



Universidad de Valladolid

**Facultad de Ciencias Económicas y
Empresariales**

Trabajo Fin de Máster

**Máster en Administración de
Empresas**

**Uso de la tecnología Blockchain en
procesos de trazabilidad de
productos alimenticios**

Presentado por:

Martínez Stanziani, Marcos Nahuel

Tutelado por:

Santos Álvarez, María Del Valle

Valladolid, 25 de julio de 2022

Uso de la tecnología Blockchain en procesos de trazabilidad de productos alimenticios

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 4 |
| Palabras clave | 4 |
| Abstract | 4 |
| Keywords..... | 5 |
| Introducción | 6 |
| Motivación – Interés personal | 11 |
| Metodología | 12 |
| Trazabilidad en la industria alimentaria..... | 12 |
| Breve historia de la trazabilidad alimentaria | 16 |
| El futuro de la trazabilidad alimentaria..... | 18 |
| Tecnología Blockchain | 19 |
| Historia de Blockchain..... | 23 |
| Tipos de redes Blockchain..... | 24 |
| Blockchain públicos..... | 25 |
| Blockchain privadas | 26 |
| Blockchain híbridos | 26 |
| Consortios..... | 27 |
| Algoritmos de consenso..... | 28 |
| Proof of Work (PoW) – Prueba de Trabajo | 29 |
| Proof of Stake (PoS) - Prueba de inversión..... | 29 |
| Delegated Proof of Stake (DPoS) – Prueba de inversión delegada | 30 |
| Proof of Authority (PoA) - Prueba de autor o prueba de autoridad | 31 |
| Proof of Elapsed Time (PoET) - Prueba de tiempo transcurrido | 31 |
| Smart contracts | 32 |
| Beneficios de Blockchain | 33 |
| Uso de Blockchain en la mejora de cadenas de suministro y trazabilidad..... | 35 |
| Blockchain en procesos de trazabilidad alimentaria | 39 |
| Casos de uso de Blockchain en trazabilidad de productos alimenticios | 42 |
| Carrefour..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Navidul | 43 |
| Olivacoin | 45 |
| Calconut..... | 46 |
| Chain4track | 47 |
| Impacto, conclusiones y comentarios finales | 47 |
| Referencias bibliográficas | 53 |
| Webgrafía..... | 62 |

Resumen

Blockchain es una de las tecnologías sobre las cuales se basa la Cuarta Revolución Industrial, etapa actual de cambios radicales y constantes en los procesos de producción y consumo y en las formas en las que las personas se relacionan. Esta tecnología es especialmente valiosa a la hora de intercambiar información en un entorno en el que intervienen numerosos actores, contando con un “libro mayor” inmutable y difícilmente manipulable sobre transacciones, modificaciones en los datos y fechas relevantes. Gracias a estas capacidades, Blockchain transformará numerosos sectores y actividades, incluyendo los procesos de trazabilidad en la industria alimentaria, cuestión especialmente importante en los últimos años debido al aumento de los requerimientos de los reguladores y al creciente interés de los consumidores por disponer de más y mejor información sobre los productos que adquieren. Además, los miembros de la cadena de producción podrán automatizar procesos y reducir riesgos, lo que eventualmente resultará en ventajas en materia de eficiencia y rentabilidad. De esta forma, se estudiarán en profundidad los cambios que implicará la adopción de Blockchain para mejorar la trazabilidad de alimentos, cuestión clave que se espera transforme el sector en los próximos años.

Palabras clave

Blockchain; trazabilidad; industria alimentaria; nuevas tecnologías; cadena de suministro; Industria 4.0; Cuarta Revolución Industrial.

Abstract

The ongoing Fourth Industrial Revolution, stage of radical and constant changes in production and consumption processes and in human relationships, is based in a series of technologies including Blockchain. This technology is especially valuable when it comes to exchanging information when numerous participants intervene, providing an immutable tamper-proof time-stamped “ledger” of transactions and changes in data. These capabilities allow Blockchain to transform many sectors and activities, including traceability processes in the food industry, a relevant area of interest in recent years due to the increase in regulatory requirements and the growing concern of consumers in having more and better information about the products they buy. In addition, members of the production chain will be able to automate processes and reduce risks, which eventually will result in efficiency and profitability gains. In this way, the changes caused by the adoption of Blockchain to improve food traceability will be studied in depth, a key issue that is expected to transform the sector in the coming years.

Keywords

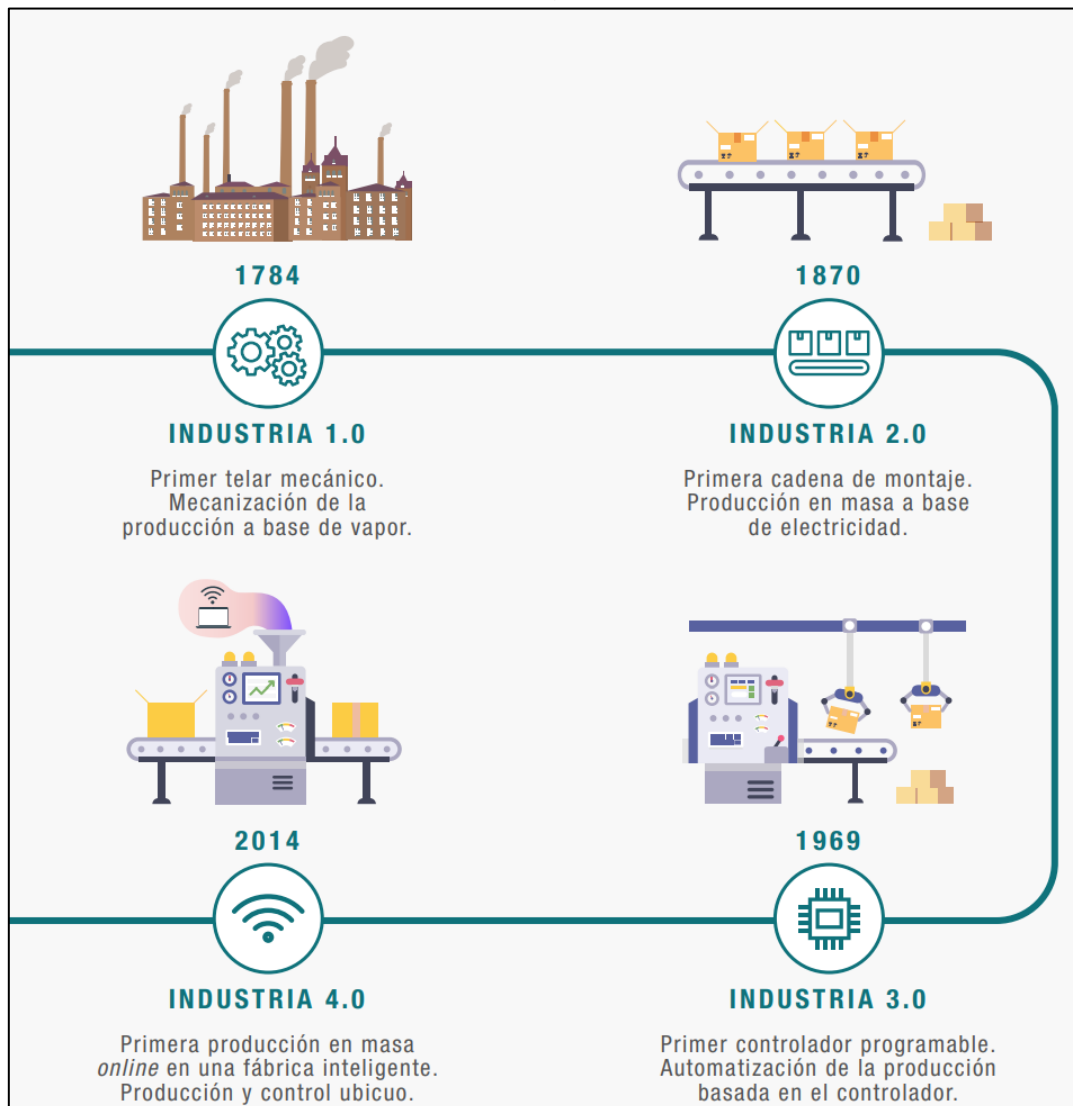
Blockchain; traceability; food industry; new technologies; supply chain; Industry 4.0; Fourth Industrial Revolution.

Introducción

En la actualidad el mundo se encuentra transitando hacia una época de cambios en los sistemas, métodos y relaciones de producción y consumo debido al surgimiento de la Cuarta Revolución Industrial, también llamada Industria 4.0. Este proceso fue bautizado así en 2016 por Klaus Schwab, economista alemán quien es fundador y presidente ejecutivo del Foro Económico Mundial. Schwab explica que en la Cuarta Revolución Industrial los sistemas de fabricación virtuales y físicos trabajan en conjunto de una forma global y flexible, teniendo un amplio alcance gracias a la fusión de tecnologías y la interacción de distintos dominios. La clave en esta etapa, entonces, no está en los desarrollos y en las tecnologías en sí, si no en la aplicación conjunta de esos desarrollos y en el cambio de paradigma que esto significa (Perasso, 2016; Iberdrola, s.f. a).

De acuerdo a Iberdrola (s.f. a), las tres Revoluciones Industriales previas habían cambiado el mundo: la Primera con la aplicación del vapor a la producción mecánica, la Segunda con la producción masiva posibilitada por la electricidad y la Tercera con la programación informática. Luego, en la segunda década del siglo XXI surgen nuevas tecnologías digitales y fábricas inteligentes, lo que posibilita modificaciones en las formas de vivir, trabajar y relacionarse a una escala sin precedentes. Según Perasso (2016), los cambios de la Cuarta Revolución Industrial no son una continuación de aquellos posibilitados por la Tercera Revolución debido a la velocidad, alcance e impacto de las recientes transformaciones en los sistemas.

Figura 1
Las Revoluciones Industriales a lo largo de la historia



Fuente: Iberdrola, s.f. a

La Industria 4.0 supondrá cambios en la forma de trabajar para los líderes de empresas e industrias, quienes necesitarán comprender cómo aprovechar el acceso en tiempo real a los datos y la inteligencia de negocio, integrar información desde diferentes fuentes y establecer relaciones entre sistemas físicos y digitales para ser competitivos y no perder cuota de mercado. Esta etapa de cambios tendrá impactos en múltiples niveles: ecosistemas (relaciones con proveedores, clientes, reguladores y otras partes interesadas), a nivel organizacional (las organizaciones se ajustarán, aprenderán y tomarán mejores decisiones gracias al uso de datos) e individuales (cambiando los trabajos realizados y pudiendo ahora consumir artículos personalizados) (Deloitte, s.f. a). Se entiende que los directivos de distintas empresas están asimilando los impactos de la Cuarta Revolución Industrial en línea con la relevancia esperada de los mismos. En una encuesta realizada por Deloitte a 1.603 ejecutivos

globales en la segunda mitad de 2017, el 86% de ellos mencionaron que están haciendo todo lo que pueden para crear una fuerza de trabajo para la Industria 4.0 (Deloitte Insights, 2018).

Por más que esta etapa de cambios cuente con sus propios riesgos y desventajas (como la escasez de talento en nuevas tecnologías presente en algunos países, la velocidad de las transformaciones y el potencial incremento de las desigualdades sociales), ventajas como aumentos en la productividad, una mayor seguridad en los procesos productivos, la posibilidad de gestionar más eficientemente los datos y tomar mejores decisiones se emplazan como oportunidades únicas para el desarrollo de empresas e industrias (APD, 2021).

En cuanto a la gestión de las cadenas de suministro, Digitales (2020) menciona que éstas deben afrontar nuevos desafíos estratégicos, tácticos y operativos en un entorno altamente cambiante; desafíos que pueden bien transformarse en oportunidades para que empresas desarrollen nuevos procesos y modelos de negocio en el área logística gracias a la implementación de las nuevas tecnologías relacionadas con la revolución digital. Más aún, a las enumeradas ventajas de la Industria 4.0 hay que agregar que ésta es capaz de ofrecer mejoras en la trazabilidad, adelantos que son posibles ya que “las tecnologías de conectividad y el análisis de datos permiten reforzar la trazabilidad de procesos de todo tipo, desde acciones internas del día a día hasta cadenas globales de suministro” (WTW, 2022).

Barleta, Pérez y Sánchez (2020) mencionan que la logística 4.0 (logística que brinda servicios a la Industria 4.0) presenta una alta capacidad de optimizar tiempos y recursos, de ofrecer trazabilidad de la cadena, seguridad e integración de los datos e interoperabilidad entre participantes humanos y digitales. El ecosistema digital en el cual se desarrolla esta logística es un ámbito que promueve la innovación, el surgimiento de nuevos servicios y modelos de negocio que posibilitan un comercio sostenible social y ambientalmente. En este contexto se alcanza una gestión en tiempo real de los flujos de carga y un mejor uso de recursos (infraestructuras, trabajadores y activos tecnológicos) gracias a la cooperación entre distintos miembros de la cadena de suministro y a una mejorada visibilidad y trazabilidad de la cadena logística.

Tecnologías como el Blockchain, el internet de las cosas (*Internet of Things* - IoT), la Realidad Aumentada y la Inteligencia Artificial generarán cambios en el sector de la logística y en el transporte internacional durante los próximos años, ofreciendo oportunidades para aquellos que logren implementar y aprovechar estas herramientas (Barleta et al., 2020). Particularmente Blockchain, siendo ésta una de las tecnologías más importantes de la Cuarta Revolución Industrial, al ofrecer la posibilidad de gestionar vastas cantidades de datos de forma más amigable, confiable y eficiente puede constituirse como una herramienta valiosa en diversos ámbitos (Olea y Vega, 2018). Con Blockchain, los procesos logísticos pueden mejorar debido a que la tecnología contribuirá a enfrentar problemas de las cadenas de suministro, posibilitando ahorros en tiempo y dinero (por no necesitar intermediarios a la hora de realizar una

transacción), reducciones del riesgo empresarial (limitándose el fraude y facilitando la mejor toma de decisiones), aumentos en la confianza y transparencia entre agentes (contando con procesos compartidos y mecanismos de consenso) y la obtención de una trazabilidad completa de la cadena de valor de los bienes (Digitales, 2020).

Especialmente valiosas serán las oportunidades ofrecidas por Blockchain para la industria alimentaria, sector en el cual los reguladores están aumentando los requerimientos de seguimiento de productos para mejorar su seguridad y evitar brotes de enfermedades. La tecnología posibilitará realizar un seguimiento digital de los de los productos alimentarios en las distintas fases de la cadena de valor hasta que lleguen a la mesa de los consumidores, mostrando información confiable sobre el origen, la identificación del lote, la fabricación, procesamiento y fechas de caducidad, entre otros (Digitales, 2020). Esto cambiará la forma en la que se transmiten los datos en la cadena de suministro de alimentos, pasando de información aislada y opaca, almacenada en papel o en bases de datos internas y centralizadas, a un sistema abierto y transparente. Con Blockchain, tecnología que almacena a la nueva información uniéndola con los datos pasados con métodos criptográficos que previenen manipulaciones, se aportará transparencia y mejorará la trazabilidad de alimentos y procedimientos (Hernández San Juan, 2019).

Para visualizar el impacto esperado que tendrá Blockchain en España y en el mundo son valiosos los aportes realizados por el informe “*Time for Trust*” de la consultora PwC. Esta compañía explora el valor que la tecnología puede añadir a la economía anualmente hasta el año 2030, distinguiendo cuánto aportará cada una de las 5 funcionalidades enumeradas: “identidad y credenciales”, “procedencia y trazabilidad”, “titularización y pagos”, “umbrales y disputas” y “lealtad y recompensas”. La consultora estima que, en total, Blockchain añadirá 1756,5 mil millones de dólares a la economía mundial en el año 2030¹, de los cuales más de la mitad (961,6 mil millones) serán gracias a sus funciones en materia de procedencia y trazabilidad. Para España, se estima que en 2023 Blockchain aporte 3,5 mil millones de dólares a la economía y 24,3 mil millones de dólares en 2030. Como ocurre con el resto del mundo, de las anteriores cifras para España, la mayor parte corresponderá a aplicaciones de Blockchain a funciones de procedencia y trazabilidad: 2 mil millones de dólares en 2023 y 14,3 mil millones en 2030 (PwC, s.f. a). En cuanto a la implementación actual de la tecnología, CincoDías (2021) hace referencia a un informe de la consultora IDC en el que se estima que la penetración actual de Blockchain en empresas españolas de más de 50 empleados es del 11%, indicador que aumenta a un 24% si se toman en cuenta proyectos piloto o previsiones que hagan uso de la herramienta.

En un informe de AMETIC (2019), la Asociación Multisectorial de Empresas de Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Electrónica, se

¹ Las cifras corresponden al PIB en dólares a precios del 2019.

plantea que en España el sector financiero se emplaza como el ámbito que liderará el volumen de inversión en Blockchain hasta 2023, aunque el sector industrial es aquel en el que las inversiones experimentarán un mayor crecimiento. De todas formas, se advierte que aún queda camino por recorrer y que es necesario construir un plan de habilitación de Blockchain para que distintas organizaciones puedan conocer las virtudes de la tecnología. Así, se recomienda comunicar al sector empresarial las medidas a tomar de acuerdo a sus necesidades para acelerar la puesta en marcha de esta herramienta, a la vez que se avance por dotar a la tecnología de mayor sencillez y transparencia y que desde la Administración Pública española se desarrolle un marco legal apropiado.

Específicamente en relación la industria alimentaria, Deloitte. (s.f. b) sostiene que la tecnología Blockchain es una de las herramientas para impulsar la digitalización y la trazabilidad de las cadenas de suministro del sector, cuestiones claves que permitirán hacer frente a los desafíos relacionados con mejorar y repensar estas cadenas y los procesos logísticos alimentarios. Además, la consultora destaca a los Fondos Next Generation EU (instrumento europeo temporal de recuperación que apunta a reparar los daños económicos y sociales causados por el coronavirus) como una “oportunidad única” en este proceso, ya que éstos pueden posibilitar avances en la implantación de Blockchain y constituirse como un impulso económico y social del medio rural español.

Estas posibilidades se tornan especialmente relevantes a la hora de considerar que en España los consumidores están cada vez más interesados en una adecuada nutrición y el cuidado del medioambiente, siendo que el 70% de ellos consulta las etiquetas de información de los alimentos que compran. Además, el 65% de los consumidores desea adquirir productos alimentarios producidos de forma ética y el 59% opina que Blockchain es una herramienta que permite confiar en la información a la hora de analizar los datos relevantes de un producto (MAPFRE, 2020).

Es de interés entonces estudiar el verdadero impacto, alcance y los beneficios más relevantes que ofrece la tecnología Blockchain para mejorar los procesos logísticos y la trazabilidad en la industria alimentaria. Cabe la posibilidad de que nuevos modelos de negocio, nuevas ventajas competitivas y nuevas empresas líderes basen su éxito el sector alimentario gracias a correcta implementación de la tecnología de la cadena de bloques. Asimismo, es de interés estudiar casos de compañías que estén haciendo uso de Blockchain en la actualidad para mejorar sus procesos de trazabilidad en la industria y evaluar qué tan favorable son los impactos para el consumidor final.

