



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO REGIÓN CARBONÍFERA

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

**“VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE
RECICLAJE DE NEUMÁTICOS EN SABINAS, COAHUILA,
MÉXICO: UN ENFOQUE HACIA LA ECONOMÍA CIRCULAR”**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

JOSÉ ALEJANDRO FARÍAS CAMPOS

DIRECTOR DE TESIS:

ODILIA BERENICE PEÑA ALMAGUER

CO-DIRECTOR DE TESIS:

HUGO ALFREDO CARRILLO SERRANO

SABINAS, COAHUILA, MÉXICO, SEPTIEMBRE 2024

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA
OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA**

Ing. José Alejandro Farías Campos

Estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Industrial** del **Tecnológico Nacional de México Región Carbonífera**, autor de la Tesis, presentada para la obtención de grado de **Maestro(a) en Ingeniería Industrial**:

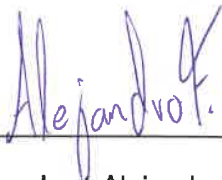
**“Viabilidad para la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en
Sabinas, Coahuila, México: un enfoque hacia la economía circular”**

Realizada bajo la dirección la M.I. Odilia Berenice Peña Almaguer

Declaro que:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros. Igualmente asumo, ante el Tecnológico Nacional de México y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

Agujita Coahuila, a 25 de septiembre de 2024



Ing. José Alejandro Farías Campos



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNM CAMPUS REGIÓN CARBONÍFERA

CARTA DE AUTORIZACIÓN Y ORIGINALIDAD



Agujita, Coah., a 25 de septiembre de 2024

M.I. ABELARDO BUENTELLO DUQUE
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE POSGRADO

La presente es para informarle que el (la) C. José Alejandro Farías Campos con número de control 221DM008 alumno(a) del Programa de Maestría en Ingeniería Industrial ha concluido la redacción de su trabajo de **Tesis** titulado:

Viabilidad para la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, México: un enfoque hacia la economía circular.

La cual personalmente he revisado su originalidad, por lo que, autorizo su liberación y pido a usted sea tan amable de asignar los miembros del jurado revisor.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

M.I. Odilia Berenice Peña Almaguer



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNM CAMPUS REGIÓN CARBONÍFERA

LIBERACIÓN DE TESIS POR EL COMITÉ TUTORIAL



Agujita, Coah., a 30 de septiembre de 2024

MAYL. ELSA GEORGINA DE LEÓN TREJO
SUBDIRECTORA DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

AT'N.: M.I. ABELARDO BUENTELLO DUQUE
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE POSGRADO

De acuerdo a la convocatoria interna de Registro de Propuestas de Proyectos de Investigación realizada por la Subdirección de Posgrado e Investigación a fin de aprobar la sustentación de **Tesis** titulada:

**“Viabilidad financiera para la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas,
Coahuila, México: un enfoque hacia la economía circular”**

Presentado por el(la) pasante C. **José Alejandro Farías Campos** con número de control **221DM008** alumno(a) del Programa de **Maestría en Ingeniería Industrial** que ofrece nuestro Instituto.

Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien autorizar la sustentación de dicha tesis para los efectos consiguientes.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

M.I. Odilia Berenice Peña Almaguer
Presidente

Dr. Hugo Alfredo Carrillo Serrano
Secretario

M.P. Verónica Rangel Medina
Vocal



MAYL. Verónica Esmeralda Hernández Medrano
Vocal suplente

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
ESTUDIOS SUPERIORES DE
LA REGIÓN CARBONÍFERA
DEPTO. DE POSGRADO

A mis padres, Alejandro y María

*Por ser mi guía y fortaleza en cada paso de mi vida, por enseñarme
con su ejemplo el valor del esfuerzo, la dedicación y el amor
incondicional.*

A mis hermanos, Alan y Aarón

*Por ser mis compañeros de vida, siempre presentes con su apoyo y
aliento, incluso en los momentos más desafiantes.*

A Sabrina

*Quien, aunque llegó en los últimos meses de este proyecto, me ha
apoyado desde el primer día con su comprensión, paciencia y amor,
dándome la fuerza para seguir adelante.*

A María Crescencia†

*Por las enseñanzas que me brindó y por el amor que dejó marcado
en mi corazón, enseñándome a ser mejor persona cada día. Aunque
ya no esté presente, su legado sigue vivo en mí.*

AGRADECIMIENTOS

El camino recorrido para la realización de esta tesis ha sido un viaje lleno de aprendizaje, retos y crecimiento personal y académico. A lo largo de este proceso, he contado con el apoyo invaluable de personas y una institución que han sido esenciales para que este trabajo pudiera materializarse, y a quienes me gustaría dedicar unas palabras de agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer al **Tecnológico Nacional de México: Campus Región Carbonífera** por ofrecerme la oportunidad de continuar mi formación académica en un ambiente de excelencia. Esta institución, a lo largo de mi carrera y en esta etapa de maestría, me proporcionó las herramientas y el apoyo necesarios para lograr mis objetivos y desarrollar este proyecto.

Mi más profundo agradecimiento a mi directora de tesis, **M.I. Odilia Berenice Peña Almaguer**, por su guía y dedicación constante. Su apoyo fue crucial desde el inicio, y sus consejos, paciencia y sabiduría me ayudaron a enfrentar los desafíos y complejidades de esta investigación. No tengo palabras suficientes para agradecer su compromiso con mi formación y su generosidad al compartir su conocimiento.

También quisiera expresar mi sincero agradecimiento al **Dr. Hugo Alfredo Carrillo Serrano**, co-director de esta tesis. Su experiencia y retroalimentación siempre precisa me permitieron enriquecer este trabajo y encontrar nuevas perspectivas que, sin duda, mejoraron el resultado final. Agradezco sus aportaciones, tiempo y disposición para acompañarme en este proceso.

Agradezco al **M.I. Abelardo Buentello Duque**, jefe del departamento de maestría, por su apoyo institucional y liderazgo, que fueron esenciales para que esta tesis pudiera desarrollarse de manera adecuada. Su labor al frente del departamento ha sido una guía constante para mí y para todos los que formamos parte de este programa.

Este proyecto comenzó como una pequeña idea en mis años de formación en la carrera de ingeniería, y no puedo dejar de agradecer a la **Ing. Karime Gazive Sánchez Delgado**, quien estuvo a mi lado en esos primeros pasos de lo que en su momento parecía solo una propuesta, y que hoy se ha transformado en una tesis. Su colaboración, ideas y apoyo fueron fundamentales en las etapas iniciales de esta investigación, y siempre recordaré su compañerismo con gratitud.

A todas las personas mencionadas, así como a aquellas que de manera directa o indirecta contribuyeron a este logro, les agradezco profundamente por haber sido parte de este viaje. Este logro no habría sido posible sin su acompañamiento y valioso aporte.

Resumen

En este trabajo de investigación se analiza la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, desde la perspectiva de la economía circular. La acumulación de neumáticos usados representa un grave problema ambiental, que puede transformarse en una oportunidad para fomentar un modelo sostenible que reduzca el uso de recursos naturales, al tiempo que promueve el reciclaje y la reutilización de materiales. El estudio explora cómo la economía circular puede cerrar el ciclo de vida de los neumáticos, evitando su disposición final en vertederos y transformándolos en nuevos productos de valor agregado. A través de una revisión de tecnologías emergentes como la pirólisis y el reciclaje mecánico, se analiza el potencial de estas soluciones para generar beneficios ambientales y sociales. También se examinan casos de éxito internacionales que destacan la relevancia de este enfoque en la gestión sostenible de residuos.

Se concluye que la implementación de la planta no solo mitigaría los problemas ambientales causados por los neumáticos en desuso, sino que también contribuiría al desarrollo de un sistema económico más eficiente y responsable, alineado con los principios de la economía circular. Las recomendaciones finales incluyen estrategias para fortalecer esta transición hacia un modelo de producción y consumo más sostenible.

Palabras clave: reciclaje de neumáticos, economía circular, pirólisis, reciclaje mecánico, gestión sostenible de residuos, beneficios ambientales, reutilización de materiales, desarrollo sostenible, producción responsable, residuos sólidos

Abstract

This research analyzes the implementation of a tire recycling plant in Sabinas, Coahuila, from the perspective of the circular economy. The accumulation of used tires represents a serious environmental problem, which can be transformed into an opportunity to promote a sustainable model that reduces the use of natural resources, while encouraging the recycling and reuse of materials. The study explores how the circular economy can close the life cycle of tires, preventing their final disposal in landfills and transforming them into new value-added products. Through a review of emerging technologies such as pyrolysis and mechanical recycling, the potential of these solutions to generate environmental and social benefits is analyzed.

International success stories are also examined, highlighting the relevance of this approach in sustainable waste management. It is concluded that the implementation of the plant would not only mitigate the environmental problems caused by disused tires but also contribute to the development of a more efficient and responsible economic system, aligned with the principles of the circular economy. The final recommendations include strategies to strengthen this transition towards a more sustainable production and consumption model.

Keywords: tire recycling, circular economy, pyrolysis, mechanical recycling, sustainable waste management, environmental benefits, material reuse, sustainable development, responsible production, solid waste.

Índice general

Índice de figuras	VII
-------------------	-----

Índice de tablas	IX
------------------	----

1. Introducción	1
1.1. Marco referencial	2
1.1.1. Antecedentes de investigación y casos de éxito en la industria del reciclaje	3
1.1.1.1. Reciclaje de neumáticos en Estados Unidos	4
1.1.1.2. Tecnologías Innovadoras para el Reciclaje de Neumáticos	4
1.1.1.3. Lakin Tire Corporation	4
1.1.1.4. Recovery Technologies Group (anteriormente Santee River Rubber LLC)	4
1.1.1.5. Unión Europea (UE)	5
1.1.1.6. Genan	5
1.1.1.7. Pyrolyx	5
1.1.1.8. Tires Spa	6
1.1.1.9. Reciclaje de neumáticos a nivel nacional	6
1.2. Planteamiento del problema	7
1.3. Objetivos de la Tesis	7
1.4. Justificación	8
1.5. Hipótesis	9
1.6. Alcances y limitaciones	9
1.6.1. Alcances	9
1.6.2. Limitaciones	9
1.7. Estructura de la tesis	10
2. Marco Conceptual	13
2.1. Generalidades del neumático	13
2.2. Información general sobre neumáticos sin usar y revisiones de neumáticos	19
2.2.1. Métodos para la valorización de materiales.	20
2.2.2. Métodos para la optimización energética.	21
2.2.3. Utilización de los materiales derivados en las fases de valorización.	21
2.3. Aspectos generales del neumático en desuso	21
2.4. Amenazas para la salud y el entorno	25
2.5. Investigaciones ecotoxicológicas acerca de los impactos ambientales de los neumáticos.	28

3. Marco Jurídico	31
3.1. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 2018): Estructura y Alcance	31
3.1.1. Clasificación de Residuos y su Gestión: Focalización en los Neumáticos Usados	32
3.1.2. Instrumentos de Política de Prevención y Gestión: Planes de Manejo Obligatorios	32
3.2. Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011: Detalles y Obligaciones	33
3.2.1. Obligaciones de las Entidades Federativas y Prohibiciones Específicas	33
3.2.2. Responsabilidad Extendida de los Productores y Gestores	34
4. Metodología	35
4.1. Diseño de la Investigación	35
4.2. Fases de la Metodología	35
4.2.1. Fase 1: Definición y Diagnóstico del Sistema	35
4.2.2. Fase 2: Análisis del Sistema	36
4.2.3. Fase 3: Análisis de Futuro y Evaluación Financiera	36
4.2.4. Fase 4: Impacto Ambiental y Social	37
4.2.5. Fase 5: Formulación Estratégica y Simulación Dinámica	37
4.3. Recolección de Información	38
4.4. Análisis de Datos	38
4.5. Encuesta para Evaluar la Disponibilidad de Materia Prima	38
5. Resultados	41
5.1. Definición del Sistema	41
5.2. Análisis Competitivo	42
5.3. Evaluación Financiera	42
5.3.1. Inversión Inicial y Costos Operativos	42
5.3.2. Flujos de Caja Proyectados	43
5.3.3. Valor de Salvamento y Análisis de Rentabilidad	43
5.4. Evaluación Socioeconómica	43
5.4.1. Contexto Demográfico	43
5.4.2. Disponibilidad de Materia Prima	44
5.5. Análisis del Impacto Ambiental y Social	44
5.5.1. Impacto Ambiental	44
5.5.2. Impacto Social	45
6. Discusión	47
6.1. Desafíos de la Gestión de Residuos de Neumáticos	47
6.2. Pirólisis: Una Tecnología Prometedora pero con Limitaciones	48

6.3. Gasificación: Producción de Energía Limpia con Retos Técnicos	48
6.4. Reciclaje y Recauchutado: soluciones Económicas pero con Menor Innovación	49
6.5. Consideraciones para el Futuro de la Economía Circular en la Gestión de Residuos de Neumáticos	49
7. Conclusión	51
7.1. Principales Hallazgos	51
7.2. Implicaciones para la Sostenibilidad	52
7.3. Recomendaciones	52
7.4. Conclusión Final	53
Bibliografía	55

Índice de figuras

2.1. Empresas manufactureras y centros de distribución de neumáticos en México (Linares Campos y cols., 2023)	14
2.2. Proceso de fabricación del neumático. Nota. La figura muestra el proceso de fabricación de neumáticos, elaborado con datos de Castro (2008)	15
2.3. Centro de acopio autorizado, Navojoa, Sonora. Fuente: IESA (2017)	22
2.4. Centro de acopio clandestino (abandono), Novolato, Sinaloa. Fuente: IESA (2017)	22
2.5. Zona de almacenamiento de neumáticos previo a su uso como combustible en la industria cementera. Fuente: IESA (2017)	23
2.6. Incineración a cielo abierto de neumático de desecho, Villa de Cloete, Sabinas, Coahuila. Fuente: Propia	23

Índice de tablas

2.1. Clasificación de marcas de neumáticos. (Linares Campos y cols., 2023) . . .	16
2.2. Valores promedio de los componentes principales.	17
2.3. Componentes peligrosos del neumático.(Parte I)	18
2.4. Componentes peligrosos del neumático.(Parte II)	18

Capítulo 1

Introducción

En el contexto global actual, la convergencia de desafíos ambientales y económicos se ha convertido en una cuestión crucial que abarca diversas esferas de la sociedad. La gestión adecuada de los residuos sólidos, en particular, se presenta como uno de los retos más significativos de nuestro tiempo, y México no es inmune a esta problemática. La proliferación de neumáticos usados es un problema que no sólo ocupa un espacio considerable en vertederos, sino que también libera contaminantes químicos y contribuye a la contaminación del suelo y del agua. En este contexto, el enfoque de la economía circular ha cobrado un papel central al promover la sostenibilidad y ofrecer soluciones innovadoras para la gestión de neumáticos usados.

En Sabinas, Coahuila, una ciudad que ha experimentado un crecimiento económico significativo y se ha convertido en un centro de la industria automotriz y de autopartes, la problemática de los neumáticos usados se ha vuelto apremiante. La producción y el desecho de neumáticos usados han aumentado exponencialmente, generando desafíos tanto en términos de disposición de residuos como de la explotación de oportunidades para el reciclaje y la economía circular. La acumulación de neumáticos usados en diversas áreas de la ciudad ha dado como resultado la contaminación visual, térmica, del suelo y del agua, con efectos perjudiciales para el medio ambiente y la calidad de vida de los ciudadanos que residen cerca de estos puntos de acumulación.

