

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



PROPUESTA DE SISTEMA DE PRODUCCIÓN DINÁMICO PARA LA ECONOMÍA
CIRCULAR DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN ECONOMÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ASTRID MINERVA OVANDO MARTÍNEZ

DIRECTOR DE LA TESIS: DR. HÉCTOR MAURICIO NÚÑEZ AMÓRTEGUI

AGUASCALIENTES, AGS.

2023

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi mamá y a mi hermano por su apoyo y amor incondicional a lo largo de esta experiencia.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Monse y Brian por su valiosa ayuda, paciencia, compañía y amistad a lo largo de estos dos años, son quienes hicieron que esta experiencia fuera mucho más llevadera.

También quiero agradecer a mis amigas Vane, Ele, Ceci, Itzel y Alli por brindarme constantemente palabras de aliento y creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Su apoyo ha sido fundamental para seguir adelante.

Asimismo, deseo reconocer y dar gracias al Dr. Héctor y al Dr. Osiel por su invaluable orientación y respaldo durante todo el proceso de investigación. Su guía ha sido fundamental para la culminación de este trabajo.

Resumen

La era actual de contaminación y agotamiento de recursos naturales se debe en gran medida al consumismo social y a un modelo lineal de producción y consumo. Reducir la contaminación y el agotamiento de recursos en un contexto de explosión demográfica y aumento del consumo es un desafío difícil. La economía circular surge como una solución al proponer un flujo cíclico de materiales y energía.

La economía circular busca cerrar el ciclo de vida de materiales, productos y servicios, con el objetivo de reducir la extracción de recursos, aprovechar materiales reciclados en nuevos procesos de producción, fabricar productos más duraderos y disminuir la necesidad de desecharlos en vertederos. Esta transición hacia una economía circular puede generar beneficios sociales y económicos, como la reducción de costos, la optimización de procesos y la mejora de la rentabilidad para las organizaciones.

En este trabajo se busca estimar los beneficios sociales resultantes de implementar un sistema de producción circular para los materiales de papel y cartón en México. Se pretende analizar la cantidad de recursos naturales que se podrían ahorrar al reutilizar materiales desechados y reintroducirlos en el proceso productivo, evaluando así el impacto ambiental y económico de esta acción. Se replicó el modelo de beneficio social y las métricas matemáticas propuestas por García-Barragán et al. (2019) para el caso de México. Estas métricas determinan el tamaño óptimo de la actividad circular de la economía en un período de tiempo, al calcular la diferencia entre la actividad de reciclaje óptima y la actividad lineal óptima.

Al variar el porcentaje de material reciclado utilizado en el proceso productivo y analizar los beneficios correspondientes, se observó una correlación directa entre los beneficios obtenidos y la cantidad de material reciclado. A medida que se reduce la cantidad de material virgen utilizado y se aumenta el uso de material reciclado, también aumentan los beneficios para la empresa productora. Este hallazgo respalda la idea de que la transición hacia una economía circular podría ser la opción más beneficiosa para la sociedad en general, aunque los resultados sugieren que es conveniente que la industria del papel y cartón utilice un 100% de material reciclado para obtener beneficios óptimos.

Se concluye que el modelo y las métricas de economía circular propuestos fomentan la reutilización y el reciclaje de recursos en el sector industrial, al reducir la dependencia de la extracción de materias primas y generar ventajas económicas para las organizaciones. Al disminuir la necesidad de adquirir grandes volúmenes de material virgen, las empresas pueden reducir costos, optimizar procesos y mejorar su rentabilidad. Además, se promueve la conservación del medio ambiente al minimizar el desperdicio y el impacto ambiental asociado a la producción y eliminación de residuos.

Sin embargo, la aplicación de estos resultados en escenarios reales requiere considerar otros factores, como la disponibilidad de tecnologías adecuadas, los costos asociados al reciclaje y la viabilidad económica de adoptar prácticas circulares. La implementación exitosa de la economía circular implica la colaboración entre diversos actores, incluidos los sectores empresariales, gubernamentales y académicos, para desarrollar estrategias integrales que fomenten la circularidad y promuevan un crecimiento sostenible.

Es importante señalar que el modelo matemático utilizado para simular la economía circular proporciona información valiosa, pero aún existen áreas de mejora. Por ejemplo, la inclusión de variables adicionales, como la variable de trabajo y los costos asociados al reciclaje, permitiría obtener datos más precisos y realistas, lo que facilitaría una comprensión más completa de los beneficios y desafíos de la transición hacia una economía circular.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Contexto.....	4
3. Revisión de literatura.....	7
4. Modelo.....	14
4.1 Comportamiento óptimo.....	17
4.2 Métricas para la circularidad.....	19
5. Simulación y resultados.....	22
5.1 Residuos sólidos urbanos inorgánicos.....	24
5.1.1 Papel y cartón.....	24
6. Conclusiones y discusión.....	33
7. Referencias.....	35
8. Ligas de las bases de datos originales.....	44
9. Anexos.....	45
9.1 Anexo 1.....	45
9.2 Anexo 2.....	46

Índice de Figuras

Figura 1. Residuos eliminados por la industria	28
Figura 2. Función de producción.....	29
Figura 3. Tamaño óptimo de la actividad circular.....	31

Índice de Tablas

Tabla 1. Beneficio de acuerdo con el porcentaje de material reciclado utilizado en la producción	27
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

1. Introducción

La era actual de contaminación y agotamiento de los recursos naturales es consecuencia del consumismo social, que en gran parte del mundo se rige bajo un modelo lineal de producción y consumo en donde se fabrica, se adquiere y se desecha todo lo que consume la sociedad (ver por ejemplo Panchal et al., 2021; y Fullerton, et al., 2022). Este modelo funciona bajo el supuesto de tener un stock infinito de recursos naturales, que en una economía lineal se podría extraer materiales vírgenes a bajo costo, diseñar productos de corta duración para que los consumidores los desechen de forma rápida, y así adquirir nuevos productos. Por ello, reducir el nivel de contaminación ante la explosión demográfica y el aumento de los niveles de consumo parece una tarea difícil para todos. Sin embargo, diferentes estudios señalan que la solución a este problema global podría ser una economía circular (EC) que pretende redefinir el crecimiento proponiendo un flujo cíclico de materiales y energía (ver por ejemplo Frosch y Gallopoulos, 1989; y Korhonen, et al., 2018).

Geissdoerfer et al. (2017) señalan que el origen del término “sostenibilidad” fue en la silvicultura (basado en el principio de que la cantidad de madera cosechada no debe superar el volumen que vuelve a crecer), aunque más tarde, se trasladó al contexto de la ecología, como principio de respetar la capacidad de la naturaleza para regenerarse, de donde procede la definición moderna de ser "capaz de mantenerse a un determinado ritmo o nivel" (Duden, 2015). La Comisión Brundtland de las Naciones Unidas en 1987 definió sostenibilidad como aquello que permite “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (UN, s.f.). Luego entonces en la actualidad, dicha sostenibilidad está siendo comprometida por el sistema de producción lineal al poner en riesgo la supervivencia de las generaciones venideras. Geissdoerfer et al. (2017) mencionan que las preocupaciones por la sostenibilidad se incorporan cada vez más a las agendas de los políticos y a las estrategias de las empresas, y en varias de estas la EC es propuesta como una posible solución en diferentes ámbitos.

El concepto de EC de acuerdo con Ghisellini et al. (2016) se remonta a diferentes escuelas de pensamiento. En la economía ambiental Pearce y Turner (1989) introdujeron el concepto de sistema económico circular basándose en estudios previos de economía ecológica, como el de Boulding (1966). Este autor tenía la idea de que la economía como sistema circular

es un requisito previo para el mantenimiento de la sostenibilidad de la vida humana en el planeta puesto que sería un sistema cerrado casi sin intercambios de materia con el entorno exterior, ya que conceptualmente la EC se enfoca en comprender el ciclo de vida de los materiales, productos o servicios de acuerdo con Roberts (2014). De acuerdo con Fullerton et al. (2022) la implementación de una EC implica diversas acciones con el objetivo de reducir la extracción de recursos, aprovechar materiales reciclados en nuevos procesos de producción, fabricar productos más duraderos, diseñar productos ecológicos que faciliten el reciclaje y disminuir la necesidad de desecharlos en vertederos. Además, la reparación y reutilización de productos bien contruidos resulta más económica a largo plazo y, al mismo tiempo, evita las consecuencias negativas tanto de la extracción de recursos como de su eliminación inadecuada.

La implementación de un sistema productivo basado en la circularidad representaría un flujo de materiales cerrado y un número de desechos limitado, tal como lo mencionan Geissdoerfer et al. (2017). De esta forma, el objetivo principal de este trabajo es estimar los beneficios sociales que resultarían de la implementación de un sistema de producción circular para distintos materiales en México, es decir, estimar la cantidad de recursos naturales que podrían dejarse de usar al reutilizar determinada cantidad de materiales que son desechados por la sociedad y reintroducirlos en el proceso productivo, determinando así el impacto ambiental y económico que esta acción tendría.

Para lograr dicho objetivo se replica para el caso de México el modelo de beneficio social y las métricas matemáticas propuestas en García-Barragán et al. (2019). Estas métricas están diseñadas para obtener el tamaño óptimo de la actividad circular de la economía en un periodo de tiempo mediante la diferencia entre la actividad de reciclaje óptima y la actividad lineal óptima. Con lo anterior se puede decir que la transición de un sistema de producción lineal a uno circular estaría siendo exitoso cuando la tasa de crecimiento entre dos periodos sea estrictamente positiva.

El presente documento está constituido por distintas secciones. En la siguiente sección se establece el problema para el contexto mexicano, en el tercer apartado se realiza una breve revisión de literatura en donde se analizan las distintas aportaciones de varios autores en lo concerniente a la EC. En la cuarta sección se presenta el modelo y las métricas matemáticas en

las que se basa esta tesis. En el apartado siguiente se realizan las simulaciones correspondientes a materiales orgánicos e inorgánicos, se muestran los resultados obtenidos, y finalmente se presentan las conclusiones en la sección 6.

2. Contexto

De acuerdo con el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (s.f.) cada año se recolectan aproximadamente 11,200 millones de toneladas de desechos sólidos en todo el mundo y la descomposición de los residuos orgánicos de los desechos sólidos contribuyen con aproximadamente el 5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Los recursos naturales se demandan más en la actualidad para ser utilizados en la producción de bienes que cubren necesidades humanas para mejorar la calidad de vida como: vestimenta, comida, agua, infraestructura, etcétera. Dicha extracción de recursos ha aumentado más del triple desde 1970, junto a esto, el procesamiento de los materiales, los combustibles y la comida son responsables actualmente de más del 90 % de la pérdida de biodiversidad y el estrés hídrico (Naciones Unidas, s.f.).

Para el caso específico de México, de acuerdo con el INEGI (2021), durante 2020 se recolectaron diariamente en promedio más de 106 mil toneladas de residuos (lo que equivale a 38 millones de toneladas para ese mismo año aproximadamente) lo que se traduce en 850 gramos por persona generados principalmente en viviendas, edificios, calles, avenidas, parques y jardines. Si se comparan estas cifras con las obtenidas por INEGI en 2019 se puede observar que de 2018 a 2020 se redujeron 532 toneladas los residuos sólidos urbanos (RSU), al pasar de 107,055 a 106,523 toneladas respectivamente. Aunque esto representa una reducción de RSU considerable no es suficiente para decir que en el país se está controlando la forma en la que se desechan los residuos, o si fue un posible efecto de la pandemia del COVID-19.

Además, según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México (CNGMD) de 2021, el 47% de los residuos que se genera en todo el país se recolecta en seis entidades federativas: Ciudad de México con 14.02% de los residuos totales, Estado de México (11.22%), Jalisco (7.21%), Veracruz (5.5%), Nuevo León (4.84%), y Guanajuato (4.28%), en ese orden. Sin embargo, al analizar los residuos per cápita promedio que se generan en cada estado, los habitantes que más producen son los de Ciudad de México (1.4 kg/hab/d), Estado de México (1.3 kg/hab/d), Baja California (1.1926 kg/hab/d), Baja California Sur (1.15 kg/hab/d) y Sonora (1.13 kg/hab/d).

Por otra parte, del total de RSU generada en el país solo se recibieron en promedio 55,664 kg. de materiales reciclables por día (20,317.36 toneladas en el 2020) en 477 centros de acopio operados por los municipios (INEGI, 2021). Esto se traduce en un 0.05% de desechos que están siendo reutilizados de forma anual para su aprovechamiento. De las 32 entidades federativas solo 14 cuentan con plantas de tratamiento para los desechos,¹ en total son 36 plantas en las que los RSU se separan, trituran, compactan, se hacen composta, se realiza digestión anaerobia y/o se realizan otros procesos a estos, se calcula que para el 2022 la cantidad total de residuos enviados a tratamiento por día fueron 9,247 toneladas (INECC, 2022).

