



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Variaciones en el diseño de red de una cadena de suministro del sector de alimentos bajo criterios de optimización económicos y ambientales: caso distribución de Bienestarina en Colombia**

**Juan Pablo Cruz Castebianco**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial  
Bogotá, Colombia

2019



# **Variaciones en el diseño de red de una cadena de suministro del sector de alimentos bajo criterios de optimización económicos y ambientales: caso distribución de Bienestarina en Colombia**

**Juan Pablo Cruz Castebianco**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería Industrial**

Director:

Carlos Eduardo Moreno Mantilla, PhD

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Grupo de Investigación:

Sociedad, Economía y Productividad, SEPRO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2019



## Resumen

En esta investigación, se presenta un análisis de las variaciones en el diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento del Chocó (Colombia), cuando se consideran diversos criterios de ponderación de los impactos ambientales mediante un modelo de optimización multi-objetivo de la forma Programación de Enteros Mixtos (MIP). El objetivo económico es medido a partir de los costos de producción y distribución de planta a bodega y de bodega a municipio. El objetivo ambiental es cuantificado siguiendo los principios del Análisis de Ciclo de Vida, por medio de la metodología ReCiPe para las perspectivas culturales individualista (corto plazo), jerárquica (mediano plazo) e igualitaria (largo plazo). En particular, se comprueba que un cambio en los criterios de ponderación de los impactos ambientales—lo que dependerá de los intereses particulares del tomador de decisiones—influye significativamente en el diseño de red y las decisiones logísticas de una cadena de suministro. Así mismo, se evidencia que a medida que aumenta el horizonte de tiempo en la consideración de los impactos ambientales, la cadena de suministro de la Bienestarina tiende a favorecer el uso de rutas con transporte multimodal.

**Palabras clave:** Diseño de la cadena de suministro, Optimización multiobjetivo, Análisis de Ciclo de Vida, Desarrollo sostenible, Sector público, Industria de alimentos.

## Abstract

In this research, an analysis of the variations in the network design of the supply chain of the Bienestarina in the department of Chocó (Colombia) is presented, when several weighting criteria of the environmental impacts are considered through a multi-objective optimization model of the form Mixed Integer Programming (MIP). The economic objective is measured from the costs of production and distribution from plant to warehouse and from warehouse to municipality. The environmental objective is quantified following the principles of Life Cycle Analysis, by means of the ReCiPe methodology for the individualist (short term), hierarchical (medium term) and egalitarian (long term) cultural perspectives. In particular, it is verified that a change in the weighting criteria of environmental impacts—which will depend on the particular interests of the decision maker—significantly influences the network design and the logistics decisions of a supply chain. Likewise, it is evident that as the time horizon in the consideration of environmental impacts increases, the supply chain of the Bienestarina tends to favor the use of multimodal transport routes.

**Keywords:** Supply Chain Network Design, Multiobjective Optimization, Life Cycle Analysis, Sustainable Development, Public sector, Food industry.

# Contenido

	Pág.
Contenido	
<b>1. Revisión de Literatura.....</b>	<b>5</b>
1.1 Cadena de suministro .....	5
1.2 Optimización multi-objetivo: incorporación de aspectos económicos y ambientales .....	8
<b>2. Descripción de la cadena de suministro de Bienestarina del ICBF .....</b>	<b>13</b>
2.1 Contexto político y social.....	13
2.2 Modelo de distribución actual .....	15
<b>3. Análisis de Ciclo de Vida de la Bienestarina .....</b>	<b>23</b>
3.1 Definición del objetivo y el alcance.....	24
3.2 Análisis del inventario de ciclo de vida .....	25
3.3 Evaluación del impacto ambiental .....	27
<b>4. Modelado Matemático .....</b>	<b>31</b>
4.1 Modelo de optimización mono-objetivo (económico) .....	32
4.1.1 Conjuntos y parámetros.....	32
4.1.2 Función objetivo y restricciones .....	37
4.2 Modelo de optimización multi-objetivo (económico-ambiental) .....	38
4.2.1 Función objetivo ambiental .....	38
4.2.2 Aproximación a fronteras de Pareto.....	39
<b>5. Discusión de Resultados.....</b>	<b>47</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>51</b>
6.1 Conclusiones.....	51
6.2 Recomendaciones.....	52

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Estructuras de una Cadena de Suministro .....	6
<b>Figura 1-2.</b> Categorías analíticas de la dimensión estructural "Modelado" .....	8
<b>Figura 2-1.</b> Cadena de suministro de Bienestarina del ICBF – Vigencia 2018.....	16
<b>Figura 2-2.</b> Diagrama de flujo de la producción de Bienestarina.....	17
<b>Figura 2-3.</b> Supervisión del ICBF al modelo de distribución de la Bienestarina .....	21
<b>Figura 2-4.</b> Georreferenciación plantas, bodegas y municipios de la cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento del Chocó, Colombia .....	22
<b>Figura 3-1.</b> Sistema de producto para la Bienestarina .....	25
<b>Figura 3-2.</b> Metodología de evaluación de impacto ambiental ReCiPe.....	27
<b>Figura 3-3.</b> Ponderación de las categorías de punto final para ReCiPe bajo diferentes perspectivas culturales.....	28
<b>Figura 3-4.</b> Resultado evaluación del impacto ambiental por procesos unitarios y perspectiva cultural (Gráfica de barras) .....	29
<b>Figura 4-1.</b> Estructura de cadena de suministro de tres eslabones .....	32
<b>Figura 4-2.</b> Diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para el óptimo económico .....	38
<b>Figura 4-3.</b> Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Individualista (Corto plazo).....	40
<b>Figura 4-4.</b> Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Jerárquica (Mediano plazo).....	42
<b>Figura 4-5.</b> Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Igualitaria (Largo plazo) .....	44
<b>Figura 4-6.</b> Comparación de las Fronteras de Pareto de las perspectivas culturales.....	45

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1.</b> Bodegas de redistribución de Bienestarina para la vigencia 2018.....	18
<b>Tabla 3-1.</b> Ficha resumen del alcance y objetivo del Análisis de Ciclo de Vida para el modelo de distribución de Bienestarina .....	24
<b>Tabla 3-2.</b> Cargas ambientales asociadas al proceso de producción de Bienestarina ...	26
<b>Tabla 3-3.</b> Proporción de transporte multimodal por bodega de redistribución de la cadena de suministro de Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) .....	27
<b>Tabla 3-4.</b> Resultado evaluación del impacto ambiental por procesos unitarios y perspectiva cultural .....	29
<b>Tabla 4-1.</b> Capacidad de producción plantas del ICBF.....	32
<b>Tabla 4-2.</b> Capacidad de almacenamiento bodegas de redistribución cadena de suministro de la Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia.....	33
<b>Tabla 4-3.</b> Demanda de Bienestarina para los municipios en el Departamento de Chocó, Colombia.....	33
<b>Tabla 4-4.</b> Costos de producción plantas ICBF .....	34
<b>Tabla 4-5.</b> Costos de distribución de plantas a bodegas cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia .....	35
<b>Tabla 4-6.</b> Distancias de plantas a bodegas cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia.....	35
<b>Tabla 4-7.</b> Costos de distribución de bodegas a municipios cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia .....	36
<b>Tabla 4-8.</b> Distancias de bodegas a municipios cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia.....	36

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Subíndices

Subíndice	Término
$i$	Conjunto de plantas de producción por $i$
$j$	Conjunto de bodegas por $j$
$k$	Conjunto de municipios por $k$

## Parámetros

Símbolo	Término
$CP_i$	Capacidad en kg de producción planta $i$
$CA_i$	Capacidad en kg de almacenamiento de la bodega $j$
$C_{ij}$	Costo de enviar un 1 kg de Bienestarina de la planta $i$ a la bodega $j$
$S_{jk}$	Costo de enviar un 1 kg de Bienestarina de la bodega $j$ al municipio $k$
$CProd_i$	Costo de producir 1 kg de Bienestarina en la planta $i$
$D_k$	Demanda mensual de Bienestarina del municipio $k$
$G_{jk}$	Factor de penalización económica por la cantidad de trasbordos multimodal requeridos para entregar 1 kg de Bienestarina de la bodega $j$ al municipio $k$
$D_{ij}$	Distancia en km desde la planta $i$ hasta la bodega $j$
$D_{jk}$	Distancia en km desde la bodega $j$ hasta el municipio $k$
$DAM_i^{Pr}$	Impacto ambiental de la producción de 1 kg de Bienestarina en la planta $i$
$DAM_i^{Tr P-B}$	Impacto ambiental por km de la distribución de 1 kg de Bienestarina desde la planta $i$
$DAM_j^{Tr B-M}$	Impacto ambiental por km de la distribución de 1 kg de Bienestarina desde la bodega $j$

## Variables

Símbolo	Término
$Q_i$	Kg de Bienestarina producidos en la planta $i$
$X_{ij}$	Kg de Bienestarina transportados de la planta $i$ a la bodega $j$
$Y_{jk}$	Kg de Bienestarina transportados de la bodega $j$ el municipio $k$

# Introducción

En las últimas décadas, el problema del diseño de red de *cadena de suministro* ha sido ampliamente abordado en la literatura académica. Aunque en principio se consideraban básicamente criterios económicos, la preocupación por el cuidado del medio ambiente y los diversos impactos ambientales negativos asociados al desarrollo de las actividades logísticas, han influido en la integración de variables ambientales en el proceso de modelamiento matemático, generando nuevas estructuras de cadenas debido a la presencia de *trade-offs* (i.e., intercambios o compensaciones, en español) entre el desempeño económico y el ambiental (Eskandarpour, Dejax, Miemczyk, & Péton, 2015).

En la evaluación del desempeño ambiental de las cadenas, la generalidad se encuentra en considerar los diferentes impactos ambientales en una sola función objetivo con el fin de incorporar con mayor facilidad esta dimensión en los modelos matemáticos. Sin embargo, esta práctica no garantiza que se obtenga la minimización de un conjunto más representativo de la totalidad de los impactos ambientales, puesto que la optimización se da bajo solo criterio—generalmente los gases de efecto invernadero (Pieragostini, Mussati, & Aguirre, 2012).

Recientemente, algunos trabajos han incluido impactos ambientales de punto medio y de punto final, enfocados principalmente para productos de la industria química y combustibles (Guillén-Gosálbez & Grossmann, 2010; Pinto-Varela, Barbosa-Póvoa, & Novais, 2011; Reyes-Labarta, Salcedo-Díaz, Ruiz-Femenia, Guillén-Gosálbez, & Caballero, 2014; Ruiz-Femenia, Guillén-Gosálbez, Jiménez, & Caballero, 2013) y en menor medida para el reciclaje de desechos (Pishvaei & Razmi, 2012) y la producción de alimentos (Vujanović, Čuček, Pahor, & Kravanja, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo pretende ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del diseño de red de una cadena de suministro cuando se consideran

diversos criterios de ponderación de los impactos ambientales en un modelo de optimización multi-objetivo, específicamente en un modelo de distribución de alimentos, sector que ha sido poco abordado en la literatura académica.

Para ello, se toma como referente la cadena de suministro de la Bienestarina del ICBF en el departamento de Chocó (Colombia). La distribución de Bienestarina es una de las principales estrategias para alcanzar los objetivos de seguridad alimentaria proyectados en el marco del Plan de Desarrollo Nacional 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad” y la Política de Seguridad Alimentaria (CONPES 113 de 2008), involucrando la ejecución presupuestal de cerca de 478.800 millones de pesos entre el 2016 y 2019, para atender población en condiciones de vulnerabilidad socioeconómica.

Para los criterios de ponderación de los impactos ambientales se utiliza una medida de desempeño ambiental basada en el Análisis de Ciclo de Vida de producto, específicamente a través de la evaluación de los impactos en punto final de la metodología ReCipe (Huijbregts et al., 2017). Dentro del análisis de ciclo de vida, la Teoría Cultural se ha utilizado como un instrumento que refleja tanto las visiones de sociedad como sobre la naturaleza (Hofstetter, 1998). Es así como a partir de las cinco perspectivas sobre la forma en que las personas perciben el mundo y se comportan planteadas por la Teoría Cultural, el análisis de ciclo de vida permite evaluar los impactos ambientales desde tres perspectivas culturales: individualista (corto plazo), jerárquica (mediano plazo) e igualitaria (largo plazo).

Con respecto a la optimización del modelo matemático multi-objetivo, se utiliza el método e-constraint, en el cual se selecciona una de las diversas funciones objetivo como la función principal (generalmente la de mayor interés), mientras que las demás funciones entran como una restricción paramétrica. Al variar los valores de estas nuevas restricciones, se obtiene una aproximación a un conjunto eficiente de puntos conocidos como Frontera de Pareto, donde cada punto eficiente representa una serie un diseño de red diferente para la misma cadena de suministro.

Por consiguiente, el objeto de esta investigación se centra en el análisis de las variaciones en el diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento del Chocó, para las perspectivas culturales individualista, jerárquica e

igualitaria, generando la aproximación a las fronteras de Pareto para cada perspectiva, seleccionando diferentes puntos eficientes a lo largo de la frontera y analizando las variaciones con base en el diseño de red para el modelo óptimo a nivel económico.

De esta manera, en la siguiente sección se presenta una revisión de la literatura en torno al concepto de la cadena de suministro, y la evolución que ha sufrido en las últimas décadas debido a la inclusión de consideraciones ambientales. Después, se describe la cadena de suministro de la Bienestarina en Colombia, haciendo énfasis en el Departamento del Chocó como la Regional del ICBF objeto de estudio. Luego, se muestra el Análisis de Ciclo de Vida realizado al sistema de producto de la Bienestarina, tomando como referencia los procesos unitarios de producción, transporte de plantas a bodegas y de bodegas a municipios, ejercicio que permite calcular los impactos asociados por proceso y por perspectiva cultural. Finalmente, se realiza la optimización mono-objetivo (económica) y multi-objetivo (económica-ambiental) para la cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento del Chocó, se construyen las Fronteras de Pareto y se discuten los resultados a la luz de la literatura.



