

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE  
ATMOSFÉRICO PRODUCIDO POR FUENTES MÓVILES DEL ÁREA  
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. CONSIDERANDO LA  
INCERTIDUMBRE Y LOS ASPECTOS CUALITATIVOS

MARCELA JAIMES BECERRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS: INFORMÁTICA Y CIENCIAS DE LA  
COMPUTACIÓN  
BUCARAMANGA  
2007

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE  
ATMOSFÉRICO PRODUCIDO POR FUENTES MÓVILES DEL ÁREA  
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. CONSIDERANDO LA  
INCERTIDUMBRE Y LOS ASPECTOS CUALITATIVOS**

**MARCELA JAIMES BECERRA**

**Trabajo de grado para optar por el título de:  
Magíster en Ingenierías con énfasis en Informática y Ciencias de la  
Computación**

**Director**

**JORGE LUIS CHACÓN VELASCO  
Doctor en Procesos Termofluidodinámicos**

**Codirector**

**EDGAR FERNANDO CASTILLO MONRROY  
Doctor en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA  
2007**

## **AGRADECIMIENTOS**

Parte de esta investigación ha sido posible gracias al trabajo en equipo realizado por los estudiantes de pregrado de ingeniería de sistemas que desarrollaron el prototipo de software de simulación para modelos difusos de la polución del aire SEXDP. Gracias a; Ferney Farid Fuentes Morelo, Edwin Ernesto Anaya Almeida. Gracias por su esfuerzo y colaboración, al igual que por haberse integrado.

Gracias al director de esta investigación; Doctor Jorge Luis Chacón Velasco, por haber realizado su aporte en base a sus bastos conocimientos en Lógica Difusa, por su disponibilidad. Por colaborar en la orientación de los estudiantes de pregrado que participaron en la investigación. Y gracias por haber guiado en la escritura de las publicaciones requeridas.

Gracias al codirector; Doctor Edgar Fernando Castillo Monrroy, por haber realizado su aporte en base a sus amplios conocimientos en “la Contaminación del Aire en el Área Urbana de Bucaramanga”, gracias por revisar todos los documentos y trabajos de esta investigación.

Gracias a los otros estudiantes de pregrado que participaron en la investigación; gracias a Victoria por colaborar en la obtención de los datos experimentales en el desarrollo del modelo de la dispersión del aire en Bucaramanga. Gracias a Raúl Fernando Castro por colaborar en la consecución de material para la revisión del estado del arte.

Gracias al CEIAM por su apoyo científico permanente, por su apoyo moral durante las presentaciones públicas de los trabajos de esta investigación. Gracias por realizar prestamos de logística cuando no se contaba con estos. Y en especial gracias a la ingeniera Ligia Patricia Arenas, candidata a magíster en Ingeniería Química y experta en “Contaminación del Aire”.

También gracias al grupo GIEMA por prestar su logística tiempo completo, y gracias por permitir a través de su director aplicar a la ayuda económica para la compra de equipos en el DIEF.

Gracias a mi esposo, el ingeniero Pedro Alonso Dulcey Vesga, especialista en Ingeniería del Medio Ambiente, quien me brindó todo el apoyo moral y económico durante toda la maestría. Más algunas asesorías técnicas y de manejo de personal. Además de enseñarme excelentes técnicas de estudio.

Gracias a mi hija, Laura Sofía Dulcey Jaimes. Por conseguir entretenerme y relajarme cuando el stress se complicaba.

Gracias a mi madre, Marina Becerra de Jaimes.

Gracias a mi padre, José Humberto Jaimes Monsalve (qpd).

Gracias a la señora Bety Mantilla Mejía. Por ayudarme a cuidar mi hija.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por haberme brindado esta oportunidad y en especial por haberme otorgado la beca durante el año 2005, tiene un valor inmensurable.

Gracias a Dios por esta casa tan linda que nos dio ("*El planeta Tierra*") que hoy tenemos el deber moral de preservar para los futuros moradores, nuestros hijos.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>17</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
<b>1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>19</b>
1.2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2.2. IMPACTO ESPERADO	20
1.2.3. USUARIOS DIRECTOS E INDIRECTOS	20
1.2.5. OBJETIVOS	22
1.2.6. METODOLOGÍA PROPUESTA	22
<b>2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>	<b>24</b>
<b>2.1. "ESTUDIO COMPARATIVO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR LA OPERACIÓN DE UN S.I.T.M EN BUCARAMANGA" (AMADO, JUAN. ET AL. 2004).</b>	<b>24</b>
<b>2.2. "UN ESTUDIO SOBRE EL CLIMA URBANO EN BUCARAMANGA" (LAZAR, REINHOLD. Y EDER, JOSEF. 2001).</b>	<b>25</b>
<b>2.3. "EL ESTIMATIVO DE LA EMISIÓN DE LOS GASES DE INVERNADERO" (IDEAN. 1990).</b>	<b>28</b>
<b>2.4. "SOLUCIÓN NUMÉRICA AL PROBLEMA DEL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE" (FEDOSSOVA, ALINA. ET AL. 2004)</b>	<b>29</b>
<b>2.5. "IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF FUZZY MODEL FOR AIR POLLUTION - AN APPROACH TO SELF-LEARNING CONTROL OF CO CONCENTRATION-" (KASUO, TANAKA. HIROYUKI, WATANABE. 1992).</b>	<b>30</b>
<b>2.6. "SERIES DE TIEMPO BORROSAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE" (MORABITO, FRANCESCO. ET AL. 2002).</b>	<b>32</b>
<b>2.7. A NEW DIRECTION IN AI. TOWARD A COMPUTATIONAL THEORY OF PERCEPTIONS. (LOFTI A ZADEH. 2001)</b>	<b>33</b>
2.7.1. TIPOS DE PROBLEMAS DE LA TEORÍA COMPUTACIONAL DE LAS PERCEPCIONES:	35
<b>2.8. MEGACITIES AND ATMOSPHERIC POLLUTION. (MARIO J MOLINA Y LUISA T MOLINA. 2004)</b>	<b>36</b>
<b>3. MODELO DIFUSO DE LA DISPERSIÓN DEL AIRE EN BUCARAMANGA</b>	<b>37</b>
<b>3.1. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL MODELO</b>	<b>37</b>
<b>3.2. DETERMINACIÓN DE LOS CONJUNTOS Y SUBCONJUNTOS BORROSOS Y SUS FUNCIONES DE PERTENENCIA</b>	<b>40</b>
3.2.1. VOLUMEN DEL TRÁFICO	40
3.2.2. VELOCIDAD DEL VIENTO	41
3.2.3. TEMPERATURA	42
3.2.4. INTENSIDAD SOLAR	43
<b>3.3. SALIDAS DEL MODELO</b>	<b>43</b>
3.3.1. COEFICIENTES POR CONTAMINANTE	44
<b>3.3.2. COEFICIENTES RESULTANTES POR REGLA</b>	<b>52</b>
<b>3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS REGLAS DE INFERENCIA</b>	<b>53</b>
<b>4. VALIDACIÓN DEL MODELO</b>	<b>55</b>

