaríamos sin ingresos.
- Entonces el PET no se vendería más.
- No me voy a prestar para acabar con el trabajo que nos da de comer.
- De esto vivo y si se usan esos animales que dicen se acaba mi trabajo.
- Si vamos sin saber que ya van a usarse las bacterias, dañamos el negocio.
- Iría, pero si solo se va a hacer con PET oscuro que casi no se vende.

De acuerdo con los anteriores resultados, puede afirmarse que existe una baja receptibilidad frente a la implementación de la biodegradación del PET, excepto para el de los colores oscuros que de acuerdo con los recicladores es menor comercializable. Frente a esta aparente renuencia, quizá se requiere de procesos de concientización de los beneficios de la biodegradación, de manera que para proyectos futuros se cuente con conocimientos más amplios acerca de los métodos y mecanismos que podrían implementarse en el Cauca, surgidos a partir de

consensos con los diferentes actores de la cadena de gestión de residuos sólidos y especialmente del PET.

4.3.9. Definición de mecanismos de implementación de las técnicas de biodegradación al ámbito caucano

En vista de la baja receptibilidad frente a la posible implementación de la biodegradación del PET a través de bacterias y hongos, en la tabla 31 se describe un conjunto de acciones por las cuales podría contribuirse a la remediación ambiental en el contexto caucano.

Figura 31. Mecanismos de implementación de la biodegradación del PET

Estrategia	Actividades	Requerimientos y/o procedimientos
Diseño e implementación de biodegradación [147]	Identificación de equipos [147]	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de irradiación UV • Autoclave Vitale plus 21 marca CRISTOFOLI • Microscopio óptico marca Thomson • Balanza analítica precisión 0.0001 marca OHAUS • Incubadora marca Memmert • Espectrofotómetro marca HACH DR 3900
	Identificación de reactivos [147]	<ul style="list-style-type: none"> • Ácido Clorhídrico • Agar McConkey marca Merk KGaA • Agar Plate Count marca Merk KGaA • Agar Sabouraud marca Merk KGaA • Agar Sangre marca Merk KGaA • Azul de metileno marca Hycel • Caldo nutritivo marca Merk KGaA • Cloruro de calcio dihidratado • Cloruro de potasio • Cristal violeta marca Biopack • Extracto de levadura • Fosfato dipotásico • Hidróxido de Potasio • Lugol marca Albor • Nitrato de Amonio • Safranina marca Hycel • Sulfato de hierro exahidratado • Sulfato de Magnesio pentahidratado • Sulfato de manganeso • Sulfato de zinc heptahidratado
	Identificación del cultivo de microorganismos [147]	<ul style="list-style-type: none"> • Agar McConkey marca Merk KGaA • Obtención de lixiviados, lodos o sustratos de suelos de montaña. • Preparación del caldo nutritivo • Cajas Petri • Agar Sabouraud marca Merk KGaA

	Aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de colonias • Análisis de laboratorio
	Selección de microorganismos	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de microorganismos, tanto hongos y bacterias entre otros que resulten del cultivo.
	Pretratamiento del PET	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de botellas. • Desinfección de botellas • Pesaje de las botellas. • Balanza micro analítica de marca OHAUS precisión 0.0001. • Recorte de 60 láminas uniformes.
	Aclimatación natural	<ul style="list-style-type: none"> • Exposición de 20 láminas al sol durante 25 días. • Rotación de ángulo de exposición para mayor incidencia solar
	Fotodegradación	<ul style="list-style-type: none"> • Exposición de 20 láminas a incidencia de luz UV durante 6 días. • Ciclos de exposición de 2 a 3 horas por día.
	Termodegradación	<ul style="list-style-type: none"> • Exposición de 20 láminas a 50°C durante 6 horas
	Preparación del medio	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de 2 litros de microecosistema de pH neutro y temperatura controlada $\pm 27^{\circ}\text{C}$ para el montaje de la prueba de degradación con reactivos químicos.
	Montaje de la biodegradación [147]	<ul style="list-style-type: none"> • 20 botellas de vidrio esterilizadas Llenado de 20 botellas con medio sintético. • Depósito de 1 lámina aclimatada naturalmente por cada botella (total 4 botellas). • Depósito de 1 lámina fotodegradada por cada botella (total 4 botellas). • Depósito de 1 lámina termodegradada por cada botella (total 4 botellas). • Depósito de 1 lámina sin ningún tratamiento por cada botella (total 4 botellas). • Uso de 4 botellas sin lámina.
	Conteo de microorganismos [147]	<ul style="list-style-type: none"> • Repiques cada 15 días del medio sintético. • Uso de agares McConkey, Bases sangre y Sabouraud. • Conteo a los 4 meses. • 200 mL de agar Plate Count y 200 mL de agar Sabouraud para bacterias y hongos. • Inoculación de 1 mL.
	Cálculo de pérdida de masa y eficiencia de biodegradabilidad [147]	<ul style="list-style-type: none"> • Hipoclorito de sodio para retirar la biopelícula adherida. • Lavado de película para sumergirlas en agua destilada por 60 minutos. • Exposición a desecador por 24 horas. • Pesaje de películas en balanza OHAUS de precisión 0.0001. • Cálculo de pérdida de masa $\Delta\%$ $\text{Peso} = ((\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / \text{Peso inicial}) * 100$ • Cálculo de eficiencia $\text{EF} = (\text{Peso final} / \text{número meses})$

		<ul style="list-style-type: none"> • Registro de pesos observados. • Pruebas de normalidad, ANOVA y T-Student
	Análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de informe • Análisis y discusión
Diseño de un programa de sensibilización	Convocatoria a asociaciones y empresas de manejo de residuos sólidos para sensibilización	<ul style="list-style-type: none"> • Envío de oficios de invitación. • Recepción de confirmación de asistencia. • Registro de asociaciones y empresas que participarán de programa de sensibilización.
	Convocatoria a autoridades ambientales con jurisdicción en el Cauca para sensibilización y acompañamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Envío de oficios de invitación. • Recepción de confirmación de asistencia. • Registro de autoridades ambientales del Cauca que participarán de programa de sensibilización.
	Socialización de resultados del proyecto piloto	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de plegables con resultados de proyecto piloto de biodegradación. • Entrega de plegables a asociaciones, empresas y autoridades ambientales. • Presentación de resultados del proyecto piloto.
	Realización de talleres de capacitación sobre biodegradación del PET	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de asistencia • Capacitación sobre biodegradación con bacterias • Capacitación sobre biodegradación con hongos
Diseño de propuesta de proyecto de biodegradación del PET a gran escala	Definición de línea base	<ul style="list-style-type: none"> • Indicadores de generación de residuos de PET. • Descripción de actores de la cadena de manejo de residuos de PET.
	Identificación de PET potencialmente utilizable en el proyecto piloto.	<ul style="list-style-type: none"> • Reunión con asociaciones para definir el tipo de PET para biodegradación. • Acuerdos para recolección y entrega de PET dispuesto para biodegradación. • Definición de pagos por material de PET para biodegradación.
	Definición de microorganismos para la biodegradación.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de bacterias y hongos que resulten del cultivo del proyecto piloto. • Definición de bacterias y hongos según las condiciones de T° de zonas representativas de generación de PET en el Cauca.
	Identificación de materiales necesarios	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales y reactivos utilizados en el proyecto piloto.
	Elaboración de presupuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación de materiales, insumos y recurso humano. • Cotización de materiales e insumos. • Estimación de remuneración del recurso humano.
	Elaboración de cronograma	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de fecha de inicio. • Definición de fechas de seguimiento.
	Análisis de la propuesta	<ul style="list-style-type: none"> • Discusión de propuesta con asociaciones, empresas y autoridades ambientales. • Realización de ajustes.

	Elaboración de propuesta final	<ul style="list-style-type: none"> •Elaboración de documento final. •Publicación de propuesta.
	Socialización de propuesta con organizaciones, empresas, autoridades ambientales y alcaldías	<ul style="list-style-type: none"> •Convocatoria a empresa, asociaciones, autoridades ambientales y alcaldías. •Presentación de la propuesta.

Fuente: información de Castro y Avendaño [147]

En general, se observa la necesidad de sensibilizar a los actores de la cadena de manejo de residuos y especialmente del PET frente a alternativas de degradación como los hongos y bacterias para contribuir a la reducción de la contaminación ambiental. En tal sentido, es posible que, a través de la vinculación de las asociaciones, empresas, autoridades ambientales, alcaldías y recicladores de oficio establecer los mecanismos de participación sin que ello represente en principio amenazas para una actividad económica que a raíz de los residuos se ha generado en los últimos años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados expuestos frente al estado de la actual gestión de residuos de PET en el territorio caucano, las investigaciones relacionadas con procesos de biodegradación de este material y en cuanto a los mecanismos por los cuales este proceso puede adaptarse como alternativas para la solución de las problemáticas ambientales de este polímero, se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

La generación de residuos sólidos en el Cauca tiene como principales responsables a los hogares y las empresas y de estas últimas, las cuales las dedicadas al comercio son las que más aportan en razón a los empaques y envases utilizados para almacenar y transportar productos de consumo como industriales. Aunque en años anteriores a 2019 el crecimiento se había estabilizado, con la pandemia por COVID-19 se incrementó el uso, especialmente de plásticos entre los que está el PET, alcanzando un incremento cercano al 5% en las tres principales ciudades (Popayán, Santander de Quilichao y Puerto Tejada).

En cuanto al aprovechamiento de los residuos, en los últimos siete años se han presentado volúmenes crecientes, al punto que hacia 2021 como año completo se alcanzó un total de 2909,7 toneladas, prácticamente cinco veces la cantidad de 2016, lo que significa que en el Cauca se ha venido consolidando una cultura de la recuperación y aprovechamiento de los residuos sólidos. No obstante, la tasa de crecimiento se ha desacelerado desde 2019 hasta experimentar un decrecimiento en 2021 del 16.2%.

