Metodología para la selección de transportadores en una Cadena de Suministro Colombiana de Café Verde usando el método PROMETHEE

Sorting methodology to select carriers in a Colombian Green Coffee Supply Chain using PROMETHEE method

Johanna Trujillo Diaz
- Industrial Engineering Faculty
Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito
Avenida Carrera 45 (Autopista Norte) #205-59, Bogotá, Cundinamarca
johanna.trujillo@escuelaing.edu.co

Rafael Guillermo García Cáceres
- Industrial Engineering Faculty
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC
Sede Central Tunja–Boyacá–Colombia
Avenida Central del Norte 39-115
rafael.garcia01@uptc.edu.co

Abstract
The article is part of an exploratory investigation of several years which has two contributions to the literature: the first is the construction of the multi-criteria evaluation matrix with the definition of the parameters from the statistical analysis of deterministic and probabilistic behavior of the criteria under assumptions factor; and the second is the application of PROMETHEE method for carrier's selection in the supply chain (SC) under the theoretical approaches in the literature to build a theoretical and practical methodology for decision-making in the CS, a case study is presented to CS of green coffee. The Multi Criteria Decision Aid (MCDA) techniques revised, the nonparametric outranking method PROMETHEE allows decision makers to combine quantitative and qualitative criteria for carrier's selection with scientists and easy components. The carrier's selection policy for Land Transportation Service (LTS) proposal is designed under the criteria of maximizing the opportunity, flexibility, efficiency or opportunity and technology; and cost minimization presented in the Network Decision Multi Criteria (MCDN) for Transportation Logistic Function (TLF).

Keywords: PROMETHEE, Multi Criteria Decision Aid (MCDA), Carrier's selection, Network Decision Multi Criteria (MCDN)

Resumen
El artículo es parte de una investigación exploratoria de varios años que presenta dos aportes a la literatura: el primero es la construcción de la matriz de evaluación multicriterio con la definición de los parámetros a partir del análisis estadístico del comportamiento determinístico y probabilístico de los criterios bajo supuestos factoriales; y el segundo es la aplicación del método PROMETHEE para la selección de trasportadores en la Cadena de Suministro (CS) bajo los criterios teóricos en la literatura construyendo una metodología teórico práctica para la toma de decisiones en la CS, se presenta un caso de estudio para la CS del café verde. De las técnicas Multi Criteria Decision Aid (MCDA) revisadas, el método outranking no paramétrico PROMETHEE le permite a los tomadores de decisiones combinar criterios cuantitativos y cualitativos en la selección de transportadores de la CS de forma científica y rápida. La política de selección de transportadores de Servicio de Transporte Terrestre (STT) propuesta, está diseñada bajo los criterios de maximización de la oportunidad, flexibilidad, eficiencia u oportunidad y tecnología, y la minimización del costo presentados en la Red de Decisión Multicriterio (MCDN) para la Función Logística de Transporte (FLT)

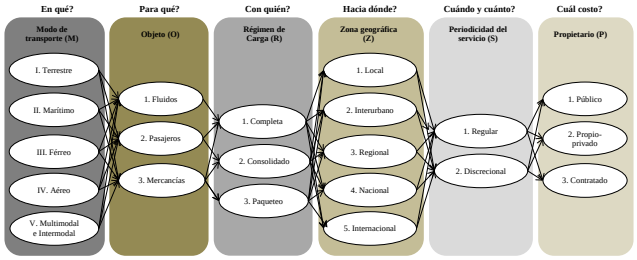
Palabras clave: PROMETHEE, Multi Criteria Decision Aid (MCDA), Transportadores, selección, Red de Decisión Multi Criterio (MCDN)

1. Introducción

La función de transporte y logística juegan un rol en la reducción de costos a lo largo de la Cadena de Suministro (CS) [1-3] y del impacto ambiental [4, 5]. Los Costos Logísticos (CL) en la CS pueden representar entre un 10% a un 30% de las ventas [1] y son muy muy variables porque dependen del sector económico, el producto o servicio y la toma de decisiones tácticas y operativas [6, 7], pero no siempre está presente en las decisiones estratégicas porque implican inversión en infraestructura [7]. Una estrategia de integración de la CS y minimización su CL es la consolidación de la función de almacenamiento, del transporte [8] y la reducción del costo de manejo [9] que incluye el cargue y descargue de mercancías [10-12]. En primer lugar, el costo de *movimiento* o *transporte* absorbe entre uno y dos tercios de los CL totales [9]. En segundo lugar, se encuentra el alto costo de *almacenamiento* de productos sobre un vehículo de transporte, que se puede justificar únicamente cuando hay un punto de equilibrio entre costo de almacenar sobre un vehículo y el costo de cargue y descargue que se relaciona directamente con el tiempo [8], complejidad en la operación [13].

Los transportadores se dividen en seis clasificaciones como se muestra en la figura 1:

Figura 1 Clasificación de los transportadores



Fuente. Los autores

- *Por modo de transporte* existen transportadores en cinco modalidades básicas y sus combinaciones dependiendo las características físicas [14] e intrínsecas del vehículo de transporte: *marítimo o acuático, ferroviario, terrestre, aéreo, por ductos o conducto directo* [8, 9, 15, 16]. Las combinaciones son: cuando hay transferencia de carga en el mismo modo se denomina: *intramodal*, en varios modos: *intermodal* [16] y bajo responsabilidad de un mismo contrato: *multimodal*.
- *Por objeto* del uso del equipo de transporte hay transportadores de carga, fluidos y/o pasajeros y se diferencian en el equipo utilizado [17].
- *Por régimen de carga* los transportadores más conocidos son los multimodales que combinan el modo terrestre y aéreo, para garantizar una entrega rápida en largas distancias [18, 19].
- *Por zona geográfica* de acuerdo a la distancia los transportadores se dividen en: nacional, internacional [16], urbano o local, interurbano [17], regional.
- *Por periodicidad* se divide en servicio *regular* cuando existe una alta demanda de un producto o un vehículo por varios clientes que buscan servicio racional, eficiente y rentable utilizando un mismo vehículo o servicio, éste se caracteriza por el alto tiempo de la planeación de la demanda, ruteo, operaciones, movilización y costo [19]. *Discrecional*, cuando la demanda se adapta de forma individual, de acuerdo a los requerimientos del cliente.
- *Por tipo de propietario* los transportadores se dividen en privados cuando un productor posee y explota sus vehículos propios y *por demanda, alquilado o contratado*, cuando realizan servicios de transporte para varios proveedores [17, 19].

Con lo anterior, cualquier CS presenta problemáticas ante la selección adecuada de transportadores debido a la gran diversidad de los mismos y las necesidades de estandarización de criterios en la toma de decisiones logísticas. El objeto de éste artículo es proponer una metodología científica y práctica para los tomadores de decisiones de transporte en la CS, para el Servicio de Transporte Terrestre (STT) bajo los criterios propuestos en la revisión de literatura. A lo cual se propone un estudio de caso para la CS de café verde en Colombia.

En la primera parte se define el objeto de estudio del artículo que es el Servicio de Transporte Terrestre (STT) en la CS, luego se presenta una revisión de la literatura del uso del Método PROMETHEE para la selección de transportadores. En la segunda parte se presentan los supuestos, aspectos matemáticos y teóricos del Método PROMETHEE I, II y la gráfica GAIA. En la tercera parte del artículo se explica la metodología para la toma de decisiones propuesta bajo los criterios establecidos en la MCDN [20] y en las dos últimas partes los resultados de la metodología utilizando el software Visual PROMETHEE, conclusiones y perspectivas de investigación futura.

1.1. El Servicio de Transporte Terrestre (STT)

El Servicio de *Transporte Terrestre (STT)* ha crecido rápidamente desde el final de la Segunda Guerra Mundial [8], es el más conveniente para el transporte de carga para bienes y productos terminados y semi terminados a distancias entre 800-845 kms. El STT es la mejor combinación multimodal e intermodal para los otros modos de transporte que incluye el área urbana [17, 21] por sus características intrínsecas como p.e. la versatilidad del equipo de transporte, la accesibilidad origen-destino sin necesidad de transbordos, la posibilidad de tener mayor frecuencia y flexibilidad en la contratación [22]. Sin embargo, el costo Tn/km (toneladas/kilómetros) es mayor que en el modo férreo y el marítimo y menos costoso que el aéreo [16]. [16]

El STT tiene pocas restricciones legales de ingreso al mercado, los TT con pequeñas inversiones pueden competir [17] debido a la falta de regulación en especial en países emergentes como p.e. Colombia y México; actualmente buscan estrategias para tener: a) tiempos de entrega más cortos y frecuentes [16, 17], b) menores tiempos de cargue y descargue [16], c) bajos niveles de inventario [17] en la CS, d) bajos costos de transporte [3, 17] y manejo [9] y e) un manejo adecuado de la información [16]. Ésta mejora logística la logran con la consolidación del *inventario, vehículos, almacenes y terminales* [9, 23], que genera otros costos fijos [17] y variables como p.e. utilización de las terminales de cargue y de descargue, almacenamiento de contenedores y traslado multimodal [17-19].

En el STT específicamente los transportadores de carga consolidada son denominados Less-Than-Truckload: (LTL), los transportadores de carga completa: Truck Load: TL o Full Truck Load: (FTL) [17] y las operaciones de consolidación para transporte postal: Postal Truck: (PT) [17, 18]. Por lo general, el flete LTL es más costoso que el TL [24, 25] debido a que poseen redes terminales de consolidación break bulk y de relevo [17] y además la movilización es nocturna [19]. En el STT local o intraurbano se usan vehículos livianos para distancias cortas y para distancias largas o interurbanas los vehículos usados son de línea de arrastre, los cuales podrían operar intraurbanamente, pero su uso no es eficiente [17].

