



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

Escuela
de Doctorado

TESIS DOCTORAL

*Tecnología blockchain aplicada a la trazabilidad
en la cadena de suministro de vidrio para lograr
una economía circular*

AUTOR: Rocío Belén Corral

DIRECTORES: Pablo Javier Vidal

2025

Être et Durer (Ser y durar)

AGRADECIMENTOS

Comienzo este trabajo de tesina agradeciendo profundamente a todas las personas que, de forma consciente o sin darse cuenta, contribuyeron a su concepción y realización. Este trabajo no habría sido posible sin su apoyo, inspiración y colaboración.

En primer lugar, agradezco a mi tutor de tesis, Pablo Javier Vidal, por su guía, predisposición y disponibilidad absoluta, su presencia activa me generó la constancia para llevar este trabajo a término. Agradezco a su vez a Ana Carolina Olivera, quien también me asistió, por su buena voluntad y por su ayuda desinteresada en la elaboración de este trabajo.

Luego, tengo un gran agradecimiento hacia todos los profesores de la carrera, quienes me han formado y apoyado en mi carrera académica y profesional durante estos años. Todos ellos han sido mi mayor motivación para completar mi carrera, culminando en este trabajo.

Agradezco a mis compañeros de la carrera, de trabajo y amigos, que en muchos casos se solapan, por su compañía en este camino, por ser una fuente de inspiración para este trabajo y por su apoyo. Les agradezco especialmente a aquellos amigos que me hicieron dar cuenta que tengo una idea contagiosa y que es la que inspira este trabajo, muchos de mis proyectos y mi forma de ver el mundo.

Por último, mi mayor agradecimiento es hacia mi familia: mi mayor fuente de apoyo y motivación. Les agradezco aunque lo hagan de forma desinteresada, por su amor, aguante y contención emocional.

Por último, este trabajo lo quiero dedicar a todos los profesores de la carrera. Esta es mi forma de retribuirles todo lo que me han enseñado y apoyado a lo largo de estos años. Nuevamente, gracias.

*Rocío Belén Corral
Mendoza, Argentina
Julio 2025*

RESUMEN

La trazabilidad permite identificar el origen y las etapas de producción y distribución de bienes, facilitando la implementación de prácticas de economía circular, donde los residuos se reciclan o reutilizan en lugar de desecharse. En particular, es deseable poder realizar la trazabilidad del vidrio, dado que es un producto que puede ser reciclado o reinsertado en la cadena de suministro de diferentes formas.

Para proporcionar un nivel superior de transparencia, seguridad y eficiencia, los sistemas de trazabilidad están comenzando a hacer uso de la tecnología blockchain. Esta tecnología permite crear registros inmutables y descentralizados, asegurando la integridad de la información y evitando manipulaciones externas. Además, brinda confianza a los consumidores al garantizar la autenticidad y calidad de los productos, mientras que también permite a las organizaciones que adoptan esta tecnología diferenciarse en el mercado, al demostrar su compromiso con la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente.

En este trabajo se desarrolla un prototipo de sistema de trazabilidad del vidrio basado en tecnología blockchain, diseñado para registrar y verificar cada etapa de su ciclo de vida, desde la producción hasta su reintroducción en la cadena de valor, facilitando su valorización. Este desarrollo sigue un proceso de ingeniería de software bajo el modelo en V, el cual estructura las fases de diseño, implementación y pruebas. Se detallan las etapas de análisis de requisitos, diseño arquitectónico, implementación del prototipo y verificación exhaustiva de sus funcionalidades, con el fin de demostrar la viabilidad y los beneficios de aplicar blockchain para una economía circular de vidrio transparente y sostenible.

ABSTRACT

Traceability enables the identification of the origin and various stages of goods' production and distribution processes, facilitating the implementation of circular economy practices where waste is recycled or reused instead of discarded. In particular, it is desirable to achieve the traceability of glass, as it is a product that can be recycled or reinserted into the supply chain in different ways.

To provide a superior level of transparency, security, and efficiency, traceability systems are leveraging blockchain technology. This technology allows for the creation of immutable and decentralized records, ensuring data integrity and preventing external manipulation. Furthermore, it fosters consumer confidence by guaranteeing product authenticity and quality, while also enabling organizations that adopt this technology to differentiate themselves in the market by demonstrating their commitment to sustainability and environmental responsibility.

This work develops a prototype blockchain-based glass traceability system, designed to record and verify each stage of its lifecycle, from production to its reintroduction into the value chain, thus facilitating its valorization. This development follows a V-model software engineering process, which structures the design, implementation, and testing phases. The stages of requirements analysis, architectural design, prototype implementation, and exhaustive testing of its functionalities are detailed, with the aim of demonstrating the viability and benefits of applying blockchain for a transparent and sustainable circular glass economy.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS



INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [IPCC2022, pelegri2021ipcc]. En este contexto, la transición hacia una economía circular se presenta como una solución prometedora para mitigar este impacto y construir un futuro más sostenible [clima2022book]. Este modelo económico busca maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, minimizando el desperdicio y reintroduciendo los materiales en los sistemas de producción [da2022economia, melendez2021economia]. Sin embargo, el principal desafío para lograr una economía circular radica en la falta de transparencia y trazabilidad dentro de las cadenas de suministro tradicionales.

Esta falta de visibilidad dificulta la capacidad para identificar oportunidades de reutilización y reciclaje, responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental y empoderar a los consumidores para que tomen decisiones informadas.

Investigaciones previas han explorado diversas tecnologías para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, incluidos códigos de barras, etiquetas RFID y redes de sensores [schuitemaker2020product]. Estas tecnologías ofrecen cierto nivel de capacidad de seguimiento; sin embargo, a menudo están limitadas por factores como la falta de estandarización, la fragmentación de información y la vulnerabilidad a la manipulación [schuitemaker2020product].

En los últimos años, la tecnología blockchain ha surgido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones [baralla2023waste, bulkowska2023implementation, alnuaimi2023blockchain]. Sus características principales, como el registro de datos distribuido, la inmutabilidad y la

transparencia, la convierten en una plataforma ideal para registrar y rastrear el movimiento de mercancías a lo largo de la cadena de suministro [baralla2023waste]. Múltiples estudios han explorado diversas aplicaciones de la tecnología blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, demostrando su potencial para mejorar la transparencia y la responsabilidad dentro de estos sistemas. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen la creación de un registro inmutable del origen de los productos para verificar su autenticidad y combatir la falsificación [bulkowska2023implementation], el rastreo de materiales a lo largo de la cadena de suministro para apoyar una economía circular [baralla2023waste], la optimización de la logística y la gestión de inventario mediante información en tiempo real [signeblock2024], y la promoción de prácticas sostenibles al identificar productos con menor impacto ambiental [bulkowska2023implementation].

La investigación existente reconoce el potencial de blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, pero muchas soluciones propuestas se enfocan únicamente en la tecnología blockchain [baralla2023waste, bulkowska2023implementation, alnuaimi2023blockchain], lo que limita su aplicabilidad en contextos donde se requiere la integración con sistemas de gestión tradicionales y tecnologías complementarias. Además, la mayoría de los estudios se centran en casos de uso específicos, como la industria alimentaria o farmacéutica, dejando una brecha significativa en la aplicación de blockchain para mejorar la trazabilidad en otros sectores, como el reciclaje de vidrio.

En Latinoamérica, el vidrio representa el 5 % de los residuos sólidos urbanos [cepal2021economia], y solo el 20 % de este vidrio se recicla [verallia2022whitebook]. La baja tasa de reciclaje de vidrio en la región se debe a la falta de infraestructura y sistemas de gestión adecuados, así como a la falta de conciencia y educación sobre la importancia del reciclaje. Mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio facilita su reciclaje, ayudando a promover una economía circular sostenible en la región. Al visibilizar el flujo de materiales y promover prácticas de reciclaje, y facilitar la información y procesos a los usuarios, es posible reducir la generación de residuos, disminuir la extracción de materias primas vírgenes y fomentar la reutilización de materiales en la producción de nuevos envases de vidrio.

Teniendo en consideración que la actividad económica principal de la provincia de Mendoza es la producción de vino, esta es una problemática local y concreta cuya solución puede tener un impacto real en la economía local. La industria del vidrio es un actor relevante en la cadena de suministro de vino al proveer los envases para el embotellado de los vinos. Por lo tanto, mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad de la industria vitivinícola y en la economía regional.

A su vez, este trabajo se enfoca específicamente. Esta decisión se fundamenta en la importancia del vidrio como material reciclable y la necesidad de mejorar su gestión dentro de la economía circular.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una solución de trazabilidad basada en tecnología blockchain para la cadena de suministro y reciclaje de envases de vidrio con el fin de mejorar la

transparencia y la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo. La solución propuesta busca abordar las limitaciones de las tecnologías existentes y proporcionar una plataforma que permita a los actores involucrados en la cadena de suministro del vidrio rastrear y verificar el origen, el movimiento y el estado de los envases a lo largo de su ciclo de vida.

Este trabajo propone un enfoque abierto que permita integrar blockchain con Internet de las cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. Esta integración permite aprovechar los datos en tiempo real de los sensores de IoT, proporcionando una visión más completa y confiable del movimiento y el estado del producto a lo largo de la cadena de suministros. Además, esta solución es compatible con sistemas de gestión tradicionales, facilitando la adopción dentro de las prácticas comerciales existentes. Se espera que este enfoque combinado represente una implementación factible y práctica para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, en última instancia, contribuyendo a la transición hacia una economía circular sostenible.

Al abordar este caso de estudio específico, se busca proporcionar una solución concreta y aplicable en el ecosistema mendocino que a su vez pueda servir en un futuro como modelo para adaptarse a otras industrias y a una variedad amplia de materiales reciclables.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta Tesina Final de Grado consiste en hacer uso de blockchain como tecnología de vanguardia para el desarrollo de una aplicación prototipo destinada a mejorar la trazabilidad en modelos de economía circular orientados al reciclaje de vidrio.

- **Objetivo 1:** entender los procesos de adopción de tecnologías tales como blockchain y las capacidades actuales en la región para el uso de sistemas de trazabilidad.
- **Objetivo 2:** en lo referido a las Ciencias de la Computación, se busca desarrollar una aplicación prototipo funcional basada en tecnología blockchain. Esto permitirá la trazabilidad transparente, segura y en tiempo real de la gestión de residuos, en particular el vidrio, desde su generación hasta su disposición final, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la confianza entre todos los actores involucrados en el proceso.

