

# The Conflict of Reducing Carbon Emissions of Products

Natalia Robles PhD.

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, nrobles@itcr.ac.cr

*Abstract*—Carbon emissions increase rapidly while a compromise to reduce them has become a difficult and barely impossible goal to accomplish. Customers and governments are compelling industries to reduce the impact on climate change of their products. This research focus is reducing the carbon emissions of a product's supply chain under a carbon tax. A review of research for reducing carbon emissions was done to establish the effect on the total cost. The goal is to show the complexity of the decisions that companies must take to reduce the carbon footprint of their products, and what carbon taxes could stimulate. Finally, practices for supply chains to reduce the carbon emissions are presented for countries that can't afford easily low carbon production equipment and technology.

*Keywords*-- Carbon emissions, Carbon taxes, Carbon Market, Sustainable Supply Chains.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# El Conflicto de la Reducción de las Emisiones de Carbono en la Producción de Bienes

Natalia Robles PhD.

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, nrobles@itcr.ac.cr

*Abstract—Carbon emissions increase rapidly while a compromise to reduce them has become a difficult and barely impossible goal to accomplish. Customers and governments are compelling industries to reduce the impact on climate change of their products. This research focus is reducing the carbon emissions of a product's supply chain under a carbon tax. A review of research for reducing carbon emissions was done to establish the effect on the total cost. The goal is to show the complexity of the decisions that companies must take to reduce the carbon footprint of their products, and what carbon taxes could stimulate. Finally, practices for supply chains to reduce the carbon emissions are presented for countries that can't afford easily low carbon production equipment and technology.*

**Keywords-- Carbon emissions, Carbon taxes, Carbon Market Sustainable Supply Chains.**

## I. INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC señaló la necesidad de llevar a cero las emisiones netas de gases de efecto invernadero para el año 2100 e instó a las naciones desarrolladas a intensificar los esfuerzos en ese sentido [1]. Un año después, en la Conferencia de las Partes (Conference of the Parts) COP 21, más de 180 naciones entregaron sus compromisos (INDC Intended Nationally Determined Contributions) con los que se esperaba reducir la generación de emisiones y limitar el aumento de la temperatura a menos de 2°C (con respecto a los niveles preindustriales). Sin embargo, en la reunión COP 25 celebrada en el 2019 en Madrid se presentó poca evidencia de avance en los compromisos dejando aún pendiente una conciliación sobre el establecimiento de un mercado de carbono para promover la reducción de emisiones. En la COP 26 celebrada en el 2021 en Glasgow aún no se llegó a fijar un correcto precio del carbono quedando en evidencia que se está lejos de un mercado mundial de carbono. Más reciente en la COP 27 a finales del 2022 celebrada en Egipto, tampoco se logró un acuerdo firme. Por otra parte, la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha roto récord año a año, en el 2018 alcanzó 407,8 partes por millón (ppm) en el 2019 llegó a 410 ppm, en el 2020 a 413 ppm y en el 2021 a 419ppm, estos dos últimos años hubo incremento a pesar de la menor actividad mundial debido a la pandemia.

Para enfrentar el cambio climático se ha planteado la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la rehabilitación de los bosques y el cambio de los sistemas de

generación de energía. Para reducir la cantidad de carbono en la atmósfera se han propuesto diversas iniciativas, algunas complejas, como la captura de este carbono para su almacenamiento o inserción en lo profundo del océano o en la tierra. Aunque ya existen algunos proyectos operando es una medida costosa y de difícil implementación a nivel global. Otras propuestas similarmente ambiciosas son el cierre total de plantas de generación de energía con carbón y por ende la dependencia 100% para la generación de energía de tecnologías limpias como la solar o la eólica. Entre las propuestas más sencillas de aplicar está el aumento del precio de los combustibles fósiles, aunque se debe valorar pues encarecería muchos bienes y servicios. El protocolo de Kyoto, promulgado en el año 1997 propició tres mecanismos flexibles para controlar las emisiones de gases efecto invernadero. Estos mecanismos contemplaron la ganancia de créditos de carbono por invertir en proyectos ambientales en países en desarrollo o en proyectos de reforestación en países industrializados o bien en economías en transición. El tercer mecanismo fue permitir a las empresas comprar créditos a quienes contaminan menos para mantener las emisiones por debajo de un determinado límite ya sea establecido por el gobierno o por un mecanismo internacional. En la Unión Europea se han implementado mercados de carbono, principalmente el European Climate Exchange® ECX. También se han implementado en Canadá y en Estados Unidos (temporalmente en Chicago). El funcionamiento solo temporal de algunos de estos mercados de carbono obedeció principalmente al bajo compromiso de los principales generadores de carbono. Por ese motivo se esperaba en la más reciente Conferencia de las Partes COP 27 un acuerdo drástico sobre el precio de las emisiones, pero no sucedió.