Es en este contexto que se plantea la tesis de maestría "Viabilidad financiera para la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, México: un enfoque hacia la economía circular". La economía circular se ha consolidado como una estrategia esencial para abordar la gestión sostenible de los recursos y reducir el impacto ambiental de los residuos. En el caso de los neumáticos usados, la economía circular propone cerrar el ciclo de vida de estos productos, evitando su disposición final en vertederos y fomentando la producción y el consumo responsables. Esto no sólo contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también abre oportunidades para la generación de valor económico a través del reciclaje y la reutilización de materiales.

La tesis se enfoca en la evaluación de la viabilidad financiera de establecer una planta de

reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila. A través de un análisis exhaustivo de costos e ingresos, se examinará el potencial económico de esta iniciativa. Además, se considerarán los aspectos relacionados con la economía circular, identificando cómo la transformación de neumáticos usados en productos reciclados puede contribuir no sólo a la mitigación de problemas ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, sino también al impulso de la economía local.

El proceso de recolección y reciclaje de neumáticos usados no solo busca mejorar el destino final de estos desechos, sino que también se orienta hacia la generación de nuevos materiales y productos con valor agregado. La planta de reciclaje propuesta tiene el potencial de convertirse en un centro de innovación y transformación, promoviendo la economía circular y generando oportunidades de empleo en la región. Además, el enfoque en la economía circular se alinea con una perspectiva global que reconoce la necesidad de abordar la gestión de residuos desde una óptica sostenible.

El objetivo fundamental de esta investigación es proporcionar una base sólida para la toma de decisiones en la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila. A través de un enfoque de economía circular, se busca demostrar que esta iniciativa no sólo es ambientalmente responsable, sino también financieramente viable, lo que puede contribuir al desarrollo sostenible de la región. La tesis busca ofrecer un análisis profundo y una visión estratégica que respalde la toma de decisiones informadas y la implementación exitosa de esta planta.

El presente trabajo aborda un tema de relevancia tanto para la ingeniería industrial como para la gestión ambiental. La implementación exitosa de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, no solo representa un avance significativo en la gestión de residuos en la región, sino que también serviría como modelo para futuras iniciativas de economía circular en México y más allá. La tesis tiene como objetivo contribuir al entendimiento del sector y de la problemática de su cadena de valor, y proporcionar una hoja de ruta estratégica para abordar este desafío en Sabinas y en otras regiones de México.

1.1. Marco referencial

En este capítulo, se examina la evolución del transporte a nivel global y, en particular, en México, centrándose en el sector automotriz. Se aborda el uso del transporte automotor como medio de movilidad y logística, y se hace hincapié en la comercialización de autopartes, con un enfoque específico en los neumáticos. Este enfoque ayudará a contextualizar y comprender la dimensión de la problemática que se plantea en esta tesis. Además, se explorarán las teorías y técnicas relacionadas con el reciclaje de llantas usadas, con un énfasis en la composición de estas llantas. También se proporcionará una revisión de investigaciones previas y proyectos realizados a nivel mundial y en México que estén relacionados con el uso, la disposición y el reciclaje de llantas producidas e importadas

en México.

1.1.1. Antecedentes de investigación y casos de éxito en la industria del reciclaje

En un mundo en constante cambio, es esencial analizar empresas, países y regiones utilizando metodologías que permitan comprender los problemas en estructuras sistémicas. La prospectiva se presenta como una herramienta metodológica valiosa para abordar problemáticas complejas, aprovechando datos del pasado y del presente para cambiar tendencias y minimizar impactos. Diversas investigaciones respaldan la necesidad de aplicar la prospectiva como medio para desentrañar problemáticas y construir futuros deseables. Se ha demostrado que el análisis estructural y la construcción de escenarios son herramientas fundamentales en estudios de futuro, proporcionando valiosa información para la toma de decisiones (Chatziioannou y Alvarez-Icaza, 2017).

La innovación verde se ha convertido en un motor de crecimiento económico, asegurando que los recursos naturales sigan proporcionando los servicios necesarios para la sostenibilidad. La mejora de procesos tecnológicos y la colaboración entre empresas y proveedores, además del cumplimiento de legislaciones vigentes, han impulsado el desarrollo de productos ecológicos. Esta colaboración también ha demostrado ser fundamental en la innovación abierta, donde las partes interesadas se involucran en el proceso de desarrollo de productos y servicios ecológicos. La presión regulatoria, así como otros factores como los costos, la ventaja competitiva, el liderazgo tecnológico y las preferencias de los consumidores, impulsan la innovación ambiental (Triebswetter y Wackerbauer, 2008). Además, la sostenibilidad ambiental depende de la relación de las empresas con las partes interesadas para resolver problemas ambientales y fomentar la innovación (Watson, Wilson, Smart, y Macdonald, 2018).

En la industria del reciclaje, donde la complejidad de los productos y servicios ofrecidos es alta, es fundamental identificar nichos de mercado o segmentos específicos. Comprender el ciclo de vida de los productos y servicios es crucial para la planificación estratégica. La gestión del ciclo de vida del producto y la preocupación por la contaminación deben abordarse desde la etapa de venta, compartiendo la responsabilidad entre compradores y vendedores (Hepperle, Mörtl, y Lindemann, 2008).

Aun mas, la planificación estratégica es esencial para abordar problemas ambientales relacionados con el transporte. La falta de coordinación regional puede dificultar la implementación de energías renovables, y es necesario un enfoque estratégico que incluya el análisis FODA para atraer inversores privados y resolver problemas ambientales (Hatefi, 2018). La planificación regional basada en escenarios se ha utilizado para respaldar decisiones en la producción de energía renovable (Nabielek, Dumke, y Weninger (2018)).

1.1.1.1. Reciclaje de neumáticos en Estados Unidos

En Estados Unidos, existen diversas empresas dedicadas a la recolección y reciclaje de neumáticos desechados. Por ejemplo, en Modesto, California, una planta de reciclaje quema aproximadamente 4.5 millones de neumáticos al año, generando 15 megavatios de energía que abastecen a unas 14,000 residencias. La generación de energía es una de las aplicaciones principales para los neumáticos reciclados. Otro caso destacado es la planta de Sterling, ubicada en Connecticut, la cual quema alrededor de 10 millones de neumáticos anualmente y genera 30 megavatios de energía (Ropero Álvarez, 2020)

1.1.1.2. Tecnologías Innovadoras para el Reciclaje de Neumáticos

Una de las empresas pioneras en la generación de nuevas tecnologías para el uso de neumáticos desechados es Lehigh Technologies, con sede en Georgia, Estados Unidos. Esta empresa ha desarrollado un proceso innovador para rejuvenecer el caucho descartado y explorar nuevas oportunidades de negocio. Utilizando nitrógeno líquido y sometiendo el caucho a temperaturas extremadamente bajas de alrededor de -100 grados centígrados, logran obtener un polvo fino que puede ser transformado en nuevos productos mediante procesos adicionales. Lehigh Technologies tiene la capacidad de procesar anualmente aproximadamente 100 millones de libras de este polvo, lo que equivaldría a reciclar alrededor de 4 millones de neumáticos por año (Habibah AIH, Abraham, Summerscales, y Brown, 2018).

1.1.1.3. Lakin Tire Corporation

La Lakin Tire Corporation opera dos instalaciones en la costa este de Estados Unidos, brindando servicios de reciclaje de neumáticos durante más de 25 años. Esta empresa se especializa en la recolección de neumáticos desechados de puntos de venta en todo el país. Sus plantas se encuentran estratégicamente ubicadas en diferentes regiones, permitiendo un servicio eficiente a clientes en áreas geográficas extensas. El objetivo principal de Lakin Tire Corporation es encontrar la mayor cantidad de aplicaciones posibles para los neumáticos reciclados.

1.1.1.4. Recovery Technologies Group (anteriormente Santee River Rubber LLC)

La empresa Recovery Technologies Group, antes conocida como Santee River Rubber LLC, experimentó dificultades financieras y se declaró en bancarrota con una deuda de 3.4 millones de dólares. Esta situación se debió a los costos elevados de construcción y otros

desafíos relacionados con la criogenización y los procesos de transformación. Inicialmente, la empresa contaba con 45 empleados y tenía una capacidad para procesar 2.6 millones de llantas. A pesar de las dificultades, Recovery Technologies Group ha logrado establecer 17 ubicaciones en Estados Unidos y Canadá, lo que le permite gestionar adecuadamente la cantidad considerable de residuos. Actualmente, tienen la capacidad de procesar alrededor de 150 millones de llantas, aunque su producción anual se encuentra en torno a los 45 millones.

1.1.1.5. Unión Europea (UE)

La Unión Europea ha sido proactiva en la regulación y gestión de los neumáticos usados. En 1999, se implementó la primera directiva que prohibía el vertido de neumáticos de desecho en vertederos y basureros. Este enfoque ha llevado a que en Europa se utilicen estos residuos en la construcción de infraestructura vial y otros fines. Los parques deportivos son un ejemplo común, consumiendo un promedio de 50-80 toneladas de material reciclado.

1.1.1.6. Genan

Genan, una empresa que surgió a finales de los años 70 debido al aumento de la industria automotriz, estableció su primera planta en Viborg, Dinamarca, en la década de 1990. Inicialmente, tenía una capacidad de 35,000 toneladas, que se duplicó a 70,000 toneladas para 2011. En 2014, Genan expandió sus operaciones a Estados Unidos, inaugurando una planta en Houston, Texas, con una capacidad de 100,000 toneladas. Genan se dedica a la recolección, procesamiento y prolongación del ciclo de vida útil de los neumáticos, explorando diversas aplicaciones, como la creación de parques ecológicos, asfalto, ladrillos ecológicos, impermeabilización y otros productos, lo que genera oportunidades de negocio. La empresa ha continuado expandiéndose y ahora tiene presencia en Asia y Medio Oriente.

1.1.1.7. Pyrolyx

Pyrox es una empresa que se destaca por su tecnología sostenible patentada para recuperar el negro de carbono de los neumáticos usados. Ofrece una solución integral para abordar el problema de la eliminación de neumáticos al final de su vida útil y reducir la huella de carbono al fabricar neumáticos nuevos. La tecnología de Pyrolyx utiliza un enfoque rentable basado en el aumento de la oferta y la reducción de alternativas para los neumáticos usados. La empresa se fundó en 2001, inicialmente como fabricante de gránulos de caucho, y en 2009 patentó su propiedad intelectual. Pyrolyx se ha convertido

en una empresa de inversión y ha construido su planta piloto en los Países Bajos. En 2015, adquirió Stegelitz GmbH, una empresa especializada en la recuperación del negro de carbono, consolidando su posición en el mercado y cotizando en la bolsa de valores de Australia.

1.1.1.8. Tires Spa

Tires Spa es una empresa líder a nivel mundial en la construcción y suministro de plantas para el reciclaje de neumáticos usados y la transformación del caucho en forma de gránulos y polvo con diferentes granulometrías. La empresa se originó como una reestructuración de Picena Macchine SRL en 2008 y ha adoptado una visión global al establecer oficinas en todo el mundo. Tires Spa ha mejorado sus procesos de desmenuzado de caucho y desarrolla plantas de procesamiento a medida de sus clientes, ofreciendo productos de alta calidad y certificados con normativas como la ISO 9001.

1.1.1.9. Reciclaje de neumáticos a nivel nacional

México ha sido proactivo en abordar la problemática del manejo de neumáticos usados desde mediados de la década de 1990. Este enfoque integral ha involucrado áreas clave como agua potable, transferencia de tecnología, salud, movimiento de personas a través de las fronteras, transporte y logística, así como la protección del medio ambiente. Uno de los aspectos más destacados de estos esfuerzos es la colaboración entre México y los Estados Unidos para resolver los desafíos relacionados con el confinamiento de neumáticos usados en los estados fronterizos. Este trabajo conjunto se centra en dos tareas fundamentales:

- Solicitar apoyo gubernamental: Se han realizado esfuerzos conjuntos para instar a los gobiernos federales de ambas naciones a promover y respaldar proyectos destinados a monitorear y reducir las emisiones de vehículos de pasajeros y camiones comerciales en las garitas fronterizas.
- Desarrollo de mercados para neumáticos usados: Se han implementado iniciativas para fomentar el uso y reutilización de neumáticos de desecho en la región (Garza-Almanza, 2018).

Como resultado de estas iniciativas, varias ciudades mexicanas han puesto en marcha programas de investigación y reciclaje de neumáticos. Un ejemplo destacado es la compañía Recubrimientos Ecológicos y Reciclados S.A. de C.V., que ha estado operando durante más de 15 años. Su labor se enfoca en retirar miles de neumáticos de entornos naturales, como bosques, ríos, lagos y mares. Además, la empresa ha invertido en la mejora continua de la calidad de sus productos ecológicos y ha sometido sus procesos a los más

altos estándares, incluyendo ISO 9000 e ISO 14001. En la actualidad, se trata de una empresa consolidada que promueve la responsabilidad ambiental, reciclando más de 300 toneladas de neumáticos al mes. Además, ha desarrollado tecnologías patentadas y cuenta con marcas registradas, extendiendo su impacto globalmente a través de su presencia en varios países de América y Europa.

1.2. Planteamiento del problema

El problema principal es la falta de opciones de reciclaje de neumáticos en la ciudad de Sabinas, Coahuila, lo que ha llevado a un aumento en la acumulación de neumáticos usados en la región. Además, esta situación tiene un impacto negativo en el medio ambiente y la salud pública, ya que los neumáticos pueden ser un foco de infección y pueden liberar sustancias tóxicas al medio ambiente.

Adicionalmente los impactos ambientales y de salud, la falta de opciones de reciclaje también representan una oportunidad perdida para la generación de empleo y el desarrollo económico de la región.

1.3. Objetivos de la Tesis

Objetivo general:

Evaluar la viabilidad de la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, México, con un enfoque hacia la economía circular, analizando los aspectos económicos, ambientales y sociales involucrados en el proceso de reciclaje de neumáticos usados.

Objetivos específicos:

- Realizar un análisis de la problemática actual relacionada con la gestión de neumáticos usados en Sabinas, Coahuila, identificando las implicaciones ambientales y económicas.
- Investigar y recopilar información sobre las tecnologías y procesos de reciclaje de neumáticos usados a nivel nacional e internacional, centrándose en soluciones exitosas y sostenibles.
- Evaluar los aspectos legales y regulatorios pertinentes en México que afectan la gestión de neumáticos usados y el reciclaje en el país, identificando oportunidades y desafíos.
- Evaluar los impactos ambientales y sociales positivos que se derivarían de la implementación de la planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila.

- Formular recomendaciones y estrategias que promuevan la sostenibilidad y la viabilidad financiera del proyecto, incluyendo posibles alianzas con actores clave en la industria del reciclaje.

1.4. Justificación

La gestión adecuada de los residuos sólidos es un desafío global que afecta a ciudades en todo el mundo. En particular, la gestión de neumáticos usados representa un problema significativo debido a su volumen, peso y compleja composición química, lo que los hace difíciles de desechar de manera segura y ambientalmente responsable. El incorrecto manejo de estos residuos puede resultar en impactos negativos en el medio ambiente, la salud pública y la calidad de vida de la comunidad.

La implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en la ciudad de Sabinas, Coahuila, ofrece una solución sostenible y rentable para abordar esta problemática. La puesta en marcha de esta planta no solo contribuiría a reducir la acumulación de neumáticos en vertederos y lugares inapropiados, disminuyendo así el impacto ambiental negativo, sino que también generaría una serie de beneficios económicos para la comunidad local.