1.3. Estructura general del documento

El presente documento se encuentra organizado en capítulos, cada uno de los cuales aborda un aspecto del trabajo realizado. En primer lugar, en el Marco Teórico, se introducen los conceptos básicos relacionados con el problema y la tecnología utilizada, para desenlazar en un análisis de las soluciones existentes y los antecedentes académicos relevantes para contextualizar el trabajo. En el siguiente capítulo, se detalla la metodología adoptada y la planeación del trabajo. En capítulos posteriores se describe el proceso de diseño, desarrollo y pruebas de la solución

propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas y las perspectivas futuras del proyecto. Adicionalmente, al final del documento se incluyen anexos como lectura opcional y un glosario de términos específicos que pueden resultar útiles para el lector.



MARCO TEÓRICO

Este capítulo introduce los fundamentos conceptuales que enmarcan la investigación, abordando la evolución y el alcance de la tecnología blockchain junto a sus aplicaciones en trazabilidad y gestión de residuos, así como los principios de la economía circular y la relevancia de las políticas sustentables en la transformación de las cadenas de suministro.

2.1. Blockchain

La tecnología blockchain, o cadena de bloques, se define como una estructura de datos distribuida y descentralizada en la que la información se almacena en forma de transacciones agrupadas en bloques, de manera que cada bloque se vincula al anterior mediante un hash criptográfico [tripathi2023comprehensive]. Su naturaleza distribuida radica en que cada nodo de la red mantiene una copia completa y actualizada del registro, lo cual asegura su transparencia y resiliencia al no depender de un servidor central [bulkowska2023implementation]. Por su parte, la descentralización implica la ausencia de una autoridad central, ya que la validación y adición de nuevos bloques se rige por un mecanismo de consenso entre los nodos participantes de la red. La interconexión criptográfica entre los bloques confiere a blockchain su característica de inmutabilidad. Una vez que un bloque es añadido, su hash se calcula a partir de su contenido y el hash del bloque anterior. Cualquier intento de alterar el contenido de un bloque invalidaría este hash y, por ende, los hashes de todos los bloques subsiguientes, rompiendo la integridad criptográfica de la cadena. Este mecanismo permite la detección de cualquier intento de manipulación y la preservación de la integridad histórica del registro [bulkowska2023implementation].

Esta tecnología fue implementada inicialmente en 2008 como el fundamento del sistema de criptomonedas Bitcoin [satoshi2008bitcoin]. Desde entonces, ha trascendido el ámbito finan-

ciero para abarcar una amplia gama de aplicaciones [bartolomeo2020introduccion]. Posteriormente, se han desarrollado diversos protocolos blockchain que han permitido la creación de redes más eficientes y adaptadas a distintas necesidades, como Ethereum [buterin2013ethereum], pionero en el concepto de contratos inteligentes, o Hyperledger [androulaki2018hyperledger], enfocado en aplicaciones empresariales [sunny2022systematic, rennock2018blockchain].

Técnicamente, una blockchain se compone de bloques enlazados que encapsulan un conjunto de transacciones. Cada bloque consta de un encabezado y un cuerpo [tripathi2023comprehensive]. El cuerpo alberga la lista de transacciones, mientras que el encabezado contiene metadatos, incluyendo el hash criptográfico del bloque anterior, una marca de tiempo, y un hash que identifica unívocamente el bloque actual, calculado sobre la totalidad de su contenido (tanto el encabezado como el cuerpo de transacciones). Este encadenamiento criptográfico de bloques en una red descentralizada garantiza la integridad e inmutabilidad de la información, ya que cualquier alteración en un bloque modificaría su hash y rompería la consistencia de la cadena, forzando a los nodos de la red a rechazar el bloque modificado o forzando al nodo que intenta modificarlo a actualizar todos los bloques posteriores [sunny2022systematic].

To-Do

Insert simple diagram of a blockchain here

Al unirse a la red, un nodo descarga una copia completa de la cadena de bloques existente, lo que le confiere una visión completa del historial de transacciones [bulkowska2023implementation]. Posteriormente, el nodo ejecuta el software del protocolo blockchain encargado de implementar el mecanismo de consenso. Cuando se genera una nueva transacción en dicho nodo, esta se transmite a la red y es recibida por los demás nodos. A su vez, el nodo recibe transacciones de otros nodos, las cuales son validadas mediante el mecanismo de consenso antes de ser añadidas a un bloque en su copia local de la cadena [bulkowska2023implementation].

La adición de un nuevo bloque a la cadena requiere su validación por los nodos de la red a través de un proceso de consenso. Una vez validado por el nodo, el bloque se incorpora al final de la cadena y se distribuye a todos los demás nodos, quienes proceden a actualizar su copia del registro [bulkowska2023implementation]. Este proceso se gestiona mediante algoritmos de consenso como Proof of Work (PoW), que se basa en la resolución de problemas computacionales; Proof of Stake (PoS), que delega la validación en función de la participación económica; o Proof of Authority (PoA), que confía en un conjunto pre-aprobado de autoridades [diaz2022protocolos]. Cada uno de estos mecanismos ofrece distintos niveles de eficiencia, seguridad y descentralización. Durante la validación del bloque, se verifican múltiples aspectos: la correcta correspondencia del hash del bloque anterior con el almacenado en el encabezado del nuevo bloque, la validez y el cumplimiento de las transacciones con las reglas del protocolo, y que el hash del bloque propuesto haya sido generado correctamente a partir de la totalidad de su contenido.

Todo algoritmo de consenso debe asegurar que el costo de modificar un bloque de forma frau-

dulenta supere significativamente el beneficio potencial derivado de dicha acción [satoshi2008bitcoin]. Esta característica garantiza que la red se mantenga segura y resistente a ataques [buterin2013ethereum]. En el caso de Bitcoin, por ejemplo, el algoritmo de consenso Proof of Work (PoW) exige que los nodos realicen cálculos computacionales intensivos para generar nuevos bloques válidos. Aunque la validación de un bloque es de complejidad constante, la alteración de un bloque ya existente implicaría la necesidad de recalcular no solo dicho bloque, sino también todos los bloques subsiguientes. Esto convierte la modificación en un proceso extremadamente costoso en términos de recursos computacionales y energía, lo cual, sumado al rechazo de la red hacia cualquier cadena alterada, desincentiva eficazmente los intentos de manipulación [satoshi2008bitcoin].

De esta manera, la combinación de la estructura encadenada criptográficamente y el mecanismo de consenso convierten a la blockchain en una base de datos distribuida que permite registrar transacciones de forma segura, transparente e inmutable, prescindiendo de una autoridad central para la administración o validación de los intercambios.

Para comprender el proceso de incorporación de una nueva transacción y su respectivo bloque en una blockchain, se presenta a continuación un esquema ilustrativo.

To-Do

Insert diagram of transaction and block creation flow here

1. Un nodo de la red crea y firma una nueva transacción con su clave privada.
2. La transacción se propaga a través de la red P2P, donde es recibida por los nodos participantes.
3. Cada nodod valida la transacción individualmente, verificando la firma del remitente y asegurándose de que este dispone de los fondos o permisos necesarios. Una vez validada, la transacción se añade a un *pool* de transacciones pendientes.
4. Un nodo (en el caso de PoW, un minero) selecciona un conjunto de transacciones pendientes del *pool* para formar un nuevo bloque. Este bloque incluye las transacciones seleccionadas, el hash del bloque anterior y otros metadatos (como la marca de tiempo y un *nonce* para PoW). El nodo luego calcula el hash de este nuevo bloque y, según el algoritmo de consenso, realiza el trabajo necesario para validarlo. En el caso de PoW, esto implica resolver un problema criptográfico que requiere una cantidad significativa de potencia computacional. En PoS, el nodo debe demostrar que posee una cantidad suficiente de fondos para participar en la validación del bloque.
5. Una vez que el nodo ha validado el nuevo bloque (o "minado.^{en} PoW), lo difunde a la red. Los demás nodos reciben este bloque y verifican su validez (incluyendo el hash, las transacciones y la prueba de trabajo/participación). Si el bloque es válido, lo añaden a su copia local de la cadena de bloques y descartan las transacciones ya incluidas de su *pool* de pendientes. Si el bloque es inválido, es rechazado por cada nodo y no se añade a la cadena.

De esta forma, la cadena de bloques se actualiza de manera continua y descentralizada, asegurando que todos los nodos de la red mantengan una copia idéntica y consistente del registro de transacciones.

Si bien en su concepción inicial las transacciones en un bloque se asociaban comúnmente a movimientos financieros [satoshi2008bitcoin], la flexibilidad inherente de la tecnología blockchain permite que los bloques contengan cualquier tipo de información estructurada [bartolomeo2020introduccion]. Esta versatilidad ha sido el motor para el desarrollo de aplicaciones más complejas, destacando entre ellas los *smart contracts* (contratos inteligentes) [sunny2022systematic].

Los *smart contracts*, o contratos inteligentes, son programas inmutables almacenados en una blockchain que se ejecutan automáticamente al cumplirse condiciones preestablecidas en su código [bulkowska2023implementation]. Su función principal es automatizar procesos en entornos descentralizados, lo que reduce significativamente la dependencia de intermediarios humanos [verma2023overview] y mejora la eficiencia operativa en múltiples sectores [sunny2022systematic].

Un contrato inteligente se concibe como un conjunto de reglas y lógica de negocio codificadas. Cada contrato posee un código (las reglas) y un estado (la información dinámica) [buterin2013ethereum]. El código es inmutable una vez desplegado en la blockchain mediante una transacción, garantizando la permanencia de las reglas establecidas. Su estado, sin embargo, puede evolucionar a medida que se interactúa con el contrato a través de transacciones. Es importante destacar que, si bien se describen como “auto-ejecutables” por su automatismo al cumplir condiciones, su ejecución es llevada a cabo por los nodos de la red que validan las transacciones e integran los cambios de estado en la cadena [buterin2013ethereum]. Tanto el código como el estado del contrato se almacenan en la blockchain, asegurando su transparencia y disponibilidad pública. Por ejemplo, un contrato inteligente podría gestionar un sistema de votación, donde los participantes envían sus votos y el contrato contabiliza automáticamente los resultados al finalizar el periodo de votación.