1.2. Revisión de literatura Método PROMETHEE

Se han desarrollado muchos Métodos de Decisión Multicriterio (MCDA) para la toma de decisiones: a) el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) [26, 27], b) la técnica de la suma ponderada [27], c) la Teoría de la Utilidad Multi Atributo (MAUT) [26] y d) los métodos de sobrecalificación (outranking) [26]. De los de outranking está El ELECTRE (Eliminación y Selección Expresando la Realidad, por su traducción del francés: ELimination Et Choix Traduisant la REalité) I, II, III, IS, TRI, A [26, 28] y de la evolución de éstos métodos se desprende otra familia que apoyan las etapas de clasificación, agrupación y anulación de alternativas: PROMETHEE I (1982) [29], II (1986) [30], III (1988) [29, 31], IV (1988) [31] IS y TRI; PROMETHEE, PROMETHEE V y VI para la toma de decisiones colectivas [32].

El método PROMETHEE I (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations) con la clasificación parcial y completa fue presentado por primera vez en 1982 en una conferencia organizada por R. Nadeau y M. Landry en la Université Laval, Québec, Canadá (L'Ingéniérie de la decisión Elaboración d'instrumentos d'Aide à la decisión) [29]. Es un método de toma de decisiones multicriterio desarrollado por Brans, Vincke, y Mareschal (1986)[29, 33], de basado en la construcción y explotación de relaciones de sobrecalificación perteneciente a la clase de MCDA de outranking [23][34]. El PROMETHEE I nace entre el 1984 y 1985 con una primera aplicación en FORTRAN por Bertrand Mareschal, realizado en una computadora central de la Universidad Libre de Bruselas (ULB), luego la Universidad de Split para el método consigue ejecutar el software en su sistema de Vax con una gran cantidad de tarjetas perforadas, donde ejecutaba en cuestión de días [35].

Han sido muchas las aplicaciones computacionales desarrolladas para la solución de problemas por métodos de outranking MCDA PROMETHEE: PROMSORT especializado para logística [32, 36], software interactivo y gráfico PROMCALC en MSDOS (1990) [35]. Decisión Lab 2000 Software toma las ideas del PromCalc y las aplica en MS Windows 95 y 98, es un proyecto de desarrollo conjunto entre la ULB y la Compañía de Decisión Visual Canadiense [35, 37], D-Sight (2000-2010), software desarrollado como spin-off por Yves De Smet (ULB) [35]. Visual PROMETHEE con la herramienta GAIA reemplaza el Lab2000 de la Escuela de Economía y Administración de la Universidad Libre de Bruselas (ULB) Solvay de Bruselas (2010 – 2012) [35], Smart Picker Pro (2012) [35].

Es una de las técnicas más desarrolladas de evaluación multicriterio que sirve para la *selección, clasificación y ordenamiento* de alternativas [34] donde los criterios se encuentran generalmente comparados entre sí. [38]. Al respecto, existen el PROMETHEE I [39] que da un preorden parcial [40] y el PROMETHEE II [39] que da un preorden completo [29, 39]; éstos se complementan con la técnica de modelización visual GAIA (1988) (Geometrical Analisis for Interactive Aid) [31, 37], herramienta de decisión cualitativa, que ayuda a la comprensión de los aspectos

conflictivos entre los criterios y a la determinación de las ponderaciones asociadas a los mismos [29, 31, 41, 42]. Además, es utilizado para mostrar gráficamente la mejor solución cuando se modifican los pesos de los criterios [43].

El uso del PROMETHEE está diversificado en la literatura y se usa especialmente en toma de decisiones estratégicas en las cuales se necesite inversión e infraestructura. Además se ha combinado con otras técnicas, en modelos métodos híbridos y heurísticos para dar robustez científica a las decisiones como p.e. ELECTRE III [34, 44], programación dinámica [29, 45], sistemas difusos[33], clustering[43], DOFA, Delphi[46], AHP[47]. Estratégicamente se enfoca en la selección de proyectos [30], planes de inversión financiera y banca [48] portafolios[48], con aplicaciones en industrias de producción de concreto u hormigón premezclado [49], de la construcción [50].

La mayor parte de autores están orientados a la *localización* de instalaciones [29, 32, 44, 47, 51] de centros de distribución empresariales [52, 53], empresas de manufactura [54], viviendas de uso residencial [55], plantas de energía eléctrica [56], centrales hidroeléctricas [57]. Hay otro enfoque en problemas *organizacionales* que incluyen la toma de decisiones en planeación estratégica [45]; la selección de Sistemas de Información de planificación de recursos empresariales, por sus siglas en inglés: *Enterprise Resource Planning (*ERP) [58]y su externalización [59]; la selección de socios estratégicos fabricantes en outsoursing para una CS textil [60], la selección de proveedores [33, 61], el desarrollo de productos [32], planificación de recursos humanos [58] y ética organizacional [29].

Hay otras aplicaciones en sostenibilidad ambiental en el uso del agua[62], los recursos hídricos [29], en energías renovables[33]. Sociales y científicos en medicina, química, cuidado [29] y atención en salud [29] en hospitales [63]. Urbanos, para la comparación del desempeño de varias ciudades [64] a fin de establecer estrategias de intervención y evaluaciones en turismo [29] y en política prospectiva para formular rutas de exploración para las reservas estratégicas de petróleo en China antes del 2020 [45]

A nivel macroeconómico hay aplicaciones PROMETHEE en *transporte* para la construcción de vías terrestres [65]; selección de rutas alternativas - caso Belgrado-Birmingham [66]; selección de transporte público ferroviario - caso Italia [41]; selección de rutas de transporte de fluidos en oleoductos [45] y en vehículos [46]. Sin embargo, en la revisión de literatura realizada no se encuentra evidencia de la aplicación de la técnica PROMETHEE en la de la selección de los transportadores y su grado de consolidación para la Función Logística de Transporte, objeto de este trabajo.

¿Cuáles son los criterios adecuados para realizar la selección de STT? ¿Qué criterios se encuentran en la literatura? ¿Existen metodologías para la selección y el ordenamiento de STT en las CS?

2. El método MCDA PROMETHE

Las metodologías MCDA comprenden, cuatro problemáticas principales: *selección, clasificación, ranking y descripción* [67]. Específicamente el objetivo de los métodos MCDA de sobrecalificación (*outranking*), es ayudar al proceso de la toma de decisiones en problemas multicriterio, utilizando la comparación con relaciones binarias que indican el desempeño de los criterios, mediante la conformación de un subconjunto parcial de las "mejores" alternativas y de clasificación completa [26]. Los métodos PROMETHEE manejan información *intercriterio*: que indican la importancia relativa con respecto a los otros criterios evaluada con una ponderación; mientras *intracriterio*, es propia de cada criterio indica la percepción o la preferencia [29, 68]

Un objetivo importante de todos los métodos multicriterio es enriquecer el gráfico dominio, es decir reducir el número de incomparabilidades (R) [29]. La ventaja del PROMETHEE es la posibilidad de adicionar o eliminar criterios, determinando la dominancia, indiferencia o incomparabilidad [29, 68], así cuando algunas alternativas son incomparables se retiran y la información sigue siendo confiable [29].

2.1. Definir la matriz de evaluación multicriterio

Incluye por filas la definición de las alternativas $\{a_1, a_2, \ldots, a_i, \ldots, a_n\}$, por columnas los criterios $\{g_1(.), g_2(.), \ldots, g_j(.) \ldots g_k(.)\}$ y sus pesos $\{w_j, j = 1, 2, \ldots, k\}$. En el problema se depben tener en cuenta los criterios mínimos a maximizar y minimizar que representan las preferencias, las prioridades, las políticas del sistema e individuales que absorban la información adicional importante bajo contextos tecnológicos, económicos, ambientales y sociales, algunos de éstos son para maximizar y otros para minimizar [26, 29, 58, 69]

Los pesos de los criterios no dependen de las unidades de medida de los mismos; indican la importancia relativa de las prioridades, preferencias o percepciones en la toma de decisiones por parte del decisor; se pueden establecer como números positivos o en términos porcentuales, por tanto cuanto mayor sea el peso del criterio más importante es respecto a los otros, sin tener inconvenientes en tener el mismo peso a cada uno de los criterios porque son ponderados debido a que $\sum_{j=1}^{k} w_j = 1$. [26, 29, 58, 68-70]. En la mayoría de los casos publicados, los pesos y los

criterios son asignados en los problemas MCDA por los expertos de cada área o gerentes de la empresa por medio del método Delphi [46], pero el método PROMETHEE aún no ofrece las directrices formales respecto los pesos, entonces para eliminar éstas limitaciones y desarrollar un proceso de toma de decisión mejorado se puede usar híbrido con otros métodos como p.e. Fuzzy Analitycal Hierarchy Process (FAHP) [47], sin embargo en la literatura hay otras técnicas matemáticas y de sensibilidad para asignar los pesos.