En primer lugar, el reciclaje de neumáticos permite la recuperación de materiales valiosos que pueden ser reutilizados en diversas aplicaciones, desde la construcción de carreteras hasta la fabricación de productos industriales. Esto no solo reduce la demanda de recursos naturales, sino que también contribuye a la economía circular y la conservación de energía. En segundo lugar, la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas generaría nuevas oportunidades de empleo en la región, impulsando así el desarrollo económico local. La creación de puestos de trabajo en la planta de reciclaje y en actividades relacionadas con la recolección y procesamiento de neumáticos usados fortalecería la comunidad y mejoraría la calidad de vida de los residentes.

En tercer lugar, la gestión adecuada de los neumáticos usados en Sabinas ayudaría a prevenir problemas de salud pública y ambientales, como la proliferación de vectores de enfermedades y la contaminación del suelo y el agua. Esto, a su vez, reduciría la presión sobre los servicios de salud pública y mejoraría la calidad del entorno.

Dada la importancia de abordar la problemática de los neumáticos usados en Sabinas y la necesidad de encontrar soluciones sostenibles, esta investigación busca evaluar la viabilidad financiera de la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en la ciudad. Al determinar la viabilidad del proyecto, se contribuirá al desarrollo sostenible de la región, se fomentará la innovación en la gestión de residuos y se brindará una solución integral a un problema persistente.

La información y los resultados generados por este estudio no solo beneficiarán a la comunidad local y a las autoridades municipales, sino que también serán valiosos para empresarios e inversores interesados en proyectos sostenibles y de gestión de residuos. La

implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, representa una oportunidad concreta para mejorar el entorno, la economía y la calidad de vida de la región, lo que justifica la realización de esta investigación.

1.5. Hipótesis

La implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, México, con un enfoque hacia la economía circular, será financieramente viable y contribuirá significativamente a la reducción de la contaminación ambiental causada por la acumulación de neumáticos usados en la región, al tiempo que generará oportunidades económicas y sociales para la comunidad local.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1. Alcances

1. **Evaluación de la viabilidad financiera:** Este estudio se enfocará en evaluar la viabilidad financiera de la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en la ciudad de Sabinas, Coahuila. Se realizará un análisis exhaustivo de los costos involucrados en la puesta en marcha y operación de la planta, así como de las posibles fuentes de financiamiento.
2. **Impacto ambiental:** Se considerarán los beneficios en términos de reducción de la contaminación del suelo y el agua, así como la conservación de recursos naturales.
3. **Beneficios económicos:** Se investigarán los posibles beneficios económicos para la ciudad de Sabinas, incluyendo ingresos por la venta de productos reciclados y la reducción de costos asociados con la gestión de neumáticos usados.

1.6.2. Limitaciones

1. **Datos disponibles:** La disponibilidad de datos específicos y actualizados sobre la gestión de neumáticos usados en la ciudad de Sabinas podría ser limitada. Esto podría requerir la estimación de ciertos parámetros y suposiciones basadas en datos disponibles a nivel nacional o internacional.
2. **Impacto real del mercado:** Dado que la viabilidad financiera de la planta de reciclaje depende en parte de la demanda de productos reciclados, las condiciones

del mercado podrían cambiar con el tiempo. Este estudio se basará en las condiciones del mercado en el momento de la investigación, y no podrá prever cambios futuros.

3. **Factores externos:** Factores externos, como cambios en las regulaciones gubernamentales o eventos imprevistos, podrían influir en la viabilidad financiera del proyecto y están fuera del alcance de este estudio.
4. **Escalabilidad y sostenibilidad a largo plazo:** Si bien se evaluará la viabilidad financiera inicial, este estudio no abordará en detalle la escalabilidad del proyecto a largo plazo ni su sostenibilidad más allá de los aspectos financieros inmediatos. Estos temas requerirían un análisis más profundo y específico.

1.7. Estructura de la tesis

El capítulo 1 proporciona una Introducción al tema central de la tesis, estableciendo el contexto del problema y describiendo su relevancia en el marco de la economía circular y la sostenibilidad ambiental. Se presentan los antecedentes del reciclaje de neumáticos a nivel nacional e internacional, además de resaltar las tecnologías más innovadoras en el campo. El capítulo incluye el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación, la hipótesis y la justificación del estudio. Se concluye con una descripción de los alcances y limitaciones del proyecto, que definen el enfoque y los límites de la investigación.

El capítulo 2 desarrolla el Marco Teórico, que proporciona una base conceptual y técnica sólida para el reciclaje de neumáticos. Se revisan los aspectos generales sobre la manufactura y disposición de neumáticos, así como el impacto ambiental generado por su acumulación. En este capítulo, también se describen las metodologías de valorización de neumáticos usados y las tecnologías empleadas en su reciclaje, tales como la pirólisis, la gasificación, y el reciclaje mecánico. Además, se incluyen estudios de casos exitosos a nivel internacional, destacando iniciativas en Europa y Estados Unidos que han logrado avances en la gestión de residuos de neumáticos bajo principios de economía circular. Se examinan, igualmente, los riesgos ambientales asociados a la mala gestión de estos residuos.

El capítulo 3 aborda el Marco Jurídico, explicando las leyes y regulaciones mexicanas relevantes para la gestión de residuos de neumáticos. Se analizan disposiciones como la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, enfocándose en las políticas que rigen el manejo de neumáticos usados. Este capítulo también discute la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los lineamientos para la disposición y reciclaje de residuos sólidos urbanos. El marco jurídico proporciona el contexto legal necesario para evaluar la factibilidad de implementar una planta de reciclaje de neumáticos

en México, identificando obligaciones, oportunidades y desafíos regulatorios.

El capítulo 4 detalla la Metodología empleada para llevar a cabo el análisis financiero y de viabilidad del proyecto. Se justifica el enfoque metodológico y se describe el proceso de recolección de información, que incluye tanto fuentes primarias como secundarias. Este capítulo incluye un análisis de los criterios de selección y exclusión de estudios, junto con una explicación del modelo PRISMA empleado para sintetizar los datos. Se discuten también las técnicas de análisis de costos y los métodos utilizados para evaluar la rentabilidad del proyecto. El análisis de viabilidad considera tanto los costos de inversión y operación de la planta de reciclaje como los ingresos potenciales derivados de la venta de productos reciclados.

En el capítulo 5, se presentan los Resultados de la investigación. Aquí se lleva a cabo un diagnóstico exhaustivo de la situación actual de la gestión de residuos de neumáticos en la región, evaluando el potencial para implementar una planta de reciclaje en Sabinas, Coahuila. Se presentan datos sobre tecnologías emergentes como la pirólisis y el reciclaje mecánico, y se evalúa su viabilidad en términos económicos, tecnológicos y ambientales. Los resultados también incluyen una evaluación de los impactos ambientales y los beneficios económicos que podrían derivarse de la implementación de una planta de reciclaje, así como las oportunidades de empleo que esta iniciativa podría generar en la región.

El capítulo 6 está dedicado a la Discusión de los resultados. Aquí se profundiza en los desafíos que enfrenta la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, incluyendo los retos técnicos, económicos y regulatorios. También se analizan las oportunidades que ofrece la adopción de tecnologías más sostenibles, y se discuten las implicaciones de los resultados obtenidos en el contexto de la economía circular. Este capítulo ofrece una interpretación crítica de los datos, relacionándolos con los objetivos planteados y con la hipótesis de la investigación. Se exploran además las posibles estrategias para superar los obstáculos identificados y se examina la sostenibilidad a largo plazo del proyecto.

Finalmente, el capítulo 7 presenta las Conclusiones y Recomendaciones de la tesis. En este capítulo se ofrece una síntesis de los principales hallazgos de la investigación, respondiendo a la hipótesis inicial y evaluando la viabilidad financiera, social y ambiental del proyecto. Se proporcionan recomendaciones para la implementación de la planta de reciclaje, incluyendo sugerencias para alianzas estratégicas con el sector privado y el gobierno, así como consideraciones para la mejora de las políticas públicas relacionadas con la gestión de residuos. También se sugieren áreas para futuras investigaciones que podrían complementar y expandir los resultados obtenidos en este estudio.

Capítulo 2

Marco Conceptual

2.1. Generalidades del neumático

El neumático es un artículo manufacturado que forma parte de la industria del plástico y el caucho. Esta rama económica se encuentra categorizada en el Sistema de Clasificación Industrial del Norte (SCIAN) bajo el código 326211, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI., 2016).

Un informe del año 2016 reveló que la producción bruta en la fabricación de neumáticos y cámaras representó el 37.8 % del total, a pesar de contar con solo el 3.2 % de las unidades económicas. Esta industria empleó al 16.9 % de la fuerza laboral en el sector hulero, ubicándose en la segunda posición en términos de generación de empleo.

El producto más exportado e importado en 2015 fueron los neumáticos de caucho nuevo. En lo que respecta a las exportaciones, predominaron los neumáticos para automóviles y autobuses con un 55.8 % del total, mientras que, en las importaciones, los neumáticos de caucho nuevo para autobuses representaron el 52.3 % del total, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en 2016.

México alberga algunas de las empresas más destacadas a nivel mundial en esta industria, con un total de 8 plantas de producción y 3 centros de distribución, según el informe 'Manejo Responsable de Llantas Usadas' de 2015. La Figura 2.1 muestra su ubicación.

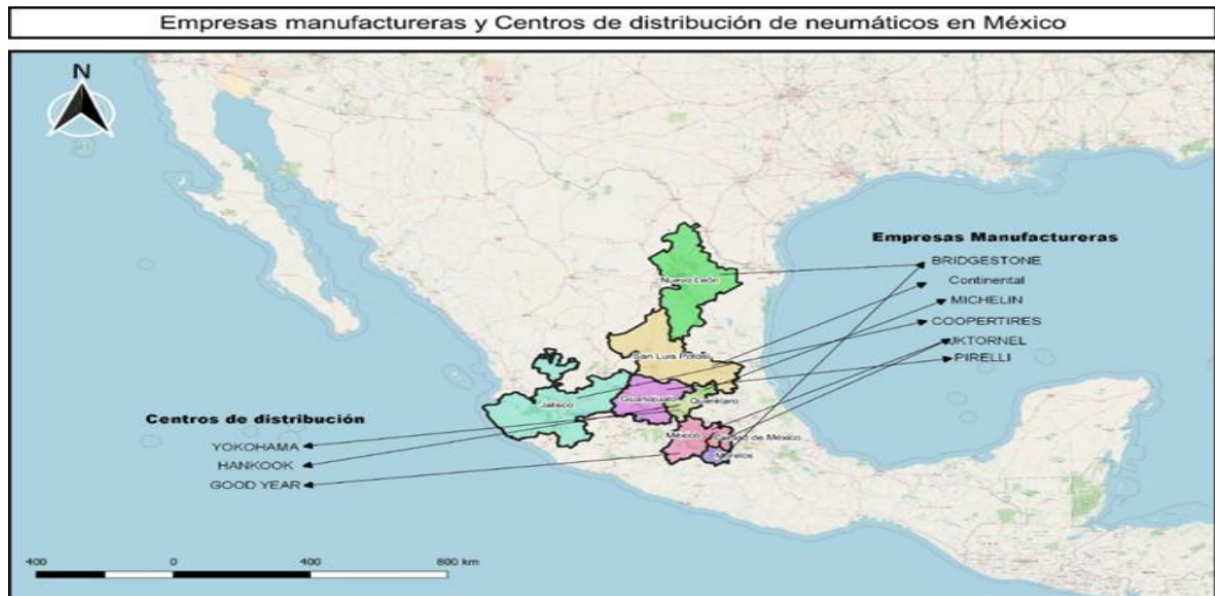


Figura 2.1: Empresas manufactureras y centros de distribución de neumáticos en México (Linares Campos y cols., 2023)

El proceso de manufactura de un neumático se compone de cinco etapas. La primera etapa inicia con la preparación de materias primas, seguida de su mezcla, generalmente realizada en lotes, donde se combinan ingredientes como caucho, negro de carbón, óxido de zinc, azufre, caucho regenerado y ablandadores a temperaturas de entre 100 y 170 °C. Una vez completada esta fase, el lote se retira del mezclador y se transforma en una lámina continua conocida como "película o goma". Esta película se divide en cuatro partes y se dirige a cuatro procesos distintos para obtener las partes que conformarán el neumático. Estos procesos se relacionan con la etapa 2: formación de cinturones, revestimiento de telas, extrusión y conformado de pestañas para producir diferentes componentes del neumático.

Luego, en la etapa 3, conocida como la etapa de construcción del neumático, se ensamblan dos conjuntos: primero, la unión del innerliner, tela de cuerpo, laterales y talones, lo que da lugar a la carcasa; y después, la unión de la carcasa con los cinturones estabilizadores y la banda de rodamiento, lo que produce el neumático verde.

En la etapa 4, el neumático pasa por el proceso de vulcanizado, donde se somete a altas temperaturas en una prensa, adoptando los patrones de la banda de rodamiento. Finalmente, en la etapa 5, se realiza la inspección final, que consta de dos tipos de revisiones: una inspección manual y visual, y una técnica. Si el neumático supera la inspección final, se almacena en el almacén para su posterior distribución y venta. En la figura 2.2 se muestra el proceso en un mapa descriptivo según los datos en (Castro, 2008; Faicán Matute y Calle González, 2011).

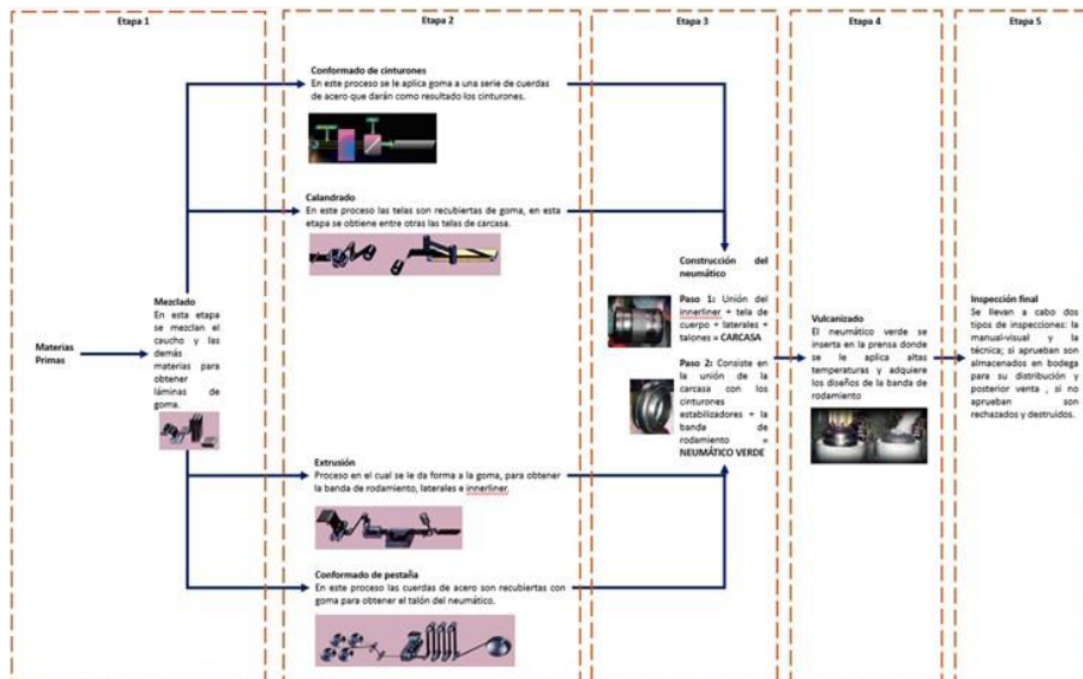


Figura 2.2: Proceso de fabricación del neumático. Nota. La figura muestra el proceso de fabricación de neumáticos, elaborado con datos de Castro (2008)

Cada componente del neumático ha sido diseñado para resistir las intensas presiones y el desgaste que experimenta. El neumático consta de seis partes esenciales: la banda de rodadura, el cinturón, la carcasa, el talón, el revestimiento interior y el flanco (según TNU, 2017). El proceso de producción puede variar dependiendo de la construcción, el tamaño y el tipo de vehículo para el que se destine el neumático (Groover, Aguilar, Lopez, y Palafox, 2014).