Los bosques, en especial los tropicales, funcionan como “sumideros” pues guardan el carbono por ello contribuyen a reducir el cambio climático. Cuando las plantas respiran emiten CO<sub>2</sub> (los animales también) pero las plantas también hacen fotosíntesis y para ello consumen carbono, usualmente secuestran más carbono del que emiten. El destinar bosques para esta captura de carbono es lo que pretenden los mercados de carbono y ciertamente son necesarios al pensar en carbono neutralidad. La carbono-neutralidad consiste en llegar a una emisión neta nula mediante la compensación de las emisiones que no se puedan reducir. Lamentablemente hay evidencia de que el mismo cambio climático ha reducido la capacidad de captura de carbono de los bosques. No obstante, algunos autores afirman que el poder comprar créditos de carbono en

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

proyectos ambientales para compensar las emisiones de carbono propicia que en lugar de tomar acciones para reducirlas se prefiera pagar por ellas [2]. Además, cuestionan si promueven que los países en desarrollo se mantengan como proyectos de compensación de países desarrollados, siendo el valor de la compensación mucho menor que el de los productos que importan de los países desarrollados [2].

Entre las propuestas para limitar las emisiones de carbono han surgido los esquemas de impuestos como medio para desestimularlas y para solventar los estragos en el cambio climático, por ejemplo, en Australia desde el 2012 se han aplicado impuestos al carbono [3]. El Fondo Monetario Internacional FMI ha indicado que los impuestos al carbono, parecen ser la forma más práctica y eficiente para reducir la generación de carbono. Sin embargo, al ser las emisiones de carbono un sub-producto de la producción industrial y económica el restringirlas implica un costo alto. El FMI también ha recomendado fijar un precio adecuado para los combustibles basados en carbono. El precio adecuado de los combustibles fósiles para el usuario final debe incluir el costo de la producción y adquisición, pero también el de la contaminación del aire y su contribución al cambio climático, ya que son externalidades. Eso ha llevado a acuñar el término de costo social del carbono. Sin embargo, definir un costo, un valor, es muy complejo, entre otros motivos, por la incertidumbre en los escenarios de los efectos del cambio climático en el futuro [4]. Algunos economistas afirman que la creación de un impuesto mundial al carbono sería una medida muy efectiva, con la cual se podrían financiar investigaciones para reducir los efectos dañinos al medio ambiente o bien para ayudar a países y hogares de bajos ingresos para adquirir tecnologías más eficientes y de menores emisiones. Según el Fondo Monetario Internacional para limitar el calentamiento global a 2°C se requiere un precio del carbono global de al menos 75 a 100\$ por tonelada para el 2030 [5]. Con ello se pretende lograr un precio más justo para las emisiones de carbono e inducir a la migración a energías más “verdes”. Sin embargo, la concepción de un impuesto a los carburantes no es bien recibida, como lo demostraron las protestas en Francia en el 2018. Lograr una drástica reducción de las emisiones de carbono puede ser de muy alto costo. El informe Instituto de Investigación Económica de Nueva Zelanda NZIER muestra que reducir las emisiones al 50% de lo que eran en el año 1990 conllevaría un costo de 19,2 mil millones de dólares anuales hasta el 2050, aproximadamente 16% del PIB proyectado para esa fecha. Eso sería un impuesto de casi 2.4 dólares por litro de combustible. Por ese motivo los economistas incitan a investigar en energía limpias más eficientes y menos costosas que las existentes [6].

