

## Evaluación de la sustentabilidad de dos puentes emblemáticos y en construcción en una importante vía aérea usando la técnica Fuzzy Vikor: Un estudio de caso

S. Bansal<sup>\*1</sup>, A. Singh<sup>2</sup>, S. K. Singh<sup>1</sup>

\* Autor de Contacto: [bansal.shishir@gmail.com](mailto:bansal.shishir@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.171>

Recepción: 10/08/2016 | Aceptación: 12/19/2016 | Publicación: 31/01/2017

### RESUMEN

Dos proyectos de puentes emblemáticos sobre el río Yamuna en Delhi, en construcción, fueron evaluados a partir de criterios de sustentabilidad usando la técnica de Fuzzy-Vikor. El Proyecto de Vía Elevada de Barapulla fue considerado el más sustentable en comparación con el Proyecto Signature Bridge en términos de varios indicadores identificados durante el estudio. En general, los objetivos de proporcionar recursos sustentables son los de encontrar un equilibrio entre lo que es importante para la comunidad, para el ambiente natural y lo que es económicamente sólido. Durante el estudio, se percibe que lo social, lo económico y lo ambiental son los parámetros establecidos de sustentabilidad para los países desarrollados mientras que otras cuestiones como gobernanza, parámetros técnicos e Ingeniería interna también desempeñan un papel fundamental para economías en desarrollo como la India.

**Palabras clave:** sustentabilidad; Fuzzy-Vikor; gobernanza; parámetros técnicos; ingeniería interna.

**Citado como:** S. Bansal, A. Singh, S. K. Singh (2017), “Evaluación de la sustentabilidad de dos puentes emblemáticos y en construcción en una importante vía aérea usando la técnica Fuzzy Vikor: Un estudio de caso”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 1-14, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.171>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Delhi Technological University, Delhi, India.

<sup>2</sup>M.tech. (Environmental Engineering).

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

## **Sustainability evaluation of two iconic bridge corridors under construction using Fuzzy Vikor technique: A case study**

### **ABSTRACT**

Two iconic bridge projects over River Yamuna in Delhi under construction have been evaluated from sustainability criteria using Fuzzy-Vikor technique. The Barapulla Elevated road project was more found to be more sustainable in comparison to the Signature Bridge Project in terms of various indicators identified during the study. In general, the goals of providing sustainable features are finding a balance between what is important to the community, to the natural environment and is economically sound. During the study, it was realized that social, economic and environmental are the established parameters of sustainability for developed countries only whereas other issues like Governance, Technical parameters and Inner Engineering also play a key role for developing economies like India.

**Keywords:** sustainability; Fuzzy-Vikor; governance; technical parameters; inner engineering.

## **Avaliação de sustentabilidade de Duas pontes emblemáticas e em construção numa importante via aérea usando a técnica Fuzzy Vikor: Um estudo de caso**

### **RESUMO**

Dois projetos de pontes emblemáticas sobre o rio Yamuna em Delhi, em construção, foram avaliadas a partir de critérios de sustentabilidade usando a técnica de Fuzzy-Vikor. O Projeto de Via Elevada de Barapulla foi considerado o mais sustentável em comparação com o Projeto Signature Bridge em termos de vários indicadores identificados durante o estudo. Em geral, os objetivos de fornecer recursos sustentáveis são os de encontrar um equilíbrio entre o que é importante para a comunidade, para o ambiente natural e é economicamente sólido. Durante o estudo, percebe-se que o social, o econômico e o ambiental são os parâmetros estabelecidos de sustentabilidade para os países desenvolvidos enquanto outras questões como governança, parâmetros técnicos e engenharia interna também desempenham um papel fundamental para economias em desenvolvimento como a Índia.

**Palavras chave:** sustentabilidade; Fuzzy-Vikor; governança; parâmetros técnicos; engenharia interna

## **1. INTRODUCCIÓN**

La idea de la sustentabilidad há sido aceptada como una necesidad mundial y es más comúnmente entendida como "mejoría que aborda lós aspectos del presente sin afectar la capacidad en el futuro de resolver sus propios problemas". Esta idea se acerco a todos os sectores de la Ingeniería, envolviendo la construcción de estructuras de transporte.

El objetivo de esta investigación comienza con la representación del pensamiento eminente sobre lo que constituye la sustentabilidad de la estructura de transporte en médio del desarrollo y como ejecutarlo. Mas allá de ello, el estudio identifica algunos de los principales problemas de sustentabilidad del sistema de transporte a través da su construcción en ciudades metropolitanas como Delhi. En esta investigación, los indicadores de sustentabilidad de la via de transporte a través del desarrollo en un domínio urbano fueron notados y destacados. La investigación fué realizada sobre el Puente Signature, que está siendo construídn en el rio Yamuna por DTTDC (Delhi Corporação de Desarrollo de Turismo y Transportes Ltd.) y el Elevado Barapulla, proyecto construído por el PWD (Departamento de Obras Públicas). El estudio fué hecho en

ambos locales durante los respectivos períodos de construcción, y se verificó que la sustentabilidad de estos corredores de transporte, durante la fase de desarrollo, no se limita apenas en tres pilares, y que en realidad va mucho más allá. Finalmente, el punto central de este estudio reside en mostrar una correlación entre los dos locales de construcción mencionados por dos organizaciones gubernamentales, siendo PWD y DTTDC, en un ambiente urbano idéntico, utilizando la estrategia Fuzzy rationale para evaluar la sustentabilidad tomando en cuenta la percepción de los indicadores de sustentabilidad utilizando informaciones tomadas a través de diferentes revisiones (forma de investigación) de los especialistas de campo y de la población (habitantes/ suburbanos). Este trabajo de investigación tiene su motivación y orientación a partir de un proyecto semejante realizado por Shishir Bansal et al. "Indicadores de Sustentabilidad de un Corredor de Transporte durante la Construcción en Ambiente Urbano".