To-Do

Insert diagram of contract creation and execution flow here, use the votation example

Para el desarrollo y ejecución de contratos inteligentes, se emplean lenguajes de programación específicos adaptados a cada plataforma blockchain [bartolomeo2020introduccion]. Un ejemplo prominente es *Solidity* [taherdoost2023smart], utilizado en Ethereum, un lenguaje orientado a objetos diseñado para esta finalidad. Estos contratos pueden interactuar entre sí y con el estado global de la blockchain, habilitando la creación de aplicaciones descentralizadas (dApps) que operan de forma autónoma y sin intermediarios en la red [buterin2013ethereum].

Sin embargo, los contratos inteligentes enfrentan limitaciones inherentes a las infraestructuras blockchain, principalmente en términos de escalabilidad [kalajdjieski2023databases]. A diferencia de los sistemas centralizados que permiten ejecución paralela y optimización con bases de datos indexadas, los *smart contracts* operan bajo modelos de ejecución secuencial y

replicación completa en cada nodo [taherdoost2023smart]. Esto impacta directamente su rendimiento y complejiza la implementación de algoritmos avanzados. Desde la perspectiva de la ingeniería de software, el desarrollo de contratos inteligentes introduce restricciones no triviales: el código inmutable, los costos asociados al almacenamiento en cadena, la ausencia de llamadas externas directas y los modelos de estado global distribuido. Estas particularidades exigen la adopción de nuevas metodologías y prácticas de diseño seguro, control de flujos y validación estática, muchas de las cuales aún se encuentran en proceso de estandarización [taherdoost2023smart, cepal2021economia].

En síntesis, los contratos inteligentes constituyen una herramienta computacional que expande las fronteras de la programación distribuida y descentralizada. Si bien su potencial transformador es innegable [taherdoost2023smart], su desarrollo robusto y seguro representa un desafío activo que abarca múltiples dominios de la computación: desde la teoría de lenguajes formales [hoskinson2017we] y la arquitectura de sistemas distribuidos, hasta la verificación de software, la criptografía aplicada y la integración de datos externos confiables [taherdoost2023smart].

Debido a la aparición los contratos inteligentes, la tecnología blockchain ha trascendido su origen ligado a las criptomonedas para convertirse en un paradigma disruptivo con aplicaciones transversales en múltiples dominios [bartolomeo2020introduccion, vaigandla2023review]. Se posicionan como un componente fundamental y un impulsor clave de gran parte de las nuevas y complejas soluciones basadas en blockchain, especialmente aquellas que buscan automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio directamente en la cadena [sharabati2024blockchain]. Si bien los contratos inteligentes representan una tecnología prometedora, aún se encuentran en una etapa incipiente, lo que implica la existencia de numerosos aspectos por perfeccionar [taherdoost2023smart]. En un contexto más amplio, la tecnología blockchain, incluyendo a los contratos inteligentes, ofrece una serie de ventajas fundamentales y limitaciones inherentes que la distinguen de los sistemas de almacenamiento de datos tradicionales.

Las características inherentes de la blockchain, detalladas previamente, se traducen en una serie de ventajas que distinguen a blockchain de los sistemas tradicionales. La descentralización propia de su diseño y la consecuente eliminación de intermediarios resultan en una mayor confianza [rejeb2023role] y eficiencia operativa al prescindir de autoridades centrales [sharabati2024blockchain]. La arquitectura basada en registros inmutables garantiza transparencia y trazabilidad completa [sharabati2024blockchain], permitiendo un historial verificable de cualquier activo o evento, lo cual es crucial para casos de uso como certificación [bartolomeo2020introduccion], logística [bartolomeo2020introduccion, rejeb2023role] y gestión de residuos [bulkowska2023implementation]. La inmutabilidad de los datos, reforzada por la seguridad criptográfica, asegura la integridad de la información [sunny2022systematic] y una resistencia robusta a manipulaciones maliciosas y puntos únicos de falla [bartolomeo2020introduccion]. Además, la capacidad de automatización de aplicaciones mediante contratos inteligentes optimiza la eficiencia y confiabilidad operativa al ejecutar condiciones lógicas de forma autónoma [bartolomeo2020introduccion]. En conjunto, estas propiedades confieren a blockchain una aplicabilidad transversal que la consolida como una tecnología habilitadora para la transfor-

mación digital en sectores diversos como finanzas, salud, IoT, energía, educación y ciudades inteligentes.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la tecnología blockchain también enfrenta desafíos y limitaciones significativos. Uno de los principales desafíos es la escalabilidad y el rendimiento [tripathi2023comprehensive]. Las blockchains actuales suelen presentar un bajo *throughput* en comparación con los sistemas centralizados [baralla2023waste], lo cual restringe su aplicación en escenarios de alta frecuencia transaccional. Esto se debe inherentemente a la necesidad de alcanzar un consenso distribuido y a la replicación completa de datos en todos los nodos [tripathi2023comprehensive]. Otro reto importante es la interoperabilidad limitada, que dificulta la integración fluida entre distintas plataformas blockchain con infraestructuras externas preexistentes [tripathi2023comprehensive]. En entornos públicos, la privacidad es una preocupación, ya que, aunque los usuarios pueden operar de forma seudónima, la visibilidad total de las transacciones en la cadena puede comprometer datos sensibles [diez2023web, rennock2018blockchain]. Además, existen vulnerabilidades técnicas inherentes, como el ataque del 51 %, el doble gasto, los ataques Sybil, y la posibilidad de errores en contratos inteligentes mal programados, que requieren atención constante [diez2023web]. La irreversibilidad de las transacciones, si bien es una garantía de seguridad, puede ser problemática ante vulnerabilidades de programación, errores o fraudes, ya que las operaciones registradas no pueden deshacerse [taherdoost2023smart]. Por último, las limitaciones de almacenamiento representan un desafío práctico, dado que los nodos deben almacenar volúmenes crecientes de información, lo cual no escala eficientemente en redes de gran tamaño [taherdoost2023smart].

Estos desafíos, aunque significativos, están siendo abordados activamente por la investigación y el desarrollo en la comunidad blockchain. La constante evolución de la tecnología y la aparición de nuevas soluciones buscan mitigar estas limitaciones, abriendo el camino para una adopción más amplia [tripathi2023comprehensive, baralla2023waste, taherdoost2023smart]. En este contexto de evolución y superación de barreras, la blockchain ha demostrado su potencial para transformar diversos sectores y abarcar numerosos casos de uso.

En el sector financiero, blockchain ha generado disrupción mediante soluciones para pagos directos (con las llamadas criptomonedas), emisión de bonos, transferencias internacionales y operaciones en mercados de capital [bartolomeo2020introduccion]. Instituciones como Santander y la Bolsa de Comercio de Santiago han adoptado esta tecnología para simplificar transacciones, automatizar registros y eliminar intermediarios [bartolomeo2020introduccion]. Gracias a su estructura descentralizada y sus mecanismos criptográficos, blockchain permite mejorar la trazabilidad de los activos financieros. Pero si bien su uso en finanzas ha sido el más destacado, la tecnología blockchain ha demostrado ser versátil y aplicable a una amplia gama de sectores, cada uno con sus propias necesidades y desafíos.

A nivel gubernamental, blockchain ofrece nuevas herramientas para la modernización del Estado. Permite la gestión segura y verificable de identidades digitales, la trazabilidad de procesos administrativos, y la implementación de sistemas de votación transparentes [vaigandla2023review]. Iniciativas como la European Blockchain Partnership buscan establecer una infraestructura di-

gital pública para servicios intergubernamentales [diez2023web]. Proyectos como QualiChain exploran aplicaciones en el sector público, como la verificación de credenciales profesionales y la gestión automatizada de elegibilidad en concursos públicos [diez2023web].

En el sector salud, blockchain permite almacenar registros médicos de manera segura y distribuida, mejorando la interoperabilidad entre instituciones, garantizando la integridad de los datos y permitiendo un mayor control por parte de los pacientes [sunny2022systematic]. También es clave en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica y en la supervisión de ensayos clínicos, donde se requiere un alto nivel de confianza y cumplimiento normativo [vaigandla2023review].

En educación, su aplicación permite la emisión y verificación de certificados académicos inmutables y descentralizados. Universidades como Nicosia o la de Murcia ya utilizan blockchain para certificar diplomas y logros [diez2023web]. Iniciativas como Blockcerts o el pasaporte educativo propuesto por la Unión Europea buscan facilitar la movilidad académica y reducir la falsificación documental. También se exploran aplicaciones como exámenes autoevaluables con contratos inteligentes, recompensas por desempeño y la gestión segura de registros estudiantiles [diez2023web].

En energía, blockchain permite crear mercados descentralizados para el comercio de energía entre pares, mejora la gestión de certificados de energías renovables, y optimiza la trazabilidad de producción y consumo energético [sunny2022systematic, vaigandla2023review]. Se está utilizando para reducir el impacto ambiental del sector y mejorar la eficiencia operativa de infraestructuras energéticas tradicionales.

En el ámbito de la gestión de la cadena de suministro (SCM), blockchain proporciona una plataforma confiable para garantizar la trazabilidad, autenticidad y visibilidad en tiempo real de productos y materiales [torres2022tendencias, sharabati2024blockchain]. Empresas como IBM, Maersk y FedEx han implementado soluciones blockchain para monitorear inventarios, registrar pagos y reducir disputas logísticas [tripathi2023comprehensive]. Casos como el de Dervinsa en Argentina, que certifica la calidad de productos derivados de residuos de vinificación, y otras iniciativas que aplican trazabilidad a alimentos y textiles, muestran cómo esta tecnología fortalece el control de calidad y la confianza en los mercados [bartolomeo2020introduccion]. Además, en contextos más amplios, blockchain permite una sincronización eficiente entre departamentos, la reducción de riesgos de falsificación y la mejora general de la sostenibilidad operativa [sunny2022systematic].

En el marco de la economía circular, blockchain se posiciona como un facilitador clave para monitorear ciclos de vida de productos y materiales, ofreciendo transparencia y responsabilidad en la gestión de residuos [bulkowska2023implementation, baralla2023waste]. Diversos tipos de residuos, desde plásticos y vidrio hasta electrónicos y biomédicos, pueden ser gestionados de forma más eficiente mediante el uso de contratos inteligentes que automatizan verificaciones, recompensas e interacciones entre actores de la cadena [baralla2023waste]. Asimismo, se propone la generación de pasaportes digitales de productos y esquemas de incentivos sosteni-

bles, promoviendo hábitos de consumo responsables y nuevos modelos de negocio circulares [baralla2023waste].