Frente a la caracterización de los actores de la cadena de manejo de residuos sólidos, en el Cauca y en Popayán existen recicladores de oficio que recuperan y venden materiales tales como papel, cartón, plástico (polietileno, pvc, PET), aluminio recubierto “bolsa chillona”, aluminio, hierro, vidrio, icopor, empaques de tetra pack, entre otros, cuyos volúmenes en su mayoría no superan los 50 kg semanales por reciclador.

A los recicladores de oficio se suman los centros de acopio que se han constituido como asociaciones de recicladores tal es el caso de AREMARPO, ASOCAMPO, RECINPOPAYAN, AROG y ARMAC; así como, sociedades de acciones simplificadas (BRASOC SAS, San Antonio SAS), y empresas de personas naturales (Victor Orozco, Éibar Mulato, La Favorita) que llevan a cabo procesos de clasificación, almacenamiento y comercialización a nivel nacional con destino a empresas transformadoras y otras extranjeras.

Como resultado del levantamiento de información primaria, la cantidad de residuos sólidos a nivel de Popayán alcanzar las 438,3 toneladas, lo que representa un gran volumen de materiales derivados de las actividades antrópicas, que, si se divide entre la población de la ciudad (367 mil aproximadamente), que cada persona genera en promedio 1.19 kg semanales. Luego, de acuerdo con estadísticas de la CEPAL [46], solo el 3.3 son aprovechadas, un indicador significativamente inferior a ciudades como Bogotá en donde se aprovecha el 24.4%, Villavicencio el 13.9% o Rionegro 13.1%.

Frente a los residuos de PET, en Popayán los recicladores recuperan en promedio 25,4 kg semanales. Sin embargo, la cantidad acopiada es de 51,6 toneladas mensuales como producto de la recuperación de los recicladores de oficio tanto de Popayán como de otros municipios. En tal sentido, se trata de un material que representa cerca del 50% de los residuos plásticos en la ciudad, el cual representa una problemática ambiental en tanto es responsable de contaminación.

Sin embargo, aunque es un material que ante su manejo inadecuado provoca contaminación, representa una actividad económica generadora de empleo formal e informal y por ende una fuente de ingresos, ya que un gran número de familias y personas al recuperar este material y su respectiva comercialización logran recursos para procurarse la satisfacción de sus necesidades básicas y en el caso de los propietarios de centros de acopio la obtención de utilidades.

A raíz de esta actividad económica que representa para los recicladores, se logra además beneficios sociales en términos de reducción de la contaminación, ya que se evitan problemas de salud causados por la presencia de residuos sólidos.

Además, es una actividad que contribuye a la inclusión de género, estrato socioeconómico, desplazamiento, entre otros aspectos sociales, lo que hace que sea una cadena que aporta a las condiciones de vida, especialmente de los más pobres.

Por otra parte, en vista que los residuos sólidos entre los que están los plásticos a los que pertenece el PET, desde hace alrededor de tres décadas se han explorado alternativas de biodegradación, cuyos estudios a escala laboratorio han demostrado una alta eficiencia de bacterias y hongos para contribuir a la remediación ambiental. En ese sentido, el proceso de revisión sistemática permite comprender que existen microorganismos que mediante tratamientos adecuados reducen el PET a través de la acción metabólica y emanación de ácidos, al punto que este plástico se mineraliza y se degrada de manera más rápida, constituyéndose en una biotecnología que puede aplicarse en el contexto caucano.

En el caso de las bacterias, los mejores resultados son producto de la implementación de consorcios, donde aquellas del género *Pseudomonas sp*, *Bacillus sp*, *Streptomyces sp*, *Ideonella sakaiensis* y otras, arrojaron una mayor eficiencia en la degradación del PET al reducirse en porcentajes superiores al 45% durante periodos que oscilan entre 50 y 120 días.

Por su parte, los hongos que mejores resultados arrojaron son los de los géneros *Aspergillus sp*, *Penicillium sp*, *Pleorotus ostreatus*, *Fusarium sp* y otros que, en la mayoría de los estudios redujeron el peso de las láminas y botellas de PET en porcentajes superiores al 30% en periodos comprendidos entre los 60 y 150 días, dependiendo de los diseños de los estudios.

Aunque en el caso colombiano estas alternativas biológicas de degradación del PET no se han implementado en un alto número de estudios o proyectos, con excepción de dos encontrados a raíz de la revisión sistemática, puede afirmarse que se obtuvieron resultados favorables que permiten confirmar la viabilidad técnica para contribuir a la biorremediación ambiental por medio de bacterias y hongos obtenidas a partir de lixiviados de rellenos sanitarios.

Aunque en principio la biodegradación por medio de microorganismos representa una alternativa de remediación ambiental, de acuerdo con la percepción de los recicladores y empresarios se constituye en una amenaza para la actividad económica que implica el reciclaje, ya que al ser biotecnologías que reducen el PET las asumen como un proceso que afectaría el trabajo y los ingresos de quienes lo recuperan y comercializan.

En vista de tal percepción, se proponen como mecanismos de implementación algunos programas a manera de estrategia, donde la sensibilización, la realización de un proyecto piloto en el Cauca y la formulación de propuestas con base en los resultados obtenidos pueden contribuir a la remediación ambiental teniendo en cuenta la participación de los actores de la cadena de manejo de residuos sólidos, especialmente de plástico y PET.

Recomendaciones

Es necesario que desde las autoridades ambientales y administrativas de los diferentes municipios se realice un proceso de censo y caracterización de los actores de la cadena de manejo de residuos sólidos, pues con ello es posible generar información actualizada acerca de las diferentes actividades que implica la gestión de los diferentes materiales que desechan los hogares, empresas e instituciones para efectos de contar con una línea base con mayor precisión.

De acuerdo con lo anterior, es necesario además la actualización oportuna del PGIRS de Popayán, teniendo en cuenta que no se cuenta con una caracterización de los indicadores de la generación y manejo de residuos sólidos, además de desconocimiento en las transformaciones que haya sufrido la cadena de manejo, tanto en actores como en las actividades relacionadas.

Se recomienda la realización de un proyecto a escala laboratorio para determinar en el contexto caucano y de Popayán, la eficiencia de microorganismos para la biodegradación del PET. Con esto es posible respaldar algunos estudios realizados en otros contextos que dan cuenta de los beneficios ambientales que se derivan del uso de bacterias y hongos para la remediación de la problemática causada por este tipo de plástico.

Por otra parte, en vista que la mayoría de los recicladores encuestados conciben la biodegradación como amenaza a su actividad económica de recuperación y comercialización de residuos de PET, se sugiere diseñar e implementar un programa de sensibilización acerca del uso de los microorganismos como alternativa biotecnológica de remediación ambiental, de tal manera que se logre promover acciones tendientes tratar al menos aquellos tipos de PET que no tienen una comercialización significativa.

Es necesario que desde la academia y en especial a partir de los grupos de investigación en ingeniería ambiental, ecología, industrial y otras que dirijan su accionar a líneas como residuos sólidos, biotecnología, desarrollo sostenible, entre otras, diseñen proyectos de investigación aplicada orientados a impulsar la biodegradación del PET y otros plásticos a través de bacterias, hongos, larvas, algas y otras alternativas biológicas.

Finalmente, se requiere de la articulación efectiva entre el quehacer investigativo de los grupos de investigación con las autoridades ambientales y alcaldías para efectos de diseñar e implementar proyectos de investigación aplicada para reducir la contaminación de residuos sólidos como el plástico, sobre todo de aquellos volúmenes que por sus características y cultura de cada lugar no sean aprovechados, siendo la biodegradación una alternativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Bollaín y D. Vicente, «Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública,» *Revista Española de Salud Pública*, vol. 93, pp. 1-10, 2019.
- [2] MADS, «Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente,» Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 17 mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/>. [Último acceso: 9 noviembre 2022].
- [3] CEPAL - DNP - CEMPRE, Encuesta a municipios sobre gestión de residuos sólidos domiciliarios 2019-Colombia, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021.
- [4] F. Parra y O. Avizaid, La formalización de la población recicladora en Colombia como prestadora del servicio público de reciclaje. Logros, oportunidades, restricciones y amenazas, Manchester, Reino Unido: WIEGO ((Mujeres en Empleo Informal: Globalizando y Organizando), 2021.
- [5] C. Millholand, «Perfiles de polímeros: Una guía de los plásticos más utilizados en el mundo,» ThermoFisher Scientific, 28 julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/materiales/perfiles-de-polimeros-una-guia-de-los-plasticos-mas-utilizados-en-el-mundo/#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%20tanto%20el,siendo%20los%20pl%C3%A1sticos%20m%C3%A1s%20utilizados..> [Último acceso: 22 febrero 2022].

- [6] El Espectador, «En 2020 en el mundo se produjo un poco menos de plástico,» *El Espectador*, p. 4, 11 junio 2021.
- [7] GESAMP, Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment, Exeter: IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP - Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 2015.
- [8] D. Suárez, «Solo 26% de las botellas plásticas se recicla,» *La República*, p. 5, 9 marzo 2016.
- [9] SUI, Publicación información reportada al SUI, para cálculo de la tarifa de aprovechamiento como actividad complementaria del servicio público de aseo, Bogotá: Sistema Unico de Información de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022.
- [10] A. Koelmans, A. Bakir, Burton. y C. Janssen, «Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies,» *Environmental Science & Technology*, vol. 50, nº 7, pp. 3315-3326, 2016.
- [11] S. Chatterjee y S. Sharma, «Microplastics in our oceans and marine health,» *Field Actions Science Reports*, vol. 19, nº Special Issue, pp. 53-64, 2019.
- [12] A. Koelmans, E. Besseling y W. Shim, «Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review,» de *Marine Anthropogenic Litter*, Springer, Cham., 2015, pp. 325-340.
- [13] A. Corti, S. Muniyasamy, M. Vitali, S. Imam y E. Chiellini, «Oxidation and biodegradation of polyethylene films containing pro-oxidant additives: Synergistic effects of sunlight exposure, thermal aging and fungal biodegradation,» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 95, nº 6, pp. 1106-1114, 2010.

