

El Manejo de Información Lingüística en la Evaluación de Infraestructura

The Management of Linguistic Data on Infrastructure Evaluation

Por / By *Andrés Caroca Baeza*

Pág.29-34

Resumen

Dentro de una organización de transportes, la evaluación de un pavimento es usualmente realizada por ingenieros experimentados. Estos expertos utilizan su conocimiento, experiencia y juicio para evaluar la condición del pavimento. Las decisiones de inversión son generalmente llevadas a cabo con una cantidad limitada de información la que usualmente es de naturaleza poco detallada.

El conocimiento utilizado en pre ingeniería es subjetivo, simbólico en naturaleza, y la evaluación de la condición actual de la infraestructura esta generalmente basada en una observación visual que utiliza términos y expresiones que describen los síntomas observados. Es por esta razón que existe la necesidad de formalizar el conocimiento, experiencia y razonamiento utilizado en la pre evaluación de la infraestructura, para estimar y priorizar en forma preliminar las necesidades de mantención.

Este artículo analiza la aplicabilidad de los números difusos, para ayudar en la evaluación de la condición general del pavimento, utilizando como fuente de información términos lingüísticos que describen los síntomas observados. Basado en la teoría de los números difusos, valores lingüísticos del deterioro son representados por funciones de pertenencia las cuales pueden ser cuantificadas capturando el conocimiento de los expertos en mantención. Es así como una medida del estado de daño o condición de un pavimento puede ser obtenido mediante el cálculo de un promedio ponderado de los números difusos y posterior aproximación lingüística.

Palabras Clave: *Inspección de infraestructura, Condición de pavimento, Números difusos, Incertidumbre, Términos lingüísticos*

Abstract

The pavement evaluation within a transportation organisation is generally developed by experienced pavement engineers. Such technical experts use their knowledge, experience and judgment to evaluate pavement condition. Investment decisions are often made on limited amount of data which are invariably not detail in nature.

Knowledge utilized in preliminary engineering is subjective, symbolic in nature, and the evaluation of the actual infrastructure condition is usually based on a visual assesment done using terms and expresions describing the observed symphoms. Because of these reasons there is a need to formalize the knowledge, experience and thought process used in infrastruture pre-evaluation, to be able to estimate and prioritize maintenance need.

This paper analyse the applicability of fuzzy sets, to help in the evaluation of a global pavement condition, using as a source of information linguistics terms describing the observed symthoms. Based on the theory of fuzzy sets, linguistic values of deterioration are represented by membership functions which can be quantified by capturing the knowledge of maintenance experts. Thus the global damage condition of a pavement could be obtained by means of the calculation of a weighted average of fuzzy numbers and subsequent linguistic approach.

Keywords: *Infrastructure assessment, Pavement condition, Fuzzy numbers, Uncertainty, Linguistic terms*

1. INTRODUCCION

Debido a las grandes inversiones que se han venido realizando en materia de infraestructura, cada vez se hace mas necesario el uso de metodologías de decisión como sistemas de apoyo para la toma de decisiones relacionada con su mantención y administración. Metodologías como la teoría de los números difusos puede ser aplicadas en la evaluación de la condición general de un pavimento, u otro tipo de infraestructura, problema que se caracteriza por la evaluación, a veces a nivel lingüístico, de los deterioros visibles en la superficie (ejemplo; Extensivo agrietamiento moderado).

En muchos casos, es difícil realizar la toma de decisiones totalmente por intuición. Una buena toma de decisiones puede ser alcanzada a través de la clasificación de información relacionada y la integración de métodos para la solución de problemas dentro de un marco definido de la situación a decidir.

Los avances en la tecnología de computadores durante los 80 y 90 ha llevado a un creciente desarrollo de aplicaciones para asistir en los procesos de información. Uno de los campos que ha tenido una gran influencia del desarrollo tecnológico han sido los sistemas de soporte de decisión para la administración.