La descarbonización industrial como resultado del cambio hacia energía limpias eficientes y de bajo costo no es algo que se pueda convertir en una realidad en el corto plazo mientras que el limitar el crecimiento de las emisiones de carbono es imperante. Durante la reciente pandemia debido al virus

SARS-COV2 el mundo entero experimento un descenso en las emisiones de gases de efecto invernadero demostrando que las actividades humanas, principalmente las actividades comerciales e industriales, son la causa del imparable crecimiento que han tenido en las últimas décadas. Si algo beneficioso tuvo esta pandemia fue que demostró que muchas actividades, como servicios, se pueden realizar de forma virtual evitando los desplazamientos de los clientes. Igualmente, que muchas labores las pueden realizar los empleados desde su hogar mediante el teletrabajo. En muchos países el transporte es una las principales fuentes de emisiones de carbono. Por otra parte, también quedó claro que no todas las actividades se pueden realizar de forma virtual. Los seres humanos somos creaturas físicas así que en particular la fabricación y distribución de productos (bienes tangibles) requiere de trasiegos, muchas veces a grandes distancias, por lo que permanece la necesidad analizar formas de reducir las emisiones de carbono. Es por ese motivo que en este artículo se estudian las emisiones de carbono que genera un producto, y se comparan los resultados de varios estudios que mediante modelos matemáticos aplicados a cadenas de suministros de productos han mostrado el efecto en el costo operativo de buscar reducir y más aún minimizar las emisiones de carbono. Además, se estudia como un impuesto a las emisiones de carbono puede obligar a tomar acciones para el fin de reducir las emisiones de carbono de un producto, pero ello según el monto del impuesto. Finalmente se sugieren algunas prácticas para las operaciones a fin de reducir las emisiones de carbono de la cadena de suministros.

## II. COMPARACIÓN DEL EFECTO EN LOS COSTOS DE LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CARBONO EN LA CADENA DE SUMINISTROS DE PRODUCTOS

Las emisiones de carbono de un producto proceden principalmente de dos grandes fuentes: las generadas en los procesos productivos y las debidas a los trasiegos de materiales y productos. Las emisiones de los procesos productivos contemplan tanto las de las instalaciones de fabricación como las de los proveedores y también las de los centros de almacenamiento (según los requisitos de almacenaje, como las temperaturas controladas de refrigeración o congelación). Los trasiegos ocurren entre proveedores y fábricas, entre fábricas y centros de distribución, entre centros de distribución y clientes. Según el producto bajo consideración, los procesos productivos varían y con ello sus consumos energéticos, de agua y de materiales. Las emisiones generadas por los trasiegos también varían según el medio de transporte que se utilice y condiciones particulares como una temperatura controlada, refrigeración o congelación, generando mayores emisiones. Por ende, la decisión que favorece el medio ambiente no siempre es fácil de identificar, para ello se requiere considerar todos los factores involucrados.

Para estudiar el efecto de la reducción de las emisiones de carbono en la cadena de suministros de un

producto se compararon varios estudios realizados con modelos matemáticos de optimización para reducir las emisiones de carbono de la cadena de suministros de distintos productos. En el Cuadro I se resume su comparación.

**CUADRO I**  
COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS COSTOS OPERATIVOS Y LAS EMISIONES DE CARBONO DE LA CADENA DE SUMINISTROS PARA VARIOS PRODUCTOS

Sector Industria Producto	Configuración de la Cadena de suministros del modelo propuesto	Costo Total y Emisiones de carbono (tCO <sub>2e</sub> (configuración al inicio )	Costo Total y Emisiones de carbono (nueva configuración con emisiones minimizadas)
Acero [8]	No incluye centros de distribución (ni sus procesos ni trasiegos).	Costo= 763364* Emisiones= 21012* 19383** 19718***	Costo Total= 199262** 1057*** Reducir las emisiones un 8.5% aumentó el costo un 25%, y otra opción redujo un 7% las emisiones menos del 0.5% de incremento en el costo.
Electrónico [9]	No incluye proveedores. No incluyen las emisiones de los procesos productivos.	Costo= 3875230 <sup>A</sup> 3863032 <sup>B</sup> Emisiones= 20805 <sup>A</sup> 21812 <sup>B</sup> Limitando fechas: 18586 <sup>A</sup> 15577 <sup>B</sup>	Costo Total= 36.634 <sup>A</sup> 31984 <sup>B</sup> Reducir las emisiones un 11% aumentó el costo 0.9% y otra opción (que aumenta el inventario y redujo trasiegos) las redujo un 28% a un incremento en el costo del 0.8%
Textiles [10]	Comprende proveedores, fábricas, y centros de distribución	Costo= 1400000* Emisiones= 3050* 2880 <sup>A</sup>	Costo Total=600000 <sup>A</sup> Reducir las emisiones 6% aumentó el costo un 40%. Otra opción redujo las emisiones 1% a un aumento en el costo del 7%
No indica el producto [11]	No incluyen proveedores	Costo= 80000* Emisiones= El caso es 250 tCO <sub>2e</sub> Límites a: 200 <sup>A</sup> 150 <sup>B</sup>	Costo Total= 20000 <sup>A</sup> 60000 <sup>B</sup> Bajar las emisiones un 70% implicó aumentar el costo un 75%. Bajar las emisiones un 20% implicó aumentar el costo el 25%.
Textil (prenda) [12]	Comprende proveedores, fábricas, y centros de distribución	Costo= 1368687* Emisiones= 3049.69* 2882.37** 2984.35***	Costo Total= 1976531** 1745338*** Reducir las emisiones un 8% aumentó el costo 43% pero una opción las redujo un 3% a un incremento en el costo del 27%
Muebles sanitarios acrílicos (tinas de baño) [13]	Comprende proveedores, una fábrica, centros de distribución, y además sitios de recolección (logística inversa)	Costo= 0.25* Emisiones= 4087* 3540** 3499.5***	Costo Total= 0.92** 0.47*** Reducir las emisiones un 15% aumentó el costo 37%. Otra opción las redujo un monto muy similar a un incremento de 20% en el costo.