- [14] D. Uribe, D. Giraldo, S. Gutiérrez y F. Merino, «Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima,» *Revista Peruana de Biología*, vol. 17, nº 1, pp. 133 - 136, 2010.
- [15] H. Sownya, B. Ramalingappa, G. Nayanashree, B. Thippeswamy y M. Krishnappa, «Polyethylene degradation by fungal consortium,» *International Journal of Environmental Research*, vol. 9, nº 3, pp. 823-830, 2015.
- [16] M. Sangale, M. Shahnawaz y A. Ade, «Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene,» *Scientific Reports*, vol. 9, nº 5390, pp. 1-11, 2019.
- [17] V. Gonzales, «Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno,» *Revista de Investigaciones de la Escuela de Posgrado*, vol. 9, nº 3, pp. 1792-1804, 2020.
- [18] G. DSouza, R. Sheriff, V. Ullanat, A. Shrikrishna, A. Joshi, L. Hiremath y K. Entoori, «Fungal biodegradation of low-density polyethylene using consortium of *Aspergillus* species under controlled conditions,» *Heliyon*, vol. 7, nº 5, pp. 1-7, 2021.
- [19] K. Veethahavya, B. Rajath, S. Noobia y B. Kumar, «Biodegradation of Low Density Polyethylene in Aqueous Media,» *Procedia Environmental Sciences*, vol. 35, pp. 709-713, 2016.
- [20] S. Jamil, S. Zada, I. Khan, W. Sajjad, M. Rafiq, A. Shah y F. Hasan, «biodegradation of polyethylene by bacterial strains isolated from Kashmir Cave, Buner, Pakistán,» *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 79, nº 1, p. 73-80, 2017.
- [21] H. Auta, A. Abioye, S. Aransiola, J. Bala, I. Chukwuemeka, A. Hassan, A. Aziz y S. Fauziah, «Enhanced microbial degradation of PET and PS

- microplastics under natural conditions in mangrove environment,» *Journal of Environmental Management*, vol. 304, pp. 1-12, 2022.
- [22] S. Mohammadi, G. Moussavi y M. Rezaei, «Enhanced peroxidase-mediated biodegradation of polyethylene using the,» *Polymer*, vol. 240, nº 1, pp. 1-9, 2022.
- [23] P. Bombelli, C. Howe y F. Bertocchini, «Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*,» *Current Biology*, vol. 27, nº 8, pp. 292-293, 2017.
- [24] A. Peydaei, H. Bagheri, L. Gurevich, N. de Jonge y J. Nielsen, «Impact of polyethylene on salivary glands proteome in *Galleria melonella*,» *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, nº 34, pp. 1-8, 2020.
- [25] P. Zhu, X. Pan, X. Li, X. Liu, Q. Lui, J. Zhou, X. Dai y G. Qian, «Biodegradation of plastics from waste electrical and electronic equipment by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella*),» *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, 2021.
- [26] ONU, «Objetivos de desarrollo del Milenio. Informe 2015,» septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-odsinformedoc-2015.pdf>.
- [27] J. Garzón, J. Rodríguez y C. Hernández, «Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible,» *Revista Universidad y Salud*, vol. 19, nº 2, pp. 309-318, 2017.
- [28] M. Chappuis, Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú. Serie Medio Ambiente y Desarrollo, Santiago, Chile: CEPAL, 2019.

- [29] M. Neira, L. Giler y J. Quevedo, «Maquina bio-recicladora de plástico pet: un emprendimiento viable. Caso Azogues – Ecuador,» *Telos*, vol. 22, nº 2, pp. 395-409, 2020.
- [30] M. Valderrama, L. Chavarro, J. Osorio y C. Peña, «Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca,» *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 15, nº 1, pp. 67-74, 2018.
- [31] H. Zhang y Z. Wen, «The consumption and recycling collection system of PET bottles: a case study of Beijing, China.,» *Waste Management*, vol. 34, nº 6, pp. 987-998, 2015.
- [32] N. Acuña, L. Figueroa y M. Wilches, «Influencia de los Sistemas de Gestión Ambiental ISO 14001 en las organizaciones: caso estudio empresas manufactureras de Barranquilla,» *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 25, nº 1, pp. 143-153, 2017.
- [33] Colombia, Constitución Política de Colombia. Capítulo III: Artículos 78, 79, 80, 81, 82., Bogotá: LEGIS, 1991.
- [34] Colombia, Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el MADS, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones, Bogotá: Departamento Administrativo de la Función Pública, 1993.
- [35] Colombia, Decreto 1713 de 2002. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la GIRS, Bogotá: Presidencia de la República, 2002.
- [36] MADS, Resolución 1045 del 26 de septiembre de 2003. Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de

Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones, Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2003.

- [37] MADS, Resolución 0477 de abril 29 de 2004. Por la cual se modifica la Resolución 1045 de 2003, en cuanto a los plazos para iniciar la ejecución de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones, Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2004.
- [38] MADS, Resolución 754 de 2014. Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos., Bogotá: Ministerio de Ambientes y Desarrollo Sostenible, 2014.
- [39] Colombia, Decreto 596 de 2016. Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 sobre el esquema de actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio y otras disposiciones, Bogotá: Presidencia de la República, 2016.
- [40] Asamblea Departamental del Cauca, Por la cual se adopta el Plan de Desarrollo Departamental del Cauca para el periodo 2020-2023 "42 motivos para avanzar", Popayán: Asamblea Departamental del Cauca, 2020.
- [41] MADS, Principales normas ambientales para el diseño del Registro Único Ambiental – RUA –, Bogotá: Ministerios del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020.
- [42] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la investigación, 5ta edición ed., México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A., 2014.
- [43] N. Esteban, Tipos de investigación, Lima: Universidad Santo Domingo de Guzmán, 2015.

- [44] G. Martínez y I. Pérez, «Las técnicas cuantitativas y su utilidad en el diagnóstico del servicio de asistencia técnica,» *Ingeniería Industrial*, vol. 31, nº 2, pp. 1-8, 2010.
- [45] J. Meneses y D. Rodríguez, *El cuestionario y la entrevista*, Barcelona: Universidad Abierta de Cataluña, 2016.
- [46] J. Casas, J. Repullo y J. Donado, «La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos (I),» *Revista de Atención Primaria*, vol. 31, nº 8, pp. 527-538, 2013.
- [47] A. Matas, «Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión,» *REDIE: Revista Electrónica de Investigación Educativa*, vol. 20, nº 1, pp. 38-47, 2018.
- [48] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba y M. Mattsson, «Systematic Mapping Studies in Software Engineering,» de *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*., Karlskrona, Sweden, 2008.
- [49] CRC, *Plan de Gestión Ambiental Regional del Cauca 2013 - 2023*, Popayán, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2013.
- [50] SUI, Información reportada al SUI, para cálculo de la tarifa de aprovechamiento como actividad complementaria del servicio público de aseo. Toneladas aprovechadas a junio de 2022, Bogotá: Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022.
- [51] S. Montes, «Seis países alrededor del mundo reciclan más de 50% de su basura durante el año,» *La República*, p. 5, 10 enero 2019.
- [52] Banco Mundial, *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*, Washington: Banco Mundial, 2018.

- [53] Y. Riascos, Manejo de residuos sólidos en el municipio de López del Micay Departamento del Cauca, Cali: Universidad del Valle, 2014.
- [54] L. Guerrero, Diagnóstico del manejo de residuos sólidos desde el área de recolección hasta la disposición final en los municipios de Sotará y Suárez en el Departamento del Cauca, Popayán, Colombia: Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, 2017.
- [55] S. Ordoñez y J. Arteaga, Estudio prospectivo para el manejo y aprovechamiento de basuras en la ciudad de Popayan, Cauca al año 2020., Popayán, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2010.
- [56] D. León, Formulación de un plan de manejo de residuos sólidos en dos de las principales plazas de mercado (plaza de mercado barrio bolívar y la plaza de mercado barrio la esmeralda), de la ciudad de Popayán Cauca, Popayán, Colombia: Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, 2018.
- [57] C. Viáfara, El manejo de residuos sólidos orgánicos en la galería del municipio de Puerto Tejada Cauca, Colombia, Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021.
- [58] Alcaldía de Popayán, Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos - PGIRS, Popayán, Colombia: Alcaldía Municipal de Popayán, 2015.
- [59] CONPES, Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2016.
- [60] MAAT, Política nacional para la gestión integral de residuos solidos – CONPES 3874, Bogotá: MAAT Soluciones, 2018.
- [61] Alcaldía Municipal de Argelia, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2027, Argelia, Cauca, Colombia: Alcaldía Municipal de Argelia, Cauca, 2016.

- [62] Alcaldía Municipal de Guachené, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2015 - 2027, Guachené, Cauca, Colombia: Alcaldía Municipal de Guachené, 2105.
- [63] Alcaldía Municipal de Caloto, Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016 - 2027, Caloto, Cauca, Colombia: Alcaldía Municipal de Caloto, 2016.
- [64] Ministerio de Vivienda, Esquema operativo de la actividad de aprovechamiento y régimen de formalización para recicladores de oficio, Bogotá: Ministerio de Vivienda, 2020.
- [65] Concejo Municipal de Popayán, Por medio del cual se crea el Fondo de Reciclaje, se reglamenta su administración y destinación y se crea el registro oficial de personas naturales y jurídicas dedicadas a labores de recuperación de residuos sólidos y reciclaje del Municipio de Popayán, Popayán: Concejo Municipal de Popayán, 2012.
- [66] Alcaldía Municipal de Popayán, Popayán conmemoró el día del reciclador entregando tres camiones a asociaciones de reciclaje, Popayán: Alcaldía Municipal de Popayán, 2023.
- [67] L. Güiza, C. Rodríguez, B. Ríos y S. Moreno, «Género y empoderamiento comunitario en un contexto de posconflicto: el caso de Vergara, Cundinamarca (Colombia),» *Revista Estudios Socio-Jurídicos*, vol. 18, nº 2, pp. 115-144, 2016.
- [68] A. Ogando, S. Roever y M. Rogan, «Gender and informal livelihoods: Coping strategies and perceptions of waste pickers in Sub-Saharan Africa and Latin America,» *International Journal of Sociology and Social Policy*, vol. 37, nº 7-8, pp. 435-451, 2017.
- [69] K. Velandia, ¿Se consideran pobres los recicladores de oficio? Una mirada subjetiva. Estudio de caso para la organización de recicladores GER8 en la

ciudad de Bogotá, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2017.

