



TEXAS A&M INTERNATIONAL UNIVERSITY



TCBEED WORKING PAPER SERIES | JUNE 2022

# Physical Internet Based Transportation Resilience to Cargo Theft Risk

Jose Eduardo Flores Franco, Ph.D.  
*Independent*

Miguel Gaston Cedillo Campos, Ph.D.  
*Texas A&M International University*

Daniel Covarrubias, Ph.D.  
*Texas A&M International University*

[texascenter.tamui.edu](http://texascenter.tamui.edu)

# Physical Internet based transportation resilience to cargo theft risk

## Resiliencia del transporte con base en Internet Físico frente al riesgo de robo de la carga

José Eduardo Flores Franco

Gastón Cedillo

Daniel Covarrubias

### *Resumen*

Las empresas de autotransporte operando en mercados emergentes como México, están constantemente buscando mitigar el riesgo de robo en las carreteras. Una de las estrategias más utilizadas es la implementación de más y mejor tecnología de seguimiento satelital. Sin embargo, actualmente es posible lograrlo al reorganizar los procesos logísticos. Un enfoque de solución se conoce como “*Internet Físico*”, el cual es un sistema interconectado donde las mercancías son encapsuladas en contenedores inteligentes y modulares, permitiendo la manipulación y envío de diferentes tipos de mercancías contenerizadas en un mismo vehículo. El objetivo de este documento es proponer un modelo cuantitativo que permita, sobre la base del nivel de riesgo de robo de cada tipo de producto para diferentes segmentos de la red carretera de México, definir la mezcla de productos que mitiga el riesgo total de robo para cada embarque. Para lograrlo, se diseñó un modelo original, resultado del acoplamiento de un modelo de inventarios estocásticos de un solo periodo, a uno de evaluación de robos. Para ello se estudió tanto la demanda, como las características de diferentes productos, lo cual permitió identificar cuáles de estos se podrían combinar en un solo embarque. Como resultado, se obtuvo un modelo que coadyuva a la toma de decisiones prácticas. Además, se identifican condiciones básicas iniciales cuando se pretende una implementación, así como las limitaciones que se deben tener en cuenta antes de implementar este enfoque en un contexto real. Finalmente se exponen conclusiones y recomendaciones de utilidad tanto para académicos, como para tomadores de decisiones, así como futuras líneas de investigación para extender los resultados aquí expuestos.

**Palabras clave:** *Internet Físico; logística; riesgo; resiliencia; autotransporte de carga.*

### **Highlights**

- *Offers insights into how the physical internet can contribute to improving transportation resilience.*
- *Proposes a novel mathematical model for mitigating the risk of cargo theft*
- *Delivers insights to public and private decision-makers for building more resilient transportation systems.*

## 1. Introducción

La inseguridad en el autotransporte de carga le cuesta a México 92 mil 500 mdp anuales [1]. Este costo es equivalente al 0.5% del producto interno bruto (PIB). Se trata de un aspecto que está retando la efectividad logística de las empresas y, en consecuencia, el cumplimiento de las expectativas de los clientes.

Se trata de un desafío a la fluidez de las cadenas de suministro. En este contexto, la complejidad estriba en hacer frente al problema, pero con soluciones que no conlleven prácticas o tecnologías, que como resultado colateral, puedan redundar en daños psicológicos, morales y/o fatales para los empleados de las empresas, además de grandes daños intangibles a la confianza de las marcas corporativas [2].

Dentro de las cadenas de suministro, al ser un eslabón que interconecta a diversos eslabones, el autotransporte de carga es un elemento clave. En realidad, la constante interrupción en el flujo de carga que mueve el autotransporte, puede dañar ostensiblemente la operación de varias cadenas de suministro en forma simultánea.

Por ejemplo, el asalto al transporte de carga impacta no solo en el incremento de las variables de costo y tiempo, sino que, además, reduce la confiabilidad de las mismas. En momentos en los que las empresas buscan pasar de sistemas de abastecimiento "*Just-In-Time*" (JIT) a "*Just-In-Sequence*" (JIS), la falta de confiabilidad se refleja en costos extra que reducen la competitividad de las empresas, pero también de los países como atractores de inversión industrial [3].

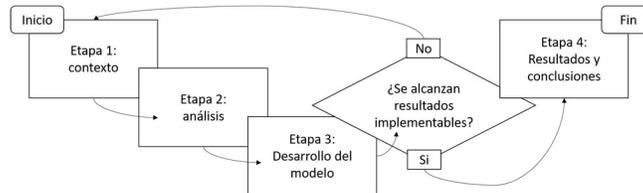
En este sentido el reporte anual del robo de carga en México Sensiguard [4], registra como zonas de alto riesgo para el transporte de carga, la región Centro y Occidente de la República Mexicana, así como en Estados de Puebla, México, Michoacán y Nuevo León. En el año 2019 se registraron 17,503 incidentes de robos a transporte de carga. Entre los robos de carga por tipo de producto destacan con mayor frecuencia: i) alimentos y bebidas; ii) construcción e industrial; y iii) químicos. En el 89% de los casos, la unidad fue interceptada cuando se encontraba en movimiento. Con este modus operandi, en el 57% existió privación ilegal de la libertad del conductor. De manera específica, entre los tramos carreteros con mayor riesgo, se destaca la autopista México-Veracruz (MEX-150D).