La teoría de los números difusos, provee las bases para una aproximación cualitativa en el análisis de sistemas en los cuales se utilizan variables lingüísticas (conceptos verbales) en vez de numéricas, para describir su estado o comportamiento. En los procesos de decisión, los ingenieros están frecuentemente enfrentados a seleccionar las opciones adecuadas a partir de la evaluación de una condición que no esta muy bien descrita. Por ejemplo el agrietamiento de una losa puede incluir la dirección transversal o longitudinal. Los grados de severidad para grietas transversales o longitudinales son considerados en forma diferente para un pavimento deteriorado. No existe una escala apropiada que se pueda utilizar en forma precisa, en cambio, cada grieta puede ser visualmente estimada mediante la asignación de un valor lingüístico, ejemplo; baja, extensa, etc. Esta clase de información puede ser manipulada mediante números difusos y técnicas de clasificación mediante el uso de patrones. Las funciones de pertenencia de cada valor lingüístico están generalmente seleccionadas en base a un juicio subjetivo y experiencia personal. La cuantificación de las funciones de pertenencia mediante el uso de números difusos proveen a los ingenieros una manera consistente de mantener la información de forma sistemática.

En la administración de pavimentos, problemas como la recolección de información, estimación de costos, y ensayos en terreno están bien estructurados debido a que son repetitivos y rutinarios hasta el punto que es posible definir un procedimiento para abordarlos, las decisiones involucradas en este tipo de problemas están principalmente orientadas al dato. Por otro lado los problemas orientados al

conocimiento, como ser el diagnóstico de una condición, asignación de fondos y priorización de proyectos, pueden ser perfeccionados. Este tipo de problemas debe tomar en cuenta información imprecisa y subjetiva, y por lo tanto generalmente no se aplican métodos para abordar su solución, es así como la consideración de las variables poco definidas queda en manos de los especialistas, estos a su vez debieran dedicar parte de su tiempo en transmitir su conocimiento, para el bienestar de futuras generaciones.

El daño estructural de un pavimento se manifiesta en variadas formas de deterioros, las cuales pueden ser observadas en la superficie de rodado. La magnitud de cada deterioro individual, a nivel de pre ingeniería, puede ser registrado mediante una escala lingüística. Estas escalas pueden ser formuladas tomando como base una técnica de patrones que consideren tanto la severidad como la extensión de cada deterioro sobre longitudes nominales del pavimento, como por ejemplo lo propuesto por el SHRP-P-338.

Basado en la teoría de los números difusos, valores lingüísticos del deterioro son representados por funciones de pertenencia las cuales pueden ser cuantificadas capturando el conocimiento de los expertos en mantención. Es así como una medida del estado de daño o condición de un pavimento puede ser obtenido mediante el cálculo de un promedio ponderado de los números difusos y posterior aproximación lingüística.

2. LA TEORIA DE LOS NUMEROS DIFUSOS

La lógica de dos niveles o "booleana" (verdadero, falso) de Aristóteles ha dominado el pensamiento en la mayor parte del crecimiento de la ciencia. La lógica difusa, propuesta por primera vez por Zadeh en 1965 (ZADEH 1965), admite un número de niveles intermedios entre verdadero falso. En la lógica de Aristóteles, cuando uno considera un conjunto, algo pertenece o no al conjunto. La lógica difusa admite varios grados de pertenencia al conjunto. La lógica de Aristóteles permite paradojas. La lógica difusa resuelve todas las paradojas en puntos intermedios entre verdadero o falso. La lógica difusa puede ser utilizada en la administración de la incertidumbre, para un razonamiento aproximado, y representación del conocimiento y sistemas.

2.1 Sub conjuntos difusos

En la teoría clásica de conjuntos, un sub conjunto U de un conjunto S puede ser definido como un mapeo desde los elementos de S a los elementos del conjunto $\{0, 1\}$, $U: S \rightarrow \{0, 1\}$. Este mapeo puede ser representado como un conjunto de pares ordenados con exactamente un par ordenado por cada elemento del conjunto S. El primer elemento del par ordenado es un elemento del conjunto S, y el segundo elemento es un elemento del conjunto $\{0, 1\}$. El valor 0 es usado para representar la "no-pertenencia", y el valor 1 la "pertenencia".

En forma análoga un sub conjunto difuso F de un conjunto S puede ser definido como un conjunto de pares ordenados, cada uno cuyo primer elemento pertenece a S y su segundo elemento pertenece al intervalo $(0, 1)$. El valor 0 es usado para representar la "no-pertenencia", y el valor 1 la "pertenencia", y los valores intermedios, entre 0 y 1, se utilizan para representar los grados de pertenencia. El conjunto S es denominado como el universo bajo análisis para el sub conjunto difuso F . Lo usual es describir este mapeo como una "función de pertenencia" de F . En la práctica los términos "función de pertenencia" y "sub conjunto difuso" son usados en forma intercambiable.