Motivación – Interés personal

El evidenciar cómo las nuevas tecnologías mejoran los procesos, cambian las formas de trabajar, de consumir, de pasar nuestro tiempo libre y de comunicarnos siempre me ha resultado curioso y atrayente. Considero que estos procesos son cada vez más frecuentes y radicales, surgiendo innovaciones disruptivas en distintos ámbitos a un ritmo siempre creciente, impulsados por la Cuarta Revolución Industrial y la automatización de procesos que ésta implica.

Dentro de las tecnologías sobre las cuales se sustenta esta etapa de cambios tecnológicos, Blockchain particularmente me resulta de interés por posicionarse como una herramienta versátil que posibilitará expandir los alcances inicialmente posibilitados por otras tecnologías. Gracias a las cadenas de bloques se podrán probar identidades de forma fiel (de personas, bienes físicos y bienes digitales), realizar transacciones de forma segura, abrir nuevos mercados de bienes (gracias a la *tokenización* de activos), conectar consumidores que realicen negocios sin riesgo por más que estén ubicados en distintos lugares del mundo, automatizar procesos para que sean realizados sin posibilidad de manipulación e implementar mejoras en innumerables sectores, logrando que empresas realicen sus actividades de forma más rápida, confiable y eficiente.

En cuanto a la trazabilidad alimentaria, mi interés en la temática despertó por haber tenido la posibilidad de conocer las instalaciones de la empresa harinera Emilio Esteban junto con mis compañeros del máster. La moderna y automatizada fábrica de la empresa se encuentra ubicada a las afueras de la ciudad de Valladolid. En la visita realizada, la dirigencia y los operarios que trabajan en Emilio Esteban comentaron la importancia de un buen sistema de trazabilidad para sus operaciones, cuestión de especial relevancia al considerar que la mayor parte de la harina producida es luego destinada a la elaboración de alimentos para niños pequeños y bebés.

Es sabido que la industria alimentaria es uno de los sectores líderes en cuanto a la aplicación de Blockchain a sus actividades. En una investigación de la consultora ARC Advisory Group se estudian 37 consorcios industriales de Blockchain con la finalidad de analizar estas pruebas piloto y mejorar la visibilidad de las cadenas de suministro, automatizar procesos de compartir información y aumentar las ganancias por venta de productos basados en la confianza: de estos 37 consorcios, 10 pertenecen a la industria alimentaria, fenómeno que pareciera estar justificado por la particular complejidad de sus cadenas de suministro (ARC Advisory Group, 2020; Macsa, 2022).

Por el mencionado interés personal y por las conocidas aplicaciones de Blockchain a la trazabilidad alimentaria surgieron los cuestionamientos que luego servirían como motivación para investigar sobre la temática y escribir el presente trabajo de grado: ¿en qué medida la tecnología Blockchain se está usando para procesos de trazabilidad?, ¿qué tanto es implementada por empresas que se

dedican al sector alimenticio?, ¿qué impacto está teniendo?, ¿qué problemas resuelve?, ¿beneficia también a los consumidores finales?, ¿se prevé que sus niveles de adopción en el sector crezcan?

Metodología

Con la finalidad de estudiar el alcance, impacto, beneficios y desafíos de una correcta implementación de la tecnología Blockchain para mejorar la trazabilidad en la industria alimentaria, se comenzará investigando la naturaleza de estos procesos en el sector de los alimentos. Será fundamental contar con un marco teórico que defina clara y correctamente qué es la trazabilidad, por qué es importante en esta industria, cómo se realiza y las particularidades del sector. Además, se brindará información sobre la historia de la trazabilidad alimentaria y se delimitarán perspectivas a futuro.

A continuación, se explicará cómo funciona Blockchain, de forma tal que la herramienta pueda ser entendida por lectores no expertos en programación y nuevas tecnologías. Asimismo, se investigará sobre su nacimiento, los tipos de redes que existen, los distintos métodos de consenso de los miembros de la red y las funcionalidades extra que puede ofrecer Blockchain gracias a la implementación de contratos inteligentes.

Luego, se estudiarán los aportes que puede hacer Blockchain para mejorar las cadenas de suministro y los procesos de trazabilidad, haciendo especial énfasis en sus aplicaciones en procesos de trazabilidad alimentaria; para luego exponer 5 casos de uso de la tecnología en empresas y proyectos reales dentro de la industria.

Finalmente, el trabajo culminará analizando el impacto de la tecnología, esbozando conclusiones acerca de la relevancia y perspectivas a futuro de ésta en procesos de trazabilidad alimentaria y realizando algunos comentarios finales.

Trazabilidad en la industria alimentaria

De acuerdo al Reglamento (CE) nº 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, en el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria y se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, el concepto de trazabilidad aplicado a la industria alimentaria se define como:

La posibilidad de encontrar y seguir el rastro, a través de todas las etapas de producción, transformación y distribución, de un alimento, un pienso, un animal destinado a la producción de alimentos o una sustancia destinados a ser incorporados en alimentos o piensos o con probabilidad de serlo (Reglamento (CE) nº 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2002).

Luego, se entiende que el objetivo primero del desarrollo de sistemas de trazabilidad en la industria alimenticia sea incrementar los niveles de seguridad de los productos que pasan por la cadena, detectando materias primas o productos terminados hacia ambos sentidos de la cadena, independientemente del momento y del lugar (Ene, 2013).

El proceso de trazabilidad, entonces, debe ser implementado para mejorar la transparencia y la seguridad de los productos a ser comercializados y sirve con fines informativos tanto a la ciudadanía, a las empresas y a la administración. Gracias a contar con buenos sistemas de trazabilidad, los ciudadanos pueden elegir de forma más informada los productos que consumirán, lo cual brinda mayores niveles de confianza a la hora de efectuar la compra. Las empresas agroalimentarias, por su parte, se ven posibilitadas de garantizar mayores niveles de seguridad alimentaria de los bienes que llevan al mercado, logran disponer de mejor información con la cual llevar adelante sus controles, cuentan con apoyo logístico para localizar y retirar productos defectuosos, se ven habilitadas a tomar mejores decisiones de destino de lotes y pueden atender mejor posibles reclamos de sus clientes. Por último, la administración logra asegurarse de que los alimentos comercializados no sean riesgosos para la salud de los consumidores y ve facilitados los controles que debe llevar adelante en distintos puntos de la cadena alimentaria, logrando que se optimice el uso de los recursos públicos (Cañizares Sevilla et al., 2013; Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición, 2009).

Según la Food Standards Agency, departamento del gobierno del Reino Unido responsable de proteger la salud pública en relación con los alimentos en Inglaterra, Gales e Irlanda del Norte, existen tres características básicas propias de los sistemas de trazabilidad. Estas son: la identificación de unidades/lotés de todos los ingredientes y productos, la información sobre cuándo y dónde se mueven o transforman y un sistema que vincule estos datos (Food Standards Agency, 2002).

Como explica Elika (2019), la Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, el seguimiento y la capacidad de reconstrucción de cada uno de los pasos atravesados por los productos comercializados por parte de empresas alimentarias debe ser realizado en tres niveles: hacia atrás, de forma interna y hacia adelante. Gracias a la trazabilidad hacia atrás es posible saber qué productos entran en la empresa, sus especificaciones, su formato, su volumen, los lotes, sus cantidades, quiénes son sus proveedores, la fecha de recepción y el destino de los bienes. Por otro lado, la trazabilidad interna tiene en cuenta los movimientos de los productos una vez que éstos han ingresado en la empresa, registrando los subproductos utilizados para producir un bien intermedio o un bien final, detallando los trabajos y actividades a las cuales se someten los productos (incluyendo fecha y hora de cada una de ellas), registrando a los lotes de productos finales y datos de control elaborados en distintos puntos del proceso de producción. Por último, el proceso de trazabilidad hacia adelante recaba información sobre los productos finalizados listos para ser

enviados al consumidor y del cliente a quien será despachado, incluyendo datos sobre la empresa y persona a quien se hará la entrega, datos del transporte y fecha y horas relevantes.

Específicamente sobre trazabilidad de productos alimentarios, existen ciertos factores que dificultan la identificación y el rastreo de alimentos en comparación con otros tipos de productos. McEntire (2019) destaca 5 factores determinantes:

- El hecho de que el mercado de alimentos sea global significa que un producto que se exporte va a verse sometido a distintas regulaciones acerca de la información que debe tener asociada, la forma en la que ésta debe presentarse y las tecnologías en la que se basará el proceso de trazabilidad.
- Los productos alimenticios generalmente están compuestos de distintos ingredientes, cada uno de los cuales puede haber pasado por un número de intermediarios antes de acabar formando parte del alimento final. Esta multiplicidad de miembros de la cadena de producción hace que la cantidad de información que debe ser recabada y transmitida se incremente, haciendo que la misma sea más difícil de manejar.
- La industria alimentaria es un sector con pocas barreras de entrada, lo que da como resultado que muchos agentes que basan su negocio en este tipo de productos no cuenten con el nivel de información y conocimiento que deberían acerca de los reglamentos y estándares existentes.
- El volumen de alimentos producidos, comercializados y consumidos anualmente es enorme, lo que incrementa exponencialmente la cantidad de información que maneja la industria alimentaria en comparación con otros sectores.
- Los productos individuales en la industria alimentaria generalmente tienen un bajo margen del beneficio. Esto hace que los miembros de la cadena tengan mayores reticencias a la hora de innovar e invertir en la implementación de avances tecnológicos.

De todas formas, contar con buenos procesos de trazabilidad en la industria alimenticia es necesario ya que posibilita beneficios tanto para los consumidores como para los empresarios que se dedican a producir, empaquetar, transportar y realizar otras actividades dentro de la cadena de producción de alimentos. Mientras que la seguridad alimentaria aparece como la ventaja más rápidamente reconocible de contar con una buena trazabilidad en el sector, es necesario explorar factores positivos adicionales para motivar un mejor mantenimiento de registros e información por parte de empresas (McEntire, 2019)

En cuanto a la seguridad alimentaria, Guzewich y Miller (2019) aseguran que la trazabilidad está ligada a la protección de la salud pública: debido a que es esperable que ocurran brotes de enfermedades transmitidos mediante el

consumo de alimentos adulterados, es importante poder valerse de sistemas fiables que permitan identificar de forma rápida los productos riesgosos para que los mismos puedan ser eliminados del sistema de distribución y evitar que se propaguen peligros sanitarios. En este sentido, los reguladores deben someterse al *trade-off* entre ofrecer alta rapidez y alta certeza. Esto es, el deber legal y ético de actuar con urgencia a la hora de identificar y retirar del mercado a los alimentos contaminados choca con los perjuicios económicos (en dinero y reputación) que podrían generársele a una empresa y a sus empleados en el caso de prohibir la venta de sus bienes cuando éstos en realidad no hayan sido los causantes del problema sanitario de los consumidores. Más aún, cometer errores de diagnóstico puede minar la credibilidad de los consumidores y de la industria, factor que clave en el sustento de futuras investigaciones. Para aliviar esta disyuntiva entre rapidez y certeza en los controles del regulador, es necesario que las tecnologías, la regulación y la innovación se complementen y logren establecer mejores procesos de trazabilidad en la industria alimenticia. Solo así los reguladores podrán tomar rápidamente medidas efectivas para evitar que productos afectados sean consumidos, identificar las fuentes del brote sanitario y evitar que ocurran incidentes similares en el futuro. Con un mejor sistema de recopilación y mantenimiento de información por parte de la industria será posible acceder más fácilmente a los datos relevantes, analizarlos con mayor rapidez y limitar la cantidad de enfermedades sufridas por los consumidores en el caso de presencia de productos perjudiciales.

Por otro lado, Southall (2019) explica que la visibilidad de la cadena de suministro se obtiene mediante la combinación de procesos internos y externos de trazabilidad. Esto requiere de la colaboración entre distintos socios comerciales y se basa en la identificación única de productos y el intercambio de datos de acuerdo a estándares comunes. Esta visibilidad de la cadena de suministro sirve para mejorar procesos comerciales, brindando incentivos y nuevas oportunidades de las que las empresas pueden aprovecharse en el caso de que cuenten con buenos procesos de trazabilidad integrados.

La autora además señala que las compañías que lleven adelante dichas prácticas podrán aprovecharse de eficiencias operativas en la gestión de inventarios, en los procesos de compra y en el cumplimiento de pedidos efectuados por parte de clientes, una mejor reputación de marca y una incrementada confianza del consumidor. Así, las eficiencias posibles podrán verse materializadas en ahorros de mano de obra, mejor disponibilidad de producto, reducción del impacto económico de las emergencias relacionadas con la seguridad alimentaria (detectando mejor cuáles son los productos afectados y aislándolos más rápidamente, lo que eventualmente significará una menor pérdida de confianza del consumidor), mejor información que permita despachar primero los productos entrados anteriormente a los almacenes (sistema FIFO), automatización de rebajas en productos que estén próximos a vencer para estimular su demanda, posibilidad de gestionar categorías de productos para evaluar qué marcas venden mejor, etc. Finalmente, estos

beneficios deberán tenerse en cuenta a la hora de evaluar programas e iniciativas que perfeccionen los procesos de trazabilidad de los productos comercializados por empresas alimentarias ya que las eficiencias y las mejoras en procesos mencionados impulsarán el ROI de alternativas de inversión que tiendan a mejorar la visibilidad de la cadena de suministro (Southall, 2019).

Breve historia de la trazabilidad alimentaria

Ya desde la antigüedad los alimentos debían demostrar su procedencia para probar la seguridad de la mercancía. En esa época, distintas sociedades implementaron herramientas para identificar objetos y poder visualizar información fácilmente sobre los mismos. Estas incluían realizar marcas a fuego, etiquetado con tinta especial, procesos de lacrado, etc. Con el paso del tiempo la variedad de productos comercializados aumentó, lo que gradualmente significó que se requirieran mejoras en el proceso de rastreo y seguimiento de los bienes (De Luca, 2008).

Montet y Dey (2018) postulan que el primer documento en el que queda plasmado un trabajo de trazabilidad es *Historia Anglicana*, libro escrito en 1275 por Thomas Walsingham: en éste se realiza una investigación acerca del origen de una epizootia (enfermedad animal que equivale a la epidemia en el ser humano) en Europa, concluyendo que una oveja infectada por viruela ovina y por sarna había sido el origen de la enfermedad. Los autores, además, mencionan que alarmas alimentarias y adulteraciones en alimentos han sido informados desde la Edad Media. Ellos realizan un resumen de los casos más significativos en los que alimentos con peligros sanitarios han sido consumidos causando enfermedades y muertes en distintos países del mundo, resaltando 20 episodios ocurridos entre 1857 y 2000, otros 20 que han sucedido entre 2001 y 2010 y 12 incidentes llevados a cabo entre 2011 y 2016. La creciente ocurrencia de crisis alimentarias es explicada en parte por el incremento de la distancia que recorre cada producto debido a la cada vez más extendida globalización. Esto marca la necesidad de implementar buenos procesos de trazabilidad que mejoren los niveles de seguridad de los productos a consumir. Además, cambios en la industria alimentaria, en la cual los consumidores demandan bienes seguros, motivaron la obligatoriedad de establecimiento de procesos de trazabilidad para minimizar los riesgos.

Como fue mencionado, el seguimiento de productos en general y de alimentos en particular es una actividad que se viene realizando desde la antigüedad, aunque el término “trazabilidad” adquiere importancia en 1996 luego de la crisis de las vacas locas en Europa. Este episodio generó un importante revuelo en la sociedad civil, política y judicial, constituyendo un suceso global, causando una pérdida de confianza en el mundo científico y político y resultando en una disminución significativa en el consumo de carne de res (Montet y Dey, 2018).

En 1998 el Consorcio Británico de Minoristas (*British Retail Consortium – BRC*), publicó la primera edición de su Norma Mundial de Seguridad Alimentaria, documento destinado a contribuir a que miembros de la cadena alimentaria pudiesen cumplir con la normativa nacional y europea. La norma, la cual ha sido actualizada en varias ocasiones, cubre temas como compromiso dirigenial y mejora continua, el plan de seguridad alimentaria, el sistema de seguridad y calidad alimentaria, estándares del establecimiento, el control del producto, el control del proceso y personal. A lo largo del tiempo, este estándar se ha convertido en un reconocido marco de referencia internacional acerca de buenas prácticas sobre seguridad alimentaria, calidad y responsabilidad (Pavlović, 2017). Respecto a la trazabilidad, British Retail Consortium (2018) menciona en su última edición de la Norma Mundial de Seguridad Alimentaria que “el establecimiento deberá poder trazar todos los lotes de materias primas (...) desde su origen en los proveedores hasta su destino en los clientes, pasando por todas las etapas de procesado y envío, y viceversa” (p.24). Además, requiere que el sistema de trazabilidad implementado se someta a pruebas periódicas (como mínimo una vez al año) para verificar su correcto funcionamiento y que este proceso debe poder determinarse en un plazo máximo de 4 horas.

A comienzos del nuevo siglo, en un contexto caracterizado por la ocurrencia de accidentes sanitarios (además del episodio de las vacas locas puede mencionarse la aparición de dioxinas en aves), la Comisión Europea llevó adelante un proceso para mejorar los niveles de seguridad de los alimentos dentro del territorio de la Unión. Así, en el año 2000 se presentó el Libro Blanco sobre la Seguridad Alimentaria, en donde se estableció un marco común para la seguridad de alimentos que integrara a toda la cadena, todos los sectores de la alimentación y a todos los Estados Miembros de la Unión (Cañizares Sevilla et al., 2013). En este documento se presentaron más de 80 acciones que debían encaminar la política sobre seguridad alimentaria en Europa en los años siguientes, junto con reformas necesarias que debían ser acometidas para mejorar los niveles de fiabilidad en los alimentos. Luego, el anteriormente mencionado Reglamento (CE) n° 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo se derivó del Plan de acción del Libro Blanco, estableciendo los principios y requisitos generales de la legislación en materia de alimentos (Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición, s.f.).

En 2001 surge la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN), organismo autónomo del Gobierno de España. Esta agencia tiene objetivos similares a la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (AESA), creada por el Reglamento (CE) n° 178/2002. Luego, en 2002, buscando incrementar los niveles de seguridad de los alimentos en Europa y para reforzar el poder de decisión de los consumidores, se crea una única Dirección General de Sanidad y Protección de los Consumidores (Cañizares Sevilla et al., 2013).

En 2007 se publicaría la normativa ISO 22005:2007, la cual brinda requisitos para el diseño y la puesta en marcha de procedimientos de trazabilidad para empresas pertenecientes a la cadena alimenticia, siendo la misma flexible

para que las distintas organizaciones alimentarias logren alcanzar sus objetivos particulares. La norma apunta a aquellas organizaciones que formen parte del mencionado sector y que pretendan una gestión integrada y coherente de la trazabilidad, superior a los niveles exigidos por ley (AENOR, s.f.).