Más allá de estos sectores, blockchain ha demostrado potencial en una variedad de aplicaciones adicionales. En IoT, facilita la recolección y gestión segura de datos en tiempo real [sunny2022systematic]. En contabilidad y auditoría, posibilita libros contables distribuidos con transparencia total y reducción de fraudes [bartolomeo2020introduccion]. También se emplea en caridad y donaciones, trazabilidad inmobiliaria y movilidad inteligente [bartolomeo2020introduccion]. Estos casos de uso evidencian cómo blockchain puede transformar modelos tradicionales mediante estructuras distribuidas, reglas codificadas y registros inmutables. Su implementación efectiva puede contribuir a una mayor eficiencia, confianza y sostenibilidad en múltiples áreas críticas del desarrollo económico, social y tecnológico.

Si bien las aplicaciones de blockchain se extienden a numerosos sectores, uno de los ámbitos donde esta tecnología adquiere un protagonismo creciente es en la economía circular. La necesidad de trazar el flujo de materiales, certificar la autenticidad de los procesos productivos y garantizar la transparencia en la gestión de residuos ha posicionado a blockchain como una herramienta protagónica para habilitar modelos circulares sostenibles. En particular, su capacidad para registrar datos inmutables y automatizar interacciones mediante contratos inteligentes permite estructurar sistemas de trazabilidad que no sólo mejoran la eficiencia, sino que también fortalecen la confianza entre actores y fomentan la rendición de cuentas [sharabati2024blockchain, rejeb2023role]. A continuación, se analiza con mayor profundidad el rol de blockchain en el diseño e implementación de estrategias de economía circular, con énfasis en sus aplicaciones concretas en trazabilidad de materiales en la cadena de suministros y gestión de residuos.

2.2. Economía circular

La economía circular se presenta como una evolución del modelo económico lineal que ha prevalecido desde la Revolución Industrial. Mientras el enfoque lineal se basa en una secuencia unidireccional de extracción, producción, consumo y descarte, la economía circular propone un rediseño profundo de este paradigma al introducir principios de regeneración, reutilización y cierre de ciclos. Su objetivo es maximizar el valor de los recursos materiales y energéticos a lo largo del tiempo, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental y la dependencia de recursos no renovables.

El modelo lineal ha demostrado ser altamente efectivo para fomentar el crecimiento económico, pero también ha generado efectos colaterales significativos que lo hacen insostenible en el largo plazo. Entre los principales problemas que motivan la transición hacia un enfoque circular se encuentran el agotamiento progresivo de los recursos naturales, la acumulación masiva de residuos y la insostenibilidad de los patrones de consumo. La extracción intensiva de materias primas, muchas veces por encima de su tasa de regeneración, ha provocado deforestación,

pérdida de biodiversidad y una creciente presión sobre ecosistemas frágiles. Al mismo tiempo, el diseño de productos con ciclos de vida cortos —como ocurre con la moda rápida o los dispositivos electrónicos desechables— genera residuos prematuros y desaprovecha el valor residual de los materiales.

Frente a estos desafíos, la economía circular emerge como un modelo restaurativo y regenerativo por diseño. Promueve prácticas como la reutilización, la reparación, el reciclaje de alta calidad y la remanufactura, con el propósito de mantener los productos y materiales en uso durante el mayor tiempo posible. Se basa en tres principios fundamentales: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener los recursos en uso mediante bucles cerrados, y regenerar sistemas naturales en lugar de degradarlos. En lugar de centrarse únicamente en reducir impactos negativos, busca generar valor positivo para la economía, la sociedad y el medio ambiente.

La economía circular ofrece una serie de ventajas frente al modelo lineal. Desde el punto de vista económico, puede fomentar nuevos modelos de negocio, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia en el uso de materiales y energía. Además, contribuye a la creación de empleo, disminuye la dependencia de materias primas importadas y mejora la resiliencia económica. Ambientalmente, permite reducir emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar la generación de residuos y preservar ecosistemas. A nivel social, promueve una cultura de consumo responsable, empodera a los ciudadanos y mejora la equidad mediante la formalización de sectores informales como el reciclaje.

Sin embargo, también enfrenta barreras significativas. Existen desafíos culturales, normativos y tecnológicos que dificultan su implementación a gran escala. La transición requiere una transformación estructural en los sistemas productivos, inversión en infraestructura, marcos regulatorios adecuados y políticas de incentivos claros. Asimismo, implica repensar la educación y la formación de trabajadores para adaptarse a nuevas dinámicas laborales. En muchos contextos, como América Latina y el Caribe, también se identifican limitaciones institucionales y de gobernanza que deben ser abordadas para permitir una adopción efectiva del modelo.

En definitiva, la economía circular no debe entenderse como una simple mejora del modelo actual, sino como una evolución hacia un sistema más integrado, resiliente y sostenible. Su implementación exige un enfoque sistémico, colaboración multisectorial y el uso estratégico de tecnologías habilitadoras como la trazabilidad digital y blockchain. Para comprender en profundidad la diferencia estructural entre la economía lineal y la economía circular, se incluyen a continuación esquemas comparativos que ilustran el flujo de recursos en ambos modelos. En el enfoque lineal, la cadena de suministro se organiza como un proceso unidireccional: los recursos son extraídos, transformados en productos, consumidos y finalmente desechados. Este modelo ignora el valor residual de los materiales, genera una creciente acumulación de residuos y no contempla mecanismos para reincorporar los productos al ciclo productivo una vez finalizada su vida útil.

En contraste, la economía circular redefine el papel de la cadena de suministro transformán-

dola en una red cerrada y regenerativa. El objetivo es mantener los productos, componentes y materiales en uso el mayor tiempo posible mediante estrategias de reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. La cadena se vuelve más dinámica e interdependiente, integrando bucles de retroalimentación entre los diferentes actores de la cadena de valor, incluyendo consumidores, productores, proveedores y gestores de residuos. Esta visión implica una transformación profunda del diseño de productos, los procesos logísticos, la distribución y la gestión del fin de vida.

Para llevar a cabo esta transición sistémica desde un modelo lineal hacia uno circular, se requieren cambios estructurales en múltiples niveles. Entre los habilitadores clave de este proceso se encuentra la trazabilidad, entendida como la capacidad de rastrear el origen, el uso y el destino de materiales y productos a lo largo de toda su vida útil. La trazabilidad permite verificar compromisos ambientales, controlar impactos, optimizar la logística inversa y empoderar tanto a consumidores como a instituciones para adoptar decisiones basadas en información confiable. Su implementación resulta esencial para garantizar la transparencia, la confianza entre actores y la eficiencia en los flujos circulares.

Es importante destacar que esta transición ya se encuentra en marcha. Diversos países, regiones y sectores productivos han comenzado a incorporar principios circulares en sus estrategias de desarrollo, en muchos casos impulsados por marcos regulatorios, acuerdos internacionales y metas vinculadas a la sostenibilidad ambiental. En este contexto, las políticas públicas han asumido un rol central como motores de adopción, ofreciendo instrumentos normativos, fiscales y de gobernanza que facilitan la transformación del sistema económico. A continuación, se analizarán estas políticas sustentables como eje estratégico para avanzar hacia una economía más circular y resiliente.

2.2.1. Políticas sustentables

En el proceso de transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles, la Unión Europea ha asumido un rol pionero en la implementación de políticas públicas alineadas con la economía circular. Iniciativas como el Pacto Verde Europeo, la Ley Europea del Clima o los marcos regulatorios vinculados al paquete Objetivo 55 han consolidado a Europa como un referente global en materia de sustentabilidad ambiental. Estas políticas no solo promueven la descarbonización de la economía, sino que también introducen principios de circularidad en sectores como la industria, la energía, la movilidad y la gestión de residuos, reconfigurando las cadenas de suministro hacia sistemas más regenerativos, transparentes y trazables.

Sin embargo, el mayor hito internacional en la construcción de una visión compartida sobre sustentabilidad ha sido, sin duda, la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas en 2015. Este conjunto de 17 objetivos interconectados, acompañados por 169 metas y más de 230 indicadores, propone una agenda universal que orienta las políticas públicas hacia un desarrollo económico, social y ambiental equilibrado para 2030.

El objetivo general de los ODS es erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad para todas las personas. En relación con la economía circular, existen cinco objetivos particularmente relevantes que guían tanto los marcos normativos como las estrategias de innovación en producción, consumo y gestión de residuos:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** Promueve el acceso universal a fuentes de energía limpias, eficientes y modernas, fundamentales para la transición a una economía circular descarbonizada.
- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Plantea la necesidad de gestionar de manera integrada los recursos urbanos, incluyendo residuos, infraestructura y movilidad, en articulación con una trazabilidad eficiente de los flujos materiales.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables.** Es el núcleo del paradigma circular, impulsando el diseño sostenible de productos, el uso eficiente de recursos, la minimización de residuos y la promoción de modelos de cadena de suministro regenerativos.
- **ODS 13: Acción por el clima.** Vincula la circularidad con la reducción de emisiones y la adaptación al cambio climático, incentivando políticas que rediseñen los sistemas productivos de alto impacto ambiental.
- **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.** Apunta a la restauración y conservación de ecosistemas degradados, objetivos que sólo pueden alcanzarse mediante modelos productivos basados en ciclos cerrados de materia y energía.

Los ODS han generado un marco de referencia común que ha influido fuertemente en las agendas de sostenibilidad a nivel global, incluyendo América Latina. Aunque en la región la adopción de políticas circulares aún es incipiente en comparación con Europa, se observan avances significativos. Por ejemplo, varios países han comenzado a incorporar la responsabilidad extendida del productor, prohibiciones de plásticos de un solo uso y normativas orientadas a la reutilización y reciclado de materiales. Estas políticas buscan reestructurar las cadenas de valor y fomentar prácticas productivas y logísticas compatibles con los principios de circularidad.

En Argentina, la Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles se destaca como el instrumento central para avanzar hacia la economía circular. Este plan integra medidas normativas, educativas, tecnológicas y financieras, orientadas a fortalecer la sostenibilidad en toda la cadena de producción y consumo. Se promueve activamente el uso de tecnologías limpias, la gestión sostenible de recursos, y la incorporación de criterios ambientales en compras públicas, reconociendo el rol de la trazabilidad como mecanismo para garantizar la transparencia, eficiencia y cumplimiento normativo en los procesos productivos.