Específicamente de los materiales que fueron recolectados en dichos centros se estima un aproximado diario de: 17,139 kg de papel y cartón; 11,288 kg de vidrio; 9,505 kg de PET; 6,047 kg de desechos eléctricos y electrónicos; los 11,685 kg restantes de los 55,644 kg acopiados en los centros municipales fueron de diversos materiales como otros plásticos, aluminio, fierro, lamina de acero, cobre, bronce, pilas y baterías, etcétera (INEGI 2021). Como es conocido al separar los desechos antes de ser recolectados se aumenta la cantidad y la calidad de los materiales reciclables; puesto que, si no son separados tienden a estar contaminados lo que reduce su valor en el mercado y la posibilidad de reciclarlos (Semarnat, 2018).

Como bien se menciona en INEGI (2022) “la gestión integral de los residuos sólidos es fundamental para evitar que se conviertan en un problema que afecte a la salud pública y el medio ambiente, para ello se requiere de una serie de procesos que van desde el almacenamiento, recolección y transferencia hasta el transporte, procesamiento y disposición adecuada de los desechos”. De acuerdo con el artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los municipios son los que se encargaran de llevar a cabo estas acciones. Para el 2020, un total de 2,544 municipios y demarcaciones territoriales del país en México prestaron servicio de recolección de residuos empleando aproximadamente a 98,528 personas (INEGI 2021).

¹ Estados con plantas de tratamiento en México según el INECC (2022): Ciudad de México, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz.

Finalmente, de acuerdo con el CNGMD 2021, el 13.81% (aproximadamente 5 millones de toneladas en el 2020) de la recolección de desechos en el país era selectiva, es decir, que hubo una separación previa entre desechos orgánicos e inorgánicos. Del total de este tipo de recolección el 26.25% son residuos orgánicos y el resto es de procedencia inorgánica; ambas provinieron de estaciones de transferencia, plantas de tratamiento, ventas o donaciones, sitio de disposición final, entre otros destinos (INEGI, 2021).

3. Revisión de literatura

Loomis (2005) resalta que las mejoras continuas en la salud y el bienestar humanos dependen cada vez más de la renovación del ambiente (calidad del aire, calidad del agua, etc.), ya que esto afecta el bienestar humano. Con la producción de alimentos, la fabricación y el consumo de bienes para el hogar y la industria se llegan a producir diversos residuos, y dependiendo de su composición, tasa de generación y manejo, pueden tener efectos en la población y en el ambiente llegando a ser altamente peligrosos en algunas ocasiones, sobre todo cuando los compuestos tóxicos son manejados inadecuadamente (Semarnat, 2015).

Algunos de los efectos que se pueden tener del manejo inadecuado de los desechos según diversos autores son la generación de biogases, la liberación de sustancias agotadoras de ozono (SAO), la contaminación de suelos y de cuerpos de agua, y, la proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades. A continuación, se describe de forma breve cada uno de ellos

1. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generan biogases cuando son llevados a los rellenos sanitarios, y algunos de estos gases son gases de efecto invernadero (GEI). Los principales gases generados en mayor proporción son metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Además, se producen en menor cantidad gases como nitrógeno (N_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH_3), entre otros. Estos gases pueden causar diversos daños, que van desde efectos perjudiciales para la salud de los habitantes hasta contribuir al aumento de la temperatura global. Estos efectos han sido señalados por Kiss y Encarnación en 2006.

2. Las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) son compuestos que tienen un impacto negativo en la capa de ozono, causando su deterioro y destrucción. Algunos ejemplos de SAO son los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbónoses (HCFC), entre otros. Estas sustancias se utilizan en la fabricación de gases refrigerantes que se emplean en refrigeradores, aires acondicionados, espumas y aerosoles. Cuando los productos que contienen SAO son desechados de manera inadecuada, estas sustancias son liberadas a la

atmósfera, lo que contribuye al deterioro de la capa de ozono, como se mencionó anteriormente. (Molina y Rowland, 1974; UNEP, 2012).

3. Estudios realizados por Allen (2001) y Torres et al. (2011) mencionan que cuando los residuos sólidos urbanos (RSU) se descomponen, se generan líquidos conocidos como lixiviados. Estos lixiviados tienen una composición variada que está directamente relacionada con la naturaleza de los residuos de los que se originan, ya sean orgánicos o inorgánicos. Sin embargo, sin importar su origen, tanto la composición como la cantidad de los lixiviados representan un riesgo de contaminación para el suelo y los cuerpos de agua cercanos, ya sean superficiales o subterráneos. Esta contaminación puede provocar problemas de toxicidad, eutrofización (aumento de nutrientes en sistemas acuáticos que promueve el crecimiento excesivo del fitoplancton) y acidificación, lo que resulta en una pérdida de calidad del agua y del suelo.

4. Cuando se acumula una cantidad significativa de RSU, estos se convierten en una fuente de recursos y un refugio para organismos nocivos que pueden representar un riesgo para la salud humana al establecerse en áreas residenciales. Insectos como moscas, cucarachas, pulgas y mosquitos pueden actuar como vectores de enfermedades como diarrea, tifoidea, paludismo, giardiasis y dengue. Además, animales como roedores y aves pueden propagar enfermedades como la peste, el tifus, la leptospirosis y la toxoplasmosis. (Hernández-Niño et al., s/a; Jaramillo, 2002; Marateo, 2013; Hernández-Rejón, 2014).

Además de lo anterior, existe una presión sobre el ambiente pues su volumen de generación se ve ligado a la discusión sobre la fabricación y el consumo sostenible, ya que, al gestionar integralmente los residuos, tratar de reducir su generación y conseguir una disposición final adecuada, puede resultar en una reducción colateral de extracción de recursos, energía y agua utilizados para elaborar productos, así como disminuir la emisión de GEI (Semarnat, s/f). Es así como, Ghisellini, et al. (2016) mencionan que se deben distinguir tres funciones económicas del ambiente: provisión de los recursos, sistema de soporte, vertedero de residuos y emisiones. Al igual que otras funciones económicas, estas tres funciones básicas deberían tener un precio. Sin embargo, la mayoría de las veces no existe ni

un precio ni un mercado para algunos bienes medioambientales (como la calidad del aire, y los bienes públicos, aunque hay bienes como el agua potable que si tienen un mercado y un precio definido), a pesar de que tengan un claro valor o utilidad para los individuos y las sociedades (Ghisellini, P. et al., 2016).

Como se mencionó anteriormente, conceptualmente la EC se basa en comprender el ciclo de vida de los materiales, productos o servicios (Roberts, 2014). Es comprensible que al buscar hacer que un sistema económico sea más circular, surjan desafíos adicionales en términos de recolección, separación, inspección, limpieza, procesamiento y remanufactura. Además, es importante considerar tanto la logística de distribución de productos desde las empresas hasta los hogares, como la logística inversa de devolver los materiales desde los hogares nuevamente a las empresas para su reparación, renovación o reciclaje. Esto implica un enfoque integral que abarca tanto la cadena de suministro como el ciclo de vida completo de los productos (Fullerton et al., 2022).

Fullerton et al. (2022) explican la progresión de una economía lineal a una circular de la siguiente forma:

1. Una economía lineal extrae materias primas y fabrica productos que, después de su uso, ingresan al flujo de desechos.
2. El reciclaje por sí solo puede reducir los desechos y conservar las materias primas vírgenes.
3. Pero un modelo de EC más completo no solo incluiría el reciclaje, sino también la reparación, la reutilización, y el diseño ecológico de productos para aumentar lo que se puede reciclar. Por lo tanto, una EC mejoraría la eficiencia de los recursos, reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero (Singh et al., 2021) y agregaría empleos locales si la reparación y el reciclaje tuvieran más mano de obra que los vertederos, como en Dufourmont y Brown 2020.

En su revisión sistemática de literatura sobre la EC, Panchal et al. (2021) clasifican 896 artículos que hablan sobre la EC según el tema que impera en estas. Por ejemplo: están las que estudiaron sobre R-imperativas (reducir, reparar, reutilizar, reciclar, etc.) en este contexto, como las investigaciones de Moriguchi (2007); Saidani et al. (2018); Batista et al. (2018); y Reike et al. (2018). También están las revisiones basadas en la perspectiva de los sistemas

(nivel de implementación, alcance, unidad de estudio), muchas clasifican los estudios de EC a nivel micro (producción más limpia y diseño ecológico), a nivel meso (parque industrial) y a nivel macro (ámbito nacional o municipal) (e.g. Su et al., 2013; Ghisellini et al., 2016; Lieder and Rashid, 2016; Heshmati, 2017; Kalmykova et al., 2018; Merli et al., 2018; Saidani et al., 2019; Bongers y Casas, 2022).

Del mismo modo se encuentran las investigaciones en las que se analizó la implementación de la EC impulsada por políticas nacionales o las industrias (e.g. Merli et al., 2018; Su et al., 2013; Sassanelli et al., 2019); otras se han centrado en el trabajo de industrias específicas; mientras que algunas han hecho clasificaciones sobre la perspectiva ambiental, económica y social como el trabajo de Iacovidou et al. (2017) y Saidani et al. (2018). Parte de la literatura también se enfoca en identificar indicadores de este tipo de economía, así como en el desarrollo de métricas e indicadores para la evaluación del rendimiento de la EC (Panchal, R. et al., 2021; Su et al., 2013; Saidani et al., 2018; Parchomenko et al., 2019; Ghisellini et al., 2016; Heshmati, 2017; Iacovidou et al., 2017; y Geng et al., 2009; Chen et al., 2022; Kinnamana et al., 2014).

Existen otras investigaciones, que además de abarcar temas anteriormente referenciados, reflejan el impacto que tendría el implementar un método de EC en determinadas regiones. A modo de ejemplo está el caso de Zająca y Avdiushchenko (2020) quienes calibran, para Polonia un modelo de Equilibrio General Estocástico Dinámico (DSGE) para la región de Malopolska basado en el supuesto de que parte del consumo actual se devuelve a los productores como suministros para reutilizarlos en el proceso de producción. De este estudio los autores llegan a que una unidad adicional de material reciclado es un sustituto de cuatro unidades de materia prima, con esta metodología, estiman que el reciclaje para la región en 2017 ascendería al 48.1%.

Kinnaman et al. (2014) estiman el costo social promedio que se tendría al gestionar los residuos municipales de Japón en función de la tasa de reciclaje. Para estos cálculos son incluidos tanto los costes de los municipios, de los hogares que reciclan y los de eliminación externa, así como los ingresos municipales y los beneficios externos que se obtienen al reciclar. Después de considerar los costos y beneficios del ambiente y la economía que están relacionados con la gestión de desechos y materiales reciclables se obtiene que la tasa de

reciclaje óptima estimada en Japón es del 10%. Basándose en este resultado los autores también llegan a la conclusión de que la tasa de reciclaje del 20% en Japón es superior a la tasa socialmente óptima.

Trabajos como los de Tulashie et al. (2023) y Chen et al. (2022), desarrollan modelos de EC para la industria alimentaria y la de la moda. Los primeros realizan un cambio en la cadena de suministro de los granos de sorgo dulce para que se pueda producir bioetanol con el exceso de este grano y así los productores de la parte norte de Ghana puedan tener ingresos extra y mejore su calidad de vida. Por otra parte, Chen et al. (2022) proponen un modelo híbrido que integra metodologías como el análisis factorial exploratorio, el método sintético difuso y el enfoque de laboratorio de prueba y evaluación de toma de decisiones para alcanzar las metas del desarrollo sostenible en la industria de la moda indonesia. De este estudio se obtiene que la mejor opción dentro del conjunto de opciones que plantean para alcanzar estas metas es la exportación de productos utilizando la ruta de envío más sostenible para así impulsar la reducción de emisiones de carbono y mejora del bienestar social.

Durante décadas recientes en China, algunos autores han analizado los resultados que se han obtenido tras la incorporación de políticas públicas y normas de EC en distintos sectores (Liu et al., 2009; Zhang et al., 2010; Li et al. 2010; Li y Su, 2010; entre otros), puesto que este tipo de economía ha sido aceptada por el gobierno central como una estrategia vital para lograr el desarrollo sostenible (Zhu, 2008; Geng and Doberstein, 2008; Su et al 2013, Li et al, 2016).

Dentro de los trabajos más destacados se encuentra el de Gang et al. (2017), quienes estudian los pilotos de Ciudad de EC en China en la ciudad de Guiyang para el periodo de 2002-2012. Esta ciudad ha ofrecido un laboratorio donde se pueden discutir las oportunidades y los desafíos para una transición urbana baja en carbono. En el estudio, los autores analizan la huella de carbono de Guiyang en 2002 (año antes de la implementación de la simbiosis industrial urbana), 2007 (tras convertirse en el piloto), 2012 (al implementar la simbiosis). Lo anterior es realizado a través de un modelo híbrido que integra un enfoque de input-output (IO) y de un análisis que distingue de entre las emisiones de carbono directas e indirectas. Algunos resultados que se obtuvieron son que la huella de carbono total y per cápita de Guiyang de casi todos los sectores disminuyó como resultado de la implementación continua

de la estrategia de EC; del mismo modo en términos de intercambio de residuos sólidos industriales, reciclaje tradicional, utilización de residuos sólidos municipales y simbiosis energética, se ofrecieron efectos adicionales al mejorar los ciclos de cierre del ciclo de vida de los productos.

