

Cadena de suministro de semiconductores

Semiconductor Supply Chain

César Valdés

Universidad de Panamá, Facultad de Administración de Empresas y Contabilidad, Panamá

Correo: cesar.valdes@up.ac.pa  <https://orcid.org/0009-0008-0897-6047>

Recibido: 22-7-2024

Aprobado: 21-10-2024

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.faeco.v8n1.a6444>

RESUMEN

Con el objetivo de establecer los procesos necesarios para la producción y distribución eficiente de semiconductores, el estudio explica la evolución y los riesgos de la cadena de suministro global de semiconductores, considerada una industria esencial en la era digital. Se analiza cómo la globalización y la regionalización han impactado la producción y distribución de chips, destacando los retos actuales como la escasez de materiales y la sostenibilidad. Se utilizó un enfoque cualitativo y documental, basado en la revisión de literatura académica y fuentes especializadas sobre la cadena de suministro de semiconductores que explican el tema desde sus inicios hasta el presente, permitiendo resumir el proceso hasta la actualidad. El artículo identificó cinco situaciones críticas principales: la escasez global de chips, la de materiales críticos, las tensiones geopolíticas, los ciclos de vida cortos y la necesidad de sostenibilidad, mostrando la digitalización y diversificación como soluciones para afrontar las situaciones críticas. Se concluye que la cadena de suministro de semiconductores está en una fase crítica de transformación impulsada por la tecnología y las tensiones políticas, visionado la diversificación regional y la sostenibilidad para asegurar su futuro.

Palabras clave: semiconductores, cadena de suministro, escasez de chips, globalización logística, producción eficiente.

ABSTRACT

With the aim of establishing the processes necessary for the efficient production and distribution of semiconductors, the study explains the evolution and risks of the global semiconductor supply chain, considered an essential industry in the digital age. It analyzes how globalization and regionalization have impacted chip production and distribution, highlighting current challenges such as material shortages and sustainability. A qualitative and documentary approach was used, based on the review of academic literature and specialized sources on the semiconductor supply chain that explain the topic from its beginnings to the present, allowing to summarize the process up to the present. The article identified five main critical situations: the global shortage of chips, the shortage of critical materials, geopolitical tensions, short life cycles and the need for sustainability, showing digitalization and diversification as solutions to face critical situations. It concludes that the semiconductor supply chain is in a critical phase of transformation driven by technology and political tensions, envisioning regional diversification and sustainability to ensure its future.

Keywords: semiconductors, supply chain, chip shortage, logistics globalization, efficient production.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, y como consecuencia directa de la globalización de las relaciones comerciales, las cadenas de suministro globales se han consolidado como la columna vertebral de la economía moderna, impulsadas por el crecimiento exponencial de la demanda tecnológica (Millar, 2015). Un ejemplo paradigmático es el *iPhone*, diseñado en Estados Unidos; el disparador de su comercialización es la demanda mundial medida en miles de millones de unidades que deben ser realizadas en la forma más eficiente para distribuirse a los mercados globales.

Este caso en particular, la cadena inicia con la extracción de minerales raros solo presentes en África, lo cual representa una ventaja comparativa para los países de este continente. El *iPhone* está fabricado en China, compuesto por una serie de componentes que provienen de todo el mundo (Barboza, 2016), recorriendo un largo camino hasta las manos del consumidor final, completándose de esta forma la cadena de suministro global, lo que ayuda a visualizar cómo los dispositivos tecnológicos dependen de una compleja red logística que atraviesa continentes para garantizar la entrega oportuna de productos.

En este contexto, la cadena de suministro de semiconductores tiene una relevancia muy particular, porque son esenciales para la producción de dispositivos electrónicos y su escasez ha generado los denominados 'cuellos de botella' o crisis de semiconductores que se vivieron recientemente en diversas industrias, como la automotriz (Forbes, 2024), la tecnológica y la de comunicaciones (Mohammad *et al.*, 2022).