Si bien estos esfuerzos representan un paso importante, los desafíos estructurales persisten. La región enfrenta obstáculos en términos de infraestructura, financiamiento, coordinación institucional y disponibilidad de información confiable. A pesar de ello, el impulso dado por los ODS ha generado una convergencia regional que permite imaginar una transición hacia modelos circulares, sostenida por políticas públicas que consideran no sólo las metas globales, sino también las realidades locales.

En este escenario, la transformación hacia una economía circular no puede pensarse sin una reconfiguración profunda de las cadenas de suministro, que constituyen la columna vertebral de los sistemas productivos. La implementación de políticas sustentables, tanto en Europa como en América Latina, ha puesto en evidencia la necesidad de contar con mecanismos que permitan monitorear, verificar y optimizar el flujo de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos. En este sentido, la trazabilidad emerge como una herramienta clave para operacionalizar los principios de la circularidad, asegurando la transparencia, la calidad y la responsabilidad en cada etapa del proceso. La siguiente sección abordará con mayor detalle cómo se articula esta relación entre cadenas de suministro y trazabilidad, y cuál es su rol estratégico en la transición hacia modelos económicos más sostenibles, resilientes y regenerativos.

2.2.2. Cadena de suministro

La cadena de suministro constituye el entramado logístico, operativo y estratégico que permite el flujo de materiales, información y recursos desde la extracción de materias primas hasta la llegada del producto al consumidor final. Este sistema complejo, que involucra a múltiples actores —proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas, consumidores y, en algunos casos, gestores de residuos y autoridades regulatorias—, busca garantizar que los bienes y servicios se produzcan y entreguen de manera eficiente, segura y rentable. En su concepción tradicional, la cadena de suministro ha estado orientada a la eficiencia lineal, es decir, maximizar el rendimiento del flujo “de origen a destino”, sin considerar el impacto postconsumo o el valor residual de los materiales.

Sin embargo, en el contexto de la economía circular, la cadena de suministro asume una nueva lógica de funcionamiento. En lugar de ser una secuencia finita de pasos que culminan con la disposición del producto, se transforma en un sistema regenerativo y cíclico, en el cual los materiales son diseñados para permanecer en uso el mayor tiempo posible, ser reutilizados, reacondicionados o reciclados. Esta visión circular implica rediseñar productos, procesos y relaciones para mantener el valor de los recursos a lo largo del tiempo, evitando su descarte prematuro y reduciendo la necesidad de materias primas vírgenes.

Esta transformación se estructura en una serie de etapas conectadas, que conforman el nuevo ciclo productivo circular: producción, consumo, recolección de residuos, transporte, clasificación y disposición, y finalmente, reciclaje o reacondicionamiento. Cada una de estas etapas requiere coordinación, trazabilidad e integración de datos, especialmente en sistemas donde intervienen múltiples organizaciones y tecnologías.

La trazabilidad —entendida como la capacidad de rastrear un producto desde su origen hasta su destino y más allá— se vuelve un habilitador fundamental que conecta todas las fases del proceso, asegurando integridad, transparencia y responsabilidad en cada paso.

La trazabilidad es la capacidad de seguir el recorrido completo de un producto, material o componente a lo largo de toda la cadena de suministro, desde su origen hasta su destino final,

e incluso más allá, en escenarios de reutilización o reciclaje. Su objetivo principal es reconstruir el historial de producción, transformación y movimiento de un bien, permitiendo conocer su composición, ubicación, responsables y condiciones de manejo en cada etapa del proceso. Esta información resulta clave no solo para verificar la autenticidad del producto, sino también para asegurar estándares de calidad, cumplimiento normativo, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental.

En el contexto de la cadena de suministro, la trazabilidad se aplica de forma transversal, es decir, atraviesa e interconecta todas las fases del ciclo: desde el diseño y la fabricación, hasta la distribución, el consumo, la gestión de residuos y el reciclaje. No se trata de una función aislada, sino de una infraestructura digital que permite registrar, verificar y compartir información crítica entre todos los actores del sistema. De este modo, la trazabilidad facilita la coordinación entre partes, reduce los riesgos asociados a errores, fraudes o contaminaciones, y mejora la capacidad de respuesta ante incidentes o fallas en la cadena.

No obstante, su implementación conlleva desafíos importantes. Las cadenas de suministro tradicionales suelen estar fragmentadas y utilizar sistemas de información heterogéneos o poco interoperables. Muchos registros todavía se realizan en papel o en bases de datos centralizadas, lo que aumenta la vulnerabilidad frente a errores humanos, pérdidas de datos o manipulaciones. Además, la ausencia de estándares unificados y la reticencia a compartir datos entre organizaciones limitan la visibilidad total del flujo de productos y materiales.

Los sistemas tradicionales de trazabilidad a menudo dependen de terceros de confianza, con datos almacenados en papel o en bases de datos centralizadas. Estos enfoques son propensos a problemas de integridad de datos, altos costos, ineficiencias por procesos manuales, errores humanos y manipulación. En contraste, Blockchain ofrece un nuevo modelo donde la autenticidad no es verificada por un tercero, sino por la propia red de nodos mediante consenso. La naturaleza descentralizada de Blockchain, donde cada participante tiene una copia del registro, contrasta con el modelo centralizado, donde un error puede llevar a la pérdida de información o comprometer su integridad.

Para abordar estos desafíos, se ha desarrollado un conjunto de tecnologías que fortalecen los sistemas de trazabilidad. Entre las más utilizadas se encuentran los códigos de barras y las etiquetas RFID, que permiten la identificación automática de productos; los sensores IoT, que capturan datos en tiempo real sobre condiciones ambientales o de transporte; los sistemas ERP y de gestión logística, que centralizan y organizan la información operativa; y, más recientemente, la tecnología blockchain, que introduce una capa adicional de seguridad, inmutabilidad y transparencia.

Blockchain, en particular, permite registrar cada transacción o evento de la cadena en un registro digital descentralizado e inalterable. Esto garantiza que todos los actores tengan acceso a un historial común y verificable, eliminando la necesidad de intermediarios o auditores externos. Combinando contratos inteligentes y plataformas de análisis de datos, la trazabilidad basada en blockchain permite no solo conocer lo que ocurrió, sino también automatizar respuestas

ante condiciones predefinidas, reduciendo los tiempos de reacción y aumentando la confianza entre las partes.

En la cadena de suministro (SCM), Blockchain desempeña un papel transformador. Aporta un aumento significativo en la seguridad, confidencialidad, trazabilidad, transparencia, precisión de datos, privacidad, eficiencia, responsabilidad y confianza. Se utiliza en diversos sectores como la agricultura, alimentos, industria, marítimo y medioambiental. Por ejemplo, en el sector alimenticio, impulsa el valor percibido del producto y la calidad, además de fortalecer la confianza entre las partes interesadas. Para el sector industrial, se enfoca en la planeación y el intercambio de información para una mayor sostenibilidad. En el sector textil, mejora los procesos internos, la trazabilidad y previene la falsificación. La tecnología Blockchain, unida a IoT, puede proporcionar soluciones eficientes y eficaces para la cadena de suministro, mejorando la recopilación de datos y los beneficios para las partes interesadas. Si bien su aplicación aún está en desarrollo, su potencial para optimizar la trazabilidad y la sostenibilidad en la gestión de residuos es ampliamente reconocido.

La trazabilidad, por lo tanto, se convierte en un habilitador clave para la transición hacia modelos de economía circular. Permite no solo verificar el cumplimiento de estándares ambientales y sociales, sino también optimizar el uso de recursos, reducir desperdicios y fomentar la reutilización y el reciclaje. En un contexto donde la sostenibilidad es cada vez más prioritaria, contar con sistemas de trazabilidad robustos y confiables resulta esencial para garantizar la transparencia, la eficiencia y la responsabilidad en las cadenas de suministro.

2.2.3. Proceso de producción y reciclaje en la economía circular

En el marco de la economía circular, los procesos de producción y reciclaje dejan de concebirse como etapas aisladas y unidireccionales para integrarse en un sistema dinámico y regenerativo. Este sistema busca maximizar el valor de los materiales a lo largo del tiempo, manteniéndolos en uso durante el mayor tiempo posible, y reintroduciéndolos en el ciclo económico una vez finalizada su vida útil. A diferencia del modelo lineal, donde los productos son descartados tras el consumo, la economía circular plantea un circuito continuo que requiere rediseñar tanto las formas de producir como las estrategias de recuperación.

El proceso de producción comienza en la etapa de diseño, donde se decide la composición de los productos considerando criterios de ecoeficiencia, reutilización y reciclabilidad. Aquí intervienen diseñadores, ingenieros y proveedores de materias primas, quienes priorizan materiales reciclados o de bajo impacto ambiental. A continuación, durante la fabricación, los procesos industriales buscan reducir el uso de recursos y minimizar las emisiones, integrando tecnologías limpias y eficientes. En esta fase, los productos terminados o semielaborados quedan registrados con información detallada sobre su origen, composición y trazabilidad, lo cual permite una futura gestión más eficiente de su reciclaje.

Una vez que los productos son utilizados por los consumidores, comienza el ciclo inverso de

valorización. Cuando estos artículos llegan al fin de su vida útil, se convierten en residuos que deben ser recolectados, transportados, clasificados y reacondicionados. Este proceso de reciclaje involucra a recolectores, centros de acopio, plantas de tratamiento, recicladores industriales y fabricantes secundarios. Durante la recolección, tecnologías como sensores IoT, lectores de códigos QR o etiquetas RFID permiten registrar información sobre la identidad del recolector, la cantidad, el tipo y las condiciones del residuo. Esta información permite monitorear flujos y brindar transparencia en la cadena.

Posteriormente, los residuos son transportados a instalaciones donde se clasifican y segregan según su tipo y calidad. Este paso es fundamental para evitar contaminaciones cruzadas y asegurar un reciclaje efectivo. Finalmente, los materiales seleccionados se someten a procesos de reciclaje o reacondicionamiento, reincorporándolos al sistema productivo como insumos o productos reutilizables. Aquí, tecnologías como blockchain pueden documentar cada transacción o transformación, fortaleciendo la integridad del proceso y fomentando la confianza entre los actores.