<b>4.1. CÁLCULO DEL ERROR</b>	<b>55</b>
<b>4.2. VALIDACIÓN DEL MONÓXIDO DE CARBONO</b>	<b>56</b>
<b>4.3. VALIDACIÓN DEL OZONO</b>	<b>58</b>
<b>4.4. VALIDACIÓN DEL MATERIAL PARTÍCULADO SUPERIOR A 10 MICRAS</b>	<b>61</b>
<b>4.5. VALIDACIÓN DEL MONÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	<b>62</b>
<b>4.6. VALIDACIÓN DEL DIÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	<b>64</b>
<b><u>5 ESPECÍFICACIONES DEL PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN</u></b>	<b><u>66</u></b>
<b>5.1. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>66</b>
<b>5.2. CASOS DE USO</b>	<b>66</b>
<b>5.3. OTROS OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>67</b>
<b>5.4. DISEÑO DE VENTANAS</b>	<b>68</b>
<b>5.4.1. INICIO</b>	<b>68</b>
<b>5.4.2. PRINCIPAL</b>	<b>69</b>
<b>5.4.3. CONFIGURACIÓN DEL FIS</b>	<b>69</b>
<b>5.4.4. PARTICIÓN DE CONJUNTOS BORROSOS</b>	<b>71</b>
<b>5.4.5. REGLAS DE INFERENCIA</b>	<b>72</b>
<b>5.4.6. VARIABLE DE SALIDA</b>	<b>74</b>
<b><u>6. DISEÑO DE ALTO NIVEL DEL PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN</u></b>	<b><u>76</u></b>
<b>6.1. DIVISIÓN DEL “SISTEMA EXPERTO DIFUSO PARA LA POLUCIÓN”, EN PAQUETES</b>	<b>77</b>
<b>6.2. PAQUETE LIBRERÍA “INTERFASE GRÁFICA DEL USUARIO”</b>	<b>79</b>
<b>6.3. PAQUETE “MOTOR DE INFERENCIA”</b>	<b>79</b>
6.3.1. MÓDULO “PARA”	81
6.3.2. MÓDULO “CVAR”	85
6.3.3. MÓDULO “OPER”	91
6.3.4. MÓDULO “RULE”	97
<b><u>7. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN</u></b>	<b><u>102</u></b>
<b><u>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u></b>	<b><u>109</u></b>
<b><u>9. BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b><u>111</u></b>
<b><u>APENDICE I. REGLA COMPOSICIONAL DIFUSA DE INFERENCIA</u></b>	<b><u>115</u></b>
<b>I.I REGLAS MIN_MAX DE IMPLICACIÓN</b>	<b>115</b>
<b>I.II REGLAS ADITIVAS DE IMPLICACIÓN</b>	<b>116</b>
<b>I.III EJEMPLO DE IMPLICACIÓN DIFUSA</b>	<b>119</b>
<b>I.IV MÉTODOS DE CORRELACIÓN</b>	<b>121</b>
<b>I.V CORRELACIÓN MÍNIMA</b>	<b>121</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Concentración de contaminantes registrados en la Estación Zona Centro	25
Figura 2-2: Mapa con la Intensidad de la Isla de Calor y la Situación Térmica en General	27
Figura 2-3: Entradas y Salida de un modelo de la polución del aire	30
Figura 2-4: Estructura de la Información	33
Figura 3-1: Sistema de Inferencia	39
Figura 4-1: Validación del CO	57
Figura 4-2: Validación del O <sub>3</sub>	59
Figura 4-3: Validación del MP <sub>10</sub>	61
Figura 4-4: Validación del NO	63
Figura 4-5: Validación del NO <sub>2</sub>	64
Figura 5-1: Diseño del Panel de Inicio	69
Figura 5-2: Diseño de la Ventana “Configuración del FIS”	70
Figura 5-3: Diseño de la Ventana “Partición de Conjuntos Borrosos”	71
Figura 5-4: Diseño de la Ventana “Reglas de Inferencia”	73
Figura 5-5: Diseño de la Ventana “Variable de Salida”	74
Figura 6-1: Diagrama de Paquetes de <b>SEXDP</b>	78

Figura 6-2: Paquete “ <b>Interface Gráfica del Usuario</b> ”	79
Figura 6-3. Diagrama de Paquetes del Paquete “ <b>Motor de Inferencia</b> ”	80
Figura 6-4: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo “para”	81
Figura 6-5: Diagrama de clases de perspectiva Implementación del módulo “cvar”	86
Figura 6-6: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo “Oper”	92
Figura 6-7: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo “Rule”	98
Figura 7-1: Panel de Inicio, con las variables sugeridas por la herramienta	103
Figura 7-2: Ingreso desde el Panel de Inicio a la ventana de los “Parámetros”	103
Figura 7-3: Ventana de los “Parámetros”	104
Figura 7-4: Ventana General para las Variables Lingüísticas y las Reglas	104
Figura 7-5: Ventana “Variable Lingüística”	105
Figura 7-6: Ventana “Reglas de Inferencia”	106
Figura 7-7: Ventana de los “Resultados”	107

Figura 7-8: Ventana que Arroja los Resultados del Modelo Sugerido sobre el Toolbox de Matlab	108
Figura I-I. Conjunto Difuso del Incremento del Riesgo	117
Figura I-II. Variable Solución RIESGO después de la primera proposición	118
Figura I-III. Incremento correlacionado al nivel [0.33]	119
Figura I-IV. Solución de la Variable RIESGO Después de Actualizar el Método Adictivo de Implicación	119
Figura I-V. Aplicación de las Reglas Usando la Técnica de Inferencia Min_Max	120

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1: Datos tomados por la estación centro de la CDMB en el año 2003	42
Tabla 3-2: Especificación de la salida “y” según el subíndice	44
Tabla 3-3: Especificación de la variable de entrada “x” según el subíndice	44
Tabla 3-4: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de CO baja tal como el vector “y”	45
Tabla 3-5: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de CO media tal como el vector “y”	45
Tabla 3-6: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de CO alta tal como el vector “y”	46
Tabla 3-7: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de O <sub>3</sub> baja tal como el vector “y”	46
Tabla 3-8: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de O <sub>3</sub> media tal como el vector “y”	47
Tabla 3-9: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de O <sub>3</sub> alta tal como el vector “y”	47
Tabla 3-10: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP <sub>10</sub> baja tal como el vector “y”	48
Tabla 3-11: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP <sub>10</sub> media tal como el vector “y”	48

Tabla 3-12: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP <sub>10</sub> alta tal como el vector “y”	48
Tabla 3-13: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO baja tal como el vector “y”	49
Tabla 3-14: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO media tal como el vector “y”	49
Tabla 3-15: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO alta tal como el vector “y”	50
Tabla 3-16: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO <sub>2</sub> baja tal como el vector “y”	50
Tabla 3-17: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO <sub>2</sub> media tal como el vector “y”	51
Tabla 3-18: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO <sub>2</sub> alta tal como el vector “y”	51
Tabla 3-19: Coeficientes para las reglas cuya salida es baja por contaminante	52
Tabla 3-20: Coeficientes para las reglas cuya salida es media por contaminante	52
Tabla 3-21: Coeficientes para las reglas cuya salida es alta por contaminante	52
Tabla 4-1: Validación de las variables de salida del modelo frente a datos experimentales	56
Tabla 4-2: Validación del CO	58

Tabla 4-3: Validación del O <sub>3</sub>	60
Tabla 4-4: Validación del MP <sub>10</sub>	62
Tabla 4-5: Validación del NO	63
Tabla 4-6: Validación del NO <sub>2</sub>	65
Tabla 7-1: Tabla Comparativa de los Resultados de SEXDP Frente al Toolbox de Matlab para un Mismo Modelo Sugerido	121

## RESUMEN

Título: \*

Autor: Marcela Jaimes Becerra. \*\*

Palabras Claves: Lógica Difusa, Contaminación del Aire, Diseño Orientado a Objetos.

Contenido:

Este es un trabajo de investigación que comprende dos objetivos que difieren en su desarrollo, pero que al mismo tiempo están relacionados con la "**Lógica Difusa**".

Mientras el primero se centra en obtener un modelo de predicción de la concentración de los contaminantes criterio, en la zona centro de la meseta de Bucaramanga, donde la emisión de gases contaminantes es producida por el flujo vehicular de manera específica [1]. Así mismo, existe incertidumbre en los factores que inciden en la predicción de la "**Contaminación del Aire**", además algunos de estos son difíciles de modelar con los métodos tradicionales. La "**Lógica Difusa**" es una opción de gran potencial para el fenómeno de interés. Los datos fueron suministrados por la CDMB (Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga) y la DT (Dirección de Tránsito y Transporte de Bucaramanga).

El segundo trata del desarrollo de un prototipo de software de simulación que emplea la "**Lógica Difusa**" para modelos de la "**Contaminación del Aire**". Para tal propósito, se empleó el "**Diseño y Programación Orientada a Objetos Con UML (Lenguaje Unificado para el modelado)**". El lenguaje de programación que se usó fue el JAVA

Los resultados de ambos objetivos fueron muy satisfactorios. Mientras en el primero, empleando la toolbox de Matlab, el margen de error medio cuadrático por contaminante criterio oscila entre 0.05 y 0.15. En el segundo objetivo los resultados generados por el prototipo de software son exactos, para un mismo modelo de contaminación del aire, con las mismas condiciones y datos de entrada, que también se configura sobre otra plataforma disponible, de uso muy similar y muy aceptada en el medio.

---

\* Modelado y Simulación de la Contaminación del Aire Atmosférico Producida por las Fuentes Móviles es el Área Metropolitana de Bucaramanga, Considerando la Incertidumbre y los Aspectos Cualitativos.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Maestría en Ingenierías con Énfasis en Informática y Ciencias de la Computación. Director: Jorge Luís Chacón Velasco.

## ABSTRACT

Title: \*

Autor: Marcela Jaimes Becerra. \*\*

Key words: Fuzzy Logia, Air Pollution y, Oriented to Objects Design.

Content:

This Research is a work that group two objectives that are different in its developing, But at the same time they have relation with "**Fuzzy Logic**".