Notas del cuadro:

\*Caso al optimizar el costo solamente

\*\* Al optimizar solo las emisiones

\*\*\* Al optimizar ambos costos y emisiones

A Caso de estudio

B Caso de estudio (diferente al A)

Cabe resaltar que los modelos difieren en varios aspectos, uno importante es que no consideran los mismos actores o nodos de la cadena, por ejemplo, no todos consideraron a los proveedores. En el Cuadro I se muestra para cada estudio, el producto, la configuración, el costo y las emisiones de carbono iniciales. En el cuadro también se muestra la configuración que resulta al minimizar las emisiones de carbono, que en todos los casos fue distinta a la inicial, con el nuevo costo. Varios de los estudios analizaron más de una opción, el resultado también se muestra en el cuadro con la relación de aumento y disminución entre los costos y las emisiones.

Del Cuadro I se tiene que la configuración de la cadena de suministros que minimiza las emisiones de carbono es distinta a la configuración que minimiza el costo total. En todos los casos que se muestran, minimizar las emisiones implicó una configuración con un mayor costo, pero es importante destacar que el aumento en el costo comparado con la reducción en las emisiones fue en algunos bastante favorable como en el caso electrónico donde se logra una reducción del 28% en las emisiones con un aumento en el costo del 1%. Por lo tanto, para lograr una reducción en las emisiones de carbono de la cadena de suministros de un producto se debe estar dispuesto a asumir un costo. No obstante, la empresa podría definir el costo que pueda aceptar, o la cantidad de ingresos que se esté dispuesta a dejar de percibir.

Por ejemplo, para reducir al mínimo las emisiones de carbono en varios de los casos anteriores se cambió el proveedor, por uno que conllevaba menos emisiones o bien porque se ubicaba más próximo y por ende el transporte representaba menos emisiones o bien una combinación de ambas causas. Sin embargo, este proveedor vendía el material a un precio más alto. Entonces, comprar a este proveedor reduce las emisiones totales del producto, pero aumentaba el costo operativo total. Bajo la mentalidad de reducción de costos y maximización de utilidades como meta principal una empresa no debería comprar material a ese proveedor sino mantener el de menor costo, aunque lleve a una huella de carbono mayor. En tanto que la huella de carbono no conlleve ninguna repercusión ¿Por qué habría que asumir costos mayores a fin de reducirla? Por eso dar un valor económico, un precio a las emisiones de carbono obligaría el actuar con el fin de reducirlas y reducir así el costo debido a ellas. Para probar el efecto del valor económico a las emisiones de carbono, desde el punto de vista coercitivo de un impuesto se realiza el estudio en la siguiente sección.

### III. ESTUDIO DE IMPUESTOS A LAS EMISIONES DE CARBONO EN LA CADENA DE SUMINISTROS

Se modificó el modelo matemático presentado en [14] que contempla una configuración de cadena de suministros compuesta por proveedores, fábricas, centros de distribución y

vendedores. La modificación radica en la creación de una función objetivo que incluye el valor de un impuesto a las emisiones de carbono. Al hacer eso tanto la función de costo como la de las emisiones quedarían en términos económico posibilitando su unión en una única función.