Finalmente, dentro de la literatura que se enfoca en desarrollar métricas e indicadores para la evaluación del rendimiento de la EC se encuentra el trabajo de García-Barragán et al. (2019). Quienes en su análisis sobre la definición y medición de la EC mencionan que este tipo de economías toman como punto de referencia de la eficiencia a la maximización del valor de un material, mientras que la actividad de reciclaje sólo describe una actividad industrial entre muchas otras. Es así como de esta discrepancia se deduce que el aplicar directamente los indicadores de reciclaje como métrica para la actividad de la EC no es satisfactoria metodológicamente. En su investigación también resaltan que todas las definiciones del término de EC hasta ahora conocidas poseen cierto grado de ambigüedad, y esto llega a comprometer el desarrollo de métricas ampliamente aceptadas y, también el desarrollo de políticas que permitirían la transición hacia este modelo económico.

Los autores desarrollan una solución conveniente a este problema al definir en función de una métrica a la EC. Se parte de un flujo de materiales y un sistema de valores (ambos bien definidos); y muestran que cuando se diseña una métrica según la lógica matemática las definiciones no son ambiguas (lo que resulta novedoso dentro de la literatura en este campo). Su metodología funciona en tres pasos: I) parten de un sistema circular dado y matemáticamente bien definido, II) caracterizan los flujos óptimos de materiales y construyen métricas definidas que miden la actividad lineal y de reciclaje en la economía, y III) utilizan las métricas para definir la economía lineal, la EC, y el crecimiento económico circular (García-Barragán et al., 2019).

Para el caso específico de México, son muy pocos los estudios realizados en este ámbito, y las propuestas de modelos que permitan incorporar la EC en las industrias son muy pocas. Como ejemplo de las investigaciones que se han realizado dentro del país está la de Guevara-Rivera et al. (2021) quienes construyen un modelo de simulación para implementar estrategias de CE en cualquier PyME, con la finalidad de probar las políticas antes de implementarlas en un escenario real. Este trabajo aplica la metodología en una fábrica de

confitería en México. Y obtiene que, de los cuatro escenarios basado en dos políticas de EC para el proceso de reciclaje de caramelo, en el escenario en el cual hay una baja cantidad de residuos de otras fábricas y una baja venta de glucosa reciclada, se obtiene la mayor mejora de utilidades monetarias.

Estudios como los de Cruz-Pastrana y Franco-García (2019), Dieleman y Martínez-Rodríguez (2019), Carrillo y Pomar (2021), López et al. (2021), y Córdova et al. (2021), se enfocan más en los aspectos teóricos de la situación de la EC en México como sus implicaciones, los modelos de negocio, la política fiscal que se requeriría para la transición a este tipo de economía, así como la factibilidad y los obstáculos que enfrentaría al implementarse, entre otros.

Por otra parte, artículos como los de Casiano Flores et al. (2018) y Cervantes (2021) llevan los modelos de EC más allá de la teoría. Los primeros autores se enfocan en el contexto de gobernanza en la subcuenca Presa Guadalupe y como esta se ve afectada por la política de plantas de tratamiento de aguas residuales, con una perspectiva de EC. A la par Cervantes (2021), presenta un estudio hecho con tres granjas experimentales en Guanajuato, México, donde se hicieron diagnósticos cualitativos y cuantitativos lo que permitió proponer nuevos aprovechamientos para cada uno de los residuos que generan estas granjas. Se propone además una red “ecoindustrial” agropecuaria entre las tres granjas, y por último se termina planteando una solución a ocho de los diez residuos que causan más conflictos en estos lugares y que contribuyen a cerrar los ciclos de las materias productivas. Así mismo, Pérez y Toriz (2017), Córdova-Pizarro (2019) y Uriarte-Ruiz (2022) desarrollan modelos que adecuan los procesos productivos de aparatos electrónicos a economías circulares.

Es así como la presente investigación podría ser representativa y ayudaría al abonar información para la discusión sobre la implementación de técnicas y proyectos que incentiven la reutilización y el reciclaje de los residuos sólidos urbanos, y coadyuven con la creación de políticas que incentiven la reducción de los niveles de contaminación. Mediante la realización de la simulación económica centrada en la industria del papel y el cartón que se hace en este estudio, se pueden extrapolar los resultados a un contexto más amplio, con el fin de analizar de manera más precisa si este nuevo sistema económico podría impulsar una transición hacia un modelo económico sostenible y determinar su viabilidad.

4. Modelo

En este trabajo se seguirá el modelo propuesto por García-Barragán et al. (2019), en el cual se considera una economía dinámica que está formada por un consumidor que tiene preferencias en el consumo de n tipos diferentes de bienes $\hat{c}_{i,t} \geq 0$, donde $i = 1, 2, \dots, n$ y t es el tiempo que va de 1 a T . Las preferencias se representan mediante una función de utilidad estrictamente cóncava $u_t(\hat{c}_{1,t}, \hat{c}_{2,t}, \dots, \hat{c}_{n,t})$, satisfaciendo: $\frac{\partial u_t}{\partial \hat{c}_{i,t}} > 0$ (supuesto de la segunda derivada), en otras palabras, se espera que un aumento en el consumo del bien i en el tiempo t resulte en un aumento en la utilidad del consumidor u_t , lo que refleja una preferencia positiva del consumidor por ese bien.

Además, el modelo parte de la base en la que los consumidores quieren satisfacer distintas necesidades (movilidad, iluminación, comunicación, etc.). Por lo tanto, más allá de centrarse en el material específico que se utiliza para fabricar los bienes y servicios, se enfocan en la funcionalidad de estos. Se supone también que la funcionalidad de $\hat{c}_{i,t}$ es una función de utilidad compuesta por bienes desechados después de h_i periodos de haber sido producidos. Dicha función se expresa por $\hat{c}_{i,t} = z_t^i(c_{i,t}, c_{i,1-t}, \dots, c_{i,t-h_i})$, que se supone estrictamente cóncava y creciente en todos los argumentos (es decir $\frac{\partial z_t^i}{\partial c_{i,t-s}} > 0, \forall s = 0, 1, \dots, h_i$).

Se tiene N cantidades de material virgen y P cantidades de material reciclado; y $M_{j,t}$ con $j = 1, 2, \dots, N$ y $M_{j,t}^r$, con $j = 1, 2, \dots, P$ que representarán las existencias de material puro y material reciclado respectivamente. De igual forma, la producción de $c_{i,t}$ requiere una cierta cantidad positiva de ambos tipos de materiales, por lo que se denota la cantidad de material virgen de tipo j usada en la producción de $c_{i,t}$ como $m_{i,t}^j$, y la cantidad de material reciclado de tipo j usada en la producción de $c_{i,t}$ como $r_{i,t}^j$. El grado de sustitución entre la cantidad de material virgen y la cantidad de material reciclado usados en la producción no es necesariamente perfecto, ya que se refleja la pérdida de calidad en rondas de reciclado posteriores.

En este modelo el capital es necesario y se representa como $k_{i,t}$. Por otro lado, también está la tecnología que transforma a la materia prima y a al material reciclado en bienes, dicha tecnología es $c_{i,t} = f_{i,t}(m_{i,t}^1, m_{i,t}^2, \dots, m_{i,t}^N, r_{i,t}^1, r_{i,t}^2, \dots, r_{i,t}^N, k_{i,t})$, donde se asume que $f_{i,t}$ es una

función cóncava que satisface lo siguiente: $\frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} \geq 0$ y $\frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} \geq 0$. Se supone que existe al menos una $m_{i,t}^{j'}$ satisfaciendo, $\frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^{j'}} > 0 \forall i, t$. En el caso de que la condición $\frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^{j'}} = 0$ se cumpla para j' , la materia prima de tipo j' no podrá ser usada para producir el bien i en el tiempo t . En este caso se asume que $\frac{\partial f_{i,t}}{\partial k_{i,t}} > 0$, es decir, si una materia prima no puede ser utilizada en la producción de un bien debido a que su derivada parcial con respecto a esa materia prima es cero, se asume que la tecnología tiene una sensibilidad positiva a la cantidad de capital utilizado en la producción de ese bien.

La utilización de materias primas y materiales reciclados en la producción conlleva externalidades no deseadas para el medio ambiente, lo que se manifiesta a través de una curva de calidad ambiental con forma cóncava (con $\frac{\partial q_{j,t}^v}{\partial m_{i,t}^j} < 0$ y $\frac{\partial q_{j,t}^r}{\partial r_{i,t}^j} < 0$), lo que indica un impacto negativo:

$$\sum_j (q_{j,t}^v(m_{1,t}^j, m_{2,t}^j, \dots, m_{n,t}^j) + q_{j,t}^r(r_{1,t}^j, r_{2,t}^j, \dots, r_{n,t}^j)),$$

En otras palabras, se tienen en cuenta diferentes impactos ambientales en función de la trayectoria específica que cada tipo de material ha seguido a lo largo del proceso de producción. Por otra parte, está la ecuación de movimiento que caracterizará la evolución del stock de materia prima, y que estará dada de la siguiente forma: $M_{j,t} - M_{j,t-1} = -\sum_i m_{i,t}^j + \Phi_{j,t}$, con $\Phi_{j,t} \geq 0$ (esto ya que cuando $\Phi_{j,t} > 0$, la materia prima de tipo j será renovable en el tiempo t , y en caso de ser $\Phi_{j,t} < 0$ la materia prima no es renovable).

Se asume que, en el proceso de reciclado, cada bien $c_{i,t}$ es transferido a una instalación especializada después de h_i periodos desde su producción, es decir, al llegar al final de su ciclo de vida útil. La empresa de reciclado recupera una fracción no negativa de cada tipo de material presente en el bien $c_{i,t}$, ya sean componentes puros o reciclados. Se considera que las opciones de reciclaje están determinadas por una regla multivariada:

$$r_{i,t}^{v,1} = g_{i,t}^{v,1}(m_{i,t-h_i}^1, k_{i,t}^{v,1})$$

$$r_{i,t}^{v,2} = g_{i,t}^{v,2}(m_{i,t-h_i}^2, k_{i,t}^{v,2})$$

$$r_{i,t}^{v,N} = g_{i,t}^{v,N}(m_{i,t-h_i}^N, k_{i,t}^{v,N})$$

$$r_{i,t}^{r,1} = g_{i,t}^{r,1}(r_{i,t-h_i}^1, k_{i,t}^{r,1})$$

$$r_{i,t}^{r,2} = g_{i,t}^{r,2}(r_{i,t-h_i}^2, k_{i,t}^{r,2})$$

$$r_{i,t}^{r,N} = g_{i,t}^{r,N}(r_{i,t-h_i}^N, k_{i,t}^{r,N})$$

Donde $k_{i,t}^{v,j}$ y $k_{i,t}^{r,j}$ denotan el capital utilizado para recuperar material virgen y reciclado integrado en el bien $c_{i,t}$, $r_{i,t}^{v,j}$ la materia prima reciclada de tipo j recuperada de reciclar i , $r_{i,t}^{r,j}$ el material re-reciclado de tipo j recuperado de reciclar i .

La intuición detrás de la regla multivariada en el proceso de reciclaje descrito en el enunciado es que la cantidad de material reciclado y re-reciclado de un bien en particular depende de múltiples factores, incluyendo la cantidad de materia prima virgen utilizada en la producción del bien (representada por $k_{i,t}^{v,j}$ y $k_{i,t}^{r,j}$), así como la cantidad de materia prima reciclada y re-reciclada previamente de ese mismo bien. En otras palabras, la regla multivariada considera que la cantidad de material reciclado y re-reciclado de un bien en un momento dado depende tanto de la disponibilidad de materia prima virgen como de la disponibilidad de materia prima reciclada previamente. Esto refleja la idea de que el reciclaje es un proceso dinámico en el que la cantidad de material reciclado y re-reciclado puede variar en función de las condiciones cambiantes del mercado, la disponibilidad de recursos y otros factores.

Además, la regla multivariada también incorpora la función de producción $g_{i,t}^{v,j}$ y $g_{i,t}^{r,j}$, que representan cómo la tecnología utilizada en el proceso de reciclaje transforma la materia prima virgen y reciclada en materiales reciclados y re-reciclados, respectivamente. Estas funciones de producción pueden tener en cuenta factores como la eficiencia del proceso de reciclaje, los costos asociados y la calidad del material reciclado, entre otros. En resumen, la regla multivariada en el proceso de reciclaje tiene en cuenta múltiples factores y su interacción

para determinar la cantidad de material reciclado y re-reciclado de un bien en un momento dado.