While first is a model of prediction of the criteria concentration pollutants, in the center zone at the Bucaramanga city, where the emission of pollutant gases is specific produced by the vehicles flow [1]. In addition, there is uncertainty in the factors that influence in the prediction of "**Air Pollution**", Furthermore some of these are too hard to model with the traditional methods. The fuzzy logic is the advisable theory in order to the interest phenomena. The data information was taken from the CDMB (Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga) and the DT(Dirección de Tránsito y Transporte de Bucaramanga).

The second deals the developing of simulation software prototype that uses the **Fuzzy Logic** in order to build "**Air Pollution**" models. For this purpose the "**Oriented to Objects Design with UML (Unified Modeling Language)**" was used. The programming language was JAVA.

The results in the objectives were very success. While in the first, using the Matlab's Toolbox, the squared media mistake is between (0.5, 0.15). In the second, the results generated by the software prototype was exactly the same; for a same air pollution model, with the same conditions and enter data, over another able tool that is very accepted in the world and its use is similar.

---

\* Modeling and Simulation of Air Pollution caused by vehicles at Metropolitan Area in Bucaramanga City. Considering the Uncertainty and Qualitative Issues.

\*\* Faculty: Physical – Mechanical Engineering. Mastery: Engineering with Emphasis in Knowledge and Computing Science. Director: Jorge Luís Chacón Velasco.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2000 el 48% de la población vivía en áreas urbanas y respecto al número de habitantes se espera un crecimiento del 2% por año durante las siguientes tres décadas. Estas concentraciones de personas y sus actividades, ha generado consecuencias nefastas en los niveles; urbano, regional, continental e incluso a nivel global; tales como el deterioro de la capa de ozono, el efecto invernadero, la lluvia ácida y el tan temido calentamiento global, que a su vez, trae consigo las inundaciones y sequías con una frecuencia que se incrementa en forma directa proporcional a la actividad urbana, además de afectar la salud pública.

Sin embargo, es posible administrar el crecimiento de la población de una manera sostenible, como ya se ha comprobado en centros desarrollados y, cómo no se ha conseguido en áreas urbanas en desarrollo; tal es el caso de Bucaramanga. La buena noticia, es que aún es posible incluso recuperar riquezas del medio ambiente que por ahora están en deterioro.

Pero para poder lograrlo, es necesario una planeación adecuada con nuevas tecnologías para controlar las emisiones. Este estudio se centra en el modelado de la polución del aire atmosférico ocasionado por las emisiones vehiculares del área metropolitana de Bucaramanga. Con el fin de regular de una mejor manera las emisiones del parque automotor, es necesario trazar políticas más eficaces. Y para esto es preciso conocer el fenómeno desde una perspectiva holística que permita comprender su complejidad.

La Lógica Difusa es una teoría computacional basada en las percepciones de los organismos biológicos altamente desarrollados y que se usa en la construcción de Modelos Complejos. El fenómeno de la contaminación del aire es de esta naturaleza. Además la Lógica Difusa es la teoría adecuada para resolver problemas donde existen grandes incertidumbres y poca disponibilidad y acceso de información experimental.

Además, la Lógica Difusa al igual que otras tecnologías nuevas que también se les conoce como las soft computing, más otras teorías ya son áreas de estudio en los diferentes centros y grupos de investigación en la Universidad Industrial de Santander, tales como; GIEMA, CEIAM y SIMON, entre otros.

Por otra parte, en la actualidad, las herramientas software para simular modelos con Lógica Difusa son muy costosas de adquirir en el mercado, y, las que se encuentran disponibles, presentan algunas limitaciones en la aplicación de modelos de complejos, como es el caso de la contaminación del aire. Es por esto, que en esta investigación se considera de suma importancia promover en el GIEMA, en el CEIAM y en general en la Universidad Industrial de Santander, el desarrollo de herramientas propias. A través del desarrollo de un prototipo de software de simulación que funcione como un sistema experto para modelos difusos. En el cual se puedan efectuar operaciones básicas de la “Lógica Difusa” y algunas más especializadas, que son muy útiles en modelos de la polución del aire. Y mediante el uso de tecnologías que faciliten el desarrollo de futuras versiones como es el UML y la programación orientada a objetos.

El presente documento se divide en nueve capítulos y un apéndice. El primero “Propuesta de la Investigación”, el segundo “Marco Teórico y Estado del Arte”, el tercero “Modelo Difuso de la Dispersión del Aire en Bucaramanga”, el cuarto “Validación del Modelo”, el quinto “Especificaciones del Prototipo de Software de Simulación”, el sexto “Diseño de Alto Nivel del Prototipo de Software de Simulación”, el séptimo “Validación del Prototipo de Software de Simulación”, el octavo “Conclusiones y Recomendaciones”, el noveno “Bibliografía”. Más un apéndice “Regla Composicional Difusa de Inferencia”.

# 1. PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el problema de la contaminación ambiental del área metropolitana de Bucaramanga es de gran actualidad y vigencia. Las emisiones de contaminantes producidos por fuentes móviles son algunos de los principales problemas que afectan a los habitantes de la ciudad.

Respecto a los fenómenos ambientales está visto que existen muchos modelos que se pueden aplicar con el objeto de preservar los recursos ambientales de países desarrollados; pero en nuestro país la investigación en esta área apenas está en sus inicios. El CEIAM tiene una buena cantidad de proyectos ya realizados o en ejecución, los cuales tienen como propósito la conservación del medio ambiente en las diferentes regiones de COLOMBIA.

En la medida en que podemos acceder al conocimiento de los fenómenos que producen la contaminación del aire atmosférico mediante la simulación, estaremos obteniendo una herramienta y, un soporte, que nos ayude en la toma de decisiones, para manejar las estrategias, tácticas y niveles operacionales del manejo por parte de las autoridades relacionadas con el medio ambiente. Además, y para el caso, la Simulación nos da una idea del comportamiento de procesos altamente complejos como el estudiado.

La Lógica Difusa al igual que otros recursos matemáticos como las Redes Neuronales y la Computación Evolutiva; constituyen las denominadas tecnologías Soft Computing usadas en la construcción de Modelos Complejos; los cuales ya se están aplicando en diferentes grupos de investigación en la Universidad Industrial de Santander; como por ejemplo: GIEMA, CEIAM y SIMON; entre otros.

La Lógica Difusa es una tecnología moderna que nos puede ayudar a predecir el comportamiento de los fenómenos ambientales, en donde existen grandes incertidumbres y, poca disponibilidad, y acceso de información experimental.

En el modelado de fenómenos ambientales se emplean las técnicas estadísticas basadas en la teoría de las probabilidades, en la estimación de algunos parámetros necesarios para predecir el comportamiento y las variaciones de estos. Adicionalmente, en otras disciplinas se emplea la estadística y la teoría de las probabilidades para analizar los resultados obtenidos de los modelos de predicción y obtener nueva información relevante en la toma de decisiones. Sin embargo, el uso de esta técnica de simulación es costosa por cuanto requiere de una buena cantidad de datos experimentales que no siempre están disponibles.

Por lo tanto, este proyecto tiene como objeto principal en una primera aproximación el modelado y la simulación de la contaminación del aire producida por las fuentes móviles del AMB utilizando la Lógica Borrosa. El modelo a desarrollar tendrá las siguientes características: Estado estacionario, georeferenciado, reactivo, y multicomponente.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.2.1. Planteamiento del problema

Actualmente el parque automotor de la meseta de Bucaramanga esta comprendido en su mayor parte de automóviles públicos y privados y tiene un número aproximado de 124.400 vehículos<sup>3</sup>. Y si se multiplica esta cantidad por los kilómetros recorridos, para luego evaluar los contaminantes generados en la quema de combustibles fósiles; se observa una contribución considerable del parque automotor a la contaminación del aire atmosférico de la meseta de Bucaramanga.

Por esta razón en los reportes que publica diariamente la Corporación de la Meseta de Bucaramanga<sup>4</sup>, se puede apreciar una mayor proporción de los contaminantes en las zonas de tránsito vehicular; de igual forma que en el estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga se observa la isla de calor en las zona central, la cual está mayormente transitada. Adicionalmente esto es una de las principales causas de algunos efectos ambientales que deterioran el medio ambiente; como lo son: el efecto invernadero, y la lluvia ácida; y lo cual puede contribuir a un aumento de las afecciones respiratorias principalmente en los niños y personas de la tercera edad de Bucaramanga. La ciudad de Bucaramanga es la ciudad con mayor proporción de niños que sufren de enfermedades crónicas de las vías respiratorias como son el Asma y la Rinitis entre las ciudades de Colombia<sup>5</sup>.

Por lo tanto, el problema radica en que existe una contribución significativa en la contaminación del aire del AMB producida por fuentes móviles; por lo que se requiere conocer su forma de dispersión influenciada por las condiciones

---

<sup>3</sup> Informe de cantidad de vehículos por clase y modelo, de la Dirección de Transporte y Tránsito, del Ministerio de Transporte.