Es en este contexto, que el presente trabajo busca proponer un modelo que permita analizar la mezcla de mercancías para mitigar el riesgo de robo en el autotransporte de carga, a través del aprovechamiento de las ventajas organizacionales y tecnológicas desarrolladas con base en el enfoque del internet físico. Nuestra hipótesis de trabajo esgrime que, si se desarrolla un modelo que permita calcular los costos de re-organizar los procesos logísticos desde el enfoque del internet físico al mezclar diferentes productos con diferentes niveles de riesgo en un solo envío de carga, entonces, debido a la alta especialización de los grupos criminales por tipo de producto, la captura de lotes incompletos de productos de su interés, les redundará en sobre costos logísticos y por lo tanto, en reducción de los incentivos para su actividad.

Como lo señalan Yang, Y., Ballot, E. & Cedillo-Campos, M. en [7], desde la perspectiva de seguridad de la cadena de suministro, la aplicación de PIC (Physical Internet handling Containers) reduce significativamente los riesgos de robo de carga. Primero, los PIC están diseñados con la capacidad de contener diferentes productos en el mismo contenedor (mix de productos) o en varios contenedores. Inicialmente, esta propiedad tuvo el propósito de elevar el factor de carga de los vehículos, pero la misma mitiga el riesgo de robo al mezclar productos de alto con aquellos de bajo valor. Se trata de una propiedad en donde los embarques donde los productos de alto y bajo valor se mezclan, someten a los criminales a un reto similar al que deben enfrentar los participantes del "*juego de la bolita*". Sobre todo, porque aumenta la dificultad para encontrar los "productos correctos" que hacen "*rentable*" la acción de los criminales (tamaño económico de botín), pero también, en caso de que el camión completo sea secuestrado, la pérdida se reduce. Segundo, los PIC están diseñados en tamaños modulares para consolidar-desconsolidar bloques de contenedores, a través una propiedad de ensamble. En comparación con el embalaje de pallet actual, esta propiedad aumenta las

dificultades para la descarga si no se cuenta con acceso a los mecanismos que desbloquean el ensamble de contenedores.

De forma general, el método utilizado para lograr nuestro objetivo consistió de cuatro etapas. La primera etapa involucró la revisión de la literatura, así como fuentes de información y teoría relacionada que permitirían definir y conceptualizar el problema. La segunda etapa consistió en el análisis y la implementación de los conceptos que conforman el cuerpo de conocimiento del internet físico. La tercera etapa involucró el desarrollo del modelo aquí propuesto. Finalmente, la cuarta etapa involucró el análisis de los resultados, así como la obtención de conclusiones (ver figura 1).



**Figura 1. Método**

El resto del documento se organiza como sigue. La sección 2 muestran los antecedentes referentes a la revisión de la literatura. La sección 3 describe la elaboración del modelo y una forma integrada de las teorías utilizadas. La sección 4 expone una simulación aplicando el modelo propuesto con la ayuda de la herramienta informática desarrollada para ese propósito. Finalmente, la última sección presenta conclusiones, así como perspectivas futuras de investigación.

## **2. Antecedentes**

El Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública (SESNSP) [5] es la entidad a través de la cual se colectan y difunden estadísticas de la actividad criminal en México. Entre ellas, el número de unidades robadas y denunciadas ante las autoridades. Dicha entidad reporta que para el año 2019 existieron un total de 11,659 denuncias, a diferencia del año 2018 con 13,115 registros, es decir, un decremento del 11.10% con respecto al año anterior. Sin embargo, en lo referente al robo a transportistas, se mantiene sin cambio. Los datos anteriores muestran que el robo al autotransporte de carga es un tema crítico para la competitividad logística y económica del país. A continuación, se presenta la revisión de la literatura sobre el tema.

### **2.1 Trabajos previos**

En un interesante trabajo desarrollado por Sarraj, Ballot, Pan y Montreuil [6], comparan el modelo clásico de una cadena logística actual contra un nuevo concepto llamado Internet Físico ( $PI, \pi$ ), lo anterior como una propuesta alternativa para satisfacer las necesidades económicas y ambientales. La necesidad de abordar un problema de logística actual con el modelo del Internet Físico surge del crecimiento exponencial de los flujos de viaje, costos ambientales y congestión en la infraestructura. Como consecuencia, los autores proponen que las redes de distribución actuales deben replantearse como un sistema que se pueda interconectar de manera efectiva. Aquí cabe resaltar que [7], detectan que sobre este enfoque, no se ha desarrollado un análisis específico que lo haga más robusto ante el riesgo de robo en el transporte. Pero en su contribución, hace una exploración inicial sobre el potencial del Internet Físico. Por ejemplo, argumentan que si los productos se combinan y son trasladados en contenedores inteligentes encapsulados de dimensiones modulares y fáciles

de interconectar habrá mejoras significativas al desempeño logístico y reducción de robo al transporte de carga.

Por su parte [8] destacan que en México el robo al autotransporte de carga se ha convertido en uno de los riesgos más importantes para la eficiencia y la competitividad de las cadenas de suministro. Analizan las variables que influyen en el riesgo de robo a través del enfoque de estadística multivariada, como análisis de componentes principales, así como de la metodología Delphi y procesos de jerarquización analítica para obtener una función de índice de riesgo. Tanto [8] como [9] y [10], señalan que obtener información sobre robos al autotransporte de carga es muy difícil, sobre todo debido al impacto que para las marcas puede generar en las empresas. Aunado lo anterior, la inexactitud de los datos publicados es otro de los retos. En este caso, la inexactitud de las cifras se debe a que estas se basan en opiniones de expertos y otras técnicas de colecta indirecta de datos. En todas ellas, la información se encuentra clasificada por tipo de producto. Un enfoque que permite la evaluación del riesgo para embarques con productos combinados no existe aún.