Los neumáticos se presentan en diversas dimensiones y diseños, adaptados a su uso y al fabricante. Existen varios tipos de neumáticos, todos diseñados con el propósito de satisfacer requisitos fundamentales de calidad, seguridad y durabilidad tal como lo señala Castro, 2008. A continuación, se detallan de manera general sus características, según la Secretaría de Energía (2017):

- Neumáticos para autopistas, también conocidos como "neumáticos de verano", están diseñados para proporcionar tracción adecuada tanto en carreteras mojadas como secas.
- Neumáticos para nieve, que ofrecen máxima tracción en condiciones de hielo, con una banda de rodadura diseñada para un óptimo agarre y materiales especiales para climas fríos.

- Neumáticos para toda temporada, aptos para operar en condiciones de lluvia o nieve, combinando manejabilidad y beneficios de los neumáticos para autopistas.
- Neumáticos de alto desempeño, que ofrecen un gran nivel de manejabilidad, agarre y rendimiento, además de soportar altas temperaturas y velocidades.
- Neumáticos para toda temporada y alto desempeño, que combinan las características de los tipos anteriores, tanto en carreteras secas como mojadas.

La identificación del tipo de neumático se logra a través de la inscripción en el flanco del neumático, donde se detallan aspectos como la marca, la dimensión, la anchura, la altura del flanco, el diámetro, la estructura, el índice de carga y el índice de velocidad.

El mercado de neumáticos presenta una amplia gama de marcas, con clasificaciones basadas en su reputación, calidad, precio y consideraciones generales. Estas marcas y fabricantes se dividen en tres categorías: premium, calidad y económicos (Linares Campos y cols., 2023). En la Tabla 2.1 se muestra la clasificación de 85 marcas de neumáticos en función de su calidad, identificadas por calidad premium, calidad media y calidad baja).

Premium	Quality	Budget		
Neumáticos Michelin	Neumáticos Fulda	Neumáticos Aurora	Neumáticos Minerva	Neumáticos Nokian
Neumáticos Bridgestone	Neumáticos Sava	Neumáticos Backlion	Neumáticos Nankang	Neumáticos Metzeler
Neumáticos Continental	Neumáticos Barum	Neumáticos Event	Neumáticos Ovation	Neumáticos Triangle
Neumáticos Goodyear	Neumáticos General	Neumáticos Federal	Neumáticos Pace	Neumáticos Accelera
Neumáticos Dunlop	Neumáticos Maxxis	Neumáticos Fedima	Neumáticos Powertrac	Neumáticos Aeolus
Neumáticos Pirelli	Neumáticos Mabor	Neumáticos Firemax	Neumáticos Primewell	Neumáticos Alliance
Neumáticos Kumho	Neumáticos Dayton	Neumáticos Fortuna	Neumáticos Rapid	Neumáticos Apollo
Neumáticos Hankook	Neumáticos Firestone	Neumáticos Fullway	Neumáticos Roadstone	Neumáticos Aplus
	Neumáticos Toyo	Neumáticos Gislaved	Neumáticos Rotalla	Neumáticos Aptany
	Neumáticos Kleber	Neumáticos Goodride	Neumáticos Seiberling	Neumáticos Kapsen
	Neumáticos BFgoodrich	Neumáticos Gremax	Neumáticos Semperit	Neumáticos Kenda
	Neumáticos Falken	Neumáticos GT Radial	Neumáticos Silverstone	Neumáticos Landsail
	Neumáticos Nexen	Neumáticos Infinity	Neumáticos Sportiva	Neumáticos Linglong
	Neumáticos Avon	Neumáticos Hifly	Neumáticos Starfire	Neumáticos Mata dor
	Neumáticos Cooper	Neumáticos Insa Turbo	Neumáticos Sunny	Neumáticos Maxtrek
	Neumáticos Marshall	Neumáticos Jinyu	Neumáticos Tracmax	Neumáticos Viking
		Neumáticos Zenises	Neumáticos Zeta	Neumáticos Tigar
		Neumáticos Kelly	Neumáticos Yokohama	Neumáticos Taurus
		Neumáticos Kormoran	Neumáticos Vredestein	Neumáticos Achilles
		Neumáticos Lassa	Neumáticos Debica	Neumáticos Wanli

Cuadro 2.1: Clasificación de marcas de neumáticos. (Linares Campos y cols., 2023)

En este contexto, a pesar de la amplia variedad de marcas de neumáticos, la composición es notablemente homogénea. Los Cuadros 2.2, 2.3 y 2.4 (Datos tomados por Castro (2008), Ramos, Alguacil, y López Gómez (2011) y Sharma, Fortuna, Mincarini, Berillo, y Cornacchia (2000)) presentan los valores promedio de los componentes principales y las características del neumático, junto con su análisis químico y la identificación de elementos potencialmente peligrosos. Se puede observar que el componente fundamental es el caucho, con una proporción que oscila entre el 45 % y el 47 %, y que el poder calorífico se sitúa

entre 32 y 34 MJ/Kg. Además, el porcentaje de carbón alcanza el 70 %, pero es importante destacar la presencia de un metal pesado, el plomo, que varía de 60 a 760 ppm.

CARACTERÍSTICA	COMPOSICIÓN	FUNCIÓN
Composición	Caucho sintético y natural 45–47 % Negro de carbón 21.5–22 % Acero 16.5–25 % Textil 5.5 % (Vehículo de pasajero) Oxido de zinc 1-2 % Azufre 1 % Aditivos 5–7.5 %	Tensión estructural Propiedades físicas mejoradas Esqueleto estructural Esqueleto estructural Catalizador Aguante vulcanizante
Metales pesados	Contenido de tazas de cobre, cadmio y plomo.	
Alto poder calorífico	32 – 34 MJ/Kg – 1 (1 tonelada es equivalente a 0.7 toneladas petróleo)	
Temperatura de autoignición	400 C	
Peso	6.5–11Kg (Automóvil) 50–80kg (Camiones)	

Cuadro 2.2: Valores promedio de los componentes principales.

Contenido del componente	(% en peso)	Contenido (g)
Compuesto de cobre	Aprox. 0.02	Aprox. 1.4
Compuesto de cadmio	Max. 0.001	Max. 0.07
Compuesto de zinc	Aprox. 1	Aprox. 70
Compuesto de plomo	Max. 0.005	Max. 0.35
Soluciones acidas o ácidos de forma solida	Aprox. 0.3	Aprox. 21
Compuestos organohalogenados	Max. 0.1	Max. 77
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	0	0

Cuadro 2.3: Componentes peligrosos del neumático.(Parte I)

ELEMENTO QUÍMICO	PORCENTAJE (%)
Carbono (<i>C</i>)	70
Hidrógeno (<i>H</i>)	7
Azufre (<i>S</i>)	1 ... 3
Cloro (<i>Cl</i>)	0.2 ... 0.6
Fierro (<i>Fe</i>)	15
Óxido de cinc (<i>ZnO</i>)	2
Dióxido de silicio (<i>SiO₂</i>)	5
Cromo (<i>Cr</i>)	97-ppm
Níquel (<i>Ni</i>)	77-ppm
Plomo (<i>Pb</i>)	60-760ppm
Cadmio (<i>Cd</i>)	5-10ppm
Talio	0.2 – 0.3ppm

Cuadro 2.4: Componentes peligrosos del neumático.(Parte II)

2.2 Información general sobre neumáticos sin usar y revisiones de neumáticos

Es crucial tener en cuenta que la contaminación del entorno comienza en la fase de fabricación de los neumáticos. La industria de los neumáticos se caracteriza por niveles significativos de contaminación y un consumo elevado de energía. Su contaminante principal es el carbono, el cual ejerce un fuerte impacto en el medio ambiente (Tsai, 2018). Durante el proceso de fabricación, se emplean más de 200 componentes distintos con el propósito de conferirles una resistencia excepcional, lo que los hace prácticamente indestructibles. Además, la producción de tan solo 4 neumáticos nuevos consume aproximadamente 7,800 litros de agua, como lo menciona TNU (Tratamiento neumáticos usados) en 2017.

Es importante destacar que la contaminación persiste incluso mientras los neumáticos están en uso, según investigaciones realizadas por Tsai (2018). Estudios han revelado que, a velocidades de 80 km/h, los neumáticos liberan partículas ultrafinas de la banda de rodadura, y este proceso se intensifica cuando los neumáticos se someten a fricción severa, como señala Park, Kim, y Lee (2018). En la banda de rodadura se encuentran elementos cuyo desgaste contribuye a la contaminación ambiental, incluyendo metales pesados como el níquel (Ni), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb) y otros, según Adachi y Tainosho (2004).

Los estudios sobre el ciclo de vida de los neumáticos han concluido que la mayor contaminación del entorno se produce durante su uso, mientras que el mayor impacto en la salud humana se origina durante su proceso de producción, de acuerdo con Piotrowska y cols. (2019).

2.2. Información general sobre neumáticos sin usar y revisiones de neumáticos

Con frecuencia, se estima que la vida útil de los neumáticos se sitúa en torno a los 50,000 kilómetros, equivalente a unos 5 años, si bien esta estimación está sujeta al mantenimiento del vehículo y a las condiciones de las vías por las cuales circula (Juan, 2012). La decisión de reemplazar un neumático se ve influenciada por el indicador de desgaste de la banda de rodadura, que, al alcanzar una profundidad de 1.6 mm, se considera el umbral mínimo para garantizar la seguridad del vehículo (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015). Un neumático fuera de uso se define como aquel que ha cumplido su función original y ha agotado su ciclo de vida debido al desgaste natural de la banda, la cantidad de kilómetros recorridos o la presencia de defectos.

La valorización de un neumático fuera de uso se centra en la recuperación de sus materiales, así como en la explotación de su contenido calorífico. Los elementos separables comprenden caucho, metal y fibra, y la valorización se determina según las propiedades particulares del neumático, como la capacidad de absorción de vibraciones, la capacidad de drenaje, el peso reducido, la resistencia al corte, la alta resistencia a los agentes climatológicos, la flexibilidad y el elevado poder calorífico. Además, se destina a un proceso

de valorización específico, según lo indicado por estudios como los de Cano, Cerezo, y Urbina (2007) y Juan (2012).

Diversas técnicas permiten llevar a cabo la valorización material y/o energética, según investigaciones previas (Cano y cols., 2007). Entre ellas se encuentran:

- Tecnologías fuera de los sistemas de reciclado del material.
- Tratamientos mecánicos.
- Tecnologías de reducción de tamaño.
- Tecnologías de regeneración.
- Otras tecnologías, como pirólisis e incineración.

2.2.1. Métodos para la valorización de materiales.

A continuación se presenta una lista con métodos para el aprovechamiento de los materiales:

- La reutilización implica dar nuevos usos a neumáticos desgastados, como en la construcción de rompeolas, barreras, taludes, juegos infantiles, entre otros (Cano y cols., 2007; Rodríguez Illescas y cols., 2017).
- El reencauchado posibilita la reutilización de la carcasa del neumático al aplicar una nueva banda de rodadura (Cano y cols., 2007; Rodríguez Illescas y cols., 2017).
- La molienda a temperatura ambiente implica la separación de metal, fibra y goma, reduciendo esta última a polvo grueso o ultrafino (Cano y cols., 2007; Rodríguez Illescas y cols., 2017).
- La molienda criogénica consiste en enfriar el caucho a temperaturas muy bajas (-200°C) mediante nitrógeno líquido, volviéndolo frágil y permitiendo obtener partículas muy finas mediante molinos de discos o martillos (Sharma y cols., 2000).
- La molienda húmeda involucra ruedas de molienda con agua pulverizada para enfriar el polvo; posteriormente, se separa el agua del polvo y se seca (Cano y cols., 2007).
- La desvulcanización utiliza procesos físicos y químicos; el primero requiere una fuente de energía externa, como procesos mecánicos, termomecánicos o criomecánicos, mientras que el segundo utiliza agentes químicos como los disulfuros (Cano y cols., 2007).

2.2.2. Métodos para la optimización energética.

La valorización energética, en términos generales, se desglosa en dos categorías principales: la pirólisis y la combustión (incineración).

1. **Pirólisis:** En este procedimiento, se someten los fragmentos de neumático (1-3 cm) a temperaturas moderadas (400-800°C) en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo. La degradación térmica del material provoca la descomposición del neumático, donde los componentes orgánicos volatilizables, principalmente cadenas de caucho, se desintegran en forma de gases y líquidos, mientras que los elementos inorgánicos, principalmente acero y negro de carbono no volátil, permanecen como residuo sólido (Cano y cols., 2007).
2. **Incineración:** Este proceso de combustión es espontáneo a temperaturas superiores a 400°C, altamente exotérmico y se vuelve autosuficiente una vez iniciado. Sin embargo, enfrenta desafíos asociados a la velocidad variable de combustión de los distintos componentes y la necesidad de depuración de los residuos, lo que dificulta su control y, además, lo hace contaminante (Rodríguez Illescas y cols., 2017).

2.2.3. Utilización de los materiales derivados en las fases de valorización.

Cuando se lleva a cabo el proceso de valorización de un neumático fuera de uso, se generan una variedad de materiales que incluyen neumáticos enteros, trozos, tiras, astillas, granulado de neumático, polvo de neumático, polvo fino de neumático, entre otros. Estos materiales encuentran diversas aplicaciones que abarcan desde su uso en proyectos de Ingeniería civil hasta la fabricación de productos industriales, según lo indicado por Cano y cols., 2007.

2.3. Aspectos generales del neumático en desuso

En México, la Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH) estima que el 91 % de todos los neumáticos de desuso procede de coches, camionetas y camiones pesados, mientras que el 9 % restante son de motocicletas, aviones, equipo de construcción y otros; La Asociación de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras A.C. (ANDELLAC), estimó que del total de neumáticos de desuso en la República Mexicana (Gobierno del Distrito Federal, 2002):

- El 5 % experimenta un proceso de renovación,
- el 2 % se destina a la generación de energía,
- el 2 % se deposita en instalaciones de almacenamiento autorizadas,

- y el 91 % permanece abandonado o se emplea de manera no regulada.

En el presente estudio, se caracterizará al neumático en desuso como un residuo clasificado como manejo especial, cuya disposición final puede realizarse en centros de acopio debidamente autorizados, tal como se ilustra en la Figura 2.3, en lugares clandestinos (abandono), evidenciado en la Figura 2.4, o bien, son dirigidos a procesos de incineración en cementeras, como se muestra en la Figura 2.5, o incluso se queman a cielo abierto, como se indica en la Figura 2.6.