Este estudio se basó en la aplicación del método fuzzy. La lógica fuzzy es referida como una forma de "raciocinio con incertezas." Brinda un sistema caracterizado para controlar la información dudosa y no completamente caracterizada. Así que sea encontrada la incerteza en la información, la teoría fuzzy ofrece un mecanismo para representar la construcción lingüística como "muchos", "bajo", "promedio", "frecuentes", "pocos". Nociones como altas ó rápidas pueden ser calculadas numericamente y preparadas con un objetivo final específico para aplicar una mentalidad más humanas en la programación. Como regla general, el raciocinio fuzzy ofrece una estructura lógica que capacita adecuadamente el pensamiento humano.

## 2. SELECCIÓN DEL TERRENO

Dos puentes emblemáticos de Delhi el Puente Signature y el Viaducto elevado Barapulla fueron tomados en consideración para el análisis de sustentabilidad.

**SIGNATURE BRIDGE en WAZIRABAD:** El proyecto del Puente Signature o el proyecto de lonte de Wazirabad es un proyecto importante y de amplitud internacional. El puente sobre el río Yamuna consiste en un puente principal que conecta la región oeste con la región, creando un destino turístico de acceso facilitado a dichas regiones citadas.

**BARAPULLA ELEVATED ROAD CORRIDOR** o El Elevado Barapulla: El proyecto de elevado sobre Barapulla Nallah es un corredor que conecta del Este al Sur de Delhi. El proyecto fue concebido en tres fases con localizaciones nodales como Mayur Vihar al Este de Delhi y Aurobindo Marg al Sur de Delhi, con conexiones intermediarias como Sarai Kale Khan y Jawahar Lal Nehru Stadium.

Fuere encontrado que ambos proyectos tienen semejanzas impresionantes, lo que llevó a la formación de un territorio común para la comparación imparcial de la sustentabilidad. Las semejanzas antes mencionadas son las siguientes:

- i. Ambos proyectos son emblemáticos: Puente Signature es un puente atirantado asimétrico con un vano principal de 251m, mientras que el Puente sobre el río Yamuna, en Barapulla Fase III es de varios vanos de 120m. En ambos casos, la cubierta es soportada por cables.
- ii. Ambos proyectos son concebidos con nuevos conceptos modernos
- iii. Ambos proyectos son realizados en fases que fueron progresivamente abiertas para uso público
- iv. Ambos proyectos fueron construidos en el mismo período, es decir SUS obras, comenzaron antes de los XIX Juegos de la Commonwealth de 2010
- v. Ambos proyectos se destacan por el uso de nuevas y altas tecnologías de construcción. Fueron adoptadas construcciones por balances consecutivos sucesivos en ambos proyectos.
- vi. Ambos proyectos tienen sus porciones principales construidas fuera de la zona urbana de la ciudad y generaron menos perturbación para el público. La vida normal no fue impedida de ninguna forma.

### 3. METODOLOGIA APROBADA PARA LA INVESTIGACIÓN

Fué tomado, en esta investigación, el procedimiento a continuación descrito para identificar los indicadores de sustentabilidad.

- i. Selección de una vía aérea en construcción y la definición de los criterios de infraestructura para esa vía.
- ii. Establecer categorías de indicadores de desarrollo de sustentabilidad
- iii. Identificación de indicadores de sustentabilidad
- iv. Compilación del formulario que incluya indicadores de sustentabilidad y columnas para su evaluación
- v. Atribuir clasificaciones cuantitativas y cualitativas a los indicadores reconocidos, obteniendo evaluaciones de las opiniones de los especialistas.

Primero, el levantamiento preliminar de los locales seleccionados fué realizado en diferentes momentos durante el día y la noche. El objetivo principal era identificar ciertos aspectos que impiden la circulación suave de tráfico y también las que son problemáticas en la ejecución y protección del proyecto en desarrollo. La lista de 43 de esos aspectos fué desarrollado y después fueron clasificados en seis categorías y cada categoría es definida como Indicador de Sustentabilidad. Para un ambiente urbano en una ciudad en desarrollo como Nueva Déhli, el Concepto de línea de base triple de sustentabilidad no encaja. Se requiere una extensión para acomodar las condiciones locales. Así, el concepto de línea de base triple es extendida a seis indicadores generales de sustentabilidad. Basados en la clasificación de estos indicadores, fué elaborado un cuestionario y se obtuvo la opinión de especialistas en estas áreas del CRRI, PWD, BRO, Consultores, RITES etc. y con la experiencia de estos especialistas, la clasificación de los indicadores fué atribuída basados en la metodología Fuzzy.