¿Qué es la lógica difusa?

La lógica difusa es un super conjunto de la lógica convencional que ha sido extendido para manejar los conceptos de verdad parcial ubicados entre los valores de completa verdad y completa falsedad. Fue introducida por el Dr. Lotfi Zadeh de la Universidad de Berkeley en los años 60 como un medio para modelar la incertidumbre de nuestro lenguaje natural (ZADEH 1965).

Zadeh dice que antes de ver la teoría difusa como una teoría individual, debemos observar el proceso de "difusión" como una metodología para generalizar cualquier teoría específica desde su planteamiento discreto a una forma continua, es así como recientemente muchos investigadores han introducido el "cálculo difuso" en sus análisis.

¿Cuál es la relación entre la verdad difusa y las probabilidades?

Esta pregunta debe ser respondida de dos formas, primero, desde el punto de vista matemático como la teoría de los números difusos difiere de la teoría de las probabilidades, y segundo como difiere en su interpretación y aplicación.

A nivel matemático, los valores difusos son comúnmente mal interpretados como probabilidades, o la lógica difusa es interpretada como una nueva forma de tratar con probabilidades. Pero esto no es cierto, ya que un requerimiento mínimo de las probabilidades es la aditividad, esto es que la suma de las probabilidades debe ser 1, o la integral de la función de densidades debe ser igual a 1.

Lo anterior no siempre es válido con los grados de pertenencia. Mientras que los grados de pertenencia pueden ser determinados con las densidades de probabilidades en mente, existen otros métodos que no tienen nada que ver con frecuencias o probabilidades.

Debido a esto, los investigadores en la teoría difusa han realizado grandes esfuerzos para distanciarse del campo de las probabilidades. Es así como los conjuntos y la lógica difusa generalizan los conjuntos y la lógica de verdadero o falso ("booleana").

De hecho desde la perspectiva matemática, los conjuntos difusos y las probabilidades existen como parte de una teoría de información generalizada la cual incluye

muchos formalismos para representar la incertidumbre (incluyendo los conjuntos aleatorios, la teoría de la evidencia de Demster-Shafer, intervalos de probabilidades, teoría de las posibilidades etc.).

Semánticamente, la distinción entre la lógica difusa y la teoría de las probabilidades tiene que ver con la diferencia entre las nociones de probabilidad y grado de pertenencia. Juicios probabilísticos son acerca de la ocurrencia de ciertos resultados, un evento ocurrirá o no, y uno puede apostar a eso. Pero en el campo de lo difuso, no puede decir si un evento ocurrió o no, pero en cambio uno puede expresar en que extensión el evento ocurrió o no.

2.2 Números difusos

Los números difusos son sub conjuntos difusos del universo de los números reales. Cuentan con un valor máximo o un grado de pertenencia igual a 1, el cual representa que cada elemento del universo está completamente en el conjunto. La función de pertenencia aumenta hacia el valor máximo y disminuye al alejarse de él. Una representación típica es la triangular, ver Figura 1, que como ejemplo muestra un número difuso (en torno a 7), que para el valor 7 el grado de pertenencia es 1.0, para el valor 6 el grado de pertenencia es 0.5, este número difuso representa la calificación que pudiese tener alguna observación que sería clasificada como 7 en una escala discreta

También es posible utilizar otras formas como una curva de pertenencia gaussiana.

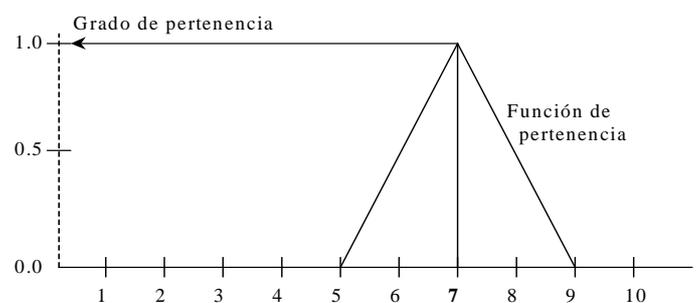


Figura 1. Representación gráfica de un número difuso.