<sup>4</sup> <http://www.cdmb.gov.co/monitoreo/redaire.php>

<sup>5</sup> Congreso “el Asma”. Berlinger de Colombia. Bucaramanga, Hotel Chicamocha. 2003

meteorológicas locales.

Es acaso la Lógica Difusa, una de las mejores teorías para comprender y predecir este fenómeno?

Son suficientes las herramientas software que usan la Lógica Difusa y que están disponibles en el mercado para modelar fenómenos complejos, como el de la contaminación del aire?

Es posible que este tipo de herramientas presten su servicio en la web?

#### 1.2.2. Impacto esperado

Se espera que este proyecto de investigación sea un aporte significativo en el conocimiento de los fenómenos ambientales del área metropolitana de Bucaramanga empleando las nuevas herramientas Soft Computing y, en especial, la Lógica Difusa.

Esto es muy importante, debido a las ventajas del modelado a través de la lógica borrosa; lo cual resuelve el problema de la escasez o falta de información y de la incertidumbre, lo que caracteriza la información relativa a las emisiones del parque automotor de la meseta de Bucaramanga.

Se espera que al finalizar el presente trabajo de investigación, el modelo desarrollado sea el inicio en el desarrollo de un modelo de predicción de una muy alta confiabilidad y que pueda interactuar con otros modelos relacionados existentes en el área metropolitana de Bucaramanga.

#### 1.2.3. Usuarios directos e indirectos

Se espera que esta herramienta sea de gran utilidad para la toma de decisiones de las autoridades competentes, como son; la CDMB, el ministerio

de la Salud, las entidades que están interesadas en el control de las emisiones producidas por la combustión de combustibles fósiles como ECOPETROL, y los centros de investigación de las principales universidades del país que manejan el tema como son el IDEAN de la Universidad Nacional de Colombia, y el CEIAM de la Universidad Industrial de Santander. Mediante este modelo se podrán identificar zonas críticas de alta contaminación, los corredores viales de mayor impacto sobre la calidad del aire en Bucaramanga y además se podrán simular eventos de control y gestión tales como el programa pico y placa, y Metrolínea, entre otros.

## 1.2.5. OBJETIVOS

### 1.2.5.1. Objetivo General

Contribuir al desarrollo de modelos de predicción de fenómenos de la contaminación del aire producida por fuentes móviles en el área metropolitana de Bucaramanga.

### 1.2.5.2. Objetivos Específicos

- Hacer una Revisión del estado del arte y una evaluación de los diferentes modelos de contaminación del aire desarrollados a nivel nacional e internacional, para decidir cuales serán los más aplicables al problema de la contaminación del aire del área metropolitana de Bucaramanga.
- Desarrollar un modelo de la contaminación del aire del área metropolitana de Bucaramanga enfocado al análisis y solución mediante la “Lógica Borrosa”.
- Desarrollar un prototipo de software de simulación empleando la lógica borrosa para fenómenos ambientales que sirva de base para futuras investigaciones en la calidad del aire.
- Validar el modelo desarrollado con otros existentes o con datos experimentales, de acuerdo con la disponibilidad en nuestro medio.

## 1.2.6. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología es teórico descriptivo; es decir se construirá un modelo basado en la lógica borrosa y con datos experimentales suministrados por el CEIAM y la CDMB o a través de la disponibilidad de otros modelos reconocidos internacionalmente, se validará el modelo.

Fase I: Revisión del estado del arte en la biblioteca central de la Universidad Industrial de Santander, en la biblioteca del ICP, en las bases de datos de UNIRED y en las bases de datos de la biblioteca central de la Universidad Industrial de Santander, las cuales son; la IEEE, la ACS, el Compendex y la

S&T.

Fase II: Recolección de los datos, y el conocimiento de los expertos quienes manejan el tema, como son la CDMB, y el CEIAM entre otros.

Fase III: Desarrollo del modelo, se seleccionó la técnica de modelado difuso más apropiada a los datos, luego se partió de los parámetros que se especifican en el estado del arte y en la fase II, para construir unas reglas de inferencia, las funciones de pertenencia y los métodos de desborrificación siguiendo la lógica borrosa. El modelo desarrollado se probará a través de la construcción de un prototipo sobre una herramienta software que lo facilite.

Fase IV: Implementación del modelo; se implementó usando un lenguaje de programación apropiado. definiendo las especificaciones y los requerimientos necesarios. La implementación se realizó mediante un proyecto de pregrado, el cual será orientado por esta investigación.

Fase V: Validar el modelo con los que ya existen y con los datos experimentales disponibles.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Durante la realización de este trabajo de investigación se consultaron diferentes fuentes. A continuación se resumen las más significativas:

### **2.1. “Estudio Comparativo de Contaminación atmosférica por la operación de un S.I.T.M en Bucaramanga” (Amado, Juan. Et al. 2004).**

El cual fue desarrollado mediante la dirección y colaboración de funcionarios de la CDMB. En este estudio se desarrollo un modelo sobre la contaminación del aire sobre un tramo de la carrera 15 y cinco de las principales intersecciones que cruzan esta vía; las cuales son: El Bulevar Santander, la avenida Quebrada seca, la calle 36, la calle 45, la avenida la rosita, la calle 50 y la calle 56. Para conseguir el objetivo deseado ellos utilizaron una red de monitoreo ambiental (la cual consiste en un sistema de equipos de medidores de contaminantes en una zona determinada), con una baja densidad de estaciones debido a los costos, y además simularon los datos faltantes para predecir con un grado de confiabilidad. En la simulación se basaron en los modelos gaussianos **I.V.E. + CAL3QHC**. A partir del primero ellos modelaron las emisiones vehiculares y en base al segundo modelaron la dispersión para determinar la concentración de los contaminantes en la atmósfera para un área de 50 kilómetros a la redonda. Finalmente ellos compararon la situación actual y la proyectada bajo el Sistema Integral de Transporte Masivo.

En el estudio de Amado et al se simularon las emisiones vehiculares y la concentración de los contaminantes por medio de herramientas software desarrolladas en el exterior. El IVE fue desarrollado por la EPA y el CE – CERT con el fin de ser usado en países en vía de desarrollo; por otra parte el CAL3QHC es un modelado desarrollado para computador, que predice la

concentración de CO y otros contaminantes inertes por causa de vehículos automotores en intersecciones viales.

Aunque este estudio es un aporte muy importante debido a la documentación que suministra en cuanto a datos recientes referentes a la contaminación del aire ocasionada por vehículos, sería mucho mejor avanzar en la construcción de modelos propios de la ciudad, es decir de acuerdo con sus condiciones; tanto para la dispersión de los contaminantes emitidos en la quema de combustibles fósiles; como en la emisión de los mismos.

Uno de los datos que se considera pertinente en el trabajo de investigación que aquí se plantea y el cual se encuentra en el estudio de Amado et al es donde se ilustran los promedios mensuales de contaminación medidos en los últimos dos años en la estación Centro, usando el índice IBUCA como se ilustra en la figura 2-1.

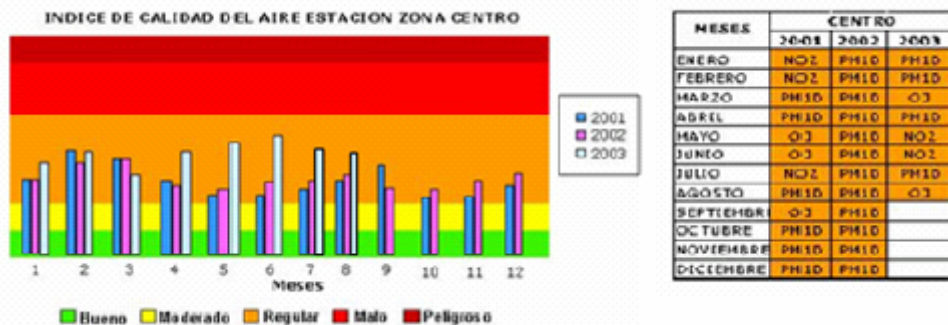


Figura 2-1: Concentración de contaminantes registrados en la Estación Zona Centro  
Fuente: CDMB. Septiembre de 2003

## 2.2. "Un estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga" (Lazar, Reinhold. y Eder, Josef. 2001).

El cual tenía entre sus metas elaborar mapas climáticos de la situación térmica incluida la isla de calor. Utilizó una combinación de varios métodos (VDI 1999):

- o Medición fija (red de estaciones automáticas),

- Medición móvil,
- Medición infrarroja (desde un punto elevado en los alrededores de la ciudad con un sensor infrarrojo).