- [70] J. Morales y L. Morales, «Colombia y la situación de los desplazados y refugiados: consideraciones teórico jurídicas,» *Aldea Mundo*, vol. 21, n° 42, pp. 19-32, 2016.
- [71] I. Ramos, «Desplazamiento forzado y adaptación al contexto de destino: el caso de Barranquilla,» *Perfiles latinoamericanos*, n° 51, pp. 1-23, 2018.
- [72] ACNUR, «Unidos, recicladores venezolanos y colombianos en la Costa Caribe de Colombia generan ingresos mientras conservan el medio ambiente,» Agencia de la ONU para los Refugiados, 18 agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.acnur.org/noticias/historia/2022/8/62fd5b6d4/unidos-recicladores-venezolanos-y-colombianos-en-la-costa-caribe-de-colombia.html>. [Último acceso: 18 octubre 2022].
- [73] C. Cross, «Experiencias de trabajo asociativo de reciclado en el Gran Buenos Aires (2004-2014),» *Athenea Digital. Revista de Pensamiento e Investigación Social*, vol. 16, n° 2, pp. 195-214, 2016.
- [74] Observatorio Ambiental de Bogotá, ¿Cuántos recicladores de oficio hay en Bogotá?, Bogotá: Observatorio Ambiental de Bogotá, 2022.
- [75] La Nota Económica, Más de 14 mil empleos podrían generarse en Colombia para 2030 en labores de reciclaje: OIT, Bogotá: La Nota Económica, 2022.
- [76] D. Rodríguez, «Colombia genera 12 millones de toneladas de basura al año,» *Portafolio*, p. 6, 17 mayo 2022.
- [77] Federeción Colombiana de Municipios, «Más de 300 recicladores de Popayán – Cauca beneficiados con elementos de protección personal,» Federeción Colombiana de Municipios, 25 julio 2022. [En línea]. Available: [https://www.fcm.org.co/mas-de-300-recicladores-de-popayan-cauca-](https://www.fcm.org.co/mas-de-300-recicladores-de-popayan-cauca)

beneficiados-con-elementos-de-proteccion-personal/. [Último acceso: 16 octubre 2022].

- [78] C. Roberts, S. Edwards, M. Vague, R. León, H. Scheffer, G. Chan, N. Swartz y J. Mellies, «Environmental Consortium Containing Pseudomonas and Bacillus Species Synergistically Degrades Polyethylene Terephthalate Plastic,» *mSphere*, vol. 5, nº 6, pp. 1151-1220, 2020.
- [79] S. Skariyachan, A. Shamsundar, S. Yashwant, A. Amaresh, M. Usharani y K. Vasist, «Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions,» *Environ Sci Pollut Res Int.*, vol. 24, nº 9, pp. 8443-8457, 2017.
- [80] X. Qi, Y. Ma, H. Chang, B. Li, M. Ding y Y. Yuan, «Evaluation of PET Degradation Using Artificial Microbial Consortia,» *Fontiers in Microbiology*, vol. 12, pp. 1-12, 2021.
- [81] I. Taniguchi, S. Yoshida, K. Hiraga, K. Miyamoto, Y. Kimura y K. Oda, «Biodegradation of PET: Current Status and Application Aspects,» *ACS Catal*, vol. 9, nº 5, p. 4089–4105, 2019.
- [82] B. Johnston, B. Adamus, A. Itohowo, M. Kowalczyk, F. Tchuenbou y I. Radecka, «Bioconversion of Plastic Waste Based on Mass Full Carbon Backbone Polymeric Materials to Value-Added Polyhydroxyalkanoates (PHAs),» *Bioengineering (Basel)*, vol. 9, nº 432, pp. 1-14, 2022.
- [83] A. Farzi, A. Dehnad y A. Fotouhi, «Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using Streptomyces species and kinetic modeling of the process,» *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, vol. 17, nº 4, pp. 25-31, 2019.

- [84] E. Syranidou, K. Karkaronachaki, F. Amorotti y A. Avgeropoulos, «Biodegradation of mixture of plastic films by tailored marine consortia,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 375, pp. 33-42, 2019.
- [85] K. Hiraga, I. Taniguchi, S. Yoshida, Y. Kimura y K. Oda, «Biodegradation of waste PET,» *EMBO Reports*, vol. 21, nº 2, pp. 1-5, 2019.
- [86] M. Nag, D. Lahiri, B. Dutta, G. Jadav y R. Rani, «Biodegradation of used polyethylene bags by a new marine strain of *Alcaligenes faecalis* LNDR-1,» *Environ Sci Pollut Res Int*, vol. 28, nº 30, pp. 41365-41379, 2021.
- [87] N. Zhang, M. Ding y Y. Yuan, «Current Advances in Biodegradation of Polyolefins,» *Microorganisms*, vol. 10, pp. 1-16, 2022.
- [88] M. Al-Jailawi, R. Ameen y A. Al-Saraf, «Polyethylene degradation by *Pseudomonas putida* S3A,» *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, vol. 2, nº 1, pp. 90-97, 2015.
- [89] S. Yoshida, K. Hiraga, I. Taniguchi y K. Oda, «*Ideonella sakaiensis*, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization,» *Methods in Enzymology*, vol. 648, pp. 187-205, 2021.
- [90] Q. Chen, J. Li, M. Liu, H. Sun y M. Bao, «Study on the biodegradation of crude oil by free and immobilized bacterial consortium in marine environment,» *PLoS ONE*, vol. 12, nº 3, pp. 1-23, 2017.
- [91] S. Skariyachan, N. Taskeen, A. Preethi, B. Venkata y G. Naidu, «Novel consortia of enterobacter and pseudomonas formulated from cow dung exhibited enhanced biodegradation of polyethylene and polypropylene,» *Journal of Environmental Management*, vol. 284, pp. 1-23, 2021.
- [92] F. Yan, R. Wei, Q. Cui, U. Bornscheuer y Y. Liu, «Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*,» *Microbial Biotechnology*, vol. 14, nº 2, pp. 374-385, 2020.

- [93] D. Pathak y D. Ollis, «Dienelactone hydrolase family protein [Thermobifida fusca],» *Journal Molecular Biology*, vol. 214, nº 2, pp. 497-525, 2010.
- [94] S. Selim, J. Negrel, C. Govaerts, S. Gianinazzi y D. Tuinen, «Isolation and Partial Characterization of Antagonistic Peptides Produced by Paenibacillus sp. Strain B2 Isolated from the Sorghum Mycorrhizosphere,» *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 71, nº 11, p. 6501–6507., 2011.
- [95] M. Šime, M. Tomislav y D. a Kucic, «Optimization of Polystyrene Biodegradation by Bacillus cereus and Pseudomonas alcaligenes Using Full Factorial Design,» *Polymers*, vol. 14, nº 4299, pp. 1-18, 2022.
- [96] O. Brandenberg, O. Schubert y L. Kruglyak, «Towards synthetic PETtrophy: Engineering Pseudomonas putida for concurrent polyethylene terephthalate (PET) monomer metabolism and PET hydrolase expression,» *Microbial Cell Factories*, vol. 21, nº 1, pp. 1-18, 2022.
- [97] H. Sagong, S. Kim, D. Lee, H. Hong, S. Lee y H. Seo, «Caracterización estructural y funcional de un dominio auxiliar que contieneMASCOTAhidrolasa de Burkholderiales bacteria,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 429, pp. 1-23, 2022.
- [98] R. Gao, H. Pan, L. Kai, K. Han y J. Lian, «Microbial degradation and valorization of poly(ethylene terephthalate) (PET) monomers,» *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 38, nº 5, pp. 1-22, 2022.
- [99] M. Kamli, N. Alzahrani, N. Hajrah, J. Sabir y A. Malik, «Genome-Driven Discovery of Enzymes with Industrial Implications from the Genus Aneurinibacillus,» *Microorganisms*, vol. 9, nº 3, pp. 499-517, 2021.
- [100] K. Janczak, K. Hryniewicz, Z. Znajewska y G. Dąbrowska, «Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil,» *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 130, pp. 65-75, 2018.

- [101] D. Danso, C. Schmeisser, J. Chow, T. Hazen y W. Streit, «New insights into the function and global distribution of polyethylene terephthalate (PET)-degrading bacteria and enzymes in marine and terrestrial metagenomes,» *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, nº 8, pp. 53-77, 2018.
- [102] C. Kang, S. Kim, S. Kim y J. Lee, «The significant influence of bacterial reaction on physico-chemical property changes of biodegradable natural and synthetic polymers using escherichia coli,» *Polymers*, vol. 9, nº 4, pp. 121-142, 2017.
- [103] R. Wei, T. Oeser y W. Zimmermann, «Synthetic polyester-hydrolyzing enzymes from thermophilic actinomycetes,» *Advances in Applied Microbiology*, vol. 89, nº 1, pp. 267-305, 2014.
- [104] N. Swissa, Y. Nitzan, Y. Anker y R. Cahan, «Biofilter based on a biofilm immobilized on geo-textile sheets for rapid atrazine biodegradation,» *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 105, pp. 146-152, 2015.
- [105] G. Dąbrowska, W. Tylman, A. Mierek, A. Richert y K. Hryniewicz, «Potential of *Serratia plymuthica* IV-11-34 strain for biodegradation of polylactide and poly(ethylene terephthalate),» *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 193, pp. 145-153, 2021.
- [106] Y. González, J. Meza, O. Gonzpalez y J. Córdova, «Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano,» *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 29, nº 1, pp. 77-115, 2013.
- [107] V. Gambarini, O. Pantos, J. Kingsbury, L. Weaver, K. Handley y G. Lear, «PlasticDB: a database of microorganisms and proteins linked to plastic biodegradation,» *Database*, vol. 22, pp. 1-12, 2022.