¿Cómo pueden ser determinadas las funciones de pertenencia?

Los métodos de determinación pueden ser subdivididos en las siguientes categorías:

- Evaluación subjetiva o estimulación; los conjuntos difusos usualmente tratan de modelar los niveles de conocimiento de la gente, ellos pueden ser determinados mediante procedimientos simples o sofisticados de encuestas. O en último caso, los expertos pueden ser inducidos a dibujar o especificar las funciones de pertenencia apropiadas para un determinado problema. También se puede proponer un determinado conjunto de

curvas apropiadas para escoger. Bajo métodos más complejos los expertos pueden ser estimulados mediante pruebas de preguntas utilizando métodos psicológicos.

- Formas ad-hocs; mientras existe un vasto número de formas para funciones de pertenencia, en la actualidad los sistemas basados en lógica difusa utilizan un número limitado de curvas, por ejemplo formas triangulares. Lo anterior simplifica el problema en sólo tener que escoger el valor central junto con las pendientes a ambos lados.
- Conversión de frecuencias o probabilidades; a veces la información obtenida en la forma de histogramas de frecuencia y curvas de probabilidad es utilizada como base para construir las funciones de pertenencia. Sin embargo se debe tener presente que las funciones de pertenencia no son probabilidades.
- Mediciones físicas; muchas aplicaciones de la lógica difusa utilizan mediciones físicas, pero casi ninguna mide el grado de pertenencia directamente. En cambio la función de pertenencia, es obtenida por otro método, y luego los grados de pertenencia individuales son calculados a partir de ella.
- Aprendizaje y adaptación; definidas las formas de las funciones de pertenencia a utilizar dentro de un sistema de decisiones, mediante el seguimiento de sus resultados, las funciones de pertenencia pueden ser mejoradas con el propósito de explicar de mejor forma las operaciones y diagnósticos obtenidos.

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

A modo de ejemplo tomemos lo que se conoce como la inspección cualitativa de un pavimento asfáltico, que a nivel de pre ingeniería sería como la primera apreciación del estado de un pavimento. Además consideremos para la representación de los números difusos una forma triangular ya que es la más simple de trabajar.

En un pavimento asfáltico pueden ser calificados cualitativamente la magnitud de cinco tipos de deterioro, como ser: ahuellamiento, grietas longitudinales, grietas transversales, grietas tipo piel de cocodrilo y rugosidad. La calificación de estos deterioros, R_i , puede realizarse haciendo uso de la escala semántica que se presenta en la Tabla 1, la representación gráfica del concepto **Moderado** (Mo) se muestra en la Figura 2.

En la Tabla 1 se muestran los cinco conceptos, de forma triangular, que se utilizaran para clasificar un deterioro, a cada uno de ellos se les ha representado por un código de dos letras que será utilizado mas adelante. Por ejemplo el concepto **Moderado** (Mo) ha sido asociado a un número difuso en torno a 3, es decir en la escala de 1 a 9 se le ha asignado el valor de pertenencia igual a 1.0 al número 3.

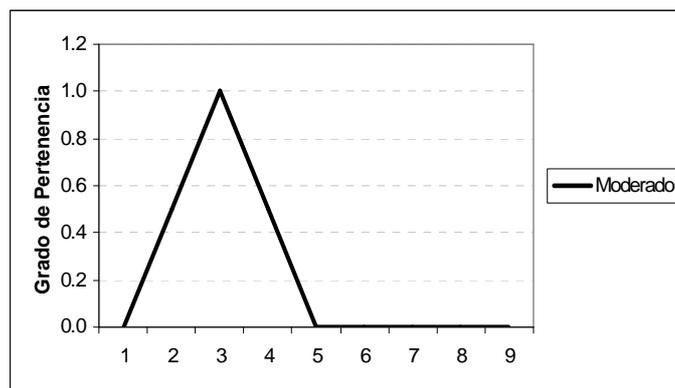


Figura 2. Representación gráfica de la Calificación del deterioro

La ocurrencia de cada deterioro es asignada mediante una inspección visual. Personal debidamente entrenado puede ser encargado de la inspección visual y así reconocer el tipo de deterioro y luego calificarlo. El entrenamiento para realizar esta actividad puede ser realizado en un periodo relativamente corto, sin embargo el entrenamiento para entender la significancia de cada deterioro puede tomar años, correspondiendo este conocimiento a los expertos en el tema. Para efectos de este ejemplo la importancia, W_i , de cada deterioro será representada por las escalas que se incluyen en las Tabla 2 y Tabla 3, nótese que la significancia de cada deterioro no corresponde a una escala absoluta por lo tanto no significa que las grietas transversales no son absolutamente No importantes.