La función del costo contempla los costos operativos ocurren a lo interno de cada nodo o actor de la cadena, en tanto que los costos de traslados son los correspondientes al traslado de los productos entre los actores (nodos) de la cadena. Los costos operativos por su parte tienen un componente fijo y otro variable. Así la función de costo económico de la configuración se compone de:

Costo C = precio de materiales de los proveedores (1) + costos operativos de las fábricas (2) + costos operativos de los centros de distribución (3) + costos del traslado de proveedores a fábricas (4) + costos del traslado de fábricas a centros de distribución (5) + costos de traslado de centros de distribución a detallistas (6) + costos fijos de las fábricas seleccionadas (7) + costos fijos de los centros de distribución seleccionados (8).

Las emisiones de carbono de la configuración de la cadena de suministros se contabilizan tanto para las operaciones y procesos productivos internos de los proveedores, fábricas y centros de distribución, como para los traslados entre ellos. Los componentes de las emisiones de carbono de la cadena de suministros serían:

Emisiones de carbono equivalente E = emisiones operativas de los proveedores (1) + emisiones operativas de las fábricas (2) + emisiones operativas de los centros de distribución (3) + emisiones por traslado de proveedores a fábricas (4) + emisiones por traslado de fábricas a centros de distribución (5) + emisiones por traslado de centros de distribución a detallistas (6) + emisiones fijas de las fábricas seleccionadas (7) + emisiones fijas de los centros de distribución seleccionados (8)

De esta forma las funciones del costo “C”, ecuación 1, y de las emisiones de carbono “E”, ecuación 2, son las siguientes (los números entre paréntesis identifican los componentes antes indicados para cada una):

Costo C (\$) =

$$\sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ri} x_{rij} (1) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \beta_j x_{jk} (2) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \delta_k x_{kl} (3) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \rho_{ij} * x_{ij} * d_{ij} (4) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \tau_{jk} * x_{jk} * d_{jk} (5) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \varphi_{kl} * x_{kl} * d_{kl} (6) + \sum_{j=1}^m \lambda_j Uf_j (7) + \sum_{k=1}^z v_k Uc_k (8) \quad (1)$$

Emisiones E (kgCO<sub>2</sub>e) =

$$\left[ \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} EE p_i EFEE p_i + \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} FE p_i EFEE p_i \right] (1) + \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} EE f_j EFEE f_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} FE f_j EFEE f_j \right] (2) + \left[ \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} EE c_k EFEE c_k + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} FE c_k EFEE c_k \right] (3) + \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} d_{ij} TF p_{ij} (4) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} d_{jk} TF f_{jk} (5) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w d_{kl} x_{kl} TF c_{kl} (6) + \sum_{j=1}^m \omega_j Uf_j (7) + \sum_{k=1}^z \sigma_k Uc_k (8) \quad (2)$$

En el Anexo#1 se detalla la simbología de cada término del costo y de las emisiones de carbono. Los factores de emisión de carbono se aplican según el tipo de combustible y fuente de energía utilizada.

La nueva función objetivo es una en una función que combina el costo y las emisiones de carbono trasladadas a un monto económico, otro costo, por ende, la intención es minimizarla (pues es un costo). La expresión de la función, ecuación 3, es:

Minimizar

$$\text{Función del Costo Total} = C + \text{Impuesto } (\$/\text{kgCO}_2\text{e}) * E \quad (3)$$

El modelo completo con esta nueva función objetivo y las restricciones asociadas a satisfacer la demanda, se aplicó al caso de estudio mostrado en [14] en el que se requerían 3 materiales, había 3 posibles proveedores para cada uno, 2 instalaciones de fabricación, 4 centros de distribución y 8 clientes. Se experimentó con distintos montos de impuestos al carbono ((\$/tCO<sub>2</sub>e), el Cuadro II muestra los resultados:

CUADRO II  
MONTOS DE IMPUESTO A LAS EMISIONES DE CARBONO DE LA CADENA DE SUMINISTROS

Monto de impuesto ((\$/tCO <sub>2</sub> e)	Configuración de la Cadena de Suministros (al minimizar el costo total)
0 a 50	Igual a la que se obtiene cuando el único objetivo es minimizar los costos “C”.
50 a 100	Igual a la que se obtiene cuando el único objetivo es minimizar los costos “C”.
100 a 150	Igual a la que se obtiene cuando el único objetivo es minimizar los costos “C”.
150 a 194	Igual a la que se obtiene cuando el único objetivo es minimizar los costos “C”.
194	Distinta, este monto de impuesto al carbono obliga a cambiar la configuración