Este estudio arrojó "la situación térmica con la isla de calor", para lo cual con base en los recorridos y las estaciones se elaboró un mapa (Con la intensidad de la isla de calor y la situación térmica en general temperaturas relativas). A través de este mapa se pueden distinguir en la ciudad de Bucaramanga 3 zonas: Una zona central con la isla de calor más acentuada, una zona periférica cuya diferencia térmica a la zona rural es muy poca; y las secciones con suficiente acumulación del aire enfriado, por ejemplo cerca de la UNAB en el quebrado S. Iglesia, es el punto con las temperaturas más bajas en cada recorrido de medición, tal como se muestra en la figura 2-2.

A partir de Lazar y Eder las autoridades competentes en el tema del medio ambiente en Bucaramanga conocen que la isla de calor se forma en el centro de la ciudad, zona que se caracteriza por el mayor tráfico vehicular. De ahí se concluye que el mayor aporte a la contaminación del aire en esta ciudad este dado por el tráfico vehicular.

Adicionalmente del estudio de Lazar y Eder también se puede concluir que los aspectos meteorológicos inciden de forma considerable en la dispersión de los contaminantes; por lo que en el modelo a desarrollar se planea tener en cuenta estos aspectos, tales como los aspectos térmicos; los aspectos de los vientos, tales como: La velocidad, las calmas y la dirección del viento combinada con la estratificación.

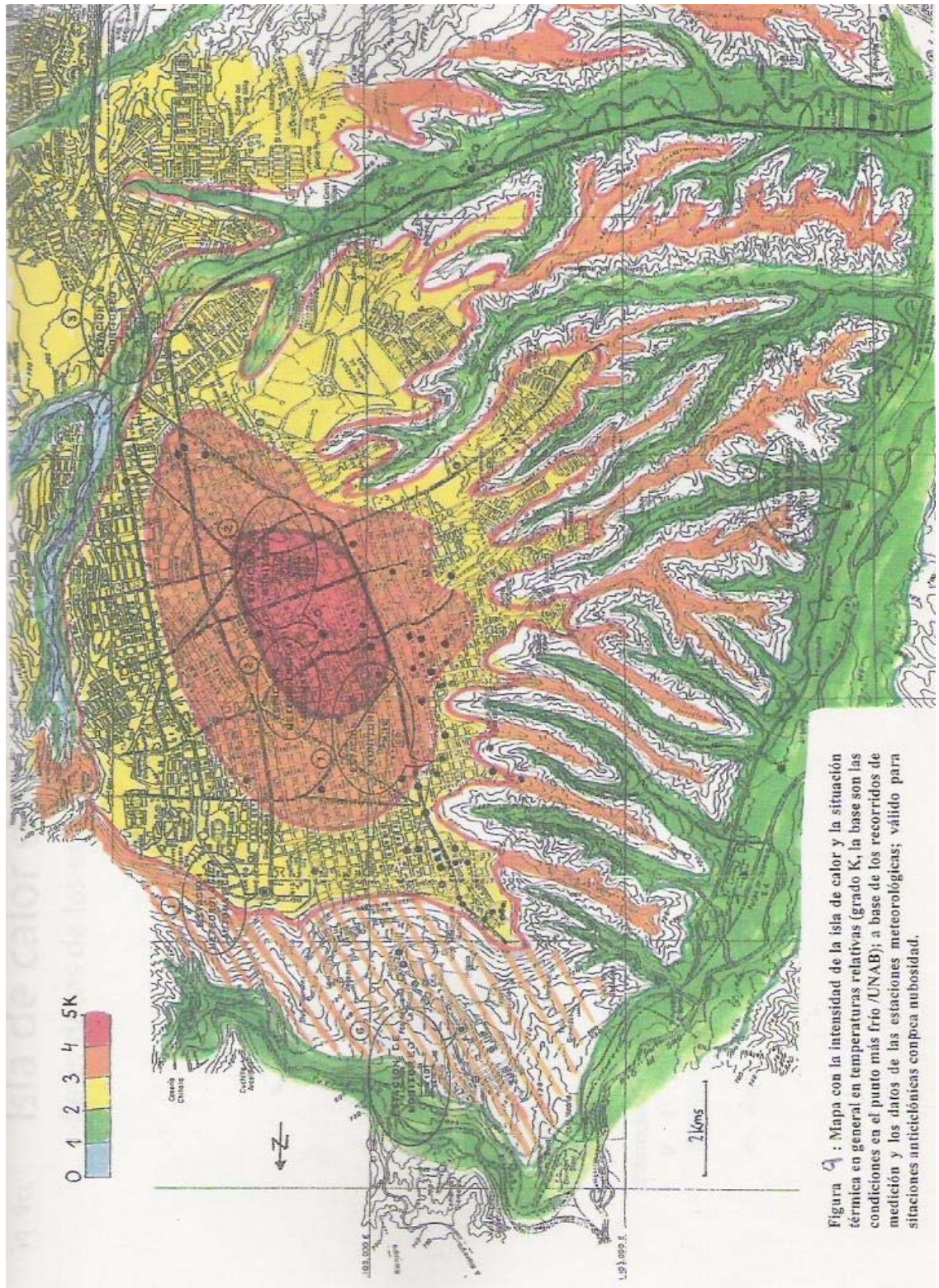


Figura 9 : Mapa con la intensidad de la isla de calor y la situación térmica en general en temperaturas relativas (grado K, la base son las condiciones en el punto más frío /UNAB); a base de los recorridos de medición y los datos de las estaciones meteorológicas; válido para situaciones anticiclónicas con poca nubosidad.

Figura 2-2: Mapa con la Intensidad de la Isla de Calor y la Situación Térmica en General

Fuente: (Lazar, Reinhold. y Eder, Josef. 2001).

### **2.3. "El estimativo de la emisión de los gases de invernadero" (IDEAN. 1990).**

En este estudio además de las emisiones industriales se estimaron las emisiones del parque automotor de Colombia. A partir de las estadísticas sobre el número de vehículos que arroja el Ministerio de Transporte, de los factores de emisión por kilómetro recorrido, y también se desarrollaron los cálculos usando factores de emisión por combustible consumido. Para lo cual los factores de emisión fueron tomados de las directrices del IPCC para vehículos americanos. También se determinó el recorrido promedio de automóviles en Colombia por tipo de vehículo y de combustible con base en los estudios realizados por el D.N.P y Bocarejo.

En este estudio no se aprecia claramente el manejo de la incertidumbre, por ejemplo proponen unas medias para el recorrido vehicular y otras para los factores de emisión, además sugieren un factor de emisión por tipo de vehículo y por tipo de combustible sin importar la edad del vehículo; bajo el punto de vista tradicional la incertidumbre puede ser evitada con todas las medias posibles. Pero bajo el punto de vista moderno la incertidumbre es considerada esencial para la ciencia. En la construcción de un modelo siempre se intenta maximizar su utilidad, este objetivo está estrechamente conectado con la relación que existe entre tres características claves de los modelos de sistemas: Complejidad, credibilidad, e incertidumbre. Esta relación actualmente no es totalmente entendida. Solo se conoce que la incertidumbre juega un papel crucial en cualquier esfuerzo por maximizar la utilidad de los modelos de sistemas. ***En general, permitir más incertidumbre tiende a reducir la complejidad e incrementa la credibilidad del modelo resultante.***

#### **2.4. "Solución numérica al problema del control de la contaminación del aire" (Fedossova, Alina. Et al. 2004)**

El cual consiste en un método estocástico para la aproximación de la minimización de la contaminación del aire causada por fuentes fijas.

Se considera el control de contaminación del aire como un problema de optimización semi-infinita. El objetivo es minimizar los costos cumpliendo con los estándares de calidad de aire los cuales se plantean a través del conjunto infinito de restricciones. Para resolverlo proponen el algoritmo estocástico de aproximaciones externas cuya idea básica consiste en el reemplazo del problema original con la secuencia de problemas aproximados más sencillos, donde cada uno esta sujeto al número finito de desigualdades. Para encontrarlo utilizaron el esquema de la búsqueda activa estocástica. El algoritmo propuesto se aplica para los problemas lineales y convexos de control de contaminación del aire.

El modelo de Fedossova et al ha sido desarrollado para direccionar el control de la contaminación del aire, debido a que la actividad industrial se considera una de las principales fuentes de contaminación del aire en las ciudades urbanas, los datos muestran que en Bucaramanga la actividad industrial es la segunda fuente de contaminación del aire. Sin embargo según lo muestran los datos en la meseta de Bucaramanga la fuente que contribuye en mayor proporción a la contaminación del aire es su parque automotor.