Definidas las escalas de calificación e importancia de cada deterioro, la evaluación de todo el pavimento es determinada mediante un promedio ponderado de números difusos, quedando definida por la siguiente formula:

$$R = \frac{\sum R_i * W_i}{\sum W_i}$$

Donde:

R : Número difuso que representa la evaluación del pavimento.

R_i : Calificación del deterioro i , Tabla 1

W_i : Significancia del deterioro i comparado con otros deterioros, Tabla 2.

Consecuente con la metodología propuesta, la evaluación total de una sección de pavimento debe ser expresada en términos lingüísticos, en vez de una escala numérica única, esto debido a que pareciera ser mas subjetiva. La Tabla 4 entrega los números difusos correspondientes a la evaluación final del pavimento, a los cuales se les ha asignado un código de dos letras para efectos de este ejemplo. Las tablas 2, 3 y 4 representan la opinión de los expertos, una vez que están definidas, el promedio ponderado es utilizado para calcular el número difuso que mejor representa la evaluación del pavimento.

Tabla 1. Calificación del deterioro, Ri.

Escala	Código	Número difuso asociado								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
No existe	Ne	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moderado	Mo	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Significativo	Si	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Severo	Se	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
Extremo	Ex	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

Tabla 2. Significancia de cada deterioro.

Escala	Número difuso asociado								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No importante	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moderadamente importante	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Importante	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Muy importante	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
Extremadamente importante	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

Tabla 3. Ponderadores de cada deterioro, Wi.

Deterioro	Ponderador
Ahuellamiento	Importante
Grietas Longitudinales	Moderadamente importante
Grietas Transversales	No importante
Grietas Piel de Cocodrilo	Extremadamente importante
Rugosidad	Muy importante

Tabla 4. Lenguaje natural para traducir la evaluación final del pavimento.

Escala	Código	Número difuso asociado								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sin Deterioro	SD	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Deterioro Moderado	DM	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Deteriorado	DE	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Severamente Deteriorado	SV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
Totalmente Deteriorado	TD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

Las secciones de pavimento evaluadas mediante esta metodología pueden ser finalmente comparadas con el propósito de establecer su condición actual y/o las necesidades de mantención o rehabilitación. La comparación, entre secciones de pavimento, puede ser

simplificada mediante la aplicación del índice de deterioro, ID, que se muestra en la siguiente fórmula.

$$ID = \frac{A_I - A_D + C}{2 * C}$$

Donde:

ID : Índice de deterioro.

A_I : Área a la izquierda del número difuso.

A_D : Área a la derecha del número difuso.

C : Área igual al universo de los números difusos.

Por ejemplo un pavimento que como resultado de la evaluación entrega el número difuso, **R**, que se presenta en la Figura 3.

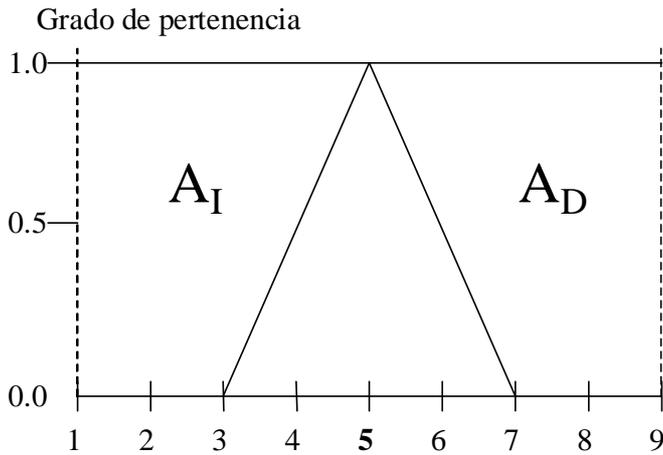


Figura 3. Ejemplo de resultado de evaluación.