- [108] A. Ramírez, L. Navarro y J. Conde, «Degradación química del poli(etileno tereftalato),» *Revista Colombiana de Química*, vol. 39, nº 3, pp. 321-331, 2010.
- [109] P. Moreno, Estudio de la biodegradabilidad y compostabilidad de los diferentes plásticos, Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena, 2020.
- [110] S. Yoshida, K. Hiraga, T. Takehana, I. Taniguchi, H. Yamaji, Y. Maeda, K. Toyohara, K. Miyamoto y Y. Kimura, «A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate),» *Science*, vol. 351, nº 6278, pp. 1196-1199, 2016.
- [111] P. Torena, M. Álvarez y M. Reza, «Biodegradation of polyethylene terephthalate microplastics by bacterial communities from activated sludge,» *The Canadian Journal Chemical Engineering*, vol. 99, pp. 69-82, 2021.
- [112] H. Webb, Biodegradation of poly(ethylene terephthalate) by marine bacteria, and strategies for its enhancement, Melbourne: Swinburne University of Technology, 2012.
- [113] E. Ivanova, V. Truong, H. Webb, V. Baulin, J. Wang, N. Mohammadi, F. Wang, C. Fluke y R. Crawford, «Differential attraction and repulsion of *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* on molecularly smooth titanium films.,» *Scientific Reports*, vol. 1, pp. 165-172, 2011.
- [114] L. Aer, Q. Jiang, I. Gul, Z. Qi, J. Feng y L. Tang, «Overexpression and kinetic analysis of *Ideonella sakaiensis* PETase for polyethylene terephthalate (PET) degradation,» *Environmental Research*, vol. 212, pp. 1-21, 2022.
- [115] Q. Huang, Y. F., X. Chen, Y. Du y J. Li, «Accelerated biodegradation of polyethylene terephthalate by *Thermobifida fusca* cutinase mediated by *Stenotrophomonas pavanii*,» *Science of The Total Environment*, vol. 808, pp. 1-7, 2022.

- [116] Y. Zhang, J. Nedergaard, B. Engin y Z. Gou, «Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery,» *Biotechnology Advances*, vol. 60, pp. 1-18, 2022.
- [117] B. Maheswaran, M. Al-Ansari, L. Al-Humaid, J. Sebastin, W. Kim, N. Karmegam y K. Mohamed, «In vivo degradation of polyethylene terephthalate using microbial isolates from plastic polluted environment,» *Chemosphere*, vol. 310, pp. 1-23, 2022.
- [118] N. Taghavi, N. Singhal, W. Zhuang y S. Baroutian, «Degradation of plastic waste using stimulated and naturally occurring microbial strains,» *Chemosphere*, vol. 263, pp. 1-17, 2021.
- [119] R. Vinay, M. Uzma, M. Govindappa, R. Vassantha y S. Lokesh, «Screening and identification of polyurethane (PU) and low density polyethylene (LDPE) degrading soil fungi isolated from municipal solid waste,» *International Journal of Current Research*, vol. 8, n° 7, pp. 34753-34761, 2016.
- [120] S. Wadood, F. Tuz y A. Moniruzzaman, «Biodegradation of Polyethylene Terephthalate (PET or PETE) and high density Polyethylene (HDPE) using microbes isolated from waste dumping sites in Chittagong, Bangladesh,» *International Journal Advanced Sciences Technology Engineering*, vol. 6, n° 3, pp. 57-61, 2018.
- [121] C. Odigbo, C. Adenipekun, I. Oladosu y A. Ogunjobi, «Polyethylene Terephthalate (PET) Biodegradation by *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius*,» *Research Square*, pp. 1-15, 2022.
- [122] X. Qi, W. Yan, Z. Cao, M. Ding y Y. Yuan, «Current Advances in the Biodegradation and Bioconversion of Polyethylene Terephthalate,» *Microorganisms*, vol. 10, n° 1, pp. 39-48, 2021.

- [123] B. Nowak, J. Pająk, B. Labuzek, G. Rymarz y E. Talik, «Biodegradation of poly(ethylene terephthalate) modified with polyester "Bionolle®" by *Penicillium funiculosum*,» *Polimery/Polymers*, vol. 56, pp. 35-44, 2011.
- [124] W. Zimmermann, «Degradation of Plastics by Fungi,» *Encyclopedia of Mycology*, vol. 2, pp. 650-661, 2021.
- [125] J. Rodrigues, S. Albino, K. Veloso, I. Rodrigues y M. Magumi, «Degradation of Green Polyethylene by *Pleurotus ostreatus*,» *PLoS One*, vol. 10, n° 6, pp. 1-12, 2015.
- [126] S. Awasthi, N. Srivastava, T. Singh, D. Tiwary y K. Kumar, «Biodegradation of thermally treated low density polyethylene by fungus *Rhizopus oryzae* NS 5,» *3 Biotech*, vol. 7, n° 1, pp. 73-89, 2017.
- [127] V. Mahalakshmi y S. Andrew, «Assessment of Physicochemically treated plastic by fungi,» *Annals of Biological Research*, vol. 3, n° 9, pp. 4374-4381, 2012.
- [128] A. Esmaeili, A. Pourbabaee, A. Alikhani, F. Shabani y E. Esmaeili, «Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil,» *PLoS One*, vol. 8, n° 9, pp. 717-720, 2013.
- [129] S. Raut, S. Raut, M. Sharma, C. Srivastav, B. Adhikari y S. Sen, «Enhancing degradation of low density polyethylene films by *Curvularia lunata* SG1 using particle swarm optimization strategy.,» *Indian journal of microbiology*, vol. 55, n° 3, pp. 258-268, 2015.
- [130] C. Muhonja, H. Makonde, G. Magoma y M. Imbuga, «Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya,» *Plos ONE*, vol. 13, n° 7, pp. 1-17, 2018.

- [131] A. Gajendiran, S. Krishnamoorthy y J. Abraham, «Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil,» *3 Biotech*, vol. 6, nº 52, pp. 1-17, 2016.
- [132] A. Zahra, S. Abbas, M. Mahsa y N. Mohsen, «Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by isolated fungi in solid waste medium,» *Waste Management*, vol. 30, nº 3, pp. 396-401, 2010.
- [133] P. Merina y K. Santosh, «Microbial Deterioration of Low Density Polyethylene by *Aspergillus* and *Fusarium* sp.,» *International Journal of ChemTech Research*, vol. 6, nº 1, pp. 299-305, 2014.
- [134] N. Raaman, N. Rajitha, A. Jayshree y R. Jegadeesh, «Biodegradation of plastic by *Aspergillus* spp. isolated from polythene polluted sites around Chennai,» *Journal Academic Industrial Research*, vol. 1, nº 6, pp. 313-316, 2012.
- [135] F. Alshehrei, «Biodegradation of Low Density Polyethylene by Fungi Isolated from Red Sea Water,» *International Journal Currency Microbiology Applied Science*, vol. 6, nº 8, pp. 1703-1709, 2017.
- [136] H. Sowmya, M. Ramalingappa y M. Krishnappa, «Degradation of polyethylene by *Chaetomium* sp. and *Aspergillus flavus*,» *International Journal Recent Science Research*, vol. 3, nº 153, pp. 517-538, 2012.
- [137] H. El-Shafei, N. El-Nasser, A. Kansoh y A. Ali, «Biodegradation of disposable polyethylene by fungi and *Streptomyces* species,» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 62, nº 2, pp. 361-365, 2018.
- [138] N. Verma y S. Gupta, «Management of polythene waste through biodegradation by using few species of *Aspergillus*: an environment friendly approach,» de *roceedings of the 3rd International Conference of Biotechnology and Biological Sciences (BIOSPECTRUM 2019)*, Kolkata, India, 2019.

- [139] N. Ojha, N. Pradhan, S. Singh, A. Barla, A. Shrivastava, P. Khatua, V. Rai y S. Bose, «Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization,» *Scientific Reports volume*, vol. 7, pp. 1-13, 2017.
- [140] R. Pramila y K. Vijaya, «Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by fungi isolated from marine water– a SEM analysis,» *African Journal of Microbiology Research*, vol. 5, nº 28, pp. 5013-5018, 2011.
- [141] S. Sheik, K. Chandrashekar, K. Swaroop y H. Somashekarappa, «Biodegradation of gamma irradiated low density polyethylene and polypropylene by endophytic fungi,» *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 105, pp. 21-29, 2015.
- [142] G. Mathur, A. Mathur y R. Prasad, «Colonization and Degradation of Thermally Oxidized High-Density Polyethylene by *Aspergillus niger* (ITCC No. 6052) Isolated from Plastic Waste Dumpsite,» *Bioremediation Journal*, vol. 15, nº 2, pp. 69-76, 2011.
- [143] R. Gao, R. Liu y C. Sun, «A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 431, pp. 1-11, 2022.
- [144] M. Temporiti, L. Nicola, E. Nielsen y S. Tosi, «Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation,» *Microorganisms*, vol. 10, nº 1180, pp. 1-27, 2022.
- [145] L. Malafatti, M. de Barros, A. Machado, E. Valoni, V. de Olivera, A. Marsaioli, D. de Franceschi y D. Attili, «Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate) (PET) depolymerization,» *Brazilian Journal Microbiology*, vol. 50, nº 3, pp. 633-648, 2019.
- [146] D. Moyses, D. Teixeira, V. Waldow, D. Freire y A. Castro, «Fungal and enzymatic bio-depolymerization of waste post-consumer poly(ethylene