**2.5. "Identification and Analysis of Fuzzy Model for air pollution - an approach to self-learning Control of CO Concentration-" (Kasuo, Tanaka. Hiroyuki, Watanabe. 1992).**

Debido a que su enfoque básico en manejar la imprecisión de los factores que determinan la concentración del monóxido de carbono ellos utilizan técnicas basadas en la lógica difusa. Ellos emplearon la técnica del modelado difuso propuesta por Kang y Sugeno, para predecir la concentración del monóxido de carbono en un punto de intersección de una de las ciudades más grandes de Japón. Además ellos usaron la regla de aprendizaje de Widrow-Hoff para simular el control self-learning de la concentración del monóxido de carbono con el fin de mantener la concentración de monóxido de carbono en un nivel constante. Las entradas y una salida de un modelo borroso son mostradas en la figura 2.  $x_1$  es la velocidad del viento,  $x_2$  es el volumen del tráfico,  $x_3$  es la temperatura,  $x_4$  es la intensidad de la luz solar y "y" es la concentración de monóxido de carbono. Las variables fueron tratadas mediante la distribución normal con media igual a cero y varianza igual a 1.

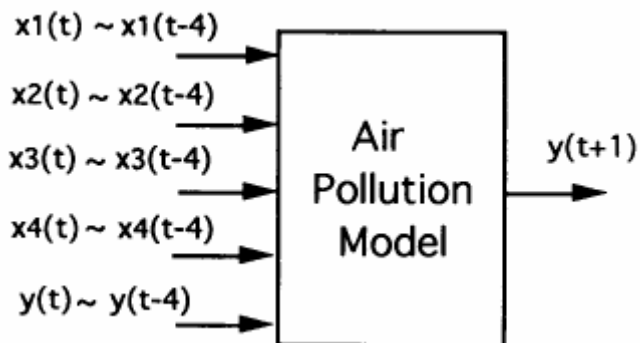


Figura 2-3: Entradas y Salida de un modelo de la polución del aire  
Fuente: (Kasuo, Tanaka. Hiroyuki, Watanabe. 1992)

En el modelo de Kasuo y Hiroyuki se demostró que el modelo difuso desarrollado es muy útil para predecir la concentración de monóxido de carbono. Ellos emplearon específicamente la técnica de Kang y Sugeno, la cual está descrita por reglas borrosas IF-THEN las cuales representan localmente relaciones de entrada y salida de un sistema. Este modelo borroso es de la siguiente forma:

$$\text{Rule } i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{in} \\ \text{THEN } y_i = c_{i0} + c_{i1}x_1 + \dots + c_{in}x_n, \quad (1)$$

donde  $i = 1, 2, \dots, r$ ,  $r$  es el número de reglas IF-THEN,  $y_i$  es la salida de la  $i$ -ésima regla, y  $A_{ij}$  es un conjunto borroso.

Después de obtenidas las salida  $y_i$  ellos emplearon un razonamiento borroso propuesto por Ichihashi y Watanabe para inferir la salida final del modelo, como sigue:

$$y = \sum_{i=1}^r w_i y_i, \quad (2)$$

Donde  $w_i$  implica el valor de verdad en conjunto de la premisa de la  $i$ -ésima implicación para la salida y se calcula como:

$$w_i = \prod_{k=1}^n A_{ik}(x_k), \quad (3)$$

Donde  $A_{ik}(x_k) = \exp(-\frac{(x_k - d_{ik})^2}{b_{ik}})$ ,  $d_{ik}$  y  $b_{ik}$  son parámetros de las funciones de pertenencia.

En la época en que tempranamente fue desarrollado el modelo de Kasuo y Hiroyuki solo existían unas pocas técnicas de modelado difuso, para entonces el modelo de Kang y Sugeno era el único utilizado en control, en la actualidad podemos contar con una amplia variedad de técnicas de modelado difuso, por lo que podremos seleccionar alguna incluso más apropiada a las condiciones y datos locales. El modelo se propone en esta investigación se desarrollará bajo la teoría de conjuntos borrosos, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: El consumo de combustible promedio por tipo de vehículo, el número de vehículos de acuerdo al tipo, además de los aspectos meteorológicos anteriormente descritos; y la concentración de los diferentes contaminantes emitidos en la quema de combustibles fósiles, los cuales son registrados actualmente en los monitoreos de la CDMB y el CEIAM como son: el monóxido de carbono, del dióxido de carbono, el oxido nitroso, el metano, el ozono, monóxido de Nitrógeno, dióxido de Nitrógeno, y otros.

## **2.6. "Series de tiempo borrosas para la predicción de la concentración de contaminantes en el aire" (Morabito, Francesco. Et al. 2002).**

El cual fue desarrollado por la Universidad Mediterránea. Y el cual propone un diseño de un sistema de predicción para la concentración de contaminantes en la atmósfera urbana. En este estudio, la herramienta explotada es una soft computing basada en el enfoque Series de Tiempo Borrosas. En particular, explotaron dos factores de series de tiempo borroso de los cuales el factor principal es la contaminación y el factor secundario es el tráfico de vehículos. Para su propósito, dos algoritmos son explotados. Las predicciones obtenidas han dado buenos resultados, especialmente con respecto a la predicción de concentraciones de contaminación una hora más tarde, lo cual representa el tiempo necesario para tomar decisiones acerca de la regulación del tráfico.

Este último modelo ha sido implementado para controlar la contaminación del aire considerando el tráfico vehicular, debido a que la principal conexión de Europa a Sicilia y viceversa esta representada por un servicio de barco trasbordador desde Villa San Gio hasta Messina, dos poblaciones a lo largo del Estrecho Homonymous. Consecuentemente, el cruce y tráfico vehicular pesado descarga compuestos orgánicos e inorgánicos en la atmósfera urbana, lo cual puede afectar la salud de los ciudadanos.

## 2.7. A NEW DIRECTION IN AI. Toward a Computational Theory of Perceptions. (Lofti A Zadeh. 2001)

En esta publicación el profesor Zadeh explica la Lógica Difusa como la Teoría computacional de las Percepciones. Nos cuenta que: “**Los humanos tenemos una marcada capacidad de desarrollar una amplia variedad de tareas sin medidas o computaciones. Muchas de las decisiones humanas y del razonamiento de sentido común es fundamentado en la percepción.**”

Una diferencia esencial entre las medidas y las percepciones es que en general, las medidas son precisas (crisp), mientras que las percepciones son difusas” (figura 1).

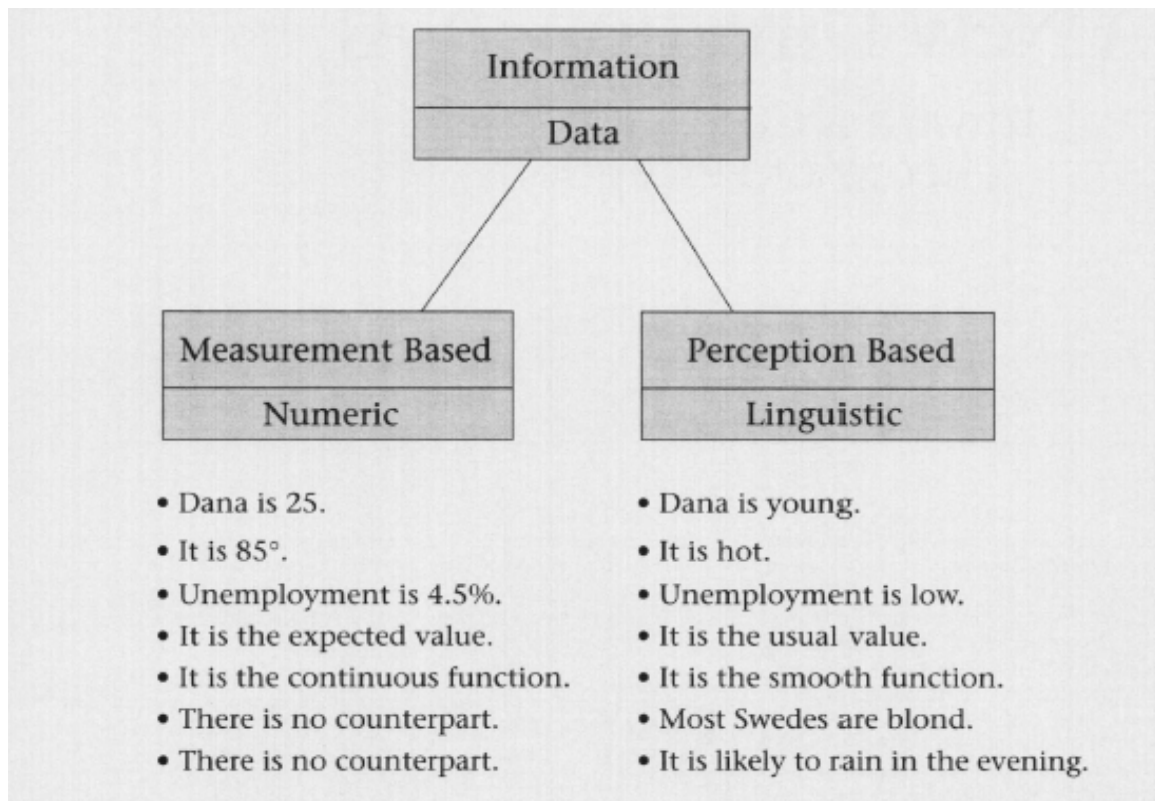


Figura 2-4: Estructura de la Información.