El análisis sobre los contenedores modulares presentado por [11], muestra el funcionamiento del encapsulado. Este inicia con la caja de un camión llamada contenedor modular, donde dentro se ubican los contenedores H que corresponde a los pallets formados con la mercancía y finalmente dentro de estos, los contenedores Pi o  $\pi$ , los cuales son las cajas que corresponden al empaque del producto. Los autores destacan que en países europeos ya se realizan modelos físicos de contenedores para su uso en la industria y transporte.

Otro componente importante de la seguridad de los flujos en las cadenas de suministro, además del transporte, es el manejo de las mercancías dentro de los almacenes. En este sentido, [12] proponen el método de w@reRISK, el cual evalúa el nivel de riesgo de seguridad al que están expuestos los productos dentro de un almacén. Lo anterior permite una mejor clasificación y localización de los productos dentro del almacén y con ello, una mayor efectividad de los flujos dentro del mismo. Sin embargo, este método cubre solamente el eslabón almacén de manera específica.

En este contexto, la corporación RAND [13] menciona herramientas estadísticas para analizar la problemática aquí abordada. Entre ellas las estadísticas multivariantes como la “clasificación” y los “conglomerados”, donde el primero lo utiliza para predecir si un área dada será: de alta, media o baja peligrosidad por un determinado periodo de tiempo (meses, trimestres, etc.). La clasificación o análisis discriminante funciona con un conjunto de objetos ya clasificados en una serie de grupos. Por su parte, los conglomerados permiten agrupar datos con atributos similares, por ejemplo, en un robo los atributos pueden ser el vecindario, hora del día, objetos robados, entre otros [14]. A pesar de que el trabajo no es alusivo al transporte, se pudo identificar como una herramienta importante para ser usada en el problema del robo al autotransporte de carga.

De manera general, fue posible constatar que, si bien existen un amplio número de reportes técnicos, artículos científicos y documentos de referencia sobre el tema de mejorar la seguridad del autotransporte de carga, en realidad, en la mayoría de los casos (excepto cuando se trata de mensajería), se asume que los embarques transportados son homogéneos, es decir, no es una mezcla de productos diversos. Lo anterior dejó visible el área de oportunidad para el desarrollo de un modelo como el aquí propuesto.

### **3. Método**

Para la presente investigación se adoptó un enfoque de investigación abductivo. Dicho enfoque combina aspectos teóricos y empíricos, que se enriquecen mutuamente (ver figura 1), favoreciendo el desarrollo de nuevo conocimiento. Es decir, a través de idas y vueltas entre la teoría y la práctica se desarrolla conocimiento y nuevas aplicaciones prácticas [15].

De este modo, con ayuda de la revisión de la literatura y fuentes de información empírica, el siguiente paso fue desarrollar un análisis detallado del robo al autotransporte de carga desde el enfoque del Internet Físico. Se asume que, dada la especialización por tipo de producto de las bandas criminales, las mismas, para rentabilizar su operación necesitan la captura de embarques completos del tipo de productos que les interesa. En la medida en la que se logre desarrollar un modelo de transporte mixto de productos con suficiente eficiencia logística para las empresas embarcadoras, las bandas criminales se verían afectadas en sus costos. Es decir, los costos operativos en los que incurren las bandas en cada operación de robo, no alcanzarían a ser cubiertas al capturar un botín (productos de su interés), con un volumen que les generaría una rentabilidad menor.

Es en este sentido que resultó fundamental el desarrollo de un modelo de análisis que denominamos “Tamaño Económico de Botín”, sobre la base teórica de los modelos de inventarios de un solo periodo como el “Tamaño Económico de Pedido” conocido como “EOQ”. El objetivo es el establecer la cantidad mínima a partir del cual, un asalto se vuelve rentable. Si bien se trata de una tarea compleja, nuestra ambición es el establecer un parámetro viable. Dicho modelo resulta fundamental con el objetivo de establecer la mezcla de productos dentro de un embarque que no cruce el umbral a partir del cual resulta rentable un asalto.

### 3.1 Las mercancías

Para el estudio sobre las diferentes mercancías que se transportan en el país, se utilizó la base de datos de cartas de porte 2017 del Instituto Mexicano del Transporte. Esta base se ha desarrollado bajo un muestreo estratificado que colecta cartas de porte. Las cartas de porte son el documento oficial que los transportistas deben tener para el envío de sus mercancías. En dicho documento se encuentran datos como origen, destino, monto del flete, fecha de envío, entre otras. La tabla 1, muestra los primeros cinco tipos de mercancías por su importancia en el flujo de carga del país.

**Tabla 1.** Muestra de 11,771 cartas de porte.

Tipo de mercancía	Total de cartas	Porcentaje acumulado
Productos derivados del petróleo y del carbón	4,983	42.33
Industria alimentaria	1,431	54.49
Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza	997	62.96
Productos a base de minerales no metálicos	985	71.33
Industria química	956	79.45
Otros	2,419	100.00

Dentro de los tipos de mercancías destacamos los primeros tres. Primero, los productos derivados del petróleo y del carbón que corresponden a productos como gasolina, diésel y gas L.P. entre otros. Segundo, dentro de la industria alimentaria se encuentran: productos de abarrotes, bebidas, cereales, alimentos para animales, entre otras. Tercero, productos de la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza, entre ellos están maíz, tomate, pollo vivo, entre otros. De esta manera, una vez identificado los principales productos que se mueven en la red de carreteras del país, fue necesario conocer las mercancías más robadas.