La interrupción de esta cadena no solo ha afectado a la producción de bienes de consumo, sino que también ha desencadenado un aumento en los costos y retrasos en la entrega de los productos (Frieske & Stieler, 2022). En términos simples, una cadena de suministro global es una red compleja de empresas, personas, actividades, información y recursos que trabajan juntos para mover un producto desde su origen hasta el consumidor final; estas cadenas se extienden a través de las fronteras nacionales, involucrando a múltiples países y a todos los continentes.

Como se ha podido analizar en la descripción anterior, cada cadena representa la receta logística con la cual la empresa se posiciona a nivel internacional y se mantiene en el mercado. La palabra clave es la eficiencia, basada en la coordinación y sincronización de actividades a lo largo de estas etapas, donde las empresas utilizan tecnología avanzada como sistemas de gestión de la cadena de suministro y el análisis de datos para optimizar procesos, reducir costos y mejorar la previsibilidad. Sin embargo, la cadena de suministro de semiconductores se ha enfrentado a una serie de desafíos considerables: la escasez de materiales como el coltán (Salazar & Carlos, 2014), las interrupciones logísticas globales causadas por la pandemia de Covid-19 y la falta de sincronización entre los actores involucrados en la producción, transporte y distribución.

La interrupción de la cadena de suministro impacta negativamente la fabricación de bienes de consumo, una situación que genera el incremento en los costos y provoca demora en la entrega de los productos que son esenciales para sostener el dinamismo comercial en la era digital (PMT, 2024). Estos problemas han evidenciado la necesidad de mantener una mayor eficiencia y coordinación a lo largo de la cadena para garantizar la estabilidad del mercado y mantener la competitividad.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es establecer los procesos necesarios para la producción y distribución eficiente de semiconductores. De esta forma se abordan las fases clave de la cadena de suministro, identificando los factores presentes y su integración, lo que guiará en su contribución al desarrollo de un mercado más resiliente y preparado para afrontar las futuras crisis en la cadena de suministro global.

METODOLOGÍA

El estudio tiene un enfoque documental y analítico centrado en la revisión de fuentes secundarias sobre la cadena de suministro de semiconductores, mediante una investigación de tipo exploratoria y descriptiva, orientada a identificar y analizar las dinámicas globales de producción, distribución y desafíos asociados a esta industria. El alcance es global, dado que la industria de semiconductores conlleva una red interconectada de países y regiones, con énfasis en los aspectos económicos, tecnológicos y geopolíticos que afectan su funcionamiento.

Para delimitarlo geográfica y temporalmente, se ubicó a nivel global, por ser necesario situar un contexto de las regiones que participan en la producción de semiconductores como Asia (especialmente Taiwán, Corea del Sur y Japón), Estados Unidos y Europa. Temporalmente, el análisis abarca desde los inicios de la industria a mediados del siglo XX hasta la actualidad, con especial atención en los avances más recientes y lo que depara el futuro, cubriendo los primeros desarrollos. Los datos se obtuvieron a través de una revisión de las fuentes encontradas a través de Google Académico, para extraer información relevante de fuentes secundarias, dándole un enfoque comparativo y crítico de las tendencias y desafíos actuales en la cadena de suministro, que se expone mejor de manera cualitativa.

Para la obtención de los datos se recurrió a la revisión y análisis de 56 fuentes secundarias mediante Google Académico; realizando la búsqueda según títulos y luego, revisando los resúmenes, se alcanzó un total de 25 fuentes definitivas. Entre las principales están artículos de investigación académica como los de Bigliardi *et al.* (2022) y Lu *et al.* (2023), informes de la industria (PMT, 2024; Forbes, 2024) y reportes especializados de impacto geopolítico y económico (Junior *et al.*, 2023). También se consultaron estudios de caso y análisis sectoriales que describen la evolución y lo que afronta la cadena global de suministro de semiconductores (Barboza, 2016; Shih, 2020).