# 1.Revisión de Literatura

## 1.1 Cadena de suministro

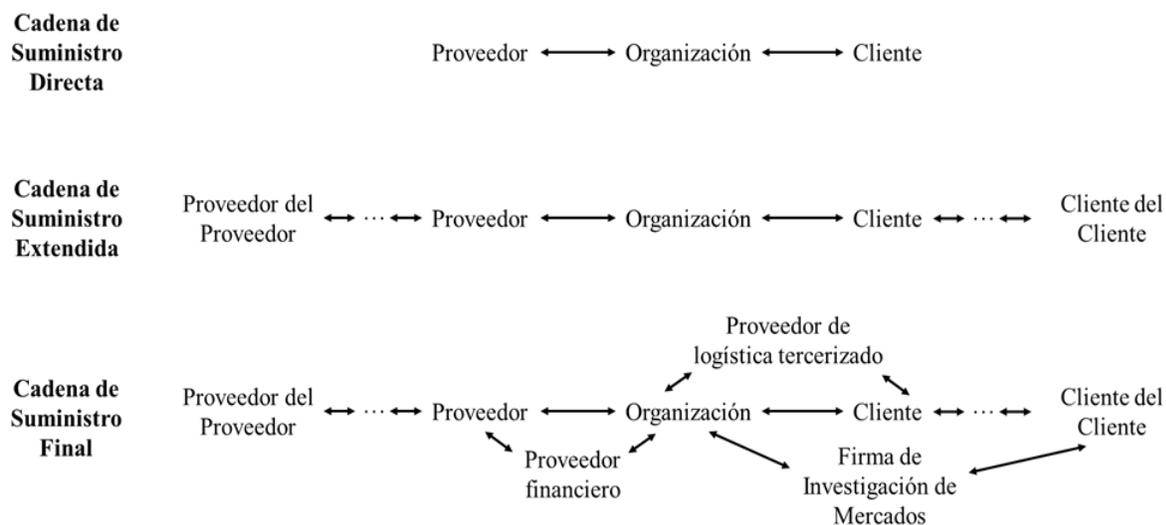
En los años 90, el concepto Cadena de Suministro (en adelante CS) se consolidó para referirse a las actividades asociadas al movimiento de bienes desde la etapa de extracción de materias primas hasta llegar al cliente como un producto terminado. (Quinn, 1977) habla de seis grandes actividades que son desarrolladas en una cadena de suministro: abastecimiento y compras, programación de la producción, procesamiento de pedidos, gestión del inventario, transporte, almacenamiento, y servicio al cliente. El desarrollo de sistemas de información que permitan ejercer monitoreo y control sobre el proceso es transversal a todas estas actividades.

Por su parte, el Consejo de Cadena de Suministro (APICS, 1997) considera las actividades de la CS como *esfuerzos*, los cuales son agrupados en cuatro procesos básicos: plan, fuente, fabricación y entrega. Estos esfuerzos se evidencian en la gestión de la oferta y la demanda, aprovisionamiento de partes y materiales, manufactura y ensamble de partes, almacenamiento y seguimiento de inventario, gestión de pedidos, distribución y entrega al cliente.

Dos años más tarde, Lummus et al. (1999) retoman las consideraciones realizadas por Quinn y el Consejo, añadiendo que las actividades involucradas en la CS permiten conectar una serie de actores internos y externos a la organización, estos últimos representados en los proveedores, transportistas, compañías de terceros y proveedores de sistemas de información. Por medio de varios casos de estudio, Lummus et al. resaltan que estos actores se encuentran relacionados mediante dos flujos principalmente: de producto y de información.

A su vez, Mentzer et al. (2001) definen la CS con base en la integración de actores por medio de los flujos presentes en la cadena. Según estos autores, la CS comprende flujos de producto e información, además de servicios y finanzas. Mentzer et al. amplían la cadena al incluir otros actores, por lo cual clasifican las CS en tres tipos: directa, extendida y final (**Figura 1-1**). La CS Directa está conformada por el proveedor, la compañía y el cliente. En la CS Extendida se incluye aguas arriba al proveedor del proveedor, hasta llegar a la extracción de la materia prima, mientras que aguas abajo abarca desde el primer cliente hasta al cliente final del producto. Por último, la CS Final vincula nuevos actores mediante los flujos de servicios y finanzas, donde toman lugar proveedores de servicios logísticos tercerizados, entidades financieras y firmas de investigación de mercados.

**Figura 1-1.** Estructuras de una Cadena de Suministro



Fuente: Elaboración propia a partir de (Mentzer et al., 2001)

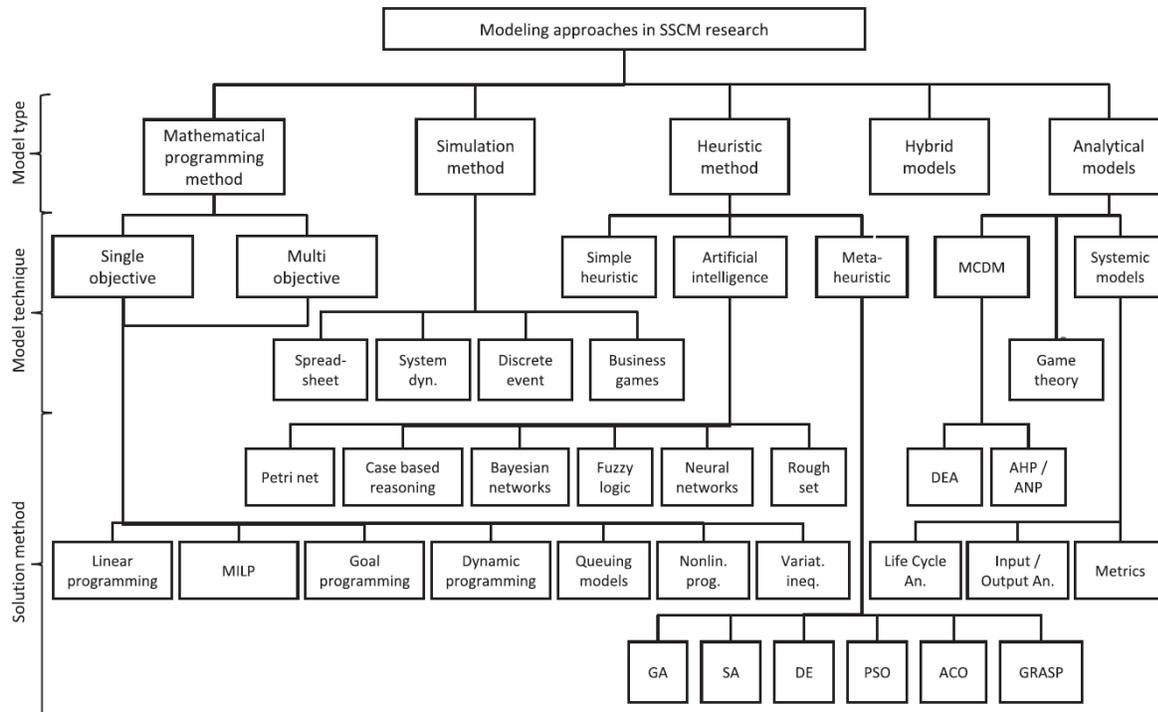
Para Mentzer et al., una cadena de suministro puede existir sin implicar que ésta sea administrada o no. Así, establecen que cadena de suministro es el nombre que se le atribuye simplemente a la forma o sistema que emerge de la interacción entre los actores y canales de distribución, mientras que gestionar una cadena de suministro requiere de un esfuerzo adicional de las organizaciones.

Aunque la existencia de una CS está determinada por la presencia de sus actores y los flujos que los conectan, la gestión de la cadena va más allá porque permite modificar su

estructura a través de decisiones sobre localización, asignación y capacidad de las instalaciones. En la literatura académica, la disciplina que aborda estas decisiones se conoce como Diseño de la Red de Cadena de Suministro (SCND, por sus siglas en inglés) (Eskandarpour et al., 2015).

En principio, la gestión y diseño de las cadenas de suministro fue realizada a partir de criterios económicos. La búsqueda de eficiencia, aprovechamiento de materiales, reducción de tiempos y costos, han sido algunos de los principales criterios utilizados. No obstante, la creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente y los impactos negativos sobre la sociedad han generado que la variable económica no sea la única tomada en cuenta a la hora de gestionar una cadena. De este modo, la inclusión de los factores ambientales y sociales a los modelos de optimización es cada vez más frecuente, así como el desarrollo de modelos, metodologías y técnicas para realizar la evaluación de estos impactos, y su integración al modelado de las cadenas de suministro (O'Rourke, 2014; Pagell & Shevchenko, 2013).

Brandenburg et al. (2014) proponen un marco de referencia que agrupa modelos, técnicas y métodos de solución (**Figura 1-2**), el cual brinda una comprensión adecuada del entorno donde se han desarrollado las investigaciones del SCND. Así, dicho marco identifica cinco enfoques de modelado de una CS: programación matemática, simulación, heurísticas, modelos híbridos y modelos analíticos, cada uno de los cuales cuenta con una serie de técnicas de modelamiento y métodos de solución.

**Figura 1-2.** Categorías analíticas de la dimensión estructural "Modelado"

Fuente: Tomado de (Brandenburg et al., 2014)

Los estudios alrededor de SCND pueden llegar a integrar más de uno de los métodos propuestos por Brandenburg de acuerdo con el nivel de complejidad del sistema a analizar y la solución que se desea brindar. Dada la amplitud del campo de investigación, en esta revisión se centra la atención en el enfoque de programación matemática mediante optimización multiobjetivo, con el fin de analizar el proceso de integración de factores ambientales en el modelamiento matemático. En cuanto al método de evaluación de impactos ambientales, se utiliza como referente el Análisis de Ciclo de Vida.

## 1.2 Optimización multi-objetivo: incorporación de aspectos económicos y ambientales

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una técnica para la evaluación del desempeño ambiental, la cual permite cuantificar la carga ambiental y sus potenciales impactos sobre la totalidad del ciclo de vida de un producto, proceso o actividad (Azapagic, 1999).

En los años 90, las principales aplicaciones del ACV giraban alrededor de los productos: análisis de productos propios, marketing, selección de proveedores y diseño de productos, dando uso limitado a la capacidad de la herramienta básicamente por los altos costos que tiene aplicarlo a lo largo de toda el ciclo de vida (Azapagic, 1999).

Azapagic destaca las potencialidades del ACV no solo a nivel de los productos, sino también en la selección, diseño y optimización de los procesos de producción, en especial para las compañías de la industria química. Para Azapagic, incorporar el Análisis de Ciclo de Vida a los sistemas de optimización multi-objetivo consiste en tres etapas:

- Llevar a cabo el estudio de ACV
- Formular el problema de optimización multi-objetivo en el contexto del ACV
- Realizar la optimización multi-objetivo y seleccionar la mejor solución

Una de las principales ventajas del ACV es la posibilidad de integrar las diferentes cargas e impactos en una función de impacto ambiental. Sin embargo, aún existe un amplio sector académico que ve con desconfianza este proceso, pues la agrupación de los impactos ambientales y su respectiva valoración implican realizar juicios de valor subjetivos (Azapagic, 1999; De Schryver et al., 2011).

En su trabajo sobre el diseño de redes de cadenas de suministro con criterios ambientales, Hugo & Pistikopoulos (2005) también reconocen la subjetividad presente en la agregación de los impactos ambientales. En consecuencia, estos autores hacen uso de los conceptos de la Teoría Cultural dentro del contexto del Eco-Indicador 99, una de las metodologías de ACV mejor establecidas. De esta forma, se busca brindar un carácter científico a los juicios de valor realizando la asignación de valor desde tres perspectivas culturales: individualista, jerárquica e igualitaria. Esta metodología es aplicada con el fin de integrar criterios del ACV en el diseño y la planificación de las cadenas de suministro, los cuales sirvan como herramienta de soporte a las decisiones estratégicas de inversión (localización, ampliación de capacidad, selección de tecnología, entre otros).

Con el fin de reducir la subjetividad en ACV, Laínez et al. (2008) y Bojarski et al. (2009) realizan la agregación de las categorías de daño después de optimizar cada una de las categorías de impacto en una cadena de suministro de Anhídrico Maleico, de forma que cada impacto de punto medio es asumido como una función objetivo a optimizar. La metodología seleccionada para realizar el estudio de ACV es el IMPACT2002+, la cual considera 14 impactos de punto medio (toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, desgaste de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidificación/nitrificación terrestre, acidificación acuática, eutroficación acuática, ocupación de tierra, calentamiento global, energías no renovables, extracción de mineral) y 4 categorías de daño (salud humana, calidad de los ecosistemas, cambio climático, recursos).

A diferencia de Azapagic, Laínez et al. y Bojarski et al. no se enfocan en los procesos, sino en el diseño de la estructura de la cadena de suministro, encontrando que para cada combinación óptima de impacto ambiental y costos, existe un diseño diferente de la cadena. De este modo, las decisiones de localización, asignación y capacidad se ven afectadas si se privilegia la variable económica o la ambiental.

Son varios los estudios que contemplan la optimización multi-objetivo entre criterios económicos y ambientales con el fin de mejorar el diseño de la CS, principalmente en cadenas de la industria química (Guillén-Gosálbez & Grossmann, 2010) (Pinto-Varela et al., 2011) (Ruiz-Femenia et al., 2013) (Reyes-Labarta et al., 2014) (Tang & You, 2018) y el desarrollo de combustibles biodegradables (Kostin, Mele, & Guillén-Gosálbez, 2011) (Lucas, Bezzo, & Carvalho, 2014) (Liu, Qiu, & Chen, 2014) (Kostin, Guillén-Gosálbez, & Jiménez, 2015). En menor medida se encuentran trabajos sobre producción de alimentos (Vujanović et al., 2014) y reciclaje de desechos (Pishvaei & Razmi, 2012). Respecto a las metodologías de ACV para realizar la evaluación ambiental, las más utilizadas son IMPACT2002+ y Eco-Indicador 99.

Específicamente en cadenas de suministro de alimentos, la referencia más cercana es la investigación de Varsei & Polyakovskiy (2016), la cual es desarrollada en la industria de vinos en Australia. Los autores consideran como objetivos principales la minimización de costos de apertura de las instalaciones y costos variables, minimización del total de gases de efecto invernadero producto de las actividades de transporte y maximización de

la sostenibilidad social de la cadena en términos de generación de empleo y menores impactos sobre la región. El estudio permite evidenciar la presencia de trade-offs entre los tres objetivos, lo cual conlleva a la reconfiguración de la cadena y quizá, a la necesidad de crear un nuevo modelo de negocio de acuerdo con el concepto de sostenibilidad (Varsei & Polyakovskiy, 2016) (Mota, Gomes, Carvalho, & Barbosa-Póvoa, 2015).

Eskandarpour et al. (2015) realizan una revisión de literatura tomando como objeto de estudio 87 artículos relacionados con el SCND y la integración del concepto de sostenibilidad mediante el uso de modelos matemáticos. Dicha investigación muestra que más de la mitad de los trabajos se encuentran en sectores de energía, procesos químicos y reciclaje de residuos, y unos pocos se concentran en bienes industriales y bienes de consumo. Áreas como manufactura, servicios de transporte, comercio al por menor y distribución de alimentos, apenas han sido estudiados. Así mismo, los autores resaltan que el enfoque hacia el sector público ha sido limitado, lo cual presenta una gran oportunidad de investigación en trabajos futuros.

En cuanto a los modelos matemáticos, Eskandarpour et al. (2015) muestran que para los objetivos ambientales, el enfoque se da frecuentemente sobre la emisión equivalente de gases de efecto invernadero y es una práctica usual la agrupación de los impactos ambientales en una sola función. No obstante, optimizar solamente un criterio (gases de efecto invernadero) no garantiza la minimización de la totalidad de los impactos ambientales (Pieragostini et al., 2012).

Recientemente, Ekener et al. (2018) desarrollan una metodología de evaluación de la sostenibilidad en el ciclo de vida para combustibles de biomasa y transporte de combustibles fósiles, considerando las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, social y económica). Con respecto a la dimensión social, se apoyan en la Teoría Cultural indicando que dependiendo de la perspectiva (individualista, jerárquica o igualitaria), se pone mayor énfasis en alguna de las dimensiones de la sostenibilidad. Así las cosas, la perspectiva individualista prioriza la dimensión económica y deja al final la dimensión social. En la perspectiva jerárquica, se busca mantener en equilibrio las dimensiones económica y ambiental, pero se coloca en primer lugar esta última. Finalmente, la

perspectiva igualitaria ubica en primer lugar la dimensión social, después la dimensión ambiental y por último la económica.