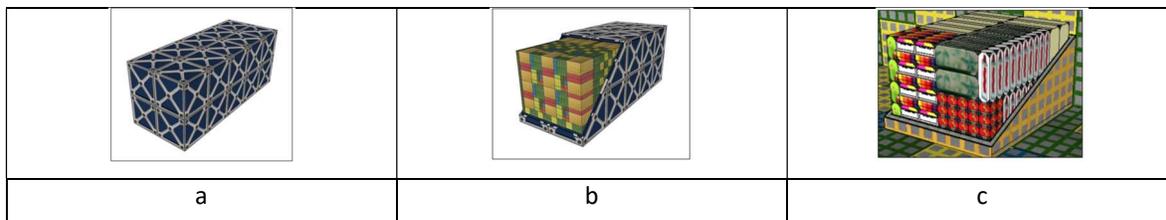
Para ello consultamos el último reporte de Sensiguard [4], el cual nos muestra los productos más robados. Entre ellos destacan: i) alimentos y bebidas con un 39%; ii) construcción e industrial 9%; y iii) químicos con un 8%. El resto son para productos electrónicos, autopartes, entre otros. Puede analizarse la coincidencia sobre los alimentos de los productos robados con los movimientos terrestres. Esto nos permite agrupar a priori, en un grupo lo relacionado a productos alimentarios y bebidas, para luego combinarlos con el resto de productos (con índice de robo menos frecuente) como son productos electrónicos, ropa y zapatos. Sin embargo, para hacer la correcta combinación de productos, es primero necesario, contar con mayores bases sobre el enfoque del internet físico.

### 3.2 Internet Físico

En el trabajo desarrollado por [16] es posible acceder a los fundamentos del Internet Físico (PI o  $\pi$ ). Los autores lo presentan como una solución al gran desafío de una logística global sustentable, entendiéndolo como el mejoramiento de la eficiencia económica, ambiental y social, y la sustentabilidad de la manera en que se mueven y almacenan las mercancías. En realidad, lo exponen como un sistema en constante evolución impulsado por la innovación tecnológica, infraestructural y empresarial [17].

Dentro de la estructura del Internet Físico identificamos como clave, el traslado y encapsulamiento para analizar los movimientos de carga y realizar mediciones. De hecho, el encapsulamiento es fundamental. Los llamados  $\pi$  contenedores o contenedores inteligentes, se utilizan para encapsular las mercancías en contenedores modulares los cuales son reutilizables y/o reciclables. En los trabajos de [11] y de [18] mencionan un contexto informativo sobre los aspectos físicos de estos contenedores (ver figura 2).

El encapsulamiento con candado es una forma de evitar los robos de mercancía, sin embargo, su implicación genera costos que pueden complicar la rentabilidad de su uso por parte de las empresas. La idea del enfoque de internet físico surge como una analogía de las redes informáticas, es decir, de los conceptos del internet digital como su interconexión, estructura y enrutamiento aplicados a la logística de cargas. Considerando las ventajas que presenta el enfoque se decidió utilizarlo.



**Figura 2.** a) Ilustración de un contenedor modular, de dimensiones 6 metros de largo, 2.4 metros de ancho y 2.4 metros de alto, nombrado como T-20S. b) Ilustración de la encapsulación de un contenedor H en un contenedor modular. c) Ilustración de contenedores P modular ( $\pi$  cajas) encapsulados en un contenedor H. Montreuil, B., Ballot, E., & Tremblay, W. [11].

### 3.3 Modelo de inventario de un solo periodo y su utilización al reto del robo.

Los modelos de inventario de un solo periodo están diseñados para los productos perecederos, es decir mercancías que pueden mantenerse en inventario por un periodo de tiempo muy limitado, antes de que no puedan venderse. Este modelo permite resolver la cantidad de pedido diario que maximiza el beneficio esperado [19]. Algunos tipos de perecederos con la característica de venderse después de un periodo de tiempo, un día, una semana, un mes o incluso en varios meses se encuentran: periódicos, revistas, flores,

alimentos frescos, fruta y verdura, entre otros, en sí cualquier producto que quede obsoleto prontamente [20].

El ejemplo de modelo de inventario de un solo periodo es el modelo conocido como del “Vendedor de Periódicos”, el cual se expresa matemáticamente en la ecuación (1). Los supuestos de este modelo son que no cuentan con un inventario inicial y costo de preparación. Otro punto importante es conocer la función de distribución de probabilidad de la demanda, que en caso de no conocerla se puede recurrir al método de bondad de ajuste o algún software especializado como EasyFit que genera una lista de posibles distribuciones.

$$G(Q)=CV * \min (Q, D) + CR * \max (0, Q - D) - CC * Q \dots\dots\dots (1)$$

Los costos y variables involucrados en la ecuación (1) para representar las ganancias de una determinada demanda nos permite calcular un valor Q que maximiza la función. La cantidad optima a ordenar. La tabla II, muestra las analogías involucradas y como se van definiendo las variables y costos.