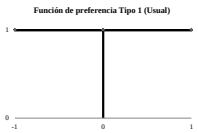
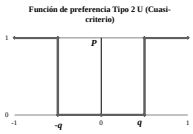
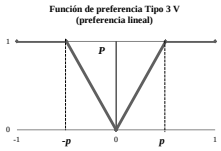
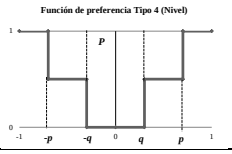
La selección de los criterios de un MCDA debe ser relevante y evitar la contradicción. La mayoría de problemáticas tienen una naturaleza multicriterio, el objetivo es seleccionar una sola alternativa que optimice todos los criterios, sin embargo no existe ninguna alternativa que optimice todos los criterios al mismo tiempo [29]. Existen dos conjuntos de criterios: a) *dinámicos*: son aquellos cuyas valoración o evaluación cambia en periodos de tiempo, p.e. precio del producto por mes. b) Criterios *estáticos*: no cambian tan a menudo p.e. la tecnología usada semestralmente**.** Éstos últimos se pueden dividir en: b1) criterios de *competencia*: que cubren todas las competencias o actividades de la empresa: técnica, organizativa y humana; y b2) los criterios *económicos*: son los que tienen en cuenta la viabilidad económica o el riesgo de la empresa [58, 61, 69].

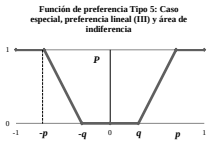
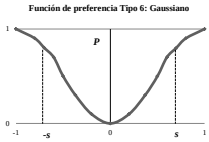
El *umbral de indiferencia* (q) es la desviación más grande y se considera como insignificante por el tomador de decisiones. El *umbral de preferencia* estricta (q), es la desviación más pequeña y se considera como suficiente para generar una preferencia completa; *s*: valor intermedio entre p y q, que define el punto de inflexión de la función de preferencia, pero se recomienda determinar primero un p y un q y fijar s en el medio. Si s está cerca de q las preferencias se verá reforzada por pequeñas desviaciones, mientras que cerca de q ellas se suavizarán. Tan pronto como la tabla de evaluación $\{g_j(.)\}$ está planteada, los pesos w_j, los parámetros y las funciones de preferencia ó criterios generalizados $\{g_j(.), P_j(a,b)\}$ presentes en la tabla 1, se inicia la aplicación [29, 58, 69, 70].

2.2. Cálculo de la matriz de índices de preferencia

La estructura de preferencias de PROMETHEE se basa en comparaciones por pares de alternativas para todos los criterios, [29], ésta relación de dominancia natural identifica la comparación por pares de alternativas (a y b) con índices de preferencia o indiferencia entre 0 y 1, que se registran en una matriz de preferencias (a y b) [28, 29] para resolver la función de utilidad $max\{g_1(a), g_2(a), \dots, g_i(a), \dots, g_k(a) | a \epsilon A\}$ del problema multicriterio que se reduce a un problema uniobjetivo, para el cual existe una solución óptima y no una frontera eficiente [28, 29], donde cada alternativa a_i, (i = 1, ..., n) puede ser evaluada con respecto a cada criterio g_j, (j = *1*, ..., *m*) [26].

Tabla 1 Tipos de criterios generalizados (P(d):Función de preferencia)

Clase de criterio	Función de densidad de probabilidad de preferencia e indiferencia	Representación gráfica		Tipo de criterios	Par ámetros fijos
Tipo 1: **Usual**	$P_1(d) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ $\lvert d \rvert = 0\ indifencia$ $\lvert d \rvert > 0\ preferencia\ estricta$	Hay indiferencia sólo cuando $g(a)$ y $g(b)$ son iguales, de lo contario sólo habrá preferencia estricta [5]. La ***función de preferencia*** de costumbre, es una buena opción para los criterios *cualitativos,* incluyendo un pequeño número de niveles de evaluación. Se utiliza una escala de Likert desde un criterio malo a un bueno [35], preferiblemente usar escalas de 9 puntos.		Discreto U(0,1)	----
Tipo 2 ó (U): **Cuasi-Criterio**	$P_2(d) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ $\lvert d \rvert \leq q\ indifencia$ $\lvert d \rvert > q\ preferencia$	La región de indiferencia es dada por $\lvert g(a) - g(b) \rvert \leq q$ [5]. Introduce la noción de umbral de indiferencia [35].		Discreto o contínuo, U(q,1)	q
Tipo 3 ó (V) Preferencia lineal	$P_3(d) = \begin{cases} 0 \\ d/p \\ 1 \end{cases}$ $\lvert d \rvert \leq q$ $0 \leq \lvert d \rvert \leq p\ indiferencia$ $\lvert d \rvert > p\ preferencia$	Existe indiferencia cuando $g(a)$ y $g(b)$ son iguales. La preferencia estricta se da cuando la preferencia es mayor a p y la función crece linealmente entre la indiferencia y preferencia estricta [5], es un caso especial de la función de preferencia lineal, cuando el umbral de indiferencia q es igual a 0, se adapta a los criterios cuantitativos, cuando incluso debe tener pequeñas desviaciones identificadas [35] para indicar preferencia.		Contínua Tr (0,p,1)	p
Tipo 4: **Nivel**	$P_4(d) = \begin{cases} 0 \\ 0.5 \\ 1 \end{cases}$ $\lvert d \rvert \leq q\ indiferencia$ $q < \lvert d \rvert \leq p$ $\lvert d \rvert > p\ preferencia$	Indiferencia cuando $\lvert g(a) - g(b) \rvert$ está por debajo de un umbral q; Preferencia estricta cuando la diferencia está sobre el umbral $q+p$ [5]. la función de preferencia nivel, es una buena opción para los criterios cualitativos con un mayor número de niveles [35].		Discreta y continua p(0<q,p<1)	p, q

Clase de criterio	Función de densidad de probabilidad de preferencia e indiferencia	Representación gráfica		Tipo de criterios	Par ámetros fijos
Tipo 5: Caso especial, preferencia **lineal (III)** con área de indiferencia	$P_5(d) = \begin{cases} 0 \\ \frac{d-q}{p-q} \\ 1 \end{cases}$ $\lvert d\rvert \leq s\ indiferencia$ $q < \lvert d\rvert \leq p^{\underline{o}}$ $\lvert d\rvert > p$	Indiferencia cuando $\lvert g(a) - g(b)\rvert$ está por debajo de un umbral s; Preferencia estricta cuando la diferencia está sobre el umbral $q+p$ [5]. La función caso especial, es la mejor opción para criterios más cuantitativos, cuando el umbral de indiferencia es el deseado [35]. En el caso de tipo 5 un umbral de indiferencia y un umbral de preferencia estricta tiene que ser seleccionado [29].		Continua Tr (q,p,1)	p, q
Tipo 6: Gaussiano	$P_6(d) = \begin{cases} 0 & \lvert d\rvert \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x^2}{2s^2}} & \lvert d\rvert > 0 \end{cases}$	Indiferencia para $g(a)$ y $g(b)$ iguales, y la preferencia estricta para una diferencia mayor a s y crece como una curva Gaussiana entre esos puntos [5]. Es una alternativa a la función de preferencia lineal [35]. En caso de un criterio de Gauss (tipo 6) la función de preferencia sigue siendo cada vez mayor para todas las desviaciones y no tiene discontinuidades, ni en su forma, ni en sus derivados [29].		Continua N(0,1;p)	s

Fuente: Los autores con base en [32]

2.3. Cálculo de la matriz de índices de preferencia

La estructura de preferencias de PROMETHEE se basa en comparaciones por pares de alternativas para todos los criterios, [29], ésta relación de dominancia natural identifica la comparación por pares de alternativas (a y b) con índices de preferencia o indiferencia entre 0 y 1, que se registran en una matriz de preferencias (a y b) [28, 29] para resolver la función de utilidad $max\{g_1(a), g_2(a), \dots, g_i(a), \dots, g_k(a) | a \epsilon A\}$ del problema multicriterio que se reduce a un problema uniobjetivo, para el cual existe una solución óptima y no una frontera eficiente [28, 29], donde cada alternativa a_i, (i = 1, ..., n) puede ser evaluada con respecto a cada criterio g_j, (j = *1*, ..., *m*) [26].

La ***amplitud*** *de las desviaciones entre las evaluaciones* de las alternativas por cada criterio pueden ser cuantitativas o cualitativas, deterministas o no deterministas (difusas o estocásticas) [26, 28, 29], cuanto mayor sea ésta desviación mayor será la preferencia o indiferencia

La preferencia de la alternativa está dada por una función de la forma: $P_j(a,b) = F_j\left[d_j(a,b)\right] \forall a, b \in A$; donde la amplitud de la desviación está dada por: $d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$. Para lo cual la preferencia está entre: $0 \leq P_j(a,b) \leq 1$. En el caso de *maximización* intra criterio $g_j(.)$ la función es preferente de **a** sobre **b,** cuando $P_j(a,b) > 0 \Longrightarrow P_j(b,a) = 0$. Las preferencias son iguales a 0 cuando las desviaciones son negativas. Así mismo, para la *minimización* intra criterio, la ***función de preferencia*** está dada por $P_j(a,b) = F_j[-d_j(b,a)]$ [29].