Tabla 1. Indicadores de Sustentabilidad adoptados

S. No.	INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD
<b>A. AMBIENTAL</b>	
1.	Contaminación del aire
2.	Sistema de drenaje existente
3.	Contaminación sonora durante el día
4.	Contaminación sonora durante la noche
5.	Agotamiento del cinturón verde
6.	Esquema de implantación
7.	Esquemas alternativos para hacer el proyecto más sustentable
<b>B. SOCIAL</b>	
8.	Salud de los trabajadores
9.	Actividades de bienestar para la familia de trabajadores
10.	Condiciones de saneamiento
11.	Primeros auxilios
12.	Medidas de seguridad
13.	Aumento del nivel de estrés de los residentes/pasajeros
14.	Impacto en la Salud de los residentes/pasajeros
15.	Impacto en la seguridad de los residentes/pasajeros
16.	Preservación de los espacios sociales como cremación, Sur Ghat
17.	Atracción pública con la estética del Proyecto
18.	Utilidad del Proyecto al Público

19.	Preservar las estructuras del patrimonio
<b>C. ECONOMIA</b>	
20.	Aumento del tiempo de viaje
21.	Aumento del tiempo de viaje
22.	Perturbación al negocio / Empleo de los residentes próximos
23.	Aumento del costo de construcción debido a la falta de recursos
24.	Aumento del costo de construcción debido al exceso de tiempo
<b>D. TÉCNICO</b>	
25.	Exhibición de los Detalles do Proyecto
26.	Desvío de tráfico
27.	Visibilidad y distancia de visión para tráfico en movimiento
28.	Iluminación de cantero de obras
29.	Explorando el terreno
30.	Eficacia de la tecnología utilizada
31.	Manipulación de Resíduos C & D
32.	Garantía de Calidad del Proyecto
<b>E. GOVERNANÇA</b>	
33.	Garantizar la movilidad del tráfico dentro del área del proyecto por el tráfico Marshalls
34.	Mantenimiento do sistema de drenaje existente
35.	Mantenimiento de Barricadas
36.	Mantenimiento de utilitarios existentes
37.	Mantenimiento da vegetación existente
38.	Tiempo de ejecución debido al atraso en gerenciar decisiones
39.	Tiempo de ejecución debido a mala gestión en el local
<b>F. INGENIERÍA INTERNA</b>	
40.	Instalaciones de Yoga / meditación
41.	Desempeño de Rituales en el terreno como Vishwakarma Puja, Primero de Mayo
42.	Celebración durante Festivales en el local
43.	Motivación a los trabajadores por política de recompensa ó de otra forma

Basados en la teoría de Fuzzy, las clasificaciones fueron atribuídas a estos 43 indicadores, conforme lo analizado en la Tabla 1. En fases posteriores, fué realizado un levantamiento con usuarios y residentes próximos para evaluar las medidas adoptadas por el cliente y por la empresa de construcción sobre la forma de de cuestionario con clasificación escala de 0 a 9. Ddonde 9 significa mejores arreglos y 0 significa menores arreglos causando el inconveniente máximo.

## 4. LÓGICA FUZZY

### 4.1 Preliminares de la Teoría de los Conjuntos Fuzzy

Algunas definiciones relacionadas a la teoría del conjunto fuzzy (Buckley 1985, Dubois y Prade, 1987, Kaufmann y Gupta, 1991, Klir y Yuan, 1995, Pedrycz, 1994, Zadeh, 1965) y Zimmermann (2001) son presentadas como sigue.

#### 4.1.1 Definición 1

En un conjunto fuzzy hay un universo de discurso  $X$  es caracterizado por una Función de

asociación  $\mu_a(x)$  que mapea cada elemento  $x$  en  $X$  para un número real en el intervalo  $[0, 1]$ . El valor de Función  $\mu_a(x)$  es denominado grado de asociación de  $x$  en la (Kaufmann e Gupta, 1991). Cuanto mas próximo el valor de  $\mu_a(x)$  fuese para la unidad, mayor será el grau de acercamiento de  $x$  em  $A$ .

**4.1.2 Definición 2**

Un número triangular fuzzy (Fig. 1) esrepresentado como un triple  $a = (a_1, a_2, a_3)$ . Debido a su simplicidad conceptual y computacional, los números difusos triangulares son muy utilizados en aplicaciones prácticas (Klir y Yuan, 1995; Pedrycz, 1994). La Función de asociación del número fuzzy triangular es dada por:  $\mu_a(x) = 0, x \leq a_1$ ,  $\mu_a(x) = (x-a_1)/(a_2-a_1)$ , para  $a_1 < x \leq a_2$  e  $\mu_a(x) = (a_3-x)/(a_3-a_2)$  para  $a_2 < x \leq a_3$  y finalmente  $\mu_a(x) = 0$ , for  $x > a_3$ , **ddonde**  $a_1, a_2, a_3$  son números reales y  $a_1 < a_2 < a_3$ . El valor de  $x$  en  $a_2$  dara la nota máxima de  $\mu_a(x)$ , es decir,  $\mu_a(x) = 1$ ; Es el valor más probable de los datos de evaluación. El valor de  $x$  en  $a_1$  da la nota mínima de  $\mu_a(x)$  es decir,  $\mu_a(x) = 0$ ; Es el valor menos probable de los datos de evaluación. Cuanro más estrecho o intervalo  $[a_1, a_3]$ , menor a nitidez dos dados de evaluación.