Existen diversos materiales reciclables, cada uno con características particulares. El papel y cartón son ampliamente reciclados y fáciles de recolectar, mientras que los metales —como el aluminio, el acero o el cobre— conservan sus propiedades tras múltiples ciclos. Los residuos electrónicos (RAEE) presentan un alto valor por su contenido en metales preciosos, aunque requieren procesos especializados. Los plásticos, si bien representan un desafío por su heterogeneidad, pueden reciclarse eficientemente si se rediseñan los envases y se simplifican sus composiciones. Los residuos orgánicos son compostables o pueden aprovecharse energéticamente. Finalmente, el vidrio destaca como el material circular por excelencia: puede reciclarse infinitas veces sin perder calidad, su estructura es químicamente estable, y su reciclaje requiere menos energía que su producción original. Estas cualidades lo convierten en un insumo ideal para sistemas de economía circular bien diseñados.

El siguiente esquema conceptual sintetiza estas etapas como un ciclo cerrado, donde cada fase se conecta mediante mecanismos de trazabilidad digital que permiten el seguimiento de los materiales desde su origen hasta su reincorporación al sistema:

Este enfoque refleja cómo el diseño de productos, la gestión eficiente de los residuos y la integración de tecnologías como blockchain pueden transformar las cadenas de suministro tradicionales en sistemas circulares, resilientes y sostenibles.

2.2.4. Cadena de suministro del vidrio

El vidrio es uno de los materiales más representativos de la economía circular por su capacidad única de ser reciclado indefinidamente sin perder calidad. Esta propiedad lo convierte en un recurso estratégico para reducir la demanda de materias primas vírgenes, minimizar residuos y disminuir la huella de carbono asociada a la producción industrial. A diferencia de otros materiales cuyo reciclaje implica degradación, el vidrio conserva íntegramente sus caracterís-

tivas físicas y químicas, permitiendo su reintegración al ciclo productivo tantas veces como sea necesario.

La cadena de suministro del vidrio en un modelo circular abarca múltiples etapas interconectadas, desde la extracción de materias primas hasta la reincorporación del material reciclado a nuevos ciclos de producción. El proceso comienza con el diseño del producto, etapa clave para asegurar su durabilidad, reutilización y posterior reciclabilidad. Le sigue la producción industrial, donde se funden arena, sosa y caliza a altas temperaturas, frecuentemente combinadas con calcín (vidrio reciclado triturado) para reducir el consumo energético. Luego, los envases fabricados son distribuidos y utilizados por los consumidores, quienes pueden reutilizarlos o, una vez descartados, ingresarlos a circuitos de reciclaje. La recolección diferenciada, el transporte, la clasificación y limpieza del material son esenciales para garantizar un reciclaje de calidad. Finalmente, el vidrio tratado se funde nuevamente y se convierte en materia prima secundaria para nuevos envases, cerrando así el ciclo.

Este sistema se representa esquemáticamente en el siguiente diagrama, que ilustra las etapas circulares desde el diseño hasta la refabricación y reincorporación al ciclo productivo:

En Mendoza, la cadena del vidrio adquiere una importancia estratégica por su estrecha vinculación con la industria vitivinícola, uno de los principales motores económicos de la región. La provincia cuenta con una única empresa que produce y recicla envases de vidrio a escala industrial: Verallia. Esta compañía internacional cubre la totalidad de la demanda local de botellas y frascos, fabricando envases para vinos, espumantes, cervezas, licores y alimentos. El proceso de producción en Verallia incluye desde la selección y mezcla de materias primas hasta la formación, inspección y distribución de los envases, con la integración progresiva de vidrio reciclado como parte del insumo.

Verallia ha reconocido públicamente que la mayor dificultad de su industria es la elevada emisión de dióxido de carbono, por lo que ha adoptado una estrategia dual orientada a optimizar el reciclaje y fomentar la reutilización del vidrio. Bajo esta lógica, ha desarrollado el programa “Vidrio, una acción transparente” en alianza con el Gobierno de Mendoza, mediante el cual se promueve la recolección de envases descartados, destinando los ingresos generados al apoyo de organizaciones benéficas. Esta iniciativa, aunque aún incipiente, representa un esfuerzo por avanzar hacia una cadena de suministro más circular y socialmente responsable.

Sin embargo, el reciclaje de vidrio en Mendoza enfrenta desafíos estructurales. La tasa de recuperación aún es baja, las métricas oficiales son escasas y las políticas de incentivo son limitadas. La logística de recolección depende en gran medida de la voluntad ciudadana y carece de sistemas obligatorios o premiantes que aseguren su masividad. En este contexto, el rol de actores industriales como Verallia resulta central para impulsar transformaciones sostenibles en la cadena del vidrio, tanto mediante la innovación tecnológica como a través de la articulación público-privada.

Más allá del caso mendocino, el vidrio sigue siendo uno de los materiales más valiosos dentro de una economía circular bien implementada. Su durabilidad, estabilidad química, transparen-

cia y capacidad de reciclaje total lo convierten en un insumo ideal para cerrar ciclos productivos sin pérdidas de calidad ni de valor. Avanzar hacia una cadena del vidrio plenamente circular requiere optimizar cada etapa, desde el diseño y la fabricación hasta la trazabilidad del reciclaje, consolidando sistemas logísticos eficientes, ciudadanos comprometidos y políticas públicas robustas que garanticen su sostenibilidad a largo plazo.

2.3. Proyectos y trabajos relacionados

To-Do

Fill this section with related projects and works

MATERIAL Y MÉTODOS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.



GUÍA COMPLETA DEL USUARIO

INSTRUCCIONES PARA EL USO DE LA PLANTILLA

Si tienes pensado utilizar esta plantilla, te recomiendo leer este capítulo con atención. Aquí encontrarás toda la información necesaria para utilizarla de forma eficaz, incluyendo las modificaciones obligatorias (*por ejemplo*, título, subtítulo, información del autor/a), así como otras configuraciones que, aunque no son imprescindibles, pueden personalizarse según tus necesidades.

La plantilla está compuesta por varios directorios y archivos, en total siete directorios distintos y decenas de archivos. Entre todos ellos, los más relevantes son `UMUthesis.tex` y `UMUthesis.cls`, que constituyen el núcleo del proyecto. En la ?? se muestra la estructura de los distintos directorios disponibles, junto con una breve descripción y un indicador que señala si es necesario modificar su contenido. Un símbolo de verificación indica que puedes realizar cambios en ese directorio, mientras que un guion significa que no deberías modificarlo.

Es crucial tener en cuenta que los archivos se organizan de acuerdo con una convención de nomenclatura específica, que debe ser **respetada** y **mantenida**. La convención de nomenclatura consiste en un valor numérico ascendente de dos dígitos, seguido de un guion y, a continuación, el nombre del archivo en mayúsculas.

Los dos archivos mencionados anteriormente, `UMUthesis.tex` y `UMUthesis.cls`, deben utilizarse con precaución. El archivo principal, como su nombre indica, es el archivo maestro en el que añadirá los capítulos necesarios para incluirlos en su trabajo. El archivo de clase, por su parte, requiere aún más cautela, y no se recomienda alterarlo.

Cuadro 4.1: Resumen de la estructura de directorios en esta plantilla.

Directorio	Modificable	Descripción
<i>Bibliography</i>	✓	Contiene el archivo de bibliografía utilizado para gestionar las referencias a lo largo del documento.
<i>Chapters</i>	✓	Aquí se organizan los capítulos individuales de la tesis, lo que facilita el trabajo por secciones.
<i>Code</i>	✓	Almacena fragmentos de código y scripts relevantes que respaldan el contenido de la tesis.
<i>Configurations</i>	-	Incluye todos los archivos de configuración necesarios para la plantilla, como estilos, diseño y opciones generales.
<i>Figures</i>	✓	Contiene todas las figuras e imágenes referenciadas en el documento, organizadas para un acceso sencillo.
<i>Matter</i>	-	Reúne los elementos preliminares del documento, como la portada, declaración de autoría y glosario.
<i>Metadata</i>	✓	Carpeta donde se encuentra el archivo de metadatos, con información personalizable como autor/a, título y dirección de tesis.

4.1. Opciones de la Plantilla y la Clase

Lo primero que debes hacer es especificar las opciones dentro del archivo `UMUthesis.tex`. ¿Cómo se hace? Es muy sencillo. En la primera línea del archivo encontrarás el comando `documentclass`, que carga la clase personalizada de esta plantilla. En esa llamada puedes incluir las opciones que necesites. Las opciones disponibles, en formato clave-valor, se enumeran en la ??.

tabularx

Cuadro 4.2: Opciones de clase soportadas por la plantilla.

Opción	Descripción
language=OPT <i>spanish, english</i>	Selección del idioma del documento. ⇒ Por defecto: <i>language=english</i>
chapterstyle=OPT <i>classic, modern, fancy</i>	Estilo visual de los capítulos. ⇒ Por defecto: <i>chapterstyle=fancy</i> Esta opción afecta a la apariencia del título del capítulo y su numeración. A mi la que más me gusta es la fancy, pero tu elige la que te de la gana.
docstage=OPT <i>final, working</i>	Etapas del documento. ⇒ Por defecto: <i>docstage=final</i> <i>final</i> → Versión final del documento. <i>working</i> → Documento en desarrollo.
media=OPT <i>paper, screen</i>	Tipo de soporte para el documento. ⇒ Por defecto: <i>media=paper</i> <i>paper</i> → Inserta páginas en blanco entre secciones. <i>screen</i> → No inserta páginas en blanco.
linkcolor=OPT	Color principal del documento.

Continúa en la siguiente página.

Tabla 4.2 continuación de la página anterior.

Opción	Descripción
<code>color</code>	⇒ Por defecto: <code>colorlink=black</code> Se requiere un color válido. Consulta el manual de <code>xcolor</code> (sección 4.2).

Tip

Aunque el color por defecto es `black`, se recomienda utilizar `red!45!black` para mejor visibilidad del PDF

Warning

Si vas a imprimir la tesis, configura el color en `black` para que los de la fotocopidora no te cobren la página a color simplemente por un link.

Después de definir las opciones de clase, puedes continuar con la personalización de los metadatos del documento. Consulta la ?? para más detalles.

4.2. Personalización de Metadatos

Mientras que algunas opciones, como el idioma o el centro, se configuran en la clase principal, otros datos —como el autor, título o año académico— deben definirse manualmente. Para facilitar esta tarea, la plantilla incluye un archivo específico para metadatos: `Metadata/Metadata.tex`. En él encontrarás todas las variables editables, junto con comentarios que indican si son obligatorias.