Si, aSb y no $bSa \rightarrow$ aPb $\therefore$ $a\ estrictamente\ Preferido\ a\ b$ y si $bSa\ y\ no\ aSb \rightarrow bPa \therefore$ $b\ estrictamente\ Preferido\ a\ a$ entonces *P, representa la preferencia,* cuando una alternativa A es mejor que B, si A es al menos tan buena que otra en todos los criterios *preferida a B* [29, 71], ó aSb lo que indica que a sobrecalifica a b", entonces se satisface la relación de sobrecalificación [71]

$$\begin{cases} \forall j: g_j(a) \geq g_j(b) \\ \exists_k: g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb,$$

Si, $aSb\ y\ bSa \rightarrow aIb \therefore a$ es indiferente a b, entonces *I, representa la indiferencia;* las alternativas que no están dominadas por ningún otra o la relación de dominancia es poco preferente entonces *A y B son indiferentes* entonces se llaman soluciones eficientes [29].

$$\forall j: g_j(a) = g_j(b) \Leftrightarrow aIb,$$

Si, $no\ aSb\ y\ no\ bSa \rightarrow aRb \therefore a$ es incomparable a b *entonces R, representa la incomparabilidad*, si la alternativa es mejor en un criterio y la otra es mejor en otro criterio y es imposible decidir cuál es mejor que otra, las alternativas son incomparables, cuando A y B son indiferentes. *A y B son incomparables* [29]. El objetivo es, por supuesto, reducir tanto como sea posible el número de incomparabilidades, pero no cuando no es realista [29].

$$\begin{cases} \exists_s: g_s(a) > g_s(b) \\ \exists_r: g_r(a) > g_r(b) \end{cases} \Leftrightarrow aRb,$$

2.4. Índices de preferencias agregados PROMETHEE I y II Rankings

El procedimiento se basa en las comparaciones por pares para *calcular los* ***índices de preferencias globales*** [29] y el *vector de preferencia e indiferencia*, como se muestran a continuación:

$$\begin{cases}\pi(a,b) = \sum_{j=1}^{k} P_j(a,b)\, w_j \\ \pi(b,a) = \sum_{j=1}^{k} P_j(b,a) w_j\end{cases} \quad (1)$$

Donde $\pi(a,b)$, expresa el grado en el que *a se prefiere sobre b*, y $\pi(b,a)$ indica cómo *b se prefiere sobre a* ó cuando *b* es mejor que *a*, en ambos casos teniendo en cuenta todos los criterios; por consiguiente son flujos positivos para la preferencia acotados superiormente por 1. Las siguientes propiedades se mantienen para todo $(a,b)\epsilon A$ [29].

$$\begin{cases}\pi(a,a) = 0, \\ 0 \le \pi(a,b) \le 1, \\ 0 \le \pi(b,a) \le 1, \\ 0 \le \pi(a,b) + \pi(b,a) \le 1\end{cases}$$

Tan pronto como $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ se puede construir la matriz de índices de preferencia y flujos. Las siguientes propiedades se cumplen para todos $(a,b) \in A$ [29]. Si los ***flujos de outranking*** son cercanos a cero $\pi(a,b) \sim 0\ implica\ una\ preferencia\ débil\ de\ a\ sobre\ b,$ pero si los flujos son cercanos a uno $\pi(a,b) \sim 1\ implica\ una\ preferencia\ fuerte\ de\ a\ sobre\ b.$

El flujo outranking positivo $\phi^+(a)$, es la medida de cómo una alternativa *a* supera a todas las demás, cuanto mayor sea éste, mejor será la alternativa. El flujo outranking negativo $\phi^-(a)$, es la medida de cómo una alternativa *a* es superada por todas las demás e indica debilidad, tanto menor sea será peor la alternativa, con éstos datos se puede construir la gráfica característica de PROMETHEE I en Visual Promethee [72] donde a la izquierda se encuentran los flujos positivos de cada alternativa *a*, que se enfrenta a las otras (n-1) alternativas en *g* criterios en el flujo negativo de la derecha [29]:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x\epsilon A} \pi(a,x);\ \phi^-(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x\epsilon A} \pi(x,a) \quad (2)$$

El PROMETHEE I realiza la clasificación parcial (P^I, I^I, R^I) a partir de los ***flujos de outranking positivos y negativos***, las cuales no suelen inducir a las mismas clasificaciones en la intersección; por tanto no decidirá qué acción es la mejor en estos casos, la responsabilidad será entonces de quien toma las decisiones [29].

$$\begin{cases} aP^I b \iff \begin{cases}\phi^+(a) > \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) < \phi^-(b), \vee \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) < \phi^-(b), \vee \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) = \phi^-(b);\end{cases} \\ aI^I b \iff \phi^+(a) = \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) = \phi^-(b); \\ aR^I b \iff \begin{cases}\phi^+(a) > \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) > \phi^-(b), \vee \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \wedge \phi^-(a) < \phi^-(b)\end{cases}\end{cases}$$

Donde P^I, I^I, R^I, son la preferencia, la indiferencia y la incomparabilidad. Cuando $aP^I b$, existe una alta capacidad de *a*, que es asociada a una debilidad menor de *a* con respecto a *b*. Cuando ambos flujos outranking son constantes, se pueden considerar como seguros. Cuando $aI^I b$ es porque los flujos positivos y negativos son iguales. Cuando $aR^I b$ existe una alta capacidad de una alternativa que está asociada a la baja debilidad de la otra, esto sucede a menudo cuando *a* es bueno en una serie de criterios sobre los que *b* es débil, e inversa, *b* es bueno en algunos otros criterios en los que *a* es débil. En tal caso, la información proporcionada por ambos flujos no es consistente, por tanto es razonable tener cuidado y tener en cuenta que las dos alternativas son incomparables [29].

2.5. El PROMETHEE II

El PROMETHEE II permite calcular el flujo total que (P^{II}, I^{II}) pueda ser comparado con una función de utilidad en la clasificación completa y absoluta del flujo neto outranking [29], considerado como $\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$. Cuanto mayor sea el **flujo neto** mejor será la alternativa [29], de modo que para los conjuntos $aP^{II}b \iff \phi(a) > \phi(b),\ aI^{II}b \iff \phi(a) = \phi(b),$ En el PROMETHEE II, todas las alternativas son comparables, no hay incomparabilidades, pero la información resultante puede ser discutible, debido a que más información se pierde por

la diferencia de flujos [29], y las siguientes propiedades se mantienen: $\begin{cases} -1 \leq \phi(a) \leq 1 \\ \sum_{x \epsilon A} \phi(a) = 0 \end{cases}$. Cuando el *flujo neto* de *a* es mayor que cero, por tanto es el mejor rankeado que todas las alternativas sobre todos los criterios, mientras que cuando el flujo neto de *a* es menor que cero, éste es el más superado.

De acuerdo con la definición de los flujos de outranking positivos y negativos y de los índices de preferencias agregados PROMETHEE I, se tiene: $\phi(a) = \phi^{+}(a) - \phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{k} \sum_{x \epsilon A} [P_j(a,x) - P_j(x,a)] w_j$; por consiguiente, $\phi(a) = \sum_{j=1}^{k} \phi_j(a) w_j$; siendo, $\phi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \epsilon A} [P_j(a,x) - P_j(x,a)]$. $\phi_j(a)$ es el *flujo neto*, que es obtenido cuando se considera un único criterio con el 100% del peso total, este expresa cómo una alternativa *a* supera $(\phi_j(a) > 0)$ o es superada $(\phi_j(a) < 0)$ por todas las otras alternativas del criterio $g_j(.)$. El perfil de una alternativa consiste en el conjunto de todos los flujos netos de los criterios únicos: $\phi_j(a)$, $j = 1,2, \dots, k$.

Los perfiles de las alternativas son particularmente útiles para apreciar la "calidad" de los diferentes criterios, y es ampliamente utilizado por los tomadores de decisiones. De acuerdo con $\phi(a) = \sum_{j=1}^{k} \phi_j(a) w_j$, se observa que el flujo neto global de una alternativa es el producto escalar entre el vector de los pesos y el vector de perfil de esta alternativa, propiedad que se utiliza ampliamente en la construcción hasta el plano GAIA.

2.6. El plano GAIA (Geometrical Analisis for Interactive Aid)

El plano GAIA es un modelo de meta (un modelo de un modelo), que utiliza la técnica de *análisis de componentes principales* [73] en éste se definen dos vectores propios que corresponden a los dos mayores valores de la matriz de covarianza M'M, M(nxk), de los flujos netos del criterio único; generando el δ, que indica la cantidad de la información conservada por el plano GAIA. Cuando δ es mayor que 70% significa que la información proporcionada es confiable y ayuda a entender la estructura de un problema multicriterio [29, 35].

La siguiente tabla presenta los flujos netos de un criterio único para todas las alternativas con: $\phi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \epsilon A} [P_j(a,x) - P_j(x,a)]$. la ecuación muestra que la información es más amplia que la *matriz de evaluación multicriterio*, debido a que en ésta se tienen en cuenta el grado de preferencia de los criterios generalizados. Mientras que el criterio $g_j(a)$, es expresado sobre su propia escala, los $\phi_j(a_i)$ son adimensionales y como se observa la matriz no está en función de los pesos de los criterios [29].