Figura 2.3: Centro de acopio autorizado, Navojoa, Sonora.
Fuente: IESA (2017)



Figura 2.4: Centro de acopio clandestino (abandono), Novolato, Sinaloa.
Fuente: IESA (2017)



Figura 2.5: Zona de almacenamiento de neumáticos previo a su uso como combustible en la industria cementera.

Fuente: IESA (2017)



Figura 2.6: Incineración a cielo abierto de neumático de desecho, Villa de Cloete, Sabinas, Coahuila.

Fuente: Propia

Cada año, aproximadamente 1,000 millones de neumáticos en desuso son generados globalmente, equivalente a alrededor de 17 millones de toneladas (López, Centeno, y Alguacil, 2012; Yadav y Tiwari, 2019). En naciones desarrolladas, la tasa de generación de este residuo se establece en un neumático desechado por habitante, con un peso promedio de 9 kg (COCEF., 2008; SEMARNAT., 2012; Yadav y Tiwari, 2019). Se estima que en Europa se producen alrededor de 3.4 millones de toneladas anuales, 4.6 millones de toneladas en Estados Unidos (Ahoor y Zandi-Atashbar, 2014), y 1 millón de toneladas en Japón (Laresgoiti y cols., 2004). En el caso de México, se estima una generación promedio anual de 1,011,033 toneladas para el período de 2006 a 2012 (SEMARNAT., 2012).

Al aplicar la tasa de generación a México y considerar la población total reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2018, que estima una población de 124,737,789 habitantes, se calcula que más de 124 millones de neumáticos fueron descartados en ese año (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). El rápido crecimiento de poblaciones y economías ha resultado en un aumento en la generación de residuos (Ortíz-Rodríguez, Ocampo-Duque, y Duque-Salazar, 2017). En México, el crecimiento entre 2015 y 2018 fue de 119,530,753 a 124,737,789 millones de habitantes, un aumento de aproximadamente 5,207,036 millones en tres años (INEGI, 2015).

Considerando los porcentajes estimados proporcionados por la ANDELLAC para 2018, se obtienen los siguientes datos:

- Hay 124,737,789 neumáticos en desuso.
- El 5 % se renueva, lo que equivale a 6,236,889.
- El 2 % se utiliza para generación de energía, correspondiente a 2,494,756.
- El 2 % se deposita en centros de acopio autorizado, también 2,494,756.
- El 91 % queda en abandono o se utiliza sin control, representando 113,511,388 neumáticos desechados.

Cabe destacar que la información presentada se refiere únicamente a la cantidad desechada en un año y no incluye estimaciones a lo largo del tiempo ni la contabilización por año de neumáticos en desuso importados legalmente desde Estados Unidos, ni se disponen de datos específicos sobre los neumáticos importados como "gallitos" desde Estados Unidos, ni se tiene registro de importaciones ilegales o traslados clandestinos que ocurren en la frontera con E.U.A.

2.4. Amenazas para la salud y el entorno

Los neumáticos carecen de biodegradabilidad debido al proceso de vulcanización durante su fabricación, donde se someten a un tratamiento con azufre a altas temperaturas para endurecerse, impidiendo así el ataque bacteriano y contribuyendo a su permanencia indefinida en el entorno hasta que se queman (Faicán Matute y Calle González, 2011; Murray, 2003). Al finalizar su ciclo de vida útil, se depositan en patios, vertederos clandestinos, espacios públicos y centros de acopio tanto públicos como privados. Si no se gestionan adecuadamente, representan un riesgo ambiental y para la salud humana, al convertirse en refugios propicios para roedores y criaderos de mosquitos como el *Aedes aegypti* y *A. albopictus*, portadores del dengue y la fiebre amarilla (Higa y cols., 2010; Honório, Cabello, Codeço, y Lourenço-de Oliveira, 2006). Además, generan problemas de contaminación visual y ocupan espacios vitales para la naturaleza (COCEF., 2008). La eliminación inapropiada puede obstruir cursos de agua, arroyos y canales de drenaje pluvial, lo que, junto con las alteraciones en el flujo, puede provocar erosión e inundaciones (PNUMA, 2011).

Dada su composición, son difíciles de encender, pero una vez que se produce un incendio, resulta complicado controlarlo y extinguirlo; dicho incendio puede perdurar durante meses (Agency, 2010). Estudios indican que la contaminación del agua derivada de la escorrentía generada por incendios puede persistir hasta 100 años, y la disposición en vertederos es perjudicial, ya que tienden a resurgir y dañar las capas, afectando a largo plazo el asentamiento del suelo y su rehabilitación (Machin, Pedroso, y de Carvalho Jr, 2017).

La incineración produce una significativa emisión de contaminantes, incluyendo una amplia variedad de hidrocarburos y compuestos halogenados clorados (metanos clorados, dioxinas y bifenilos policlorados, formados por carbón, hidrógeno y cloro) (Downard y cols., 2015). La contaminación resultante puede extenderse en una amplia área afectando no solo al aire, sino también al agua y al suelo (Agency, 2010).

La exposición humana a las emisiones derivadas de la quema de neumáticos principalmente ocurre por la inhalación del aire contaminado, dependiendo de la proximidad a la fuente, la intensidad y la dispersión del humo (Downard y cols., 2015). Los efectos de la inhalación del humo pueden ocasionar intoxicaciones agudas o subagudas, irritación y congestión de las vías respiratorias superiores e inferiores por partículas de hollín, sofocación por vapores ácidos (especialmente compuestos de azufre y nitrógeno) e intoxicación por monóxido de carbono. Estos fenómenos pueden llevar al coma o incluso a la muerte por asfixia durante exposiciones intensas (Centre Français du Caoutchouc et des Polymères industriels, 2007).

En la siguiente lista hecha por Linares Campos y cols. se presentan los efectos en organismos vivos y ecosistemas como resultado de la exposición a los componentes emitidos durante la quema, entre los que se incluyen el monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos, entre otros.

- **Monóxido de Carbono:** En el cuerpo humano, ocasiona una reducción en la capacidad de llevar oxígeno en la sangre, trastornos cardíacos, afectaciones en el sistema nervioso, cefaleas, vértigos y fatiga. Además, participa en la generación de gases de efecto invernadero, con una permanencia atmosférica de aproximadamente tres meses.
- **Hidrocarburos aromáticos policíclicos:** Inducen la aparición de cáncer, anomalías, disfunciones y deformidades genéticas. En términos ambientales, exhiben persistencia y una descomposición desafiante, lo que resulta en una prolongada presencia en el entorno durante años, generando impactos significativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres.
- **Dioxinas y Furanos:** La exposición afecta órganos vitales como el corazón, sistema inmunológico, hígado, piel y la glándula tiroides, pudiendo incluso inducir el desarrollo de cáncer reproductivo. Desde el punto de vista medioambiental, su descomposición es extremadamente lenta, persistiendo durante largos períodos y pudiendo acumularse en organismos, ingresando así a la cadena alimentaria.
- **Ácido clorhídrico:** La inhalación puede resultar en neumonitis y edema pulmonar, desencadenando el Síndrome de Disfunción Reactiva de Vías Respiratorias, una forma de asma inducida por la exposición a productos químicos o agentes irritantes. Además, muestra una alta capacidad de irritación para las membranas mucosas de la nariz, la garganta y el tracto respiratorio.
- **Benceno:** Es ampliamente reconocido como un agente carcinógeno; la inhalación de esta sustancia puede ocasionar somnolencia, mareos, aumento de la frecuencia cardíaca, dolores de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento. En caso de ingestión, induce vómitos, irritación estomacal, mareos y convulsiones con palpitaciones cardíacas rápidas. Esta sustancia ejerce su acción en la sangre, causando perturbaciones en la médula ósea y una reducción en el número de glóbulos rojos. Desde una perspectiva ambiental, actúa como un carcinógeno y presenta una alta toxicidad para los animales, generando alteraciones y malformaciones en sus organismos.
- **Bifenilos policlorados:** Son compuestos químicos con una capacidad de biodegradación extremadamente baja, lo que los hace altamente persistentes en el entorno. Exhiben propiedades de bioacumulación en los organismos, lo que significa que pueden concentrarse a medida que los seres vivos se consumen unos a otros a lo largo de la cadena alimentaria. Esto puede resultar en concentraciones significativamente elevadas en los grandes depredadores en comparación con los organismos inferiores, dando lugar a procesos de biomagnificación. Sus efectos pueden incluir daños en el sistema nervioso central, endocrino o reproductivo, malformaciones fetales,

trastornos del comportamiento, diabetes, reducción del período de lactancia y carcinogénesis.

- **Arsénico:** La exposición a estas sustancias provoca irritación en el estómago e intestino, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel e irritación de los pulmones. En caso de ingestión, aumenta la probabilidad de desarrollar cáncer de piel, pulmón, hígado y sistema linfático. Exposiciones a niveles muy altos pueden resultar en infertilidad y abortos en mujeres, trastornos cutáneos, pérdida de la resistencia a infecciones, problemas cardíacos, daño cerebral tanto en hombres como en mujeres, y provocar daños en el ADN. En cuanto a su impacto ambiental, la presencia de arsénico inorgánico en el suelo y en las aguas superficiales incrementa la posibilidad de alterar el material genético de los peces.
- **Cadmio:** Este compuesto es irritante para los ojos y el tracto respiratorio, su inhalación puede provocar edema pulmonar, fiebre de los humos metálicos, diarreas, dolor estomacal, vómitos severos, fracturas óseas, fallos en la reproducción e incluso la posibilidad de infertilidad, y daño en el sistema nervioso central, entre otros efectos. En cuanto a su impacto ambiental, las concentraciones elevadas de este elemento en el suelo generan alteraciones en los procesos microbiológicos, poniendo en riesgo el adecuado funcionamiento del medio ambiente. En el medio marino, puede bioacumularse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces.
- **Metano:** La inhalación de este compuesto puede dar lugar a asfixia debido a la disminución del contenido de oxígeno en el aire, llevando a pérdida de conocimiento e incluso a la muerte. En el caso de exposición cutánea, puede causar efectos de congelación graves. En términos medioambientales, es el segundo compuesto que más contribuye al calentamiento global de la Tierra (efecto invernadero), representando un 15 %, siendo superado únicamente por el dióxido de carbono con un 76 %.
- **Cromo:** La inhalación de este compuesto puede ocasionar problemas de salud significativos, como malestar estomacal y úlcera, dificultades respiratorias, debilitamiento del sistema inmunológico, daño en los riñones y el hígado, alteración del material genético y riesgo de cáncer de pulmón. En el entorno ambiental, las plantas absorben el cromo, pero un aumento de esta sustancia en el suelo puede tener efectos adversos en su desarrollo.
- **Vanadio:** La inhalación de este compuesto puede ocasionar bronquitis y neumonía. Los efectos más graves incluyen irritación de los pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales, daño cardíaco y vascular, inflamación del estómago e intestinos, daño en el sistema nervioso, sangrado en el hígado y los riñones, irritación de la piel, temblores severos y parálisis, sangrado de la nariz, dolor de cabeza, mareos y cambios de comportamiento. Pruebas de laboratorio en animales han demostrado que el vanadio puede causar daño en el sistema reproductivo de animales machos y

alteraciones en el ADN en algunos casos, aunque no ha demostrado causar cáncer en animales.

- Zinc: El contacto con esta sustancia puede resultar en irritación de los ojos, la piel y el tracto respiratorio, con posibles efectos en la sangre, como la metahemoglobinemia, así como afectar el riñón y provocar vómitos, náuseas y anemias en caso de ingestión en cantidades elevadas. En el medio acuático, esta sustancia contribuye a la acidificación de las aguas superficiales. En el suelo, el zinc ejerce un efecto tóxico sobre las plantas, inhibiendo su crecimiento y desarrollo, y limitando sus condiciones de supervivencia.
- Níquel: La inhalación de esta sustancia puede ocasionar inflamaciones y ulceraciones en la cavidad nasal, fallos respiratorios, trastornos cardíacos, mientras que el contacto con la piel puede desencadenar dermatitis, entre otras complicaciones. Para los animales, este elemento se considera cancerígeno.

2.5. Investigaciones ecotoxicológicas acerca de los impactos ambientales de los neumáticos.

Se han llevado a cabo estudios sobre el impacto ecotoxicológico de los neumáticos, en su mayoría centrándose en lixiviados generados a partir de la ralladura obtenida de la banda de rodamiento. Estos estudios han investigado diferentes temperaturas y condiciones, incluyendo la presencia o ausencia de radiación ultravioleta, con el propósito de identificar posibles efectos a corto plazo. Los organismos acuáticos evaluados en estos estudios abarcan diversas categorías taxonómicas, como peces, crustáceos y algas (Marwood y cols., 2011; Wik y Dave, 2005; Wik y Dave, 2006). Entre los crustáceos utilizados como modelo en estos estudios ecotoxicológicos, destaca *Daphnia magna*, reconocido como un bioindicador importante en comunidades de agua dulce debido a su amplia distribución geográfica. Este organismo presenta ventajas como su reproducción partenogenética, ciclo de vida corto, alta tasa de reproducción, sensibilidad a diversos compuestos tóxicos y facilidad relativa de cultivo en el laboratorio, de acuerdo con la normativa NMX-AA-087-SCFI-2010 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010).

En 1995, el Instituto Pasteur de Lille (Francia) realizó dos estudios con el objetivo de evaluar la toxicidad del polvo de caucho obtenido de carcassas de neumáticos en organismos como algas *S. Capricornutum*, crustáceos *Daphnia magna* y peces *Brachydanio rerio*. Los resultados de ambas pruebas no mostraron evidencia de toxicidad, según información proporcionada por el PNUMA (2011).

En 2005, Wik y Dave llevaron a cabo un estudio para examinar la viabilidad de utilizar pruebas de toxicidad con *Daphnia magna* como criterio para el etiquetado ambiental de neumáticos de automóvil. Se evaluó la toxicidad de 12 neumáticos de automóvil seleccionados al azar, triturando la banda de rodadura en pequeños trozos para simular

el material de desgaste. La CE50 a las 24 horas varió entre 0.29 g y 32 g/L, mientras que a las 48 horas osciló entre 0.0625 g y 2.41 g/L. Se observó que los neumáticos de verano eran más tóxicos que los de invierno, y se concluyó que este método podría servir como base para el etiquetado ambiental de neumáticos de automóviles (Wik y Dave, 2005).

En 2006, realizaron otra investigación sobre los efectos tóxicos de 25 neumáticos diferentes. Rallaron la banda de rodadura para simular el material de desgaste, lo equilibraron con agua de dilución a 44 °C durante 72 horas, filtraron el caucho de los lixiviados y agregaron organismos de prueba. La CE50 a las 48 horas varió entre 0.5 g/L y mayor que 10.0 g/L (Wik y Dave, 2006).

En 2009, investigaron la toxicidad de tres neumáticos diferentes utilizando varios organismos de prueba, incluyendo algas verdes *Pseudokirchneriella subcapitata*, crustáceos *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia Dubia* y huevos de pez cebra *Danio rerio*. Rasparon el caucho para obtener el lixiviado y realizaron seis lixivitaciones secuenciales. La reproducción de *C. dubia* resultó ser el criterio más sensible, con una CE50 de 0.013 g/L. Concluyeron que la toxicidad de los neumáticos disminuyó con las lixivitaciones secuenciales y que, después de la sexta lixivitación, las CE fueron mayor que 0.1 g/L para todos los criterios de valoración. Las evaluaciones de identificación de toxicidad sugirieron que la toxicidad estaba relacionada principalmente con zinc y compuestos orgánicos lipofílicos (Wik y cols., 2009).