- terephthalate) (PET) bottles using *Penicillium* species,» *3 Biotech*, vol. 11, n° 10, pp. 435 - 456, 2021.
- [147] A. Castro y C. Avendaño, Determinación del pretratamiento más efectivo sobre el polietileno tereftalato para el aumento en la eficiencia del proceso de degradación realizado por hongos y bacterias autóctonas de lixiviado de relleno sanitario, Socorro, Colombia: Universidad Libre, 2020.
- [148] D. Rodríguez y V. Velandia, Degradación de pitillos plásticos convencionales previamente tratados con luz ultravioleta en un sistema de microcosmos inoculado con *Phanerochaete* sp. CMPUJH123., Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2021.
- [149] SCIMAT, «*Aneurinibacillus Migulanus* Sem,» Fine Art America - Buy Art Online, 2020. [En línea]. Available: <https://fineartamerica.com/featured/aneurinibacillus-migulanus-sem-scimat.html>.
- [150] C. Lo, S. Sankar y B. Fall, «High-quality genome sequence and description of *Paenibacillus dakarensis* sp. nov.,» *New Microbes and New Infections*, vol. 10, p. 132–141, 2016.
- [151] A. Wen, M. Fegan, C. Hayward, S. Chakraborty y L. Sly, «Phylogenetic relationships among members of the Comamonadaceae, and description of *Delftia acidovorans*,» *International Journal of Systematic Bacteriology*, vol. 49, pp. 567-576, 2001.
- [152] L. Yulong, L. Haiyang, H. Xue, H. Gang, X. Jiao, L. Yutao y Z. Yanjiang, «Biofertilizante basado en actinobacterias mejora el rendimiento de diferentes plantas y altera los procesos de ensamblaje de las comunidades microbianas de la rizosfera,» *Applied Soil Ecology*, vol. 171, pp. 324-345, 2022.

- [153] CODEINEP, «Pseudomonas sp,» CODEINEP, 2004. [En línea]. Available: <https://codeinep.org/wp-content/uploads/2017/02/PSEUDOMONAS-AERUGINOSA.pdf>.
- [154] M. Realpe, C. Hernández y C. Agudelo, «Especies del género Bacillus: morfología macroscópica y microscópica,» *Instituto Nacional de Salud*, pp. 1-4, 2002.
- [155] D. Scharf, «Streptomyces sp,» Science Photo Library's, 2019. [En línea]. Available: <https://www.sciencephoto.com/keyword/streptomyces-sp>.
- [156] ANIR, «Bacteria Ideonella sakaiensis,» Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje A.G., 2020. [En línea]. Available: <https://anir.cl/descubren-una-bacteria-que-se-come-el-plastico/>.
- [157] M. Klich, Identification of common Aspergillus species., Utrecht, The Netherlands: Centraalbureau voor Schimmelcultures., 2002.
- [158] INSPQ, Penicillium spp., Quebec: Institut National de Santé Publique du Québec, 2020.
- [159] IRESIDUO, «Un hongo comestible podría biodegradar las colillas de cigarro,» Iresiduo, 2019. [En línea]. Available: <https://iresiduo.com/noticias/colombia/dicyt/19/04/30/hongo-comestible-podria-biodegradar-colillas-cigarro>.
- [160] IDEAM, Autoridades ambientales en Colombia, Bogotá: Instituto Nacional de Estudios Ambientales, 2020.
- [161] DANE, Censo Nacional de Población y Vivienda, Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2019.
- [162] Portafolio, Guía de empresas colombianas, Bogotá: Casa Editorial El Tiempo, 2020.

- [163] Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, «Grupos de Investigación,» Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, 2022. [En línea]. Available: <https://www.uniautonoma.edu.co/investigacion/grupos>. [Último acceso: noviembre9 2022].
- [164] Universida del Cauca, «Grupos de Investigación Vicerrectoría de Investigaciones,» Universida del Cauca, 2022. [En línea]. Available: <https://www.unicauca.edu.co/sisvri/faces/paginavri/categorizaciongrupos.xhtml>. [Último acceso: 9 noviembre 2022].
- [165] Corporación Universitaria Comfacauca, «Grupos de investigación,» Corporación Universitaria Comfacauca, 2022. [En línea]. Available: <https://www.unicomfacauca.edu.co/investigacion/grupos-investigacion/>. [Último acceso: 9 noviembre 2022].

ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuesta para personas recicladoras de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA	
	
FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA	
ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS	
Estimado (a) reciclador (a)	
<p>Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado “Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental”.</p> <p>Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se ciñe a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.</p>	
Características socio-demográficas	
1. En cuanto a género, Usted se define como:	Mujer <input type="checkbox"/> Hombre <input type="checkbox"/>
2. Su edad actual es:	<input type="text"/> años
3. El estrato al cual Usted pertenece es	Sin estratificar <input type="checkbox"/> Uno <input type="checkbox"/> Dos <input type="checkbox"/> Tres <input type="checkbox"/> Cuatro <input type="checkbox"/> Cinco <input type="checkbox"/> Seis <input type="checkbox"/>
4. El lugar de donde usted proviene es:	<input type="text"/>
5. El tiempo que Usted lleva dedicado a la actividad del reciclaje es:	<input type="text"/> años
6. El máximo nivel educativo que Usted tiene es:	Primaria sin terminar <input type="checkbox"/> Primaria <input type="checkbox"/> Bachillerato sin terminar <input type="checkbox"/> Bachillerato <input type="checkbox"/> Técnico <input type="checkbox"/> Tecnólogo <input type="checkbox"/> Universitario <input type="checkbox"/> Posgrado <input type="checkbox"/>

En el caso de la biodegradación, de qué tipo de organismos ha escuchado que se usen para reducir el PET	Bacterias <input type="checkbox"/> Hongos <input type="checkbox"/> Larvas <input type="checkbox"/> Algas <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/>
Según Usted, en una escala de 1 a 5, donde 1 significa un nivel de compromiso nulo y 5 el máximo nivel de compromiso, ¿cómo califica su compromiso con la reducción de la contaminación por PET?	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/>
Teniendo en cuenta su nivel de compromiso y en vista que existen microorganismos que degradan el PET, estaría Usted dispuesto a participar de procesos de biodegradación de este material utilizando bacterias, hongos, larvas u otras?	Definitivamente si <input type="checkbox"/> Posiblemente <input type="checkbox"/> Definitivamente no <input type="checkbox"/>
¿Cuáles podrían ser las razones para no participar de tal proceso?	_____ _____ _____ _____
De acuerdo con sus criterios, ¿estaría Usted en disposición de participar de talleres sobre biodegradación del PET con bacterias, hongos, larvas u otras formas?	Si <input type="checkbox"/> Ns/Nr <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
<i>¡Muchas gracias por su participación!</i>	
Fecha de diligenciamiento:	
Encuestador:	

Anexo 2. Formato de encuesta para organizaciones dedicadas a la actividad de reciclaje de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA	
 <p style="text-align: center;">Uniautónoma DEL CAUCA</p>	
<p style="text-align: center;">FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA</p>	
ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS	
<p>Estimado (a) empresario (a) reciclador (a)</p> <p>Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado “Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental”.</p> <p>Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se ciñe a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.</p>	
<p>1. La organización dedicada a la actividad de reciclaje que Usted representa, está constituida bajo la forma de:</p>	<p>Cooperativa <input type="checkbox"/></p> <p>Fundación <input type="checkbox"/></p> <p>Sociedad Ltda <input type="checkbox"/></p> <p>Corporación <input type="checkbox"/></p> <p>S.A.S. <input type="checkbox"/></p> <p>Otra ¿Cuál? _____ <input type="checkbox"/></p>
<p>2. Según la respuesta anterior, actualmente el número de asociados, socios fundadores o accionistas que conforman la organización es:</p>	<p><input type="text"/> personas</p>
<p>3. ¿Cuántos años tiene de constituida la organización?</p>	<p><input type="text"/> años</p>
<p>4. Quienes desarrollan la actividad de reciclaje en la organización están representados en:</p>	<p>Los mismos socios <input type="checkbox"/></p> <p>Los socios y otros empleados <input type="checkbox"/></p> <p>Solo empleados <input type="checkbox"/></p> <p>Otros ¿Cuáles? _____ <input type="checkbox"/></p>
<p>5. En promedio, ¿cuantas personas realizan la actividad de reciclaje?</p>	<p><input type="text"/> personas</p>

6. Digite los municipios en donde la organización lleva a cabo la actividad de reciclaje:	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
7. De los siguientes materiales, ¿cuáles recicla su organización?	Papel <input type="checkbox"/> Plástico <input type="checkbox"/> Vidrio <input type="checkbox"/> Aluminio <input type="checkbox"/> Hierro <input type="checkbox"/> Otro. ¿Cuál? _____ <input type="checkbox"/>
8. De acuerdo con Usted, ¿en kilogramos, cuál es la cantidad aproximada semanal que la organización recicla según cada material?	
Papel Plástico Vidrio Aluminio Hierro Otro.	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
9. La actividad de reciclaje que realiza actualmente la organización, consiste en:	Recolección y venta <input type="checkbox"/> Transformación <input type="checkbox"/> Ambas <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____ <input type="checkbox"/>
10. De acuerdo con las respuestas anteriores, los materiales de recolección y venta, a dónde los destina la organización.	Venta a empresas locales <input type="checkbox"/> Venta a empresas extranjeras <input type="checkbox"/> Venta a empresas nacionales <input type="checkbox"/> Otra. ¿Cuál? _____ <input type="checkbox"/>
11. En caso que la organización realice actividades de transformación, ¿qué otros materiales genera a partir del reciclaje?	Maderas plásticas <input type="checkbox"/> Lozas plásticas <input type="checkbox"/> Postes plásticos <input type="checkbox"/> Fundición de metales <input type="checkbox"/> Forja de metales <input type="checkbox"/> Otros. ¿Cuáles? _____ <input type="checkbox"/>
12. ¿Los trabajadores de la organización, reconocen claramente el Plástico PET?	Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
13. ¿Cuál es la cantidad aproximada en kilogramos semanales que se recicla de Plástico PET por parte de la organización?	<input type="text"/> kilos
<i>¡Muchas gracias por su participación!</i>	
Fecha de diligenciamiento:	
Encuestador:	