Tabla 2
Red Flujo neto con criterio único

$\boldsymbol{a}$	$\boldsymbol{\phi_1(.)}$	$\boldsymbol{\phi_2(.)}$	...	$\boldsymbol{\phi_j(.)}$	...	$\boldsymbol{\phi_k(.)}$
a_1	$\phi_1(a_1$	$\phi_2(a_1)$	...	$\phi_j(a_1$	...	$\phi_k(a_1)$
a_2	$\phi_1(a_2$	$\phi_2(a_2)$	...	$\phi_j(a_2$	...	$\phi_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
a_i	$\phi_1(a_i$	$\phi_2(a_i)$	...	$\phi_j(a_i$	...	$\phi_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
a_n	$\phi_1(a_n$	$\phi_2(a_n)$	...	$\phi_j(a_n$	...	$\phi_k(a_n)$

Fuente. [29]

Con la matriz, se construye el plano GAIA, que busca conservar la mayor cantidad de información posible, debido a que el conjunto de *n* alternativas son representadas como una nube de *n* puntos en un espacio k-dimensional. Sin embargo, la proyección de las alternativas (puntos) y los criterios (ejes de vectores unitarios) hace que la visión de algunos datos se pueda perder, debido a que la nube está centrada en el origen y a medida que el número de criterios sea mayor que dos, es imposible obtener una visión clara de la posición relativa de los puntos con respecto a los criterios [29]. En el plano GAIA, $(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n)$, son las proyecciones de los *n* puntos que representan las alternativas, mientras que $(C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_k)$ son las proyecciones de los k vectores unitarios de los ejes de coordenadas R^k representando los criterios. [29]:

El plano GAIA incluye sólo un porcentaje del total de información, capacidad de discriminación de los criterios, los aspectos conflictivos, la "calidad" de cada alternativa sobre los distintos criterios. GAIA proporciona una potente

herramienta de visualización gráfica para el análisis de un problema multicriterio, siempre que sea δ lo suficientemente alto, se cumplen las siguientes propiedades [29]:

a. El largo de los ejes de un criterio en el plano GAIA indica su nivel de discriminación.
b. Los criterios que expresan preferencias similares están aproximadamente orientados hacia la misma dirección.
c. Los criterios con preferencias opuestas o en conflicto están orientados en direcciones opuestas.
d. Los criterios que no están relacionados en términos de preferencias están representados por ejes ortogonales.
e. Las alternativas similares están representadas por puntos situados cerca el uno del otro.
f. Las alternativas buenas en un criterio particular están representadas por puntos situados en la dirección del eje del criterio correspondiente.

2.7. El impacto de los pesos en el GAIA

El impacto de los pesos en el plano GAIA está representado en un vector R^k. El flujo neto PROMETHEE II de una alternativa a_i es el producto escalar entre el vector de sus flujos netos de criterio único a_i: $\left(\phi_1(a_i), \phi_2(a_i), \dots, \phi_j(a_i), \dots, \phi_k(a_i)\right)$ y el vector de los pesos w: $\left(w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_k\right)$, por tanto el flujo neto PROMETHEE II de a_i es su proyección sobre el vector *w*; por consiguiente las posiciones relativas de las proyecciones de todas las alternativas sobre *w* son las ofrecidas por el ranking PROMETHEE II [29].

El vector *w*, representa en el plano GAIA la proyección del vector unitario de pesos, π es llamado el eje de decisión PROMETHEE y las alternativas recomendadas se encuentran en su dirección. Si todos los pesos se concentran en un criterio π coincidirá con el eje de este criterio en el plano GAIA, ambos ejes son entonces la proyección de una unidad de vector de coordenadas de R^k. Cuando los pesos se distribuyen en todos los criterios, el eje π aparece como una resultante ponderado de todos los ejes criterio $\left(C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_k\right)$ [29].

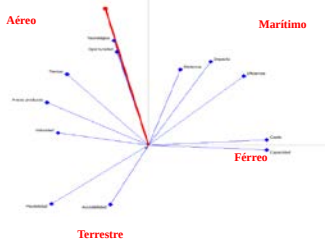
Si π es largo, existe un fuerte poder de decisión para seleccionar las alternativas en esa dirección. Si es corto, no tiene gran poder de decisión. Esto significa que, de acuerdo con los pesos, los criterios pueden ser fuertemente contradictorios y que la selección de una buena alternativa es un problema difícil de resolver [29].

Con lo anterior, la herramienta del análisis de sensibilidad, sirve para simular la toma de decisiones de problemas multicriterio y permite pivotar con diferentes distribuciones de peso, la barra de decisión PROMETHEE sobre el plano GAIA. Cuando se modifican los pesos, las posiciones de las alternativas y de los criterios se mantienen sin cambios en el plano GAIA, pero el vector *w* es como una barra de decisión que puede moverse según las preferencias del tomador de decisiones por determinados criterios [29], ver Figura 12.

3. Metodología para la selección de transportadores

Para validar la metodología se plantea éste estudio caso para la selección de transportadores, el cual tiene una implicación económica importante para Colombia, debido al nivel de ingresos económicos que aporta al país. Hasta el momento es una cercana y clara representación del concepto de CS del Café Verde en Colombia debido a que las unidades productivas denominadas fincas productoras de café venden en diferentes presentaciones a la Cooperativa Nacional de Cafeteros (CNC) y/o

Figura 2 Grafica GAIA para criterios de selección para transportadores de cualquier Modo de Transporte (MT)



Fuente. Los autores en VPROMETHEE

Federación Nacional del Café (FNC), los que estratégicamente son los responsables de la distribución nacional e internacional de la demanda de café de acuerdo a las políticas públicas formuladas por el estado para proteger el precio del café y el mercado.

La CS de Café Verde, tiene clientes potenciales en diferentes países a nivel mundial: Estados Unidos, Rusia, Francia, Japón, Antillas Holandesas, España, Noruega y Unión Europea. La CS caso de estudio exporta hacia varios lugares en el mundo y está compuesta por 14 empresas del sector; su Centro de Distribución está ubicado en la ciudad de Armenia (Colombia), departamento integrante de la región cafetera por sus condiciones climáticas y de suelo, que permiten el crecimiento de grano con altos estándares de calidad, haciendo del departamento de Quindío (Colombia) uno de los que registra mayores rendimientos del grano con 1,1 Toneladas Métricas por Hectárea (Tm/Ha).

Una estrategia táctica para la de integración en la recolección y distribución regional de la CS de Café Verde en Colombia es la selección de STT con base en criterios adecuados al contexto colombiano. Para lo cual, se utilizan los descritos en la Red de Decision Multicriterio (MCDN) para la CS [6, 20] y se proponen a continuación los específicos para el STT.

3.1. Criterios de selección de transportadores en el STT

Trujillo et al. (2015) en la Red de Decisión Multi Criterio por sus siglas en inglés Multi Criteria Decision Network (MCDN), ha propuesto los criterios de selección de los transportadores y modos de transporte [20],[6], los cuales han sido contrastados en un pre-estudio para éste artículo bajo una Gráfica de Análisis Geométrico Interactivo en sus siglas en inglés GAIA (Geometrical Analisis for Interactive Aid), como se presenta en la siguiente figura. Cada cuadrante tiene un modo y el conjunto de criterios cercanos describen el comportamiento del modo, p.e. si se desea buscar un mínimo costo y capacidad la combinación multimodal de transporte estaría entre marítimo y férreo.

La *accesibilidad* es una variable exógena y pública en el STT que incluye infraestructura, terminales y vías en la extensión geográfica de un territorio, por tanto para zonas urbanas es adecuado debido a que no tiene vías fijas dedicadas, a diferencia de los otros modos de transporte [16, 17] [74], por tanto los otros siempre necesitan de los vehículos de motor llamados también “coordinadores universales” [17, 20] para entregar en zonas urbanas por su facilidad trasbordo del equipo de consolidación.

En la definición del concepto nivel de servicio algunos autores hablan de “nivel de franqueza” [75]. El *nivel de servicio* de un transportador es un indicador de competitividad intramodal e intermodal asignado a los transportadores que agrega los criterios que implican el cumplimiento de la demanda y de los requisitos de calidad del servicio de trasporte [17, 76]. Los criterios que agrega el nivel de servicio son: *oportunidad, flexibilidad, costo, productividad o eficiencia y tecnología.*

Oportunidad de un transportador depende internamente de: a) la velocidad intrínseca del modo de transporte y la planeación operativa de las entregas [17]; b) del manejo que además implica la cantidad en peso y volumen, el tipo de mercancía y la complejidad de la consolidación; y c) por último, la *accesibilidad* en vías no depende del transportador [17, 20] la oportunidad se ve afectada por la dinámica de movilidad y la infraestructura física de acceso [77]. El STT es muy *confiable* y moviliza mercancías a una *velocidad* aceptable de 95 km/h aprox. [16, 76], pero ésta depende directamente de los otros modos de forma directa y viceversa, así, p.e. la velocidad del modo aéreo depende la velocidad del STT, que es conveniente para distancias menores de 804,7 kilómetros [17].

Flexibilidad de un transportador depende directamente de la inversión que éste haga en infraestructura, equipos de arrastre y terminales, pero además de la *accesibilidad* terrestre desde el punto de origen al de destino, que implica la cantidad y el estado de las vías de transporte [17, 20], la diversidad del servicio y el bienestar de los transportadores p.e. obteniendo ofertas en restaurantes y hoteles, el almacenamiento de vehículos en distancias largas, etc. [17, 76].