Posteriormente, en España entraría en vigor la Ley 28/2015, de 30 de julio, para la defensa de la calidad alimentaria; normativa en la cual se reconoce la importancia del sector alimentario para el país y para toda Europa por sus impactos sociales, económicos y medioambientales. Además, en esta ley se establece que los operadores de la cadena alimentaria deben establecer un sistema de autocontrol de las operaciones de las cuales son responsables. Este sistema de autocontrol debe incluir procedimientos documentales, un plan de muestreo y análisis y un procedimiento de trazabilidad. Además, los operadores deben comunicar a las autoridades competentes toda la información relacionada con el sistema de autocontrol y trazabilidad y los datos que éste produzca. En la mencionada ley se incluyen entre las infracciones graves el no llevar un sistema de autocontrol y de trazabilidad interna cuando sea obligatorio hacerlo y no disponer de sistemas y procedimientos de trazabilidad suficientes y actualizados (Ley 28/2015, de 30 de julio, para la defensa de la calidad alimentaria).

El futuro de la trazabilidad alimentaria

La actual tendencia de hacer cada vez más responsables a las empresas por los productos alimenticios que pasan por sus instalaciones crea oportunidades para desarrollar soluciones mejores en cuanto a sistemas de seguridad alimentaria. Estas soluciones permitirían seguir un producto de principio a fin a lo largo de la cadena, visibilizar a la misma en tiempo real y que las empresas participantes sean más resilientes, obteniendo una mayor rentabilidad, reputación y lealtad de sus consumidores (Unnikrishnan et al., 2021).

De acuerdo a McEntire (2019), existen ciertos factores que contribuirán a que los sistemas de trazabilidad con los que cuentan los productos alimentarios sean cada vez más desarrollados:

- Las mejoras tecnológicas y de infraestructura, que posibilitarán contar con mejores sistemas de trazabilidad.
- El interés creciente de los consumidores en la comida que consumen y el hecho de que la mejorada trazabilidad esté siendo usada en ciertos sectores como una ventaja comparativa.
- El hecho de que el consumo de alimentos de una población mundial cada vez más numerosa necesitará de una producción de alimentos más eficientes, la cual será posible gracias sistemas de trazabilidad que permitan identificar oportunidades de mejora.

- La regulaciones nacionales e internacionales que obligarán a los productores de alimentos a implementar mejoras en sus procesos de trazabilidad.

De todas formas, es fundamental que la industria pueda actuar de forma conjunta para aportar soluciones. Si eso no ocurre, los altos costos de los requerimientos de trazabilidad pueden recaer más fuertemente en los miembros del sector alimentario a los que más les costaría afrontarlos: pequeños productores, consumidores de bajos ingresos y la sociedad en general. Para evitarlo, entonces, la industria tiene que trabajar de forma unida, así sea con iniciativas lideradas por grandes compañías, por coaliciones amplias con participación de miembros diversos del sector o por distintos grupos, siempre y cuando las soluciones de unos puedan comunicarse con las de otros. Además, la industria deberá trabajar con los reguladores para implementar normativas que sean útiles para disminuir los riesgos e incrementar el valor para todos los miembros de la cadena (Unnikrishnan et al., 2021).

En este proceso, las nuevas tecnologías que ya están disponibles se constituyen como herramientas que pueden posibilitar mejoras y el desarrollo de sistemas de trazabilidad más eficientes, eficaces y seguros, a la vez que se reducen los desechos y el impacto ambiental causado por la cadena alimentaria. Por ejemplo, la trazabilidad digital, proceso que permite seguir un producto a lo largo de la cadena y en distintas direcciones gracias al soporte de sistemas digitales, reduce los errores humanos y produce beneficios para consumidores, minoristas, empresas manufactureras, distribuidores y productores primarios gracias a aliviar algunos de los riesgos más urgentes que soporta el sector (Lawson, 2021; Eitfood, 2021).

Así, las tecnologías de la Industria 4.0 tienen el potencial para cambiar el sistema alimentario que existe actualmente, mejorando muchos de sus componentes entre los cuales se encuentra la trazabilidad. Las tecnologías particulares que contribuirán a crear mejores sistemas incluyen el Blockchain, los sensores tecnológicos, la robótica, equipos de visión, chips RFID en etiquetas inteligentes, sistemas inteligentes e interconectados y el Big Data (World Economic Forum, 2019; Keene, 2021; Altertecnia, s.f.).

Tecnología Blockchain

Probablemente, la forma más fácil en la cual un desconocido en la materia puede empezar a aventurarse en el mundo de Blockchain es pensando en esta tecnología como un gran libro mayor compartido entre diferentes partes. De hecho, IBM (s.f. a) define al Blockchain como “un libro mayor compartido e inmutable para registrar transacciones, rastrear activos y generar confianza”. La empresa explica que los activos que pueden ser rastreados mediante esta tecnología deben ser entendidos en sentido amplio, ya que es posible seguir prácticamente cualquier cosa de valor, recursos tanto tangibles como

intangibles. BBVA Research (2015) menciona que “blockchain es una base de datos con información horaria estampada e inmutable de cada transacción que se replica en servidores de todo el mundo”; mientras que, de acuerdo a 99Bitcoins (2019), canal de Youtube informativo sobre criptomonedas y su entorno, “la tecnología Blockchain es una solución para el problema de la centralización, un sistema para en el que todos mantienen los registros (...), una forma descentralizada de mantener un libro mayor que es prácticamente imposible de falsificar”.

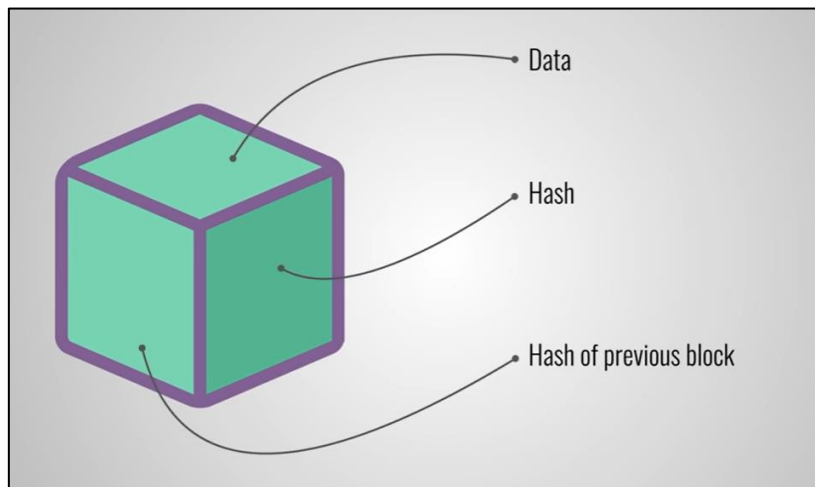
Debido a la vital importancia que tiene la información en el desarrollo de negocios, es clave que la misma se pueda obtener de forma rápida y exacta. Blockchain es una herramienta fundamental en ese proceso ya que brinda a las personas y empresas que lo utilizan la posibilidad de acceder a datos de forma inmediata. Esos datos son compartidos y transparentes, y se almacenan en un registro al cual solamente pueden acceder miembros autorizados. Todo esto hace que la fuente de información sea fidedigna y que permita rastrear todos los movimientos que ha ido realizando cierto activo (IBM, s.f. a).

De acuerdo con IBM (s.f. a), las transacciones producidas que apuntan al movimiento de un activo son registradas en un bloque de datos, el cual permite ingresar información acerca de quién realizó la transacción, el activo que fue traspasado, el momento, el lugar, la cantidad, la condición y otros datos a elección. Así, cada bloque contiene información de tres tipos: datos sobre transacciones, su hash y el hash del bloque inmediatamente anterior (Simply Explained, 2017a).

- El hash de los bloques es comparable a su huella digital, ya que éste es un código que identifica a cada bloque y a su contenido de forma única. El hash se calcula una vez que cada bloque se crea, de forma que cambiar parte del contenido que se encuentra dentro del bloque hará que el propio hash se modifique. Así, este código es de mucha utilidad cuando se quieren detectar si se han realizado o no cambios en los datos que contiene cada bloque.
- El hecho de que cada bloque contenga el hash del bloque anterior crea la cadena de bloques, aportándole seguridad a la tecnología: si se manipula la información del bloque número N, su hash cambiará, lo que hará que el bloque N+1 y todos los subsiguientes sean inválidos, ya que no guardarán información válida acerca del hash de los bloques anteriores.
- Asimismo, los datos que se guardan dentro de cada bloque dependen del tipo de Blockchain: por ejemplo, el Blockchain de Bitcoin guarda información acerca de las transacciones realizadas: el emisor, el receptor, la fecha de la operación y la cantidad de criptomonedas enviadas.

Figura 2

Información contenida dentro de cada bloque.



Fuente: Simply Explained (2017a)

De esta forma se entiende cómo cada uno de los bloques en los cuales se registran transacciones está conectado con el bloque inmediatamente anterior y posterior, formando una “cadena de bloques” - *block chain*. Dentro de cada bloque, entonces, las transacciones se unen para evitar que las mismas sean alteradas y se guarda información sobre el tiempo en el que se produjo cada una de ellas. Luego, con cada bloque adicional que se crea para almacenar nuevas transacciones se refuerza la verificación de la autenticidad del bloque anterior. El hecho de que los bloques estén conectados a través de un cifrado -el hash- hace que sea imposible modificar los datos de un bloque anterior, logrando que la información no pueda ser alterada o falsificada. Así, las transacciones se unifican y se forma una cadena irreversible e inalterable a prueba de manipulaciones (IBM, s.f. a).

Además, la manipulación de los datos que son guardados en Blockchain se previene utilizando algoritmos de consenso. Un algoritmo de consenso “es el mecanismo usado (...) para seleccionar el estado correcto de un registro después de realizar una transacción” (Tavira, 2019). Los tipos de algoritmos de consenso se explicarán más adelante, pero para comprender la utilidad éstos es posible ejemplificar exponiendo qué sucede cuando se utiliza Proof-of-work, el mecanismo de consenso empleado en el Blockchain de Bitcoin: gracias a Proof-of-work se pone en marcha un mecanismo que hace que demore aproximadamente 10 minutos la adhesión de nuevos bloques a la cadena ya existente. Esto dificulta la manipulación de los datos, ya que si alguien se dispusiese a dañar la información debería calcular el Proof-of-work de todos los bloques subsiguientes, lo que implicaría mucho tiempo. Esto previene que se manipule un bloque y se recalculen todos los hashes de los otros bloques para hacer que el Blockchain en conjunto sea válido (Simply Explained, 2017a).

Por último, otra funcionalidad sobre la que se sostiene la autenticidad de los datos que son guardados en Blockchain es que la certeza de la información

no es verificada por un tercero (autoridad central), sino por una red de nodos (ordenadores o computadoras conectadas a la misma red que no se conocen entre ellos) que examinan los datos y los validan. Cada nodo mantiene una copia completa del Blockchain. Cuando un nuevo bloque es creado, éste es enviado a todos los nodos de la red, los cuales lo verifican para asegurarse de que la información del mismo no ha sido manipulada. Si todo concuerda, cada nodo agrega este nuevo bloque a la copia del Blockchain que mantiene. Esto significa que las transferencias de activos se realizan gracias al consenso al que llegan todos los nodos, quienes se ponen de acuerdo acerca de qué bloques son válidos y qué bloques no, lo que asegura que la información almacenada sea transparente. Así, para manipular los datos de la red, será necesario alterar los bloques subsiguientes de la cadena, rehacer el Proof-of-work de cada bloque y tener el control de más del 50% de los nodos. Solamente así el bloque manipulado será aceptado por todos los demás participantes del sistema (Molano, 2019; Simply Explained, 2017a).

De esta forma, para poner en marcha un sistema con tecnología Blockchain y que todos los participantes del mismo tengan la facultad de crear, verificar y actualizar registros de datos es necesario contar con 5 elementos:

- Una red *peer-to-peer*: una red de computadoras, nodos, en la cual todas ellas tengan las mismas facultades. Se requiere una red que permita que los nodos se comuniquen y compartan información de forma remota.
- Criptografía: técnica que sirve para asegurar información en un entorno hostil, con la cual los usuarios podrán verificar mensajes ajenos y probar la autenticidad los propios mensajes emitidos, aun cuando existan agentes malintencionados.
- Un algoritmo de consenso: reglas aplicables a todos los nodos que regulen la forma en la que se agrega un nuevo bloque a la cadena. Existen distintos algoritmos de consenso, cada uno de los cuales presenta sus propias ventajas y desventajas.
- Un sistema de castigos y recompensas, con el cual sea posible asegurar que lo mejor para todos los intervinientes es seguir siempre las reglas. Deben otorgarse recompensas a las personas que contribuyen a mantener los registros y agregar nuevos bloques. Esta recompensa puede ser un “*token*” o moneda que se entrega cada vez que se llega a un consenso y se agrega un nuevo bloque a la cadena. Por otro lado, los actores malintencionados que intenten manipular el sistema deben verse sometidos a perder el dinero gastado en poder computacional.
- Adopción extensiva: Para que todo el sistema sea realmente descentralizado es necesario que existan suficientes intervinientes en el mismo. Un Blockchain se vuelve verdaderamente descentralizado e inmutable solo una vez que se alcanza una masa crítica de usuarios (99Bitcoins, 2019).

Cabe aclarar que la enumeración anterior se realizó considerando a redes Blockchains públicas, sistemas abiertos en las cuales cualquier persona puede participar y en donde se precisa de una alta adopción para funcionar de forma eficiente (Conexión ESAN, 2019). Cuando se trabaja con redes Blockchain privadas es necesario tener en cuenta otras consideraciones, ya que en estos sistemas se limita el número de agentes habilitados a formar parte y existen entidades que gobiernan el correcto funcionamiento de la tecnología. Las distintas formas en las cuales puede estructurarse el sistema se explicarán más adelante.

Los beneficios ofrecidos por esta nueva tecnología resultan en que la misma esté siendo cada vez más utilizada por diversos comercios e industrias. De acuerdo a una encuesta de PwC, el 84% de 600 directivos entrevistados asegura que sus empresas tienen en marcha algún proyecto relacionado con el Blockchain. Algunos de los indicadores de cambios fundamentales que muestran qué tanto se está utilizando Blockchain en el mundo empresarial son: la tokenización de activos, las ICO (*Initial Coin Offerings*) y las plataformas de software corporativas que están empezando a utilizar la mencionada tecnología (PwC, s.f. b).

Historia de Blockchain

De acuerdo a Simply Explained (2017a), la tecnología Blockchain fue inicialmente descrita en 1991 por un grupo de investigadores. Ésta estaba originalmente destinada a etiquetar la fecha de documentos virtuales de modo que la misma no pudiese ser corrompida o manipulada. Luego, en 1992 comienza a circular en internet *Cypherpunks*, una lista de correos electrónicos a la cual se suscribían criptógrafos, activistas políticos e investigadores sobre la protección de la intimidad personal en la evolución digital (Gómez García, 2019). Allí se desarrollaban nuevos protocolos, propuestas e ideas dentro de un ambiente colaborador que fomentaba el intercambio.

Como explica Gómez García (2019), experto en arquitectura de infraestructura IT y telecomunicaciones de Santander Global Tech, a finales de octubre de 2008 una persona (o personas u organización de personas) bajo el pseudónimo de Satoshi Nakatomo publicaría en *The Cryptography Mailing List*, lista de correos electrónicos heredera de *Cypherpunks*, una invitación a leer un artículo suyo en el que presenta un nuevo sistema electrónico de pagos: Bitcoin. Con Bitcoin comenzaría la historia oficial de la tecnología Blockchain, la cual representó un avance fundamental dentro de la ya larga trayectoria de la criptografía aplicada. Este nuevo método de pagos se basaría en trabajos, intercambio de conocimientos y debates previos que comenzaron desde antes de *Cypherpunks* y que se esparcieron gracias a esa vía de comunicación entre expertos en la materia.

Con Bitcoin se sustituiría definitivamente la necesidad de confiar en un tercero que avalara las transacciones para pasar a un sistema que se basa en el

consenso de muchas partes que verifican información de forma simultánea. Con este método de pagos se logró conjugar un mecanismo de creación de monedas que fuese definido para todo el sistema, una estructura de reglas de actuación que incentiva a que los participantes actúen de forma honesta y la posibilidad de escalar la tecnología. Luego, Blockchain comenzaría a ser utilizado en variadas industrias y aplicaciones, permitiendo que muchos procesos, además de los pagos y el intercambio de dinero, se beneficiaran de sus ventajas en materia de seguridad, descentralización y automatización (Gómez García, 2019).

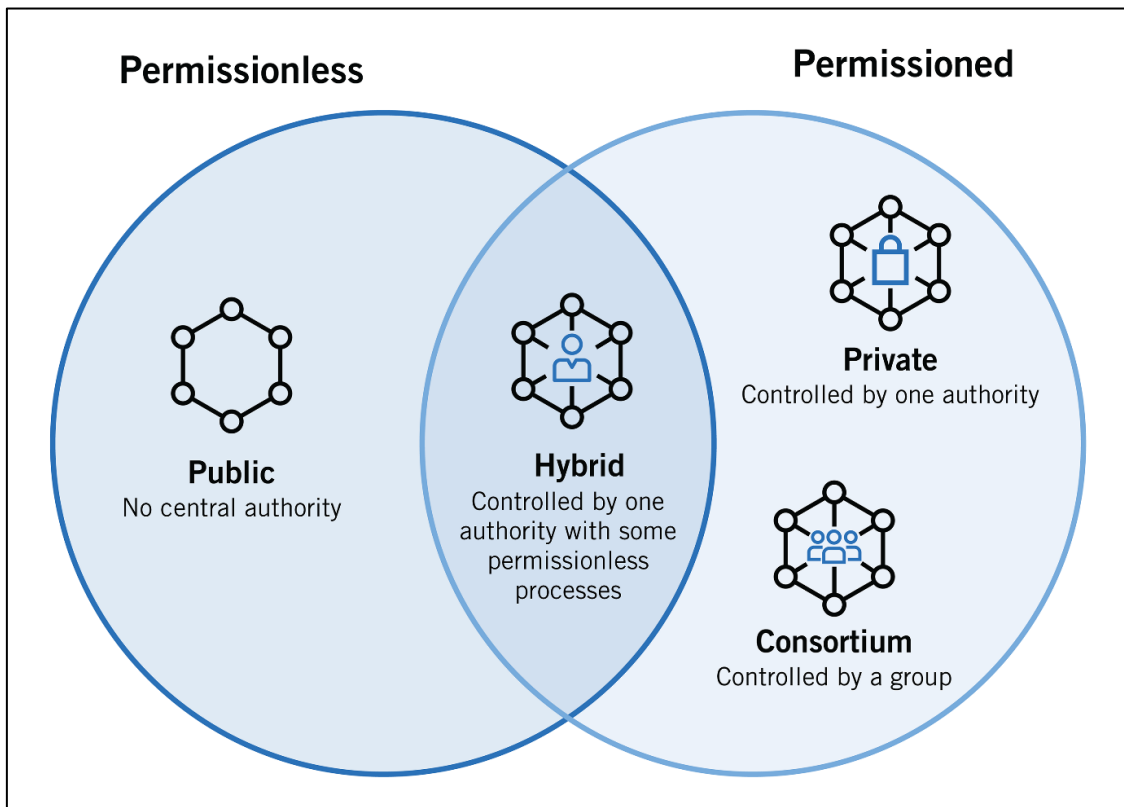
Tipos de redes Blockchain

De acuerdo a Wegrzyn y Wang (2021), en una primera instancia las redes Blockchain pueden ser clasificadas según su pertenencia a dos grupos: redes *permissionless* (que no requieren permisos) y redes *permissioned* (autorizadas).