RESULTADOS

Una cadena de suministro es un sistema completo de producción y distribución de un bien, desde la extracción de las materias primas hasta la entrega del producto final al consumidor. En el caso de la industria de los semiconductores es algo muy complejo, porque contiene numerosas etapas y procesos que suelen llevarse a cabo en diferentes países, lo que aumenta el riesgo para el establecimiento óptimo de la cadena, basado en los costos y actividades que ineludiblemente deben ser realizadas para su logro.

Los semiconductores son componentes básicos para la tecnología moderna, siendo utilizados en productos que van desde teléfonos inteligentes hasta los automóviles eléctricos. Su producción requiere de una coordinación precisa y una mejora constante de la cadena de suministro para garantizar la eficiencia y la calidad de los productos finales.

Tal como se observó en la introducción, desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje final del chip, la producción de un semiconductor (con la fabricación de obleas de silicio la fotolitografía, el grabado y ensamblaje final) se lleva a cabo de manera globalizada. Según Gereffi (2020), la estructura de esta producción es la que ha permitido a las empresas reducir costos de manufactura al aprovechar las ventajas comparativas de diferentes regiones, pero también ha creado vulnerabilidades en el sistema debido a la interdependencia entre los mercados internacionales.

Esta interconexión mundial trae consigo riesgos para el establecimiento óptimo de la cadena de suministro, basados en los costos y actividades necesarios para su éxito, como el transporte internacional, el almacenamiento temporal en distintos puntos de la cadena y los regímenes aduaneros que varían según la jurisdicción. La complejidad inherente a las cadenas de suministro globales, especialmente en los sectores tecnológicamente avanzados como el de los semiconductores, aumenta la exposición a interrupciones por conflictos geopolíticos, pandemias o restricciones logísticas (PWC, 2022).

En este sentido, la evolución de la cadena de suministro de semiconductores a nivel global ha pasado por etapas de crecimiento y adaptación constantes, desde los primeros días de la fabricación localizada hasta el actual ecosistema internacional. Las principales empresas del sector, como TSMC, Samsung e Intel, han establecido plantas de producción en múltiples continentes para garantizar una mayor flexibilidad y responder a las demandas del mercado (Gereffi, 2020; PWC, 2022).

Transición al estado actual

La cadena de suministro de semiconductores ha experimentado una evolución exponencial, influenciada por los avances tecnológicos, los cambios en la demanda del mercado y las tensiones geopolíticas, similar a otros sectores globalizados. Desde sus inicios en la primera mitad del siglo XX, la industria ha pasado de la producción de materiales semiconductores básicos a la creación de componentes avanzados considerados esenciales para la tecnología actual. Este desarrollo tuvo un punto de inflexión en 1947 cuando William Shockley junto con John Bardeen y Walter Brattain, inventaron el transistor en los Laboratorios Bell, lo que revolucionó la electrónica y marcó el inicio de la era moderna de los semiconductores (Lojek, 2007).

A lo largo de las décadas de 1950 y 1960, la producción de semiconductores se centró en la fabricación de transistores y circuitos integrados (IC). La empresa Fairchild Semiconductor, fundada en 1957, fue una de las pioneras en la comercialización de los primeros IC, permitiendo una mayor miniaturización y un aumento en la eficiencia de los dispositivos electrónicos que sentó las bases para el crecimiento explosivo de la industria en las décadas posteriores, cuando se inició la integración de los semiconductores en productos de consumo masivo como computadoras, teléfonos y a automóviles (Riordan & Hoddson, 1997).

Los primeros semiconductores surgieron durante la Segunda Guerra Mundial, cuando los diodos y transistores fueron desarrollados para aplicaciones militares, mejorando significativamente la comunicación y el radar, marcando el comienzo de una nueva era tecnológica. El transistor inventado en 1947 reemplazó los tubos de vacío con una alternativa más pequeña y eficiente para la amplificación y el control de las señales

eléctricas (Riordan & Hoddeson, 1997). Esta innovación abrió las puertas a la miniaturización de los dispositivos electrónicos, sentando las bases para lo que más tarde se convertiría en la revolución de los circuitos integrados.