**4.2 Variables lingüísticas y teoría de los conjuntos fuzzy**

En la teoría del conjunto fuzzy, las escalas de conversión son usadas para transformar los términos cualitativos en números fuzzy. Una escala de 0-9 es usada para clasificar los criterios y las alternativas. La Tabla 2 representa los esquemas de conversión para las clasificaciones cualitativas, alternativas y de criterios.

Tabele 2. Transformación fuzzy para criterios cualitativos de pponderación y clasificación de terrenos

Criterios de pponderación		Clasificaciones del terreno	
Clasificación Cualitativa	Función de asociación	Clasificación Cualitativa	Función de asociación
Muy bajo (VL)	(1,1,3)	Muy pobre (VP)	(1,1,3)
Bajo (L)	(1,3,5)	Pobre (P)	(1,3,5)
Médio (M)	(3,5,7)	Justo (F)	(3,5,7)
Alto (H)	(5,7,9)	Bueno (G)	(5,7,9)
Muy Alto (VH)	(7,9,9)	Muy bueno (VG)	(7,9,9)

**4.3 Método VIKOR**

En 1998 fué desarrollado por Opricovic el método VIKOR (Vlse kriterijumska Optimizacija IKompromisno Resenje) para la optimización de los multicriterios de los sistemas complejos. El método VIKOR se concentra en clasificar y clasificar un conjunto de alternativas contra vários criterios de decisión asumiendo que comprometer es adecuado apenas para resolver conflictos. Así como algunos otros métodos MCDM como TOPSIS, VIKOR depende de una Función de agregar que significa cercanía con el ideal, al contrario del TOPSIS, que introdujo el índice de clasificación con base en las medidas particulares de cercanía con las soluciones ideales y, por lo tanto, este método utiliza la normalización lineal para eliminar unidades de funciones de criterio (Opricovic & Tzeng, 2004).

La estrategia VIKOR fué introducida como un método apropiado para actualizar dentro de aspectos MCDM y fué producida como una elección multicriterios para hacer un procedimiento y resolver una decisión discreta para un problema con criterios no mesurables y conflictivos. Este método se centra en la clasificación y selección de un conjunto de alternativas que evalúa la solución de compromiso para un problema dentro de criterios conflictivos, lo que puede ayudar a



los tomadores de decisión a llegar a una solución final. La medida multicriterio para obtener posicionamiento es producida a partir de la métrica LP utilizada como capacidad de totalización como parte de un método de programación de trade off.

Asumiendo que cada alternativa es evaluada de acuerdo con cada Función de criterio, la clasificación de compromiso puede ser realizada comparando la medida de cercanía con la alternativa ideal. Las  $m$  alternativas son indicadas como  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . Para la alternativa  $A_i$ , la clasificación del  $j$ -ésimo aspecto es denotada por  $f_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ ), es decir,  $f_{ij}$  y el valor de la Función del  $j$ -ésimo criterio para la alternativa  $A_i$ ,  $n$  es el número de criterios.

El algoritmo de clasificación de compromiso del método VIKOR tiene las siguientes etapas:

**Paso 1: Atribuir clasificaciones a varios terrenos y criterios alternativos por tomadores de decisión (K Nos.) y especialistas (L Nos.)**

Tomemos un conjunto de  $m$  locales alternativos llamados  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  que necesitamos evaluar contra un conjunto de  $n$  criterios, que es  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ .

- a) Los pesos de los criterios valorados por los especialistas son representados por  $w_j$  donde ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). La clasificación de cada especialista  $E_l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) para cada criterio  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) es indicada por:  $(a_{jl}, b_{jl}, c_{jl})$ , donde  $j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, L$ ;
- b) Las clasificaciones de desempeño del tomador de decisión  $D_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) para cada alternativa  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) de acuerdo con los criterios  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) son indicados por:  $(a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk})$ , donde  $j = 1, 2, \dots, n; i = 1, \dots, m; k = 1, 2, \dots, K$

**Paso 2: Calcular las clasificaciones agregadas de nitidez ( $w_j$ ) para cada criterio por especialistas y  $D_k$  correspondientes a cada criterio de alternativas y criterios.**

Los pesos fuzzy agregados ( $w_{ij}$ ) correspondientes a cada criterio son calculados como  $w_j = (w_{j1}; w_{j2}; w_{j3})$  donde

$$w_{j1} = \min \{w_{jl1}\}, w_{j2} = \frac{1}{l} \sum_{l=1}^L w_{jl2}, w_{j3} = \max \{w_{jl3}\} \tag{1}$$

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  correspondiente a cada uno de los criterios 'n'

Clasificación Crisp  $w_j = (w_{j1} + 4*w_{j2} + w_{j3})/6$

De la misma manera forma, la clasificación difusa agregada para cada uno de los terrenos  $m$  alternativos es calculada.