- Blockchain *permissionless*: son aquellas en las cuales cualquier usuario es capaz de unirse a la red de forma cuasi anónima (convirtiéndose en un nodo) y en la cual no se restringen los derechos de los nodos participantes en el sistema. Al contar con muchos nodos para validar las transacciones, en estas redes sería difícil que actores malintencionados se confabularan para manipular los resultados, por lo que suelen contar con una alta seguridad. De todas formas, las redes *permissionless* tienden a tener largos tiempos de procesamiento de transacciones debido a la gran cantidad de actores intervinientes y al gran número de transacciones.
- Blockchain *permissioned*: en este tipo de sistemas el acceso a la red está restringido solo para ciertos nodos, a los cuales también se le puede limitar sus derechos. En un Blockchain autorizado, las identidades de los usuarios son conocidas por el resto de los intervinientes. Debido a que el acceso está restringido, hay menos nodos en la red, lo que se traduce en un menor tiempo de procesamiento por transacción y en una incrementada eficiencia.

Para acceder a las ventajas del reducido tiempo de procesamiento en las Blockchain autorizadas es necesario estar dispuesto a afrontar ciertas desventajas. Esto sucede porque en el caso de que una autoridad central mantenga una red Blockchain *permissioned*, otorgando el permiso de acceso a diferentes nodos y creando las restricciones de participación, se obtendría un sistema menos seguro por ser este más propenso a vulnerabilidades de piratería. Esto es así debido a que cuantos menos nodos validan la información de la red, más fácil es el agrupamiento de actores malintencionados. De esta forma, los administradores de las redes autorizadas deben asegurarse de que los nodos que agregan y verifican la información sean confiables.

Figura 3
Tipos de redes Blockchain.



Fuente: Wegrzyn y Wang (2021)

Luego, sin perder de vista la posibilidad de requerir autorización para participar en la red, los sistemas Blockchain pueden ser clasificados dentro de cuatro categorías: redes públicas, privadas, de consorcio o híbridas, las cuales serán explicadas a continuación (Parizo, 2021; Singh, 2021; Wegrzyn y Wang, 2021; Rawat, 2021; Geroni, 2021; ReadBTC, s.f.).

Blockchain públicos

En estas redes, los nodos que desean unirse no requieren de permisos y están completamente descentralizados, contando éstos con los mismos derechos para acceder a los datos, crear nuevos bloques y validar la información. Los Blockchain públicos se utilizan principalmente para intercambiar y extraer criptomonedas, siendo estas las redes que ayudaron a popularizar la tecnología, eliminando los problemas que acarrea la centralización (menor seguridad y transparencia). Debido a su naturaleza descentralizada, se requiere de algún algoritmo de consenso, un método para verificar la autenticidad de los datos, mediante el cual los nodos participantes lleguen a un acuerdo sobre el estado actual de la información. Suele existir un sistema de incentivos que anime a más personas a unirse a estas redes.

Las ventajas mostradas por las redes Blockchain públicas incluyen el hecho de que son completamente independientes de las organizaciones, por lo que, si la entidad que las inició deja de existir, la cadena de bloques pública seguirá funcionando si existen computadoras conectadas a ella. Además, cuentan con una elevada transparencia debido a que sus usuarios siguen protocolos y métodos de seguridad. Como desventaja se puede mencionar que estas redes son lentas y las empresas que hacen uso de las mismas no pueden restringir el acceso a la información. Las redes públicas no son fácilmente escalables ya que su velocidad se deteriora a medida que más nodos se unen a las mismas.

Blockchain privadas

Éstas son redes que funcionan dentro de un entorno restringido, un sistema cerrado que está bajo el control de una entidad. Por más que funcionan como una red pública en el sentido de que utilizan conexiones entre pares y descentralización, este tipo de Blockchain se encuentra en una escala mucho más pequeña. En lugar de que cualquiera pueda unirse y proporcionar potencia informática, las cadenas de bloques privadas generalmente se operan en una pequeña red dentro de una empresa u organización, siendo necesario contar con permisos para participar. La autoridad central que administra la red es quien otorga estas autorizaciones, determinando quién puede ser un nodo y estableciendo los derechos o facultades con los que cuentan los distintos agentes intervinientes.

De esta forma, las redes privadas solo están parcialmente descentralizadas. Éstas se adaptan mejor a entornos empresariales en situaciones en las que una empresa quiere beneficiarse de las cualidades de la tecnología sin exponer su información al público.

El hecho de que existan diversos permisos y niveles de seguridad, autorizaciones y accesibilidad es una de las ventajas de estas redes privadas ya que, por ejemplo, puede establecerse que algunos autores estén facultados a cargar nueva información, mientras que a otros solo les sea posible ver los datos de la red. Además, debido a que tienen un tamaño limitado, las redes privadas son rápidas para procesar transacciones. De todas formas, estos sistemas tienen como desventaja de que no siguen la filosofía central de la tecnología, que se basa en la extensiva descentralización. Asimismo, en estos sistemas es más difícil confiar plenamente en la información ya que los nodos centralizados determinan qué es válido y esta pequeña cantidad de validadores también puede significar menos seguridad.

Blockchain híbridos

Los Blockchain híbridos combinan elementos de los sistemas públicos y de los privados. Estas redes son creadas y controladas una sola organización, a

vez que cuentan con un nivel de supervisión realizado por un Blockchain público, el cual se requiere para realizar ciertas validaciones de transacciones. Las redes híbridas combinan un sistema *permissioned* junto con un sistema público *permissionless*. De esta forma, en esencia, un Blockchain híbrido cuenta con dos interfaces: un Blockchain público sirve para verificar los datos almacenados dentro de un Blockchain privado.

Aunque las transacciones dentro de una red híbrida no se hacen públicas, aún son verificables cuando sea necesario. Los individuos que controlan la red no son capaces de alterar la inmutabilidad de los datos y la seguridad de las transacciones, solo pudiendo controlar qué transacciones se hacen públicas y cuáles no. Una vez que a un usuario se le permite el acceso para participar dentro de un Blockchain híbrido, puede formar parte plenamente de las actividades en la red: comparte los mismos derechos para realizar y visualizar transacciones con el resto de los actores.

Dentro de los beneficios presentados por las redes híbridas puede mencionarse el hecho de que las mismas funcionan en un ecosistema cerrado, lo que permite que las empresas que hacen uso de la tecnología no filtren abiertamente información relevante. Además, estas redes permiten cambiar ciertas reglas de uso (lo que dota de flexibilidad al sistema), están protegidas contra un ataque del 51% (que actores malintencionados se apoderen de más de la mitad de la capacidad computacional y logren cambiar los datos a su favor), resguardan la privacidad de los participantes sin dejar de comunicarse con el mundo exterior que no forma parte del sistema y permiten realizar transacciones con un bajo costo ya que requieren de pocos nodos para verificarlas. De todas formas, hay que tener en cuenta de que no todas las empresas y organizaciones están en condiciones de poder implementar un Blockchain híbrido de forma eficiente: las redes públicas son más asequibles y abiertas para la mayoría de los casos de uso. Además, actualizar la red puede constituirse como un desafío y no existen incentivos para que los usuarios participantes contribuyan al mantenimiento del sistema.

Consortios

Los Blockchain de consorcio o federados son redes *permissioned* gobernadas por un grupo de organizaciones. Esencialmente, un Blockchain de consorcio es un sistema privado con acceso limitado a un grupo en particular, lo que elimina los riesgos que conlleva que una sola entidad controle la red. Así, los Blockchain de consorcio disfrutan de una mayor descentralización que los privados, lo que da como resultado niveles más altos de seguridad. En este tipo de redes los procedimientos de consenso están controlados por nodos preestablecidos. En los Blockchain de consorcio existe un nodo validador que inicia, recibe y valida transacciones, mientras que los nodos miembros están facultados para recibir o iniciar transacciones.

Este tipo de redes es mayormente aplicable en esas situaciones en las que varias empresas operan en la misma industria y necesitan una plataforma única para realizar transacciones o transmitir información. La banca y los pagos son dos áreas que cuentan con un uso extendido para este tipo de Blockchain: distintos bancos pueden unirse y formar un consorcio, decidiendo qué nodos validarán las transacciones. Además, procesos de cadena de suministro pueden mejorarse gracias a la utilización de estos sistemas.

Entre las ventajas mostradas por los Blockchain de consorcio se encuentra que tienden a ser redes más seguras, escalables y eficientes que las Blockchain públicas y ofrecen la posibilidad de establecer controles de acceso. Sin embargo, son menos transparentes que las redes públicas y todavía pueden verse comprometidas si se viola un nodo miembro. Además, la creación de consorcios puede ser un proceso difícil ya que requiere la cooperación entre varias organizaciones, lo que presenta desafíos logísticos.

Algoritmos de consenso

Como fue explicado brevemente en un apartado anterior, los algoritmos de consenso constituyen el proceso mediante el cual se consigue un acuerdo sobre el valor de un dato en un sistema distribuido, siendo estos mecanismos diseñados para incrementar los niveles de confianza en una estructura donde participan múltiples actores. Estos procesos deben cumplir la condición de terminación (que los nodos eventualmente lleguen a un resultado) y la condición de acuerdo (que ese resultado sea el mismo para todos los nodos). Generalmente, los algoritmos de consenso comienzan con un paso de elección (en el que un nodo propone un valor de salida, un resultado), siguen con una votación (en la que se verifica la propuesta) y culminan con una decisión (llegando a un acuerdo generalizado acerca del único valor de salida) (Rodríguez, 2019).

Dado que los algoritmos de consenso contribuyen a mantener la integridad y seguridad de las redes Blockchain, éstos pueden considerarse como el corazón de la tecnología. Distintas plataformas de Blockchain utilizan diferentes algoritmos para llegar al consenso, mecanismos que difieren en su funcionamiento y ejecución. De acuerdo a Patil et al. (2021), los 5 algoritmos de consenso más populares en plataformas de cadenas de bloques son *Proof of Work (PoW)*, *Proof of Stake (PoS)*, *Delegated Proof of Stake (DPoS)*, *Proof of Authority (PoA)* y *Proof of Elapsed Time (PoET)*. A continuación se explicará brevemente cada uno de ellos.

Proof of Work (PoW) – Prueba de Trabajo

Este es el primer algoritmo de consenso utilizado por la tecnología Blockchain, ya que es el proceso implementado por Bitcoin para que sus nodos se pongan de acuerdo. En este mecanismo, los mineros, un grupo de nodos que verifican y agregan al Blockchain los nuevos bloques de transacciones de criptomonedas, resuelven acertijos matemáticos complejos que requieren de una extensiva capacidad computacional. El primer minero que resuelve el acertijo (problema con formato de adivinanza, que solo puede ser resuelto mediante prueba y error) es quien crea el bloque, recibiendo como recompensa la criptomoneda específica del Blockchain sobre el que se trabaja. Así, el minero que propone un resultado solo puede validar un nuevo bloque de transacciones si el resto de los nodos distribuidos de la red llegan a un consenso y aceptan como válido el hash (el resultado del acertijo).

Esta verificación del resultado es rápida y sencilla, por lo que no es rentable para los agentes malintencionados intentar enviar un estado falso. Además, cada bloque de la cadena hace referencia al bloque inmediatamente anterior, de forma que no es sensato enviar información no verdadera acerca de las transacciones pasadas (para validar esto sería necesario recalcular y validar todos los hashes de los bloques siguientes). De esta forma, PoW determina la forma en que una red Blockchain llega al consenso sin la intermediación de agentes externos al exigir una importante capacidad computacional que desincentiva la participación de agentes malintencionados.

Cuando se utiliza este sistema y se cuenta con un poder de procesamiento tan potente como el de Bitcoin, intentar atacar a la red significa perder tiempo y recursos. De todas formas, no todos los Blockchains que utilizan *Proof of Work* tienen este poder computacional, por lo que no resulta tan costoso atacarlas. Además, este proceso es criticado por sus perjudiciales efectos medioambientales, dado que para mantener a los sistemas que se basan en PoW se consume mucha energía eléctrica (Binance Academy, 2018a; Amores Martínez, 2020; Jiménez, 2019; Gómez, 2020 y Tavira, 2019).

Proof of Stake (PoS) - Prueba de inversión

Proof of Stake es un algoritmo de consenso que se fundamenta en la idea de que cuanto más dinero tenga invertido un agente en la red Blockchain, más fiable será éste validando transacciones. Esto sucede porque mayor será su interés en que la red funcione bien y que su patrimonio no se debilite. De esta forma, cuál sea el nodo que valide un bloque de transacciones depende de la cantidad invertida en la red por ese potencial validador.

Así, para determinar cuál será el nodo validador en una red que utiliza PoS se realiza una selección en la cual los nodos que poseen mayor cantidad de criptomonedas tienen mayores posibilidades de ser elegidos. Adicionalmente, para que los nodos que se ganen la posibilidad de crear un nuevo bloque sean

aquellos más comprometidos con la red, también se tiene en cuenta el tiempo de permanencia del nodo en el sistema. Finalmente, también existe un factor aleatorio para que todos los agentes tengan la posibilidad de crear un bloque. De esta forma, un nodo es elegido para que actúe como validador designado, procesando y autorizando bloques dentro de la red.

PoS es un protocolo que dota a la red de mayor escalabilidad en comparación a PoW, pudiendo procesar muchas más transacciones por segundo. El hecho de la existencia de una complejidad reducida en las operaciones de validación que se llevan a cabo cuando el algoritmo de consenso es PoS tiene como consecuencia que los bloques de información sean validados y agregados a la red de forma más rápida. Además, el necesitar menos capacidad computacional para realizar los controles hace que este mecanismo sea más sostenible y favorable para la conservación medioambiental.

De todas formas, hay que mencionar que PoS no es un mecanismo perfecto: debido a que el protocolo se basa principalmente en la cantidad de criptomonedas que posee cada nodo, los validadores que dispongan de un mayor patrimonio invertido contarán con posibilidades más altas de validar el siguiente bloque y ganar las comisiones de transacción del bloque autorizado. Esto incrementa las diferencias patrimoniales entre los “nodos ricos” y los “nodos pobres” (Amores Martínez, 2020; Jiménez, 2019; Gómez, 2020; Tavira, 2019; Maldonado, 2020 y Binance Academy, 2018b).

Delegated Proof of Stake (DPoS) – Prueba de inversión delegada

Con el algoritmo de consenso de Prueba de inversión delegada los usuarios de la red Blockchain votan nodos delegados (“testigos” o “productores de bloques”) para validar el siguiente bloque de transacciones. Así, se eligen un número limitado de delegados (generalmente entre 20 y 100) para que validen cada nuevo bloque, pudiendo no ser los mismos delegados designados para validar el bloque subsiguiente. Luego, el validador exitoso que haya logrado autorizar el bloque recibe la tarifa de transacción por su tarea de control y autorización, recompensa que es compartida con los nodos que lo votaron anteriormente.

DPoS es una forma democrática de elegir quién verifica el siguiente bloque, lo que permite que muchos nodos participen en el proceso. Con DPoS el sistema de votación depende directamente de la reputación de los delegados, ya que si un validador no funciona de forma eficiente será expulsado y reemplazado por otro. De esta forma, el proceso se fundamenta en la reputación ganada y no en la riqueza que de los posibles validadores. Además, dado que existe un número limitado de nodos productores de bloques, este mecanismo logra llegar a un acuerdo rápidamente. Gracias a las ventajas ofrecidas, este algoritmo de consenso se constituye como un proceso prometedor para mejorar la eficiencia de las redes Blockchain. Especialmente importante es la ventaja de que, en la mayoría de los casos, DPoS presenta un mejor rendimiento que PoS

en término de transacciones por segundo validadas (Amores Martínez, 2020; Jiménez, 2019; Cryptopedia, 2021 y Binance Academy, 2018c).

Proof of Authority (PoA) - Prueba de autor o prueba de autoridad

La prueba de autoridad o de autor se constituye como una variante del algoritmo de consenso PoS. En este sistema, en lugar de criptomonedas, los nodos participantes que validan las transacciones y crean bloques ponen en juego su identidad y reputación.

Al utilizar PoS se omite el hecho de que es posible que nodos que tengan una misma participación en el sistema no valoren el monto invertido de la misma forma. Así, en PoA se apunta a que lo que se ponga en juego sea la reputación de los nodos validadores: los validadores son entidades conocidas que arriesgan su nombre por el derecho a validar los bloques, eliminando la necesidad de considerar posibles discrepancias monetarias entre ellos y garantizando que todos los participantes de la red estén igualmente motivados para trabajar por el éxito del sistema.

De esta forma, un pequeño número designado de nodos tiene el poder de validar las transacciones en la red y actualizar el registro compartido. De acuerdo a la estructuración elegida, uno o más nodos se encargarán de generar cada nuevo bloque de transacciones que se incluirán en el Blockchain. Debido a la importancia de su papel y al poder que ostentan, las redes PoA generalmente aceptan como validadores a entidades con probada reputación, rol que generalmente no puede ser alcanzado por una persona común que pretenda participar en la red.

Utilizando este procedimiento, el consumo de energía es bajo: no hay competencia técnica entre los validadores, casi no se requiere poder de cómputo y, por lo tanto, se necesita poca electricidad para su funcionamiento. De todas formas, el número de actores que puede participar es limitado, lo que significa una fuerte debilidad de los sistemas que se valen de este mecanismo: las redes presentan una fuerte centralización en manos de un pequeño número de validadores autorizados.

Debido a que existe una cantidad reducida de nodos validadores, este mecanismo de consenso generalmente se utiliza en redes privadas o consorcios, sistemas en los que existe cierto nivel de confianza entre los miembros (Tavira, 2019; Valente, 2019 y Bogdanov, 2021).

Proof of Elapsed Time (PoET) - Prueba de tiempo transcurrido

Proof of Elapsed Time es un método utilizado para determinar quién generará el próximo bloque en algunas redes Blockchain autorizadas en las cuales se requiere que los participantes del sistema se identifiquen para poder formar parte del mismo. Este algoritmo de consenso selecciona al nodo validador de cada bloque de forma aleatoria. Con PoET cada nodo tiene asignado un

temporizador que realiza una cuenta regresiva basado en un tiempo aleatorio: mientras el tiempo del temporizador transcurre, los nodos “duermen”; siendo que cuando expira el primer temporizador (cuando llega a cero), el nodo que lo tiene asignado se convierte en el “líder” y produce el nuevo bloque, transmitiendo luego la información al resto del sistema. Seguidamente, el proceso se repite para generar el próximo bloque.

Este algoritmo de consenso cuenta con una alta eficiencia y no consume tantos recursos como PoW, funcionando sin requerir tampoco de complejos sistemas de participación e incentivos. PoET se constituye como un buen mecanismo a ser utilizado en redes Blockchain *permissioned*, y permite una alta escalabilidad.