La invención del circuito integrado (IC) en la década de 1960 por ingenieros como Jack Kilby en *Texas Instruments* y Robert Noyce en *Fairchild Semiconductor*, marcó el siguiente paso en la evolución de los semiconductores (Bassett, 2002), un avance que permitió integrar varios transistores y otros componentes electrónicos en un solo chip de silicio, revolucionando la industria al permitir la creación de dispositivos más pequeños y potentes. A partir de la década de 1970, Asia, especialmente en países como Japón, Taiwán y Corea del Sur, surgió como un centro clave de fabricación de semiconductores, impulsado por políticas gubernamentales favorables y una mano de obra más barata, consolidando su papel en la cadena de suministro global de la industria (Junior *et al.*, 2003).

Durante las décadas de 1970 y 1980, la industria de semiconductores experimentó un crecimiento masivo impulsado en gran parte por la Ley de Moore en 1965, que predecía que el número de transistores en un chip se duplicaría aproximadamente cada dos años (Moore, 1998). Esta tendencia marcó el ritmo de la innovación, permitiendo la creación de procesadores cada vez más rápidos y eficientes. Empresas como Intel, AMD y Texas Instruments lideraron el desarrollo de los avances tecnológicos, impulsando la producción en masa de semiconductores. Paralelamente, la globalización transformó la industria, con la fabricación de chips distribuyéndose por diversas regiones, especialmente en Asia, lo que permitió aprovechar costos más bajos y beneficiarse de la especialización técnica en distintas fases de la cadena de suministro (Byrne & Corrado, 2017).

En el siglo XXI, esta cadena de suministro se ha convertido en una de las más globalizadas y complejas del mundo. La producción se lleva a cabo en múltiples continentes, mostrando la necesidad de coordinar una red muy compleja de proveedores, fabricantes y ensambladores. Empresas líderes como TSMC, Samsung e Intel, han establecido fábricas en diferentes regiones para mitigar riesgos, aprovechar las ventajas comparativas y responder a la demanda creciente de la tecnología avanzada.

Sin embargo, esta expansión global ha traído consigo una serie de desafíos como la interdependencia (anteriormente mencionada) de las cadenas de suministro globales que ha hecho que la industria sea vulnerable a las interrupciones por factores geopolíticos, pandemias y restricciones logísticas; es una escasez de materiales críticos y ciclos de vida cortos de los productos tecnológicos que han puesto a prueba la capacidad de adaptación de la industria. Estos son algunos de los problemas que destacan en todos los especialistas del área la complejidad de gestionar una cadena de suministro distribuida que debe equilibrar eficiencia y resiliencia.

En respuesta a estos desafíos, la industria de los semiconductores está en un proceso de consolidación y adaptación: las empresas están invirtiendo en nuevas tecnologías como la inteligencia artificial para mejorar la transparencia y eficiencia en la gestión. Esta es una tendencia que ha impulsado la visión hacia la regionalización, una idea que está ganando fuerza con los esfuerzos por diversificar la producción y reducir la dependencia de ciertas regiones para asegurar la estabilidad a largo plazo.

Los procesos que conforman una cadena de suministro para los semiconductores

En el contexto de la producción de semiconductores, se necesita diferenciar entre suministro y abastecimiento, porque ambos conceptos, aunque están interrelacionados, tienen vertientes distintas dentro de la gestión de recursos. El suministro se refiere a la gestión global de los recursos necesarios para la producción, involucrando la planificación, coordinación y distribución de materiales a lo largo de la cadena de suministro. El abastecimiento se centra más en la adquisición o compra de estos recursos de los proveedores específicos, asegurando que los materiales críticos estén disponibles cuando se necesiten en el proceso de producción.