Con lo anterior se comprueba que indicado por el Fondo Monetario Internacional en [5] a bajos montos de impuestos

no estimulan acciones. Evidentemente el monto acá encontrado obedece a las particularidades del caso estudiado con sus respectivos parámetros. Para mostrarlo se modificaron los parámetros del modelo con respecto a la distribución solamente, en concreto con mayores rendimientos en la distribución tanto de proveedores a fábricas, como de estas a centros de distribución y de ahí a los vendedores o clientes. Bajo mayores rendimientos del transporte se obtuvo que a partir de un impuesto a las emisiones de carbono de 150 ( $\$/tCO_2e$ ) se obligaba al cambio en la configuración de la cadena de suministros a fin de reducirlas. Un mejor rendimiento del combustible se puede dar por el tipo de transporte, pero también aspectos operativos internos como las prácticas de conducción y otros externos como los congestionamientos.

Por otra parte, es importante tener presente que los impuestos no suelen ser bien recibidos y los países tienen sus economías recién levantando tras la pandemia. Recientemente el Parlamento Europeo aprobó para los próximos años prohibir los vehículos nuevos que no sean eléctricos. Ese es un ejemplo de imposición que obliga a tomar acciones. Pero si bien eso es algo deseable en todo el mundo, un planteamiento de ese tipo afectaría negativamente a regiones con economías golpeadas, América Latina y el Caribe se caracterizan por ser los menores emisores de carbono (comparados con Asia, Europa y América del Norte) pero también se caracterizan por su pobreza económica para afrontar innovación tecnológica a gran escala como paneles solares, vehículos eléctricos y tecnologías de menor consumo energético. Además, si bien se espera que en las próximas décadas emergerán equipos con tecnologías de menor consumo energético, un mayor aprovechamiento de la energía solar y eólica, también una mayor producción de bio combustibles [15] no se puede esperar a que las tecnologías estén en el mercado, sino que es importante hacer cambios desde hoy para reducir las emisiones de carbono de los procesos industriales. De ahí que en el corto plazo se deben tomar acciones referidas más a las operaciones que se realizan que a la tecnología con la que se realizan. En la siguiente sección se presentan algunas.

#### IV. ACCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CARBONO EN LA CADENA DE SUMINISTROS

A continuación, se presentan posibles acciones en cada actor (nodo) de la cadena de suministros para reducir las emisiones de carbono dirigidas más a las operaciones que a la tecnología:

- Acciones con los proveedores:

Como antes se indicó cambiar de proveedor podría ser una buena acción para reducir las emisiones. Pero si no fuera posible también se pueden en su lugar buscar medios para reducir las emisiones debidas a su trasiego, por ejemplo, aumentando el volumen de cada compra para reducir la cantidad de transportes o buscando otros medios de transporte quizá más lentos, pero de menor emisión de carbono. También

podría solicitar a los proveedores reducir el tamaño del embalaje para aumentar la cantidad de cargamento por viaje y reducir así la cantidad de viajes (esto lo ha implementado Walmart con sus proveedores) [16].

- Acciones con los transportes para el trasiego de materiales y productos:

Las acciones en los trasiegos se pueden aplicar también al envío de productos a centros de distribución y/o también a clientes. Hay compañías que han cambiado sus medios de transporte, por ejemplo, han reducido los transportes aéreos e incrementado los de tren, evidentemente eso según las distancias que se requieran recorrer. La compañía sueca del sector alimenticio ICA entre sus acciones implementó centros de distribución para consolidar los envíos de proveedores y tener así un envío de mayor volumen, en lugar de muchos de poco volumen a sus instalaciones de fabricación [17]. También se puede optar por coordinar entre empresas horarios de entregas de menor congestionamiento vehicular y no que por el contrario se estilan los periodos de recepción limitados.

- Acciones en las instalaciones de fabricación y centros de distribución:

En las instalaciones de fabricación los procesos de transformación de materiales en productos consumen recursos, materias primas, agua y energía. En los centros de distribución, aunque el consumo de recursos suele ser mucho menor, cuando se requieran temperaturas controladas o congelación será importante reducir las emisiones de carbono en ambos casos mediante una mayor eficiencia. Para ello se deberá reducir todo desperdicio por fugas, aislamientos deficientes, entradas y salidas innecesarias a congeladores, operación inadecuada de equipo, y otros desperdicios en cuando sea imposible afrontar un reemplazo de equipos por tecnologías más eficientes.