Todo lo anterior se hace siguiendo a Eichner y Pethig (2001), para que se pueda garantizar el equilibrio y se descarte la posibilidad de una eficacia de reciclado del 100%; además se asume que las funciones de reciclado son cóncavas y cumplen con:

$$r_{i,t}^{v,j} < m_{i,t-h_i}^j, r_{i,t}^{r,j} < r_{i,t-h_i}^j, g_{i,t}^{v,j}(0, \dots) = g_{i,t}^{r,j}(\dots, 0) = 0, \lim_{k_{i,t}^{v,j} \rightarrow +\infty} g_{i,t}^{v,j} < m_{i,t-h_i}^j \quad \text{y}$$

$$\lim_{k_{i,t}^{r,j} \rightarrow \infty} g_{i,t}^{r,j} < r_{i,t-h_i}^j$$

Los residuos son eliminados en un vertedero con capacidad W_t , de acuerdo con la siguiente norma:

$$W_t - W_{t-1} = - \left(\sum_i \sum_j \left(m_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{r,j} \right) \right)$$

Los materiales recuperados $r_{i,t}^{v,j}$ y $r_{i,t}^{r,j}$ se transfieren para ser almacenados y reintroducidos a la economía según la siguiente ecuación:

$$M_{j,t}^r - M_{j,t-1}^r = \sum_i (r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t}^{r,j} - r_{i,t}^j)$$

Dado que hay una única reserva de material reciclado para cada tipo de material j , se pueden considerar dos situaciones: ciclos abiertos (donde el material reciclado es utilizado por diferentes sectores) o ciclos cerrados (donde el reciclado es una actividad específica de un sector). Con una cantidad fija, positiva y finita de capital $K_t > 0$ que es viable para todos los sectores (para poder comprender mejor el funcionamiento del modelo ver anexo 1), se tiene que:

$$K_t = \sum_i k_{i,t} + \sum_i \sum_j (k_{i,t}^{v,j} + k_{i,t}^{r,j})$$

4.1 Comportamiento óptimo

Posteriormente los autores García-Barragán et al. (2019) proceden a caracterizar el comportamiento óptimo de los flujos del sistema. El problema de maximización de la

economía sujeta a las restricciones tecnológicas puede escribirse en notación lagrangiana como:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & \sum_t u_t(z_t^1(c_{1,t}, \dots, c_{1,t-h_1}), \dots, z_t^n(c_{n,t}, \dots, c_{n,t-h_n})) \\
& + \sum_t \sum_j (q_{j,t}^v(m_{1,t}^j, m_{2,t}^j, \dots, m_{n,t}^j) + q_{j,t}^r(r_{1,t}^j, r_{2,t}^j, \dots, r_{n,t}^j)) \\
& + \sum_t \lambda_t^c(c_{i,t} - f_{i,t}(m_{i,t}^1, m_{i,t}^2, \dots, m_{i,t}^N, r_{i,t}^1, r_{i,t}^2, \dots, r_{i,t}^N, k_{i,t})) \\
& + \sum_t \sum_i \sum_j \lambda_{i,j,t}^{r^v}(r_{i,t}^{v,j} - g_{i,t}^{v,j}(m_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{v,j})) \\
& + \sum_t \sum_i \sum_j \lambda_{i,j,t}^{r^r}(r_{i,t}^{r,j} - g_{i,t}^{r,j}(r_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{r,j})) \\
& + \sum_t \lambda_t^k \left(K_t - \sum_i k_{i,t} - \sum_i \sum_j (k_{i,t}^{v,j} + k_{i,t}^{r,j}) \right) \\
& + \sum_t \lambda_t^W \left(W_t - W_{t-1} + \sum_i \sum_j (m_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{r,j}) \right) \\
& + \sum_t \sum_j (\lambda_{j,t}^M \left(M_{j,t} - M_{j,t-1} + \sum_i m_{i,t}^j - \phi_{j,t} \right)) \\
& + \sum_t \sum_j \lambda_{j,t}^{M^r} \left(M_{j,t}^r - M_{j,t-1}^r - \sum_i (r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t}^{r,j} - r_{i,t}^j) \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

En la expresión dada, λ_i^c denota el precio sombra del bien físico $c_{i,t}$, mientras que $\lambda_{i,j,t}^{r^v}$ y $\lambda_{i,j,t}^{r^r}$ denotan los precios sombra de la materia prima $r_{i,t}^{v,j}$ y del material reciclado $r_{i,t}^{r,j}$, respectivamente. Además, λ_t^k es el precio sombra del capital, λ_t^W es el precio sombra de la capacidad del vertedero, mientras que, $\lambda_{j,t}^M$ y $\lambda_{j,t}^{M^r}$ son el precio sombra del stock de la materia prima j y es el precio ficticio de las existencias de material reciclado j respectivamente.

Posteriormente se obtienen las condiciones de primer orden con respecto a $m_{i,t}^j$ y $r_{i,t}^j$ (ver anexo 2), y reordenándolas tendríamos:

$$\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} = -\frac{\partial q_{j,t}^v}{\partial m_{i,t}^j} + \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} + \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^v} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{v,j}}{\partial m_{i,t}^j} - \lambda_{t+h_i}^W - \lambda_j^M \quad \forall t$$

$$\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} = -\frac{\partial q_{j,t}^r}{\partial r_{i,t}^j} + \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} + \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^r} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{r,j}}{\partial r_{i,t}^j} - \lambda_{t+h_i}^W - \lambda_j^{M^r} \quad \forall t$$
(2)

La ecuación 2 se describe cómo los flujos de materiales pueden maximizar el bienestar social al igualar los beneficios marginales presentes y futuros, los cuales consideran la durabilidad, con los costos sociales marginales de reciclaje, incluyendo los impactos sobre la escasez de recursos materiales y espacio para vertederos. Para determinar el beneficio marginal de una unidad adicional de un material, se debe tener en cuenta el valor marginal asignado por el consumidor a la funcionalidad, multiplicado por la productividad marginal del bien para proporcionar funcionalidad (intensidad de producto de la funcionalidad) y por la productividad marginal de los materiales para producir bienes (intensidad material de los productos) (García-Barragán et al., 2019). En resumen, esta ecuación representa cómo los flujos de materiales pueden optimizarse para maximizar el bienestar social, considerando tanto los beneficios como los costos asociados con el uso de los recursos naturales y los vertederos.

4.2 Métricas para la circularidad

El siguiente paso después de caracterizar el flujo óptimo de materiales vírgenes y reciclados es la construcción de algunas métricas auxiliares. Para ello se calcula la tasa de reciclaje del material j en el sector i en el tiempo t ($\alpha_{j,t}^i$), la cual se define como:

$$\alpha_{j,t}^i = \frac{r_{i,t}^j}{m_{i,t}^j + r_{i,t}^j} \in [0,1]$$
(3)

Mientras que el tamaño de la actividad óptima de reciclaje del material tipo j en el sector i en el momento t ($R^*_{i,j,t}$) es:

$$(R^*_{i,j,t}) = \left(\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}^*}{\partial z_{t+s}^*} \frac{\partial z_{t+s}^*}{\partial f_{i,t}^*} \frac{\partial f_{i,t}^*}{\partial r_{i,t}^j} \right) \alpha^{*i}_{j,t} \quad (4)$$

En este caso, los asteriscos señalan los niveles óptimos que se deben alcanzar. La métrica (4) se utiliza para medir el beneficio marginal del material reciclado $r_{i,t}^j$, teniendo en cuenta que los consumidores valoran el bien físico $c_{i,t}$ que requiere $r_{i,t}^j$ como entrada del proceso de producción y que la métrica se multiplica por la tasa de reciclaje $\alpha^i_{j,t}$. Se pueden observar dos sensibilidades parciales para la métrica de reciclaje en esta ecuación:

$$\partial R^*_{i,j,t} / \partial \alpha^i_{j,t} > 0 \quad (5)$$

$$\partial R^*_{i,j,t} / \partial \alpha^*_{t+s} / \partial r_{i,t}^j > 0 \quad (6)$$

Ambas sensibilidades son positivas y muestran cómo la métrica de reciclaje se ve afectada positivamente por los aumentos en el nivel de reciclaje y la utilidad marginal que genera cada unidad adicional de material $r_{i,t}^j$ utilizado en la economía.

Usando la ecuación (2), se puede observar que la métrica otorga mayor importancia a los flujos de materiales reciclados que son relativamente más valorados por los consumidores cuando las externalidades ambientales están completamente internalizadas. Esta propiedad es atractiva, ya que permite medir el tamaño de la actividad de reciclaje cuando los flujos están destinados a maximizar el valor del sistema en su totalidad, incluyendo su dimensión intertemporal.

Del mismo modo, la métrica que define el tamaño de la actividad lineal óptima del sector i para el tipo de material j en el tiempo t ($L^*_{i,j,t}$) está definida de tal manera que también puede ser utilizada para medir el tamaño de la actividad de manera óptima en el contexto de

maximización del valor total del sistema, teniendo en cuenta las mismas condiciones mencionadas anteriormente.

$$(L^*_{i,j,t}) = \left(\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}^*}{\partial z_{t+s}^*} \frac{\partial z_{t+s}^*}{\partial f_{i,t}^*} \frac{\partial f_{i,t}^*}{\partial m_{i,t}^j} \right) (1 - \alpha^{*i}_{j,t}) \quad (7)$$

La métrica (7) exhibe una sensibilidad similar con respecto a la utilidad marginal del material virgen, lo que implica que un aumento en la utilidad marginal del material virgen resulta en un incremento en $\partial L^*_i / \partial [\partial u_{t+s}^* / \partial m_{i,t}^j] > 0$. Sin embargo, al mantener constante el nivel de utilidad marginal $\partial u_{t+s}^* / \partial m_{i,t}^j$, se espera que la actividad lineal aumente a medida que la tasa de reciclaje $\alpha^{i}_{j,t}$ disminuya. Se considera que esta característica hace que $L^*_{i,j,t}$ sea una medida atractiva para evaluar la actividad lineal en los sectores. Para construir una métrica que capture la actividad circular del sistema, se combinan las dos métricas auxiliares. Se define el nivel agregado de actividad de reciclaje óptima en el tiempo t como $R_t^* = \sum_i \sum_j R^*_{i,j,t}$, y el nivel agregado de actividad lineal óptima en el tiempo t como $L_t^* = \sum_i \sum_j \mu_{i,j} L^*_{i,j,t}$. Finalmente, se define el tamaño óptimo de la actividad circular de la economía en el tiempo t (C_t^*) como

$$C_t^* = R_t^* - L_t^* \quad (8)$$

En resumen, la actividad circular de la economía se define como la diferencia entre la actividad de reciclaje óptima y la actividad lineal óptima, pero penalizada por factores de intolerancia $\mu_{i,j}$. Estos factores de intolerancia son parámetros exógenos que generalmente se fijan en uno, lo que significa que no se permite ningún grado de intolerancia en la economía. Sin embargo, cuando el grado de sustitución entre materiales vírgenes y reciclados tiende al infinito, las métricas que miden la actividad circular y lineal pueden converger, lo que dificulta distinguir entre ambas. En este caso extremo, la presencia de los factores de intolerancia $\mu_{i,j}$ garantiza que la actividad circular sea distinguible de la actividad lineal.

Es importante destacar que una métrica basada únicamente en la actividad de reciclaje, como R_t^* , no puede caracterizar de manera satisfactoria el comportamiento de una EC. Si al menos una tasa de reciclaje es cero, la métrica R_t^* se vuelve insensible a incrementos parciales en la utilidad marginal del sector de reciclaje cero. En otras palabras, si se considera R_t^* como la métrica de la EC, una economía que sea relativamente más lineal podría parecer igualmente circular. Para resolver este problema, se utiliza la métrica L_t^* como una penalización, lo que ayuda a distinguir entre la actividad circular y la actividad lineal.

Para definir claramente la EC, se utiliza la métrica presentada en la ecuación (8). Se dice que una economía es circular en el tiempo t si el valor de la métrica que mide la actividad circular óptima, denotada como $C_t^* > 0$ lo que significa que la economía está operando de manera circular. Por otro lado, si $C_t^* \leq 0$, se dice que la economía es lineal. Por otra parte, para comparar la circularidad de la economía en diferentes momentos del tiempo se utiliza la métrica C_{t+s}^* . Se dice que la economía es más circular con relación a esta métrica si $C_t^* > C_{t+s}^*$ para algún valor de $s \in \mathbb{N}^{2,3}$.

Para medir el crecimiento económico circular entre dos periodos de tiempo, denotados como τ y τ' , se utiliza la tasa de crecimiento circular $\rho(\tau, \tau') = (C_{\tau'}^* - C_{\tau}^*)/C_{\tau}^*$ donde $\rho(\tau, \tau') > 0$. Esta tasa indica que la economía está experimentando un crecimiento económico circular entre los periodos τ y τ' , lo que implica que la métrica que mide la tasa de crecimiento circular es estrictamente positiva.

5. Simulación y resultados

En esta sección de la tesis, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas utilizando el modelo de EC previamente descrito. Dichas simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software Excel, donde se asignaron valores a cada una de las variables en dicho modelo. La simulación se realizó para un periodo de 21 años (donde t va de 0 a 20), y además se realizaron tres variaciones en la cantidad de material reciclado utilizado en la producción de

² Tomar en cuenta que las comparaciones intertemporales son posibles dado que se descuenta la utilidad.

³ En este caso el término "más circular" se refiere a un mayor nivel de implementación de prácticas y procesos circulares en la economía, lo cual se refleja en una métrica que indica un mayor grado de actividad circular óptima.

bienes, específicamente en porcentajes del 60, 70 y 80%. El objetivo principal de estas simulaciones fue evaluar los beneficios que podrían obtener las organizaciones al implementar un enfoque de producción circular.