En la industria de los semiconductores, esta diferenciación es relevante porque la naturaleza de las cadenas de suministro globales es de naturaleza compleja: un semiconductor necesita de materiales raros como el galio y el indio, que provienen de regiones específicas y cuya disponibilidad puede estar sujeta a fluctuaciones geopolíticas o restricciones de la oferta. En la obtención de estos materiales mediante procesos de abastecimiento, se orienta a garantizar su adquisición a partir de contratos con los proveedores (Shih, 2020). Sin embargo, la gestión del suministro envuelve en su visión un horizonte más amplio que asegura la sincronización de los flujos logísticos, para evitar las interrupciones en la producción, debido a la escasez de materiales (Campuzano-Bolarín *et al.*, 2019).

Con las anteriores especificaciones, se entiende que la cadena de suministro de semiconductores involucra una serie de procesos que van desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje final del producto, lo que inicia con la obtención de silicio de alta pureza, que es refinado para fabricar las obleas que servirán de base para los circuitos. Las obleas pasan por múltiples etapas de fotolitografía y dopaje químico para crear los millones de transistores que componen un chip. Posteriormente, los chips son sometidos a pruebas de calidad y finalmente son ensamblados en módulos y dispositivos electrónicos. Cada fase del proceso se lleva a cabo en distintas regiones de mundo, demostrando la naturaleza globalizada de esta industria y el desafío logístico de coordinar los flujos de materiales, transporte y ensamblaje (Mack, 2011).

El proceso de fotolitografía utiliza patrones de luz para transferir los circuitos a los wafers, seguido por el dopaje, que altera las propiedades eléctricas del silicio mediante la adición de impurezas. Posteriormente, la metalización deposita capas de metal para conectar los componentes del circuito. En la fase de ensamblaje y encapsulado, los chips se montan y protegen, y finalmente se realizan pruebas rigurosas para asegurar su funcionalidad.

Las cadenas de suministro globales (señala Srivastava, 2021) ofrecen beneficios que han transformado industrias como la de los semiconductores, y uno de los principales es la reducción de costos, que ayuda a las empresas a localizar cada etapa en regiones donde los insumos, la mano de obra o los procesos de manufactura son más baratos. La globalización facilita el acceso a materias primas especializadas tecnologías avanzadas, lo que sería difícil de conseguir si la producción estuviera confinada a una sola región.

Otro beneficio es la capacidad de diversificar el riesgo, porque una cadena de suministro distribuida a nivel global minimiza el impacto de interrupciones locales como desastres naturales o inestabilidad política. Para la industria de semiconductores, la dispersión geográfica ha hecho que se acelere la innovación y el desarrollo de productos, aprovechando la especialización técnica de diferentes mercados; así es como la flexibilidad y escalabilidad que brindan las cadenas globales ayudan a las empresas a responder más rápidamente a las fluctuaciones de la demanda y a los cambios tecnológicos (Srivastava, 2021).

La escasez global de chips es un problema que ha sido impulsado por el aumento de la demanda en industrias como la automotriz, la de tecnología y la electrónica de consumo. Con la pandemia de Covid-19 aumentó este problema al interrumpirse la producción y las cadenas de suministro, creando retrasos en la entrega de componentes básicos, lo que puso en evidencia la fragilidad de la industria y la falta de capacidad de producción para satisfacer la demanda global que ya venía en aumento (Shih, 2020). Aquí intervinieron las siguientes etapas:

Escasez de materiales: los semiconductores dependen de materiales raros como el litio, el cobalto y el silicio, cuya disponibilidad está limitada por factores geológicos y geopolíticos; la extracción de estos recursos está concentrada en pocas regiones del mundo, aumentando la vulnerabilidad de la cadena de suministro. La dificultad para obtenerlos y la fluctuación en sus precios es lo que se considera riesgoso para que las empresas puedan mantener la capacidad de producción a largo plazo (Ku *et al.*, 2021).

Ku *et al.* explican que la extracción de estos materiales está dominada por un pequeño número de regiones, lo que incrementa la vulnerabilidad de la cadena de suministro frente a crisis locales o globales, con una concentración geográfica que limita el acceso a los

recursos y puede causar fluctuaciones significativas en los precios. Cuando se combinan estos elementos con los retos asociados a su extracción y transporte, se presenta un riesgo considerable para la estabilidad de la cadena de suministro.