Con relación a este aspecto, De Schryver et al. (De Schryver et al., 2011) argumentan que considerar diferentes perspectivas puede influenciar la evaluación del impacto ambiental, toda vez que cada perspectiva de la Teoría Cultural tiene ponderaciones diferentes para los factores de categorización de los impactos de punto medio y final. En este sentido, estos autores desarrollan un estudio para la categorización del impacto a la Salud Humana, encontrando que para todos los factores el mayor impacto ambiental se presenta en la perspectiva igualitaria, seguida de la jerárquica y finalmente la individualista, orden que está asociado con el horizonte de tiempo de cada perspectiva.

Teniendo en cuenta que la perspectiva cultural influencia el valor de los factores de categorización y el cálculo del daño ambiental general, es necesario definir la perspectiva que se desea utilizar para la evaluación de los impactos ambientales, decisión que depende de los juicios de valor de los modeladores o de los usuarios del ACV, estos últimos también con sus propios juicios de valor.

## **2. Descripción de la cadena de suministro de Bienestarina del ICBF**

### **2.1 Contexto político y social**

El Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) es una institución pública enfocada a la *“protección y prevención integral de la primera infancia, la niñez, la adolescencia y el bienestar de las familias en Colombia”* (ICBF, 2018a), tarea que lleva a cabo mediante un conjunto de modalidades o servicios ofrecidos en cinco direcciones misionales: Primera Infancia, Niñez y Adolescencia, Familias y Comunidades, Protección, y Nutrición (ICBF, 2018b).

En la actualidad, la atención brindada por el ICBF se centra en los niños, niñas y adolescentes en condición de vulnerabilidad, llegando a abarcar más del 80% del total de cupos disponibles en la oferta institucional por vigencia (ICBF, 2018b). Algunos de los programas con mayor cobertura son Hogares Comunitarios, Desarrollo Infantil en Medio Familiar, Centros de Desarrollo Infantil y Hogares Infantiles.

Entre las principales estrategias de atención asociadas a estas modalidades, se encuentra el suministro de Alimentos de Alto Valor Nutricional (AAVN)<sup>1</sup> como complemento a la entrega de canastas alimenticias, y que tienen como propósito

---

<sup>1</sup> Alimentos de Alto Valor Nutricional (AAVN): Son alimentos adicionados y/o enriquecidos y/o fortificados y/o que se consideran buena fuente de macro o micronutrientes, buscando contribuir a la ingesta de uno o varios nutrientes esenciales y aportar en el cubrimiento de las necesidades de energía total de la población beneficiaria de los programas ICBF. Fuente: [https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/procesos/g6.pp\\_guiia\\_tecnica\\_del\\_componente\\_de\\_alimentacion\\_y\\_nutricion\\_para\\_los\\_programas\\_y\\_proyectos\\_misionales\\_del\\_icbf\\_v3.pdf](https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/procesos/g6.pp_guiia_tecnica_del_componente_de_alimentacion_y_nutricion_para_los_programas_y_proyectos_misionales_del_icbf_v3.pdf).

fortalecer la alimentación saludable y disminuir el índice de desnutrición aguda<sup>2</sup>, que para el año 2015 alcanzó un 2,3% en niños y niñas, superior con relación a la estimada para Suramérica (1,3%) (ICBF, 2019).

La entrega de AAVN ha sido liderada por el ICBF desde el año 1976, pero desde el año 2000 se realizó la contratación de un operador logístico para realizar la administración de las plantas de producción y llevar a cabo la distribución de la Bienestarina. En principio, solo se consideraba la producción y distribución de Bienestarina<sup>3</sup> en polvo, pero recientemente se realizó la inclusión de otros alimentos como Bienestarina Líquida lista para el consumo (2009) y el Alimento para la mujer gestante y madre en periodo de lactancia (2015). Aun así, el alimento de mayor distribución continúa siendo la Bienestarina en polvo.

Mediante el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES 3843 de 2015, el ICBF establece la importancia de la distribución de AAVN a población vulnerable en todo el territorio colombiano, y describe de manera general el plan de producción y distribución de estos alimentos entre los años 2016 y 2019, donde se proyectaba la atención de más 5.600.000 beneficiarios con 22.000 toneladas de AAVN por vigencia (Departamento Nacional de Planeación, 2015).

Sin embargo, las proyecciones de atención de cupos realizadas en el CONPES 3843 de 2015 han sufrido disminuciones principalmente por condiciones políticas y macroeconómicas. En lo político, se han encontrado dificultades de operación en programas tales como Desayunos Infantiles con Amor (DIA) (Vanguardia Liberal, 2015), o la movilización de programas hacia otras instituciones públicas, como lo sucedido con el Programa de Alimentación Escolar (PAE) que migró del ICBF hacia el Ministerio de Educación Nacional, sumado a la falta de recursos para su financiación (Heraldo, 2015). A nivel macroeconómico, está el aumento en el precio de las materias primas, lo cual

---

<sup>2</sup> La desnutrición aguda puede ser interpretada como el déficit del peso en relación con la talla. Los niños con desnutrición aguda están en mayor riesgo de enfermar y morir.

<sup>3</sup> La Bienestarina es un complemento alimenticio de alto valor nutricional, producido a partir de una mezcla de harina de trigo, fécula de maíz, harina de soya, leche entera en polvo y minerales. Además, contiene una adición de vitaminas que son agregadas al producto por medio de una premezcla desarrollada por el ICBF.

tiene un mayor impacto si se considera que cerca del 90% de los proveedores son internacionales.

En consecuencia, el ICBF ha experimentado una reducción en la cantidad de AAVN disponibles para distribuir, de modo tal que para el 2018 se distribuyeron cerca de 18.000 toneladas de AAVN para algo más de 2.200.000 beneficiarios.

Sin embargo, esta situación contrasta con la necesidad del país, pues de acuerdo con proyecciones del DANE a partir del Censo del 2005, hay más de 450.000 niños y niñas entre 0 y 5 años que se encuentran en condición de Necesidades Básicas Insatisfechas (DANE, 2018).

En este sentido, a pesar de los esfuerzos por parte del ICBF para brindar una atención integral a los niños, niñas y adolescentes en condición de vulnerabilidad de Colombia, siguen existiendo regiones del país donde hace falta implementar la estrategia de entrega de AAVN.

## **2.2 Modelo de distribución actual**

En el 2018, el proyecto de distribución de Bienestarina del ICBF alcanzó una cobertura de 2.223.641 beneficiarios a lo largo del territorio colombiano, atención lograda con una cadena de suministro conformada por 2 plantas de producción, 21 bodegas de redistribución, 4.200 puntos primarios y 83.000 unidades ejecutoras (

**Figura 2-1).**

**Figura 2-1.** Cadena de suministro de Bienestarina del ICBF – Vigencia 2018

Fuente: Tomado de (ICBF, 2014)

De manera general, el modelo logístico divide el país en 33 regionales que corresponden a los 32 departamentos del país y el Distrito Capital, considerando este último como una regional independiente debido a la cantidad de puntos de entrega presentes.

A continuación, se describen las principales características de cada uno de los eslabones de la cadena de suministro del proceso de distribución de Bienestarina:

- Plantas de producción

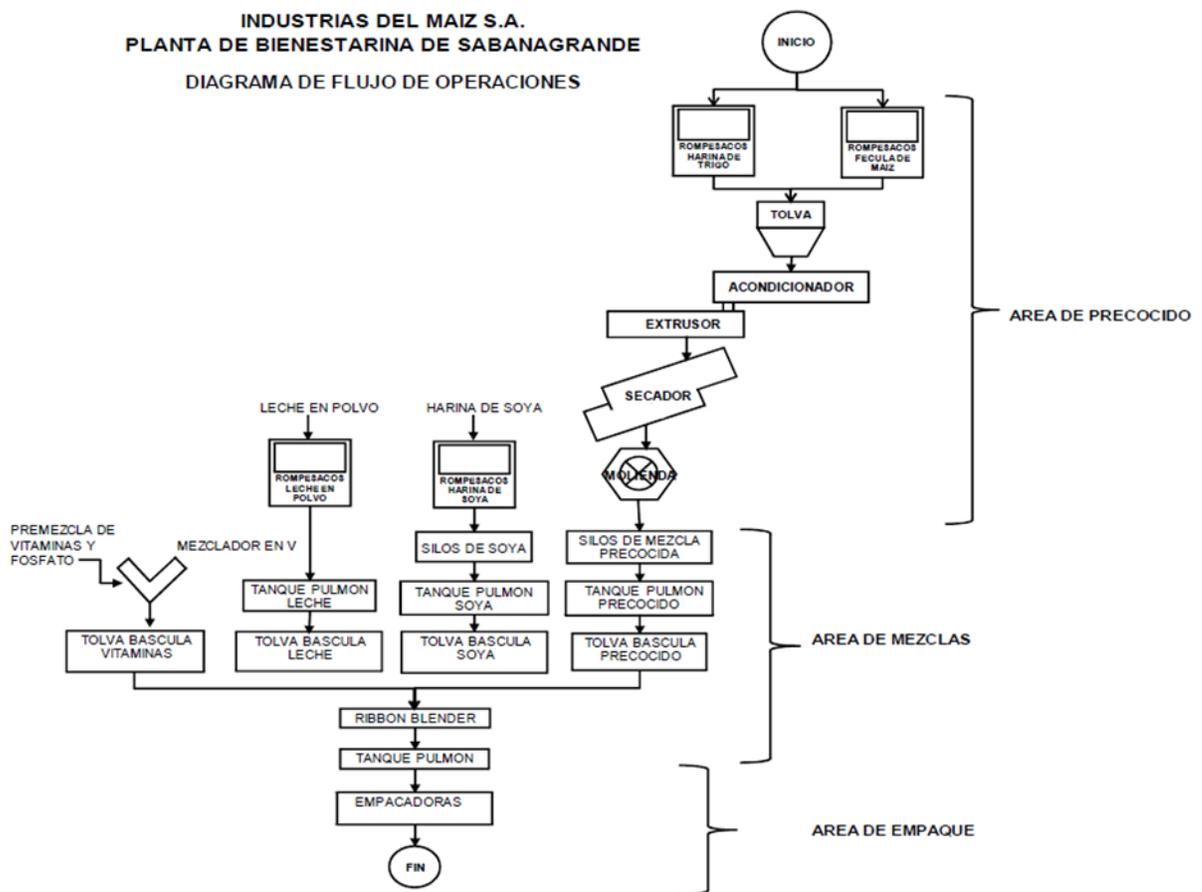
El ICBF cuenta con dos plantas de producción de Bienestarina ubicadas en Cartago (Valle del Cauca) y Sabanagrande (Atlántico). La planta de Cartago fue inaugurada en 1980 y actualmente tiene una capacidad instalada de producción de 76 toneladas de Bienestarina por día. Por otra parte, la planta de Sabanagrande fue inaugurada en 1988 y tienen una capacidad instalada de 94,5 toneladas de Bienestarina Más por día.

No obstante, en la actualidad el funcionamiento de las plantas es de dos turnos en Cartago y un turno en Sabanagrande, toda vez que la planta de Cartago está

ubicada estratégicamente con relación a los proveedores de materias primas y los principales corredores viales del país, lo cual hace que el costo de producción sea considerablemente menor en consideración con el de Sabanagrande.

Con respecto al proceso de producción, la Bienestarina está compuesta por harina de trigo (30% en peso), fécula de maíz (30%), harina de soya (30%), leche en polvo (8%), y el restante se compone de fosfato tricálcico, Omega 3 vegetal y premezcla vitamínica (Departamento Nacional de Planeación, 2015). Estas materias primas son sometidas a procesos de acondicionamiento, extrusión, secado, mezcla y empaque (**Figura 2-2**), este último realizado en primera instancia en bolsas de 900 gramos y luego en sacos de 25 bolsas de 900 gramos.

**Figura 2-2.** Diagrama de flujo de la producción de Bienestarina



Fuente: Información suministrada por el ICBF

No obstante, aunque la distribución de materias primas y los procesos son los mismos en ambas plantas, cada una de ellas cuenta con equipos de diferentes referencias, lo que permite explicar las diferencias en las capacidades de producción y que cada planta presente un impacto ambiental diferente.

- Bodegas de redistribución

Son puntos intermedios en el proceso de distribución de la Bienestarina, desde los cuales se realiza la consolidación del producto de acuerdo con la demanda de los puntos primarios, generación de actas de entrega y despacho de vehículos de transporte. Para finales del 2018, el ICBF contaba con 21 bodegas ubicadas de la siguiente manera (**Tabla 2-1**):

**Tabla 2-1.** Bodegas de redistribución de Bienestarina para la vigencia 2018

No.	Departamento	Municipio	Regionales que atiende habitualmente
1	Amazonas	Leticia	Amazonas
2	Antioquia	La Estrella	Antioquia
3	Atlántico	Barranquilla	Antioquia, Atlántico, Bolívar, Córdoba, La Guajira
4	Bolívar	Magangué	Bolívar, Sucre
5	Boyacá	Duitama	Boyacá
6	Cesar	Valledupar	Cesar, La Guajira, Magdalena
7	Córdoba	Cerete	Antioquia, Bolívar, Choco, Córdoba, Sucre
8	Cundinamarca	Tenjo	Amazonas, Arauca, Bogotá, Boyacá, Caquetá, Casanare,
9	Huila	Neiva	Caquetá, Huila, Meta
10	Magdalena	Santa Ana	Magdalena
11	Meta	Villavicencio	Guaviare, Meta
12	Nariño	Pasto	Nariño, Putumayo
13	Norte de Santander	Cúcuta	Norte de Santander
14	Risaralda	Dosquebradas	Caldas, Choco, Quindío, Risaralda, Valle del Cauca
15	San Andrés	San Andrés	San Andrés
16	Santander	Bucaramanga	Bolívar, Cesar, Norte de Santander, Santander
17	Santander	San Gil	Santander
18	Tolima	Ibagué	Tolima

No.	Departamento	Municipio	Regionales que atiende habitualmente
19	Valle del Cauca	Buenaventura	Cauca, Choco, Nariño, Valle del Cauca
20	Valle del Cauca	Yumbo	Cauca, Nariño, Putumayo, Valle del Cauca
21	Vaupés	Mitú	Vaupés

Fuente: Elaboración propia

Puesto que la distribución de Bienestarina se hace a nivel nacional, una parte del producto es transportado por modo terrestre, pero en muchas regionales se requiere de trasbordos a otros modos, con lo cual, dependiendo de la zona geográfica las rutas de distribución pueden contemplar recorridos fluviales, marítimos o aéreos, los cuales se combinan para hacer llegar el producto a los puntos primarios.