$R_k = (a_k, b_k, c_k)$ , donde  $k = 1, 2, \dots, K$ , entonces la clasificación difusa agregada es definida por  $R = (a, b, c)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  donde;

$$a = \min \{a_k\}, b = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_k, c = \max \{c_k\} \tag{2}$$

**Paso 3: Para calcular la matriz de decisión fuzzy para 'K' tomadores de decisión, 'm' locales alternativos y 'n' número de criterios**

La matriz de decisión fuzzy ( $D$ ) para los criterios ( $C_j$ ) y las alternativas ( $A_i$ ) es construída como sigue:

$$D = \begin{matrix} & & & & A_1 & A_2 & \dots & A_m \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} & , & i= 1, 2, \dots, m; & j= 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (3)$$

**Paso 4: defuzzificar los elementos de la matriz de decisión fuzzy correspondientes a las alternativas y los pesos de los criterios en valores nítidos.**

Un número fuzzy  $a = (a_1, a_2, a_3)$  puede ser convertido en un número nítido  $a$  usando la siguiente ecuación:

$$a = (a_1 + 4a_2 + a_3)/6 \quad (4)$$

**Paso 5: Determinar los mejores y peores valores de la clasificación de los criterios donde  $f_j^*$  es mejor y valores  $f_j^-$  es el peor valor**

$$\begin{aligned} f_j^* &= \max_i \{x_{ij}\} \\ f_j^- &= \min_i \{x_{ij}\} \end{aligned} \quad (5)$$

**Paso 6: Para calcular los valores de  $S_i$  e  $R_i$  utilizando las ecuaciones presentadas abajo**

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^- - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (6)$$

$$R_i = \max_j w_j \frac{f_j^- - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (7)$$

**Paso 7: Para calcular los valores de  $Q_i$  usando**

$$Q_i = v \frac{s_i - s^*}{s^- - s^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^-}{R^- - R^*} \quad (8)$$

Donde  $S^* = S_i$  mínimo,  $S^- = S_i$  máximo,  $R^* = R_i$  mínimo es  $R^- = R_i$  máximo y  $v$  es el peso para la estrategia de utilidad máxima de grupo y aquí es tomado como 0,5

**Paso 8: Clasificar las alternativas clasificando los valores  $Q$ ,  $R$  e  $S$  en orden creciente.**

**Paso 9: Proponer una solución de compromiso para la alternativa (A (1)) que es el mejor clasificado por la medida  $Q$  (mínimo) si las dos condiciones siguientes son satisfechas.**

**C1: Ventaja aceptable**

$$\text{If } Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ \quad (9)$$

Donde  $A^{(2)}$  es la alternativa que ocupa la segunda posición en la lista de clasificación de acuerdo con  $Q$  es

$$DQ = 1/J-1, \text{ Donde } j \text{ y el número de criterios} \quad (10)$$



**C2: Estabilidad aceptable en la toma de decisiones**

La alternativa A<sup>(1)</sup> también debe ser la mejor clasificada por R y/o S. La solución de liquidación es estable únicamente dentro de un proceso de toma de decisión específico, y esa podría ser la estrategia de utilidad máxima del grupo (cuando  $v > 0,5$  es necesaria), Por consenso cuando  $v = 0,5$ , o - con veto ie ( $v < 0,5$ ). Si una de las condiciones antes no fué satisfecha, entonces un conjunto de soluciones de asentamiento es propuesto, que consiste en:

- Alternativas A (1) y A (2) si apenas la condición C2 no fuese satisfecha ó
- Alternativas A (1), A (2), ... A (M) si la condición C1 no fuese satisfecha;

A (M) es determinada por la relación  $Q(A(M)) - Q(A(1)) < DQ$  para M máximo (la posición de estas alternativas está en la cercanía).

**5. APLICACIÓN NUMÉRICA DE LA LÓGICA FUZZY**

En esta sección, la evaluación de la sustentabilidad de las dos vías de transporte como locales alternativos, llamadas A1 y A2, en Delhi, en construcción, fué realizada usando la técnica Fuzzy VIKOR. Estos locales de proyecto son el elevado de Barapulla (A1) construído por el PWD y el Puente Signature (A2) construída por el DTTDC.

Fué formado un comité de 10 especialistas (E1, E2 ... E10) para obtener las clasificaciones cualitativas de los criterios y de las alternativas.

Tabla 3. Evaluaciones cualitativas y clasificaciones agregadas de criterios fuzzy