Desafíos geopolíticos: las tensiones geopolíticas (especialmente entre Estados Unidos y China) han generado restricciones en el acceso a tecnologías clave y sanciones comerciales que afectan a los principales actores de la industria. Estas tensiones han derivado en el denominado desacoplamiento de las cadenas de suministro, obligando a los países a buscar alternativas más seguras, pero menos eficientes, y aumentando los costos de producción (Varman, 2023).

Para Varman, el desacoplamiento de las cadenas de suministro por las tensiones geopolíticas ha forzado a las empresas a diversificar sus fuentes de suministro y producción, lo que puede resultar en una menor eficiencia operativa. La necesidad de trasladar la producción a regiones alternativas también causa costos adicionales relacionados con la adaptación a nuevos escenarios regulatorios y logísticos, que son cambios por los que se atraviesa y aumentan los costos de producción, afectando la calidad y la velocidad de comercialización de los productos semiconductores. Las medidas de seguridad nacional y la políticas de autosuficiencia promovidas por distintos gobiernos modifican el panorama de la industria: hay países que están invirtiendo en la creación de capacidades locales para reducir la dependencia de proveedores extranjeros, que es un factor que puede llevar a la creación de nuevas cadenas de suministro regionales, sin embargo, el proceso de regionalización todavía se vislumbra como costoso y lento, con implicaciones que Varman considera como significativas para la estabilidad de la cadena global.

Ciclos de vida cortos y rápida obsolescencia: los semiconductores tienen ciclos de vida muy cortos por la rápida evolución tecnológica, creando una presión constante para innovar y actualizar los productos, lo que a la vez requiere de adaptaciones rápidas en las cadenas de suministro. La obsolescencia cada vez más rápida también significa que grandes cantidades de lotes de chips puedan volverse inservibles antes de su distribución, complicando la planificación y el manejo de inventarios (Campuzano-Bolarín *et al.*, 2019).

Sostenibilidad: la producción de semiconductores es intensiva en energía y recursos, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad. Las empresas de la industria están bajo presión para reducir su huella ambiental, disminuir las emisiones de carbono y gestionar los residuos generados en el proceso de fabricación. Al mismo tiempo, la transición hacia prácticas más sostenibles puede aumentar los costos de producción y crear barreras logísticas adicionales (Khalid & Peng, 2021).

Logística y gestión de inventarios: la globalización de la cadena de suministro ha hecho que la gestión logística sea un desafío considerable, especialmente en términos de coordinación entre múltiples regiones y actores. El transporte de materias primas y productos semielaborados a través de fronteras internacionales introduce retrasos y aumenta la complejidad del inventario. La falta de visibilidad en tiempo real sobre el estado de los envíos crea problemas de sobreabastecimiento o desabastecimiento, afectando la eficiencia de la cadena de suministro (Öztürk, 2019).

Al tener bien establecidas las funciones de suministro y abastecimiento, las empresas de semiconductores mejoran la eficiencia operativa, reducen costos y aumentan la resiliencia frente a perturbaciones externas, como la reciente escasez global de chips. De hecho, estudios recientes sugieren que la gestión del suministro ayuda a paliar crisis como la que se presentó en el año 2020, que afectó drásticamente el flujo de materiales esenciales (Frieske & Stieler, 2022).

El futuro de las cadenas de suministro globales

El futuro de las cadenas de suministro globales, incluida la de semiconductores, estará marcado por la digitalización y el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, *blockchain* y el Internet de las Cosas (IoT). Son tecnologías que ayudarán a tener mayor transparencia, automatización y eficiencia en el seguimiento de inventarios, la logística y la toma de decisiones en tiempo real. La digitalización facilitará la resiliencia ante interrupciones al mejorar el flujo de información y permitir respuestas rápidas a los cambios en la demanda o problemas en la producción (Kleinhans, 2024; Bigliardi *et al.*, 2022).