Para omitir una variable, basta con comentarla. En la ?? se resumen las variables disponibles, sus comandos asociados y si son obligatorias.

Cuadro 4.3: Variables de metadatos en la plantilla.

Variable	Comando macro	Obligatoria
Title	<code>\GetTitle</code>	✓
Título Español	<code>\GetTitleEsp</code>	✓
Lugar y fecha	<code>\GetDate</code>	✓
Año académico	<code>\GetAcademicYear</code>	✓
Nombre del autor/a principal	<code>\GetFirstAuthor</code>	✓
Nombre del director/a	<code>\GetSupervisor</code>	✓
Correo del director/a	<code>\GetSupervisorMail</code>	✓
Co-director/a	<code>\GetCoSupervisor</code>	-
Correo co-director/a	<code>\GetCoSupervisorMail</code>	-

Continúa en la siguiente página.

Tabla 4.3 continuación de la página anterior.

Variable	Comando macro	Obligatoria
Segundo co-director/a	<code>\GetSecCoSupervisor</code>	-
Correo segundo co-dir	<code>\GetSecCoSupervisorMail</code>	-

¿Quieres añadir más opciones? Puedes abrir un *issue* en el repositorio oficial de GitHub o escribirme al correo indicado en esta documentación.

4.3. Comandos Personalizados

Esta plantilla incluye algunos comandos personalizados para facilitar tu trabajo. Por ejemplo, si deseas insertar una nota de tareas pendientes, puedes usar el bloque `\begin{block}[todo]`, que mostrará un bloque al estilo Markdown. Otros bloques disponibles son: *tip*, *warning* y *note*. A continuación se muestra un ejemplo visual:

<p>To-Do</p> <p>Este es un bloque de tareas pendientes.</p>	<p>Tip</p> <p>Este es un bloque de sugerencias.</p>
<p>Warning</p> <p>Este es un bloque de advertencia.</p>	<p>Note</p> <p>Este es un bloque de nota.</p>

También puedes utilizar el comando `\myuline{TEXT0}` para subrayar de forma más estética. A diferencia del subrayado estándar de \LaTeX , este comando mejora la presentación visual sin alterar el interlineado. Así puedes tener un subrayado más limpio y elegante.

4.4. Inserción de Capítulos Personalizados

Como se indicó anteriormente, para utilizar esta plantilla correctamente debes realizar tres pasos: *i* configurar las opciones en la clase del documento (ver ??), *ii* personalizar los metadatos (ver ??), y *iii* crear e importar tus propios capítulos. Para ello, crea un archivo `.tex` dentro del directorio `Chapters`, siguiendo la convención de nombres, e inclúyelo en el archivo principal con el comando `\include{CAPITULO}`. ¡Y listo! Tu primer capítulo estará listo para compilar.



TUTORIAL ESENCIAL DE L^AT_EX: FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS CLAVE

En este capítulo se introduce el entorno de trabajo de L^AT_EX, destacando los aspectos básicos que necesitarás para redactar tu tesis. A diferencia de los editores de tipo *Lo que ves es lo que obtienes* como Microsoft Word, L^AT_EX utiliza archivos de texto plano que contienen tanto el contenido como los comandos de formato. Estos archivos son procesados por un motor TeX, que interpreta dichos comandos para producir un PDF maquetado con precisión tipográfica.

Este enfoque te permite centrarte en el contenido, dejando la responsabilidad del diseño y la presentación a L^AT_EX y al motor TeX, garantizando así un resultado profesional en todo momento. Aunque en este capítulo se presentarán algunas funcionalidades clave, se recomienda encarecidamente aprender L^AT_EX desde sus fundamentos. Puedes consultar en cualquier momento la serie de Overleaf Learn LaTeX como guía de referencia.

5.1. Citas

Existen dos formas principales de citar entradas de la bibliografía. El primer método consiste en instalar un gestor de bibliografías. Existen múltiples en el mercado (Mendeley, Zotero, Endnote etc.). Actualmente, la UMU tiene una colaboración con Mendeley ([Link](#)). Es fácil de usar y se puede sincronizar con Overleaf. Una vez hecho esto, para realizar una cita dentro del texto, se utiliza el comando `\cite{ENTRADA}`, y en el mismo comando puedes citar a múltiples autores a la vez `\cite{ENTRADA1, ENTRADA2, ENTRADA3}`.

Tip

Citar correctamente es fundamental en la escritura académica, ya que constituye la base de la credibilidad, la transparencia y el avance del conocimiento. Es una práctica esencial de cualquier trabajo académico riguroso. Asegúrate siempre de que tus citas sean precisas y adecuadas.

Ejemplo: Esta plantilla es una modificación de la plantilla IPLeiriaThesis [IPLeiriaThesis], dando lugar a la creación de UMUthesis [UMU_Thesis]

5.2. Referencias

Al igual que las citas bibliográficas, es altamente recomendable referenciar elementos clave dentro del documento, como capítulos, secciones, figuras o tablas. Para ello, primero debes crear una etiqueta utilizando el comando `\label{TEXT0}`, colocándola dentro del elemento que deseas referenciar. Una vez creada la etiqueta, puedes hacer referencia a ella con `\ref{ETIQUETA}`.

Se recomienda encarecidamente utilizar `\autoref{ETIQUETA}`. Este comando genera un enlace automático con el tipo de elemento correspondiente (por ejemplo, capítulo, sección, figura...), y lo presenta con el formato adecuado. Por ejemplo, una referencia a un capítulo se verá así: ??, en lugar de simplemente Capítulo ??.

Tip

*Referenciar correctamente elementos del documento, como **capítulos, secciones, figuras, tablas o listados**, es fundamental para garantizar la claridad y estructura del texto.*

5.3. Glosario y Acrónimos

Este documento incluye tanto un glosario como una lista de acrónimos, disponibles al inicio del trabajo. Puedes crear una nueva entrada en los archivos ubicados en Matter/02-Glossary (para términos) o Matter/03-Acronyms (para acrónimos), dependiendo del tipo de concepto que desees añadir.

Una vez añadida la entrada, puedes referenciarla dentro del texto de las siguientes maneras:

- Para entradas del glosario, usa `\gls{ENTRADA}`. - Para acrónimos, tienes dos opciones: - `\acrfull{ENTRADA}`: se utiliza la primera vez que aparece el acrónimo y muestra su significado completo. - `\acrshort{ENTRADA}`: para menciones posteriores sin repetir la definición.

Ejemplo: Utilizar Latex para Mathematics es fundamental (...). Es aconsejable obtener tanto el () como el () porque (...). Más adelante, con la ayuda del y el , podemos (...).

5.4. Figuras

En \LaTeX , insertar figuras es un proceso sencillo. Para ello, se debe utilizar el entorno `\begin{figure}`. Puedes ajustar el parámetro `width` según tus necesidades, pero es fundamental elegir imágenes de alta calidad para garantizar un buen resultado visual.

También es importante añadir un pie de figura (caption) bien redactado. Si la figura proviene de una fuente externa, considera incluir una cita o referencia. El pie de figura se crea con el comando `\caption{TEXTO}`. Si deseas una versión abreviada del pie de figura para que aparezca en la Tabla de Figuras, usa el formato `\caption[TEXTO_CORTO]{TEXTO_COMPLETO}`.

Siguiendo estas recomendaciones, podemos generar una figura como se muestra en la ??.



Figura 5.1: *Ilustración de la catedral más bonita del mundo).*

Si deseas comparar imágenes u organizarlas una al lado de la otra, puedes utilizar los entornos `\begin{figure}` y `\begin{subfigure}` de forma conjunta. Luego, puedes referenciar las subfiguras como ?? y ??.



(a) Subfigura 1.



(b) Subfigura 2.

Figura 5.2: La catedral más bonita del mundo.

5.5. Tablas

Las tablas son esenciales para presentar resultados e información de forma clara. En esta sección se presentan distintas técnicas para mostrar datos utilizando los entornos disponibles en esta plantilla. Aunque definir tablas en \LaTeX pueda parecer complicado al principio, esta plantilla simplifica considerablemente el proceso.

Tip

Antes de mostrar los diferentes entornos de tablas, es importante recordar que todas deben estar dentro del entorno `\begin{table}`. Además, se recomienda utilizar la opción de flotación `[!htpb]` para mejorar la colocación automática de las tablas en el documento. **Este consejo también aplica al uso de figuras.**

5.5.1. Entorno Tabular

El entorno estándar `\begin{tabular}` permite crear tablas simples pero elegantes. La tabla ?? se ha generado utilizando un entorno centrado (`\centering`) y empleando el paquete `booktabs` para mejorar el estilo visual.

Cuadro 5.1: Ejemplo de uso del entorno tabular.

Encabezado 1	Encabezado 2	Encabezado 3
Lorem Ipsum	Pharetra Dolor	✓
Amet Consectetuer	Curabitur Aliquet	-
Praesent Mauris	Praesent Libero	✓

5.5.2. Entorno Tabularx

El paquete `tabularx` permite construir tablas con columnas que se expanden automáticamente para ocupar todo el ancho disponible. Para lograr este comportamiento, se puede utilizar el

entorno: `\begin{tabularx}{\textwidth}{lX}`, donde la columna X se comporta como una columna multicolumna que ocupa el espacio restante. La tabla ?? muestra un ejemplo del uso de este entorno.

Cuadro 5.2: *Ejemplo del uso del entorno tabularx.*

Encabezado 1	Encabezado 2
Foo Bar Baz	Quisque cursus, metus vitae pharetra auctor, sem massa mattis sem, at interdum magna augue eget diam.
Ipsum Dolor	Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Curabitur aliquet quam id dui.
Dolor Sit	Phasellus condimentum elementum justo, quis interdum est sagittis ac. Vestibulum non arcu sit amet justo lobortis semper.
Amet Consectetuer	Integer nec odio praesent libero sed cursus ante dapibus diam sed nisi vestibulum non arcu.
Consectetuer Adipiscing	Nulla quis sem at nibh elementum imperdiet. Duis sagittis ipsum. Praesent mauris.

5.5.3. Entorno Longtable

Cuando se trabaja con tablas especialmente largas que necesitan dividirse en varias páginas, es conveniente usar el entorno `\begin{longtable}`. Este entorno requiere definir el encabezado dos veces: una para la primera aparición de la tabla y otra para las siguientes páginas. Esto garantiza que el lector pueda identificar correctamente las columnas en todo momento. Consulta la ?? para ver un ejemplo detallado.