- Puntos Primarios y Unidades Ejecutoras

Los puntos primarios son los lugares aprobados por los Centros Zonales para realizar la recepción, almacenamiento y entrega de la Bienestarina y los demás Alimentos de Alto Valor Nutricional. Estos puntos son postulados por los operadores regionales contratados para brindar la atención a los beneficiarios en el marco de los servicios del ICBF.

Debido a que la Bienestarina es un complemento nutricional, en varios servicios del ICBF la entrega de este producto se realiza acompañada de otros alimentos adicionales, los cuales son establecidos mediante *minutas alimenticias patrón*<sup>4</sup>, de forma tal que se logre contribuir significativamente al requerimiento de calorías y nutrientes de la población objetivo.

---

<sup>4</sup> Una minuta alimenticia patrón es una “guía que se utiliza para servirles a los niños, niñas y adolescentes, la porción de alimentos más adecuada para su edad. Esta minuta patrón, determina los grupos de alimentos que debe llevar el menú escolar, así como la cantidad exacta que se debe servir y la frecuencia con la que los alimentos serán consumidos semanalmente.” Fuente: <http://huila.gov.co/pae/lineamientos-pae/minuta-patron>.

Es por esta razón que en ocasiones los operadores regionales solicitan crear los puntos de entrega en las cabeceras municipales, con el fin de consolidar las canastas familiares con la totalidad de los alimentos (incluyendo la Bienestarina), y luego los transportan a puntos ubicados en las zonas rurales y dispersas donde realmente se brinda la atención al beneficiario final. Estos puntos son conocidos como *unidades ejecutoras*.

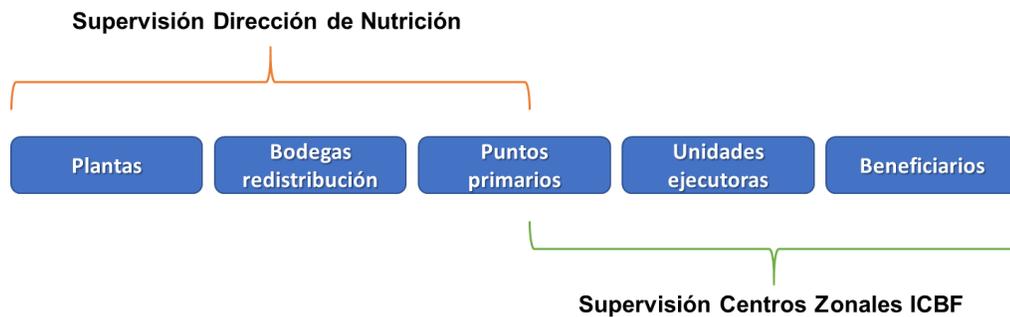
Es así como la distribución de la Bienestarina en la última milla es realizada por operadores regionales, los cuales con base en la focalización de los beneficiarios, se encargan de llevar al usuario final no solo la Bienestarina sino los demás alimentos contemplados en el servicio del ICBF.

- Beneficiarios

El beneficiario es el consumidor final del producto, el cual debe estar previamente inscrito en alguna de las modalidades del ICBF, y es atendido desde las unidades ejecutoras. Las modalidades del ICBF contemplan la atención de mujeres gestantes, madres en periodo de lactancia, adultos mayores, y niños, niñas y adolescentes, concentrando la atención en estos tres últimos beneficiarios. Debido a que la Bienestarina es un complemento de distribución gratuita financiado con recursos del Estado, un aumento en la población objetivo implica necesariamente decisiones a nivel de política pública.

Teniendo en cuenta que el proceso de distribución de la Bienestarina y los demás AAVN se realiza en dos etapas, la primera por un solo contratista desde plantas de producción hasta puntos primarios, y la segunda por operadores regionales desde puntos primarios hasta beneficiarios, la supervisión de la entrega de los Alimentos también se realiza en dos secciones.

Por una parte, la supervisión liderada por la Dirección de Nutrición desde la producción hasta la distribución a puntos de entrega primarios, y la segunda, liderada por los más de 200 centros zonales del ICBF, que contempla la distribución de puntos de entrega hasta los beneficiarios (**Figura 2-3**).

**Figura 2-3.** Supervisión del ICBF al modelo de distribución de la Bienestarina

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, la presente investigación tiene como alcance las actividades de la cadena de suministro bajo la supervisión de la Dirección de Nutrición, que comprenden la producción, distribución de plantas a bodegas y distribución de bodegas a puntos de entrega, teniendo en cuenta la facilidad de acceso a la información.

No obstante, debido a la gran cantidad de puntos de entrega y con el fin de simplificar las dimensiones del modelo de optimización multi-objetivo, se seleccionó como objeto de estudio la regional Chocó, por encontrarse dentro de los principales departamentos en condición de vulnerabilidad y con necesidades básicas insatisfechas (Colombia Informa, 2019).

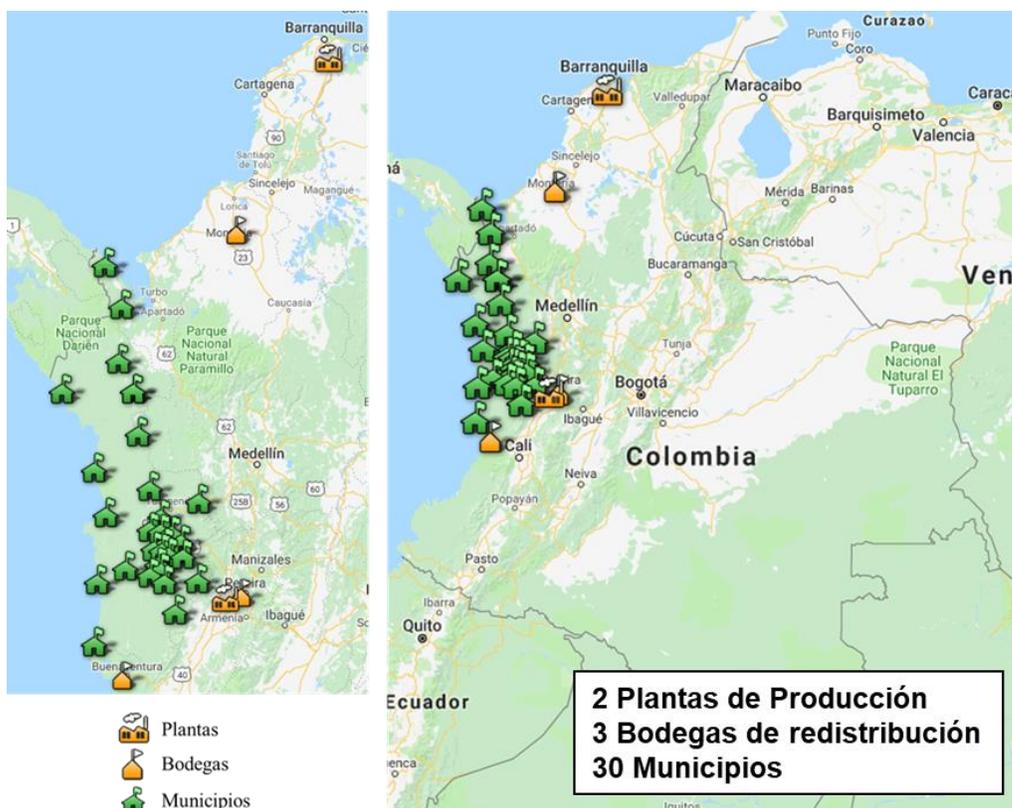
Además, debido a las condiciones geográficas del departamento del Chocó, para efectos del estudio se tiene la oportunidad de diseñar el modelo matemático para brindar atención desde ambas plantas de producción, tres bodegas diferentes (Cereté, Dosquebradas y Buenaventura) y la combinación de los modos de transporte terrestre, fluvial y marítimo.

Por otra parte, en lugar de considerar la distribución de bodegas a puntos de entrega, se asume la entrega de bodegas a municipios, considerando cada municipio como la suma total del requerimiento de Bienestarina de los puntos de entrega presentes en esa zona geográfica.

El anterior supuesto es aceptable, toda vez que la constitución de las metas sociales de atención a beneficiarios en las diferentes modalidades del ICBF se realiza por municipio y no por punto de entrega. Así mismo, las proyecciones demográficas realizadas por el DANE llegan hasta el nivel de municipios de Colombia.

En este sentido, el análisis del ciclo de vida y el modelo de optimización multi-objetivo realizado en las siguientes secciones se desarrolla con base en la siguiente cadena de suministro (**Figura 2-4**):

**Figura 2-4.** Georreferenciación plantas, bodegas y municipios de la cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento del Chocó, Colombia



Fuente: Elaboración propia

### **3. Análisis de Ciclo de Vida de la Bienestarina**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un marco metodológico de gestión ambiental, el cual permite analizar objetiva, metódica y sistemáticamente el impacto generado durante el ciclo de vida de un producto o proceso (Haya, 2016).

Así mismo, de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14040, el ACV se puede concebir como la *“recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”* (ICONTEC, 2007).

Esta evaluación es realizada mediante un marco de referencia compuesto de cuatro fases: definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto, e interpretación, fases que van desde la conceptualización del ciclo de vida del producto o proceso, hasta la identificación, agrupación y evaluación de las principales cargas ambientales generadas.

Algunos de los principales beneficios del ACV mencionados en la NTC-ISO 14040 son facilitar el desarrollo y mejora de productos, apoyar la planificación estratégica y brindar herramientas para desarrollo de políticas públicas.

En este mismo sentido, Haya (2016) menciona que entre las principales ventajas del ACV para el sector público se encuentra obtener herramientas para el desarrollo de legislaciones y políticas ambientales que propendan por la conservación de los recursos.

A continuación, se describen en mayor detalle las fases contempladas en la NTC-ISO 14040 para el ACV y su aplicabilidad en el modelo de distribución de la Bienestarina.

### 3.1 Definición del objetivo y el alcance

El objetivo del ACV debe contener las razones por las cuales se quiere realizar el estudio, indicando la aplicación y el público objetivo previsto. Así mismo, debe ser definido de una manera clara y coherente el uso que se desea dar a los resultados.

Por otra parte, en el alcance del ACV se deben definir (ICONTEC, 2007):

- Unidad funcional: es la unidad de referencia mediante desde la cual se expresan los datos de entradas y salidas.
- Sistema del producto a analizar: serie de procesos unitarios y los flujos de entrada, salida y flujos intermedios.
- Límites del sistema: procesos unitarios que se van a considerar dentro del sistema. Dependiendo del objeto de estudio, los límites pueden ser de cradle-to-grave (de la cuna a la tumba) o cradle-to-cradle (de la cuna a la cuna, para analizar un solo proceso como puede ser la producción).
- Categoría de impacto: clase que representa los asuntos ambientales de interés a los cuales se les puede asignar los resultados obtenidos en el ICV. Dependiendo de la metodología, se pueden encontrar impactos de punto medio y de punto final.
- Metodología seleccionada para la evaluación del impacto ambiental.

En la **Tabla 3-1** se presenta el objetivo y el alcance del Análisis del Ciclo de Vida realizado para la Bienestarina:

**Tabla 3-1.** Ficha resumen del alcance y objetivo del Análisis de Ciclo de Vida para el modelo de distribución de Bienestarina

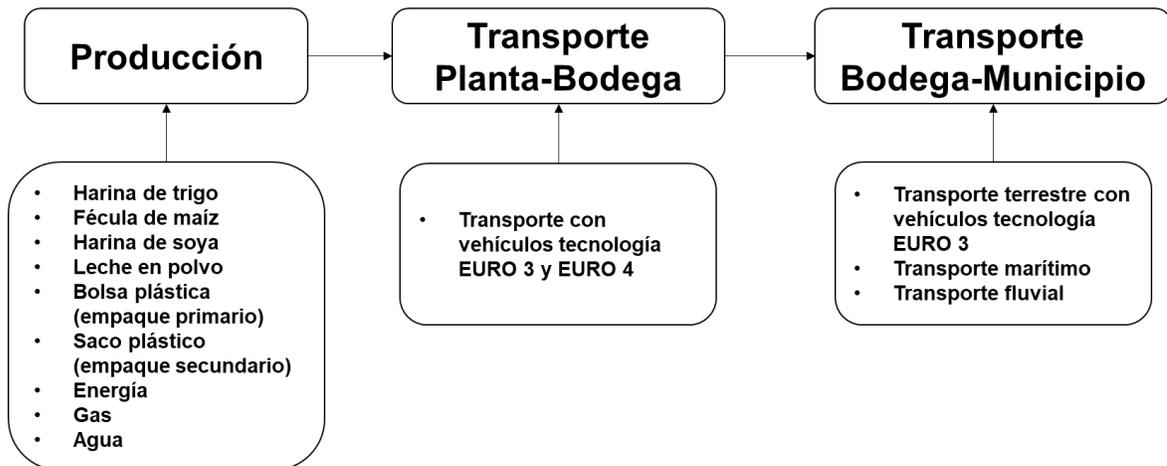
Aspecto	Descripción
Objetivo	El objetivo de este estudio es determinar los impactos ambientales asociados a la producción y distribución de la Bienestarina en el Departamento de Chocó
Aplicación	Estudio como fuente de determinación de los impactos ambientales para modelo de optimización multi-objetivo
Público objetivo	Instituto Colombiano de Bienestarina Familiar
Unidad Funcional	1 kg de Bienestarina entregado en el municipio de la Regional Chocó
Límites del Sistema	Producción, Transporte de Planta a Bodega y Transporte de Bodega a Municipio.
Categoría de impacto	Punto final

Aspecto	Descripción
Metodología	Perspectivas culturales Individualista, Jerárquica e Igualitaria de la metodología ReCipe.

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al sistema de producto para la Bienestarina, se contemplan los siguientes flujos y procesos unitarios (**Figura 3-1**):

**Figura 3-1.** Sistema de producto para la Bienestarina



Fuente: Elaboración propia

## 3.2 Análisis del inventario de ciclo de vida

- Cargas ambientales en el proceso de producción

La determinación de las cargas ambientales para las plantas de producción fue realizada con base en información suministrada por el operador logístico encargado de la administración de las plantas, el cual realizó la caracterización de los impactos ambientales para inicios del 2018.

Teniendo en cuenta que esta información hace parte del contrato de producción y distribución de Bienestarina y existe un compromiso de confidencialidad entre las partes, en la **Tabla 3-2** se presenta el resumen de las principales cargas ambientales por kilogramo de Bienestarina.