Otra tendencia será la regionalización y diversificación de la producción, con la creciente preocupación por la dependencia de pocas regiones para la fabricación de chips (especialmente en Asia), donde se está llevando la creación de nuevos centros de producción en Europa y América del Norte. La sostenibilidad será cada vez más prioritaria, con esfuerzos para reducir el impacto ambiental de la producción y mejorar las prácticas éticas en las cadenas de suministro. Estas transformaciones están destinadas a crear un ecosistema más equilibrado, flexible y capaz de adaptarse a lo que espera en el futuro de estas estrategias y retos globales (Lu *et al.*, 2023; Kleinhans, 2024).

CONCLUSIONES

Este artículo confirma que la cadena de suministro de semiconductores ha evolucionado de manera muy rápida, consolidando su papel en la economía global y destacando la interdependencia entre las regiones para los procesos de producción y distribución. A nivel teórico, se valida la aplicabilidad de los modelos de globalización y especialización económica, como los de David Ricardo y Michael Porter en la industria de semiconductores.

Los resultados sobre la escasez de materiales y los desafíos geopolíticos contribuyen al conocimiento sobre la gestión de las cadenas de suministro aportando nuevas perspectivas para enfrentar las limitaciones de recursos y la volatilidad política en un sector que demanda de innovación continua y estrategias resilientes, porque el análisis de estos casos impacta en la sostenibilidad y regionalización, sugiriendo la necesidad de replantear la dependencia global hacia estructuras más diversificadas y adaptativas.

Como reflexión, se puede señalar que, desde la escasez de chips, pasando por la complejidad de la fabricación hasta las tensiones geopolíticas y los problemas de sostenibilidad. Cada desafío necesita de soluciones innovadoras y estratégicas, y la adaptación a estos desafíos, junto con la implementación de prácticas eficientes y sostenibles, será lo que ayude a asegurar que el suministro a futuro sea continuo y eficiente.

Por otro lado, hay que tomar en cuenta las palabras resiliencia y colaboración, porque en el primero de los casos, la cadena debe ser más resiliente para hacer frente a las interrupciones inesperadas, lo que conlleva a diversificar la producción, reducir la dependencia de un solo proveedor y desarrollar planes de contingencia. La colaboración entre gobiernos, empresas y academia también sirve de apoyo para abordar estos desafíos para desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barboza, D. (2016). An iPhone's Journey, From the Factory Floor to the Retail Store (And Why the Product Costs More in China). In *The New York Times*.
<https://www.nytimes.com/2016/12/29/technology/iphone-china-apple-stores.html>
- Bassett, R. K. (2003). *To the digital age: Research labs, start-up companies, and the rise of MOS technology*. JHU Press.
- Bigliardi, B., Filippelli, S., Petroni, A., & Tagliente, L. (2022). The digitalization of supply chain: a review. *Procedia Computer Science*, 200, 1806-1815.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.381>
- Byrne, D. M., & Corrado, C. A. (2017). ICT Services and their Prices: What do they tell us about Productivity and Technology? *Feds Working Paper*, 1-43.
<https://doi.org/10.17016/FEDS.2017.015r1>.
- Campuzano-Bolarín, F., Marín-García, F., Moreno-Nicolás, J. A., Bogataj, M., & Bogataj, D. (2019). Supply chain risk of obsolescence at simultaneous robust perturbations. *Sustainability*, 11(19), 5484. <https://doi.org/10.3390/su11195484>