Por otro lado, para comprender su principal desventaja, debe considerarse que para que PoET funcione, asignando aleatoriamente el tiempo de espera y certificando que el validador ha esperado el tiempo correspondiente, es necesario contar con un entorno de computación segura: el Software Guard Extensions (SGX) desarrollado por Intel. Así, el hecho de que este software esté fabricado en su totalidad por una compañía significa que la confianza que pueda inspirar este mecanismo de consenso depende de una empresa particular, un tercero al sistema. Esto choca con el espíritu y la intención mantenida originalmente cuando se desarrollaron las criptomonedas, primera aplicación de Blockchain que perseguía una mayor descentralización de las decisiones y controles (Amores Martínez, 2020; Jiménez, 2019; Tavira, 2019; Frankenfield, 2022 y Curran, 2018).

Smart contracts

La primera vez que se utilizó el término *smart contract* fue gracias al informático, legista y criptógrafo estadounidense Nick Szabo, quien en el año 1997 se propuso crear un registro descentralizado para alojar contratos entre partes. Así, fueron creados los *smart contracts* (contratos inteligentes), los cuales se diferencian de los contratos convencionales en que los primeros son completamente digitales: constituyen pequeños programas informáticos que pueden guardarse en una red Blockchain. Los nodos de la red cumplen una importante función dado que realizan un análisis y ejecutan alguna de las partes de la lógica interna de los *smart contracts* (Simply Explained, 2017b; Fernández Espinosa, 2019).

Gupta (2017) define a los *smart contracts* como un “conjunto de reglas que rigen una transacción comercial, las cuales son almacenadas en Blockchain y ejecutadas automáticamente como parte de la transacción²” (p. 17). El autor aclara que el propósito de esta herramienta es dotar a las transacciones de una incrementa seguridad, a la vez que se reducen los costos y las demoras presentes en los contratos tradicionales.

² Traducción propia

Aún existen ciertos retos a superar para que se extienda la implementación de los *smart contracts*: éstos incluyen el hecho de que la tecnología todavía no está completamente madura, que necesite de una mayor estandarización y regulación y que unir en una sola herramienta conceptos propios del ámbito tecnológico y otros propios del ámbito legal se constituye como un importante desafío. De todas formas, estos programas están concebidos de forma tal que sus características posicionan a la herramienta como un recurso confiable, lo cual hace esperable que se incrementen sus niveles de uso. Rasgos particularmente importantes de los *smart contracts* incluyen su inmutabilidad (una vez que son creados, nunca más pueden ser modificados) y su distribución (el resultado del programa está validado por todos los miembros de red, lo que significa que todos los participantes de la misma controlan que se cumplan las condiciones previstas). Así, los contratos inteligentes ofrecen las siguientes ventajas a aquellos agentes que hagan uso de los mismos: reducción de costes debido a la eliminación de gastos operativos, incrementada velocidad en los procesos, autonomía de ejecución, fiabilidad y precisión (Simply Explained, 2017b; Fernández Espinosa, 2019; Bello, 2020).

De esta forma, gracias a sus características, los *smart contracts* se emplazan como herramientas que pueden ser de gran utilidad para una variedad de sectores e industrias. Así, ámbitos de aplicación de éstos incluyen el comercio (donde, por ejemplo, la aprobación de financiación puede ser realizada de forma más rápida y eficiente), la propiedad intelectual (permitiendo crear un registro de las patentes que pertenecen a una determinada compañía), las elecciones (donde mediante contratos inteligentes se valide la identidad de un votante y se registre su voto), los seguros (procesando siniestros, determinando el importe de pago y abonando su monto de forma automática), la gestión de cadenas de suministro (creando programas que permitan rastrear elementos de forma transparente), entre otros (Iberdrola, s.f. b; Medium, 2021).

Beneficios de Blockchain

Como explica Gupta (2017), el hecho de que en Blockchain las nuevas transacciones se estructuran sobre el historial de transacciones anteriores hace que cualquier posible manipulación sea evidente y que ello aumente la confianza entre los participantes de la red. Esta capacidad que tienen los miembros del sistema de autocontrolar que todo funcione correctamente mitiga la necesidad de implementar salvaguardas y sanciones legales para monitorear el flujo de transacciones comerciales. De todas formas, cuando la supervisión de terceros sigue siendo requerida, con Blockchain se reduce el costo de los controles debido a que se facilita que los auditores y reguladores revisen la información relevante de las transacciones.

Las nuevas oportunidades y los beneficios que significa la tecnología Blockchain para empresas pertenecientes a diversas industrias incluyen el ofrecer una mayor transparencia, una mayor eficiencia, una mejorada seguridad

y una trazabilidad más sencilla. En cuanto a la trazabilidad, Koksai (2019) menciona que el hecho de que los intercambios sean registrados en un “libro mayor” que asienta de dónde proviene los bienes mejora la seguridad y contribuye en las tareas de verificación de los activos negociados, lo que puede ser especialmente útil para sectores como la medicina y el arte. Asimismo, esto también puede beneficiar a industrias en las que cuestiones ambientales sean un área de interés o que tengan problemas con la falsificación y el fraude. Además, los datos de trazabilidad ofrecidos por la tecnología Blockchain pueden exponer debilidades existentes en las cadenas de suministro (IBM, s.f. b).

En relación a la transparencia, ésta se refuerza por el hecho de que, con Blockchain, las organizaciones intervinientes mantienen una base de datos conjunta. Esto posibilita que todas las entidades vean la misma información al mismo tiempo, la cual consta de datos inmutables que incorporan la fecha y la hora en la que fueron creados. Los miembros de la red pueden ver el historial completo de una transacción, siendo esto especialmente útil en industrias para las cuales la transparencia es fundamental, como por ejemplo en los sistemas y negocios financieros en los que cada entidad involucrada se ve incentivada a actuar con integridad (Koskal, 2019: IBM, s.f. b).

Gupta (2017) también hace referencia a la incrementada eficiencia y seguridad para los negocios que hagan uso de Blockchain, mencionando que las ventajas ofrecidas por la tecnología para las empresas incluyen:

- Ofrecer ahorro de tiempos: el tiempo que requiere efectuar transacciones complejas se reduce considerablemente debido a que no se requiere verificación de una autoridad central.
- Permitir ahorro de costes: los costes al utilizar Blockchain se reducen por varios motivos:
 - Se requiere de menor supervisión debido a que el sistema es se autogobierna por los propios participantes.
 - Existen menos intermediarios porque los participantes están facultados a realizar intercambios directamente.
 - Se elimina la duplicación de esfuerzos de que cada participante de un intercambio mantenga sus propios registros. Todos tienen acceso a los datos compartidos.
- Proveer una mejorada seguridad: la forma en la que estructura el sistema hace que Blockchain sea resistente ante manipulaciones y fraudes.

Además, la automatización que permiten los *smart contracts* aumenta la eficiencia y acelera los procesos que se basan en el uso de la tecnología Blockchain. Los contratos inteligentes reducen la intervención humana y mejoran procesos de verificación de cumplimiento contractuales (IBM, s.f. b).

Las redes Blockchain privadas, además, cuentan con niveles de seguridad todavía mayores porque permiten conformar una red a la que solamente tienen acceso aquellos miembros con permiso, permitiendo contar con evidencia de que los agentes son quienes dicen ser y que los bienes

intercambiados son exactamente como se representan. Las redes privadas permiten mayor privacidad ya que el uso de permisos posibilita que se especifique a qué información de cada transacción pueden acceder otros miembros de la red (Gupta, 2017).

De todas formas, para que la tecnología logre ser implementada exitosamente y que sus beneficios sean disfrutados por empresas e industrias pertenecientes a varios sectores, será necesario sortear ciertos desafíos. Los retos o desventajas presentados por Blockchain que deberán ser minimizados para una correcta y extensiva utilización de la tecnología incluyen, entre otros, a la dificultad de entendimiento que presenta, la disminuida escalabilidad en el procesamiento de datos en comparación a otras alternativas, la incipiente regulación gubernamental, los altos costes de implementación para las empresas, el alto consumo energético que requiere y la posibilidad de generar desempleo revolucionando tareas tradicionalmente realizadas por personas (Swan, 2017; Mondragón Tenorio, 2021). De todas formas, se entiende que los beneficios en materia de seguridad, eficiencia, transparencia y trazabilidad enumerados anteriormente superan los riesgos y desafíos potenciales de la tecnología.

Uso de Blockchain en la mejora de cadenas de suministro y trazabilidad

Como fue mencionado anteriormente, Blockchain es una de las tecnologías que está contribuyendo a la creación de mejores y más desarrollados sistemas de trazabilidad. Gaur y Gaiha (2020) mencionan que, a pesar de que importantes avances en la trazabilidad han sido posibilitados gracias a la implementación de sistemas de planificación de recursos empresariales (ERPs), la visibilidad sigue siendo un desafío para las cadenas de suministro más complejas. Estos autores estudian la gestión de cadenas de suministro de varias empresas y encuentran que las grandes organizaciones pueden contar con muchos ERPs a la vez, siendo éstos programas que no se comunican fácilmente entre sí. Además, las cadenas de suministro en las cuales los bienes pasan por muchas organizaciones o por varios países mantienen complejidades adicionales, siendo que actualmente la mayoría de la información que se traspasa de una empresa a otra lo hace sin contar con acuerdos en relación a la taxonomía de datos (Wattananjantra, 2019)

Con el uso de Blockchain las compañías podrían otorgarles identificadores únicos a los diferentes activos (tokens) y se les asignarían firmas digitales a los participantes del sistema. Luego, los distintos flujos que implican las transacciones comerciales (de información, financieros y reales/de mercadería) son registrados en la cadena de bloques de forma cronológica como una transferencia del token correspondiente entre los participantes. Gracias a esto, se captura información que no es registrada en los ERPs tradicionales.

Además, cada bloque cuenta con la ventaja de estar cifrado y distribuido entre todos los participantes, lo que en su momento facilita las tareas de auditoría y sirve para prevenir las manipulaciones. De esta forma, se eliminan o reducen problemas de ejecución, trazabilidad y coordinación entre los participantes de las transacciones comerciales pertenecientes a las cadenas productivas, lo que a su vez posibilita la mejor toma de decisiones empresariales. De acuerdo a Gaur y Gaiha (2020), Blockchain no reemplazará a los ERPs, si no que servirá como el entorno con el cual interactúen los sistemas de planificación de recursos de distintas empresas (o de una misma compañía), facilitando la integración de la información.

En cuanto a la trazabilidad de bienes físicos, es necesario que éstos se vinculen con la red Blockchain, lo que puede hacerse mediante etiquetas RFID o alguna tecnología similar. Estas etiquetas constituyen un sistema de seguimiento que, mediante códigos de barra inteligentes, logra identificar artículos utilizando la tecnología de radiofrecuencia, transmitiendo datos desde la etiqueta a un lector que luego la comunica a un programa informático (Pontius, 2022). De esta forma, pueden crearse registros virtuales en Blockchain que apunten a un determinado bien físico mediante su identificación por etiqueta RFID. Así, el sistema ofrece varias funcionalidades para distintos intervinientes, como puede ser el registro virtual de que un bien final o un producto en curso ha sido elaborado, la posibilidad de verificar cuáles son los insumos con los cuales se ha construido un bien que se está por adquirir, la validación de la originalidad de un artículo o la geolocalización y el seguimiento de bienes que están siendo despachados de un miembro de la cadena a otro (Linares Barbero, 2018).

Más aún, de acuerdo a Wattanajantra (2019), Blockchain se puede combinar con IoT para desarrollar aún mejores cadenas de suministro. Al utilizar sensores y dispositivos conectados e inteligentes es posible recabar una mayor cantidad de datos y se pueden medir condiciones ambientales como la temperatura. Esto es especialmente útil para la trazabilidad de productos pertenecientes a algunas industrias, como son la alimentaria y la farmacéutica. La combinación de estas tecnologías permite el completo seguimiento de los productos, lo que brinda real visibilidad de la cadena de principio a fin a través de las compañías y países por los cuales transitan los bienes.

Además, los procesos de trazabilidad que hacen uso de Blockchain están siendo complementados con la utilización de códigos QR, códigos en los cuales existen datos almacenados dentro una superficie cuadrangular y permiten ser escaneados mediante lectores específicos o dispositivos móviles para descargar archivos o acceder a información relevante. Imprimiendo y pegando códigos QR a los artículos, los miembros de las cadenas de suministro pueden relacionar un objeto específico con sus datos de fabricación, historial de producción y almacenamiento, previamente registrados en una red Blockchain. Luego, miembros posteriores de la cadena o el consumidor final tienen la posibilidad de escanear dicho código y revisar la información de trazabilidad de los productos (Calvo, 2022; DENSO, 2018).

Industrias como la automoción y la aeronáutica son algunas de las que más se están beneficiando actualmente de la implementación de la tecnología Blockchain para mejorar la información de sus cadenas de suministro. Estos sectores cuentan con la ventaja inicial de que muchos de sus componentes cuentan con serialización única. Los agentes miembros de estas cadenas y el resto de los participantes de cadenas de suministro industriales aprovechan la incrementada visibilidad de los procesos mencionada anteriormente, ya que con esta información les es posible analizar los resultados de cambios en los productos, evitar fraudes y actuar más rápidamente ante variaciones en el mercado (Lage Serrano, 2021).

La tecnología Blockchain, además, no solamente es útil para productores y miembros de la cadena distintos al consumidor final: gracias a su uso en la mejora de las cadenas de suministro, los consumidores finales cuentan con una mayor confianza a la hora de realizar la compra, siendo capaces de recibir más detalles del producto que van a adquirir. Además, al posibilitar Blockchain prácticamente la inviolabilidad de los datos, los consumidores podrán fiarse más de la información del artículo en cuestión. Estas capacidades serán cruciales para la industria de los bienes de consumo del futuro, estando los consumidores cada vez más preocupados por la autenticidad y trazabilidad de los bienes que adquieren. Así, por ejemplo, si los artículos de una cierta compañía son producidos en condiciones sostenibles y la empresa es capaz de probarlo mediante la tecnología Blockchain, ésta contará con una ventaja competitiva y podrá diferenciarse de su competencia (Ramos, 2021; Deloitte, s.f. c).

Muchas de las ventajas y los niveles de automatización que logre la tecnología para la gestión de las cadenas de suministro y la trazabilidad de los productos comercializados se verán afectados por el uso que se haga de los *smart contracts*. Este conjunto de reglas programadas en la tecnología Blockchain permiten, por ejemplo, registrar los productos en la plataforma, modificar la información sobre los lotes de productos y asentar las transferencias de artículos entre partes; definir las condiciones de acceso a la red de cada uno de los miembros de la cadena de producción para proteger los datos y la privacidad de otros intermediarios; verificar que un lote de producto cumple con los requisitos debidos y automatizar los pagos a los proveedores una vez que se ha comprobado que los productos recibidos son correctos (Wang et al., 2019; Thomas Signe, 2021; Ruiz Villar, 2019; Maestre, 2018).

De acuerdo a Deloitte (2017), las implementaciones de Blockchain para mejorar las cadenas de suministro serán especialmente útiles en aquellos casos en los que no se cuente con un intermediario central de confianza o cuando las partes de la cadena sean reacias a intercambiar información directamente. La consultora menciona que Blockchain tiene beneficios primarios y secundarios que afectan positivamente a estos procesos. Entre los potenciales beneficios primarios se encuentran (Deloitte, 2017, p.6):

- Aumentar la trazabilidad de la cadena de suministro de bienes para garantizar que se cumplan los estándares corporativos.
- Menores pérdidas por el comercio de falsificaciones/mercado gris.
- Mejorar la visibilidad y el cumplimiento de acuerdos cuando se subcontrata la fabricación.
- Reducir el papeleo y los costos administrativos.

Por otro lado, los potenciales beneficios secundarios incluyen (Deloitte, 2017, p.6):

- Fortalecer la reputación corporativa proporcionando transparencia de los materiales utilizados en los productos.
- Mejorar la credibilidad y la confianza pública de los datos compartidos
- Reducir el riesgo potencial de relaciones públicas por malas prácticas en la cadena de suministro
- Involucrar a las partes interesadas.

De todas formas, la consultora también marca que existen algunas limitaciones o posibles riesgos para la implementación de Blockchain en esta área. Éstos factores incluyen la dificultad de integración, dado que las soluciones Blockchain requieren cambios mayores o reestructuraciones totales de muchos de los sistemas actuales; el desafío de unir lo físico a lo digital, ya que se requiere que todos los pasos de la cadena estén representados digitalmente; el control, seguridad y privacidad, ya que existen preocupaciones acerca de potenciales filtraciones de datos; y el cambio cultural que requiere la adopción de esta tecnología y la implementación de redes descentralizadas.

Es importante recalcar, como lo hacen Gaur y Gaiha (2020), que utilizar correctamente Blockchain para manejar las cadenas de suministro requerirá de reglas distintas a aquellas aplicables a su implementación a otros ámbitos:

- Para comenzar, las redes Blockchain utilizadas en las cadenas de suministro deberán ser redes *permissioned* entre participantes que se conozcan entre sí: los miembros de la cadena deben conocer la fuente y la calidad de los productos que compran, por lo que solamente intermediarios conocidos deben estar facultados de participar en estas redes. Los permisos deben ser otorgados de forma selectiva para cerciorarse que los datos representados en el Blockchain no sean usados para fines malintencionados.

Así, uno de los desafíos que las redes deberán solventar son los mecanismos de gobernanza que determinarán las reglas que se aplican al sistema.

- Considerando la enorme cantidad de datos que deberá alojar una red destinada al intercambio de información relativa a la cadena de suministro en un sector, será necesario un mecanismo de consenso que permita manejar la información de forma rápida. PoW no se constituye como un método adecuado para esta implementación de la tecnología.

- Adicionalmente, habrá que asegurar la calidad de los productos que sean comercializados y registrados en la red. Para hacerlo, las compañías están implementando tres acciones:
 - Se llevan adelante auditorías físicas a los productos la primera vez que entran en la cadena producción para asegurarse que las unidades cumplen con las especificaciones registradas en la red Blockchain.
 - Se están desarrollando aplicaciones distribuidas (dApps) con las cuales seguir a los productos a lo largo de la cadena. Estas aplicaciones se comunican con el Blockchain para prevenir errores y fraude.
 - Se están implementando dispositivos inteligentes que hacen uso de la tecnología IoT y sensores para escanear productos y registrar información sin intervención humana.

Blockchain en procesos de trazabilidad alimentaria

Los beneficios de la tecnología Blockchain anteriormente mencionados, que posibilitan contar con mejores sistemas de trazabilidad, desarrollar cadenas de suministro más eficientes, confiables y eficaces y obtener visibilidad de principio a fin de los artículos comercializados, son perfectamente aplicables a la industria alimentaria y a sus productos. De hecho, Borrero (2019) menciona que la existencia de algunos factores podría hacer de la tecnología una herramienta especialmente valiosa para ser implementada en procesos de trazabilidad en este sector:

- Los recientes cambios en los hábitos de consumo han ocasionado que las personas demanden más y mejor información acerca de la integridad alimentaria de los productos que adquieren, estando ahora más preocupadas por la seguridad y sostenibilidad de los alimentos. Gracias a utilizar la tecnología Blockchain, entonces, es posible registrar mayor cantidad de información, la cual es luego verificada por el sistema sin intervención humana y compartida con los usuarios que cuentan con los correspondientes permisos. Luego, los consumidores pueden obtener información completa de los productos y de su tránsito por la cadena de suministro, pudiendo los productores auditar en tiempo real los datos manejados por el sistema.
- La existencia de incidentes sanitarios relacionados con la seguridad alimentaria y con la veracidad de certificaciones de alimentos han sabido socavar la confianza de los consumidores. Utilizando Blockchain, la información agroalimentaria de la cadena de suministro es transparente y abierta, lo que deviene en mayores niveles de confianza. Esto es resultado de que con la tecnología se posibilitan los controles cruzados y

se cuente con registros inmutables, además de que el uso de sensores y dispositivos de IoT minimiza el riesgo de manipulación.