En 2011, Marwood y cols. y sus colaboradores llevaron a cabo un estudio utilizando elutriados de sedimentos de partículas de desgaste de la banda de rodadura de neumáticos. Los sedimentos se obtuvieron de un laboratorio de simuladores de carreteras del Instituto Federal de Investigación de Carreteras de Alemania, donde se rodaron tres neumáticos diferentes. Los sedimentos se combinaron, tamizaron a 150 micrometros y se mezclaron con agua dura para formar cuatro concentraciones (100, 500, 1000 y 10000 mg/L). La mezcla se agitó con rotores de acero inoxidable durante 24 horas a 22 ± 2 °C. Posteriormente, evaluaron la toxicidad aguda en tres organismos de prueba: el pez *Pimephales promelas*, el crustáceo *Daphnia magna* y el alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. Concluyeron que las partículas de desgaste no fueron agudamente tóxicas para ninguna de las especies, ya que todas las CE50 superaron los 10,000 mg/L. Además, mediante un análisis de componentes, identificaron que el zinc y la anilina son los tóxicos más probables en este contexto (Marwood y cols., 2011).

Capítulo 3

Marco Jurídico

En México, el marco jurídico ambiental está sólidamente constituido para proteger el entorno natural de contaminantes diversos, asegurando que tanto los actores económicos como las autoridades participen activamente en la gestión y mitigación del impacto ambiental. Este marco legal abarca desde la definición de responsabilidades específicas para los diferentes sectores involucrados hasta la implementación de políticas preventivas y sanciones para aquellos que dañen el medio ambiente. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, junto con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), forman la columna vertebral de este sistema normativo.

3.1. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF 2018): Estructura y Alcance

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2018) es una ley fundamental que regula todos los aspectos relacionados con la generación, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos en México. En su **Título Primero**, bajo las **Disposiciones Generales**, específicamente en el **Artículo 1, sección VI**, se establece la competencia de esta ley para definir las responsabilidades de los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades en todos los niveles de gobierno, así como de los prestadores de servicios involucrados en el manejo integral de residuos. Esta definición de competencias es crucial porque asegura que cada uno de estos actores conozca y cumpla con sus obligaciones, evitando así que los residuos terminen gestionados de manera inapropiada.

La ley no solo se limita a definir responsabilidades, sino que también busca fomentar una cultura de prevención y valorización de los residuos. La **gestión integral de los residuos** implica no solo su adecuada disposición, sino también su reducción en la fuente, reciclaje

y recuperación de materiales, minimizando así el impacto ambiental y promoviendo una economía circular.

3.1.1. Clasificación de Residuos y su Gestión: Focalización en los Neumáticos Usados

Uno de los aspectos más destacados de esta ley es la clasificación de los residuos. En su **Título Tercero, el Artículo 19, sección X** clasifica a los neumáticos usados como **residuos de manejo especial**. Esta clasificación es esencial porque determina las obligaciones específicas para su manejo. Los neumáticos, al final de su vida útil, representan un desafío ambiental significativo debido a su volumen, durabilidad y composición química, que dificulta su degradación natural. Sin una gestión adecuada, estos residuos pueden convertirse en focos de contaminación, afectando tanto a los suelos como al agua y al aire (DOF, 2018).

La clasificación de los neumáticos como residuos de manejo especial exige que estos reciban un tratamiento específico y controlado. No pueden ser simplemente desechados como basura común, sino que deben ser recolectados, almacenados y procesados de acuerdo con normativas especiales. Estas normativas buscan evitar que los neumáticos terminen en vertederos inadecuados o sean incinerados de manera informal, lo cual podría liberar sustancias tóxicas al ambiente.

3.1.2. Instrumentos de Política de Prevención y Gestión: Planes de Manejo Obligatorios

En el **Título Cuarto**, que aborda los **Instrumentos de la Política de Prevención y Gestión Integral de los Residuos**, se estipula en el **Capítulo II, Artículo 28, sección III** que están obligados a formular y ejecutar planes de manejo aquellos actores considerados grandes generadores, así como los productores, importadores, exportadores y distribuidores de productos que, al desecharse, se convierten en residuos sólidos urbanos o de manejo especial. Esta obligación incluye también a los residuos de envases plásticos, entre ellos los de poliestireno expandido, y los neumáticos usados (DOF, 2018).

Estos **planes de manejo** son herramientas fundamentales dentro del marco jurídico, ya que detallan las estrategias que cada actor debe implementar para asegurar el manejo adecuado de los residuos que genera. Los planes de manejo deben incluir acciones concretas para la recolección, transporte, almacenamiento, reciclaje o disposición final de los residuos, garantizando así que se minimice el impacto ambiental y se cumpla con las normativas vigentes.

En el caso específico de los neumáticos usados, el plan de manejo puede incluir desde la recolección de neumáticos en puntos específicos hasta su procesamiento para

la recuperación de materiales o su reutilización en otros productos, como materiales de construcción o combustibles alternativos. Estos planes también pueden contemplar campañas de concienciación dirigidas a los consumidores finales para promover el reciclaje y la correcta disposición de los neumáticos al final de su vida útil.

3.2. Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011: Detalles y Obligaciones

La **NOM-161-SEMARNAT-2011** es una norma oficial mexicana que complementa la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos al establecer criterios específicos para **la clasificación de los Residuos de Manejo Especial** y determinar cuáles de ellos están sujetos a un Plan de Manejo. Esta norma incluye un **Anexo Normativo** donde se presenta un listado exhaustivo de los residuos considerados de manejo especial, siendo el **neumático de desecho** uno de ellos.

Dentro de este anexo, en el número IV, se clasifica al neumático de desecho como un residuo derivado de las actividades del **transporte federal**, que abarca desde servicios en puertos y aeropuertos hasta centrales camioneras y estaciones de autotransporte. Además, se incluyen los neumáticos generados por el transporte público. La norma exige que todo generador que produzca una cantidad mayor a 10 toneladas anuales de estos residuos presente un **Plan de Manejo**.

Este requerimiento se basa en la idea de que los grandes generadores tienen un impacto ambiental mayor y, por lo tanto, deben ser responsables de mitigar dicho impacto. La presentación de un plan de manejo no es solo una formalidad, sino una herramienta de gestión que permite a las autoridades monitorear y controlar el destino final de los neumáticos usados, evitando que se conviertan en un problema ambiental.

El apartado VIII de la norma, en el inciso “c”, detalla que los neumáticos de desecho, al finalizar su vida útil, se desechan en cantidades significativas, lo que requiere un manejo especial. Esto se debe a que los neumáticos contienen materiales no biodegradables y sustancias químicas que, si no se manejan correctamente, pueden filtrarse en el suelo y las aguas subterráneas, causando contaminación (Diario Oficial de la Federación, 2013).

3.2.1. Obligaciones de las Entidades Federativas y Prohibiciones Específicas

La norma también menciona que son las **entidades federativas** quienes tienen la responsabilidad de establecer las obligaciones específicas de los generadores de residuos, diferenciando entre grandes y pequeños, así como de los prestadores de servicios de manejo de residuos de manejo especial. Estas entidades deben formular los **criterios**

y **lineamientos** para la gestión integral de estos residuos, asegurando que se cumplan las normativas de manera uniforme en todo el territorio nacional.

Además, la norma **prohíbe expresamente** la disposición final de estos residuos en lugares inadecuados, como predios baldíos, barrancas, cañadas, ductos de drenaje y alcantarillado, cuerpos de agua y cavidades subterráneas. Esta prohibición es crucial para prevenir la contaminación y proteger los recursos naturales. La incorrecta disposición de los neumáticos puede resultar en la acumulación de agua, creando criaderos de mosquitos vectores de enfermedades, o en incendios que liberan grandes cantidades de contaminantes atmosféricos (Diario Oficial de la Federación, 2013).

3.2.2. Responsabilidad Extendida de los Productores y Gestores

Finalmente, bajo esta normativa, los fabricantes, importadores, distribuidores, gestores y generadores de neumáticos usados están **obligados a hacerse cargo** de la gestión de estos residuos. Esto incluye garantizar su recolección, transporte, almacenamiento, reciclaje y disposición final de acuerdo con lo establecido en la **norma oficial mexicana correspondiente** y en los **planes de manejo** aprobados.

La responsabilidad extendida del productor es un principio clave que subyace en este marco legal. Este principio asegura que los productores de bienes que, al final de su vida útil, se convierten en residuos, también se responsabilicen de su manejo, promoviendo así un ciclo de vida más sostenible para los productos. En el caso de los neumáticos, esto podría incluir el financiamiento de sistemas de recolección y reciclaje, la investigación y desarrollo de alternativas más ecológicas, y la promoción de la reutilización de materiales (Diario Oficial de la Federación, 2013).

Capítulo 4

Metodología

4.1. Diseño de la Investigación

La investigación se realiza bajo un enfoque mixto, que incluye tanto métodos cuantitativos como cualitativos, con un diseño exploratorio, descriptivo e inferencial. Este enfoque permite una evaluación exhaustiva de la viabilidad financiera, el impacto ambiental y social, y los aspectos técnicos necesarios para la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, México. La investigación se desarrolla en varias fases, cada una con métodos específicos y objetivos claramente definidos.

4.2. Fases de la Metodología

4.2.1. Fase 1: Definición y Diagnóstico del Sistema

La primera fase implica el uso de la Matriz de Macro-Segmentación de Derek Abell, que permite definir los límites del sistema a través de tres dimensiones: clientes, necesidades y tecnologías. En este contexto, se identifica los segmentos de mercado, las necesidades de gestión de residuos y las tecnologías de reciclaje disponibles. El procedimiento incluye la identificación de los principales clientes y usuarios de los productos reciclados, la definición de las necesidades específicas relacionadas con la gestión y reciclaje de neumáticos, y el análisis de las tecnologías existentes y su aplicabilidad en la planta de reciclaje.

Además, se realiza un diagnóstico estratégico utilizando el Árbol de Competencias de Marc Giget. Este análisis permitirá conocer las características, origen y esencia de la empresa, evaluando sus competencias clave y capacidades estratégicas. El procedimiento consistirá en realizar un análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) para identificar las áreas críticas de la empresa, y evaluar las competencias esenciales que la planta de reciclaje debe desarrollar para ser competitiva.

Un estudio socioeconómico se lleva a cabo utilizando bases de datos del INEGI y otros organismos relevantes para describir socioeconómicamente la región de Sabinas, Coahuila.

Este procedimiento incluirá la recolección de datos sobre actividades económicas, recursos naturales, población, parque vehicular, índice de marginación, entre otros. El análisis descriptivo se realizará utilizando herramientas como el software QGIS para la elaboración de mapas y visualización de datos.

4.2.2. Fase 2: Análisis del Sistema

La segunda fase involucra la utilización de las 5 Fuerzas de Porter para evaluar la competitividad dentro de la industria del reciclaje de neumáticos. Este análisis considera el poder de negociación de los compradores, el poder de negociación de los proveedores, la amenaza de nuevos entrantes, la amenaza de productos sustitutos y la rivalidad entre los competidores existentes. El procedimiento consiste en un análisis detallado de cada una de las cinco fuerzas en el contexto de la industria del reciclaje de neumáticos en Sabinas y la evaluación del impacto de estas fuerzas en la viabilidad de la planta de reciclaje.

También se utiliza la Matriz de Atractividad del Mercado para determinar la posición estratégica a largo plazo de la planta de reciclaje. Este análisis ponderará variables cualitativas y cuantitativas relevantes como el tamaño del mercado, la tasa de crecimiento y la competitividad. El procedimiento incluirá la identificación y ponderación de cada variable, seguida de un análisis de la atractividad del mercado.

Se implementa una Matriz de Perfil Competitivo (MPC) para comparar la empresa con sus competidores directos utilizando factores críticos de éxito. El procedimiento consistirá en la identificación de competidores clave y factores críticos de éxito, seguida de una evaluación comparativa de la planta propuesta frente a sus competidores.

Un análisis PESTEL se lleva a cabo para examinar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos y legales externos a la empresa. El procedimiento incluirá la recolección y análisis de datos sobre cada uno de los factores PESTEL y la evaluación del impacto de estos factores en la operación de la planta de reciclaje.

Se utiliza las matrices MEFI (Matriz de Evaluación de Factores Internos) y MEFE (Matriz de Evaluación de Factores Externos) para identificar las fortalezas y debilidades internas, así como las oportunidades y amenazas externas. El procedimiento incluirá la recolección de datos internos y externos relevantes, seguida de una evaluación y clasificación de cada factor para desarrollar estrategias adecuadas.

4.2.3. Fase 3: Análisis de Futuro y Evaluación Financiera

En la tercera fase, se empleará la Matriz de Impactos Cruzados (MICMAC) para analizar las variables estratégicas que influirán en el futuro de la planta de reciclaje. El procedimiento incluirá la identificación de variables clave, el análisis de su interrelación y la evaluación del impacto de cada variable en el sistema.

El análisis MACTOR se utiliza para evaluar la influencia de actores clave (internos y externos) en las variables estratégicas identificadas. El procedimiento consistirá en la

identificación de actores relevantes y sus objetivos, seguido de un análisis de alianzas y conflictos potenciales.

El Método Delphi se utilizará para recoger información cualitativa mediante cuestionarios a expertos con el fin de obtener un consenso sobre futuros posibles. El procedimiento incluirá el diseño y envío de cuestionarios a expertos en reciclaje.

Se aplica la herramienta ERIC (Eliminación, Reducción, Incremento y Creación) del Océano Azul para complementar las acciones estratégicas a corto y largo plazo. El procedimiento incluirá la identificación de factores que deben eliminarse, reducirse, incrementarse o crearse para diferenciar la planta de reciclaje en el mercado.

Finalmente, se realiza una evaluación financiera para elaborar proyecciones financieras detalladas, análisis de rentabilidad, sensibilidad financiera y evaluación económica. El procedimiento incluirá la recolección de datos financieros y de costos, seguida de la elaboración de proyecciones financieras y análisis de rentabilidad utilizando herramientas como el análisis de flujo de caja descontado.

4.2.4. Fase 4: Impacto Ambiental y Social

La cuarta fase incluye la evaluación de impacto ambiental, que analiza la reducción de residuos y la minimización del impacto ambiental. El procedimiento consiste en la realización de un estudio de impacto ambiental considerando las operaciones de la planta de reciclaje y la evaluación de la reducción de emisiones y residuos mediante prácticas de reciclaje.

Se realiza una evaluación de impacto social para analizar la creación de empleo y la percepción comunitaria sobre la planta de reciclaje. El procedimiento incluye encuestas y entrevistas a la comunidad local y partes interesadas, seguido de un análisis del impacto social en términos de creación de empleo y desarrollo comunitario.

Además, se lleva a cabo pruebas de toxicidad y una evaluación ecotoxicológica mediante experimentos en laboratorio para evaluar la toxicidad de las emisiones y residuos del proceso de reciclaje. El procedimiento incluirá la recolección de muestras de emisiones y residuos, la realización de pruebas de toxicidad utilizando modelos ecotoxicológicos como *D. magna* y el análisis de los resultados para evaluar el impacto ambiental.

4.2.5. Fase 5: Formulación Estratégica y Simulación Dinámica

En la quinta fase, se integran los resultados y acciones desarrolladas mediante el Cuadro de Mando Integral (Balance ScoreCard, BSC) para la implementación y evaluación de la estrategia empresarial. El procedimiento incluirá la definición de indicadores clave de desempeño (KPIs) y el monitoreo y evaluación continua del desempeño de la planta.