- Forbes. (2024). Los semiconductores en la cadena de suministro: avances, desafíos y perspectivas globales. En *Forbes Centroamérica*. <https://forbescentroamerica.com/2024/05/24/los-semiconductores-en-la-cadena-de-suministro-avances-desafios-y-perspectivas-globales>
- Frieske, B., & Stieler, S. (2022). The “semiconductor crisis” as a result of the COVID-19 pandemic and impacts on the automotive industry and its supply chains. *World Electric Vehicle Journal*, 13(10), 189. <https://doi.org/10.3390/wevj13100189>
- Gereffi, G. (2018). *Global Value Chains and Development: Redefining the Contours of 21st Century Capitalism*. Cambridge University Press.
- Junior, C., Redkva, P. E., & Sandrino, B. (2023). Semiconductors in the Digital Age: Evolution, Challenges, and Geopolitical Implications. *Rev. Científica Multidiscip. Núcleo Conhecimento*, 133-150. [10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/technology-en/semiconductors](https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/technology-en/semiconductors)
- Khalid, M., & Peng, Q. (2021). Sustainability and environmental impact of additive manufacturing: A literature review. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(6), 1210-1232. https://www.researchgate.net/profile/Marwan-Khalid/publication/349641036_Sustainability_and_Environmental_Impact_of_Additive_Manufacturing_A_Literature_Review/links/60393b61a6fdcc37a8558e41/Sustainability-and-Environmental-Impact-of-Additive-Manufacturing-A-Literature-Review.pdf
- Ku, A. Y., Alonso, E., Eggert, R., Graedel, T., Habib, K., Hool, A., ... & Veeh, C. (2024). Grand challenges in anticipating and responding to critical materials supply risks. *Joule*, 8(5), 1208-1223. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.03.001>
- Lojek, B. (2007). *History of semiconductor engineering*. Springer.
- Lu, W. M., Lo, S. F., Hung, S. W., & Yo, J. (2023). Semiconductor industry supply chain productivity changes: Incorporating corporate green performances. *Managerial and Decision Economics*, 44(8), 4232-4247. <https://doi.org/10.1002/mde.3945>
- Mack, C. A. (2011). Fifty years of Moore's law. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 24(2), 202-207. [10.1109/TSM.2010.2096437](https://doi.org/10.1109/TSM.2010.2096437)
- Millar, M. (2015). *Global supply chain ecosystems: Strategies for competitive advantage in a complex, connected world*. Kogan Page Publishers.
- Mohammad, W., Elomri, A., & Kerbache, L. (2022). The global semiconductor chip shortage: Causes, implications, and potential remedies. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 476-483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>
- Moore, G. E. (1998). Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82-85. <http://www.computer-architecture.org/textual/Moore-Cramming-More-Components-1965.pdf>
- Öztürk, H. (2019). Modeling an inventory problem with random supply, inspection and machine breakdown. *Opsearch*, 56(2), 497-527. <https://doi.org/10.1007/s12597-019-00374-3>

- PCW. (2022). *Rebuilding supply chains. Impact of the supply chain shocks on the Dutch economy and the way forward*. PCW.
- PMT. (2024). The Importance of Semiconductor Chips in Modern Living. In *Precision Measurement Technologies*. <https://acortar.link/AE8stl>.
- Riordan, M., & Hoddeson, L. (1997). *Crystal fire: The birth of the information age*. WW Norton & Company.
- Salazar, J. C., & Carlos, J. (2014). Tensiones entre la minería y el resto de sectores económicos en el contexto regional: estudios de caso sobre minería informal e ilegal. En J. Benavides (Comp.) *Insumos para el desarrollo del Plan Nacional de Ordenamiento Minero*, 573-630. Ediciones Uniandes.
- Shih, W. C. (2020). Global supply chains in a post-pandemic world. *Harvard Business Review*, 98(5), 82-89. <https://myscma.com/wp-content/uploads/2024/04/Global-Supply-Chains-in-a-Post-Pandemic-World.pdf>
- Srivastava, M. & Rogers, H. (2021). Managing global supply chain risks: effects of the industry sector. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(1), 1091-1114. 10.1080/13675567.2021.1873925
- The Missing Strategy in Europe's Chip Ambitions. In *Interface I*. <https://www.interface-eu.org/publications/europe-semiconductor-strategy>
- Varman, R. (2023). What Do We Learn about Capitalism from Chip War? In *Monthly Review. An Independent Socialist Magazine*. <https://monthlyreview.org/2023/11/01/what-do-we-learn-about-capitalism-from-chip-war/>