**Tabla 2.** Analogía del modelo del vendedor de periódicos y el modelo para evaluar el botín rentable

	<b>Modelo del vendedor de periódicos</b>	<b>Modelo del robo de carga</b>
Variables	<b>D</b> es la demanda, cantidad que se debe vender  <b>Q</b> es la cantidad a ordenar	<b>D</b> es la demanda, cantidad que debe ser atracada para vender  <b>B</b> es el botín del atraco
Periodo	Hace referencia a la venta de periódico en un solo periodo (día)	Hace referencia a la venta de la mercancía atracada en un solo embarque (días o meses)
Costos	CC: costo de compra  Costo de adquirir un periódico	CA: costo de atraco  El costo de realizar un atraco (costo del personal, vehículos, etc.) para adquirir una mercancía
	CV: costo de venta  Precio al cliente	PV: precio de venta  Precio al cual venderá la mercancía robada (mercado informal)
	CR: costo de remate  Periódico no vendido	PR: precio de remate  Precio de la mercancía no vendida o no deseada por lo cual estará dispuesto a rematarla
	G es la ganancia de las ventas por la cantidad Q	G es la ganancia obtenida gracias al botín B

La ecuación (2) propuesta calcula la cantidad optima de botín que maximiza las ganancias. Para las ecuaciones (1) y (2), los términos positivos hacen referencia a las ventas y los negativos a los gastos.

$$G(B)=PV * \min (B, D) + PR * \max (0, B - D) - CA * B \dots\dots\dots (2)$$

Si bien el modelo matemático para evaluar el robo de carga muestra las ganancias esperadas con la cantidad de botín óptimo, es necesario conocer su nivel de riesgo. El índice de riesgo presentado en la siguiente sección, permite calcular el nivel de riesgo por tipo de mercancías.

### 3.4 Índice de riesgo

El elemento fundamental que permite establecer el nivel de riesgo de un envío de mercancías es el índice de riesgo. El índice de riesgo es calculado con base en los factores que involucran el robo al autotransporte, entre ellos: i) ruta; ii) tipo de vehículo; iii) tipo de mercancía transportada; iv) factor humano; y v) carreteras con o sin peaje por las cuales circulan las mercancías. Con base en este análisis, [8] propusieron la formula (3).

$$I_R=P * p + H * h + Z * \sum_j A_j * z_{aj} + V * v + C * c \quad \forall j \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

- $P * p =$  Proporción del factor tipo de producto.
- $H * h =$  Proporción del factor humano.
- $Z * \sum_j A_j * z_{aj} =$  Proporción del factor zona,  $A_j$  porcentaje de la ruta en el Estado  $j$ -ésimo y  $z_{aj}$  porcentaje del recorrido de la mercancía por los estados involucrados.
- $V * v =$  Proporción del factor tipo de vehículo.
- $C * c =$  Proporción del factor tipo de carretera.

En el modelo la letra mayúscula (P, H, Z, V y C) representan la ponderación de cada factor basada en la opinión de expertos y la letra minúscula (p, h, z, v y c) representan la ponderación para cada factor según sus categorías con base en Sensiguard. Por ejemplo, para el factor producto se tienen tres categorías: i) alta; ii) media; y iii) baja siendo la categoría alta la que cuenta con mayor ponderación, y así sucesivamente hasta la menor categoría (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Factores de riesgo y sus categorías respectivas (el orden de las categorías se presenta de mayor a menor ponderación).

Factor	Categorías
Producto	Alto Medio Bajo
Humano	No aplica controles de seguridad Certifica solo operadores Identifica y certifica personal clave
Zona	Severo Alto Medio Bajo
Vehículo	Camión 3.5 toneladas Camión de dos ejes (C2) Camión de tres ejes (C3) Camión articulado
Carretera	Libre de peaje Con peaje Mixta

La fórmula permite calcular el índice de robo por tramos carretero, lo cual es necesario para analizar el modelo matemático propuesto con el fin de identificar el número de mercancías a enviar al considerar la implementación del enfoque de Internet Físico.

### **3.5 Número de mercancías**

Las variables que se introducen en la construcción del modelo que nos permitirá evaluar la mezcla de mercancías se realiza de la siguiente manera.

- **Demanda de las mercancías.** En primer lugar, es necesario conocer la distribución de probabilidad de la demanda. Es decir, se debe conocer bajo cuál función probabilística se encuentra la demanda de los productos que se envían. Una de las limitantes es que frecuentemente no se conoce, para ello fue necesaria la utilización de software especializado o realizar un análisis de bondad de ajuste;
- **Índice de robo.** El segundo paso es calcular el índice de robo por tramos de infraestructura (en este caso, segmentos carreteros). Esto permite identificar desde el mayor hasta el menor en cuanto a peligrosidad de robo. A cada tramo le llamaremos  $I_{ti}$  que representa el índice de robo en el tramos  $i$  donde  $i=1,2,\dots,r$  tramos. De este modo, se obtiene la ecuación (4) del total de tramos involucrados.

$$p_i = I_{ii} / \sum_r I_{ir} \quad \forall r \dots\dots\dots (4)$$

- Modelo para evaluar el robo de carga. Al conocer la distribución de probabilidad de la demanda se ejecuta el modelo con la finalidad de encontrar la ganancia máxima  $B^*$ . El siguiente paso es calcular el número de mercancías para cada tramo  $T_i$  a través de la ecuación (5). Multiplicando la proporción  $p_i$  por el valor óptimo del modelo  $B^*$ .

$$T_i = p_i * B^* \dots\dots\dots (5)$$

Entonces, al tomar de (5) los diferentes tramos, el valor mínimo calculado a través de la ecuación (6), será la cantidad de mercancía a colocar en los contenedores.

$$x_j = \min \{T_{ij}\} \dots\dots\dots (6)$$

Este análisis se tiene que realizar para cada mercancía  $j=1,2,\dots,n$  siendo  $n$  el total de mercancías que se requiera enviar y por lo tanto, combinar.