Cabe resaltar que los procesos industriales por ser intensivos a pesar de que una acción conlleve una reducción que parezca insignificante, la frecuencia de ejecución del proceso demuestra que pueden tener gran impacto en el tiempo. Además, pueden tomarse acciones que, aunque no minimizan la emisión de carbono de toda la cadena de suministros de un producto, son posibles y prontas de implementar y por ende son preferibles a la inacción.

#### IV. CONCLUSIONES

En el ámbito de la ética ambiental el principio de “quien contamina paga” ha sido aceptado, pero aún existe oposición y confusión para establecer el marco general de una justicia ambiental internacional sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Como se mostró en este estudio la reducción de las emisiones de carbono de un producto puede llevar a un costo total mayor que el mínimo. No obstante que la empresa podría escoger una cierta reducción de emisiones de carbono y costo, no es atractivo tener un costo mayor al mínimo posible.

Por ello es necesario dar un valor económico, un precio, razonable, a las emisiones de carbono. En este estudio se demostró que mediante un esquema de impuestos a la generación de emisiones carbono se puede lograr su reducción en la cadena de suministros de un producto mediante cambios en la configuración. Sin embargo, se debe destacar que montos de impuestos bajos no obligarán a llevar a cabo acciones, en esos casos se va a preferir pagar el impuesto.

La situación económica de muchos países y empresas no permite la adquisición de tecnologías de producción más limpias en un corto plazo, por ello se mostraron en el estudio algunas acciones atinentes a las operaciones las cuales, si bien no minimizan la emisión de carbono de toda la cadena de suministros de un producto, se pueden implementar prontamente y son preferibles a mantenerse en la inacción.

El trabajo futuro consistirá en más pruebas de impuestos a otros casos de estudio y en más aspectos para la sostenibilidad.

#### REFERENCES

[1] Intergovernmental Panel for Climate Change IPCC “Climate Change 2014: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Geneva, Switzerland, 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

[2] E. Leff, “La geopolítica de la biodiversidad y el desarrollo sustentable: economización del mundo, racionalidad ambiental y reapropiación social de la naturaleza,” Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales CLACSO, 2011. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.clacso.edu.ar/gsd/collect/clacso/index/assoc/D3838.dir/37Leff.pdf>

[3] A. Zakeri, F. Dehghanian, B. Fahminia y J. Sarkis, “Carbon pricing versus emissions trading: supply chain planning perspective,” *International Journal of Production Economics*, 164, 197–205, 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.012

[4] J.C.J.M. van den Bergh y W.J.W. Botzen, “Monetary valuation of the social cost of CO<sub>2</sub> emissions: A critical survey,” *Ecological Economics*, 114, 33–46, 2015, doi:10.1016/j.ecolecon.2015.03.015

[5] K. Rogoff, “The Inequality Debate We Need 2020,” *Project Syndicate*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.project-syndicate.org/commentary/global-energy-inequality-carbon-tax-by-kenneth-rogooff-2020-01>

[6] B. Lomborg, “El fingir sobre el cambio climático,” *Project Syndicate*, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.project-syndicate.org/commentary/climate-change-undeliverable-emissions-targets-by-bjorn-lomborg-2019-02>

[8] A. Ramudhin, A. Chaabane, M. Kharoune y M. Paquet, “Carbon Market Sensitive Green Supply Chain Network Design,” *Proceedings of the 2008 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2008, doi:10.1109/IEEM.2008.4738039

[9] T.P.N. Le y T-R. Lee, “Model selection with considering the CO<sub>2</sub> emission alone the global supply chain,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(4), 653–672, 2011, doi:10.1007/s10845-011-0613-6

[10] S.C. Tseng y S.W. Hung, “A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management,” *Journal of Environmental Management*, 133, 315–322, 2014, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.023

[11] A. Diabat y D. Simchi-Levi, “A carbon-capped supply chain network problem,” *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 523–527, 2010, [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/1721.1/58988>

[12] S.C. Tseng y S.W. Hung, “A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management,” *Journal of Environmental Management*, 133, 315–322, 2014, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.023

Tseng,

[13] R. Zhao, L. Yiyun, N. Zhang y T. Huang, “An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach,” *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 1085–1097, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.006>

[14] N. Robles-Obando, “Optimización de la cadena de suministros mediante un modelo que incorpora su impacto en el cambio climático,” *Revista Tecnología En Marcha*, 30 (4), 118–129, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i4.3416>