Costo: El STT agrega el costo de cargue, descargue, manejo, seguro, transporte e imprevistos que dependen del tipo de mercancía, la capacidad del equipo de consolidación, la distancia y la complejidad en la operación [13]. En términos del empaque y embalaje el STT es más económico que el transporte férreo y acuático. El STT no considera la inversión en carreteras porque por lo general son públicas y los transportadores pagan únicamente los derechos de paso; p.e. en el caso del transporte interurbano los costos variables de operar un tractor remolque son del 80% y el 20% son los costos fijos [17]. Con lo anterior, la estructura de los costos del STT está conformada por:

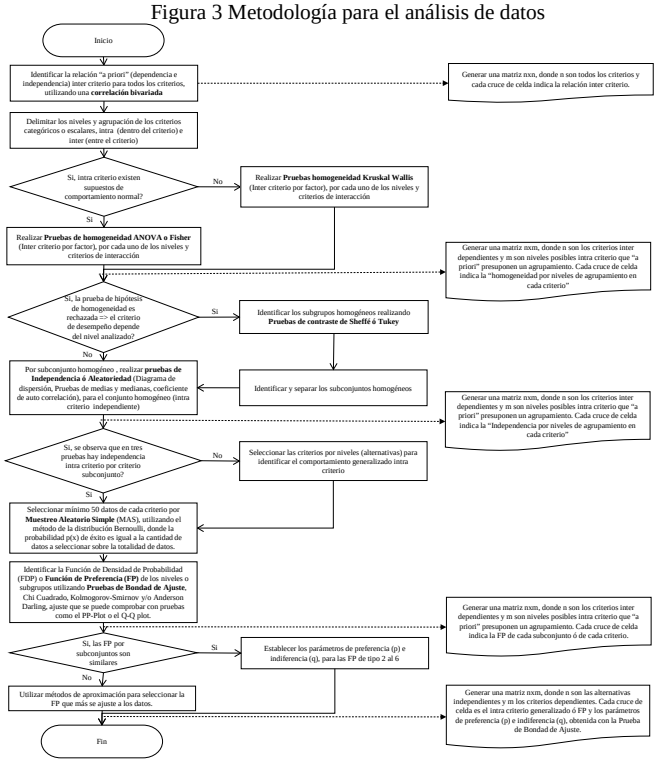
a) *costos variables* altos que están entre el 70% al 90% aprox. de los cuales la mayor parte son mano de obra y combustible influenciados por la demanda estacional [17, 76]. El costo variable por *manejo* o manipulación en STT puede reducirse cuando se manejan varios equipos de consolidación como p.e remolques, contenedores, camiones, vagones, etc. que buscan eliminar el tiempo de cargue, descargue, consolidación y recolección [17] en combinaciones intramodales, intermodales o multimodales, p.e. los LTL tienen costos altos de manipulación [17]

b) *costos fijos* bajos del 10% al 30% aprox., que están asociados al equipo que es el activo más importante, los intereses y depreciación del vehículo, de los terminales, de garajes y oficinas y servicios públicos. Los costos fijos de los transportadores TL son bajos porque las inversiones en terminales son pocas debido a que no se dedican a la consolidación de carga pero los LTL si [17].

Productividad y/o eficiencia: los transportadores del STT invierten en la infraestructura necesaria para mejorar la eficiencia operativa a fin de mejorar la operación y obtener menores costos y mayores ingresos, contratando personal entrenado y capacitado en servicio al cliente [16]. Un ejemplo de ésta variable puede ser calculado por la cantidad resultado de una operación/recursos (tiempo, mano de obra, maquinaria, infraestructura, capital)

Tecnológico: El uso de la tecnología de satélites ha tenido un impacto importante en la industria de transporte terrestre; los clientes y transportadores con la tecnología de posicionamiento global (GPS) en los vehículos, utilizan los satélites para hacer seguimiento, observar la ubicación y el movimiento de los vehículos desde el origen al destino, observar las condiciones climáticas y los problemas en las vías previamente. Algunos LTL, utilizan el internet para retroalimentar el estado y ubicación de las mercancías a los cliente [17, 78] p.e. STT para correo o paqueteo. Para la *seguridad* en el STT se han desarrollado sistemas informáticos y de comunicaciones para el rastreo de los vehículos y de las mercancías con el fin de ofertar un servicio más seguro y eficiente [16] y con alto nivel de servicio, sin embargo el STT tiene menores indicadores de daño de mercancías que el férreo y el acuático [17]. La s*eguridad* y el *precio del producto* se asocian directamente al *riesgo* de transporte, por tanto cuando el precio de un producto es alto el riesgo por tanto la seguridad debería ser alta [20].

Figura 3 Metodología para el análisis de datos



Fuente. Los autores con base en [7, 79, 80]

3.2. Análisis estadístico de criterios y parametrización del PROMETHEE

El comportamiento de los datos intra criterio que es uno de los procedimientos para generalizar la función de preferencia, los parámetros y umbrales de la forma $\{g_j(.), P_j(a,b)\}$**,** bajo seis tipos de funciones de preferencia empíricamente definidas en la literatura (ver tabla siguiente), sin embargo se pueden utilizar otras adicionales matemáticamente viables [29, 68]. El análisis de datos y la definición se hace bajo la metodología en la figura 3.

3.3. Elaboración de la Matriz de Evaluación Multi Criterio (MEMC)

Para la construcción de la MEMC se pueden analizar los datos estadísticamente o simplemente construirla de forma directa bajo una escala de valoración de unidades irreductible cualitativa denominada Likert, la cual estratifica la evaluación de cada alternativa [15]. En una escala de valoración cualitativa de nueve puntos las unidades de medida son: Muy bajo (1), bajo (3), aceptable (5), alto (7), muy alto (9), con valores intermedios de 2, 4, 6 y 8. Y cuando se necesitan comparar dos elementos cercanos se usan medidas intraescalares decimales como p.e. 1.1, 2.8, etc. [16, 81, 82].

Tabla 3
Matriz de evaluación multicriterio

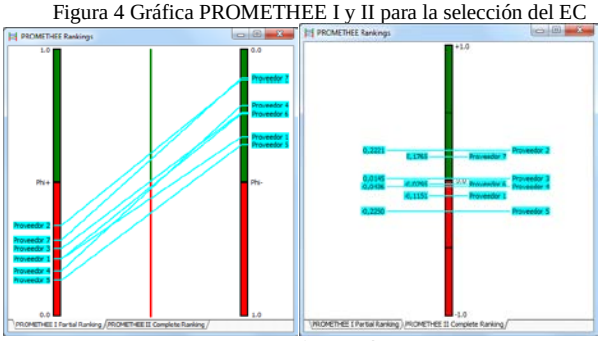
$g_k(a_n)$	$g_1(.)$	$g_2(.)$	$g_3(.)$	$g_4(.)$	$g_5(.)$	$g_6(.)$
Criterio g_j	Nivel de servicio	Oportunidad	Flexibilidad	Costo	Eficiencia	Tecnológico
Objetivo del criterio	Maximizar	Maximizar	Maximizar	Minimizar	Maximizar	Minimizar
Peso del criterio w_k	2	1	1	1	1	1
Función de Preferencia (FP)	Usual	Tipo U	Nivel	Gaussiano	Nivel	Tipo U
Desviación estándar poblacional	1	1	1	5.624	3	2
Alternativas a_i Transportador	Likert 1-5 puntos	Likert 1-5 puntos	Likert 1-5 puntos		Likert 1-9 puntos	Likert 1-9 puntos
1	3	1	3	24.989	8	4
2	5	3	1	14.567	2	6
3	2	2	3	9.083	8	7
4	4	4	2	23.458	7	5
5	1	5	4	12.455	5	5
6	4	1	5	15.998	1	2
7	4	3	2	11.255	7	8

Fuente. Los autores

4. Resultados

Para las corridas PROMETHEE I y II se utilizó el Software Visual PROMETHEE. Y los resultados que se presentan en la figura 4 en la parte izquierda: es que el transportador 2 y 7 son incomparables entre sí, pero son los "mejores", luego siguen los transportadores 3, 6 y 4 que al igual son incomparables entre sí por el cruce de líneas; los dos siguientes son el 1 y el 4 por último 5 que no es incomparable. La selección adecuada se realiza teniendo en cuenta el PROMETHEE 2 (ver figura gráfica 4, derecha). Por tanto, el orden jerárquico de selección para los transportadores es como sigue: transportador 2, 7, 3, 2, 6, 4, 1 y 5.

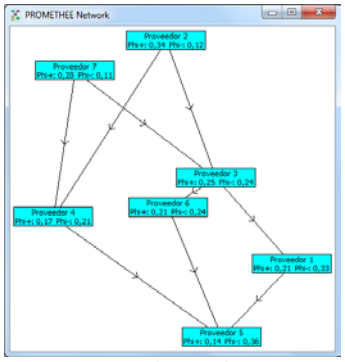
Figura 4 Gráfica PROMETHEE I y II para la selección del EC



Fuente. VP V1.3. con información de los autores

Tanto los PROMETHEE I y II, como la red PROMETHEE y GAIA de la figura 5 ayudan a tomar decisiones sustentadas científicamente. Por tanto, tomando la red en la gráfica 5 se concluye que el transportador 2 y el 7 son los mejores porque dominan o superan los criterios de selección de los transportadores 4 y 3. El transportador 3 domina al 6 y por último el 1, 4 y 6 dominan al transportador

Figura 5 Gráfica de Red PROMETHEE I



Fuente. VP V1.3. con información de los autores

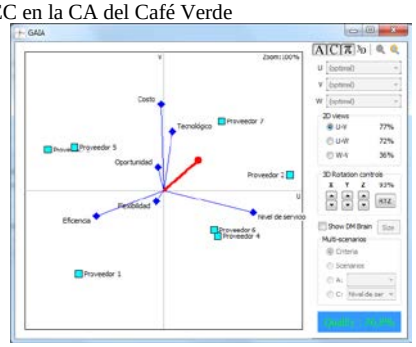
GAIA es una gráfica discriminante que en éste caso de estudio permite caracterizar y visualizar los transportadores de acuerdo a sus criterios intrínsecos de servicio; la gráfica se basa en el principio de componentes principales; se divide en cuatro cuadrantes donde cada uno de los proveedores similares están cercanos y alrededor de los criterios que los caracterizan. La calidad del modelo en la figura 6, es del 76%, y es aceptada porque supera el 70% recomendada en la revisión de la literatura. Éste porcentaje está influido por el criterio costo debido a que es el crítico de la problemática y tiene el peso más alto para la selección de transportadores en la CS de café verde.