Finalmente, con los puntos anteriores se propone la ecuación (7), la cual nos indica la cantidad de  $\pi$  mercancías ( $\pi M$ ) que se enviarán de cada tipo de producto.

$$\pi M = \sum_j x_j \quad \forall j \dots\dots\dots (7)$$

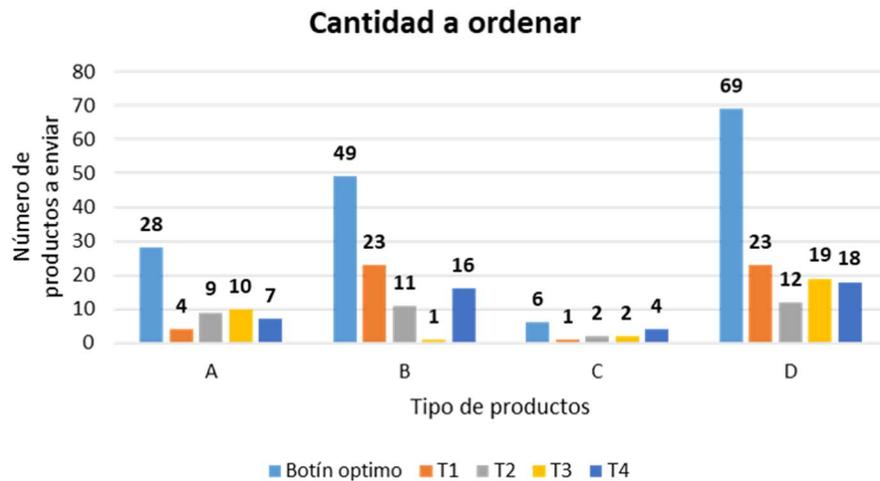
La ecuación (7) es analizada desde la perspectiva de que en un inventario se tienen diferentes mercancías que se envían a través de camiones de carga. Es decir, tomar decisiones relacionadas con el envío de mercancías, el número de camiones que se requieran, el uso de materiales para la implementación del Internet Físico como los contenedores modulares, entre otros.

#### 4. Análisis y discusión de resultados

Con las ecuaciones (2) y (7) se realiza un análisis de simulación. Los valores iniciales a introducir en el modelo corresponden primeramente a conocer la función de probabilidad de la demanda, para ello utilizaremos una distribución normal, teniendo como promedio 31 y una desviación estándar de 15.44. Los datos iniciales son {12, 23, 43, 54, 23, 21, 22, 11, 43, 23, 43, 54} que corresponden a cada mes del año respectivamente para la demanda. Los costos iniciales correspondientes de acuerdo a la tabla II son {CA=20, PV=35, PR=5, CO=10}. Con base en la demanda propuesta, se obtiene la demanda máxima y la demanda mínima, con ello se establecen seis demandas iniciales. Para todas ellas, se debe calcular su probabilidad dada la distribución normal, para luego, finalmente, proceder a trabajar el modelo del robo de carga para obtener la ganancia máxima.

Cabe resaltar que el procedimiento anterior se debe realizar para cada tipo de producto involucrado. De este modo, para este ejercicio se utilizaron los productos A, B, C y D. Además, para cada producto es necesario

calcular el índice de robo de acuerdo a los tramos carreteros de interés. Se formará una matriz de  $m$  productos con  $n$  tramos y se introduce el valor del índice. Para este estudio se tomaron en cuenta solamente cuatro tramos de un origen  $X$  a un destino  $Y$ . Los datos para este caso se utilizaron números aleatorios entre  $(0,1)$  ya que son los valores que se obtienen al utilizar la fórmula (3) para cada valor de la matriz. La matriz utilizada es de  $4 \times 4$ , 4 productos, 4 tramos. Una vez completado lo anterior se procedió a utilizar la ecuación (7). En la figura 3 se identifica que para el producto A se tienen programados 28 productos a enviar, de los cuales al obtener la proporción por medio de la ecuación (5), se obtienen cuatro valores  $\{4,9,10,7\}$ . Debido a que, a mayor valor, mayor índice de robo, se establece el valor mínimo, en este caso es  $x_1=4$ .