**Tabla 3-2.** Cargas ambientales asociadas al proceso de producción de Bienestarina

<b>Demanda</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cartago</b>	<b>Sabanagrande</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/kg Bienestarina	6,40667E-08	5,20945E-05
Demanda Química de Oxígeno	mg/kg Bienestarina	9,95444E-08	6,04845E-05
Sólidos Suspendidos Totales	mg/kg Bienestarina	3,44444E-09	1,63122E-06
Grasas y/o Aceites	mg/kg Bienestarina	3,22056E-09	3,39571E-06
Nitrógeno Total Kjendal	mg/kg Bienestarina	2,3901E-08	2,90451E-05
Nitrógeno Amoniacal	mg/kg Bienestarina	1,06826E-08	7,54088E-06
Nitritos	mg/kg Bienestarina	7,99111E-11	8,56853E-08
Nitratos	mg/kg Bienestarina	7,68111E-10	1,00893E-06
Nitrógeno Total	mg/kg Bienestarina	2,4749E-08	2,07876E-05
Detergentes	mg/kg Bienestarina	1,5283E-08	1,02421E-05
Hidrocarburos Totales	mg/kg Bienestarina	1,37778E-09	6,15556E-07
Fósforo	mg/kg Bienestarina	2,81756E-09	2,59315E-06
Ortofosfatos	mg/kg Bienestarina	6,18622E-09	4,64326E-06

Fuente: Elaboración propia

- Cargas ambientales en el proceso de distribución

La distribución de la Bienestarina se consideró en dos etapas: de planta a bodega y de bodega a municipio. En primer lugar, para la distribución de planta a bodega se analizó el histórico de despachos realizados desde cada una de las plantas a bodegas, permitiendo establecer que por lo general los vehículos utilizados en la planta de Cartago obedecen a la normativa EURO III, mientras que los vehículos utilizados por la planta de Sabanagrande tienen tecnología EURO IV.

Para la distribución de bodega a municipio, se realizó el mismo ejercicio descrito anteriormente, específicamente para las rutas de los municipios de Chocó, encontrando el uso de vehículos con tecnología EURO III. Por otra parte, teniendo en cuenta la ubicación geográfica de las bodegas Cereté, Dosquebradas y Buenaventura, y los registros de entregas del 2018 que fueron suministrados por el operador logístico, donde se puede apreciar el uso del transporte multimodal para las principales rutas de distribución, a cada bodega se le asignó una

proporción de modo de transporte sobre el 100% de la ruta, como se muestra en la **Tabla 3-3**:

**Tabla 3-3.** Proporción de transporte multimodal por bodega de redistribución de la cadena de suministro de Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia)

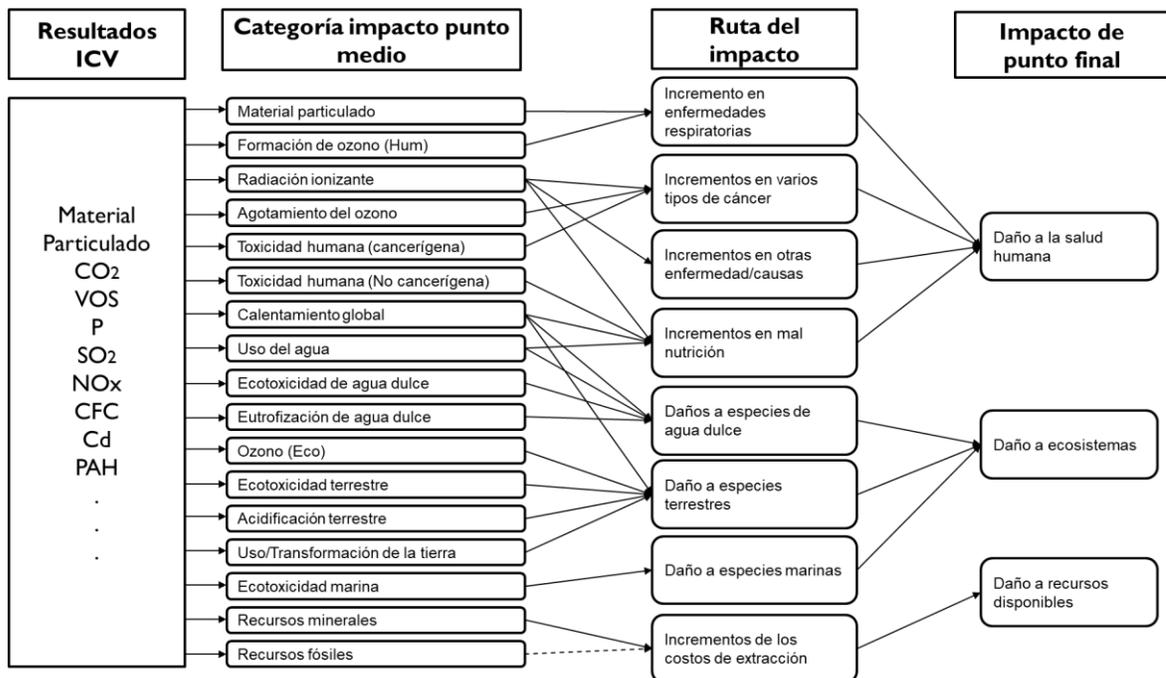
Bodega	% Transporte Terrestre	% Transporte Marítimo	% Transporte Fluvial
Cereté	30%	30%	40%
Dosquebradas	50%	25%	25%
Buenaventura	15%	40%	45%

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Evaluación del impacto ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental se utilizó la metodología ReCiPe, la cual permite realizar la agrupación de las cargas ambientales en 17 categorías de impacto de punto medio y, a su vez, agrupar estos 17 impactos en 3 categorías de impacto de punto final (Daño a la Salud Humana, Daño a los Ecosistemas y Daño a los Recursos Disponibles) (**Figura 3-2**).

**Figura 3-2.** Metodología de evaluación de impacto ambiental ReCiPe



Fuente: Tomado de (Golsteijn, 2017)

Jolliet et al. (2003) sugieren considerar las categorías de impacto final de forma separada para la fase de interpretación del ACV. Sin embargo, de requerirse su agregación—como en este caso, a efectos de evaluar los trade-offs entre el desempeño económico y el ambiental que conlleva la operación de la cadena de suministro—pueden usarse factores de ponderación determinados según alguna perspectiva social o un factor de uno (1.0) por defecto.

En este sentido, bien sea para impactos de punto medio o punto final, la metodología ReCiPe permite hacer la evaluación del impacto ambiental de acuerdo con tres perspectivas culturales: Individualista (corto plazo, optimista que la tecnología puede evitar muchos problemas futuros), Jerárquica (mediano plazo, es la más utilizada en los modelos científicos y asume que los daños ambientales se pueden evitar con una buena gestión) e Igualitaria (largo plazo, basada en el principio de precaución). Dependiendo de la perspectiva cultural adoptada para el análisis, se tendrán factores de ponderación distintos para cada una de las categorías de punto final (**Figura 3-3**).

**Figura 3-3.** Ponderación de las categorías de punto final para ReCiPe bajo diferentes perspectivas culturales

<b>Perspectiva</b>	Ecosistemas	Salud humana	Recursos	Total
Individualista	250	550	200	1000
Jerárquica	400	300	300	1000
Igualitaria	500	300	200	1000

Fuente: Tomado de (Listén & Andersson, 2014)

Teniendo en cuenta lo anterior, en la **Tabla 3-4** se muestra el resultado de la evaluación del impacto ambiental desagregada por cada uno de los procesos unitarios y las tres perspectivas culturales, información que sirve como parámetro para la construcción del modelo matemático ambiental descrito en la siguiente sección (**Figura 3-4**). La evaluación del impacto ambiental fue cuantificada a través del programa OpenLCA con las bases de datos Ecoinvent 3.4. Los factores de normalización para cada una de las categorías de daño y por consiguiente la clave para la interpretación de los resultados a nivel de “eco-puntos” de impacto ambiental puede encontrarse en Jolliet et al. (2003, p. 329).

**Tabla 3-4.** Resultado evaluación del impacto ambiental por procesos unitarios y perspectiva cultural

Proceso	Eslabón	Individualista (Puntos/kg producido)	Jerárquico (Puntos/km recorrido)	Igualitario (Puntos/km recorrido)
Producción	Sabanagrande	3,5746E-02	3,8941E-02	4,7368E-02
	Cartago	3,8448E-02	4,2719E-02	5,1975E-02
Transporte Planta-Bodega	Sabanagrande	1,1807E-05	1,5884E-05	1,0433E-05
	Cartago	1,5103E-05	1,6588E-05	1,0772E-05
Transporte Bodega- Municipio	Cereté	9,8517E-06	1,0187E-05	8,3431E-06
	Dosquebradas	1,1601E-05	1,9688E-05	1,0722E-05
	Buenaventura	5,3629E-06	9,0154E-06	4,1219E-06

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-4.** Resultado evaluación del impacto ambiental por procesos unitarios y perspectiva cultural (Gráfica de barras)

Fuente: Elaboración propia



## 4. Modelado Matemático

El objetivo de esta investigación es analizar las variaciones en el diseño de red de una cadena de suministro del sector de alimentos cuando se consideran diversos criterios de ponderación de los impactos ambientales mediante un modelo de optimización multi-objetivo, entendiendo el diseño de red como aquellas decisiones logísticas que pueden cambiar el funcionamiento operativo de la cadena.

Para ello, se seleccionó como objeto de estudio la distribución de Bienestarina en la Regional Chocó, considerando una estructura de la cadena de suministro de tres eslabones (plantas, bodegas y municipios). Así mismo, se realizó el Análisis de Ciclo de Vida de la Bienestarina a partir de los procesos unitarios y estableciendo como criterios de ponderación de los impactos ambientales las tres perspectivas culturales que brinda la metodología de evaluación de impacto ambiental ReCiPe.

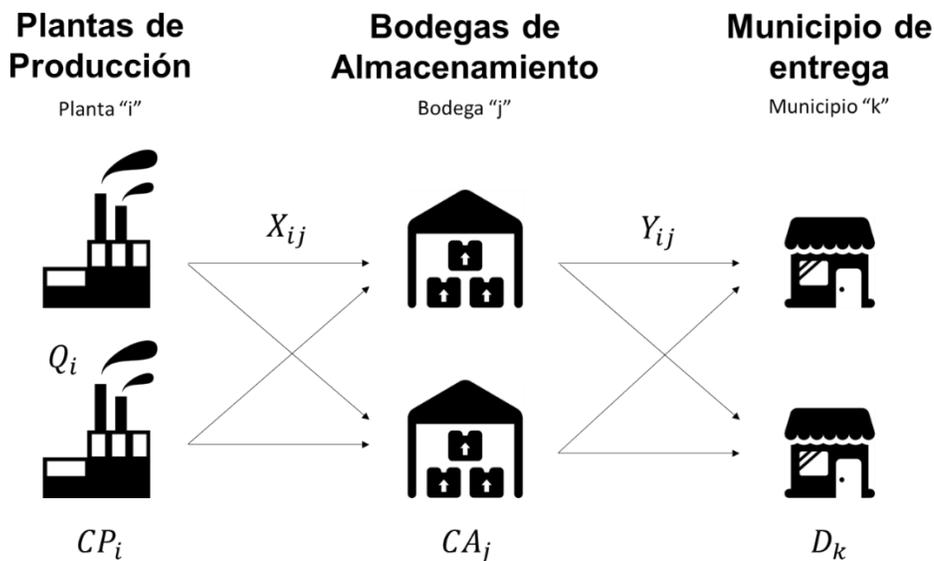
En esta sección, se toman los elementos identificados anteriormente para realizar, en primera instancia, la optimización de la cadena de suministro de Bienestarina para la Regional Chocó bajo un modelo de optimización económico (mono-objetivo), con el fin de establecer el punto inicial de comparación. Posteriormente, se amplía el modelo de optimización mediante la inclusión de una función objetivo ambiental, se construye la Frontera de Pareto para cada una de las perspectivas culturales de la metodología ReCiPe (Individualista, Jerárquica e Igualitaria) y se describen los principales hallazgos.

## 4.1 Modelo de optimización mono-objetivo (económico)

### 4.1.1 Conjuntos y parámetros

Para la construcción del modelo matemático de distribución de Bienestarina se considera una estructura general de tres eslabones, en la cual se definen los conjuntos correspondientes para las plantas de producción, bodegas de almacenamiento y municipios de entrega (**Figura 4-1**).

**Figura 4-1.** Estructura de cadena de suministro de tres eslabones



Fuente: Elaboración propia

- Capacidad de producción y almacenamiento

Las capacidades de producción de cada una de las plantas se calculan a partir de la capacidad instalada actual en la (**Tabla 4-1**). Por otra parte, tanto estas como la capacidad de almacenamiento de las bodegas se describen en la **Tabla 4-2**.

**Tabla 4-1.** Capacidad de producción plantas del ICBF

Planta	Capacidad de producción (kg/mes)
Sabanagrande	94.500
Cartago	76.000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-2.** Capacidad de almacenamiento bodegas de redistribución cadena de suministro de la Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia

<b>Bodega</b>	<b>Capacidad de almacenamiento (kg)</b>
Cereté	125.000
Dosquebradas	200.000
Buenaventura	112.000

Fuente: Elaboración propia

- Demanda de Bienestarina

Con respecto a la demanda de los municipios, en la **Tabla 4-3** se muestran los requerimientos de kg de Bienestarina a partir de la estimación realizada con los niños entre 6 meses y 5 años atendidos a través de las modalidades del ICBF en la Regional Chocó y la ración mensual establecida para este tipo de población.

**Tabla 4-3.** Demanda de Bienestarina para los municipios en el Departamento de Chocó, Colombia

<b>Cód.</b>	<b>Municipio</b>	<b>Demanda Bienestarina (kg/mes)</b>
M1	Quibdó	13.767
M2	Acandí	591
M3	Alto Baudó	905
M4	Atrato	567
M5	Bagadó	1.010
M6	Bahía Solano	418
M7	Bajo Baudó	1.025
M8	Bojaya	1.317
M9	El Cantón del San Pablo	527
M10	Carmen del Darién	720
M11	Cértegui	352
M12	Condoto	1.323
M13	El Carmen de Atrato	505
M14	El Litoral del San Juan	1.426
M15	Istmina	1.969
M16	Juradó	423
M17	Lloró	98
M18	Medio Atrato	727
M19	Medio Baudó	757
M20	Medio San Juan	1.119

<b>Cód.</b>	<b>Municipio</b>	<b>Demanda Bienestarina (kg/mes)</b>
M21	Nóvita	501
M22	Nuguí	611
M23	Río Iro	441
M24	Río Quito	808
M25	Riosucio	2.862
M26	San José del Palmar	318
M27	Sipí	301
M28	Tadó	1.779
M29	Unguía	1.249
M30	Unión Panamericana	569

Fuente: Elaboración propia

- Costos de producción

El costo de producción para cada una de las plantas fue estimado a partir de los costos fijos y el precio de las materias primas establecidos en el contrato de producción y distribución, los cuales deben ser actualizados mensualmente con base en la variación del precio de las materias primas y el IPC.

Para el caso de los costos fijos, se consideró el nivel de producción actual de cada una de las plantas (dos turnos en Cartago y un turno en Sabanagrande), con lo cual se determinó que actualmente resulta más económico producir 1 kilogramo de Bienestarina en Cartago que en Sabanagrande (**Tabla 4-4**).

**Tabla 4-4.** Costos de producción plantas ICBF

<b>Planta</b>	<b>Costo de producción (\$/kg)</b>
Sabanagrande	5.915,3
Cartago	5.372,2

Fuente: Elaboración propia

- Matrices de distancia y costos de distribución de planta a bodega y bodega a municipio

Para los costos de distribución, tanto de planta a bodega como de bodega a municipio, se tomó como punto de partida el precio propuesto por el operador

logístico al ICBF en la licitación pública del 2015, y se realizó la actualización a precios de hoy mediante el incremento del IPC. (**Tabla 4-5** y **Tabla 4-7**).