La elección de los porcentajes de reciclado utilizados en la simulación en el contexto de que la EC, busca maximizar la eficiencia y minimizar el uso de recursos naturales, fomentando el reciclaje y la reutilización de materiales. Por lo tanto, los porcentajes de reciclado mencionados se consideran realistas y relevantes en función de las metas y políticas de EC que se pueden implementar en diferentes sectores y países. En el caso de las métricas que proponen García-Barragán et al. (2019) al utilizar diferentes niveles de material reciclado, se buscó determinar las variaciones de la actividad circular y ver cuál sería el porcentaje óptimo de material reciclado que se utilizaría para que un proceso productivo circular funcione de forma eficiente.

Es importante destacar que en el modelo propuesto por García-Barragán et al. (2019), no se especifica una función de producción en concreto. Por lo tanto, se ha optado por utilizar una función de producción de tipo Elasticidad de Sustitución Constante (CES) en las simulaciones para permitir su ejecución. Esta elección se debe a la presencia de dos tipos de materiales (virgen y reciclado) y el capital en el proceso productivo. En este caso la función de producción CES permite capturar la combinación de los materiales y el capital en el proceso productivo, lo cual es fundamental para evaluar los efectos de diferentes porcentajes de reciclado en las simulaciones y determinar su impacto en las utilidades de las organizaciones.

La función de producción CES tiene la siguiente forma:

$$c_{i,t} = [(\alpha m_{i,t}^\rho) + (1 - \alpha) r_{i,t}^\rho] + k_{i,t} \quad (9)$$

Donde se utiliza el parámetro α para determinar el parámetro de proporción de los dos insumos (material virgen $m_{i,t}$ y material reciclado $r_{i,t}$). En este caso si $\alpha = 1$, $m_{i,t}$ tiene peso completo en la producción y $r_{i,t}$ no tiene ningún efecto. Mientras que si $\alpha = 0$ ocurre lo contrario. Por otra parte, ρ controla la elasticidad de sustitución entre los dos tipos de materiales; si $\rho > 1$ los materiales son sustitutos imperfectos. Si $\rho = 1$ los serán sustitutos perfectos y en caso de que $\rho < 1$ los materiales son complementarios.

5.1 Residuos sólidos urbanos inorgánicos

5.1.1 Papel y cartón

5.1.1.1 Contexto de la Industria del papel y el cartón en México

En la investigación de Area et al. (2012) se menciona que el uso de papel reciclado ha experimentado un rápido crecimiento y se ha convertido en un material importante para la industria. En el pasado, en 1970, aproximadamente el 20% de los empastes contenían fibras celulósicas recicladas, mientras que en 1995 esta proporción había aumentado al 35% y continuó aumentando. En México, se implementó la norma NMX-N-107-SCFI-2010, la cual establece las especificaciones y el procedimiento de verificación para garantizar el contenido mínimo de fibra reciclada en la fabricación de diferentes productos de papel. Estos productos incluyen papel periódico, papel para bolsas y envolturas, papel para sacos, cartoncillo y cajas corrugadas y laminadas exclusivamente (Cámara del Papel, 2019).

La norma anterior establece los porcentajes mínimos de contenido de fibra reciclada que debe contener cada producto, estos varían desde el 50% hasta el 80%, dependiendo del tipo de producto en cuestión (Cámara del Papel, 2019). El aumento en el uso de papel reciclado ha sido impulsado por la conciencia ambiental y la necesidad de reducir la dependencia de la pulpa virgen. La calidad del papel reciclado como materia prima depende de dos factores clave: la calidad de las fibras, que está determinada por el tipo de papel recuperado utilizado, y el grado de contaminación, que se refiere a la naturaleza y cantidad de sustancias contaminantes presentes en el papel reciclado.

A pesar de estas consideraciones, el papel reciclado sigue siendo una alternativa favorable desde el punto de vista ambiental, ya que es biodegradable y contribuye a reducir el volumen de residuos, por ejemplo: por cada tonelada de papel reciclado son sustituidos de 15 a 20 árboles de tamaño medio, aproximadamente (Area et al., 2012). Es importante tener en cuenta que el proceso de reciclaje del papel tiene limitaciones ya que el papel de desecho solo puede reciclarse 5 o 6 veces, pues cada vez que este material se recicla, pierde entre el 15% y el 20% de sus fibras largas. Lo que significa que las fibras recicladas a menudo se mezclan con pulpa virgen para obtener papeles con propiedades adecuadas. Y por ello existe una

relación no lineal entre el consumo de fibra virgen y la utilización de papel reciclado. Según estudios, se ha determinado que el porcentaje óptimo de reciclado es del 93% para papel producido a partir de pulpa química y del 81% para papel producido a partir de pulpa mecánica (Schenk et al., 2004; Area et al., 2012).

Según la Cámara Nacional de la industria de la Celulosa y del Papel (2014), el papel y el cartón son productos elaborados a partir de fibras vegetales que han sido tratadas tanto de forma mecánica como química, y posteriormente unidas mediante procesos industriales. En el contexto mexicano, históricamente se ha utilizado una variedad de materiales para fabricar celulosa y papel, como paja de trigo, avena, arroz, fuste de coco, copetes de piña, bagazo de caña y mezcal, desperdicios de henequén, lino y lechuguilla, borra de algodón, yuca, palmas, maderas, bambú, y desperdicios de papel y cartón. Sin embargo, en la actualidad, la fabricación de papel se concentra principalmente en tres materias primas: madera, bagazo de caña y desperdicios de papel y cartón. Esto se debe a consideraciones económicas, de calidad y de disponibilidad, lo que ha llevado a que los otros materiales mencionados hayan caído en desuso en la industria papelera mexicana.

De acuerdo con datos del Censo Económico de 2019, la producción bruta total de la industria de fabricación de productos de cartón y papel (rama industrial 3222) alcanzó los \$169,650 millones de pesos mexicanos. Los estados que lideraron en términos de producción bruta total fueron el Estado de México con \$35,612 millones de pesos mexicanos y Nuevo León con \$27,622 millones de pesos mexicanos. En cuanto a los ingresos totales, se registró un total de \$175,790 millones de pesos mexicanos en 2019, siendo el Estado de México nuevamente el estado con mayores ingresos con \$37,425 millones de pesos mexicanos, seguido de Nuevo León con \$28,663 millones de pesos mexicanos (Data México,2022).

En lo que respecta al número de empresas en esta industria, se contabilizaron 5,106 empresas con un rango de 0 a 10 empleados. Durante el mismo período, se registraron 591 empresas con una plantilla de 11 a 50 empleados, mientras que se identificaron 120 empresas con 51 a 100 empleados en el año 2022. Además, se registraron 282 empresas con más de 101 empleados (DENUE,2022; Data México,2022).

5.1.1.2 Resultados de simulación

La simulación dinámica del sistema de producción de productos de cartón y papel (industria 3222) se llevó a cabo considerando datos iniciales de materiales vírgenes ($M_{j,t}$ y $m_{i,t}$), materiales reciclados ($M_{j,t}^r$ y $r_{i,t}$) y capitales utilizados ($K_t, k_{i,t}^{v,j}$ y $k_{i,t}^{r,j}$), los cuales se obtuvieron del Censo Económico de 2019 realizado por el INEGI. Para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y mantener un equilibrio entre el crecimiento económico y la preservación de los recursos, se asumió que el capital necesario para la operación y expansión del sistema aumentaría anualmente en un 4%. Esta cifra se basó en la aplicación de la regla de oro, la cual busca promover un desarrollo económico sostenible.

En el análisis de las externalidades, se incluyen las externalidades negativas relacionadas con el transporte. Para calcular estas externalidades, se considera el volumen de material reciclado ($r_{i,t}$) y material virgen ($m_{i,t}$) utilizado en la producción, multiplicado por sus respectivos costos de transporte. Según González Martínez (2001), el precio de transporte para el material reciclado es de \$3.58 MNX por tonelada de $r_{i,t}$. Por otro lado, de acuerdo con documentos de logística y reportes del Gobierno de México (2019), el costo de transporte para el material virgen es de \$80 MNX por tonelada de $m_{i,t}$. Estos valores son utilizados para evaluar el impacto económico de las externalidades negativas generadas por el transporte en el contexto de la producción y utilización de los materiales.

En la función de producción, se asignan diferentes valores a los parámetros para determinar su impacto en el proceso. En este caso, como se mencionó anteriormente, si el valor de α es igual a 1, el material $m_{i,t}$ tiene un peso completo en la producción, mientras que $r_{i,t}$ no tiene ningún efecto. Por otro lado, si α es igual a 0, ocurre lo contrario. En esta investigación, se ha asignado un valor de 0.3 a α , lo que implica que $m_{i,t}$ tendrá un peso menor en comparación con $r_{i,t}$. En lo que respecta al parámetro ρ , que controla la elasticidad de sustitución entre los dos tipos de materiales. Ya que García-Barragán et al. (2019) mencionan que los dos tipos de materiales son sustitutos imperfectos, esto implicaría que ρ debe ser mayor a 1. Por lo que en la simulación se ha considerado esta característica y se ha establecido un valor apropiado para ρ . Estos parámetros se han ajustado cuidadosamente para

reflejar las características específicas de los materiales y garantizar una representación precisa de la sustitución entre ellos.

Estos enfoques y suposiciones establecidos en la simulación permiten tener una visión dinámica de la evolución del sistema de producción de productos de cartón y papel, considerando tanto los factores económicos como los ambientales. De esta manera, se pueden evaluar escenarios futuros y analizar el impacto de diferentes variables en la rentabilidad y sostenibilidad de la industria. Los resultados de la simulación muestran cómo la implementación de la EC influye en la economía de la industria de productos de cartón y papel. Se observa que, a medida que se incrementa el porcentaje de material reciclado utilizado en la producción, los beneficios máximos obtenidos a los 21 años aumentan gradualmente.

Tabla 1. Beneficio de acuerdo con el porcentaje de material reciclado utilizado en la producción

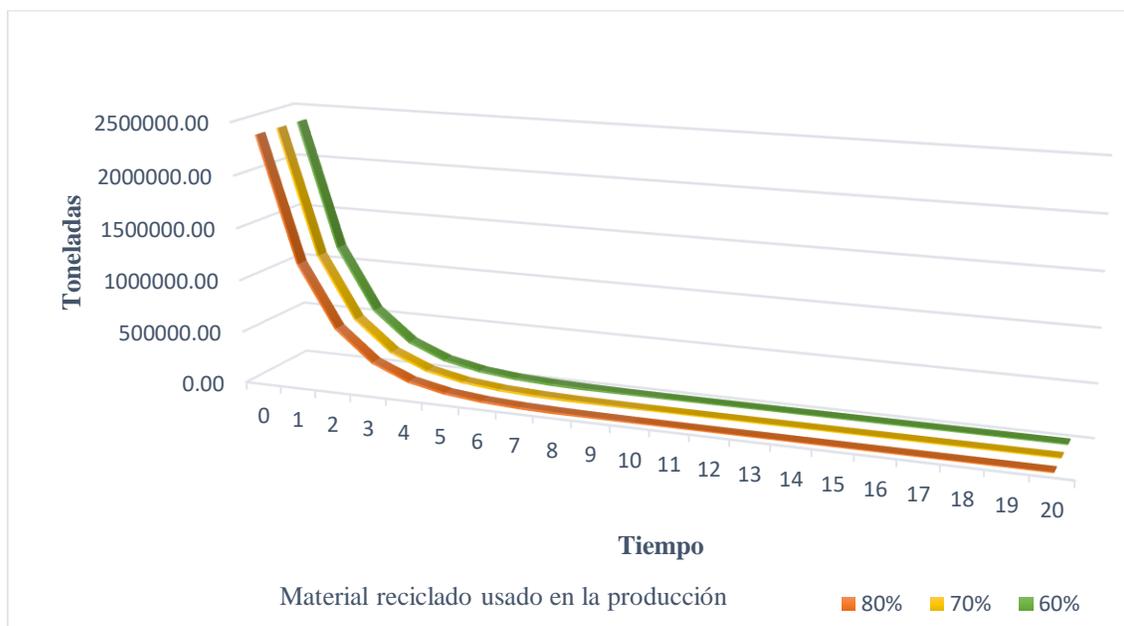
Cantidad de material reciclado utilizado en la producción	Beneficio de la industria 3222 en 21 años (pesos mexicanos)
0%	29,790,228,392.51
60%	30,024,343,503.35
70%	30,064,807,349.45
80%	30,105,603,857.11

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 1 proporciona una visión clara de cómo el porcentaje de material reciclado influye en el beneficio máximo de la industria del papel y el cartón. Al analizar los datos, se observa que al utilizar un 80% de material reciclado, la industria logra alcanzar un beneficio máximo superior en comparación con los escenarios donde se reduce el porcentaje de material reciclado al 70% y al 60%. Aunque en estos últimos casos los beneficios máximos también disminuyen, siguen siendo significativas. Es destacable que si la industria no incorporara ningún material reciclado en su producción (es decir, un 100% de material virgen), el beneficio se reduce drásticamente a más de un millón de pesos. Este hallazgo resalta la importancia y el impacto positivo que tiene la adopción de prácticas circulares, como el uso de material reciclado, en la rentabilidad de la industria del papel y el cartón.