Se utilizará la simulación dinámica con el software Vensim para modelar el sistema de reciclaje de neumáticos y simular diferentes escenarios. El procedimiento incluirá la creación de un diagrama de influencias y un diagrama de Forrester, seguido de la

simulación de escenarios considerando variables como la logística inversa y la aplicación de legislación, y el análisis de resultados para la toma de decisiones estratégicas.

4.3. Recolección de Información

Se utilizan tanto fuentes secundarias como primarias para la recolección de información. Las fuentes secundarias incluirán la revisión de documentos, informes y manuales de organismos sanitarios y empresas con experiencia en reciclaje. Las fuentes primarias incluirán la realización de encuestas y entrevistas con expertos y actores clave en la industria del reciclaje de neumáticos.

4.4. Análisis de Datos

Se empleara métodos cualitativos y cuantitativos para el análisis de datos, utilizando herramientas estadísticas y software especializado como R commander, Excel y Vensim. Además, se calculará el alfa de Cronbach para evaluar la confiabilidad y consistencia interna de las encuestas realizadas sobre la disponibilidad de materia prima en la ciudad.

4.5. Encuesta para Evaluar la Disponibilidad de Materia Prima

La siguiente encuesta se utiliza para evaluar la disponibilidad de neumáticos usados en Sabinas, Coahuila, y calcular el alfa de Cronbach para determinar la confiabilidad de las respuestas:

1. **Facilidad de acceso a neumáticos usados:** ¿Con qué frecuencia considera que es fácil acceder a neumáticos usados para recolectarlos y llevarlos a una recicladora?
 - 5: Nunca es fácil
 - 4: Raramente es fácil
 - 3: A veces es fácil
 - 2: Frecuentemente es fácil
 - 1: Siempre es fácil
2. **Cooperación de los ciudadanos:** ¿Cree que los ciudadanos colaboran adecuadamente colocando neumáticos usados en los puntos de recolección designados para su posterior reciclaje?
 - 5: Nunca cooperan

- 4: Raramente cooperan
 - 3: A veces cooperan
 - 2: Frecuentemente cooperan
 - 1: Siempre cooperan
3. **Facilidad de transporte:** ¿Considera que es fácil transportar los neumáticos usados desde los puntos de recolección hasta una recicladora?
- 5: Nunca es fácil transportarlos
 - 4: Raramente es fácil transportarlos
 - 3: A veces es fácil transportarlos
 - 2: Frecuentemente es fácil transportarlos
 - 1: Siempre es fácil transportarlos
4. **Hábito de dejar neumáticos usados:** ¿Con qué frecuencia los clientes dejan neumáticos viejos en su local después de comprar neumáticos nuevos?
- 5: Nunca dejan neumáticos viejos
 - 4: Raramente dejan neumáticos viejos
 - 3: A veces dejan neumáticos viejos
 - 2: Frecuentemente dejan neumáticos viejos
 - 1: Siempre dejan neumáticos viejos
5. **Acumulación de neumáticos usados:** ¿Ha notado que, con el tiempo, se acumulan muchos neumáticos usados en su local debido a que los clientes los dejan?
- 5: Nunca se acumulan muchos neumáticos usados
 - 4: Raramente se acumulan muchos neumáticos usados
 - 3: A veces se acumulan muchos neumáticos usados
 - 2: Frecuentemente se acumulan muchos neumáticos usados
 - 1: Siempre se acumulan muchos neumáticos usados

Esta metodología integral permite evaluar de manera exhaustiva la viabilidad financiera y el impacto ambiental y social de la implementación de una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila, promoviendo un enfoque hacia la economía circular y el desarrollo sostenible.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la investigación sobre la viabilidad de implementar una planta de reciclaje de neumáticos en Sabinas, Coahuila. A través de un enfoque de investigación mixto, se evaluaron diversos aspectos, incluyendo análisis financieros, socioeconómicos, disponibilidad de materia prima y el impacto ambiental y social del proyecto. Cada fase de la metodología ha sido abordada de manera exhaustiva, lo que permitirá una comprensión integral de los resultados y su implicancia.

5.1. Definición del Sistema

La planta de reciclaje de neumáticos se ha definido como un sistema complejo que integra múltiples etapas, desde la recolección de neumáticos desechados hasta su procesamiento y conversión en productos reutilizables. En este sentido, se han identificado varios elementos clave:

1. **Partes Interesadas:** Las partes interesadas incluyen las autoridades locales, empresas de vulcanización, consumidores, organizaciones ambientales y la comunidad en general. La interacción y el apoyo de estas partes son cruciales para la aceptación y sostenibilidad del proyecto.
2. **Flujo de Materiales:** El proceso comienza con la recolección de neumáticos en desuso, que se transportan a la planta donde se llevan a cabo las actividades de trituración, separación de materiales y producción de productos reciclados.
3. **Cadenas de Valor:** Se ha diseñado una cadena de valor que contempla desde la adquisición de neumáticos hasta la distribución de productos reciclados, asegurando así la maximización de beneficios tanto económicos como sociales.

La definición del sistema permite entender cómo cada uno de estos componentes interactúa y contribuye al objetivo final de minimizar el impacto ambiental y maximizar el valor económico y social del reciclaje.

5.2. Análisis Competitivo

El análisis competitivo se centró en identificar las iniciativas de reciclaje existentes en la región de Sabinas y evaluar su capacidad para competir en el mercado. Para ello, se realizaron las siguientes actividades:

1. **Identificación de Competidores:** Se identificaron otras empresas y proyectos de reciclaje en la Región Carbonífera de Coahuila, que abordan diferentes tipos de residuos, incluidos neumáticos, plásticos y metales.
2. **Evaluación de Capacidades:** Se analizó la capacidad operativa de los competidores, incluyendo tecnología, infraestructura y experiencia. Este análisis reveló que, aunque existen iniciativas, hay una alta demanda no satisfecha para el reciclaje de neumáticos.
3. **Percepción del Proyecto:** La encuesta realizada a 10 vulcanizadoras en Sabinas reveló que 7 de ellas tienen una percepción positiva del proyecto, indicando un apoyo significativo por parte de la comunidad empresarial. Esta percepción positiva no solo resalta la viabilidad del proyecto, sino que también señala la posibilidad de colaboración entre los actores locales.

El análisis competitivo indica que, aunque hay otros jugadores en el mercado, el enfoque específico en el reciclaje de neumáticos, combinado con la percepción favorable de la comunidad, proporciona una ventaja competitiva para la planta propuesta.

5.3. Evaluación Financiera

La evaluación financiera del proyecto es fundamental para determinar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. Se realizó un análisis exhaustivo de los costos iniciales, operativos, flujos de caja, así como de indicadores de rentabilidad.

5.3.1. Inversión Inicial y Costos Operativos

Los datos recopilados indican que:

- **Inversión Inicial:** Se estima que la inversión inicial necesaria para la implementación de la planta de reciclaje de neumáticos es de \$29,406,967.00 MXN. Esta cifra incluye costos de infraestructura, maquinaria, permisos y capacitación de personal.
- **Costos Operativos:** Los costos operativos anuales se han calculado en \$1,765,316.00 MXN. Estos costos incluyen salarios, mantenimiento de maquinaria, insumos y gastos generales.

5.3.2. Flujos de Caja Proyectados

Se han proyectado los flujos de caja para los primeros tres años de operación, resultando en lo siguiente:

- **2025:** \$25,811,062 MXN
- **2026:** \$33,658,394 MXN
- **2027:** \$48,965,776 MXN

Estos flujos de caja positivos reflejan la capacidad de la planta para generar ingresos significativos, lo que es fundamental para cubrir tanto la inversión inicial como los costos operativos.

5.3.3. Valor de Salvamento y Análisis de Rentabilidad

El análisis financiero también incluyó el cálculo del valor de salvamento al final del período de evaluación, que se estima en \$15,717,496.69 MXN. A partir de los flujos de caja y la inversión inicial, se calcularon los siguientes indicadores clave:

- **Valor Presente Neto (VPN):** \$25,694,062 MXN. Este indicador muestra que el proyecto generará un valor adicional considerable sobre la inversión inicial, lo que refuerza su viabilidad financiera.
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** 73 %. Este alto porcentaje indica que la planta de reciclaje no solo es financieramente viable, sino que también ofrece un retorno atractivo sobre la inversión.

La evaluación financiera global sugiere que el proyecto es económicamente sostenible y que representa una oportunidad de inversión favorable para los interesados.

5.4. Evaluación Socioeconómica

La evaluación socioeconómica se realizó para entender el contexto demográfico y económico de Sabinas, así como la disposición de la comunidad para aceptar el proyecto.

5.4.1. Contexto Demográfico

Sabinas, con una población de 64,811 habitantes, presenta una tasa de empleo del 61.5 %, lo que indica una población activa considerable. La principal actividad económica en la región es la minería de carbón, que representa el 98 % de la producción nacional. En 2019, la industria del carbón generó cerca de 6,500 empleos formales, lo que refleja la

importancia de este sector en la economía local. Además de la minería, Sabinas también cuenta con una industria manufacturera que incluye sectores como alimentos, textiles y electrónica. Sin embargo, es importante señalar que la región no cuenta con un parque vehicular significativo, lo que podría limitar el transporte de materiales y productos.

5.4.2. Disponibilidad de Materia Prima

Para evaluar la disponibilidad de neumáticos usados, se llevó a cabo una encuesta entre 10 negocios locales de vulcanizadoras. Los resultados de esta encuesta son significativos:

- **Coeficiente de Confiabilidad:** Se obtuvo un coeficiente de confiabilidad de 0.874, indicando una alta consistencia en las respuestas de los participantes.
- **Percepción del Proyecto:** De las 10 empresas encuestadas, 7 mostraron una percepción positiva hacia el proyecto de reciclaje de neumáticos, lo que sugiere una disposición favorable de la comunidad empresarial para colaborar con la planta.

La disponibilidad de neumáticos usados es un factor crítico para el éxito del proyecto. Los resultados de la encuesta sugieren que existe una oferta suficiente de materia prima, lo que respalda la viabilidad operativa de la planta.

5.5. Análisis del Impacto Ambiental y Social

El impacto ambiental y social del proyecto fue analizado para comprender cómo la planta de reciclaje podría influir en la comunidad y en el entorno natural.

5.5.1. Impacto Ambiental

La planta de reciclaje de neumáticos tiene como objetivo principal reducir la cantidad de residuos generados por neumáticos desechados. Este enfoque no solo minimiza el impacto ambiental negativo asociado con la acumulación de neumáticos, sino que también promueve prácticas sostenibles de reciclaje. Los beneficios ambientales incluyen:

- **Reducción de Residuos:** La planta contribuirá significativamente a la disminución de neumáticos en vertederos, mitigando así el riesgo de contaminación.
- **Recuperación de Recursos:** A través del reciclaje, se podrán recuperar materiales valiosos, como caucho, acero y fibra textil, que pueden ser reutilizados en la industria.
- **Conciencia Ambiental:** La implementación del proyecto puede fomentar una mayor conciencia sobre la importancia del reciclaje y la gestión de residuos en la comunidad.

5.5.2. Impacto Social

El análisis del impacto social sugiere que la planta de reciclaje generará empleo local y contribuirá a mejorar la economía de Sabinas. Los beneficios sociales incluyen:

- **Generación de Empleo:** Se prevé que el proyecto generará nuevas oportunidades de empleo en la planta, así como en la cadena de suministro relacionada con la recolección y transporte de neumáticos.
- **Desarrollo Comunitario:** La planta puede convertirse en un centro de desarrollo comunitario, promoviendo la capacitación en prácticas sostenibles y la educación ambiental.
- **Apoyo a la Economía Local:** La colaboración con negocios locales, como vulcanizadoras, no solo fortalecerá la economía local, sino que también proporcionará a las empresas oportunidades para diversificar sus servicios.

Capítulo 6

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación revelan que la gestión de residuos de neumáticos sigue representando un reto significativo para la sostenibilidad ambiental a nivel global. A pesar de los avances tecnológicos y el desarrollo de estrategias dentro del marco de la economía circular, la implementación efectiva de tecnologías para el aprovechamiento de estos residuos enfrenta diversas limitaciones, tanto económicas como regulatorias. En esta sección, se discuten los hallazgos clave, sus implicaciones en el contexto actual, así como las áreas de oportunidad para mejorar la gestión de los residuos de neumáticos.

6.1. Desafíos de la Gestión de Residuos de Neumáticos

El diagnóstico actual evidencia que una gran proporción de los residuos de neumáticos generados anualmente no recibe un tratamiento adecuado, lo que incrementa su impacto negativo en el medio ambiente. La acumulación de neumáticos en vertederos y la liberación de contaminantes tóxicos a través de la quema no controlada son problemas persistentes en muchas regiones, especialmente en países en vías de desarrollo donde las políticas ambientales son débiles o inexistentes. Este problema se ve agravado por la compleja composición química de los neumáticos, que dificulta su degradación natural y plantea desafíos adicionales para su procesamiento.

Aunque tecnologías como la pirólisis y la gasificación han demostrado ser eficaces en la transformación de residuos de neumáticos en subproductos valiosos, su adopción sigue siendo limitada. Los estudios revisados indican que, si bien estas tecnologías tienen un potencial significativo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y generar productos reutilizables, existen barreras relacionadas con los costos operativos y la infraestructura tecnológica requerida para su implementación a gran escala. Estos

obstáculos limitan la capacidad de las empresas y gobiernos para integrar estas tecnologías en sus estrategias de gestión de residuos.

6.2. Pirólisis: Una Tecnología Prometedora pero con Limitaciones

La pirólisis ha emergido como una de las tecnologías más prometedoras para el aprovechamiento de residuos de neumáticos debido a su capacidad para producir aceite pirolítico y negro de carbón, ambos con aplicaciones comerciales en la producción de combustibles y materiales de construcción. Sin embargo, los estudios indican que, a pesar de su eficiencia, la viabilidad económica de la pirólisis sigue siendo un desafío significativo. El proceso requiere una alta demanda energética y un control exhaustivo de las emisiones para evitar la liberación de gases tóxicos, lo que incrementa los costos operativos y reduce la rentabilidad a largo plazo.

Además, aunque el aceite pirolítico tiene el potencial de reemplazar los combustibles fósiles, su aceptación en el mercado es limitada debido a la variabilidad en la calidad del producto final. Este factor reduce su competitividad frente a los combustibles tradicionales, lo que dificulta su comercialización a gran escala. En consecuencia, aunque la pirólisis presenta ventajas desde el punto de vista ambiental, su implementación industrial requiere de mejoras tecnológicas que permitan reducir los costos energéticos y mejorar la consistencia de los subproductos generados.

6.3. Gasificación: Producción de Energía Limpia con Retos Técnicos

La gasificación se presenta como una alternativa viable para la generación de syngas a partir de residuos de neumáticos, lo que contribuye a la producción de energía limpia. Este proceso es particularmente atractivo debido a su capacidad para reducir emisiones contaminantes y utilizar subproductos como el carbón activado, que tiene aplicaciones industriales en la filtración y el tratamiento de aguas. Sin embargo, la gasificación también enfrenta barreras técnicas que limitan su adopción.