Además, se realizó la georreferenciación de las plantas, bodegas y municipios con el fin de determinar las distancias euclidianas. Mediante el uso de factores de corrección, se precisó igualmente el precio por kilogramo distribuido entre cada una de las conexiones de los tres eslabones. (**Tabla 4-6** y **Tabla 4-8**).

**Tabla 4-5.** Costos de distribución de plantas a bodegas cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia

Planta	Bodega (\$/kg)		
	Cereté	Dosquebradas	Buenaventura
Sabanagrande	936	1.724	2.331
Cartago	1.481	208	734

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-6.** Distancias de plantas a bodegas cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia

Planta	Bodega (km)		
	Cereté	Dosquebradas	Buenaventura
Sabanagrande	240,4	671,8	809,3
Cartago	459,7	22,4	160,8

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-7.** Costos de distribución de bodegas a municipios cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia

Bodega	Municipios regional Chocó (\$/kg)									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Cereté	2.444,0	1.134,6	2.637,2	2.562,5	2.607,2	2.303,0	3.124,9	1.867,0	2.711,5	1.580,4
Dosquebradas	1.153,0	3.623,7	1.293,2	1.056,2	820,8	1.973,8	1.486,1	1.948,6	1.018,2	2.343,8
Buenaventura	1.499,5	3.746,2	1.321,9	1.368,9	1.343,8	1.904,5	897,2	2.216,0	1.205,8	2.599,5

Bodega	Municipios regional Chocó (\$/kg)									
	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
Cereté	2.663,2	2.872,6	2.252,6	3.617,1	2.834,8	1.963,3	2.556,8	2.242,6	2.934,9	2.934,9
Dosquebradas	941,5	872,4	1.044,4	1.598,3	920,0	2.770,0	956,6	1.438,4	1.225,5	966,3
Buenaventura	1.261,0	1.034,0	1.744,8	400,4	1.071,8	2.663,8	1.380,3	1.738,5	995,0	960,7

Bodega	Municipios regional Chocó (\$/kg)									
	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30
Cereté	2.963,5	2.584,6	2.723,7	2.571,6	1.454,7	2.911,4	3.190,9	2.734,0	1.146,0	2.714,4
Dosquebradas	807,0	1.607,9	718,6	1.155,8	2.684,3	473,9	713,9	854,9	3.169,7	936,0
Buenaventura	944,8	1.485,0	1.230,2	1.364,7	2.873,8	1.110,1	760,1	1.190,0	3.365,6	1.204,1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-8.** Distancias de bodegas a municipios cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó, Colombia

Bodega	Municipios regional Chocó (km)									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Cereté	759,0	352,4	819,0	795,8	809,7	715,2	970,5	579,8	842,1	490,8
Dosquebradas	291,9	917,4	327,4	267,4	207,8	499,7	376,2	493,3	257,8	593,4
Buenaventura	424,8	1.061,2	374,5	387,8	380,7	539,5	254,2	627,8	341,6	736,4

Bodega	Municipios regional Chocó (km)									
	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
Cereté	827,1	892,1	699,6	1.123,3	880,4	609,7	794,0	696,5	911,5	911,5
Dosquebradas	238,3	220,9	264,4	404,6	232,9	701,3	242,2	364,2	310,3	244,6
Buenaventura	357,2	292,9	494,3	113,4	303,6	754,6	391,0	492,5	281,9	272,1

Bodega	Municipios regional Chocó (km)									
	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30
Cereté	920,3	802,7	845,9	798,6	451,8	904,2	991,0	849,1	355,9	843,0
Dosquebradas	204,3	407,1	181,9	292,6	679,6	120,0	180,7	216,4	802,4	237,0
Buenaventura	267,6	420,7	348,5	386,6	814,1	314,5	215,3	337,1	953,4	341,1

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.2 Función objetivo y restricciones

La función objetivo del modelo económico está compuesta por tres costos principales: el costo de producción por kg de Bienestarina en planta, el costo de distribución de planta a bodega y el costo de distribución de bodega a municipios (ver Ecuación 4.7)

$$\text{Min } Z = \sum_i (Q_i * C_{Prod_i}) + \sum_i \sum_j [(X_{ij} * C_{ij}) * T_{ij}] + \sum_j \sum_k [(Y_{jk} * S_{jk}) * G_{jk}] \quad (4.1)$$

Junto con la función objetivo, se establecen las restricciones de balance (ver Ecuación 4.2), de capacidad de producción de las plantas (ver Ecuación 4.3), de capacidad de almacenamiento de bodegas (ver Ecuación 4.4), satisfacción de demanda (ver Ecuación 4.5) y no negatividad para las variables del modelo (ver Ecuación 4.6).

$$\sum_i X_{ij} = \sum_k Y_{jk} \quad \forall j \quad (4.2)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq CP_i \quad \forall i \quad (4.3)$$

$$\sum_k Y_{jk} \leq CA_j \quad \forall j \quad (4.4)$$

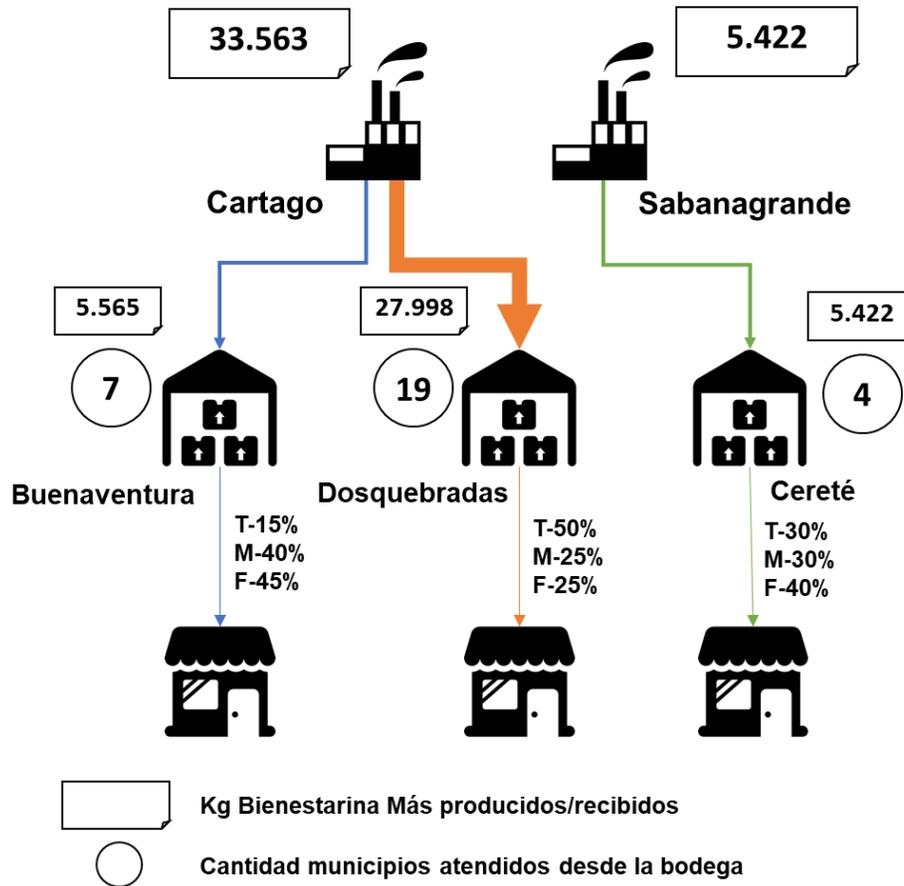
$$\sum_j Y_{jk} \geq D_k \quad \forall k \quad (4.5)$$

$$Q_i, X_{ij}, Y_{jk} \geq 0 \quad (4.6)$$

El modelo matemático fue modelado en GAMS con el solver CPLEX Programación de Enteros Mixtos (MIP), que es un software de optimización que combina el lenguaje del álgebra matemática con los conceptos de programación tradicionales para describir y resolver problemas de optimización de manera eficiente. El óptimo encontrado permite realizar la distribución a los 30 municipios de la Regional Chocó con un costo mínimo de 271.583.258 pesos colombianos.

Con respecto al diseño de red de la cadena de suministro, en la **Figura 4-2** se presenta un resumen de la solución óptima, la cual considera producir 33.563 kg de Bienestarina desde la planta de Cartago (86% del total de la demanda) y el restante desde Sabanagrande. En relación al uso de las bodegas, de los 30 municipios por atender, 19 son distribuidos desde Dosquebradas (64%), 7 desde Buenaventura (23%) y 4 desde Cereté (13%).

**Figura 4-2.** Diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para el óptimo económico



Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Modelo de optimización multi-objetivo (económico-ambiental)

### 4.2.1 Función objetivo ambiental

La inclusión de la función objetivo ambiental dentro del modelo económico se realiza a través de los procesos unitarios descritos en la sección del Análisis de Ciclo de Vida. Para ello, se hace uso de las variables definidas en el modelo económico y se ingresan como parámetros los impactos ambientales determinados en la Sección 3.3 para las actividades de producción, transporte de planta a bodega y transporte de bodega a municipio para las perspectivas Individualista, Jerárquica e Igualitaria (ver Ecuación 4.7).

$$Min \text{ DAM} = \sum_i Q_i * \text{DAM}_i^{Pr} + \sum_i \sum_j X_{ij} * D_{ij} * \text{DAM}_i^{Tr P-B} + \sum_j \sum_k Y_{jk} * D_{jk} * \text{DAM}_j^{Tr B-M} \quad (4.7)$$

### 4.2.2 Aproximación a fronteras de Pareto

Para realizar la optimización multi-objetivo y la construcción de las fronteras de Pareto con cada una de las perspectivas culturales de impacto ambiental, en este estudio se hace uso del método e-constraint, en el cual se selecciona una de las dos funciones objetivo como la función principal, mientras que la otra función entra como una restricción paramétrica. Al variar la paramétrica de esta nueva restricción, se obtiene un conjunto eficiente de puntos, los cuales constituyen la Frontera de Pareto (Rardin, 1998).

A continuación, se presentan las Fronteras construidas para los criterios de ponderación de los impactos ambientales Individualista, Jerárquico e Igualitario, tomando como función objetivo principal la dimensión económica, y como restricción paramétrica la función objetivo ambiental para cada perspectiva.

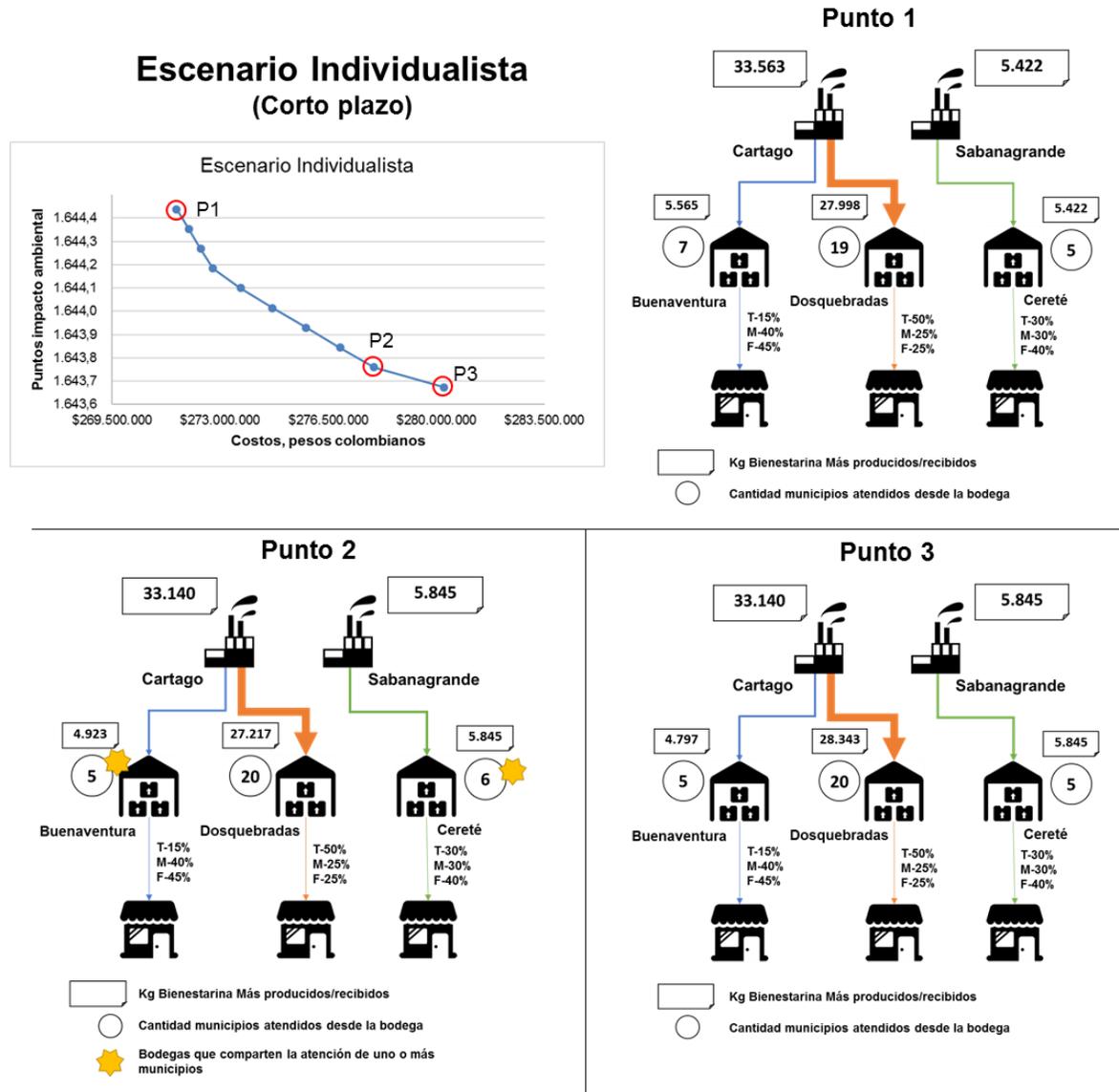
Así mismo, se presenta el análisis en las variaciones del diseño de red para cada una de las perspectivas culturales. Este ejercicio es desarrollado mediante la selección y comparación de las decisiones logísticas en tres puntos diferentes de la Frontera de Pareto, lo cual permite evidenciar la evolución de la cadena de suministro a medida que se pasa de un punto óptimo con énfasis en lo económico a uno con énfasis en lo ambiental.

Realizar este mismo análisis con las perspectivas culturales (corto, mediano y largo plazo), permite identificar y comparar las implicaciones para el diseño de red de la cadena de suministro que conlleva utilizar diferentes criterios de ponderación de los impactos ambientales, que es el propósito de esta investigación.

- Perspectiva Individualista (Corto plazo)

En la **Figura 4-3** se muestra la Frontera de Pareto construida para la perspectiva cultural Individualista, que tiene un horizonte de proyección de corto plazo.

**Figura 4-3.** Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Individualista (Corto plazo)



Fuente: Elaboración propia

Al analizar las variaciones de las decisiones logísticas entre los tres diferentes puntos podemos encontrar que, a medida que se avanza en la Frontera de Pareto para obtener un mejor desempeño ambiental se disminuye la atención brindada en la bodega de Buenaventura, pasando de atender 7 a 5 municipios.