Estos resultados demuestran que la implementación de estrategias de EC, que promueven el uso eficiente de recursos y la reducción del consumo de materia prima virgen, no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también genera beneficios económicos tangibles para las empresas del sector. Al tomar decisiones que fomenten la incorporación de material reciclado en la producción, la industria puede mejorar su rentabilidad y al mismo tiempo reducir su impacto ambiental, lo que respalda la viabilidad y la importancia de la transición hacia un modelo económico más circular.

Figura 1. Residuos eliminados por la industria

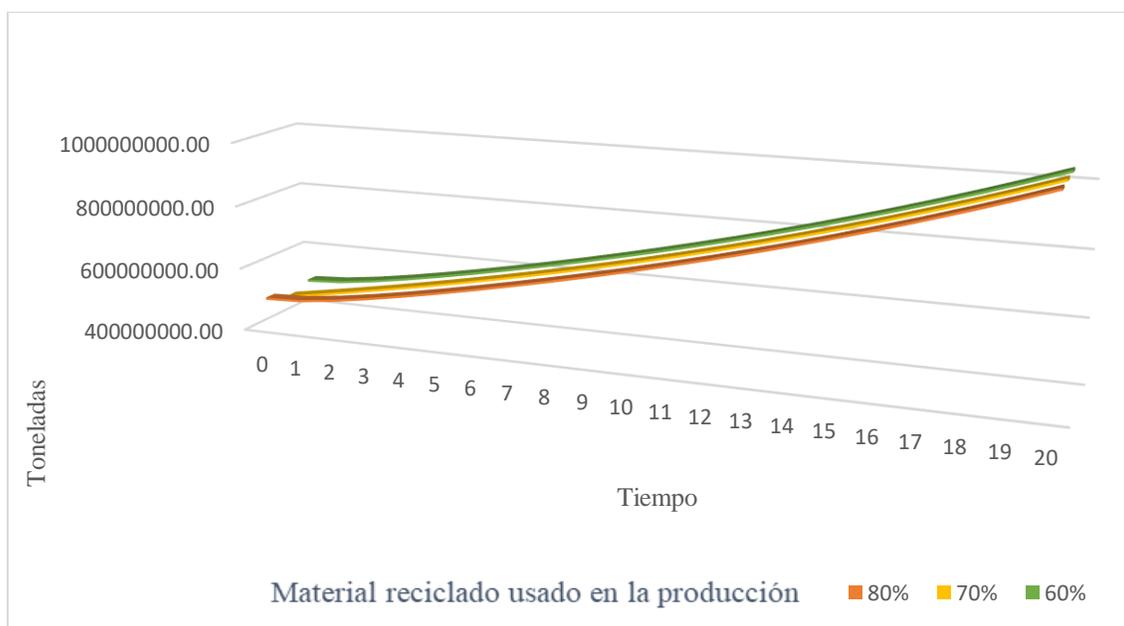


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1 se muestra la representación de los residuos que son desechados en un vertedero, cuya capacidad se denota como W_t , y que ya no pueden ser utilizados en el proceso de producción. Es interesante observar que a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado en la industria, la cantidad de residuos generados disminuye. Este comportamiento revela una relación inversa entre el nivel de reciclaje y la generación de residuos. A medida que los residuos van disminuyendo, se observa que todos los valores convergen hacia cero, lo que sugiere una tendencia hacia la reducción total de los residuos generados por la industria. Esto destaca la importancia del reciclaje en el marco de una EC, donde se busca minimizar los desechos y aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Como bien lo sugieren otras investigaciones, una estrategia clave para alcanzar la reducción de residuos es el rediseño del ciclo de vida de los recursos, con el fin de asegurar que todos los productos sean reciclados y evitando que sean enviados a vertederos, incineración u otros métodos tradicionales de eliminación. Esta estrategia promueve el reciclaje y la reutilización de los desechos, permitiendo que sean transformados en nuevos materiales. En esencia, el reciclaje de residuos se convierte en un método efectivo de aprovechamiento de recursos y contribuye al objetivo de la sostenibilidad (Zaman y Lehman, 2011; Zaman, 2014; Yang et al., 2022). Al implementar estas prácticas, se fomenta la EC, donde los productos y materiales son reciclados y reintegrados en nuevos ciclos de producción, minimizando así la generación de residuos y optimizando el uso de los recursos disponibles. Esta forma de abordar la gestión de los residuos implica un cambio de paradigma hacia una economía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Figura 2. Función de producción



Fuente: Elaboración propia

Además, al examinar la Figura 2, se puede observar el comportamiento de la función de producción. Una vez más, se evidencia que las tres variaciones en el porcentaje de material reciclado utilizado en el proceso productivo muestran un comportamiento similar. A medida que transcurre el tiempo, se observa un aumento en la producción. En esta etapa de la investigación, se llevaron a cabo diversas variaciones en los parámetros de la función de

producción. Se descubrió que cualquier cambio en el rango de 0 a 1 asignado al parámetro α no generaba diferencias significativas en el comportamiento descrito anteriormente. En cuanto al parámetro ρ , el cual debe tomar valores mayores a uno según las especificaciones del modelo, se observó que a medida que se incrementa su valor, la producción sigue un patrón similar al de una función cuadrática.

Estos hallazgos indican que, en el contexto del modelo utilizado, los cambios en los parámetros de la función de producción tienen un impacto limitado en el comportamiento general de la producción. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este análisis se basa en las condiciones específicas del modelo y que podrían existir otros factores y variables que influyan en la producción en situaciones reales (e.g. el trabajo y los costos de reciclaje).

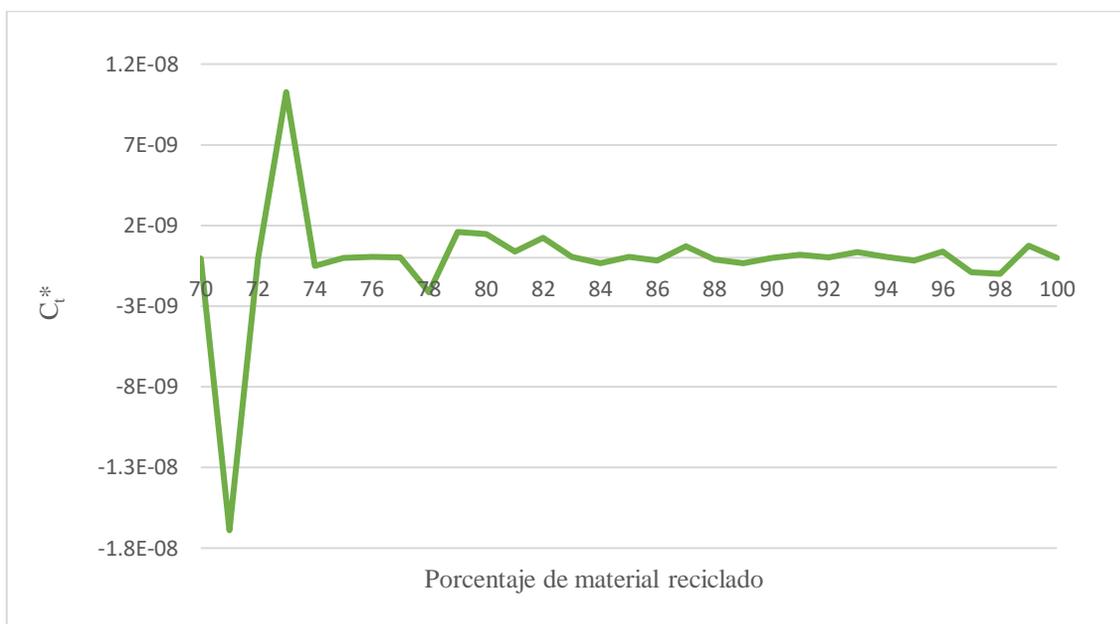
Algunos académicos de la EC destacan los fundamentos del optimismo tecnológico como parte del concepto de la EC, sosteniendo que el cambio tecnológico tiene el potencial de separar el crecimiento económico del impacto ambiental negativo (Murray et al. 2017; Isenhour 2016; Wiedmann et al. 2015; Fullerton et al. 2022). La EC se centra en la búsqueda de soluciones innovadoras y tecnológicas que permitan reducir la extracción de materias primas, desarrollar productos más respetuosos con el medio ambiente, maximizar el uso eficiente de los recursos y minimizar la generación de residuos.

En este sentido, el análisis de la función de producción y su comportamiento con relación al porcentaje de material reciclado utilizado en el proceso productivo respalda la idea de que la implementación de prácticas circulares puede conducir a beneficios tanto económicos como ambientales. Al demostrar que la producción aumenta a medida que se incrementa el material reciclado, se refuerza la noción de que la transición hacia una EC podría ser una opción viable y ventajosa para las empresas y la sociedad en general.

Finalmente, en el proceso de análisis, se realiza el cálculo del óptimo tanto para la actividad de reciclaje como para la actividad lineal, y luego se obtiene la diferencia entre ambas para determinar el tamaño óptimo de la actividad circular de la economía a lo largo de 21 años (C_t^*). En este contexto, se examina cómo varía el comportamiento de C_t^* al considerar porcentajes continuos de material reciclado en la producción de papel y cartón, que van desde el 70% hasta el 100%. Este enfoque permite evaluar el impacto de los diferentes porcentajes de material reciclado en la EC. Al analizar el comportamiento de C_t^* para los distintos

porcentajes, implicaría encontrar el equilibrio entre la cantidad de material reciclado utilizado y los beneficios económicos obtenidos a través de la implementación de prácticas de EC.

Figura 3. Tamaño óptimo de la actividad circular



Fuente: Elaboración propia

Al analizar la Figura 3, se puede observar el comportamiento a lo largo del tiempo de la actividad óptima circular (C_t^*). Es notable que los valores fluctúan entre positivos y negativos, aunque siempre muy cercanos a cero. Como se mencionó anteriormente, se considera que una economía es circular en el tiempo t si el valor de la métrica que representa la actividad circular óptima, denotada como $C_t^* > 0$. Esto indica que la economía está operando de manera circular y se están implementando prácticas de reutilización y reciclaje. Por otro lado, si $C_t^* \leq 0$ se dice que la economía es lineal, lo que sugiere un enfoque predominante en la producción y consumo lineal, sin una adecuada consideración de la circularidad. Lo que nos refleja que al implementar el modelo matemático propuesto por García-Barragán et al. (2019) la industria del papel y el cartón en México no termina de ser circular del todo de acuerdo con las métricas que proponen.

Es importante tener en cuenta que estos resultados pueden estar influenciados por los valores numéricos iniciales asignados en la simulación económica, lo cual constituye una de las principales limitaciones de este estudio. Estos valores iniciales pueden tener un impacto

significativo en el comportamiento de la actividad óptima circular a lo largo del tiempo. La fluctuación de los valores cercanos a cero en la actividad óptima circular C_t^* en el análisis de la Figura 3 indica que la implementación del modelo matemático propuesto no logra que la industria del papel y el cartón en México alcance plenamente una economía circular según las métricas establecidas.

Además, es posible que el modelo matemático propuesto por García-Barragán et al. (2019) tenga una naturaleza más general para adaptarse a diferentes escenarios, lo que puede requerir ajustes específicos para reflejar de manera más precisa la realidad de la industria del papel y el cartón. Al incorporar valores más cercanos a la realidad en la simulación, es posible que se pueda observar una mayor eficacia en la implementación de prácticas de economía circular, lo que contribuiría a que la industria funcione de manera más circular y sostenible. Por lo tanto, es necesario considerar la adaptabilidad del modelo matemático y su capacidad para representar adecuadamente el contexto específico de estudio.

Es fundamental realizar un análisis exhaustivo y meticuloso al seleccionar los valores iniciales en la simulación, ya que estos desempeñan un papel crucial en la evaluación de la viabilidad y efectividad de un modelo económico circular. Es importante considerar las variables clave que afectan la economía circular en el sector específico que se está estudiando. Estas variables pueden abarcar desde la disponibilidad de materiales reciclados y la demanda del mercado, hasta las políticas gubernamentales y otros factores relevantes que influyen en la transición hacia una economía más circular. Al tener en cuenta estos aspectos, se pueden obtener conclusiones más sólidas y realistas sobre la implementación de prácticas de economía circular en el sector en cuestión.

6. Conclusiones y discusión

La EC representa una transformación disruptiva al introducir nuevos enfoques en la producción y comercialización dentro del ámbito económico. Este enfoque innovador nos ofrece la oportunidad de reducir la extracción de materias primas, diseñar productos de manera más amigable con el medio ambiente, optimizar el uso de los productos para preservar su valor y disminuir el desperdicio (Fullerton et al., 2022). Los economistas desempeñan un papel fundamental en enriquecer y contribuir a la transición de una economía lineal a una circular. Investigaciones como la realizada por García-Barragán et al. (2019) nos brindan una visión clara de que es posible implementar cambios en los sistemas de producción para lograr este objetivo.