Criterio	Clasificación Cualitativa										Peso agregado Fuzzy	Clasificación Crisp (W <sub>j</sub> )
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10		
C1	VH	VH	VH	H	H	VH	VH	H	VH	VH	(5,8,4,9)	7.93
C2	H	VH	M	VH	M	M	H	VH	VH	H	(3,7,2,9)	6.80
C3	M	H	H	H	L	H	M	M	M	M	(1,5,6,9)	5.40
C4	H	VH	VH	VH	VH	H	H	H	H	VH	(5,8,9)	7.67
C5	VH	VH	M	H	H	VH	VH	H	H	H	(3,7,6,9)	7.07
C6	VH	VH	VH	H	H	M	H	M	H	H	(3,7,2,9)	6.80
C7	H	M	M	VH	H	H	VH	VH	H	H	(3,7,2,9)	6.80
C8	VH	VH	H	VH	H	VH	H	H	H	VH	(5,8,9)	7.67
C9	VH	H	L	VH	H	H	H	M	H	H	(3,6,8,9)	6.53
C10	VH	VH	H	VH	H	VH	H	H	H	H	(5,7,8,9)	7.53
C11	VH	VH	VH	VH	H	VH	VH	VH	H	VH	(5,8,6,9)	8.07
C12	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	(7,9,9)	8.67
C13	H	VH	VL	VH	M	VH	VH	H	M	VH	(1,7,9)	6.33
C14	VH	VH	VH	VH	M	VH	VH	H	H	H	(3,8,9)	7.33
C15	VH	VH	VH	VH	H	VH	VH	VH	VH	H	(5,8,6,9)	8.07
C16	H	VH	M	M	H	VH	VH	H	VH	H	(3,7,4,9)	6.93
C17	M	H	L	H	H	VH	M	M	H	M	(1,6,9)	5.67
C18	VH	VH	M	H	M	H	VH	VH	H	VH	(3,7,6,9)	7.07
C19	VH	M	M	M	M	H	VH	VH	VH	H	(3,7,9)	6.67
C20	VH	VH	VH	VH	M	VH	H	H	VH	H	(3,8,9)	7.33
C21	VH	VH	VH	VH	M	M	H	H	VH	H	(3,7,6,9)	7.07
C22	H	H	VH	VH	L	M	H	H	H	M	(1,6,8,9)	6.53
C23	H	H	H	VH	VH	VH	H	H	VH	VH	(5,8,9)	7.67
C24	H	H	H	VH	VH	VH	H	H	VH	VH	(5,8,9)	7.67

C25	H	H	M	H	L	L	H	M	VH	L	(1,5,6,9)	5.40
C26	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	H	(5,8,8,9)	8.20
C27	VH	VH	H	VH	M	VH	VH	VH	H	H	(3,8,9)	7.33
C28	VH	VH	H	VH	VH	VH	VH	VH	VH	H	(5,8,6,9)	8.07
C29	VH	VH	H	VH	H	VH	VH	H	VH	VH	(5,8,4,9)	7.93
C30	VH	H	H	H	M	M	M	H	VH	H	(3,6,8,9)	6.53
C31	H	H	M	VH	H	VH	VH	H	H	H	(3,7,4,9)	6.93
C32	VH	H	VH	VH	VH	VH	VH	VH	H	H	(5,8,4,9)	7.93
C33	VH	VH	VH	VH	VL	VH	H	VH	VH	VH	(1,8,9)	7.00
C34	VH	VH	H	VH	H	VH	H	VH	VH	VH	(5,8,4,9)	7.93
C35	H	M	H	VH	H	VH	H	VH	H	M	(3,7,2,9)	6.80
C36	VH	H	VH	VH	VH	VH	H	VH	H	H	(5,8,2,9)	7.80
C37	VH	VH	M	VH	H	H	H	H	H	VH	(3,7,6,9)	7.07
C38	H	H	VH	VH	VH	H	H	M	VH	VH	(3,7,8,9)	7.20
C39	H	H	VH	VH	M	M	VH	VH	VH	H	(3,7,6,9)	7.07
C40	M	M	M	H	VL	M	VL	L	VL	L	(1,3,4,9)	3.93
C41	VL	L	H	VH	VH	M	VL	M	H	L	(1,5,9)	5.00
C42	M	VL	VH	H	VL	M	VL	M	M	VL	(1,3,8,9)	4.20
C43	VH	VH	H	H	VH	VH	H	H	VH	VH	(5,8,2,9)	7.80

Las clasificaciones cualitativas en números triangulares fuzzy y, enseguida, generadas las clasificaciones agregadas usando la ecuación (1). La Tabla siguiente presenta la matriz de decisión fuzzy agregada para los dos locales alternativos.

Generar clasificaciones agregadas de nitidez para ambos locales alternativos usando la ecuación (4). Basados en estos valores, calcularemos los mejores  $f_j^*$  y los peores valores  $f_j^-$  de todos los 43 criterios usando la ecuación (5)

Tabla 4. Los mejores valores  $f_j^*$  y los peores valores  $f_j^-$  de los 43 criterios

Criterio	Evaluación Crisp		Peor valor $F_j^-$	Mejor valor $F_j^*$
	A1 (PWD)	A2 (DTTDC)		
C1	6.15	6.01	6.01	6.15
C2	6.17	6.15	6.15	6.18
C3	6.28	6.17	6.17	6.28
C4	6.32	6.19	6.19	6.32
C5	6.83	6.53	6.53	6.83
C6	4.44	4.57	4.44	4.57
C7	6.75	6.59	6.59	6.75
C8	6.15	6.01	6.01	6.15
C9	4.33	4.52	4.33	4.52
C10	4.36	4.57	4.36	4.57
C11	6.8	6.53	6.53	6.85
C12	6.15	6.01	6.01	6.15
C13	6.09	6.12	6.09	6.12
C14	6.64	6.59	6.59	6.64
C15	6.8	6.51	6.51	6.8
C16	6.64	6.53	6.53	6.64
C17	6.15	6.01	6.01	6.15