Anexo 3. Formato de encuesta diligenciado con personas recicladoras de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA	
 FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS	
Estimado (a) reciclador (a)	
<p>Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado "Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental".</p> <p>Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se cita a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.</p>	
Características socio-demográficas	
1. En cuanto a género, Usted se define como:	Mujer <input checked="" type="checkbox"/> Hombre <input type="checkbox"/>
2. Su edad actual es:	37 años
3. El estrato al cual Usted pertenece es	Sin estratificar <input type="checkbox"/> Uno <input checked="" type="checkbox"/> Dos <input type="checkbox"/> Tres <input type="checkbox"/> Cuatro <input type="checkbox"/> Cinco <input type="checkbox"/> Seis <input type="checkbox"/>
4. El lugar de donde usted proviene es:	Popayán
5. El tiempo que Usted lleva dedicado a la actividad del reciclaje es:	4 años
6. El máximo nivel educativo que Usted tiene es:	Primaria sin terminar <input type="checkbox"/> Primaria <input type="checkbox"/> Bachillerato sin terminar <input type="checkbox"/> Bachillerato <input checked="" type="checkbox"/> Técnico <input type="checkbox"/> Tecnólogo <input type="checkbox"/> Universitario <input type="checkbox"/> Posgrado <input type="checkbox"/>

Caracterización de la actividad de reciclaje													
7. De acuerdo con su experiencia, la actividad de reciclaje que Usted actualmente realiza es producto de:	Solo trabajo suyo <input checked="" type="checkbox"/> Trabajo familiar <input type="checkbox"/> Trabajo otras personas <input type="checkbox"/> Otra forma. ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												
8. En caso que Usted contrate a personas para la actividad de reciclaje, ¿podría decir cuántas personas contrata normalmente?	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> Más de 3 ¿Cuántas? <input type="checkbox"/>												
9. De los siguientes materiales, ¿cuáles recicla Usted actualmente?	Papel <input checked="" type="checkbox"/> Plástico <input checked="" type="checkbox"/> Vidrio <input checked="" type="checkbox"/> Aluminio <input checked="" type="checkbox"/> Hierro <input checked="" type="checkbox"/> Otro. ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												
10. La actividad de reciclaje que Usted realiza actualmente, consiste en:	Recolección y venta <input type="checkbox"/> Transformación <input type="checkbox"/> Ambas <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												
11. De acuerdo con su experiencia, ¿en kilogramos, cuál es la cantidad aproximada semanal que Usted recicla según cada material?	<table border="1"> <tr><td>Papel</td><td>12</td></tr> <tr><td>Plástico</td><td>20</td></tr> <tr><td>Vidrio</td><td>18</td></tr> <tr><td>Aluminio</td><td>10</td></tr> <tr><td>Hierro</td><td>5</td></tr> <tr><td>Otro.</td><td>6</td></tr> </table>	Papel	12	Plástico	20	Vidrio	18	Aluminio	10	Hierro	5	Otro.	6
Papel	12												
Plástico	20												
Vidrio	18												
Aluminio	10												
Hierro	5												
Otro.	6												
12. Reconoce Usted claramente el Plástico PET	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>												
13. ¿Cuál es la cantidad aproximada en kilogramos semanales que Usted recicla de Plástico PET	10 kilos												
Sobre la conciencia ambiental y participación de procesos de biorremediación													
14. Según su percepción, califique el nivel de contaminación ambiental que ocasiona el PET	Muy alto <input checked="" type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Bajo <input type="checkbox"/> Muy bajo <input type="checkbox"/>												
De acuerdo con su experiencia y conocimientos, cuáles son los métodos más frecuentes que se utilizan para reducir el PET	Incineración <input type="checkbox"/> Reciclaje <input checked="" type="checkbox"/> Enterramiento <input type="checkbox"/> Biodegradación <input type="checkbox"/> Fotocatálisis <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												

En el caso de la biodegradación, de qué tipo de organismos ha escuchado que se usen para reducir el PET	Bacterias <input type="checkbox"/> Hongos <input type="checkbox"/> Larvas <input type="checkbox"/> Algas <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>
Según Usted, en una escala de 1 a 5, donde 1 significa un nivel de compromiso nulo y 5 el máximo nivel de compromiso, ¿cómo califica su compromiso con la reducción de la contaminación por PET?	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/>
Teniendo en cuenta su nivel de compromiso y en vista que existen microorganismos que degradan el PET, estaría Usted dispuesto a participar de procesos de biodegradación de este material utilizando bacterias, hongos, larvas u otras?	Definitivamente si <input type="checkbox"/> Posiblemente <input type="checkbox"/> Definitivamente no <input checked="" type="checkbox"/>
¿Cuáles podrían ser las razones para no participar de tal proceso?	<i>Nos dañar el trabajo Las bacterias son infecciosas Se deja de tener plásticos</i>
De acuerdo con sus criterios, ¿estaría Usted en disposición de participar de talleres sobre biodegradación del PET con bacterias, hongos, larvas u otras formas?	Si <input type="checkbox"/> Ns/Nr <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
¡Muchas gracias por su participación!	
Fecha de diligenciamiento: 26-10-2022	
Encuestador: Nicolás Montaña	

Fuente: elaboración propia

Continuación Anexo 3. Formato de encuesta diligenciado con personas recicladoras de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA	
 FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS	
Estimado (a) reciclador (a)	
Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado "Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental".	
Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se ciñe a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.	
Características socio-demográficas	
1. En cuanto a género, Usted se define como:	Mujer <input type="checkbox"/> Hombre <input checked="" type="checkbox"/>
2. Su edad actual es:	53 años
3. El estrato al cual Usted pertenece es	Sin estratificar <input type="checkbox"/> Uno <input checked="" type="checkbox"/> Dos <input type="checkbox"/> Tres <input type="checkbox"/> Cuatro <input type="checkbox"/> Cinco <input type="checkbox"/> Seis <input type="checkbox"/>
4. El lugar de donde usted proviene es:	Ciénaga Magdalena
5. El tiempo que Usted lleva dedicado a la actividad del reciclaje es:	11 años
6. El máximo nivel educativo que Usted tiene es:	Primaria sin terminar <input type="checkbox"/> Primaria <input type="checkbox"/> Bachillerato sin terminar <input checked="" type="checkbox"/> Bachillerato <input type="checkbox"/> Técnico <input type="checkbox"/> Tecnólogo <input type="checkbox"/> Universitario <input type="checkbox"/> Posgrado <input type="checkbox"/>

Caracterización de la actividad de reciclaje													
7. De acuerdo con su experiencia, la actividad de reciclaje que Usted actualmente realiza es producto de:	Solo trabajo suyo <input checked="" type="checkbox"/> Trabajo familiar <input type="checkbox"/> Trabajo otras personas <input type="checkbox"/> Otra forma. ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												
8. En caso que Usted contrate a personas para la actividad de reciclaje, ¿podría decir cuántas personas contrata normalmente?	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> Más de 3 ¿Cuántas? <input type="checkbox"/>												
9. De los siguientes materiales, ¿cuáles recicla Usted actualmente?	Papel <input checked="" type="checkbox"/> Plástico <input checked="" type="checkbox"/> Vidrio <input checked="" type="checkbox"/> Aluminio <input checked="" type="checkbox"/> Hierro <input checked="" type="checkbox"/> Otro. ¿Cuál? <input checked="" type="checkbox"/>												
10. La actividad de reciclaje que Usted realiza actualmente, consiste en:	Recolección y venta <input type="checkbox"/> Transformación <input type="checkbox"/> Ambas <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												
11. De acuerdo con su experiencia, ¿en kilogramos, cuál es la cantidad aproximada semanal que Usted recicla según cada material?	<table border="1"> <tr><td>Papel</td><td>15</td></tr> <tr><td>Plástico</td><td>25</td></tr> <tr><td>Vidrio</td><td>8</td></tr> <tr><td>Aluminio</td><td>12</td></tr> <tr><td>Hierro</td><td>5</td></tr> <tr><td>Otro.</td><td>10</td></tr> </table>	Papel	15	Plástico	25	Vidrio	8	Aluminio	12	Hierro	5	Otro.	10
Papel	15												
Plástico	25												
Vidrio	8												
Aluminio	12												
Hierro	5												
Otro.	10												
12. Reconoce Usted claramente el Plástico PET	Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>												
13. ¿Cuál es la cantidad aproximada en kilogramos semanales que Usted recicla de Plástico PET?	20 kilos												
Sobre la conciencia ambiental y participación de procesos de biorremediación													
14. Según su percepción, califique el nivel de contaminación ambiental que ocasiona el PET	Muy alto <input type="checkbox"/> Alto <input checked="" type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Bajo <input type="checkbox"/> Muy bajo <input type="checkbox"/>												
De acuerdo con su experiencia y conocimientos, cuáles son los métodos más frecuentes que se utilizan para reducir el PET	Incineración <input checked="" type="checkbox"/> Reciclaje <input type="checkbox"/> Enterramiento <input type="checkbox"/> Biodegradación <input type="checkbox"/> Fotocatálisis <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? <input type="checkbox"/>												

Toda en la capar
Toda en la capar

En el caso de la biodegradación, de qué tipo de organismos ha escuchado que se usen para reducir el PET	Bacterias <input type="checkbox"/> Hongos <input type="checkbox"/> Larvas <input type="checkbox"/> Algas <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>
Según Usted, en una escala de 1 a 5, donde 1 significa un nivel de compromiso nulo y 5 el máximo nivel de compromiso, ¿cómo califica su compromiso con la reducción de la contaminación por PET?	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/>
Teniendo en cuenta su nivel de compromiso y en vista que existen microorganismos que degradan el PET, estaría Usted dispuesto a participar de procesos de biodegradación de este material utilizando bacterias, hongos, larvas u otras?	Definitivamente sí <input type="checkbox"/> Posiblemente <input checked="" type="checkbox"/> Definitivamente no <input type="checkbox"/>
¿Cuáles podrían ser las razones para no participar de tal proceso?	Nos quedamos sin trabajo El PET es necesario para trabajar Es un mal necesario Las bacterias crecen muy rápido
De acuerdo con sus criterios, ¿estaría Usted en disposición de participar de talleres sobre biodegradación del PET con bacterias, hongos, larvas u otras formas?	Sí <input type="checkbox"/> Ns/Nr <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
¡Muchas gracias por su participación!	
Fecha de diligenciamiento:	28 - octubre - 2022
Encuestador:	Nicolás Montano