Al realizar las variaciones en el porcentaje de material reciclado utilizado en el proceso productivo y analizar los niveles de beneficio correspondientes, se observa una correlación directa y esperada entre los beneficios obtenidos y la cantidad de material reciclado. Es decir, a medida que se reduce la cantidad de material virgen utilizado en la producción y se aumenta el uso de material reciclado, los beneficios para la empresa productora también se incrementan. Este hallazgo respalda y refuerza la idea de que la transición hacia una EC podría ser la opción más beneficiosa para la sociedad en general, a pesar de que los resultados de la actividad óptima circular sugieren solo es conveniente para la industria del papel y el cartón hacer circular su sistema productivo cuando se utiliza un 100% de material reciclado para producir sus bienes.

Se puede concluir que el modelo y las métricas de EC propuestas por García-Barragán et al. (2019), fomentan la reutilización y reciclaje de recursos en el sector industrial, pues no solo se reduce la dependencia de la extracción de materias primas, sino que también genera ventajas económicas para las organizaciones. Al disminuir la necesidad de adquirir grandes volúmenes de material virgen, las empresas pueden reducir costos, optimizar sus procesos y mejorar su rentabilidad. Al mismo tiempo, se promueve la conservación del medio ambiente al minimizar el desperdicio y el impacto ambiental asociado a la producción y eliminación de residuos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la aplicación de estos resultados en escenarios reales requiere considerar otros factores, como el tipo y la disponibilidad de tecnologías adecuadas, los costos asociados al reciclaje y la viabilidad económica de adoptar prácticas circulares. La implementación exitosa de la EC implica la colaboración entre diversos actores, incluidos los sectores empresariales, gubernamentales y académicos, para desarrollar estrategias integrales que fomenten la circularidad y promuevan un crecimiento sostenible.

Por último, es importante señalar que, aunque el modelo matemático utilizado para simular la EC proporciona información valiosa, aún existen áreas de mejora que podrían enriquecerlo. Una de estas áreas, es la inclusión de variables adicionales, como la variable de trabajo y los costos asociados al reciclaje. Al incorporar estas variables, se obtendrían datos más precisos y realistas que permitirían una comprensión más completa de los beneficios y desafíos de la transición hacia una EC.

La inclusión de la variable de trabajo en el modelo permitiría evaluar cómo la implementación de prácticas circulares afecta la generación de empleo en diferentes sectores de la economía. Esto es especialmente relevante, ya que la EC puede impulsar la creación de nuevos puestos de trabajo en áreas relacionadas con la gestión de residuos, la recuperación de materiales y la innovación en procesos sostenibles. Además, el análisis de esta variable podría proporcionar una visión más completa de los impactos sociales y laborales de la EC, permitiendo una evaluación más precisa de sus beneficios para la sociedad.

Por otro lado, la consideración de los costos de reciclaje en el modelo ofrecería una perspectiva más precisa sobre la viabilidad económica de la transición hacia una EC. Esto implicaría evaluar los gastos asociados a la recolección, clasificación y procesamiento de los materiales reciclables, así como los posibles ahorros derivados de la reducción en la utilización de materiales vírgenes. Estos datos más precisos sobre los costos de reciclaje permitirían una evaluación más completa de la rentabilidad y la toma de decisiones informadas por parte de las organizaciones interesadas en adoptar prácticas circulares.

7. Referencias

- Area, M., Mastrantonio, G., & Velez, H. (2012). Gestión ambiental en la fabricación de papel reciclado. En *Reciclado celulósico* (págs. 263-303). Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/262932872>
- Allen, A. (2001). Containment landfills: the myth of sustainability. *Engineering Geology* 60, 3-19.
- Batista, L., Bourlakis, M., Smart, P., & Maull, R. (2018). In search of a circular supply chain archetype a content analysis based literature review. *Prod. Plann. Contr.*, 29, 438–451. doi:<https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1343502>
- Bin Guo, Y. G. (2017). Comparative Assessment of Circular Economy Development in China's Four Megacities: The Case of Beijing, Chongqing, Shanghai and Urumqi. *Journal of Cleaner Production*, 162, 234-246. doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.061
- Bongers, A., & Casas, P. (2022). The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecological Economics*, 199, 1-12.
- Boulding, K. (1966). The economy of the coming spaceship earth. *Economics, Ecology, Ethics: Essay towards a Steady State Economy*.
- Cámara del Papel. (2019). *NORMA MEXICANA NMX-N-107-SCFI-2010*. Secretaría de Economía.
- Carrillo González, G., & Pomar Fernández, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*. doi:<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933>
- Casiano Flores, C., Bressers, H., Gutierrez, C., & de Boer, C. (2018). Towards circular economy – a wastewater treatment perspective, the Presa Guadalupe case. *Emerald Publishing Limited*, 41, 554-571. doi:DOI 10.1108/MRR-02-2018-0056
- Cervantes, G. (2021). TRANSITANDO A LA ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR AGROPECUARIO: GRANJAS EXPERIMENTALES EN GUANAJUATO. *Kawsaypacha*, 7, 45-66. doi:<https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.003>

- Chen, C.-C., Sukarsono, F., & Jui, K. (2022). Evaluating a sustainable circular economy model for the Indonesian fashion industry under uncertainties: a hybrid decision-making approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *40*, 188-204. doi:10.1080/21681015.2022.2162616
- Córdova Preciado, M., Salgado Beltrán, L., & Bravo Díaz, B. (2021). Economía circular y su situación en México. *Revistas UNISON*, *1*.
- Cordova-Pizarro , D., Aguilar-Barajas, I., Romero, D., & Rodriguez, C. (2019). Circular Economy in the Electronic Products Sector: Material Flow Analysis and Economic Impact of Cellphone E-Waste in Mexico. *Sustainability*, *11*, 1-18. doi:10.3390/su11051361
- Cruz-Pastrana , J.-L., & Franco-García, M.-L. (2019). Feasibility Analysis of a Cap-and-Trade System in Mexico and Implications to Circular Economy. En M.-L. F.-G. al., *Towards Zero Waste, Greening of Industry Networks Studies 6* (págs. 61-80). Springer Nature Switzerland AG. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92931-6_4
- DENUE. (2022). *Directorio de empresas y establecimientos*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/directorio/>
- Dieleman , H., & Martínez-Rodríguez, M.-C. (2019). Potentials and Challenges for a Circular Economy in Mexico. En M.-L. F.-G. al., *Towards Zero Waste, Greening of Industry Networks Studies 6* (págs. 9-24). Springer Nature Switzerland AG. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-92931-6_2
- Duden. (2015). Duden: Deutsches Universalwörterbuch, eighth ed. Bibliographisches Institut GmbH, Berlin.
- Dufourmont , J., & Brown , E. (2020). Jobs & skills in the circular economy: state of play and future pathways. *Rep., Circle Economy, Amsterdam*, 2-15. Obtenido de <https://www.circle-economy.com/resources/jobs-skills-in-the-circular-economy-state-of-play-and-future-pathways>

- Fang, K., Dong, L., Ren, J., Zhang, Q., Han, L., & Fu, H. (2017). Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China. *Ecological Modelling*, *365*, 30–44. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.09.024>
- Frosch, R., & Gallopoulos, N. (1989). Strategies for manufacturing. *Sci. Am.*, *261*, 144–152. doi:<https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
- Fullerton, D., Babbitt, C., Bile, M., He, S., Isenhour, C., Khanna, V., . . . Theis, T. (2022). Introducing the Circular Economy to Economists. *Annual Review of Resource Economics*, *14*, 493-514. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-resource-101321-053659>
- García-Barragán, J. F., Eyckmans, J., & Rousseau, S. (2019). Defining and Measuring the Circular Economy: A Mathematical Approach. *Ecological Economics*, *159*, 369–372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.003>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., M.P. Bocken, N., & Jan Hultink, E. (2017). The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757-768. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Geng, Y., Zhu, Q., Doberstein, B., & Fujita, T. (2009). Implementing China's circular economy concept at the regional level: a review of progress in Dalian, China. *Waste Manag.*, *29*, 996–1002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.036>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11-36.
- Gobierno de México. (2019). *COBROS Y CUOTAS VIGENTES A PARTIR DEL*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/511857/MILESTONE_PEARSON_2019.pdf
- González Martínez, A. C. (2001). Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. *Gaceta Ecológica*, *58*, 17-26. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53905802>
- Guevara-Rivera, E., Zaldivar-Carrillo, V., & Osorno Hinojosa, R. (2021). Dynamic simulation methodology for implementing circular economy: A new case study.

- Journal of Industrial Engineering and Management*, 14, 850-862. Obtenido de <https://doi.org/10.3926/jiem.3609>
- Hernández-Niño , J., Hernández Molano , A., & Tello, V. (2009). Seroprevalencia de leptospirosis en perros callejeros y personas de alto riesgo ocupacional en la ciudad de Tunja. *Teoría y praxis investigativa*, 4, 33-38.
- Hernández-Rejón, E. (2014). Sustentabilidad y calidad de vida urbana. *Revista de Comunicación de la SEECI, Número extraordinario*, 159-169.
- Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *Int. J. Green Econ.*, 11, 251-288. doi:<https://doi.org/10.1504/IJGE.2017.089856>
- Iacovidou, E., Millward-Hopkins, J., Busch, J., Purnell, P., Velis, C., Hahladakis, J., . . . Brown, A. (2017). A pathway to circular economy: developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *J. Clean. Prod.*, 168, 1279–1288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2022). *Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos*. SEMARNAT. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/693803/125_2022_Atlas_Nacional_Residuos_Solidos.pdf
- INEGI. (2019). *Censos Económicos* . Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Tabulados>
- INEGI. (2022). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021. Presentación de resultados generales*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/cngmd/2021/doc/cngmd2021_resultados_geogr_amb.pdf
- INEGI. (2022). *En números. Documentos de análisis y estadísticas. Cuaderno 24. Los Gobiernos Municipales en México Volumen II: Funciones Básicas*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463907367.pdf

- INEGI. (s.f.). *Cuentame de México*. Obtenido de Medio ambiente . Basura : <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/basura.aspx?tema=T>
- INEGI. (s.f.). *Programas de información*. Obtenido de Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/#Documentacion>
- Jaramillo, J. (2022). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Colombia : CEPIS, Organización Panamericana de la Salud, OMS.
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy - from review of theories and practices to development of implementation tools. *Resour. Conserv. Recycl.*, 135, 190–201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kinnamana, T., Shinkuma, T., & Yamamoto, M. (2014). The Socially Optimal Recycling Rate: Evidence from Japan. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68, 54-70. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeem.2014.01.004>
- Kiss, K., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39-51. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907903>
- Korhonen , J., Honkasalo , A., & Seppälä , J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecol. Econ.*, 143, 37–46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Li, H., Bao , W., Xiu , C., Zhang , Y., & Xu , H. (2010). Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy*, 35, 4273-4281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021>
- Li, R., & Su, C. (2012). Evaluation of the circular economy development level of Chinese chemical enterprises. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1595-1601. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.151>
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: acomprehensive review in context of manufacturing industry. *J. Clean. Prod.*, 115, 36–51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>

- Liu, Q., Li, H.-m., Zuo, X.-l., Zhang, F.-f., & Wang, L. (2009). A survey and analysis on public awareness and performance for promoting circular economy in China: A case study from Tianjin. *Journal of Cleaner Production*, *17*, 265-270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.003>
- Loomis, J. (2005). Economic Values without Prices: The Importance of Nonmarket Values and Valuation for Informing Public Policy Debates. *Agricultural & Applied Economics Association*, *20*, 179-182. Obtenido de <https://www.choicesmagazine.org/2005-3/nonmarket/2005-3-01.pdf>
- López Pérez, S., Bernal Domínguez, D., & Sandoval Barraza, L. (2021). Apuntes sobre el papel de la política fiscal en la transición hacia un modelo de economía circular en México. *Economía UNAM*, *18*, 167-187. doi:<https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2021.53.635>
- Marateo, G., Grilli, P., Bouzas, N., Jensen, R., Ferretti, V., Juárez, M., & Soave, G. (2013). Uso de hábitat por aves en rellenos sanitarios del noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ecología Austral*, *23*, 202-208. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/23379>
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *J. Clean. Prod.*, *178*, 703–722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112>
- México, D. (2022). *Fabricación de Productos de Cartón y Papel: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad*. Obtenido de Data México: <https://datamexico.org/es/profile/industry/converted-paper-product-manufacturing#company-size>
- Molina, M., & Rowland, F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction ozone. *Nature*, *249*, 810-812. Obtenido de http://fnorio.com/0106heat_engine_refrigeration_cycle_0/Molina_Rowland_1974.pdf
- Moriguchi, Y. (2007). Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. *J. Cycles Waste Manag.*, *9*, 112–120. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-007-0182-0>

- Naciones Unidas . (s.f.). *Datos y cifras*. Obtenido de <https://www.un.org/es/actnow/facts-and-figures#:~:text=Becca%20McChaffie%2FUnsplash.-,Residuos,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero>.
- Panchal, R., Singh, A., & Diwan, H. (2021). Does circular economy performance lead to sustainable development? – A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 293, 1-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112811>
- Papel, C. N. (2014). *Camaradelpapel.com.mx*. Obtenido de <https://camaradelpapel.com.mx/historia-del-papel.php>
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J., & Rechberger, H. (2019). Measuring the Circular Economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 Metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357>
- Pearce, D., & Turner, R. (1989). *Economics of Natural Resources and the Environment*. (B. Italian edition 1991 by Il Mulino, Ed.) *Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf, London*.
- Pérez Hurtado, J., & Toriz García, E. (2017). MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA PRODUCCIÓN Y EL CONSUMO SOSTENIBLES EN MÉXICO. *Revista electrónica ANFEI digital*, 6, 1-9.
- Regadío, M., Ruiz, A., Rodríguez-Rastrero, M., & Cuevas, J. (2015). A containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution. *Waste Management*, 46, 408-419. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.014>
- Reike, D., Vermeulen, W., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? — exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resour. Conserv. Recycl.*, 135, 246–264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- Roberts, B. (2014). *Australian Environmental Planning: Current Challenges and Future Prospects* (1 ed.). London: Routledge.