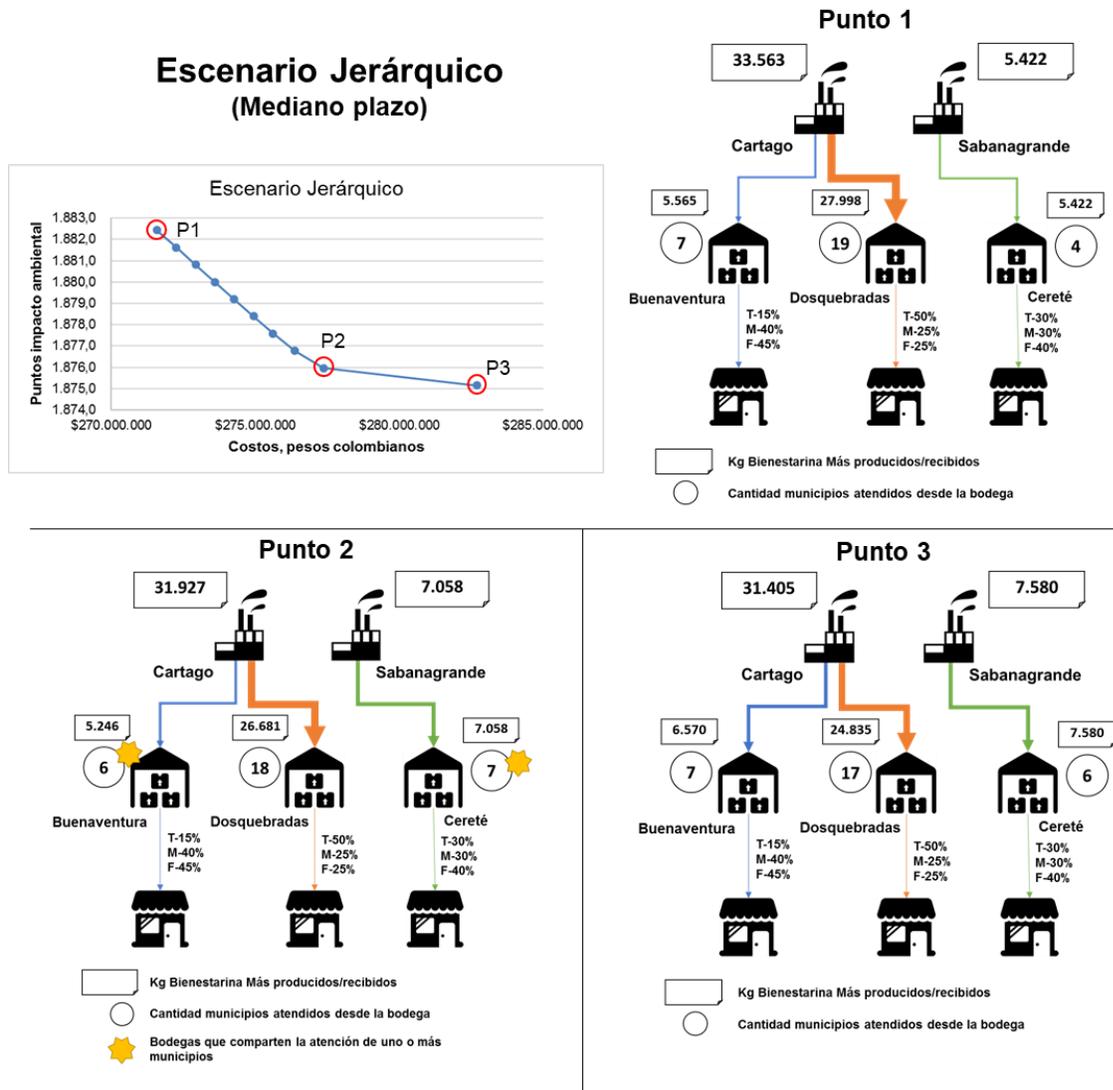
Teniendo en cuenta que la bodega de Buenaventura contempla una proporción de multimodalismo en sus rutas del 15% Terrestre, 40% Marítimo y 45% Fluvial, se evidencia que, para un criterio de ponderación de impactos ambientales en un horizonte de corto plazo, se beneficia la atención desde aquellas bodegas que tienen mayor porcentaje de distribución terrestre.

Lo anterior se puede apreciar toda vez que a medida que se mejora el impacto ambiental, se presenta un aumento en las cantidades a distribuir a través de bodega de Dosquebradas.

- Perspectiva Jerárquica (Mediano Plazo)

La **Figura 4-4** muestra la construcción de la Frontera de Pareto para la perspectiva cultural jerárquica, que considera un horizonte de planeación de mediano plazo.

**Figura 4-4.** Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Jerárquica (Mediano plazo)



Fuente: Elaboración propia

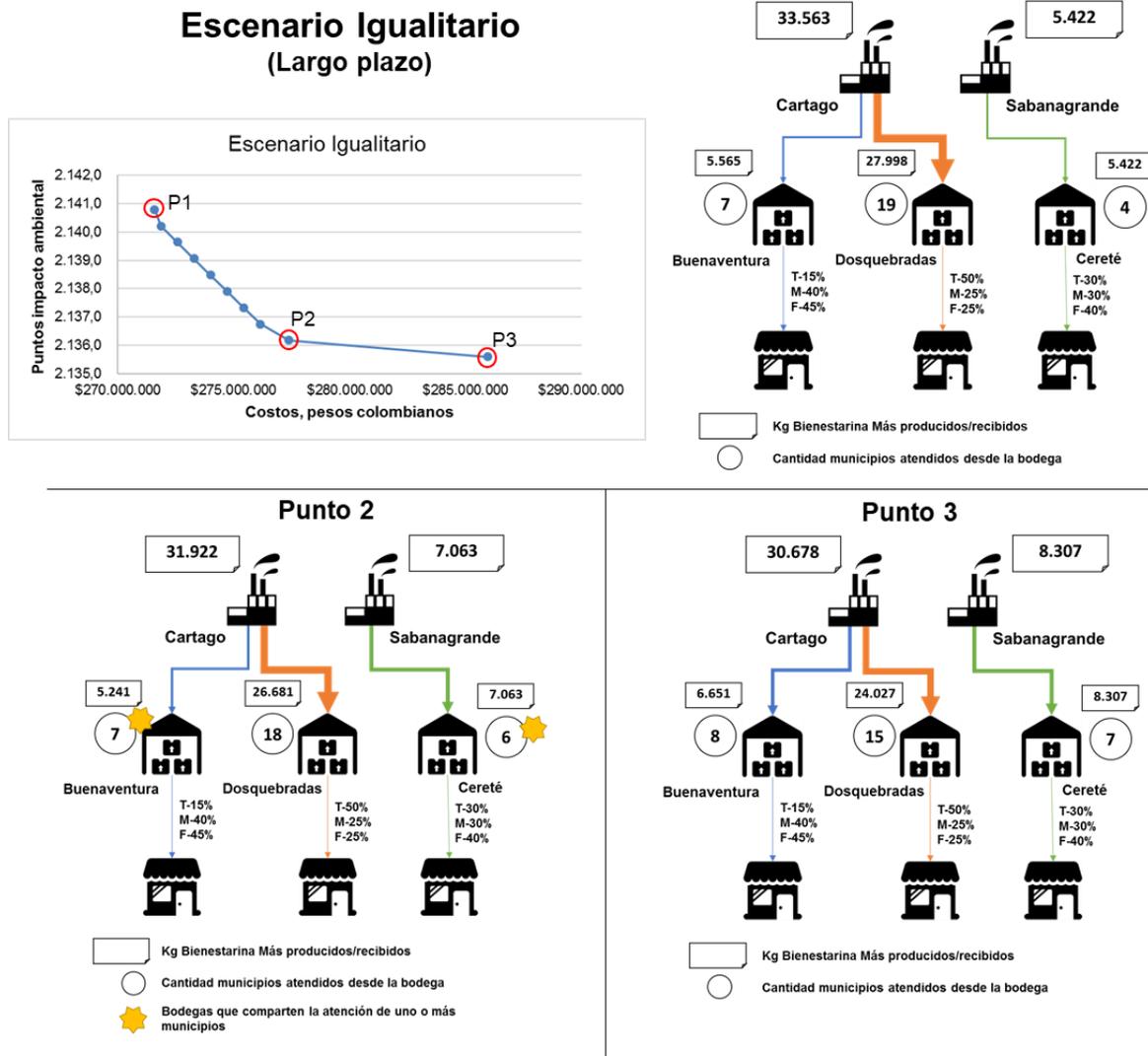
Con relación a las variaciones en las decisiones de la cadena de suministro es importante resaltar que, contrario a lo que sucede en la perspectiva Individualista (corto plazo), en el mediano plazo la reducción del impacto ambiental conlleva realizar una mayor parte de la distribución a través de las bodegas que tienen una proporción de rutas con multimodalismo más alta.

En este sentido, la bodega de Dosquebradas pasa de recibir 27.998 kg en el punto 1, a recibir 26.681 kg en el punto 2 y 24.834 kg en el punto 3, presentando reducciones del 4,7% y 11,3%, respectivamente. Por su parte, la bodega de Cereté para atender cuatro a seis municipios con un aumento final de kg de Bienestarina del 39,8%, y la bodega de Buenaventura con un aumento final de kg de Bienestarina del 18,1%.

- Perspectiva Igualitaria (Largo Plazo)

De la misma manera, la **Figura 4-5** muestra la construcción de la Frontera de Pareto para la perspectiva cultural igualitaria, que considera un horizonte de planeación de largo plazo.

**Figura 4-5.** Comparación del diseño de red de la cadena de suministro de la Bienestarina en el departamento de Chocó (Colombia) para puntos óptimos de la Perspectiva Cultural Igualitaria (Largo plazo)



Fuente: Elaboración propia

Respecto a las variaciones identificadas en el diseño de red y las decisiones de la cadena de suministro se puede mencionar que para el largo plazo, es mucho más pronunciada la tendencia de favorecer el transporte multimodal en la reducción del impacto ambiental.

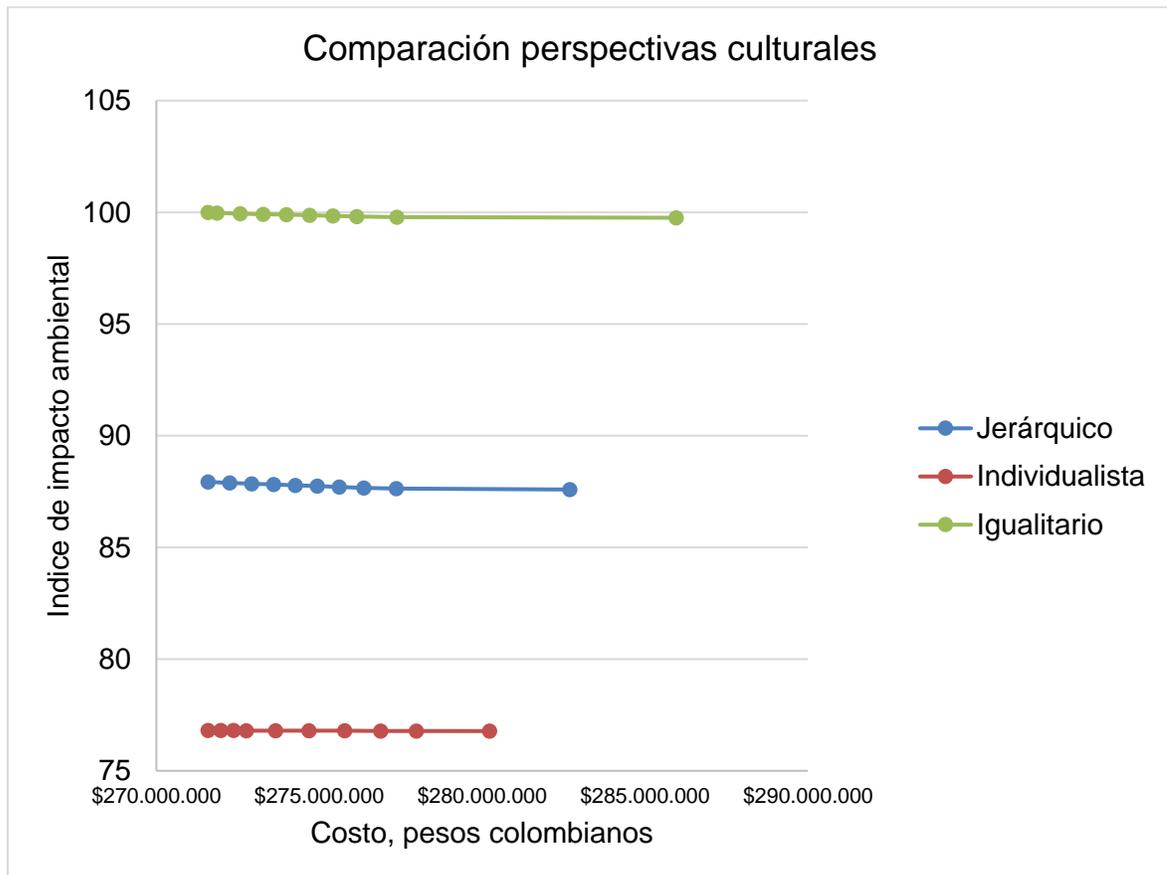
Así las cosas, la bodega de Dosquebradas presenta una reducción en los puntos 2 y 3 del 4,7% y 14,2%, respectivamente; a su vez, pasó de atender 19 municipios a tan solo

15. En la bodega de Buenaventura se pasa de atender 7 a 8 municipios, con un incremento en los kg de Bienestarina recibida del 19,5%. Y para la bodega de Cereté, se pasa de atender 4 a 7 municipios, con un incremento en kg de Bienestarina recibidos del 53,2%.

- Comparación de las Fronteras de Pareto para las tres perspectivas culturales

Con el fin de complementar el análisis realizado para cada una las perspectivas culturales con relación a las variaciones en el diseño de la red de cadena de suministro, es importante resaltar que a medida que se aumenta el horizonte de tiempo para la consideración de los impactos ambientales, no solo se beneficia en mayor grado la distribución multimodal, sino que también se incrementa el trade-off entre la reducción del impacto ambiental y la reducción de costos.

**Figura 4-6.** Comparación de las Fronteras de Pareto de las perspectivas culturales



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la **Figura 4-6**, a medida que se avanza en el horizonte de tiempo contemplado por la respectiva perspectiva cultural, se hace más costoso llegar al óptimo ambiental. Esta es una implicación de particular importancia para modelos de distribución como el de la Bienestarina, que es liderado por una entidad pública con recursos del Estado colombiano y que está sujeta a las decisiones de política pública del gobierno vigente.

## 5. Discusión de Resultados

La presente investigación analiza las implicaciones de considerar diversos criterios de ponderación de los impactos ambientales en un modelo de optimización multi-objetivo sobre el diseño de red de una cadena de suministro, entendiendo el diseño de red como el conjunto de decisiones logísticas que comprenden capacidades, asignación, y localización, entre otras.