Entre los principales desafíos se encuentra la necesidad de equipos especializados para realizar el proceso a temperaturas extremadamente altas, lo que aumenta los costos iniciales de inversión. Además, aunque el syngas es un combustible versátil, su producción y almacenamiento requieren de infraestructura adicional, lo que complica su adopción por parte de industrias que no están preparadas para integrar este tipo de tecnologías.

Un aspecto positivo de la gasificación es su capacidad para realizarse en combinación

con otros tipos de residuos, lo que mejora la eficiencia económica del proceso. Sin embargo, se requiere un mayor desarrollo tecnológico para optimizar el rendimiento de esta tecnología, reducir los costos operativos y hacerla más accesible para industrias que buscan alternativas a los combustibles fósiles.

6.4. Reciclaje y Recauchutado: soluciones Económicas pero con Menor Innovación

El reciclaje mecánico y el recauchutado se destacan como soluciones más accesibles y económicas en comparación con la pirólisis y la gasificación. Estos procesos son ampliamente utilizados en la industria de la construcción y en la fabricación de neumáticos, donde el granulado de caucho y los neumáticos recauchutados han demostrado ser materiales eficientes y duraderos. No obstante, estos procesos presentan limitaciones en términos de innovación tecnológica, ya que no resuelven completamente el problema de la acumulación de residuos a largo plazo.

El reciclaje mecánico es útil para reducir el volumen de neumáticos en vertederos, pero no aborda el impacto ambiental asociado con los químicos peligrosos que permanecen en los productos reciclados. Por otro lado, el recauchutado permite extender la vida útil de los neumáticos, pero depende de la calidad inicial del neumático, lo que limita su aplicación a neumáticos que todavía están en condiciones aceptables para su renovación.

En términos de viabilidad económica, tanto el reciclaje como el recauchutado son procesos más rentables y menos demandantes en cuanto a infraestructura, lo que los hace atractivos para muchas empresas. Sin embargo, su impacto ambiental es menor en comparación con tecnologías más avanzadas como la pirólisis, lo que sugiere que estas técnicas deberían complementarse con soluciones más innovadoras que aborden los desafíos ambientales a largo plazo.

6.5. Consideraciones para el Futuro de la Economía Circular en la Gestión de Residuos de Neumáticos

El estudio pone de manifiesto que la economía circular ofrece un marco sólido para la gestión sostenible de los residuos de neumáticos, pero su implementación requiere una combinación de innovación tecnológica y políticas públicas adecuadas. Para que las tecnologías emergentes, como la pirólisis y la gasificación, sean económicamente viables y ambientalmente sostenibles, es necesario que los gobiernos y las empresas colaboren en la

creación de incentivos financieros y en la desregulación de barreras normativas que limiten la adopción de estas tecnologías.

La adopción de tecnologías avanzadas debe ir acompañada de un fortalecimiento de las políticas ambientales, que incluyan la reducción de subsidios a los combustibles fósiles y el fomento del uso de combustibles alternativos, como los derivados de los residuos de neumáticos. Asimismo, es crucial que se promueva la investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y reducir los costos de tecnologías como la pirólisis y la gasificación, permitiendo su integración en sectores industriales clave.

Finalmente, es importante destacar que la aceptación social de estas tecnologías también juega un papel crucial en su implementación. La educación y sensibilización sobre los beneficios de una economía circular son fundamentales para que las industrias y los consumidores adopten prácticas más sostenibles en el manejo de los neumáticos y otros residuos.

Capítulo 7

Conclusión

El presente estudio ha permitido identificar y analizar las principales tecnologías emergentes para el aprovechamiento de los residuos de neumáticos de caucho en el contexto de la economía circular. A través de una Revisión Sistemática de Literatura, se destacó el papel crucial que desempeñan tecnologías como la pirólisis, gasificación, reciclaje mecánico y recauchutado en la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de estos residuos, los cuales presentan graves problemas ambientales debido a su disposición inadecuada y difícil degradación.

7.1. Principales Hallazgos

- Pirólisis y gasificación se posicionan como las tecnologías más prometedoras para transformar los residuos de neumáticos en productos de valor agregado, tales como combustibles y materiales de construcción. Ambas tecnologías tienen la capacidad de reducir significativamente el impacto ambiental al minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y recuperar energía de los neumáticos desechados. Sin embargo, enfrentan barreras económicas y técnicas que limitan su adopción a gran escala, como los altos costos energéticos y la necesidad de control exhaustivo de emisiones tóxicas.
- El reciclaje mecánico y el recauchutado son alternativas más accesibles y económicamente viables a corto plazo, pero su impacto en términos de innovación tecnológica es limitado. Aunque ayudan a reducir el volumen de residuos y promueven la reutilización de materiales, no abordan completamente el problema ambiental a largo plazo ni maximizan el potencial energético de los residuos de neumáticos.
- La transición hacia una economía circular en la gestión de residuos de neumáticos requiere un enfoque integral, que combine la adopción de tecnologías emergentes con políticas públicas que incentiven el uso de estas tecnologías. Los incentivos

financieros, junto con la investigación y desarrollo continuo para mejorar la eficiencia y reducir los costos, son factores determinantes para garantizar el éxito de estas soluciones en el ámbito industrial.

7.2. Implicaciones para la Sostenibilidad

La implementación de un enfoque basado en la economía circular para la gestión de residuos de neumáticos tiene el potencial de mitigar los efectos negativos que estos residuos generan en el medio ambiente, al tiempo que ofrece oportunidades para crear valor económico a partir de productos que, de otra manera, serían desechados. Las tecnologías emergentes analizadas no solo permiten el reciclaje y la reutilización de neumáticos, sino que también contribuyen a la descarbonización de la economía mediante la producción de combustibles alternativos y la reducción de la dependencia de recursos naturales no renovables.

A pesar de los desafíos identificados, las tecnologías emergentes tienen el potencial de revolucionar la forma en que se gestionan los residuos de neumáticos. La pirólisis y la gasificación, en particular, ofrecen una solución sostenible que maximiza la recuperación de recursos y minimiza el impacto ambiental, siempre que se superen las limitaciones técnicas y económicas que actualmente enfrentan.

7.3. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones para impulsar la adopción de tecnologías emergentes en la gestión de residuos de neumáticos:

1. Fomento de la investigación y desarrollo: Es necesario continuar invirtiendo en la investigación para mejorar la eficiencia y viabilidad económica de tecnologías como la pirólisis y la gasificación, buscando reducir su demanda energética y optimizar el control de emisiones.
2. Políticas públicas: Los gobiernos deben implementar incentivos financieros y subsidios que promuevan la adopción de tecnologías sostenibles, así como establecer normativas que regulen adecuadamente la disposición de neumáticos y fomenten el uso de subproductos derivados de su procesamiento.
3. Educación y sensibilización: La educación y sensibilización pública juegan un rol clave en la aceptación y adopción de prácticas sostenibles. Es importante informar tanto a la industria como a la ciudadanía sobre los beneficios de la economía circular y las tecnologías emergentes para la gestión de residuos.
4. Colaboración público-privada: Fomentar la colaboración entre el sector público y privado es esencial para superar las barreras financieras y tecnológicas. La creación

de alianzas estratégicas puede acelerar la implementación de estas tecnologías en la industria y aumentar su impacto positivo en el medio ambiente.

7.4. Conclusión Final

En conclusión, el aprovechamiento de los residuos de neumáticos bajo un enfoque de economía circular representa una oportunidad única para abordar de manera sostenible uno de los mayores desafíos ambientales de la actualidad. Aunque existen barreras técnicas y económicas que deben ser superadas, las tecnologías emergentes ofrecen soluciones viables y prometedoras para transformar estos residuos en recursos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico. Es necesario un esfuerzo conjunto entre la industria, el gobierno y la sociedad para lograr una transición exitosa hacia modelos de producción y consumo más sostenibles, en los que los residuos de neumáticos dejen de ser un problema y se conviertan en una fuente de oportunidades.

Referencias

- Adachi, K., y Tainosho, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment international*, 30(8), 1009–1017.
- Agency, H. P. (2010). Chemical hazards and poisons report - issue 18. *Chemical Hazards and Poisons*.
- Ahoor, A. H., y Zandi-Atashbar, N. (2014). Fuel production based on catalytic pyrolysis of waste tires as an optimized model. *Energy conversion and management*, 87, 653–669.
- Cano, E., Cerezo, L., y Urbina, M. (2007). Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. *Universidad Carlos III de Madrid*.
- Castro, G. (2008). Materiales y compuestos para la industria del neumático. *Departamento de ingeniería mecánica FIUBA*.
- Chatziioannou, I., y Alvarez-Icaza, L. (2017). A structural analysis method for the management of urban transportation infrastructure and its urban surroundings. *Cogent Engineering*, 4(1), 1326548.
- COCEF. (2008). Propuesta de estrategia y política pública.
- Diario Oficial de la Federación, D. (2013). Norma oficial mexicana nom-161-semarnat-2011, que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. al margen un sello con el escudo nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- DOF. (2018). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. *Diario Oficial de la Federación*.
- Downard, J., Singh, A., Bullard, R., Jayarathne, T., Rathnayake, C. M., Simmons, D. L., ... others (2015). Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill-part 1: Characterization of gaseous and particulate emissions. *Atmospheric Environment*, 104, 195–204.
- du Caoutchouc et des Polymères industriels., C. F. (2007). Incendie dans un entrepôt de stockage de pneumatiques équipé d'une installation sprinkler.
- Faicán Matute, F. E., y Calle González, H. P. (2011). *Implementación y estandarización de estrategias de manufactura"5's y kanban."*^{en} el área de preparación de materiales

- en la empresa continental tire andina sa* (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Federal, G. D. D. (2002). Llantas usadas diagnóstico de la situación actual en el distrito federal. *Secretaría Del Medio Ambiente*, 1–39.
- Garza-Almanza, V. (2018). Fundación binacional México–Estados Unidos para la salud y el ambiente crónica de un proyecto altruista: 1982–1991. *Cultura Científica y Tecnológica*(65).
- Groover, M. P., Aguilar, J. E. A., Lopez, U. F., y Palafox, F. J. S. (2014). *Introducción a los procesos de manufactura*. McGraw-Hill Interamericana.
- Habibah AIH, D., Abraham, F., Summerscales, J., y Brown, P. (2018). Fatigue properties and fracture morphology of micronised rubber powder (mrp) from waste tyres in unfilled elastomers. *Mechanics and Manufacturing*.
- Hatefi, S. (2018). Strategic planning of urban transportation system based on sustainable development dimensions using an integrated swot and fuzzy copras approach. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(1), 99–112.
- Hepperle, C., Mörtl, M., y Lindemann, U. (2008). Innovation cycles concerning strategic planning of product-service-systems. En *Ds 48: Proceedings design 2008, the 10th international design conference, dubrovnik, croatia*.
- Higa, Y., Yen, N. T., Kawada, H., Son, T. H., Hoa, N. T., y Takagi, M. (2010). Geographic distribution of *aedes aegypti* and *aedes albopictus* collected from used tires in Vietnam. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 26(1), 1–9.
- Honório, N. A., Cabello, P. H., Codeço, C. T., y Lourenço-de Oliveira, R. (2006). Preliminary data on the performance of *aedes aegypti* and *aedes albopictus* immatures developing in water-filled tires in Rio de Janeiro. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 101, 225–228.
- INEGI. (2015). Resultados definitivos de la encuesta intercensal 2015.
- INEGI. (2016). Estadísticas a propósito de... la industria hulera.
- INEGI. (2018). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018.
- Juan, R. S. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *Química Viva*, 11(1), 24–39.
- Laresgoiti, M., Caballero, B., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M., y Chomón, M. (2004). Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 71(2), 917–934.
- Linares Campos, A., y cols. (2023). *Impacto socioeconómico y ambiental de la contaminación derivada de neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México* (Tesis Doctoral no publicada). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- López, F., Centeno, T. Á., y Alguacil, F. J. (2012). Aprovechamiento energético de residuos: el caso de los neumáticos fuera de uso.
- Machin, E. B., Pedroso, D. T., y de Carvalho Jr, J. A. (2017). Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 306–315.
- Manejo Responsable de Llantas Usadas, A. C. (2015). Plan de manejo de neumáticos usados de desecho conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011. *Norma2*, 88.

- Marwood, C., McAtee, B., Kreider, M., Ogle, R. S., Finley, B., Sweet, L., y Panko, J. (2011). Acute aquatic toxicity of tire and road wear particles to alga, daphnid, and fish. *Ecotoxicology*, 20(8), 2079–2089.
- Murray, V. (2003). Chemical hazards and poisons report - issue 1. *Chemical Hazards and Poisons*.
- Nabielek, P., Dumke, H., y Weninger, K. (2018). Balanced renewable energy scenarios: a method for making spatial decisions despite insufficient data, illustrated by a case study of the vorderland-feldkirch region, vorarlberg, austria. *Energy, Sustainability and Society*, 8, 1–12.
- Ortíz-Rodríguez, O. O., Ocampo-Duque, W., y Duque-Salazar, L. I. (2017). Environmental impact of end-of-life tires: Life cycle assessment comparison of three scenarios from a case study in valle del cauca, colombia. *Energies*, 10(12), 2117.
- Park, I., Kim, H., y Lee, S. (2018). Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions. *Journal of Aerosol Science*, 124, 30–40.
- Piotrowska, K., Kruszelnicka, W., Baldowska-Witos, P., Kasner, R., Rudnicki, J., Tomporowski, A., ... Opielak, M. (2019). Assessment of the environmental impact of a car tire throughout its lifecycle using the lca method. *Materials*, 12(24), 4177.
- PNUMA. (2011). Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de neumáticos usados y de desecho. *PNUMA*.
- Ramos, G., Alguacil, F. J., y López Gómez, F. A. (2011). The recycling of end-of-life tyres. technological review. *Technological review*.
- Rodríguez Illescas, S. S., y cols. (2017). *Reutilización de neumáticos fuera de uso* (Tesis de Master no publicada). Universidad de la Laguna.
- Ropero Álvarez, J. (2020). Plan prospectivo para la creación de una empresa recicladora de neumáticos llamada glolocal recycling solutions sas en el área metropolitana de bucaramanga al año 2020. *Doctoral dissertation*.
- SEMARNAT., I. . (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos.
- Sharma, V. K., Fortuna, F., Mincarini, M., Berillo, M., y Cornacchia, G. (2000). Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. *Applied Energy*, 65(1-4), 381–394.
- Triebswetter, U., y Wackerbauer, J. (2008). Integrated environmental product innovation in the region of munich and its impact on company competitiveness. *Journal of Cleaner Production*, 16(14), 1484–1493.
- Tsai, W.-H. (2018). Carbon taxes and carbon right costs analysis for the tire industry. *Energies*, 11(8), 2121.
- Watson, R., Wilson, H. N., Smart, P., y Macdonald, E. K. (2018). Harnessing difference: a capability-based framework for stakeholder engagement in environmental innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 35(2), 254–279.
- Wik, A., y Dave, G. (2005). Environmental labeling of car tires—toxicity to daphnia magna can be used as a screening method. *Chemosphere*, 58(5), 645–651.

- Wik, A., y Dave, G. (2006). Acute toxicity of leachates of tire wear material to daphnia magna—variability and toxic components. *Chemosphere*, 64(10), 1777–1784.
- Wik, A., Nilsson, E., Källqvist, T., Tobiesen, A., y Dave, G. (2009). Toxicity assessment of sequential leachates of tire powder using a battery of toxicity tests and toxicity identification evaluations. *Chemosphere*, 77(7), 922–927.
- Yadav, J., y Tiwari, S. (2019). The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 485–568.