- Saidani , M., Bernard , Y., Leroy , Y., & François Cluzel, A. (2018). A taxonomy of circular economy indicators. *J. Clean Production*, 207, 542-559. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Saidani, M., Kendall, A., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2019). Closing the loop on platinum from catalytic converters: contributions from material flow analysis and circularity indicators. *J. Ind. Ecol.*, 23, 1143–1158. doi:<https://doi.org/10.1111/jiec.12852>
- Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: a systematic literature review. *J. Clean. Prod.*, 229, 440–453. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Schenk , N., Moll , H., & Potting , J. (2004). The Nonlinear Relationship between Paper Recycling and Primary Pulp Requirements. *Journal of Industrial Ecology*, 8, 141–161.
- Semarnat. (2006). Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Semarnat.
- Semarnat. (s.f.). *Informe del Medio Ambiente*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html#tema7>
- SEMARNAT. (s.f.). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales*. Obtenido de Informe del Medio Ambiente: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
- Singh , S., Babbitt , C., Gaustad , G., Eckelman , M., & Gregor, J. (2021). Thematic exploration of sectoral and cross-cutting challenges to circular economy implementation. *Clean Technol. Environ. Policy*, 915–936.
- Su , B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, 42, 215-227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- Torres Corral, S., Barrientos Becerra, B., & Hernández Berriel, M. (2011). Afectación ambiental del tiradero a cielo abierto de Almoloya del Río, estado de México. *Hacia*

laSustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de materia prima y energía. Memorias 4o. México: Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, 4o. Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos.

Tulashie, S., Dodoo, D., Ketu , E., Adiku , S., Miyittah , M., Forfoe , E., & Art, E. (2023). Environmental and socio-economic benefits of a circular economy for bioethanol production in the northern part of Ghana. *Journal of Cleaner Production*, 390, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136131>

UNEP. (2012). Protecting our atmosphere for generations to come. 25 years of the Montreal Protocol.

United Nations (UN). (s.f.). *United Nations, Academic impact*. Obtenido de Sustainability: <https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability>

United Nations Environment Programme (UNEP). (s.f.). *Solid waste management*. Obtenido de <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/solid-waste-management>

United Nations environmental programme (UNEP). (s.f.). *Solid waste management*. Obtenido de <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/solid-waste-management>

Uriarte-Ruiz, M. (2022). Exploring the obstacles towards the creation of a circular economy: Replacement and reuse of mobile phones in Greater Mexico City. *Journal of Cleaner Production*, 374. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133398>

Zajęca, P., & Avdiushchenko, A. (2020). The impact of converting waste into resources on the regional economy,. *Ecological Modelling*, 243, 109-299.

Zhang, L., Yuan, Z., Bi, J., Zhang, B., & Liu, B. (2010). Eco-industrial parks: national pilot practices in China. *Journal of Cleaner Production*, 18, 504-509. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.11.018>

8. Ligas de las bases de datos originales

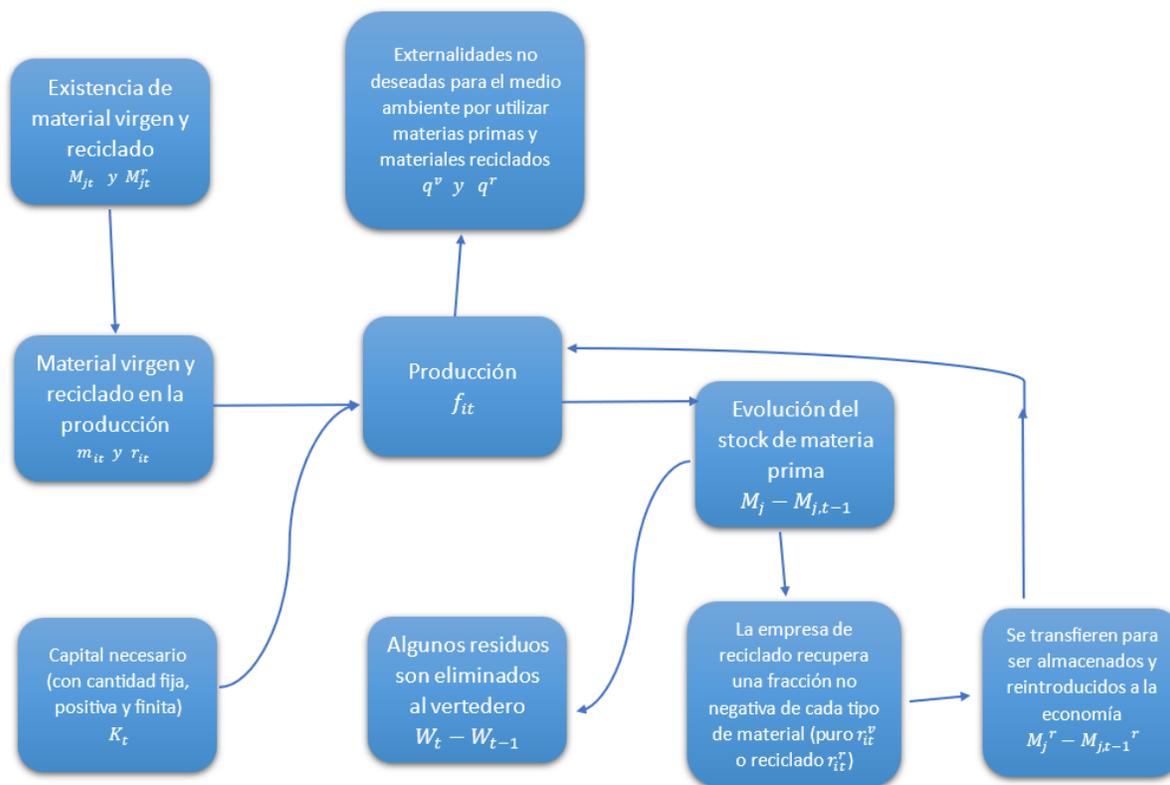
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
 - Censo Económico 2019
Tabulados básicos
<https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Tabulados>

- Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México (González Martínez, 2001)
 - Externalidades negativas del transporte (p.23)
<https://www.redalyc.org/pdf/539/53905802.pdf>

- Gobierno de México
 - Cobros y cuotas vigentes a partir del 29 de octubre de 2019
MILESTONE LOGÍSTICA MÉXICO, S.A. DE C.V
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/511857/MILESTONE_PEARSON_2019.pdf

9. Anexos

9.1 Anexo 1



Fuente: Elaboración propia

9.2 Anexo 2

Problema de optimización

F.O.

$$\sum_t u_t(z_t^1(c_{1,t}, \dots, c_{1,t-h_1}), \dots, z_t^n(c_{n,t}, \dots, c_{n,t-h_n}))$$

s.a.

- Externalidades no deseadas para el medio ambiente

$$\sum_j (q_{j,t}^v(m_{1,t}^j, m_{2,t}^j, \dots, m_{n,t}^j) + q_{j,t}^r(r_{1,t}^j, r_{2,t}^j, \dots, r_{n,t}^j)) \geq 0$$

- Tecnología que transforma a la materia prima y al material reciclado en bienes

$$c_{i,t} = f_{i,t}(m_{i,t}^1, m_{i,t}^2, \dots, m_{i,t}^N, r_{i,t}^1, r_{i,t}^2, \dots, r_{i,t}^N, k_{i,t})$$

- Regla multivariada donde se consideran las opciones de reciclaje

$$r_{i,t}^{v,j} = \sum_i \sum_j (g_{i,t}^{v,j}(m_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{v,j}))$$

$$r_{i,t}^{r,j} = \sum_i \sum_j (g_{i,t}^{r,j}(r_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{r,j}))$$

- Función de capital con cantidad fija, positiva y finita de capital $K_t > 0$

$$K_t = \sum_i k_{i,t} + \sum_i \sum_j (k_{i,t}^{v,j} + k_{i,t}^{r,j})$$

- Norma de los residuos que son eliminados en un vertedero con capacidad W_t

$$W_t - W_{t-1} = -\left(\sum_i \sum_j (m_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t-h_i}^j - r_{i,j}^{r,j})\right)$$

- Ecuación de movimiento que caracteriza la evolución del stock de materia prima

$$M_{j,t} - M_{j,t-1} = -\sum_i m_{i,t}^j + \Phi_{j,t}$$

- Materiales recuperados que se transfieren para ser almacenados y reintroducidos a la economía

$$M_{j,t}^r - M_{j,t-1}^r = \sum_i (r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t}^{r,j} - r_{i,t}^j)$$

Planteando la función lagrangiana tenemos:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_t u_t (z_t^1(c_{1,t}, \dots, c_{1,t-h_1}), \dots, z_t^n(c_{n,t}, \dots, c_{n,t-h_n})) \\ & + \sum_t \sum_j (q_{j,t}^v(m_{1,t}^j, m_{2,t}^j, \dots, m_{n,t}^j) + q_{j,t}^r(r_{1,t}^j, r_{2,t}^j, \dots, r_{n,t}^j)) \\ & + \sum_t \lambda_t^c (c_{i,t} - f_{i,t}(m_{i,t}^1, m_{i,t}^2, \dots, m_{i,t}^N, r_{i,t}^1, r_{i,t}^2, \dots, r_{i,t}^N, k_{i,t})) \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \lambda_{i,j,t}^{rv} (r_{i,t}^{v,j} - g_{i,t}^{v,j}(m_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{v,j})) \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j \lambda_{i,j,t}^{rr} (r_{i,t}^{r,j} - g_{i,t}^{r,j}(r_{i,t-h_i}^j, k_{i,t}^{r,j})) \\ & + \sum_t \lambda_t^k \left(K_t - \sum_i k_{i,t} - \sum_i \sum_j (k_{i,t}^{v,j} + k_{i,t}^{r,j}) \right) \\ & + \sum_t \lambda_t^W \left(W_t - W_{t-1} + \sum_i \sum_j (m_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t-h_i}^j - r_{i,t}^{r,j}) \right) \\ & + \sum_t \sum_j (\lambda_{j,t}^M \left(M_{j,t} - M_{j,t-1} + \sum_i m_{i,t}^j - \phi_{j,t} \right)) \\ & + \sum_t \sum_j \lambda_{j,t}^{Mr} \left(M_{j,t}^r - M_{j,t-1}^r - \sum_i (r_{i,t}^{v,j} + r_{i,t}^{r,j} - r_{i,t}^j) \right) \end{aligned}$$

Seguindo la regla de la cadena y obteniendo las derivadas parciales respecto de $m_{i,t}^j$ y $r_{i,t}^j$, se tiene que las condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial m_{i,t}^j} = \sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} + \frac{\partial q_{j,t}^v}{\partial m_{i,t}^j} - \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} - \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^v} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{v,j}}{\partial m_{i,t}^j} + \lambda_{t+h_i}^W + \lambda_j^M = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r_{i,t}^j} = \sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} + \frac{\partial q_{j,t}^r}{\partial r_{i,t}^j} - \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} - \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^r} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{r,j}}{\partial r_{i,t}^j} + \lambda_{t+h_i}^W + \lambda_j^{M^r} = 0$$

Este modelo en particular se enfoca en el comportamiento de las materias primas y el material reciclado dentro del proceso de producción, por lo que solo se calculan las derivadas parciales con respecto a $m_{i,t}^j$ y $r_{i,t}^j$ sin considerar otras variables relevantes.

Reacomodando se tiene entonces que

$$\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} = -\frac{\partial q_{j,t}^v}{\partial m_{i,t}^j} + \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial m_{i,t}^j} + \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^v} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{v,j}}{\partial m_{i,t}^j} - \lambda_{t+h_i}^W - \lambda_j^M \quad \forall t$$

$$\sum_{s=0}^{h_i} \frac{\partial u_{t+s}}{\partial z_{t+s}} \frac{\partial z_{t+s}}{\partial f_{i,t}} \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} = -\frac{\partial q_{j,t}^r}{\partial r_{i,t}^j} + \lambda_t^c \frac{\partial f_{i,t}}{\partial r_{i,t}^j} + \lambda_{i,j,t+h_i}^{r^r} \frac{\partial g_{i,t+h_i}^{r,j}}{\partial r_{i,t}^j} - \lambda_{t+h_i}^W - \lambda_j^{M^r} \quad \forall t$$