Fuente: elaboración propia

Anexo 4. Formato de encuesta diligenciado con organizaciones recicladoras de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA													
 Uniautónoma FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS													
Estimado (a) empresario (a) reciclador (a)													
<p>Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado "Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental".</p> <p>Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se ciñe a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.</p>													
1. La organización dedicada a la actividad de reciclaje que Usted representa, está constituida bajo la forma de:	<input checked="" type="checkbox"/> Cooperativa <input type="checkbox"/> Fundación <input type="checkbox"/> Sociedad Ltda <input type="checkbox"/> Corporación <input type="checkbox"/> S.A.S. <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____												
2. Según la respuesta anterior, actualmente el número de asociados, socios fundadores o accionistas que conforman la organización es:	<input type="text" value="25"/> personas												
3. ¿Cuántos años tiene de constituida la organización?	<input type="text" value="17"/> años												
4. Quienes desarrollan la actividad de reciclaje en la organización están representados en:	<input type="checkbox"/> Los mismos socios <input type="checkbox"/> Los socios y otros empleados <input type="checkbox"/> Solo empleados <input checked="" type="checkbox"/> Otros ¿Cuáles? <i>recolectores</i>												
5. En promedio, ¿cuántas personas realizan la actividad de reciclaje?	<input type="text" value="45"/> personas												
6. Digite los municipios en donde la organización lleva a cabo la actividad de reciclaje:	<i>Popayán</i>												
7. De los siguientes materiales, ¿cuáles recicla su organización?	<input checked="" type="checkbox"/> Papel <input checked="" type="checkbox"/> Plástico <input checked="" type="checkbox"/> Vidrio <input checked="" type="checkbox"/> Aluminio <input checked="" type="checkbox"/> Hierro <input checked="" type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? <i>botellas de aluminio</i>												
8. De acuerdo con Usted, ¿en kilogramos, cuál es la cantidad aproximada semanal que la organización recicla según cada material?	<table border="1"> <tr><td>Papel</td><td><input type="text" value="20000"/></td></tr> <tr><td>Plástico</td><td><input type="text" value="75000"/></td></tr> <tr><td>Vidrio</td><td><input type="text" value="—"/></td></tr> <tr><td>Aluminio</td><td><input type="text" value="2000"/></td></tr> <tr><td>Hierro</td><td><input type="text" value="1000"/></td></tr> <tr><td>Otro.</td><td><input type="text" value="5000"/></td></tr> </table>	Papel	<input type="text" value="20000"/>	Plástico	<input type="text" value="75000"/>	Vidrio	<input type="text" value="—"/>	Aluminio	<input type="text" value="2000"/>	Hierro	<input type="text" value="1000"/>	Otro.	<input type="text" value="5000"/>
Papel	<input type="text" value="20000"/>												
Plástico	<input type="text" value="75000"/>												
Vidrio	<input type="text" value="—"/>												
Aluminio	<input type="text" value="2000"/>												
Hierro	<input type="text" value="1000"/>												
Otro.	<input type="text" value="5000"/>												
9. La actividad de reciclaje que realiza actualmente la organización, consiste en:	<input checked="" type="checkbox"/> Recolección y venta <input type="checkbox"/> Transformación <input type="checkbox"/> Ambas <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____												
10. De acuerdo con las respuestas anteriores, los materiales de recolección y venta, a dónde los destina la organización.	<input checked="" type="checkbox"/> Venta a empresas locales <input type="checkbox"/> Venta a empresas extranjeras <input checked="" type="checkbox"/> Venta a empresas nacionales <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____												
11. En caso que la organización realice actividades de transformación, ¿qué otros materiales genera a partir del reciclaje?	<input type="checkbox"/> Maderas plásticas <input type="checkbox"/> Lozas plásticas <input type="checkbox"/> Postes plásticos <input type="checkbox"/> Fundición de metales <input type="checkbox"/> Forja de metales <input type="checkbox"/> Otros. ¿Cuáles? _____												
12. ¿Los trabajadores de la organización, reconocen claramente el Plástico PET?	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No												
13. ¿Cuál es la cantidad aproximada en kilogramos semanales que se recicla de Plástico PET por parte de la organización?	<input type="text" value="2550"/> kilos												
<i>¡Muchas gracias por su participación!</i>													
Fecha de diligenciamiento: <i>10 - Octubre - 2022</i>													
Encuestador: <i>Nicolás Montaña</i>													

Fuente: elaboración propia

Continuación Anexo 4. Formato de encuesta diligenciado con organizaciones recicladoras de residuos sólidos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA													
 FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA ENCUESTA PARA ORGANIZACIONES DEDICADAS AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS													
Estimado (a) empresario (a) reciclador (a)													
<p>Esta encuesta tiene como finalidad la caracterización de organizaciones dedicadas a la actividad del reciclaje, cuya información es fundamental para el proyecto de grado denominado "Estado actual de la implementación de procesos de biodegradación del polietileno tereftalato PET para la remediación ambiental".</p> <p>Es una encuesta que no compromete el buen nombre de su organización y los datos obtenidos se publicarán de manera global. Además, se cñe a lo contemplado en la Ley 1581 de 2012 que establece la protección de datos personales. Acudimos a su honestidad para obtener información precisa sobre el proceso de manejo de residuos sólidos.</p>													
1. La organización dedicada a la actividad de reciclaje que Usted representa, está constituida bajo la forma de:	<input type="checkbox"/> Cooperativa <input type="checkbox"/> Fundación <input type="checkbox"/> Sociedad Ltda <input type="checkbox"/> Corporación <input checked="" type="checkbox"/> S.A.S. <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____												
2. Según la respuesta anterior, actualmente el número de asociados, socios fundadores o accionistas que conforman la organización es:	<input type="text" value="2"/> personas												
3. ¿Cuántos años tiene de constituida la organización?	<input type="text" value="23"/> años												
4. Quiénes desarrollan la actividad de reciclaje en la organización están representados en:	<input type="checkbox"/> Los mismos socios <input type="checkbox"/> Los socios y otros empleados <input type="checkbox"/> Solo empleados <input checked="" type="checkbox"/> Otros ¿Cuáles? <u>recolectores</u>												
5. En promedio, ¿cuantas personas realizan la actividad de reciclaje?	<input type="text" value="150"/> personas												
6. Digite los municipios en donde la organización lleva a cabo la actividad de reciclaje:	<u>Dopaza</u> <u>Timbío</u> <u>El Tambo</u> <u>Dafra</u> <u>Otra</u>												
7. De los siguientes materiales, ¿cuáles recicla su organización?	<input checked="" type="checkbox"/> Papel <input checked="" type="checkbox"/> Plástico <input checked="" type="checkbox"/> Vidrio <input checked="" type="checkbox"/> Aluminio <input checked="" type="checkbox"/> Hierro <input checked="" type="checkbox"/> Otro. ¿Cuál? <u>bolitas blancas</u>												
8. De acuerdo con Usted, ¿en kilogramos, cuál es la cantidad aproximada semanal que la organización recicla según cada material?	<table border="1"> <tr><td>Papel</td><td><input type="text" value="15000"/></td></tr> <tr><td>Plástico</td><td><input type="text" value="10000"/></td></tr> <tr><td>Vidrio</td><td><input type="text" value="5000"/></td></tr> <tr><td>Aluminio</td><td><input type="text" value="1000"/></td></tr> <tr><td>Hierro</td><td><input type="text" value="3500"/></td></tr> <tr><td>Otro.</td><td><input type="text" value="3500"/></td></tr> </table>	Papel	<input type="text" value="15000"/>	Plástico	<input type="text" value="10000"/>	Vidrio	<input type="text" value="5000"/>	Aluminio	<input type="text" value="1000"/>	Hierro	<input type="text" value="3500"/>	Otro.	<input type="text" value="3500"/>
Papel	<input type="text" value="15000"/>												
Plástico	<input type="text" value="10000"/>												
Vidrio	<input type="text" value="5000"/>												
Aluminio	<input type="text" value="1000"/>												
Hierro	<input type="text" value="3500"/>												
Otro.	<input type="text" value="3500"/>												
9. La actividad de reciclaje que realiza actualmente la organización, consiste en:	<input checked="" type="checkbox"/> Recolección y venta <input type="checkbox"/> Transformación <input type="checkbox"/> Ambas <input type="checkbox"/> Otra ¿Cuál? _____												
10. De acuerdo con las respuestas anteriores, los materiales de recolección y venta, a dónde los destina la organización.	<input checked="" type="checkbox"/> Venta a empresas locales <input type="checkbox"/> Venta a empresas extranjeras <input checked="" type="checkbox"/> Venta a empresas nacionales <input type="checkbox"/> Otra. ¿Cuál? _____												
11. En caso que la organización realice actividades de transformación, ¿qué otros materiales genera a partir del reciclaje?	<input type="checkbox"/> Maderas plásticas <input type="checkbox"/> Lozas plásticas <input type="checkbox"/> Postes plásticos <input type="checkbox"/> Fundición de metales <input type="checkbox"/> Forja de metales <input type="checkbox"/> Otros. ¿Cuáles? _____												
12. ¿Los trabajadores de la organización, reconocen claramente el Plástico PET?	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No												
13. ¿Cuál es la cantidad aproximada en kilogramos semanales que se recicla de Plástico PET por parte de la organización?	<input type="text" value="2200"/> kilos												
¡Muchas gracias por su participación!													
Fecha de diligenciamiento: <u>10 - Octubre - 2022</u>													
Encuestador: <u>Nicolas Montano</u>													

Fuente: elaboración propia