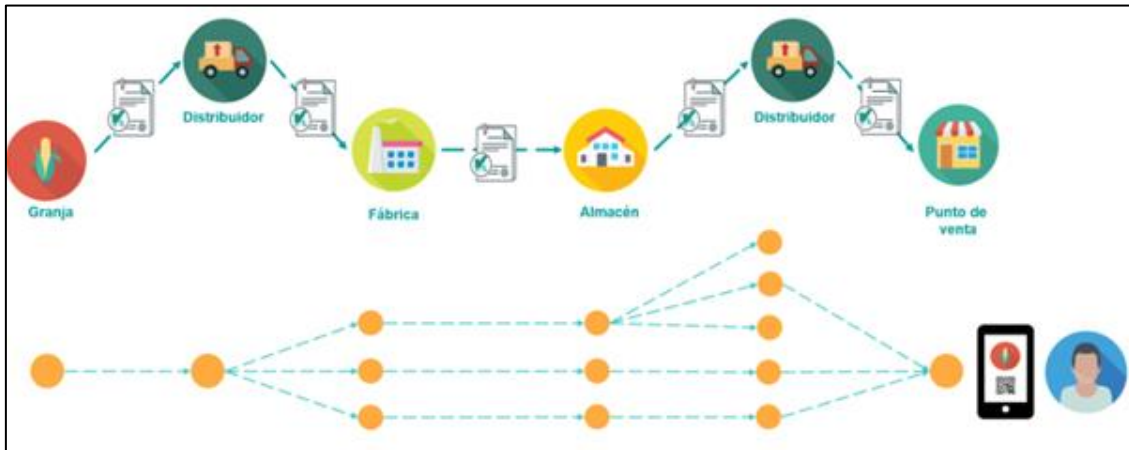
- Las cadenas de suministro de productos alimentarios involucran a numerosos actores, constituyéndose como sistemas no eficientes y poco fiables. Con Blockchain se elimina la necesidad de una organización centralizada que monopolice los datos y la gobernanza de la información, aumentando los niveles de fiabilidad.

En el mismo sentido, Burke (2019) afirma que los propios desafíos que presentan las cadenas de suministro en la industria alimentaria constituyen a las soluciones Blockchain como herramientas especialmente atractivas. De acuerdo al autor, estos desafíos incluyen la existencia de socios comerciales dispares, cadenas de suministro hiperglobalizadas y adopción desigual de la tecnología digital entre miembros de la cadena. Por ello se están implementando iniciativas Blockchain en la industria alimentaria que intentan atacar, entre otros, aspectos como el fraude alimentario, el retiro de productos de mercado y la seguridad alimentaria, el cumplimiento regulatorio, aspectos sociales (como el trabajo infantil y la legalidad del empleo) y la transmisión de información a los consumidores.

Las funcionalidades de Blockchain permitirían entonces construir sistemas en los cuales exista visibilidad de extremo a extremo y en los que se cuente con información fiable, transparente y fácilmente accesible. De esta forma se posibilita que los consumidores dispongan de mayores niveles de confianza y que los productores y miembros de la cadena compartan mayor cantidad y mejor información sobre los distintos procesos, de forma menos costosa. Además, se reducen riesgos (ya que es más fácil detectar problemas en alguna parte o en alguna actividad de la cadena), se incrementa la eficiencia, se posibilitan mejores condiciones de financiación (por compartir información más fácilmente) y se favorece la creación y la entrada en mercados digitales (Three Points, 2021). Incluso, Blockchain y los *smart contracts* podrían emplazarse como una oportunidad especialmente valiosa que permitiera que pequeños agricultores y cooperativas logran competir en mercados mundiales (Borrero, 2019).

Figura 4

Visibilidad extremo a extremo posibilitada por Blockchain



Fuente: Three Points, 2021

A modo de ejemplificación de las mencionadas ventajas ofrecidas por la tecnología, bien puede mencionarse el caso de IBM Food Trust: la red colaborativa desarrollada por IBM en la cual, mediante la participación de distintos miembros de las cadenas de suministro alimentarias, se mejora la visibilidad, transparencia, trazabilidad y confianza en todo el proceso. Esta red está construida sobre un Blockchain propio de la empresa desarrolladora y “conecta a los participantes a través de un registro autorizado, permanente y compartido de detalles del origen de los alimentos, datos de procesamiento, detalles de envío y más” (IBM, 2018). La red nació como respuesta al pedido de colaboración que Walmart le hizo en 2016 al gigante de la informática, ya que la cadena de supermercados se veía con dificultades a la hora de seguir e identificar el vencimiento de algunos de sus alimentos, por lo cual debía eliminar grandes cantidades de producto. Al lograr desarrollar un sistema que identificara los productos caducados en segundos, IBM decidió enmarcar la solución en una red abierta de trazabilidad de productos alimentarios de la que hoy por hoy forman parte importantes empresas minoristas de todo el mundo. De acuerdo a Martin Hagelstrom, líder de IBM Latin America Blockchain, el verdadero valor de la red está en que posibilita que el ecosistema se conecte, permitiendo que cada miembro decida con qué otros actores comunicarse y a quién dar visibilidad de su información (Datta, 2020).

A pesar los beneficios mencionados anteriormente, es necesario notar que también es posible encontrar desafíos relativos a la utilización de la tecnología en el sector alimentario. Entre éstos puede mencionarse el hecho de que el compartir información se torna más difícil en este ámbito, siendo los distintos actores miembros de las cadenas de suministro muy numerosos y encontrándose los mismos generalmente en ubicaciones físicas distantes. Además, la tecnología todavía tiene un elevado costo y no ha alcanzado los niveles de madurez pretendidos, lo que sería deseable para que la misma pudiese ser implementada más fácilmente en un sector de inmenso tamaño (con

la correspondiente necesidad de almacenamiento y sincronización de datos que esto implica) (Borrero, 2019).

Casos de uso de Blockchain en trazabilidad de productos alimenticios

A continuación, se examinarán los casos de uso más relevante de la tecnología Blockchain por parte de empresas o proyectos pertenecientes al sector alimentario en España. Es necesario realizar la aclaración de que las implementaciones son aún incipientes y distan de ser numerosas. Más aún, las fuentes de información sobre cada caso de uso son escasas y opacas, en el sentido de que no detallan en profundidad la forma elegida para estructurar el sistema. Se entiende que lo anterior podría apuntar a la expresa decisión de no compartir información sensible sobre las operaciones de la empresa que pudiese beneficiar a los competidores. Además, en línea del crecimiento esperado de la tecnología y en su aplicación a procesos de trazabilidad en España, se prevé que varias empresas del sector se encuentren trabajando en implementaciones Blockchain en sus operaciones aunque dichos proyectos se encuentren aún en estado de desarrollo.

Carrefour

Carrefour, la cadena multinacional de distribución oriunda de Francia reconocida internacionalmente por sus hipermercados, es una de las empresas del sector alimentario que hace uso de Blockchain para mejorar sus procesos de trazabilidad y ofrecer un mejor servicio a sus clientes. Para hacerlo, la empresa utiliza la anteriormente mencionada plataforma IBM Food Trust, de la cual es miembro fundador, además de los servicios de IBM y de la empresa gallega Coren. La tecnología, que ya era utilizada en Francia, fue implementada en las instalaciones ubicadas en España en el año 2018, siendo el producto “pollo campero” Calidad y Origen el primer alimento para el cual se ofrece una visualización completa de la cadena de suministro (Food Retail, 2018). Así, mediante un código QR los consumidores pueden informarse acerca de la fecha de nacimiento del animal, el modo de cría, el lugar de ubicación de la granja, el alimento consumido y la fecha de llegada a los almacenes de Carrefour, entre otros.

La compañía menciona que su gracias a la colaboración conjunta con IBM Food Trust se logrará mejorar la información sobre trazabilidad de origen y calidad, sobre las propiedades nutricionales de los productos y reducir los riesgos y el alcance de retiradas de productos en el mercado gracias a compartir información entre distintos miembros de la cadena. Lo que motiva estos desarrollos, de acuerdo a Cosme de Moucheron, Director Gerente responsable del grupo Carrefour, es el hecho de que los consumidores están demandando

cada vez mayores niveles de transparencia sobre los alimentos que adquieren (Carrefour, 2018).

Durante el 2021 la cadena francesa expandió el uso de Blockchain para mejorar procesos de trazabilidad a productos no alimentarios, ofreciendo seguimiento completo de la cadena de suministro de sus productos textiles. Con esto, sus clientes podrán validar que los artículos textiles se hayan producido de forma medioambientalmente responsable. Además, durante el 2022, Carrefour se convirtió en el primer minorista en utilizar la tecnología Blockchain con los productos orgánicos de su propia marca, Carrefour Bio, siendo la naranja de postre de origen español el primer producto en aprovechar los beneficios de la tecnología, la cual se planea extender para todos los productos Bio (Ledger Insights, 2021; Financial Food, 2022).

Figura 5

Naranjas Carrefour Bio con código QR.



Fuente: Financial Food (2022)

Navidul

En el año 2021, Navidul, empresa española de alimentación distinguida por la calidad de sus productos, principalmente por su jamón curado, implementó códigos QR en la vitola de sus paletas ibéricas con la cual pone a disposición de sus clientes información relevante del producto. Esta iniciativa planea replicarse con sus jamones ibéricos en octubre de 2022. Gracias a almacenar y compartir sus datos de producción con la tecnología Blockchain, los clientes de la compañía pueden escanear el QR y acceder a información sobre las distintas empresas que participaron en la producción del artículo que van a consumir, los alimentos que se le han dado al cerdo, el lugar de curado, su peso y la fecha de consumo preferente (Food Retail, 2021).

Además, una encuesta de satisfacción puede encontrarse en el sitio al cual se redirige a los consumidores cuando éstos escanean el código QR de los productos. La finalidad de dicha encuesta es que Navidul logre fortalecer los

vínculos con su clientela. Juana Manso, directora de la Unidad de Negocio de la empresa, menciona que con esta herramienta han “dado un paso más allá al iniciar la incorporación de la tecnología Blockchain a nuestras piezas ibéricas, abriendo dichos procesos a proveedores, clientes y consumidores y favoreciendo mayor transparencia a lo largo de toda la cadena de suministro” (Cordón, 2022).

Figura 6

Procedimiento para acceder a los datos de trazabilidad de productos Navidul.



Fuente: Navidul (s.f.)

Manso además explica que, para poder desarrollar esta implementación, la cual fue posible gracias a la ayuda de Deloitte como socio principal, fue necesaria la colaboración y el trabajo coordinado y sostenido de 10 departamentos de la empresa. Fuertes inversiones debieron realizarse para modificar las líneas de producción para que éstas se adaptaran a las nuevas necesidades de información, lectura, carga de datos y seguimiento (Cordón, 2022):

Los principales cambios que se han introducido son en las operaciones, con la modificación de las líneas de recepción de materia prima y empaquetado, la instalación de antenas de radiofrecuencia, la integración de todos los sistemas de registro de datos o la modificación de los sistemas de impresión para la generación de los códigos QR. Pero, dichos cambios también se han aplicado a las formas de trabajo, con formación a empleados sobre la tecnología y los cambios en la operativa y a proveedores sobre el uso de la plataforma e integración de su información en la cadena de valor. Por último, se han llevado a cabo controles y seguimiento permanente a todas las partes que intervienen en el proyecto para garantizar su aplicación exitosa.

Olivacoin

Olivacoin es un proyecto distinto a los mencionados anteriormente, ya que el mismo se trata un mercado digital de aceite de oliva de alta calidad basado en una criptomoneda sostenida por el propio producto. Esto es, una moneda digital creada a partir de una red Blockchain que es otorgada a los productores de aceite en relación al tipo, cantidad y calidad del producto elaborado. Al momento de realizar una transacción y vender el producto, lo que se comercializa es la criptomoneda, ya que la misma está ligada a un activo subyacente (el aceite).

Esta iniciativa, nacida en la Universidad de Sevilla e integrada por compañías y cooperativas olivareras, tiene como objetivo garantizar la transparencia en los procesos de compraventa de aceite de oliva, evitando el fraude en la información y mejorando la trazabilidad del producto (a nivel de almazara, cultivo y producción). La criptomoneda Olivacoin, entonces, previene que los datos del aceite sean adulterados y garantiza que la información sea veraz e inviolable, asegurando a los compradores que el producto que adquieren es de la más alta calidad y no ha sido falsificado. Esto sucede porque se graban en Blockchain todos los datos del producto (incluyendo el perfil organoléptico, a qué sabe y huele el aceite), previniendo que los mismos sea modificados.

En Olivacoin primero se almacenan datos de trazabilidad del aceite producido por las distintas olivareras y cooperativas para generar un mercado digital de compraventa del producto y luego ofrecer una cobertura de riesgo del precio. El mercado es descentralizado y de escala global, y se destina a unir compradores y vendedores sin intermediarios en un contexto informado acerca de las características del producto comercializado (M2MMARKETPLACE, 2018; Olivacoin, 2018).

Los productores de aceite poseen un hardware conectado a la red Blockchain con el cual se registra en la plataforma la calidad del producto. Luego, gracias a *smart contracts*, los compradores pueden certificar que el aceite adquirido se corresponde con las características publicadas del bien comprado. Además, al utilizar la tecnología de cadenas de bloques, las operaciones de compraventa son automatizadas de forma veraz e incorruptible para mejorar la eficiencia y seguridad del sistema, mientras que el riesgo del precio del aceite anteriormente mencionado puede ser gestionado a partir de un mercado de futuros ofrecido en la plataforma, el cual también hace uso de contratos inteligentes (Valcárcel, 2018).

De acuerdo a miembros del equipo de trabajo que impulsó la plataforma, el lanzamiento de la misma fue arduo debido a la cantidad de actores que entorpecieron el desarrollo de Olivacoin por esperar obtener un beneficio personal y por el poco apoyo recibido por parte de la Administración Central, la cual debería haber promovido la realización de una iniciativa de I+D+i. Finalmente, la presentación oficial de Olivacoin fue realizada en marzo de 2021 en el Colegio de Economistas de Sevilla, luego de que la plataforma formara parte de una Sandbox regulatoria (marco establecido por el regulador que

permite a las empresas emergentes realizar experimentos en un entorno controlado bajo su supervisión) (Chamizo, 2021; EAE Business School, 2021).

Calconut

Calconut es una empresa con sede en Alicante que opera como comercializadora en el mercado de frutos secos desde el año 2005 bajo la mencionada denominación, aunque sus orígenes se remontan hacia décadas anteriores. La compañía, que se dedica a importar y exportar frutos secos, frutas deshidratadas y disecadas y semillas, entre otros productos, la lograda emplazarse durante tres años consecutivos (entre 2016 y 2018) como una de las 1000 empresas de Europa con crecimiento más rápido (Calconut, s.f.).

Calconut se caracteriza por apostar por la innovación, contando con instalaciones (fábrica de procesado, envasado y almacenaje) altamente automatizadas, haciendo uso de sensores que alertan en caso de incidencias. Además, gracias a su departamento de I+D+i, han creado la marca Nut&Me, con la cual venden productos alimenticios online, los cuales en el futuro incluirán alternativas veganas al queso y al chorizo, entre otras. La empresa también demuestra sus cualidades en materia de innovación gracias a la virtualización de sus instalaciones, lo que sirve para que los visitantes que acudan a la sede principal puedan realizar un tour virtual por la planta y conocer los procesos de la empresa con más profundidad (Somos L'Alacantí, 2021; Calconut, s.f.).

La empresa alicantina es también pionera en su sector en cuanto a la aplicación de la tecnología Blockchain, que permite que los clientes comprueben el origen de sus frutos secos, recibiendo información de toda la cadena de suministro, desde la obtención de la materia prima al almacenamiento del producto terminado. La empresa asegura haber implementado la tecnología por los crecientes niveles de concientización de los consumidores respecto de los alimentos que adquieren, necesitando ellos obtener datos confiables acerca de la elaboración ética y responsable de los mismos. Además, el uso de Blockchain les permite reducir los desperdicios de alimentos. Similarmente a otras implementaciones, la forma en la cual los clientes de Calconut pueden acceder al registro inmutable de información acerca de los alimentos que adquieren es mediante el escaneo de un código QR representado en el envase (Europapress, 2021; Calconut, s.f.).

Figura 7

Escaneo con el móvil de código QR en producto de Calconut.



Fuente: Financial Food (2020).

Chain4track

Otra iniciativa que pretende mejorar la trazabilidad alimentaria gracias al uso de la tecnología Blockchain, surgida de la Universidad de Sevilla al igual que Olivacoin, es Chain4track. En este caso, alumnos del MBA de la universidad desarrollaron un servicio basado en las cadenas de bloques para mejorar la visibilidad en la producción de vino (Quirós, 2019).

De acuerdo a Quirós (2019), los alumnos pretenden ofrecer a empresas del sector del vino la herramienta desarrollada para que éstas puedan mejorar sus capacidades de seguimiento de los productos y ofrezcan más y mejor información a los clientes sobre la elaboración de sus vinos. Los clientes podrán acceder a los datos relevantes mediante el escaneo de un código QR ubicado en las botellas. Además, el servicio permitirá detectar de forma más rápida fallos en la producción.

En este marco, los alumnos que están desarrollando Chain4track planean en el futuro ofrecer la herramienta para sectores distintos al vitivinícola: la intención es expandirse a joyas, galerías de arte, aeronáutica, automoción y al área de la responsabilidad social (Martínez, 2019).

Impacto, conclusiones y comentarios finales

Luego de considerar los cambios en casi todos los procesos y actividades de vida que se están produciendo debido a las disrupciones ocasionadas por la Cuarta Revolución Industrial, parece evidente que actualmente el mundo se encuentra en una etapa clave. Tecnologías como Blockchain están modificando las formas en las cuales vivimos, pasamos nuestro tiempo libre, trabajamos,

producimos, consumimos y nos comunicamos. La cadena de bloques específicamente posibilita muchas de estas revoluciones en varios sectores, siendo disruptiva en numerosas industrias. El Foro Económico Mundial incluso considera que Blockchain está dentro de las 6 mega tendencias de software y servicios que cambiarán el mundo en la próxima década (World Economic Forum, 2015).