Fuente: A new Direction in AI: Toward a Computational Theory or Perceptions. Lofti A Zadeh. 2001

En la teoría computacional de las percepciones, el punto de partida no es, en general, una colección de percepciones; mejor aún, este es una colección de descripciones de percepciones expresadas en lenguaje natural. Lo cual es muy aplicable a la forma como un experto en contaminación del Aire explica este fenómeno; tome en consideración los siguientes ejemplos<sup>5</sup>:

1. Si existen fuentes de contaminantes del aire en el área entonces esto generará concentración de estos.
2. A mayor calor en la atmósfera mayor concentración de los contaminantes
3. En consecuencia, la intensidad solar también los incrementa.
4. A menor temperatura, la concentración de estos disminuye.
5. Si llueve, el agua precipita consigo las moléculas de los contaminantes y por consiguiente disminuye su concentración
6. La velocidad del viento dispersa los contaminantes lejos del área y por lo tanto disminuye su concentración.

El principal objetivo de CTP (teoría computacional de las percepciones) es el desarrollo de una herramienta para computación y razonamiento con percepciones. Un ejemplo de razonamiento con percepciones es: Asuma que **“la mayoría de los hombres jóvenes son saludables”** y que **“Roberto es es un hombre joven”**, entonces la percepción consecuente podría ser **“seguramente Roberto es saludable”**. Para el problema en cuestión una percepción consecuente a las citadas es:

If (la Intensidad Solar es Alta) y (el volumen del tráfico es alto) entonces (la concentración de CO es alta)

En el siguiente capítulo esta entre otras reglas del modelo desarrollado, las cuales también son otras percepciones consecuentes.

---

<sup>5</sup> Clases de “contaminación del Aire” de la especialización en Ingeniería del Medio Ambiente. Profesor: Edgar Fernando Castillo Monroy. 2004

### **2.7.1. Tipos de problemas de la teoría computacional de las percepciones:**

En términos más específicos los tipos de problemas que caen dentro de la pendiente de la teoría computacional de las percepciones según Zadeh son:

- La percepción basada en el modelado de función.
- La percepción basada en el modelado del sistema
- Análisis de series de tiempo basado en la percepción
- La solución de ecuaciones basadas en percepción
- La computación con probabilidades basadas en percepción.

De todos estos la solución de ecuaciones basadas en percepción fue de gran ayuda en el desarrollo del modelo debido a su complejidad.

## **2.8. Megacities and Atmospheric Pollution. (Mario J Molina y Luisa T Molina. 2004)**

Estos autores realizaron un estudio exhaustivo de nueve centros urbanos escogidos, de ahí ellos determinaron que en cada ciudad su problema, fuentes y panorama son únicos. Y que la necesidad de un enfoque holístico para comprender la complejidad del fenómeno es la misma en todas.

Por otra parte es muy alentador conocer que: Es posible, con una apropiada planeación que las mega ciudades puedan liderar de manera eficiente sus problemas de calidad del aire; a través de medidas tales como la aplicación de nuevas tecnologías para el control de las emisiones y el desarrollo de sistemas de transporte masivo.

Además, es importante anotar, que los autores insisten en que se debe establecer una alta prioridad para que **existan los monitoreos atmosféricos extensivos y modelado, ya que esto es necesario para definir estrategias de control de emisiones óptimas**, políticas que usen esta información para balancear la economía y los beneficios sociales del mejoramiento de la salud contra el costo del control de las emisiones.

Estos autores sugieren también variables ha considerar; sin embargo como ellos mismos lo afirman cada ciudad tiene su propio perfil en contaminación del aire. Es por esto que en el presente trabajo de investigación las variables para el modelo desarrollado fueron tomadas de otras fuentes; y en especial los contaminantes a predecir fueron sugeridos por el director del CEIAM quien a su vez forma parte de esta investigación como codirector.

### **3. Modelo Difuso de la Dispersión del Aire en Bucaramanga**

Actualmente dentro de la lógica difusa están disponibles varios modelos tales como Mamdani, Sugeno y otros[2] y [3]. Para el estudio se realizaron pruebas con los modelos Mamdani y Sugeno. Sin embargo se observó que el modelo de Mamdani pierde coherencia cuando se robustece el modelo. Por lo que este capítulo se centra en el desarrollo y resultados del modelo de Sugeno.

Por otra parte, el propósito de la aplicación del modelo de Sugeno es tratar de predecir las concentraciones de los contaminantes criterio según la variación de los parámetros propuestos, con el objeto de adquirir una mayor comprensión del fenómeno y de esta manera poder sugerir medidas a la comunidad en general y a las autoridades competentes.

#### ***3.1. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL MODELO***

Según la DT (Dirección de Transito y Transporte de Bucaramanga), la calle 36 con carrera 15 es la intersección más congestionada de la zona centro de Bucaramanga. Además la CDMB (Corporación Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga) registra los datos de la zona en este punto en especial. Debido a esto, el modelo se ha desarrollado para predecir la concentración de los contaminantes criterios para dicha intersección.

Por otra parte, "el clima urbano de Bucaramanga es relativamente complejo debido a su relieve y su ubicación al borde de la cordillera oriental.

Por eso los vientos locales e inversiones térmicas juegan un gran rol en la dispersión de los contaminantes” [1]. En palabras más concretas los aspectos meteorológicos tales como **la velocidad del viento, la intensidad de la luz solar y la temperatura** inciden de manera considerable en la dispersión de los contaminantes.

Además, como ya se mencionó, en esta zona la fuente de emisiones de gases contaminantes más importante es el **flujo vehicular**, por lo tanto es otra variable de entrada a considerar.

Para dar una valoración de la calidad del aire en el área metropolitana de Bucaramanga los siguientes contaminantes criterio fueron sugeridos por el director del CEAIM; que en el modelo corresponden a las variables de salida:

- En especial, el **material particulado** superior a las 10 micras (**MP<sub>10</sub>**) porque últimamente en algunos meses llega a sobrepasar los niveles permitidos por la ley [4].
- El ozono (**O<sub>3</sub>**) que de manera precisa solo es posible modelar con las llamadas soft computing porque a través de los modelos tradicionales es muy difícil predecir el comportamiento de un compuesto químico que se libera por reacción química de otros [5]. Y en particular por medio de la lógica difusa debido a la escasez de datos.
- Otros gases que tienen una contribución importante en el efecto invernadero que tanto nos preocupa a los habitantes del planeta en la actualidad son los NO<sub>x</sub> (**óxidos de nitrógeno**) y el CO (**monóxido de carbono**) [6].

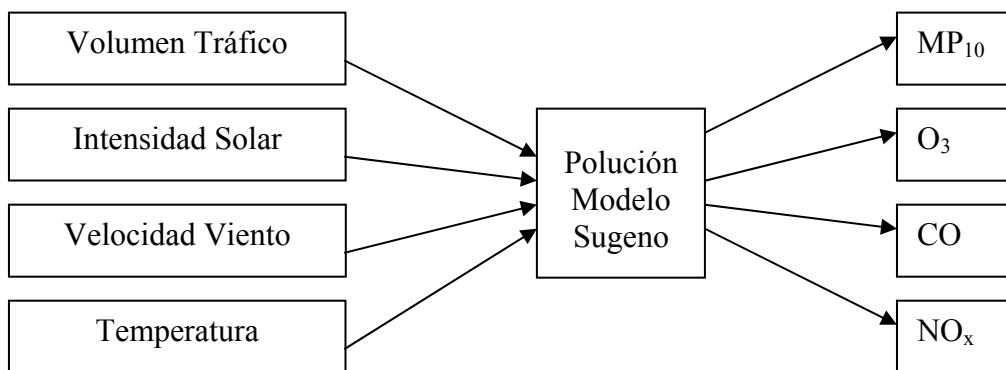
Existen otros contaminantes, pero para esta investigación se tomaron los de mayor contribución a los fenómenos que deterioran el medio ambiente, puesto que todo modelo tiene dos objetivos principales que son:

- a) Conseguir la mayor precisión posible en las salidas del modelo.
- b) Ayudar a comprender el fenómeno en estudio.