$R := \{0.0/1, 0.0/2, 0.0/3, 0.5/4, 1.0/5, 0.5/6, 0.0/7, 0.0/8, 0.0/9\}$

Tabla 5. Evaluación del pavimento v/s ID Índice de deterioro.

Código	Evaluación	ID
SD	Sin Deterioro	0.06
DM	Deterioro Moderado	0.25
DE	Deteriorado	0.50
SV	Severamente Deteriorado	0.75
TD	Totalmente Deteriorado	0.94

Por ejemplo secciones de pavimento calificadas de acuerdo a la Tabla 1 y a la metodología propuesta entregan los resultados que se incluyen en la Tabla 6.

Tabla 6. Secciones de pavimentos evaluadas.
Número de sección evaluada

Deterioro evaluado	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahuellamiento	Mo	Si	Si	Se	Mo	Se	Si	Mo
Grietas Longitudinales	Si	Mo	Si	Si	Si	Se	Ex	Si
Grietas Transversales	Se	Ex	Mo	Si	Ne	Ne	Ex	Ne
Grietas Piel de Cocodrilo	Mo	Si	Ex	Ex	Ex	Se	Mo	Mo
Rugosidad	Mo	Mo	Si	Se	Si	Se	Mo	Si

Cálculo del ID	0.32	0.43	0.60	0.74	0.55	0.70	0.41	0.35
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

Comparación con valores de la

Tabla

SD	0.26	0.37	0.54	0.68	0.49	0.64	0.35	0.29
DM	0.07	0.18	0.35	0.49	0.30	0.45	0.16	0.10
DE	-0.18	-0.07	0.10	0.24	0.05	0.20	-0.09	-0.15
SV	-0.43	-0.32	-0.15	-0.01	-0.20	-0.05	-0.34	-0.40
TD	-0.62	-0.51	-0.34	-0.20	-0.39	-0.24	-0.53	-0.59
Evaluación Final	DM	DE	DE	SV	DE	SV	DE	DM

Corresponde a un índice de deterioro de:

$$ID = (3 - 3 + 8) / (2 \cdot 8) = 0.50$$

Este índice de deterioro, resultante del promedio ponderado de la evaluación total del pavimento, puede ser traducido a un lenguaje natural utilizando la Tabla 5 que entrega los índices correspondientes a las definiciones entregadas en la Tabla 4, mediante una simple comparación de cercanía del valor resultante, para luego transformar la evaluación en un lenguaje natural.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

La metodología propuesta es capaz de capturar información poco precisa, mediante la utilización de la representación del lenguaje natural a través de números difusos.

Se provee de una metodología confiable, fácil y consistente para la evaluación preliminar de la condición de un pavimento.

Procedimientos y métodos similares pueden ser utilizados en la evaluación preliminar de infraestructura como ser, puentes, puertos, túneles etc., con el propósito de verificar su condición y establecer sus necesidades de mantención o de una inspección mas especializada.

5. REFERENCIAS

CAROCA A. (1994), Tesis para optar al título de Master en Ingeniería, "Aplicability of Fuzzy Expert Systems for the Selection of Pavement Maintenance Rehabilitation Options", Faculty of Engineering, University of Pretoria, Pretoria, South Africa 1994,

DONG W.M., WONG F.S. (1993), " Fuzzy weighted averages and implementation of the extension principle", Stanford University, Stanford, USA, November 1985.

GRIVAS D.A., AND SHEN Y.C. (1991), "A Fuzzy set approach for pavement damage assessments", Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, November 1991.

SHEN Y.C. (1991), "Pavement Mangement Decision Methodology and Decision Support System" A thesis submitted to the graduate faculty of resselaeer polytechnic institute in partial fulfillment of the equirements for the degree of Doctor of Philosophy, Troy, New York, November 1991

SHRP-P-338, "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.

ZADEH L. A. (1996), "Fuzzy sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy systems", edited by George J Klir & Bo Yuan, SUNY Binghamton, May 1996.

Andrés Caroca Baeza
Ingeniero Civil, M.Sc.
APSA Ltda. Gestión de Infraestructura

Civil Engineer, MSc.
APSA Ltda. Infrastructure Management
apsa@apsa.cl