En relación a la industria alimentaria, en los casos de aplicaciones de Blockchain a procesos de trazabilidad expuestos anteriormente puede evidenciarse la importancia de las ventajas ofrecidas por la tecnología para las empresas del sector. Algunas compañías que producen, importan, exportan y comercializan alimentos ya están en la actualidad aprovechando las posibilidades de contar con más datos, tomar mejores decisiones y disponer de una visibilidad extremo a extremo de la cadena de producción. Además, estas organizaciones también logran contar con una individualización total de los productos que venden (aspecto fundamental en el caso de que se requiera realizar una retirada de artículos por cuestiones sanitarias), posicionarse como empresas más transparentes y responsables y competir en nuevos mercados. Todos estos beneficios, posibilitados o potenciados por el uso de Blockchain en procesos de trazabilidad, resultan en ventajas que se plasman en varios aspectos:

- Se mejora la eficiencia, ya que la inteligencia de la cual dispone cada empresa es mayor, lo que posibilita tomar mejores cursos de acción y solucionar procesos defectuosos.
- Aumenta la rentabilidad, ya que al tomar mejores decisiones se obtienen resultados económicos más favorables.
- Se experimenta un incremento de ingresos, al poder competir en nuevos mercados y atender a una mayor clientela.
- Se posibilita una mejor gestión de marca y posicionamiento, por el mencionado beneficio de que la compañía sea percibida como una organización más transparente.

Para las compañías que no cuentan con un punto de contacto directo con los consumidores finales puede ser muy difícil construir imagen de marca. Blockchain puede aliviar este problema al registrar y hacer visible información de todas las empresas que han participado de la cadena de producción (Spielman, 2021).

Al mismo tiempo, las necesidades de los consumidores están siendo satisfechas en una mayor medida gracias a la implementación de Blockchain. Como se ha mencionado, en los últimos tiempos ha crecido la preocupación y los requerimientos de información por parte de los compradores acerca de los alimentos que adquieren: ¿son los alimentos saludables? ¿dónde fueron cultivadas las materias primas? ¿qué empresas participaron en la cadena productiva? ¿se han cumplido las condiciones de transporte y almacenamiento deseadas? Gracias a la implementación de Blockchain, los consumidores

reciben respuestas confiables de esas preguntas. Con solo escanear un código QR presente en el envasado de cada producto, pueden realizar un seguimiento de los pasos que ha ido atravesando el artículo a medida que pasó el tiempo, hasta el punto de encontrarlo en la góndola del comercio. Incluso, si se han utilizado dispositivos y contratos inteligentes, los compradores podrán saber si los alimentos han sido almacenados a la temperatura indicada y en qué grado han sobrepasado los umbrales mínimos en cada control sanitario.

De esta forma, los consumidores se sienten más a gusto y confían más en los productos que adquieren si es que éstos ofrecen la mencionada información, pudiendo incluso decantarse por una alternativa u otra en la medida en la que puedan comprobar cómo ha sido la cadena productiva de un artículo. Esto es de especial importancia considerando, por ejemplo, que la cantidad de consumidores estadounidenses que cambiarían de marca a aquellas que brindan información más detallada del producto casi se duplicó entre el 2016 y el 2018, mientras que el 71% de los consumidores de todo el mundo están dispuestos a pagar más por las marcas que brindan información transparente (PNUD, 2021). Luego, las empresas que brinden estas posibilidades contarán con una ventaja competitiva frente a aquellas que no puedan ofrecer visibilidad a sus procesos. Algunas de las empresas incluidas en los casos expuestos en el apartado anterior hacen mención explícita del creciente interés de los consumidores sobre los procesos productivos que atravesaron los alimentos, cuestión que impulsó la implementación de Blockchain en sus actividades.

Lo anterior está en concordancia con lo planteado por Garaus y Treiblmaier (2021), autores que encuentran que las empresas minoristas desconocidas por los consumidores se benefician más de la aplicación de la tecnología Blockchain a sus procesos de trazabilidad que aquellas que tienen relación con los clientes. De esta forma, los comercios cuyos clientes cuentan con menores niveles de confianza pueden aprovechar en mayor proporción la implementación de sistemas de trazabilidad basados en la cadena de bloques. Además, en su estudio, Garaus y Treiblmaier concluyen que informar a los consumidores acerca de los beneficios específicos de Blockchain fortalece los efectos positivos de un sistema de trazabilidad construido a partir de la tecnología.

Al implementar Blockchain a las cadenas de suministro en la industria alimentaria también se mejora el bienestar y la seguridad general de la población: como fue mencionado, la tecnología puede disminuir los riesgos sanitarios al permitir identificar y relacionar brotes de enfermedades con las fuentes que las causaron. Por ejemplo, ZetoChain es una herramienta que puede ser aplicada para seguir en tiempo real productos alimenticios que deban ser producidos y almacenados dentro de una cadena de frío, controlando la temperatura y poniendo a disposición de las empresas que forman parte del proceso la información necesaria para que éstas puedan implementar rápidamente acciones reparadoras. Esto facilita el trabajo de las agencias involucradas en el control de riesgos alimentarios, permitiendo que las mismas rastreen y retiren

rápido de la venta los lotes de alimentos adulterados o contaminados (Patelli y Mandrioli, 2020).

Por otro lado, continuar con las aplicaciones de Blockchain al sector alimentario devendrá en beneficios ambientales. De acuerdo al PNUD - Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo- (2021), “las cadenas de suministro agroalimentario contribuyen al 26% de la liberación antropogénica de gases de efecto invernadero mientras utilizan el 50% de la superficie habitable de la Tierra y el 70% del agua dulce” (p.3), mientras que la agricultura es la actividad que más afecta a la pérdida de biodiversidad. En este contexto, en las cadenas de suministro en las que intervengan muchos intermediarios y no cuenten con alta visibilidad se esconden desigualdades y prácticas no sostenibles, las cuales pueden ponerse en manifiesto para los consumidores y la sociedad mediante el uso de tecnología Blockchain.

De todas formas, es importante considerar que, al requerir la participación de todos los actores presentes en la cadena de suministro, las soluciones Blockchain no son siempre fáciles de implementar. Esta participación es generalmente el aspecto más difícil de manejar (incluso más que la tecnología en sí misma), ya que requiere un análisis de los incentivos de los distintos miembros para formar parte del sistema (PNUD, 2021). De esta forma, acordar procesos, incentivos, formas de gobernanza y resolución de conflictos y quién se hace cargo de los costes de la infraestructura para asegurar la suficiente participación de todos los actores relevantes se constituye como uno de los principales desafíos para que las aplicaciones Blockchain en el sector agroalimentario continúen expandiéndose. Incluso, debido a que las cadenas de suministro de alimentos actuales cruzan fronteras entre países, los agentes que deben colaborar para construir cadenas de suministro de alimento seguras y protegidas incluyen a distintos gobiernos nacionales. En este contexto, surgen oportunidades para que nazcan sistemas y modelos de negocios innovadores (Pearson et al., 2019; Garaus y Treiblmaier, 2021).

La multiplicidad de agentes que intervienen en los procesos productivos de alimentos será también clave a la hora de evaluar cómo implementar Blockchain a cadenas de suministro del sector. A la hora de hacerlo, el PNUD (2021) menciona que será importante saber si existe o no un tercero confiable (*Trusted Third Party* - TTP) que pueda verificar las identidades de todos los participantes de la red y otorgue identificadores a las entidades, ubicaciones y productos. Si este TTP puede procesar todas las transacciones por sí mismo sería más eficiente contar con una base de datos centralizada mantenida por esta entidad. Al contrario, si ningún TTP tiene los recursos para procesar y almacenar todas las transacciones, un Blockchain *permissioned* puede estar justificado. Por otro lado, en el caso en el que la cadena de suministro tenga actores desconocidos entre sí, un Blockchain público puede ser la mejor solución.

Otro desafío que será necesario superar apunta a la necesidad actual de establecer estándares comunes que permitan desarrollar más

implementaciones y que, gracias a su interoperabilidad, industrias enteras comiencen a hacer uso de la tecnología. Para ello, debe continuar estudiándose cuál es la forma de estructurar las redes para que la cantidad de transacciones por segundo que puedan ser procesadas no se constituyan como cuellos de botella, cuestión especialmente relevante si se han de utilizar redes Blockchain públicas. Además, la latencia (el tiempo necesario para agregar un bloque a la cadena) debe ser gestionada (Burke, 2019). En este sentido, hay que considerar que, aunque la tecnología Blockchain haya sido investigada frecuentemente en el último tiempo, las aplicaciones de ésta a las cadenas de suministro alimentarias no son comunes y aún hace falta información técnica sobre sus implementaciones (van Hilten, Ongena y Ravesteijn, 2020). Los estándares comunes que se requieren son necesarios ya que permitirán desarrollar una herramienta escalable, la cual necesitará manejar grandes cantidades de datos e incluir a numerosos miembros de la cadena junto con proveedores externos (como compañías de refrigeración, auditoras, compañías etiquetadoras, etc.) (Pearson et al., 2019).

La mencionada particularidad de que las cadenas de suministro en la industria alimentaria incluyen diversos actores no debe perderse de vista, sobre todo al considerar que éstos cuentan con diferentes tamaños, ubicaciones y posibilidades de acceso a recursos. De esta forma, será necesario desarrollar soluciones inclusivas, que no dejen de lado a pequeños productores para quienes sea más difícil afrontar los costes de desarrollos digitales y que no posean las habilidades requeridas para participar. De acuerdo a Pearson et al. (2019), la infraestructura tecnológica requerida para operar y mantener sistemas Blockchain puede prevenir que nuevos usuarios y productores alimentarios accedan al mercado, constituyéndose como una barrera tecnológica a comercializar y reduciendo la competencia. Es necesario entonces resolver estos obstáculos y proveer facilidades a nuevos ingresantes, manteniendo el acceso al Blockchain de forma simple, económica y fácil de implementar y desplegar.

Los desafíos que es necesario superar también incluyen la necesidad del desarrollo de un marco legal que regule estas actividades. De acuerdo a Feng, Wang, Duan, Zhang y Zhang (2020) Blockchain actualmente no cuenta con normas y estándares claros para ser implementado, cuestión necesaria para regular y monitorear la aplicación de la tecnología en una temática de tanta importancia como es la trazabilidad alimentaria.

Por otro lado, de acuerdo a Patelli y Mandrioli (2020), al implementar tecnología Blockchain, el precio de los productos que cuenten con trazabilidad digital puede aumentar. De todas formas, es posible que este aumento de precio sea cubierto por el mercado, ya que existe evidencia de que los consumidores están dispuestos a pagar más dinero por artículos que presenten digitalmente información sobre trazabilidad. Así, se espera que la trazabilidad mediante Blockchain de alimentos sea implementada en mayor medida y beneficie más fuertemente a productos que no compitan en precio. Esto es, las empresas cuya

estrategia de negocio apunte a diferenciarse en calidad, que cuenten con una reconocida marca y un marcado posicionamiento (que apunte a clientes motivados por la seguridad alimenticia y la transparencia de los bienes que compran) serán aquellas que más aprovecharán implementaciones Blockchain en sus procesos de trazabilidad. De hecho, algunos de los casos de uso estudiados anteriormente corresponden a empresas que elaboran productos alimentarios diferenciados y altamente reconocidos por su calidad: el Pollo Campero Calidad y Origen de Carrefour, las paletas y jamones Navidul y los frutos secos de Calconut. Por su parte, OlivaCoin y Chain4track son desarrollos que serán aplicados a productos elaborados por distintas compañías, las cuales muy probablemente apostarán por la estrategia de distinguirse de la competencia ofreciendo una mayor calidad.

Además, por más que Blockchain sea considerado como una tecnología innovadora que puede revolucionar distintas industrias, se necesita una mayor cantidad de casos de uso con los cuales mejorar la comprensión sobre la misma y sus ventajas ofrecidas en materia de trazabilidad alimentaria. Actualmente las investigaciones en el ámbito de la trazabilidad alimentaria carecen de detalles específicos sobre soluciones reales Blockchain. No se cuenta con métodos de evaluación compartidos por todos respecto de las implementaciones de la tecnología, sus principales ventajas y los desafíos que deben enfrentar los investigadores y profesionales del sector alimentario (van Hilten, Ongena y Ravesteijn, 2020; Feng et al., 2020). Además, falta comprensión pública sobre la función y las implicaciones de la tecnología, ya que los consumidores precisan formación sobre qué es posible esperar de soluciones Blockchain, sus formas de uso y limitaciones (Garaus y Treiblmaier, 2021).

En vista de todo lo anterior, es difícil establecer hasta qué punto y de qué forma Blockchain modificará el sector alimentario y, en especial, sus procesos logísticos. De todas formas, se prevén cambios con los cuales en un futuro sea posible desarrollar mejores sistemas de trazabilidad que permitan avanzar desde un estado de datos aislados y manejados de forma interna a bases de datos más abiertas y transparentes. Debido a los considerables desafíos aún existentes, la tecnología no parece ser una solución fácil que modifique rápidamente la existencia de sistemas de trazabilidad opacos, pero no por eso debe perderse de vista el potencial de la herramienta para lograr desarrollar cadenas de suministro transparentes, interoperables y colaborativas (Burke, 2019).

Con la intención de contribuir al entendimiento de la tecnología y de servir como posible incentivo para el desarrollo de redes Blockchain en la industria alimentaria, este Trabajo Fin de Máster detalla el funcionamiento de las cadenas de bloques, sus ventajas y menciona valiosos casos de uso de aplicaciones a procesos de trazabilidad alimentaria. También se marcan los desafíos y limitaciones en la materia, específicamente en cuanto a la dificultad de establecer acuerdos entre los distintos miembros de las cadenas alimentarias y de desarrollar marcos y diseños comunes de desarrollos. Se espera que estos retos puedan ser superados mediante el surgimiento de más aplicaciones y los

aprendizajes que se deriven de ellos. Esto permitiría que en un futuro pueda disponerse de información visible extremo a extremo de las cadenas productivas de un mayor número de los alimentos consumidos y se cuente con marcos normativos actualizados y efectivos que regulen debidamente el uso de la tecnología en un sector tan importante como lo es la industria de los alimentos.

Referencias bibliográficas

AENOR. (s.f.). *ISO 22005: Trazabilidad en la cadena de alimentos*. Recuperado de <https://www.aenor.com/certificacion/alimentacion/trazabilidad#:~:text=ISO%2022005%3A%20Trazabilidad%20en%20la%20Cadena%20de%20Alimentos,-ISO%2022005%3A%20Trazabilidad&text=Esta%20Norma%20Internacional%20establece%20los,largo%20de%20la%20cadena%20alimentaria>.

Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. (2009). *Guía para la aplicación del sistema de trazabilidad en la empresa agroalimentaria*. Recuperado de https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/publicaciones/seguridad_alimentaria/guia_trazabilidad.pdf

Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. (s.f.). *Principios y requisitos generales*. Recuperado de https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/subseccion/principios_y_requisitos.htm

Altertecnica. (s.f.). *Trazabilidad en la industria alimentaria 4.0*. Recuperado de <https://altertecnica.com/trazabilidad-industria-alimentaria-4-0/#>

AMETIC. (2019). *Estado del arte de Blockchain en la empresa española*. Recuperado de https://ametic.es/sites/default/files/informe_el_estado_del_arte_de_blockchain_en_la_empresa_espanola.pdf

Amores Martínez, A. (2020). *Blockchain, algoritmos de consenso*. Recuperado de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/127926/6/aamoresmTFM1220memoria.pdf>

APD. (2021). *Pros y contras de la Cuarta Revolución Industrial*. Recuperado de <https://www.apd.es/ciberindustria-ventajas-desventajas/>

ARC Advisory Group. (2020). *Industrial Blockchain in the food supply chain*. Recuperado de <https://www.arcweb.com/blog/industrial-blockchain-food-supply-chain>

Barleta, E., Pérez, G. y Sánchez, R. (2020). *La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0*. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45454/1/S2000009_es.pdf

- BBVA Research. (2015). *Tecnología de cadena de bloques (blockchain)*. Recuperado de https://www.bbva.com/wp-content/uploads/2015/08/Situacion_Economia_digital_jul-ago15-Cap4.pdf
- Bello, E. (2020). *Smart contracts: qué son, para qué sirven y ventajas*. Recuperado de <https://www.iebschool.com/blog/smart-contract-blockchain-tecnologia/>
- Binance Academy. (2018a). *¿Qué es la minería de criptomonedas?* Recuperado de <https://academy.binance.com/es/articles/what-is-cryptocurrency-mining>
- Binance Academy. (2018b). *Proof of Work (PoW) vs. Proof of Stake (PoS)*. Recuperado de <https://academy.binance.com/es/articles/proof-of-work-vs-proof-of-stake>
- Binance Academy. (2018c). *Delegated Proof of Stake explicada*. Recuperado de <https://academy.binance.com/es/articles/delegated-proof-of-stake-explained>
- Bogdanov, D. (2021). *Proof of Authority explained*. Recuperado de <https://limechain.tech/blog/proof-of-authority-explained/>
- Borrero, J. D. (2019). Sistema de trazabilidad de la cadena de suministro agroalimentario para cooperativas de frutas y hortalizas basado en la tecnología Blockchain. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 95, 71-94.
- British Retail Consortium. (2018). *Norma mundial de seguridad alimentaria: Edición 8*. Londres.
- Burke, T. (2019). Blockchain in food traceability. En McEntire, J. y Kennedy, A. W. (Eds.), *Food Traceability from binders to blockchain* (pp. 133-143). Springer.
- Calconut. (s.f.). *Sobre nosotros*. Recuperado de <https://www.calconut.com/sobre-nosotros/>
- Calvo, L. (2022). *¿Qué es un código QR y cómo funciona?* Recuperado de <https://es.godaddy.com/blog/que-es-un-codigo-qr-y-como-funciona/>
- Cañizares Sevilla, E., Ortiz Berrocal, F. y López Infante, M.I. (2019). *Introducción a la trazabilidad en la industria agroalimentaria*. Recuperado de http://coli.usal.es/web/Guias/pdf/Intro_Traza_indus_Agroali_andalucia.pdf
- Carrefour. (2018). *Food traceability: Carrefour, a blockchain pioneer in Europe, has joined the IBM Food Trust platform to take action on a global scale*. Recuperado de https://www.carrefour.com/sites/default/files/2019-12/carrefour_press_release_81018_eng.pdf

- Chamizo, H. (2021). *Así se ha creado el primer mercado de derivados del aceite de oliva virgen: "Hemos tenido todos los obstáculos habidos y por haber de la Administración"*. Recuperado de <https://www.businessinsider.es/ha-creado-mercado-derivados-aceite-oliva-virgen-830679>
- CincoDías. (2021). *El 'Blockchain' generará un impacto de más de 20.000 millones en España en 2030*. Recuperado de https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/04/10/companias/1618078216_033474.html
- Conexión ESAN. (2019). *Blockchain pública vs privada: ¿cuál es la diferencia?* Recuperado de <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/blockchain-publica-vs-privada-cual-es-la-diferencia-1>
- Cordón, N. (2022). *Ibéricos con sabor a 'Blockchain'*. Recuperado de <https://www.ciospain.es/industria-y-utilities/ibericos-con-sabor-a-blockchain>
- Cryptopedia. (2021). *What are Proof of Stake and Delegated Proof of Stake?* Recuperado de <https://www.gemini.com/cryptopedia/proof-of-stake-delegated-pos-dpos>
- Curran, B. (2018). *What is Proof of Elapsed Time consensus? (PoET). Complete beginner's guide*. Recuperado de <https://blockonomi.com/proof-of-elapsed-time-consensus/>
- Datta. (2020). *¿Cómo nació Food Trust? La red alimentaria de IBM que busca sustentabilidad con Blockchain*. Recuperado de <https://datta.com.ec/articulo/como-nacio-food-trust-la-red-alimentaria-de-ibm-que-busca-sustentabilidad-con-blockchain>
- De Luca, C. J. (2008). *Trazabilidad* (tesis de grado). Universidad Nacional de Luján, Luján, Argentina.
- Deloitte. (2017). *Using blockchain to drive supply chain innovation*. Recuperado de <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/operations/articles/blockchain-supply-chain-innovation.html>
- Deloitte. (s.f. a). *¿Qué es la Industria 4.0?* Recuperado de <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html>
- Deloitte. (s.f. b). *El futuro de la industria alimentaria: Blockchain para mejorar la trazabilidad y la valorización de la cadena alimentaria*. Recuperado de <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/strategy/articles/futuro-industria-agroalimentaria.html>
- Deloitte. (s.f. c). *Blockchain's potential for consumer products companies*. Recuperado de <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/consumer-industrial-products/articles/blockchain-in-the-consumer-products-industry.html>