Este objetivo fue establecido partiendo de hallazgos en trabajos de investigación como los desarrollados por Varsei & Polyakovskiy (2016) y Mota et al. (2015), los cuales argumentan que, al integrar objetivos económicos y ambientales en un modelo matemático, las combinaciones óptimas de reducción de impacto ambiental y minimización de costos conllevan un diseño diferente en la cadena de suministro. Esto fue comprobado mediante la optimización multi-objetivo realizada a la cadena de suministro de la Bienestarina en el Departamento del Chocó, en la cual se presentan cambios significativos específicamente para las decisiones de producción en plantas y flujo de producto entre los diferentes eslabones de la cadena.

De acuerdo con lo mencionado por Pagell y Shevchenko (2013), la gran mayoría de las investigaciones actuales pasan por alto las consecuencias ambientales y sociales de las acciones de las cadenas de suministro o, en el peor de los casos, son investigaciones sobre un tipo de gestión de la cadena de suministro que es insostenible o irresponsable. Sin embargo, en los últimos años se observa una tendencia creciente a incorporar las dimensiones ambiental y social del desempeño en la literatura sobre diseño de redes de cadenas de suministro. Es importante resaltar que la inclusión de la dimensión ambiental en el modelamiento matemático puede ser realizada de múltiples maneras. De acuerdo con lo expuesto por Eskandapour et al. (2015), el método más utilizado es la agregación

de los impactos en una única función ambiental, generalmente asociada a los efectos de los gases invernadero.

Si bien resulta importante identificar los posibles cambios que pueden sufrir las cadenas de suministro al considerar diferentes aspectos ambientales, esta investigación considera en particular la forma como se da la inclusión de esta dimensión desde diferentes perspectivas culturales, pues como lo expresa Ekener et al. (2018), la diferenciación de las prioridades de las partes interesadas influye notablemente en el resultado de la evaluación del impacto ambiental.

En este sentido, la literatura académica relaciona la Teoría Cultural como una de las principales formas de categorizar los impactos ambientales, asignando diferentes factores de impacto de acuerdo con perspectivas de corto (individualista), mediano (jerárquica) y largo plazo (igualitaria) (Hugo & Pistikopoulos, 2005). Los resultados del presente estudio muestran que a medida que se considera un horizonte de tiempo más lejano se genera un mayor nivel de impacto ambiental, lo cual corrobora lo encontrado por De Schryver et al. (2011).

Este argumento fue comprobado mediante la optimización multi-objetivo de la cadena de suministro de la Bienestarina en Chocó, toda vez que, al relacionar las Fronteras de Pareto obtenidas para cada una de las perspectivas culturales, se encuentra que el menor rango de impacto ambiental se encuentra en la perspectiva de corto plazo (individualista), y que este avanza significativamente a medida que se amplía el horizonte de tiempo.

En cuanto a las variaciones del diseño de red de la cadena de suministro, esta investigación permite evidenciar que para modelos de distribución que contemplan multimodalismo en sus actividades de transporte, a medida que se amplía el horizonte de tiempo, se tiende a utilizar en mayor medida las rutas multimodales, teniendo en cuenta que para el escenario individualista (corto plazo), la mayor parte de la distribución es realizada a través de la bodega de Dosquebradas, con una configuración de transporte multimodal de 50% terrestre, 25% marítimo y 25% fluvial. Mientras que, en las perspectivas Jerárquica (mediano plazo) e Igualitaria (largo plazo), se tiene una mayor

utilización de las bodegas de Cereté (30% terrestre, 30% marítimo y 40% fluvial) y Buenaventura (15% terrestre, 40% marítimo y 45% fluvial).

Este hallazgo es más valioso en la medida en que se considera que la cadena de suministro de la Bienestarina es administrada por una entidad pública, la cual tiene compromisos que van más allá de la minimización de costos, y que, como lo menciona Ekenyer et al. (2018), se requiere de una mayor participación de las partes interesadas (stakeholders) al momento de establecer los criterios de ponderación de los impactos ambientales.

Así mismo, esta investigación sirve como punto de partida para la toma de decisiones con respecto a proyectos de inversión en infraestructura de transporte de carga un país como Colombia, el cual cuenta con cuatro cuencas principales para el transporte fluvial (Magdalena, Orinoquía, Amazonía y Atrato), y dos mares para el transporte marítimo.

Finalmente, y en línea con lo establecido por De Schryver et al. (2011), es necesario profundizar más en las implicaciones de asignar criterios de ponderaciones o juicios de valor en la evaluación del impacto ambiental en el ciclo de vida. En este sentido, Sabio et al. (2012) también expresan la necesidad de evaluar la variación de los trade-offs cuando se consideran diferentes categorías de impacto de punto medio.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las variaciones en el diseño de red de la cadena de suministro de Bienestarina en el Departamento de Chocó (Colombia) mediante un modelo de optimización multiobjetivo y con consideraciones ambientales a partir de las perspectivas culturales individualista, jerárquica e igualitaria, permiten evidenciar que al integrar objetivos económicos y ambientales con perspectivas diferentes, las soluciones óptimas conllevan a un diseño diferente en la cadena de suministro.

En específico, para el modelo de distribución de Bienestarina se presentan cambios en las decisiones de producción en plantas y flujo de producto entre los diferentes eslabones de la cadena. Así mismo, un aumento en el horizonte de tiempo, conlleva un mayor uso de las bodegas que incluyen rutas de transporte multimodales.

Por otra parte, se encuentra que a medida que se considera un horizonte de tiempo más lejano, se genera un mayor nivel de impacto ambiental, lo cual va en línea con los planteamientos encontrados en la revisión de literatura. De esta manera, el menor nivel de impacto ambiental se encuentra en la perspectiva de corto plazo (individualista), y este se incrementa significativamente a medida que se amplía el horizonte de tiempo.

Teniendo en cuenta lo anterior, la inclusión de la dimensión ambiental dentro de los modelos matemáticos debería estar precedida de un análisis de las necesidades de las partes interesadas (stakeholders), de modo tal que se seleccione correctamente el horizonte de tiempo para la evaluación de los impactos ambientales.

Sin embargo, este estudio se centra solamente en el análisis de las variaciones para categorías de impacto ambiental en punto final, por lo cual es necesario complementar el análisis con una investigación para las variaciones con categorías de impacto a nivel de punto medio, de forma tal que se tenga una mayor comprensión de la asignación de juicios de valor al momento de elegir criterios de ponderación de impactos ambientales.

## **6.2 Recomendaciones**

Esta investigación es un estudio enfocado en las variaciones del diseño de red de una cadena de suministro de alimentos cuando se optimiza bajo criterios económicos y ambientales, esto último a través de diferentes perspectivas culturales de corto, mediano y largo plazo.

La metodología utilizada para la ponderación de las categorías de impacto ambiental fue ReCiPe en niveles de punto final, que es la agrupación de las cargas ambientales en daño a la Salud Humana, daño al Ecosistema y daño a los Recursos Disponibles. Otro enfoque interesante puede ser realizar el mismo estudio, pero con categorías de impacto en punto medio, que para la metodología de ReCiPe cuenta con 18 categorías. La evaluación a nivel de punto medio puede permitir evidenciar con mayor detalle el porqué de los cambios de la cadena de suministro, e identificar aquellas cargas ambientales que tienen mayor influencia en la ponderación de los impactos ambientales.

Así mismo, es importante replicar el ejercicio realizado para la Regional Choco en las otras 32 Regionales del país en donde se realiza la distribución de Bienestarina, con lo cual se podrá evidenciar adicionalmente el impacto de la integración de medidas de desempeño ambientales sobre el modelo de operación de la cadena de suministro.

Por otra parte, en futuros estudios se deberían considerar otros costos asociados a la cadena de suministro, tales como la apertura de nuevas bodegas de redistribución y el costo del inventario en tránsito, los cuales no fueron incluidos en este trabajo por la no disponibilidad de información, pero que pueden ampliar el alcance de esta investigación al integrar decisiones estratégicas tales como la localización y la asignación.

Finalmente, un siguiente paso puede ser la inclusión de una función objetivo social, teniendo en cuenta que la cadena de suministro objeto de estudio pertenece a una institución de carácter público, y está enfocada en la atención de población colombiana en condición de vulnerabilidad.



## Bibliografía

- APICS. (1997). Supply Chain Council. Retrieved from <http://www.apics.org/sites/apics-supply-chain-council>
- Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1–21.  
[https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X)
- Bojarski, A. D., Laínez, J. M., Espuña, A., & Puigjaner, L. (2009). Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach. *Computers and Chemical Engineering*, 33(10), 1747–1759.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.04.009>
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Colombia Informa. (2019). Chocó: entre la riqueza, el abandono y la pobreza. Retrieved February 17, 2019, from <http://www.colombiainforma.info/choco-entre-la-riqueza-el-abandono-y-la-pobreza/>
- DANE. (2018). Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>
- De Schryver, A. M., van Zelm, R., Humbert, S., Pfister, S., McKone, T. E., & Huijbregts, M. A. J. (2011). Value Choices in Life Cycle Impact Assessment of Stressors Causing Human Health Damage. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 796–815.  
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00371.x>
- Departamento Nacional de Planeación, D. (2015). CONPES 3843 de 2015.
- Ekener, E., Hansson, J., Larsson, A., & Peck, P. (2018). Developing Life Cycle Sustainability Assessment methodology by applying values-based sustainability weighting - Tested on biomass based and fossil transportation fuels. *Journal of*

- Cleaner Production*, 181, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.211>
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega (United Kingdom)*, 54, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
- Golsteijn, L. (2017). Updated Impact Assessment Methodology ReCiPe2016. Retrieved March 3, 2019, from <https://simapro.com/2017/updated-impact-assessment-methodology-recipe-2016/>
- Guillén-Gosálbez, G., & Grossmann, I. (2010). A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Computers and Chemical Engineering*, 34(1), 42–58. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.09.003>
- Haya, E. (2016). Análisis de Ciclo de Vida, 43. Retrieved from [https://static.eoi.es/savia/documents/teoria\\_acv\\_migma1.pdf](https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf)
- Heraldo. (2015). Viceministro dice que recorte en alimentación escolar será del 33%.
- Hofstetter, P. (1998). *Perspectives in life cycle impact assessment; a structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere, and valuesphere*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Hugo, A., & Pistikopoulos, E. N. (2005). Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, 13(15), 1428–1448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.04.011>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/DOI 10.1007/s11367-016-1246>
- ICBF. (2014). Cartilla Bienestarina. *Instituto Colombiano de Bienestar Familiar*, 2, 121. Retrieved from <http://issuu.com/icbfcolumbia/docs/cartillabienestarina.pdf/1?e=7627936/10601184>
- ICBF, I. C. de B. F. (2018a). Misión y visión del ICBF. Retrieved September 7, 2018, from <https://www.icbf.gov.co/instituto>
- ICBF, I. C. de B. F. (2018b). Portafolio de cooperación ICBF 2018-2019. Bogotá, D.C. Retrieved from [https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/portafolio\\_2018\\_v1\\_0.pdf](https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/portafolio_2018_v1_0.pdf)
- ICBF, I. C. de B. F. (2019). ENSIN: Encuesta Nacional de Situación Nutricional. Retrieved February 15, 2019, from <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/encuesta->

- nacional-situacion-nutricional
- ICONTEC. (2007). Ntc 14040, (571), 24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A Next Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8, 324-330. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Kostin, A., Guillén-Gosálbez, G., & Jiménez, L. (2015). Dimensionality reduction applied to the simultaneous optimization of the economic and life cycle environmental performance of supply chains. *International Journal of Production Economics*, 159, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.018>
- Kostin, A., Mele, F. D., & Guillén-Gosálbez, G. (2011). Multi-objective optimization of integrated bioethanol-sugar supply chains considering different LCA metrics simultaneously. *Computer Aided Chemical Engineering*, 29, 1276–1280.
- Láinez, J. M., Bojarski, A., Espuña, A., & Puigjaner, L. (2008). Mapping environmental issues within supply chains: a LCA based approach. *Computer Aided Chemical Engineering*, 25, 1131–1136. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(08\)80195-2](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(08)80195-2)
- Listén, M., & Andersson, S. (2014). Life Cycle Impact Assessment : A comparison of three contemporary methodologies, 1–61.
- Liu, Z., Qiu, T., & Chen, B. (2014). A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China. *Applied Energy*, 126, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.001>
- Lucas, G., Bezzo, F., & Carvalho, A. (2014). Optimal Design of a Bioethanol Supply Chain Considering Different Environmental Impact Assessment Methods. *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, 973–978.
- Lummus, R. R., Vokurka, R. J., Texas, A., & Station, C. (1999). Defining supply chain management : a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 99(1), 11–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/02635579910243851>
- Mentzer, J. T., Dewitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Póvoa, A. (2015). Supply chain design and planning accounting for the Triple Bottom Line. *12th International Symposium on*

- Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, (June), 1841–1846. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63576-1.50001-7>
- O'Rourke, D. (2014). The science of sustainable supply chains. *Science*, *344*(6188), 1124–1127. <https://doi.org/10.1126/science.1248526>
- Pagell, M., & Shevchenko, A. (2013). Why Research in Sustainable Supply Chain Management Should Have No Future. *Journal of Supply Chain Management*, *50*(1), 10.
- Pieragostini, C., Mussati, M. C., & Aguirre, P. (2012). On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, *96*(1), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.014>
- Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Novais, A. Q. (2011). Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances. *Computers and Chemical Engineering*, *35*(8), 1454–1468. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.009>
- Pishvaei, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, *36*(8), 3433–3446. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.007>
- Quinn, F. . (1977). "What's the buzz?". *Logistics Management*, *36*(2), 43–47.
- Rardin, R. L. (1998). *Optimization in Operation Research*. Prentice Hall, Inc.
- Reyes-Labarta, J. A., Salcedo-Díaz, R., Ruiz-Femenia, R., Guillén-Gosálbez, G., & Caballero, J. A. (2014). Handling of uncertainty in life cycle inventory by correlated multivariate lognormal distributions: Application to the design of supply chain networks. *Computer Aided Chemical Engineering*, *33*, 1075–1080. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63455-9.50014-3>
- Ruiz-Femenia, R., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., & Caballero, J. A. (2013). Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chemical Engineering Science*, *95*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.02.054>
- Sabio, N., Kostin, A., Guillén-Gosálbez, G., & Jiménez, L. (2012). Holistic minimization of the life cycle environmental impact of hydrogen infrastructures using multi-objective optimization and principal component analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(6), 5385–5405. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.039>

- Vanguardia Liberal. (2015). Finaliza mayo y aún no inicia la entrega de desayunos infantiles. Retrieved October 15, 2018, from <https://www.vanguardia.com/santander/guanenta/finaliza-mayo-y-aun-no-inicia-la-entrega-de-desayunos-infantiles-KYVL313382>
- Varsei, M., & Polyakovskiy, S. (2016). Sustainable supply chain network design : A case of the wine industry in Australia. *Omega*, (JANUARY), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.009>
- Vujanović, A., Čuček, L., Pahor, B., & Kravanja, Z. (2014). Multi-objective synthesis of a company's supply network by accounting for several environmental footprints. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(5), 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.03.004>