[15] E. Assureira y M. Assureira M, “Bio-Carbón De Hojas De Caña De Azúcar Para Su Empleo Como Combustible Y Agente Reductor En Procesos De Reducción Directa Del Mineral De Hierro,” *Proceedings of the 19<sup>th</sup> LACCEI International Conference Virtual 2021*, doi: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.28>

[16] A. Nagurney, M. Yu y J. Floden, “Supply chain network sustainability under competition and frequencies of activities from production to distribution,” *Computational Management Science*, 10(4), 397–422, 2013, doi: 10.1007/s10287-013-0190-6

[17] United Nations Climate Change, “ICA Gruppen: Beyond Climate Change Neutrality”, Sweden, 2020. [En línea]. Disponible: <https://unfccc.int/climate-action/un-global-climate-action-awards/climate-neutral-now/ica-gruppen>

Anexo 1: Nomenclatura del modelo

- $\alpha_{ri}$  Precio de venta de cada material r del proveedor i
- $\beta_j$  Costo de producción de cada fábrica j (costo variable)
- $\lambda_j$  Costo fijo de operar cada fábrica j
- $\delta_k$  Costo de almacenamiento en el centro de distribución k (costo variable)
- $v_k$  Costo fijo de operar cada centro de distribución k
- $Df_{rj}$  Demanda de material r de cada fábrica j
- $Dd_i$  Demanda de producto de cada detallista l
- $\theta f_j$  Capacidad producción de cada fabrica j
- $\theta p_{ri}$  Capacidad de suministro de material r de proveedor i
- $\theta c_k$  Capacidad de almacenamiento de cada centro de distribución k
- EEPr<sub>i</sub> Consumo energético eléctrico (kWh) de material en proveedor i
- EEF<sub>j</sub> Consumo energético eléctrico (kWh) de producto en fábrica j
- EEc<sub>k</sub> Consumo energético eléctrico (kWh) de producto en centro de distribución k
- FEPr<sub>i</sub> Litros de combustible por material en cada proveedor i
- FEF<sub>j</sub> Litros de combustible por producto en cada fábrica j
- FEc<sub>k</sub> Litros de combustible por producto en centro de distribución k
- REPr<sub>i</sub> Descarga de refrigerante (kg) por material en proveedor i
- REF<sub>j</sub> Descarga de refrigerante (kg) por producto en fábrica j
- REc<sub>k</sub> Descarga de refrigerante (kg) por producto en centro de distribución k
- EFEP<sub>i</sub> Factor de emisión de energía eléctrica de cada proveedor i (kgCO<sub>2</sub>/kWh)
- EFEEF<sub>j</sub> Factor de emisión de energía eléctrica de cada fábrica j (kgCO<sub>2</sub>/kWh)
- EFEEc<sub>k</sub> Factor de emisión de energía eléctrica de cada centro de distribución k (kgCO<sub>2</sub>/kWh)
- EFFEP<sub>i</sub> Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada proveedor i (kgCO<sub>2</sub>/l)
- EFFEF<sub>j</sub> Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada fábrica j (kgCO<sub>2</sub>/l)
- EFFEc<sub>k</sub> Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada centro de distribución k (kgCO<sub>2</sub>/l)
- $\omega_j$  Emisión fija de cada fábrica j (kgCO<sub>2</sub>e)
- $\sigma_k$  Emisión fija de cada centro de distribución k (kgCO<sub>2</sub>e)
- $d_{ij}$  Distancias proveedor i a fábrica j (km)
- $d_{jk}$  Distancias fábrica j a centro distribución k (km)
- $d_{kl}$  Distancias centro distribución k a detallista l (km)
- $\rho_{ij}$  Costo por tonelada-kilómetro del proveedor i a la fábrica j
- $\tau_{jk}$  Costo por tonelada-kilómetro de fábrica j a centro distribución k
- $\phi_{kl}$  Costo por tonelada-kilómetro de centro de distribución k a detallista l
- Tfp<sub>i</sub> Factor de emisión de transporte kgCO<sub>2</sub>e/t-km de proveedor i a fábrica j
- Tff<sub>j</sub> Factor de emisión de transporte kgCO<sub>2</sub>e/t-km de fábrica j a centro de distribución k
- Tfc<sub>k</sub> Factor de emisión de transporte kgCO<sub>2</sub>e/t-km de centro distribución k a detallistas