- Deloitte Insights. (2018). *La cuarta revolución industrial está aquí - ¿está usted preparado?* Recuperado de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uy/Documents/human-capital/Revoluci%C3%B3n%204.0.pdf>
- DENSO. (2018). *Usando código QR Códigos a Enlace cadena de bloques con físico cosas.* Recuperado de <https://thecores.denso.com/en/block-chain01/>
- Digitales. (2020). *Industria 4.0.* Recuperado de <https://www.digitales.es/wp-content/uploads/2020/04/INDUSTRIA-4.0-web-spread.pdf>
- EAE Business School. (2021). *Sandbox regulatorio: definición y tipos.* Recuperado de <https://retos-directivos.eae.es/sandbox-regulatorio-definicion-tipos/#:~:text=El%20sandbox%20regulatorio%20es%20un,en%20el%20C3%A1mbito%20de%20Fintech>
- Eitfood. (2021). *How can digital traceability increase trust in the agrifood industry?* Recuperado de <https://www.eitfood.eu/blog/how-can-digital-traceability-increase-trust-in-the-agrifood-industry>
- Elika. (2019). *Trazabilidad.* Recuperado de <https://seguridadalimentaria.elika.eus/trazabilidad/#1533040540030-470ee26e-3234>
- Ene, C. (2013). The relevance of traceability in the food chain. *Economics of Agriculture*, 60(2), 287-297.
- Europapress. (2021). *La española Calconut implanta la tecnología 'Blockchain' para garantizar la trazabilidad de sus productos.* Recuperado de <https://www.europapress.es/economia/noticia-espanola-calconut-implanta-tecnologia-blockchain-garantizar-trazabilidad-productos-20210412161919.html>
- Financial Food. (2020). *Calconut invierte en tecnología Blockchain.* Recuperado de <https://financialfood.es/calconut-invierte-en-tecnologia-blockchain/>
- Financial Food. (2022). *Carrefour implanta la tecnología Blockchain en sus productos bio.* Recuperado de <https://financialfood.es/carrefour-implanta-la-tecnologia-blockchain-con-sus-productos-bio/>
- Feng, H., Wang, X., Duan, Y., Zhang, J. y Zhang, X. (2020). *Applying blockchain technology to improve agri-food traceability: A review of development methods, benefits and challenges.* Recuperado de <https://uobrep.openrepository.com/bitstream/handle/10547/623900/Applying%20blockchain%20technology%20to%20improve%20agri-food%20traceability%20-%20final%20accepted%20version.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Fernández Espinosa, L. (2019). *Qué son los 'smart contracts' o contratos inteligentes.* Recuperado de <https://www.bbva.com/es/smart-contracts-los-contratos-basados-blockchain-no-necesitan-abogados/>

- Food Retail. (2018). *Carrefour lanza en España el primer Blockchain alimentario*. Recuperado de https://www.foodretail.es/retailers/carrefour-blockchain-pollo_0_1275172480.html
- Food Retail. (2021). *Navidul implanta Blockchain al jamón ibérico: así es la tecnología que se extiende en la alimentación*. Recuperado de https://www.foodretail.es/food/navidul-blockchain-jamon-tecnologia-alimentacion_0_1610838933.html
- Food Standards Agency. (2002). *Traceability in the food chain, a preliminary study*. Recuperado de https://www.quiveter.com/ftp_public/articulo361.pdf
- Frankenfield, J. (2022). *Proof of Elapsed Time (PoET)*. Recuperado de [https://www.investopedia.com/terms/p/proof-elapsed-time-cryptocurrency.asp#:~:text=Proof%20of%20elapsed%20time%20\(PoET\)%20is%20a%20consensus%20algorithm%20developed,every%20node%20the%20same%20chance](https://www.investopedia.com/terms/p/proof-elapsed-time-cryptocurrency.asp#:~:text=Proof%20of%20elapsed%20time%20(PoET)%20is%20a%20consensus%20algorithm%20developed,every%20node%20the%20same%20chance)
- Garaus, M. y Treiblmaier, H. (2021). The influence of blockchain-based food traceability on retailer choice: The mediating role of trust. *Food Control*, 129, 108082.
- Gaur, V. y Gaiha, A. (2020). *Building a transparent supply chain*. Recuperado de <https://hbr.org/2020/05/building-a-transparent-supply-chain>
- Geroni, D. (2021). *Hybrid Blockchain: The best of both worlds*. Recuperado de <https://101blockchains.com/hybrid-blockchain/>
- Gómez, I. (2020). *Algoritmos de consenso: prueba de trabajo vs. prueba de participación*. Recuperado de <https://www.criptonoticias.com/tecnologia/algoritmos-consenso-prueba-trabajo-vs-prueba-participacion/>
- Gómez García, J. (2019). *El origen de Bitcoin y Blockchain, ¿inventados desde cero por un desconocido?* Recuperado de <https://santanderglobaltech.com/origen-bitcoin-blockchain-inventados-desde-cero-por-un-desconocido/>
- Gupta, M. (2017). *Blockchain for dummies, IBM limited edition*. Hoboken, New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Guzewich, J. y Miller, B. (2019). Public health. En McEntire, J. y Kennedy, A. W. (Eds.), *Food Traceability from binders to blockchain* (pp. 1-12). Springer.
- Hernández San Juan, I. (2019). Tecnología Blockchain y regulación de la trazabilidad: la digitalización de la calidad y seguridad alimentarias. *Revista General de Derecho de los Sectores Regulados: RSR*, (4), 1-29.
- Iberdrola. (s.f. a). *Industria 4.0: ¿qué tecnologías marcarán la Cuarta Revolución Industrial?* Recuperado de <https://www.iberdrola.com/innovacion/cuarta-revolucion-industrial>

- Iberdrola. (s.f. b). *'Smart contracts': contratos inteligentes para formalizar acuerdos en la era digital.* Recuperado de <https://www.iberdrola.com/innovacion/smart-contracts>
- IBM. (2018). *IBM Food Trust can help organizations transform global food safety.* Recuperado de <https://www.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=899/ENUSLP18-0418&infotype=AN&subtype=CA>
- IBM. (s.f. a). *¿Qué es la tecnología de blockchain?* Recuperado de <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-blockchain>
- IBM. (s.f. b). *Benefits of blockchain.* Recuperado de <https://www.ibm.com/topics/benefits-of-blockchain>
- Jiménez, D. (2019). *¿Cuántos algoritmos de consenso existen para las Blockchain?* Recuperado de <https://es.cointelegraph.com/news/cuantos-algoritmos-de-consenso-existen-para-las-blockchain>
- Keene, M. (2021). *How technology is changing traceability and safety.* Recuperado de <https://foodindustryexecutive.com/2021/01/how-technology-is-changing-traceability-and-safety/>
- Koksal, I. (2019). *The benefits of applying Blockchain technology in any industry.* Recuperado de: <https://www.forbes.com/sites/ilkerkoksal/2019/10/23/the-benefits-of-applying-blockchain-technology-in-any-industry/?sh=733e6ec749a5>
- Lage Serrano, O. (2021). *Blockchain y la trazabilidad en la Industria 4.0.* Recuperado de <https://industrytalks.es/icriteria-blockchain-y-la-trazabilidad-en-la-industria-4-0/>
- Lawson, D. (2021). *The growing impact of traceability in food supply chains.* Recuperado de <https://www.supplychainbrain.com/blogs/1-think-tank/post/33629-the-growing-impact-of-traceability-in-food-supply-chains>
- Ledger Insights. (2021). *Carrefour expands blockchain traceability to textile products.* Recuperado de <https://www.ledgerinsights.com/carrefour-expands-blockchain-traceability-to-textile-products/>
- Ley 28/2015, de 30 de julio, para la defensa de la calidad alimentaria. *Boletín Oficial del Estado*, 182, de 31 de julio de 2015. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-8563
- Linares Barbero, M. (2018). Trazabilidad con Blockchain. *Hacia la transformación digital. Actas del I Congreso Internacional de Ingeniería de Sistemas*, 99-106. Recuperado de http://200.11.53.159/bitstream/handle/ulima/8748/ponencia_04-Linares.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Macsa. (2022). *Beneficios de la tecnología Blockchain en la trazabilidad de las cadenas de suministro.* Recuperado de <https://www.macsa.com/blog/beneficios-de-la-tecnologia-blockchain-en-la-trazabilidad-de-las-cadenas-de-suministro/>

- Maestre, R. J. (2018). *Blockchain en el sector de la logística: trazabilidad y transparencia*. Recuperado de <https://www.iebschool.com/blog/blockchain-logistica/>
- Maldonado, J. (2020). *¿Qué es la Proof of Stake (PoS)?* Recuperado de <https://es.cointelegraph.com/explained/what-is-the-proof-of-stake-pos>
- MAPFRE. (2020). *Blockchain será clave para la seguridad alimentaria*. Recuperado de: <https://www.mapfre.com/actualidad/innovacion/seguridad-alimentaria-blockchain/>
- Martínez, M. E. (2019). *Chain4track: Tecnología Blockchain para seguir la trazabilidad del vino en España*. Recuperado de <https://www.diariobitcoin.com/paises/europa/espana/chain4track-tecnologia-blockchain-para-seguir-la-trazabilidad-del-vino-en-espana/>
- McEntire, J. (2019). Introducing the drivers and complexities to tracing foods. En McEntire, J. y Kennedy, A. W. (Eds.), *Food Traceability from binders to blockchain* (pp. 1-12). Springer.
- Medium. (2021). *Blockchain smart contracts and their use cases*. Recuperado de <https://medium.com/geekculture/blockchain-smart-contracts-and-their-use-cases-d2544032fd52>
- Molano, N. A. (2019). *Claves para entender la tecnología 'Blockchain'*. Recuperado de <https://www.bbva.com/es/claves-para-entender-la-tecnologia-blockchain/>
- Mondragón Tenorio, E. (2021). *Advantages and disadvantages of Blockchain*. Recuperado de <https://www.bbva.ch/en/news/advantages-and-disadvantages-of-blockchain/>
- Montet, D. y Dey, G. (2018). *History of food traceability*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/325247189_History_of_food_traceability
- Navidul. (s.f.). *Trazabilidad jamón en Blockchain*. Recuperado de <https://www.navidul.es/es/trazabilidad-jamon-blockchain/>
- Olea, N. y Vega, D. (2018). *El rol de Blockchain en la Cuarta Revolución Industrial*. Recuperado de <https://www.delineandoestrategias.com.mx/blog-de/el-rol-de-blockchain-en-la-cuarta-revolucion-industrial>
- Parizo, C. (2021). *What are the 4 different types of Blockchain technology?* Recuperado de <https://www.techtarget.com/searchcio/feature/What-are-the-4-different-types-of-blockchain-technology>
- Patelli, N. y Mandrioli, M. (2020). Blockchain technology and traceability in the agrifood industry. *Journal of food science*, 85(11), 3670-3678.
- Patil, P., Sangeetha, M. y Bhaskar, V. (2021). *Blockchain for IoT access control, security and privacy: A review*. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/346542241_Blockchain_for_IoT_Access_Control_Security_and_Privacy_A_Review

- Pavlović, A. (2017). *What is BRC? Global food safety standard explained*. Recuperado de <https://www.ideagen.com/thought-leadership/blog/what-is-brc-global-food-safety-standard-explained>
- Pearson, S., May, D., Leontidis, G., Swainson, M., Brewer, S., Bidaut, L., Frey, J., Parr, G., Maull, R. y Zisman, A. (2019). Are distributed ledger technologies the panacea for food traceability? *Global food security*, 20, 145-149.
- Perasso, V. (2016). *Qué es la cuarta revolución industrial (y por qué debería preocuparnos)*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37631834>
- PNUD. (2021). *Blockchain for agri-food traceability*. Recuperado de <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2021-11/UNDP-Blockchain-for-Agri-Food-Traceability.pdf>
- Pontius, N. (2022). *What are RFID tags? Learn how RFID tags work, what they're used for, and some of the disadvantages of RFID technology*. Recuperado de <https://www.camcode.com/blog/what-are-rfid-tags/>
- PwC. (s.f. a). *Time for trust: How blockchain will transform business and the economy*. Recuperado de <https://www.pwc.com/gx/en/industries/technology/publications/blockchain-report-transform-business-economy.html>
- PwC. (s.f. b). *Blockchain ya está aquí. ¿Tienes claro tu próximo paso?* Recuperado de <https://www.pwc.es/es/digital/blockchain-proximo-paso.html>
- Quirós, F. (2019). *Chain4track: Impulsan el uso de blockchain en España para certificar la producción de vino*. Recuperado de <https://es.cointelegraph.com/news/chain4track-the-use-of-blockchain-to-certify-the-production-of-wine-is-promoted-in-spain>
- Ramos, D. (2021). *Blockchain: la revolución de la certificación y la trazabilidad*. Recuperado de <https://www.silicon.es/blockchain-revolucion-certificacion-trazabilidad-2438442>
- Rawat, S. (2021). *Hybrid Blockchain: Working and benefits*. Recuperado de <https://www.analyticssteps.com/blogs/hybrid-blockchain-working-and-benefits>
- ReadBTC. (s.f.). *Public, private and hybrid Blockchain explained*. Recuperado de <https://www.readbtc.com/blockchain-101/public-private-hybrid-blockchains>
- Reglamento (CE) nº 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos

generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 31/1, de 1 de febrero de 2002. <https://www.boe.es/doue/2002/031/L00001-00024.pdf>

Rodríguez, A. (2019). ¿Qué es un algoritmo de consenso? Recuperado de <https://adr-rod87.medium.com/qu%C3%A9-es-un-algoritmo-de-consenso-ea1d8e99f348>

Ruiz Villar, I. (2019). *Industria alimentaria 4.0 (ii): Blockchain*. Recuperado de https://alimentandolainocuidad.com/industria-alimentaria-4-0-ii-blockchain/#Smart_contracts

Singh, J. (2021). *Private, public and consortium blockchains: The differences explained*. Recuperado de <https://cointelegraph.com/explained/private-public-and-consortium-blockchains-the-differences-explained>

Somos L'Alacantí. (2021). *Calconut, una empresa del futuro, hoy en Mutxamel*. Recuperado de: <https://somoslacanti.com/2021/10/19/noticias-mutxamel/calconut-empresa-frutos-secos/>

Southall, M. (2019). Industry benefits. En McEntire, J. y Kennedy, A. W. (Eds.), *Food Traceability from binders to blockchain* (pp. 1-12). Springer.

Spielman, S. (2021). *Using Blockchain to track transparently*. Recuperado de <https://www.foodengineeringmag.com/articles/99285-using-blockchain-to-track-transparently>

Swan, M. (2017). *Anticipating the economic benefits of Blockchain*. Recuperado de https://www.timreview.ca/sites/default/files/Issue_PDF/TIMReview_October2017.pdf#page=6

Tavira, J. (2019). *El concepto de consenso en Blockchain, su relevancia y consecuencias*. Recuperado de <https://santanderglobaltech.com/concepto-consenso-blockchain-relevancia-consecuencias/#:~:text=En%20Blockchain%20un%20algoritmo%20de,todos%20los%20nodos%20deben%20seguir>

Thomas Signe. (2021). *Smart contracts en Latinoamérica: Blockchain a otro nivel*. Recuperado de <https://www.thomas-signe.com/blog/smart-contracts-en-latinoamerica-el-blockchain-a-otro-nivel>

Three Points. (2021). *Aplicaciones de Blockchain en la industria alimentaria. Trazabilidad, calidad y gestión de productos*. Recuperado de <https://www.threepoints.com/blog/aplicaciones-de-Blockchain-en-la-industria-alimentaria>

Unnikrishnan, S., von Koeller, E., Mutz, M., Fovargue, H y Yong, K. (2021). The time is ripe for food traceability. Recuperado de <https://www.bcg.com/publications/2021/food-traceability>

- Valcárcel, M. (2018). *Olivacoin, la innovadora alternativa 4.0 al mercado de futuros del aceite de oliva*. Recuperado de <https://www.mercacei.com/noticia/48779/actualidad/olivacoin-la-innovadora-alternativa-4.0-al-mercado-de-futuros-del-aceite-de-oliva.html>
- Valente, M. (2019). *What is Proof of Authority?* Recuperado de <https://www.coinhouse.com/learn/what-is-proof-of-authority/>
- van Hilten, M., Ongena, G. y Ravesteijn, P. (2020). Blockchain for organic food traceability: case studies on drivers and challenges. *Frontiers in Blockchain*, 3, 1-13.
- Wang, S., Li, D., Zhang, Y. y Chen, J. (2019). Smart contract-based product traceability system in the supply chain scenario. *IEEE Access*, 7, 115122-115133.
- Wattanajantra, A. (2019). *How blockchain traceability can improve supply chain management*. Recuperado de <https://www.sage.com/en-gb/blog/blockchain-traceability-supply-chain/>
- Wegrzyn, K. E. y Wang, E. (2021). *Types of Blockchain: public, private, or something in between*. Recuperado de <https://www.foley.com/en/insights/publications/2021/08/types-of-blockchain-public-private-between>
- World Economic Forum. (2015). *Survey report: Deep shift. Technology tipping points and societal impact*. Recuperado de https://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf
- World Economic Forum. (2019). *Innovation with a purpose: Improving traceability in food value chains through technology innovations*. Recuperado de https://www3.weforum.org/docs/WEF_Traceability_in_food_value_chains_Digital.pdf
- WTW. (2022). *Tips para adaptar tu empresa a la Industria 4.0*. Recuperado de <https://willistowerswatsonupdate.es/talento-y-retribucion/tips-adaptar-tu-empresa-industria-4-0/>

Webgrafía

- M2MMARKETPLACE. (2018, 24 de octubre). *Mercado digital Olivacoin trim*. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/Ebxgu1Z0Aek>
- Olivacoin (2018, 24 de julio). *Olivacoin - Noticias Canal Sur*. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/zJuiQKuJQJs>
- Simply Explained. (2017a, 13 de noviembre). *Cómo funciona una blockchain - Explicado de forma sencilla*. [Video]. YouTube. https://youtu.be/SSo_ElwHSd4
- Simply Explained. (2017b, 20 de noviembre). *Contratos inteligentes - explicación básica*. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/ZE2HxTmxfrl>

99Bitcoins. (2019, 28 de mayo). *What is Blockchain? Blockchain technology explained simply*. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/2yJqjTiwpXM>