Cuadro 5.3: *Ejemplo del uso del entorno longtable.*

Nombre	Correo electrónico	Rol o puesto
Alice Johnson	alice.johnson@email.com	Project Manager
Bob Thompson	bob.thompson@email.com	Data Analyst
Charlie Davis	charlie.davis@email.com	Marketing Specialist
Steven Martin	steven.martin@email.com	Robotics Engineer

5.5.4. Tablas Complejas

Crear tablas complejas en \LaTeX puede ser una tarea algo desafiante. Por ello, se recomienda encarecidamente el uso de herramientas como Table Generator. Esta herramienta permite diseñar visualmente la tabla con el estilo deseado y luego copiar fácilmente el código generado al documento \LaTeX .

Este enfoque simplifica el proceso y asegura una representación precisa del contenido. No obstante, es fundamental que la tabla siga siendo comprensible para el lector. **El exceso de complejidad puede dificultar la interpretación.** La ?? muestra un ejemplo de tabla con múltiples niveles de detalle.

Cuadro 5.4: Ejemplo del uso de tablas complejas.

Componente	Especificaciones	
	Característica	Compatible
CPU	Núcleos (ej.: 8)	✓
	Frecuencia base (ej.: 3.6 GHz)	✓
	Hyper-Threading	✓
	Gráficos integrados	-
GPU	Núcleos CUDA (ej.: 5120)	✓
	Frecuencia base (ej.: 1.5 GHz)	✓
	Soporte Ray Tracing	✓
	Multi-GPU (SLI/CrossFire)	-
Memoria	Tipo (ej.: DDR5, GDDR6)	✓
	Capacidad (ej.: 16 GB)	✓
	Ancho de banda (ej.: 448 GB/s)	✓
	Soporte ECC	-
Placa Base	Soporte PCIe 5.0	✓
	Wi-Fi 6E	✓
	Thunderbolt 4	-

5.6. Listas

Crear listas en \LaTeX es sencillo y ofrece varias opciones según tus necesidades. Puedes generar listas con viñetas mediante el entorno `\begin{itemize}` o listas numeradas con `\begin{enumerate}`. A continuación se muestra un ejemplo con el entorno `itemize`:

- Cada elemento comienza con el comando `\item`.
- Los elementos están marcados con un punto negro (viñeta).
- El texto de cada elemento puede tener cualquier longitud.

Como se mencionó anteriormente, también puedes crear una lista numerada con el entorno `enumerate`. Por ejemplo:

1. Los elementos se numeran automáticamente.
2. La numeración comienza en 1 en cada entorno `enumerate`.
3. Otro elemento más en la lista.

También es posible anidar listas dentro de otras listas del mismo tipo. Aquí tienes un ejemplo:

1. Elemento de primer nivel
2. Elemento de primer nivel
 - a) Elemento de segundo nivel

- b) Elemento de segundo nivel
 - 1) Elemento de tercer nivel
 - 2) Elemento de tercer nivel

Tip

Observa que las etiquetas cambian automáticamente según el nivel, aunque se use el mismo entorno para todas las listas. Esto demuestra que no es necesario cambiar de entorno para lograr una numeración jerárquica.

También puedes personalizar la etiqueta de cada ítem según tus necesidades. Para ello, basta con añadir un nuevo `\item` y colocar la etiqueta deseada entre corchetes. Por ejemplo, `\item[!]` mostrará un signo de exclamación como viñeta. A continuación se muestran algunos ejemplos:

- Este es mi primer punto
- Otro punto que quiero destacar
- ! ¡Un punto importante!
- Un punto fuerte y cuadrado
- ¿Una etiqueta vacía?

Por último, puedes utilizar una lista descriptiva. A diferencia de las listas con viñetas o numeradas, este tipo permite asignar una descripción personalizada a cada elemento. En el siguiente ejemplo, hay tres entradas: dos con descripción y una sin etiqueta:

Elemento 1: Este es el primer ítem con descripción.

Elemento 2: Otro ítem con una descripción diferente.

Un ítem sin una etiqueta específica.

5.7. Listados de Código

A veces puede ser útil incluir fragmentos de código fuente directamente en tu documento. Para ello, puedes usar dos entornos anidados: `\begin{listing}`, que permite añadir título y etiqueta, y `\begin{minted}`, que aplica resaltado de sintaxis.

?? muestra un ejemplo de código en lenguaje C:

El código anterior está incluido directamente en el documento. Sin embargo, también puedes importar código desde un archivo externo. Para ello, utiliza el comando `\inputminted{LENGUAJE}{ARCHIVO}` dentro del entorno `listing`. En el siguiente ejemplo, se importa código Haskell:

En algunos casos, cuando solo necesitas resaltar un comando específico, no es necesario usar `listing` ni `minted`. Puedes usar el comando `\verb` para resaltar texto en línea o `\begin{verbatim}` para bloques largos.

Listado 1: *Hola mundo en C.*

```

1  #include <stdio.h>
2  int main() {
3      printf("Hello, World!"); /* printf() imprime la cadena */
4      return 0;
5  }

```

Listado 2: *Factorial en Haskell.*

```

1  -- Factorial function
2  factorial :: Integer -> Integer
3  factorial 0 = 1  -- Base case: 0! = 1
4  factorial n = n * factorial (n - 1)  -- Recursive case
5
6  -- Main function to test the factorial
7  main :: IO ()
8  main = do
9      putStrLn "Enter a number:"
10     input <- getLine
11     let number = read input :: Integer
12     print (factorial number)

```

Ejemplo:

```

\begin{listing}[!htpb]
    \inputminted{LENGUAJE}{ARCHIVO}
    \caption{TÍTULO}
    \label{ETIQUETA}
\end{listing}

```

Si el fragmento de código es demasiado largo y ocupa varias páginas, puedes usar el entorno `\begin{longlisting}`, que divide automáticamente el contenido en varias páginas. Un ejemplo se muestra en ??.

Listado 3: *Ejemplo de funciones en Lisp.*

```

1  (defun factorial (n)
2    "Calcula el factorial de un número."
3    (if (zerop n)
4        (* n (factorial (1- n))))))
5
6  (defun fibonacci (n)
7    "Calcula el n-ésimo número de Fibonacci."
8    (cond ((zerop n) 0)
9          ((= n 1) 1)
10         (t (+ (fibonacci (1- n)) (fibonacci (- n 2))))))

```

```

11
12 (defun gcd (a b)
13   "Calcula el máximo común divisor entre a y b."
14   (if (zerop b)
15       a
16       (gcd b (mod a b))))
17
18 (defun primes-up-to (limit)
19   "Devuelve una lista de todos los números primos hasta LIMIT."
20   (let ((primes '()))
21     (loop for i from 2 to limit
22           unless (some (lambda (p) (zerop (mod i p))) primes)
23           do (push i primes))
24     (nreverse primes)))
25
26 (defun example-function (x)
27   "Función de ejemplo para demostrar capacidades en Lisp."
28   (let ((result (list (factorial x)
29                       (fibonacci x)
30                       (gcd x 10)
31                       (primes-up-to x))))
32     (format t "Factorial de ~A: ~A~%" x (factorial x))
33     (format t "Fibonacci de ~A: ~A~%" x (fibonacci x))
34     (format t "MCD de ~A y 10: ~A~%" x (gcd x 10))
35     (format t "Primos hasta ~A: ~A~%" x (primes-up-to x))
36     result))
37
38 (example-function 10)

```

5.8. Ecuaciones

Al redactar ecuaciones o expresiones matemáticas, \LaTeX es una herramienta potente y versátil. Puedes introducir fórmulas en modo en línea usando el entorno `\(FORMULA\)` o utilizar `\begin{equation}` para mostrar la ecuación en modo matemático con numeración. Si prefieres que la ecuación no tenga numeración, puedes usar el entorno `\[FORMULA\]`.

Ejemplo: En física, la equivalencia entre masa y energía se expresa mediante la ecuación $E = mc^2$, descubierta en 1905 por Albert Einstein. En unidades naturales ($c = 1$), la fórmula (??) expresa la siguiente identidad:

$$E = m.c^2 \tag{5.1}$$

Ejemplo: A continuación se muestra una ecuación —*sin numeración*— que representa una función de pérdida regularizada en aprendizaje supervisado, combinando la pérdida media de predicción sobre el conjunto de entrenamiento y un término de regularización L_2 para evitar

el sobreajuste:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell(y_i, f(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\theta})) + \lambda \|\boldsymbol{\theta}\|_2^2$$

Crear ecuaciones puede resultar complejo, por lo que recomendamos usar un editor en línea como LaTeX Equation Editor. Solo tienes que construir la fórmula, copiarla y pegarla en tu documento, ya sea en línea o en un bloque matemático.

5.9. Notas al pie

En ocasiones, puede ser útil presentar información complementaria que no forma parte del cuerpo principal del texto. En \LaTeX , esto se puede hacer fácilmente usando el comando `\footnote{TEXTO}`. El contenido aparecerá al pie de la página¹.

Si deseas insertar notas al pie dentro de una tabla, es mejor replantearlo, ya que \LaTeX no ofrece una forma sencilla de manejarlas. En su lugar, puedes colocar un asterisco “*” donde quieras que aparezca la referencia. Luego, debajo de la tabla —**pero antes de cerrar el entorno table**— coloca el texto asociado al asterisco. Así lograrás un efecto similar al de una nota al pie, pero localizada bajo la tabla y no al final de la página.

¹ Esto es una nota.



CONCLUSIONES

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Apéndice



SHOWCASING THE FIRST APPENDIX

Writing Guidance

Appendices contain supplementary material **created by the author** that enhances the reader's understanding of the dissertation while not being essential for following the primary narrative. These sections often include detailed tables, figures, complex calculations, or materials like survey questions and interview transcripts produced in the course of the research. The appendices allow readers to explore the research in greater detail, offering a deeper insight into methods and findings without interrupting the main body of work.



SHOWCASING THE SECOND APPENDIX

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Anexos



SHOWCASING THE FIRST ANNEX

Writing Guidance

Annexes are supplementary sections in a dissertation that provide additional information or external documents not essential to the main arguments but that support or complement the research. Unlike appendices, **annexes generally contain material that was not developed by the author**, such as reports, legal documents, or published datasets from external sources. This information is placed separately to keep the main content concise, allowing readers access to relevant external references without disrupting the dissertation's flow.