El perfil tecnológico en la gráfica GAIA, lo tienen los transportadores 2 y 7 como se muestra en el cuadrante I de la figura 6. El cuadrante 2, muestra que los transportadores más *oportunos* y con *costos mínimos* son el 3 y el 5. El transportador 1, es el de perfil más eficientes y flexible. Los de mejor nivel de servicio son el transportador 4 y 6. Los criterios en conflicto son el tecnológico y la flexibilidad, debido a que está opuesto uno al otro.

Figura 6 Gráfica GAIA para la selección del EC en la CA del Café Verde

II I

III VI



Fuente. VP V1.3. con información de los autores

La decisión de la CS de café verde es seleccionar al transportador 2, debido a que el eje de decisión PROMETHEE tiene una longitud adecuada y está orientado hacia el primer cuadrante. Se presume por la cercanía del transportador 2 al criterio nivel de servicio, que su servicio es adecuado. Si en dado caso la contratación con el transportador 2, no se da; el siguiente adecuado a la problemática es el proveedor 7.

5. Conclusiones

- Los criterios propuestos para el STT en éste artículo son construidos bajo los supuestos de la MCDN, red de criterios que permite identificar la dependencia e interrelación de los criterios [20] en la FLT, los cuales surgen de la revisión de la literatura como una necesidad de estandarizar para los tomadores de decisiones los criterios de selección de modos de transporte, transportadores y grados de consolidación.
- En éste artículo se propone una metodología, después de la revisión en la literatura realizada alrededor de la técnica PROMETHEE. En la cual se encuentra que la mayor utilización es en la localización de instalaciones e infraestructura de transporte como p.e. vías y terminales. Ésta metodología aporta al estado del arte para coayudar a los tomadores de decisiones con herramientas estructuradas para la complejidad en la FLT.
- Es en este enfoque positivista recae el aporte de este artículo, a la ayuda al proceso de priorización, selección y caracterización de las decisiones de transporte especialmente en STT; debido a que en su gran mayoría son tomadas con base en el costo sin tener en cuenta otros criterios importantes para maximizar el nivel de servicio. Los tomadores de decisiones utilizan en la FLT enfoques “blandos” como el plan maestro, el método del actor racional, el gradual, el de negociación o por grupo de toma de decisiones, sin embargo éstos métodos no dan al usuario un marco general para el análisis del problema, a lo cual existen aproximaciones rigurosas basadas en la investigación de operaciones y la teoría de la decisión que han mostrado su valor especialmente en los contextos tácticos y operativos y que se conciernen a la FLT, una muestra es la metodología en éste artículo desarrollada.
- Es confuso para los tomadores de decisiones cuando seleccionan transportadores debido a que ésta problemática se ubica en el servicio, mientras que la selección del modo de transporte y la consolidación se tiene en cuenta la infraestructura, la UC y la UA, objeto de ésta investigación.
- Los criterios de la MCDN deben ser utilizados de forma agregada o desagregada, al igual que los propuestos en ésta investigación para la STT, el lector podría adicionar otros que considere importantes para una CS a estudio.
- El uso del plano GAIA, le sirve al tomador de decisiones para perfilar y discriminar la utilización y necesidad de más o menos criterios en el momento de hacer la clasificación, ordenamiento y selección de alternativas.

- Con la MCDA PROMETHEE, se pueden generar políticas de gestión para cualquier proceso (comercial, productivo, administrativo, logístico, etc.) para cualquier tipo de organización, con el fin de generar perfiles de gestión y estrategias de mejor desempeño. Para el caso, en la Función Logística de Transporte se demostró que los criterios encontrados en el estado del arte se pueden replicar a cualquier tipo de organización, la metodología de decisión es la misma.
- Es recomendable que el tomador de decisiones haga un análisis de sensibilidad utilizando la gráfica GAIA, con diferentes pesos de los criterios MCDN.

6. Perspectivas de investigación futura

- Replicar la metodología planteada en éste documento, para ampliar la aplicación de la MCDN para la toma de decisiones de Consolidación, Mezcla de Flota de Transporte, Asignación de Vehículos, Enrutamiento y Programación de Vehículos y Planes de Carga.
- Se espera que los criterios de utilizados de la MCDN para la STT, se utilicen y validen en otros contextos o CS para la toma de decisiones, combinándolos con otros métodos, técnicas, modelos o metodologías.
- El planteamiento de la nomenclatura para modos y transportadores y la metodología de toma de decisiones con PROMETHEE, pero se espera que la MCDN, difusas para la toma de decisiones como el AHP, el ELECTRE y el PROMETHEE encontradas en la literatura y posteriormente hacer análisis de sensibilidad o de cerebro humano [29]

7. Agradecimientos

Agradecemos a la Fundación Universitaria Cafam por el financiamiento de éste proyecto de investigación y al programa de Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla por los aportes científicos al mismo.

8. Referencias

[1] F. Astals Coma, *Almacenaje, manutención y trasporte interno en la industria*: Ediciones de la Universitat Politecnica de Catalunya, 2009.
[2] A. M. Bewer, K. o. Button, and D. A. Hensher, "Handbook of Logistics and Supply-Chain Management," *Handbook in Transport PERGAMON*, vol. 2, p. 218, 2001.
[3] H. Runhaar and R. van der Heijden, "Public policy intervention in freight transport costs: effects on printed media logistics in the Netherlands," *Transport Policy*, vol. 12, pp. 35-46, 2005.
[4] A. S. Bergantino, M. Bierlaire, M. Catalano, M. Migliore, and S. Amoroso, "Taste heterogeneity and latent preferences in the choice behaviour of freight transport operators," *Transport Policy*, vol. 30, pp. 77-91, 2013.
[5] M. Browne, J. Allen, T. Nemoto, D. Patier, and J. Visser, "Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 19-33, 2012.
[6] J. Trujillo, A. Velasquez, R. Martínez, H. Bolivar, J. Vallejo, and J. Perez, "Methodology for decisions making in transportation logistics function, for Supply Chain (SC) colombian green coffee study," in *International* Dubai, United Arab Emirates, 2015.
[7] J. Trujillo, E. Gonzalez, and A. Velasquez, "Hybrid model for making Tactical and Operational decisions in land transportation for the case of a perishable Supply Chain," in *2nd International Symposium (1963-2013 - 50th Anniversary) - 24th National Conference on Operational Research; Hellenic Operational Research Society (HELORS)*, Athens, Greece, 2013, pp. 66-80.
[8] D. J. Bowersox, D. J. Closs, and M. B. Cooper, *Administración y Logística en la Cadena de Suministros*: McGraw Hill, 2007.
[9] R. H. Ballou, *Logistica Administración de la Cadena de Suministro* vol. 5ta Edición. Mexico, 2004.
[10] C. Nguyen, M. Dessouky, and A. Toriello, "Consolidation strategies for the delivery of perishable products," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 69, pp. 108-121, 2014.
[11] P. Nijkamp, A. Reggiani, and S. Bolis, "European freight transport and the environment: empirical applications and scenarios," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, pp. 233-244, 1997.
[12] A. Reggiani, S. Cattaneo, M. Janic, and P. Nijkamp, "FREIGHT TRANSPORT IN EUROPE: Policy Issues and Future Scenarios on Trans-Border Alpine Connections," *IATSS Research*, vol. 24, pp. 48-59, 2000.
[13] A. Velasquez, J. Trujillo, C. Franco, and H. Bolivar, "Measure Characterization of a Complex System Logistics," in *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)*, Salerno (Italy), 2014, pp. 504-508.
[14] J. H. Banks, *Transportation Planning*, 2 ed. USA: Mc Graw Hill, 2002.
[15] J. Khisty C. and L. Kent B., *Transportation Engineering: an introduction*, 2nd ed. New Yersey: Prentice Hall, 1998.
[16] L. A. Mora García, *Gestión logística integral las mejores prácticas en la cadena de abastecimientos*. Bogotá D.C.: Ecoe, 2008.
[17] E. J. Bardi, J. J. Coyle, and R. A. Novack, *Management of transportation* Thomson/South-Western, 2006.
[18] J. F. Campbell, "Strategic Network Design for Motor Carriers," ed, 2005.
[19] T. Crainic, "Long-Haul Freight Transportation," in *Handbook of Transportation Science*. vol. 56, R. W. Hall, Ed., ed: Springer US, 2003, pp. 451-516.
[20] J. Trujillo, A. Velasquez, M. Martinez, H. Bolivar, C. Franco, and J. Perez, "Criteria for decision-making in transportation logistics function," in *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM) 2015*, Dubai, United Arab Emirates, 2015, pp. 1-6.
[21] D. M. Lambert, J. R. Stock, and L. M. Ellram, *Fundamentals of Logistics Management*: Mc Graw Hill Higher Education, 1998.
[22] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management Strategy, Planning and Operation*, 3ra Edición ed., 2010.

