



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

Departamento de Posgrados

**Generación de índice integrado de calidad del aire en el cantón
Cuenca basado en contaminantes atmosféricos utilizando
lógica difusa**

**Maestría en Sistemas de Información, mención Inteligencia de Negocios,
versión 1**

Autor:

Boris Alejandro Criollo Zúñiga

Director:

Paúl Andrés Patiño León

Cuenca – Ecuador

2023

DEDICATORIA

Dedicado a Dios, a mi Padre, Tete, Cristina, y al
Boris de la infancia (te sorprenderías de todo lo que
has logrado).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi Padre, ya que por ellos soy quien soy y estoy donde estoy. Gracias a Cristina por todo su amor, inspiración y paciencia. A Mami, Tete, Mili, Taty, Álvaro, Moni, Caro, Andy, Vale, Nano, Sofy, Vicky y Cosmi por todo su soporte y cariño. Gracias a mis compañeros de música y de trabajo por su comprensión. A mi director Andrés por su guía en este proceso de titulación. A mis profesores por su enseñanza. A mis amigos y a todos quienes me brindaron su apoyo y están pendientes de mi bienestar y superación.

¡Muchas gracias!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	iv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
II. MARCO TEÓRICO.....	2
Contaminantes atmosféricos.....	2
Índice de calidad del aire.....	4
Lógica difusa.....	5
III. ESTADO DEL ARTE	6
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
Etapas del SPEM.....	9
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Resultados del análisis exploratorio de datos	16
Resultados del preprocesamiento	19
Resultado de la estandarización de los rangos de O ₃	20
Resultados de las funciones de pertenencia	20
Reglas de inferencia	25
Sistema difuso	25
Reportes de ICA por temporalidad	26
VI. CONCLUSIONES	32
REFERENCIAS.....	34
ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Correspondencia de valores para el cálculo del índice de calidad del aire	5
Figura 2 Diagrama SPEM de la metodología	9
Figura 3 Valores categóricos de las etiquetas	12
Figura 4 Intersección de las funciones de pertenencia en los límites superiores de los rangos ..	13
Figura 5 Punto medio de las etiquetas de O ₃	14
Figura 6 Media de O ₃ y PM _{2.5} por día de la semana	16
Figura 7 Media de O ₃ y PM _{2.5} por hora	16
Figura 8 Dispersión de O ₃ por mes.....	17
Figura 9 Dispersión de PM _{2.5} por mes	18
Figura 10 Dispersión de O ₃ por hora	18
Figura 11 Dispersión de PM _{2.5} por hora	19
Figura 12 Funciones de pertenencia triangulares del O ₃ , PM _{2.5} e ICA.....	22
Figura 13 Funciones de pertenencia trapezoidales del O ₃ , PM _{2.5} e ICA	23

Figura 14	Funciones de pertenencia gaussianas del O ₃ , PM _{2.5} e ICA	24
Figura 15	Sistema difuso implementado en Matlab Fuzzy Logic Designer	26
Figura 16	Gráfico de los resultados de los sistemas difusos. Lunes – 0:00.....	28
Figura 17	Gráfico de los resultados de los sistemas difusos. Lunes – 6:00.....	29
Figura 18	Gráfico de los resultados de los sistemas difusos. Lunes – 12:00.....	31
Figura 19	Gráfico de los resultados de los sistemas difusos. Lunes – 18:00.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Codificación de colores y consideraciones para la salud por rango ICA	4
Tabla 2	Medidas estadísticas de contaminantes atmosféricos.....	10
Tabla 3	Valores perdidos de O ₃ y PM _{2.5}	10
Tabla 4	Etiquetas para las variables de entrada (O ₃ , PM _{2.5}) y de salida (ICA).....	11
Tabla 5	Límite superior para cada etiqueta de O ₃	12
Tabla 6	Factor para funciones de pertenencia triangulares de O ₃	13
Tabla 7	Etiquetas, factor y variación para funciones de pertenencia triangulares de O ₃	14
Tabla 8	Generación de reglas de inferencia	15
Tabla 9	Muestras eliminadas en el preprocesamiento	19
Tabla 10	Rangos del O ₃ transformados de ppm a µg/m ³	20
Tabla 11	Variables lingüísticas, factor y variación para funciones triangulares	21
Tabla 12	Valores para las funciones de pertenencia triangular para el O ₃ , PM _{2.5} e ICA.....	22
Tabla 13	Valores para las funciones de pertenencia trapezoidal para el O ₃ , PM _{2.5} e ICA.....	23
Tabla 14	Valores para las funciones de pertenencia gaussianas para el O ₃ , PM _{2.5} e ICA	24
Tabla 15	Reglas de inferencia	25
Tabla 16	Resultados y etiquetas de los sistemas difusos. Lunes – 0:00.....	26
Tabla 17	Resultados y etiquetas de los sistemas difusos. Lunes – 6:00.....	28
Tabla 18	Resultados y etiquetas de los sistemas difusos. Lunes – 12:00.....	30
Tabla 19	Resultados y etiquetas de los sistemas difusos. Lunes – 18:00.....	31

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1)	Índice de calidad del aire para cada contaminante	4
(2)	Límite de valores atípicos	11
(3)	Transformación de ppm a µg/m ³	11
(4)	Variación general para apertura de funciones de pertenencia	14
(5)	Variación de cada etiqueta para apertura de funciones de pertenencia.....	14

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Pasos para el preprocesamiento de datos	38
Anexo 2	Pruebas empíricas para determinar valor de variación	39
Anexo 3	Código para ejecución de los sistemas difusos en Matlab.....	69
Anexo 4	Resultados de los métodos de desfuzzificación disponibles en Matlab	70

RESUMEN

En la ciudad de Cuenca – Ecuador, para prevenir los efectos nocivos de la contaminación en la población, se desarrolló un índice de calidad del aire basado en las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, el mismo que es resultado del contaminante con mayor valor y utiliza una escala mediante conjuntos rígidos. El presente estudio plantea una alternativa de cálculo para el índice de calidad del aire utilizando los contaminantes ozono (O_3) y material particulado $PM_{2.5}$; así como técnicas de lógica difusa que permitan generar una clasificación por etiquetas lingüísticas que se aproximen más al razonamiento humano y al criterio de expertos. Se implementaron tres sistemas difusos tipo Mamdani, usando funciones de pertenencia triangulares, trapezoidales y gaussianas; con 30 reglas de inferencia y método de desfuzzificación del centroide. Los resultados demuestran la factibilidad de aplicación de lógica difusa para la generación de un índice de calidad del aire.

Palabras clave: Lógica difusa, Mamdani, funciones de pertenencia triangular, trapezoidal, gaussiana, índice de calidad del aire, Fuzzy Logic Designer.

ABSTRACT

In Cuenca – Ecuador, in order to prevent the harmful effects of pollution on the population, an air quality index was developed based on the recommendations of the Environmental Protection Agency of the United States, which is the result of the pollutant with the highest value and uses a scale through crisp sets. This study proposes an alternative calculation for the air quality index using the pollutants ozone (O₃) and particulate matter PM_{2.5}, as well as fuzzy logic techniques to generate a classification by linguistic labels that are closer to human reasoning and expert criteria. Three Mamdani-type fuzzy systems were implemented by using triangular, trapezoidal, and Gaussian membership functions; with 30 inference rules and defuzzification by the centroid method. The results demonstrate the feasibility of applying fuzzy logic for the generation of an air quality index.

Keywords: Fuzzy logic, Mamdani, membership functions, triangular, trapezoidal, gaussian, air quality index, Fuzzy Logic Designer.

Translated by



Boris Criollo