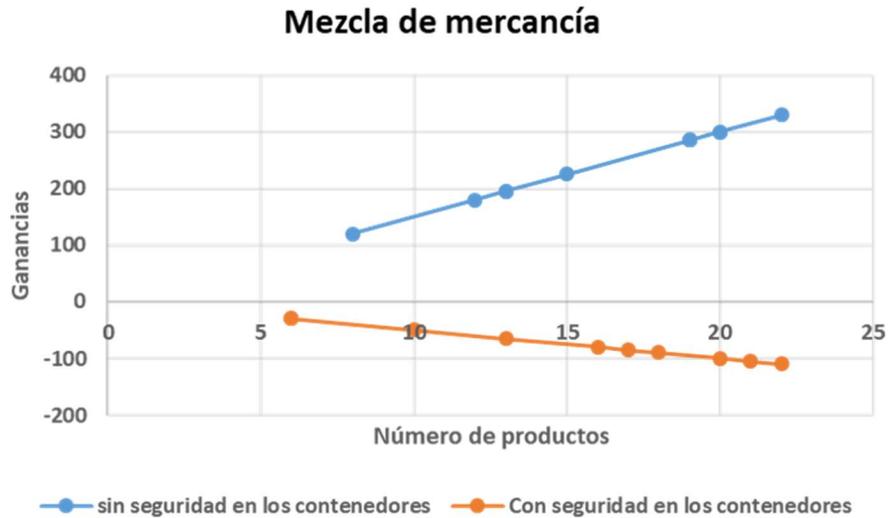


**Figura 3.** Cantidad a enviar por tipo de productos involucrados.

Puede observarse que los valores de las proporciones al sumarse no den la cantidad del botín optimo, ya que al tratarse de una proporción se utiliza un redondeo hacia arriba para no tener productos en cero. Al realizar el mismo análisis para los demás productos se encuentra que al sumar todos los valores mínimos de cada producto, obtenemos  $\pi M=4+1+1+12=18$ . Siendo este número, 18, la cantidad de mercancías a colocar de cada tipo de producto dentro de los contenedores.

La implementación del PI hasta este punto radica únicamente en la mezcla de diferentes productos. Los costos iniciales se verán afectados al considerar más aspectos del internet físico como la utilización de candados, o empaquetado dentro de un contenedor modular, evitando así, conocer los productos que contienen. Esto puede resultar en que el costo inicial del atraco CA aumente, derivado de la dificultad para los atracadores para hacerse con el botín.

La implementación del PI hasta este punto radica únicamente en la mezcla de diferentes productos. Los costos iniciales se verán afectados al considerar más aspectos del internet físico como la utilización de candados, o empaquetado dentro de un contenedor modular, evitando así, conocer los productos que contienen. Esto puede resultar en que el costo inicial del atraco CA aumente, derivado de la dificultad para los atracadores para hacerse con el botín.



**Figura 4.** Comparación de costos al considerar mercancías mezcladas con elementos de internet físico con un costo de atraco de  $CA=40$ .

En la figura 4 se puede observar un análisis comparativo derivado de realizar cambios en el valor del costo por atraco. Se observa que conforme aumenta el número de productos se provoca mayores pérdidas. Los cálculos se realizan con  $G(x1)=PV * x1 - CA * x1$  para el tipo de producto A, sin considerar el precio de remate.

Si a la ecuación (2) le involucramos un costo de oportunidad  $CO$ , es decir, el costo por tener faltante frente a la oportunidad de vender, lo cual ocurre cuando la demanda supera al botín, entonces (2) tendrá un nuevo termino negativo  $CO * \max\{0, D - B\}$ .

La figura 5 representa la gráfica de la ganancia máxima calculada a través de la ecuación (2) y modificada por  $CO$ . Puede observarse que conforme el número de botines aumenta, las ganancias son mayores. El asunto observable es que si se empiezan a reducir las cargas de productos "atractivos" para las bandas criminales que operan en los tramos por donde circula el cargamento, ya no es benéfico para quienes realizan el atraco.



**Figura 5.** Comportamiento de las ganancias obtenidas con el modelo del robo de carga modificado.

De esta manera, se confirma que al considerar el volumen mínimo de mercancías “*atractivas*” para las bandas criminales operando en los tramos origen-destino por donde debe circular el embarque, se reduce el nivel de riesgo de robo. Los resultados muestran que el enfoque de internet físico es un poderoso enfoque logístico con amplio potencial para reducir el riesgo de robo a los embarques en los países emergentes como México. Dado que el autotransporte de carga es de mayor utilización en estos mercados, el análisis aquí desarrollado tiene una amplia área de aplicación.

## 5. Conclusiones

El riesgo de robo en logística es un área de oportunidad para reducir el costo logístico total que debe ser aún explorada. Nuestra revisión de la literatura nos mostró que existen pocos trabajos científicos que desarrollen propuestas novedosas para mitigarlo. Este documento analiza la posibilidad de implementar el enfoque de Internet Físico para mitigar el riesgo de robo al autotransporte de carga en mercados emergentes como México, a través de la consolidación de embarques combinados de productos como estrategia para reducir la “*atractividad*” de los embarques ante bandas criminales altamente especializadas por tipo de producto.

De esta forma, derivado de los resultados obtenidos se pueden concluir los dos siguientes puntos:

- El Internet Físico se presenta como un poderoso enfoque que permite dar viabilidad a la consolidación de embarques de productos combinados y moverlos de forma eficiente de un punto de origen, a uno de destino. Al mismo tiempo, favorece la colaboración entre empresas, con lo cual se alcanza otro objetivo importante de nuestros tiempos, la reducción de las emisiones de *CO2* y transformar los sistemas de distribución actuales, a unos sostenibles;
- Desde el punto de vista del costo logístico total, es verdad que si bien el envío de embarques completos es la estrategia que permite reducir los costos de transporte, esta misma también otorga a cada embarque la “*atractividad*” suficiente para ser jugoso objetivo de las bandas criminales. De este modo, es importante considerar que la reducción en el volumen de los envíos va a requerir del desarrollo de alianzas entre empresas, de forma que puedan ser consolidados productos “*atractivos*” y “*no*

*atractivos*” para la delincuencia operando en los diferentes pares origen-destino por los que debe circular un determinado embarque.