C18	6.85	6.51	6.51	6.85
C19	6.85	6.53	6.53	6.85
C20	6.93	6.61	6.61	6.93
C21	6.85	6.53	6.53	6.85
C22	6.83	6.53	6.53	6.83
C23	6.85	6.56	6.56	6.85
C24	6.75	6.51	6.51	6.75
C25	6.83	6.53	6.53	6.83
C26	6.83	6.59	6.59	6.83
C27	6.83	6.51	6.51	6.83
C28	6.85	6.59	6.59	6.85
C29	6.83	6.53	6.53	6.83
C30	6.88	6.56	6.56	6.88
C31	6.85	6.53	6.53	6.85
C32	6.64	6.53	6.53	6.64
C33	6.64	6.56	6.56	6.64
C34	6.59	6.53	6.53	6.59
C35	6.83	6.56	6.56	6.83
C36	6.61	6.56	6.56	6.61
C37	5	5.72	5	5.72
C38	6.85	6.53	6.53	6.85
C39	6.59	6.53	6.53	6.59
C40	6.64	6.56	6.56	6.64
C41	6.64	6.56	6.56	6.64
C42	6.44	6.15	6.15	6.44
C43	6.64	6.51	6.51	6.64

La siguiente tabla presenta los valores de  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$  para las dos alternativas calculadas por las ecuaciones (6) - (8). Los valores de  $S^* = 0,736$ ,  $S^- = 5,76$ ,  $R^* = 0,163$ ,  $R^- = 0,188$  son calculados utilizando la ecuación (9).

Tabla 5. Valores de  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$

	A1(PWD)	A2(DTTDC)
$S_i$	0.74	5.75
$R_i$	0.16	0.19
$Q_i$	0	0

La Tabla 6 clasifica las dos alternativas, clasificando los valores de  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$  obtenidos de la Tabla 5 en orden ascendente. Puede ser observado a partir de los resultados antes presentados en la Tabla 6 que el terreno 1 que es el Elevado de Barapulla por la PWD es el mejor clasificado por la medida de menor valor de  $Q_i$ . Por tanto, ahora será analizado para las dos condiciones dadas que fueron discutidas anteriormente.

Tabla 6. Clasificación de las alternativas

$S_i$	A1	A2
$R_i$	A1	A2
$Q_i$	A1	A2

**1). C1: ventaja aceptable, esto es, ecuación 9**

Utilizando la ecuación 9  $DQ = 1/43 - 1 = 1/42 = 0,0238$ .

Ahora, para satisfacer la condición  $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$ , donde  $A^{(1)}$  es el mejor clasificado por la medida Q (mínimo) y en este caso es A1

Se tiene:

$Q(A2) - Q(A1) = 1 - 0 = 1 > 0,0238$ , por tanto, a condición  $QA^{(1)} - QA^{(2)} \geq DQ$  es satisfecha.

**2). C2: Estabilidad aceptable en la toma de decisión usando la ecuación 10**

Una vez que el terreno A1 es mejor clasificado por Si y Ri (considerando o - "por consenso regla  $v = 0,5$ "), por tanto, es declarado como una vía más sustentable.

**6. RESULTADOS y DISCUSIONES****6.1 Resultados**

La técnica Fuzzy VIKOR fué aplicada para la evaluación de la sustentabilidad de dos corredores (vías aéreas) de transporte principales en construcción, esto es, (A1, A2), en la ciudad de Nueva Déli. Esos proyectos fueron el Elevado de Barapulla siendo construído por PWD (A1) y Puento de Signature construída por la DTTDC (A2). Los resultados finales luego de la aplicación numérica del método Fuzzy VIKOR muestran que el terreno A1, es decir el Elevado de Barapulla que está siendo construído por PWD, se considero más sustentable en lãs condiciones dadas y los indicadores de sustentabilidad elegidos.

**6.2 Discusiones**

La metodología de cinco etapas definida en esta investigación puede ser usada para cualquier corredor de transporte para desarrollar indicadores de sustentabilidad. Los cinco Pasos son

- i. Selección de uan vía en construcción y definición de los criterios de infraestructura para el corredor
- ii. Desarrollo de las categorías de indicadores de sustentabilidad
- iii. Identificación de los indicadores de sustentabilidad
- iv. Compilación de un formulario que incluya indicadores de sustentabilidad y columnas correspondientes para la evaluación
- v. Atribuir las clasificaciones cuantitativas y cualitativas a los indicadores reconocidos, brindando las clasificaciones de las opiniones de los especialistas de campo

Cada una de esas etapas puede ser aplicada para evaluar un corredor de transporte sustentable en construcción en un ambiente urbano. Este proceso comenzó con el requisito para la categorización de la sustentabilidad de tres pilares existentes, es decir, aspectos económicos, sociales y ambientales y se destacó con el desarrollo de tres categorías, mas vitales es decir, Gobernabilidad, Técnica e Ingeniería Interna. En fases posteriores, los parámetros / indicadores individuales de estas 6 categorías de sustentabilidad furon reconocidos visitando las vías en construcción y consultada con los especialistas de campo. Finalmente, el proceso fué concluído con la Compilación de un formulario que ofrece evaluaciones cualitativas y cuantitativas a cada indicador de sustentabilidad identificado por los especialistas.