[23] M. Lindholm, "How Local Authority Decision Makers Address Freight Transport in the Urban Area," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 134-145, 2012.
[24] T. Kohonen, "Self-organized formation of topologically correct feature maps," *Biological Cybernetics*, vol. 43, pp. 59-69, 1985.
[25] D. Blanchard, "Transportation: Logistics a la Mode," in *Supply Chain Management Best Practices*, ed USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 103-119.
[26] A. Bufardi, R. Gheorghe, and P. Xirouchakis, "Fuzzy Outranking Methods: Recent Developments," in *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making*, C. Kahraman, Ed., ed: Springer Science, 2008.
[27] G. d. l. N. Sanchez Guerrero, "La técnica Electré," in *Técnicas participativas para la planeación*, ed. Mexico, 2003, pp. 183-196.
[28] J. Figueira, V. Mousseau, and B. Roy, "Electre Methods," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, Eds., ed New York, United States of America: Springer Science+Business Media, 2005, pp. 133-153.
[29] J.-P. Brans and B. Mareschal, "Promethee Methods," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. vol. 78, J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, Eds., ed New York, United States of America: Springer Science+Business Media, 2005, pp. 163-186.
[30] J. P. Brans, P. Vincke, and B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: The Promethee method," *European Journal of Operational Research*, vol. 24, pp. 228-238, 1986.
[31] B. Mareschal and J.-P. Brans, "Geometrical representations for MCDA," *European Journal of Operational Research*, vol. 34, pp. 69-77, 1988.
[32] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, "PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 200, pp. 198-215, 2010.
[33] Y.-H. Chen, T.-C. Wang, and C.-Y. Wu. (2011) Strategic decisions using the fuzzy PROMETHEE for IS outsourcing. *ScienceDirect*. 2.
[34] S. Corrent, S. Greco, and R. Sowinski. (2012) Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE. *ScienceDirect*.
[35] B. Mareschal. (2013, Abril 1 de 2013). *Visual PROMETHEE 1.3 Manual (1.3 ed.)*. Available: http://www.promethee-gaia.net/files/VPManual.pdf
[36] C. Araz and I. Ozkarahan, "Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multicriteria sorting procedure," *International Journal of Production Economics*, vol. 106, pp. 585-606, 2007.
[37] J. P. Brans and B. Mareschal, "The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid," *Decision Support Systems*, vol. 12, pp. 297-310, 1994.
[38] X. Yu, Z. Xu, and Y. Ma. (2013) Prioritized Multi-Criteria Decision Making. *ScienceDirect*.
[39] J. P. Brans, "L'ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE," in *L'aide a la Décision: Nature, Instruments et Perspectives d'avenir*, R. Nadeau, Landry, M, Ed., ed. Québec, Canada: Presses de l'Université Laval, 1982, pp. 183-214.
[40] Y.-C. Hu and C.-J. Chen. (2011) A PROMETHEE-based classification method using concordance. *ScienceDirect*.
[41] R. Dulmin and V. Mininno, "Supplier selection using a multi-criteria decision aid method," *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 9, pp. 177-187, 2003.
[42] K. Lidouh, Y. De Smet, and E. Zimányi, "GAIA Map: A tool for visual ranking analysis in spatial multicriteria problems," in *Information Visualisation, 2009 13th International Conference*, 2009, pp. 393-402.
[43] Y. Peng, Y. Zhang, G. Kou, J. Li, and Y. Shi. (2012) Multicriteria decision making approach for cluster validation. *ScienceDirect*.
[44] A. Raveh, "Co-plot: A graphic display method for geometrical representations of MCDM," *European Journal of Operational Research*, vol. 125, pp. 670-678, 2000.
[45] Y. Bai, D. Zhou, P. Zhou, and L. Zhang. (2012) Optimal path for China's strategic petroleum. *ScienceDirect*.
[46] M. Tavana, M. Behzadian, M. Pirdashti, and H. Pirdashti. (2012) A PROMETHEE-GDSS for oil and gas pipeline planning in the Caspian Sea basin. *ScienceDirect*.
[47] G. Kabir and R. Sultana. (2014) Power substation location selection using fuzzy analytic hierarchy process and PROMETHEE: Acase study from Bangladesh. *ScienceDirect*.
[48] R. Vetschera and A. Teixeira. (2011) A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. *ScienceDirect*.
[49] Z. Ribarović and N. Mladineo, "Application of multicriterional analysis to the ranking and evaluation of the investment programmes in the ready mixed concrete industry," *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 12, pp. 367-374, 1987.
[50] R. Maciel, D. Dumke, and A. Teixeira. (2015) A multicriteria model for ranking of improvement approaches in construction companies based on the PROMETHÉE II method. *ScienceDirect*.
[51] J. Karkazis, "Facilities location in a competitive environment: A promethee based multiple criteria analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 42, pp. 294-304, 1989.
[52] B. Mareschal and J. P. Brans, "PROMETHEE V: MCDM problems with segmentation constraints," *INFOR Journal*, vol. 30, pp. 85-96, 1992.
[53] A. S. Fernández Castro and M. Jiménez, "PROMETHEE: an extension through fuzzy mathematical programming," *Journal of the Operational Research Society* vol. 56, pp. 119-122, 2004.
[54] I. Pavić and Z. Babić, "The use of the PROMETHEE method in the location choice of a production system," *International Journal of Production Economics*, vol. 23, pp. 165-174, 1991.
[55] O. Marinoni, "A stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, pp. 51-68, 2005.
[56] J. C. Leyva López and E. Fernández González, "Un nuevo método para el apoyo de decisiones en grupo basado en la metodología ELECTRE III " *European Journal of Operational Research (EJOR)*, vol. 148, pp. 14-27, 2003.
[57] N. Mladineo, J. Margeta, J. P. Brans, and B. Mareschal, "Multicriteria ranking of alternative locations for small scale hydro plants," *European Journal of Operational Research*, vol. 31, pp. 215-222, 1987.
[58] H. Selcuk, S. Zaim, and D. Denle. (2014) Selecting ''The Best'' ERP system for SMEs using a combination of ANP and PROMETHEE methods. *ScienceDirect*.
[59] J.-J. Wang and D.-L. Yang, "Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing," *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 3691-3700, 2007.
[60] C. Araz, P. Mizrak Ozfirat, and I. Ozkarahan, "An integrated multicriteria decision-making methodology for outsourcing management," *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 3738-3756, 2007.
[61] I. Veza, S. Celar, and I. Peronia. (2014) Competences-based Comparison and Ranking of Industrial Enterprises using PROMETHEE Method. *ScienceDirect*.
[62] H. Kuang, M. Kilgour, and K. Hipel. (2014) Grey-based PROMETHEE II with application to evaluation of source water protection strategies. *ScienceDirect*.

[63] T. Amaral and A. Costa. (2013) Improving decision-making and management of hospital resources:An application of the PROMETHEE II method in an Emergency Department. *ScienceDirect*.
[64] K. Kourtit, C. Macharis, and P. Nijkamp. (2013) A multi-actor multi-criteria analysis of the performance of global. *ScienceDirect*.
[65] N. Mladineo, I. Lozić, S. Stošić, D. Mlinarić, and T. Radica, "An evaluation of multicriteria analysis for DSS in public policy decision," *European Journal of Operational Research*, vol. 61, pp. 219-229, 1992.
[66] D. Radojevic and S. Petrovic, "A fuzzy approach to preference structure in multicriteria ranking," *International Transactions in Operational Research*, vol. 4, pp. 419-430, 1997.
[67] G. Lu, H. Wang, and X. Mao, "Using ELECTRE TRI Outranking Method to Evaluate Trustworthy Software."
[68] P. Vincke, *Multicretia Decision-Aid*. Michigan: Wiley, 1992.
[69] J. Jablonsky. (2014) MS Excel based software support tools for decision problems with multiple criteria. *ScienceDirect*.
[70] A. Albadvi, S. Chaharsooghi, and A. Esfahanipour. (2007) Decision making in stock trading: An application of PROMETHEE. *European Journal of Operational Research*. 673-683.
[71] M. Hersh, *Mathematical Modelling for Sustainable Development*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
[72] B. Mareschal and Y. De Smet, "Visual PROMETHEE: Developments of the PROMETHEE & GAIA multicriteria decision aid methods," in *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1646-1649.
[73] C. P. Miranda, *Estadística multivariable*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
[74] S. ö. Behrends, "The Urban Context of Intermodal Road-Rail Transport – Threat or Opportunity for Modal Shift?," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 463-475, 2012.
[75] J. Woxenius, "Directness as a key performance indicator for freight transport chains," *Research in Transportation Economics*, vol. 36, pp. 63-72, 2012.
[76] J. T. Diaz, M. M. Rojas, C. F. Franco, A. T. V. Contreras, H. Bolivar, and J. F. P. Gonzalez, "Criteria for decision-making in transportation logistics function," in *Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1-6.
[77] M. Hesse, "Shipping news: the implications of electronic commerce for logistics and freight transport," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 36, pp. 211-240, 2002.
[78] J. Trujillo, V. Amador, and Othoniel, "Metodología Híbrida ANHEPROMAP para formular una Estrategia Tecnológica – Caso Sector Petroquímico Secundario de México," in *Aplicación del saber: casos y experiencias*, Villahermosa - Tabasco (México), 2015, pp. 2374 - 2381.
[79] A. Scarelli and L. Venzi, "Nonparametric statistics in multicriteria analysis," *Theory and Decision*, vol. 43, pp. 89-105, 1997/07/01 1997.
[80] J. Trujillo, J. Vallejo, and M. Becerra, "Methodology Call-Center's Simulation – Study Case," *Studiositas*, vol. 5, p. 125, Diciembre 2010.
[81] T. L. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, pp. 9-26, 1990.
[82] S. J. R. Rabbani and S. Rahnemay Rabbani, *Decisions in Transportation with the Analytic Hierarchy Process*. Brazil: UFPB/CCT, 1996.

Biografía

J. Trujillo-Díaz, Docente e Investigador de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Magistra en Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Estudiante de doctorado en de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP).
ORCID: 0000-0001-6243-6393; ReseacherID Thomson Reuters: M-9683-2013