Finalmente, el tema de robo en el autotransporte de carga con un enfoque de Internet Físico es un parteaguas para futuras investigaciones como el desarrollo de esquemas de colaboración entre empresas para elevar el nivel de rentabilidad en la implementación del enfoque aquí propuesto. Así como el desarrollo de herramientas de cálculo más detalladas con base en modelos de programación lineal, toma de decisiones bajo incertidumbre, análisis de costos y elaboración de mapas geoespaciales.

## **5.5 Trabajo futuro**

### **Fuentes de financiamiento**

Los autores agradecen tanto al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por su apoyo a través del Proyecto TI 14/20, así como al Texas Center for Border Economic and Enterprise Development de la A.R. Sanchez School of Business Texas A&M International University a través del proyecto CO/TAMIU/44.

### **Agradecimientos**

The authors would like to thank the different agencies of the Ministry of Communications and Transportation for their availability for sharing the information requested for this article. Likewise, to the transport associations that kindly agreed to provide the information required to complement our work. Finally, to our colleague Eric Moreno who provided valuable comments to improve this document.

Nevertheless, it is important to clarify that the author retains full responsibility for any prevailing flaw or omission in the document.

### **Referencias**

- [1] Hernández, L. *La inseguridad en autotransporte le cuesta a México 92 mil 500 mdp anuales*. El Financiero, junio, [En línea]: <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/la-inseguridad-en-autotransporte-le-cuesta-a-mexico-92-mil-500-mdp-anuales> (diciembre 2018).
- [2] Cedillo-Campos, M. *Primera encuesta nacional Evaluación del Riesgo en Cadenas de Suministro*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología Reporte de Investigación GC-74-78/2011, México (2011).
- [3] Wagner, S. M., & Silveira-Camargos, V. Decision model for the application of just-in-sequence. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5713-5736, (2011).
- [4] Sensiguard. *Reporte anual 2019: Robo de Carga en México* (2019).
- [5] Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública. SESNSP (2020). *Víctimas y unidades robadas, nueva metodología*, [En línea]: <https://www.gob.mx/sesnsp/acciones-y-programas/victimas-nueva-metodologia?state=published>
- [6] Sarraj, R., Ballot, E., Pan, S., y Montreuil, B. Analogies between Internet network and logistics service networks: challenges involved in the interconnection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25, No. 6, pp. 1207-1219, (2014).
- [7] Yang, Y., Ballot, E. & Cedillo-Campos, M. Contribution of Physical Internet Containers to Mitigate the Risk of Cargo Theft. *15th IMHRC Proceedings*, Savannah, Georgia, U.S.A., 2018.
- [8] De la Torre, Elizabeth, et al . Herramienta para la evaluación del riesgo de robo en el autotransporte de carga. *Nova Scientia*, 7.13 (2015): 438-469.

- [9] Cedillo-Campos, M. *Evaluación del Riesgo en Cadenas de Suministro*. Editorial AML, Mexico (2011). ISBN: 978-607-96403-0-9, 10.13140/2.1.1111.5846.
- [10] Cedillo-Campos, M., Bueno, A., González-Ramírez, R., Jiménez-Sánchez, E. & Pérez-Salas, G. *Supply Chains under Security Threat: The First National Exploratory Study in Mexico*, In: Ochoa-Zezzatti, A., Sánchez, J., Cedillo-Campos, M. & Margain de Lourdes (Ed). *Handbook of Research on Military, Aeronautical, and Maritime Logistics and Operations*, 2016. IGI Global, pp. 32-55.
- [11] Montreuil, B., Ballot, E., & Tremblay, W. Modular design of physical internet transport, handling and packaging containers. *Progress in material handling Research: 2014, 13, MHI, International Handling Research Colloquium*, 2015.
- [12] Cedillo-Campos, M. y Cedillo-Campos H. w@areRISK method: security risk level classification of stock keeping units in a warehouse. *Safety Science*, Volume 79, pp. 358–368, 2015
- [13] Perry, W. L., McInnis, B., Price, C. C., Smith, S., & John, S. (2013). *Hollywood, Predictive Policing: The Role of Crime Forecasting in Law Enforcement Operations*. RAND corporation, Washinton.
- [14] Johnson, R. y Wichern, D. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Sexta Edición, Editorial Pearson Prentice Hall, 2007.
- [15] Kovács, G., & Spens, K. M. Abductive reasoning in logistics research. *International journal of physical distribution & logistics management*, 2005.
- [16] Montreuil, Benoit, Russell D. Meller, and Eric Ballot. "Physical internet foundations." *IFAC Proceedings Volumes* 45.6 (2012): 26-30.
- [17] Sallez, Yves, et al. "Proposition of a hybrid control architecture for the routing in a Physical Internet cross-docking hub." *IFAC-PapersOnLine* 48.3 (2015): 1978-1983.
- [18] Sallez, Yves, et al. "On the activeness of intelligent Physical Internet containers." *Computers in Industry* 81 (2016): 96-104.
- [19] Cachon, G. y Terwiesch, C. *Matching Supply with Demand: An Introduction to Operations Management*. 3rd Edition, McGraw-Hill Education, 2012.
- [20] Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. *Investigacion de operaciones*. Décima edición, editorial McGraw-Hill, 2015.