## 7. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones son extraídas del estudio anteriormente desarrollado:

- i. A través de esta investigación fué definido que la sustentabilidad no es apenas basado en tres parámetros, también dependen de varios otros indicadores que fueron identificados en este estudio.
- ii. Diversos Indicadores de Sustentabilidad a través de la fase de construcción fueron identificados para un elevado y por lo tanto, son clasificados en varias categorías como las analizadas en esta investigación.
- iii. Los tres pilares de la sustentabilidad, a saber, sociales, económicos y ambientales, son viables apenas para los países desarrollados, mientras que en economías en desarrollo como la India, donde varios otros factores, como el aumento exponencial de la población etc., entra en juego la necesidad de introducir parámetros adicionales.
- iv. El estudio comparativo de 2 vías de transporte emblemáticas y en construcción, El Elevado de Barapulla siendo construido por PWD (A1) y el Puente Signature construido por la DTTDC (A2) definió una metodología para futuros estudios de sustentabilidad
- v. Los resultados de este estudio mostraron también que el elevado de Barapulla es más sustentable en comparación con el Puente Signature.

## 8. REFERENCIAS

- Awasthi A., Chauhan S. S., Omrani H. (2011), “*Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems*”, Expert Systems with Applications, V. 38 pp.12270–12280.
- Awasthi A., Omrani H., Philippe G. (2013), “*Multi-criteria decision making for sustainability evaluation of urban mobility projects*”, CEPS Instead, Working Paper No 2013-01.
- Buckley, J. J. (1985), “*Fuzzy hierarchy analysis.*” Fuzzy Sets and Systems 17: 233-47.
- Christy Mihyeon J., (2007), “*Incorporating sustainability into transportation planning and decision making: definitions, performance measures, and evaluation*” Ph.D. Thesis in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Congress Proceedings:
- Dubois D. and Prade H. (1987), “*Possibility theory: An approach to computerized processing of uncertainty*” New York: Plenum Ed.
- Jeon, C. M. and Amekudzi, A. (2005) “*Addressing sustainability in transportation systems: Definitions, Indicators, and Metrics*” Journal of Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers (ASCE). V.11, N. 1, pp. 31-50.
- Kaufmann, A., and Gupta, M. M. (1991), “*Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and Application*”, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Klir, G. J. and Yuan, B. (1995), *Fuzzy Sets and fuzzy logic. Theory and Applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Litman T. (2009), *A good example of bad transportation performance evaluation*, Working paper, Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2008), “*Well Measured: Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning*”. British Columbia: Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. and Burwell, D. (2006), “*Issues in sustainable transportation*”, Journal of Global Environmental Issues, V., N.4, pp331-346.
- Litman, T., (2009), “*Sustainable transportation indicators- A recommended research program for developing sustainable transportation indicators and data*”. In Proceedings of the 2009 transportation research board annual conference, CD-ROM, Washington, DC, January 11-15

- Opricovic, G. H. T. (2004), *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, European Journal of Operational Research, 156, pp. 445–455
- Opricovic, T. (2002), “*Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering”, V.17, N.3, pp. 211–220
- Ott, W. (1978), “*Environmental indices: Theory and Practice*”. Ann Arbor: Ann Arbor Science.
- Pedrycz, W. 1994. “*Why triangular membership functions?*” Fuzzy Sets and Systems 64 (1): 21–30.
- Robert, “*Sustainable transportation and quality of life*”, Department of Psychology, University of Victoria, Victoria BC V8W 3P5, Canada.
- Shishir B., Kurian J., Singh S. K., (2013), “*Application of environmental friendly systems to protect the environment during construction of grade separators in new delhi*”, First international conference on concrete sustainability, Tokyo, Japan, Being Organised By Japan Concrete Institute, May 27-29, 2013
- Shishir B., Sameer V., Singh S. K. (2014), “*Sustainability indicators of a transportation corridor during construction in an urban environment*”, International Conference on sustainable civil infrastructure, American Society of Civil Engineers, India Section, Hyderabad (2014)
- Shishir B., Sameer V., Singh S. K. (2015), “*Identificaton of sustainability indicators and evaluation of transportation corridors during construction using fuzzy Vikor method*”, Journal of Civil Engineering and Architecture, V.9, N.10, pp -1217-1228.
- Shishir B., Singh S. K., Kurian J., (2013), “*Environmental impacts and mitigation measures in infrastructure projects in new delhi*”, First International Conference on Concrete Sustainability, 27-29 May 2013, Tokyo Japan, Program & Paper abstracts, pp 177
- Steg L., (2005) Department of Psychology, University of Groningen, Netherlands, Gifford,
- Stuart Samberg, RK&K Engineers, Bassok Alon, (2011) Puget Sound Regional Council and Holman Shawna, P., “*Method for evaluation of sustainable transportation toward a comprehensive approach*”
- Sunita B., Srijit B., Singh S. K. (2015), “*Approach of fuzzy logic for evaluation of green building rating system*”, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), V.2, N.3, pp 35-39.
- Sunita B., Srijit B., Singh S. K. (2015), “*Fuzzy modelling for selection of most economical green building out of N-Alternatives*”, International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST), V. 36, N.3, pp 7-11
- Sunita B., Srijit B., Singh S. K. (2015), “*Selection of most economical green building out of n-alternatives: approach of vague fuzzy logic*”, International Journal of Research in Engineering and Technology, V.4, N.2, pp. 164-168.
- World Commission on Environment and Development (WCED), (1987) “*Our Common Future*”, Oxford University Press, Oxford, England
- Zadeh, L. (1965), “*Fuzzy sets.*”, Information and Control 8(3): 338-53.
- Zimmermann, H. J., (2001), “*Fuzzy set theory and its applications*”, 4th ed. Boston: Kluwer Academic Publishers. entice-Hall PTR.