Y mientras nos acerquemos más a la realidad considerando más variables obtendremos mayor precisión pero a costa de alejarnos del otro objetivo principal [7]

En resumen, las variables de salida del modelo son: La concentración de  $MP_{10}$ ,  $O_3$ ,  $CO$  y  $NO_x$ .

De esta manera el modelo se muestra en la figura 3-1.



*Figura 3-2: Sistema de Inferencia*

## **3.2. DETERMINACIÓN DE LOS CONJUNTOS Y SUBCONJUNTOS BORROSOS Y SUS FUNCIONES DE PERTENENCIA**

### **3.2.1. Volumen del tráfico**

Los datos para esta variable fueron suministrados por La Dirección de Transito y Transporte de Bucaramanga. Se consideró que en el mejor de los casos no pasa ningún carro, y que en el peor de los casos pasan 670 arribos en un cuarto de hora. Esta variable de entrada se dividió en 3 conjuntos borrosos a saber: Congestionado con un mayor grado de pertenencia en un intervalo de flujo entre 550 y 670 arribos en 15 minutos, semicongestionado con mayor grado de pertenencia en un intervalo de flujo entre 390 y 470 arribos en 15 minutos, y descongestionado con un mayor grado de pertenencia en un intervalo entre 0 y 230 arribos en quince minutos.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Distribución del volumen de Arribos. SIEMENS. Industrial Solutions and Services/Building Technologies. Bucaramanga. Calle 36 – Carrera 15. Diciembre 1 de 2003

### **3.2.2. Velocidad del viento**

Amado Et al en [8] publicaron una tabla de datos tomados por la estación de monitoreo Centro ubicada en la terraza de Mercadefam de la carrera 15.

Aunque estos datos no son los más recientes se usaron en el desarrollo del modelo porque ya tienen unas características que son necesarias, debido a que en la zona existen elementos altos (como los edificios) que provocan que la velocidad del viento disminuya debido a la presión. Finalmente esta tabla muestra el cálculo de la velocidad a 2 metros de altura. La cual es la recomendable para estudios en calidad del aire, ya que a esta altura es en la cual los humanos respiramos. Finalmente, a esta variable de entrada se subdividió en 3 conjuntos borrosos, a saber: Lento, moderado y rápido.

HORA	VELOCIDAD DEL VIENTO m/s
6:00	0.8
7:00	1.0
8:00	1.3
9:00	1.5
10:00	1.8
11:00	1.0
12:00	1.3
13:00	1.3
14:00	1.4
15:00	1.5
16:00	1.5
17:00	1.3
18:00	1.1

*Tabla 3-1: Datos tomados por la estación centro de la CDMB en el año 2003*

### **3.2.3. Temperatura**

Para esta variable de entrada los datos fueron tomados publicados por la CDMB según [9], para describir las funciones de pertenencia se uso una función trapezoidal y se partió en 3 conjuntos borrosos, a saber: Frío, templado, y calor. El frío con mayor grado de pertenencia a una temperatura de 18° centígrados; el templado con mayor grado de pertenencia en una temperatura de 25° centígrados; y para el calor con un valor de máxima pertenencia en 29° centígrados.

### 3.2.4. Intensidad Solar

Esta variable de entrada fue partida en 3 conjuntos borrosos a saber: Noche, Aurora y Mediodía. Para esto el modelo se basó de nuevo en los datos publicados por la CDMB en [9]. El subconjunto noche se definió con una función de pertenencia del tipo Singleton, ya que la radiación solar siempre permanece nula durante las horas nocturnas. Mientras que para los otros subconjuntos se hace uso de una función de pertenencia del tipo campana de gauss.

Ahora, mientras en Aurora existe menor grado de pertenencia en radiaciones altas, cuyo comportamiento sucede en horas tempranas o al atardecer, es decir entre 6:00 a.m. y 8:00 a.m., como también entre 4:00 p.m. y 7:00 p.m.; para el mediodía con un máximo grado de pertenencia a este conjunto una radiación solar correspondiente a un intervalo entre 800 wátios/m<sup>2</sup> y 1000 wátios/ m<sup>2</sup>.

### 3.3. SALIDAS DEL MODELO

El modelo que más se acerca al comportamiento del fenómeno de estudio es el modelo de **Sugeno**, por lo que este documento se centrará en sus resultados y desarrollo.

Como ya es sabido, la única diferencia del modelo de **Sugeno** con el de **Mandami** es el consecuente de las reglas de inferencia [2]. En el caso del modelo de **Sugeno**, el consecuente es un polinomio de la forma:

$$ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + f = y_i \quad (1)$$

Ecuación 3-1. Polinomio de salida

Donde  $y_i$  es la salida del modelo; es decir la concentración de los respectivos contaminantes criterio, como sigue:

<b>i</b>	<b>Gas Contaminante</b>
1	Monóxido de carbono (CO)
2	Ozono (O <sub>3</sub> )
3	Material particulado de 10 micras (MP <sub>10</sub> )
4	Monóxido de nitrógeno (NO)
5	Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )

*Tabla 3-2: Especificación de la salida “y” según el subíndice*

Y donde  $X_i$  son las variables de entrada del modelo tal como sigue:

<b>i</b>	<b>Variable de entrada</b>
1	Velocidad del Viento
2	Volumen del Tráfico
3	Temperatura
4	Intensidad de la Luz Solar

*Tabla 3-3: Especificación de la variable de entrada “x” según el subíndice*

### **3.3.1. Coeficientes por Contaminante**

Para encontrar los coeficientes por contaminante se realizó una regresión utilizando el método de los mínimos cuadrados con datos experimentales suministrados por la CDMB y la Dirección de Tránsito y Transporte de Bucaramanga.

Para efectos de desarrollar la regresión y por observación del comportamiento del fenómeno los datos experimentales se organizaron por matrices donde “y” es la matriz de salida o concentración del contaminante y “x” los valores de los

parámetros tomados para esas salidas así:

3.3.1.1. Para el CO en las reglas de salida

- o Baja

y=	<b>CO</b>
	0
	0.68
	0.71
	0.75
	0.8
	0.85
	0.9
	0.95
	1.08
	1.19

x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	0	0	1.8	16
	140	0.1	1.77	16.5
	220	0.2	1.76	16.6
	230	0.8	1.7	16.8
	250	4	1.65	16.89
	252	90	1.64	19.9
	260	100	1.6	16.901
	369	120	1.56	16.901
	370	140	1.54	19
	660	150	1.5	19.01

*Tabla 3-4: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de CO baja tal como el vector “y”*

Donde “VT” es volumen del tráfico, “IS” es intensidad solar, “VV” es velocidad del viento, “T” temperatura y “CO” en la concentración del monóxido de carbono.

- o Media

y=	<b>CO</b>
	1.08
	1.2
	1.8
	2.0
	2.2
	2.4
	2.6
	2.7

x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	230	140	1.6	20
	250	152	1.55	21
	280	300	1.5	22
	300	350	1.45	23
	320	400	1.4	24
	350	500	1.35	25
	390	550	1.3	26
	670	600	1.2	26.5

*Tabla 3-5: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de CO media tal como el vector “y”*

- o Alta: En esta salida se observa una mayor dependencia del volumen del trafico

y=	CO	x=	VT	IS	VV	T
	3.0		470	600	1.1	26
	3.15		550	650	1.09	26.5
	3.16		560	700	1.05	27.5
	3.18		580	800	1.0	27
	3.2		600	900	0.95	28
	3.25		650	950	0.9	29
	3.3		660	980	0.85	29.5
	3.4		670	1000	0.8	30

Tabla 3-6: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de CO alta tal como el vector "y"

### 3.3.1.2. Para el O<sub>3</sub> en las reglas de salida

- o Baja

y=	CO	x=	VT	IS	VV	T
	0		0	0	1.75	18
	1		140	40	1.7	18.5
	2		160	60	1.65	19
	3		180	80	1.62	19.5
	5		200	100	1.619	20
	6		220	120	1.615	20.5
	6.5		240	130	1.6	21
	7		260	140	1.58	21.2
	7.5		280	145	1.55	21.5
	8		660	150	1.5	26

Tabla 3-7: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de O<sub>3</sub> baja tal como el vector "y"

- Media



y=	<b>O<sub>3</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	4		200	160	1.6	18
	6		240	200	1.55	20
	7		280	240	1.5	21
	8		300	280	1.45	22
	8.1		390	300	1.4	23
	8.15		470	340	1.35	24
	11		550	380	1.3	25
	14		670	596	1.2	26

Tabla 3-8: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de O<sub>3</sub> media tal como el vector "y"

- Alta: En este subconjunto de salida se observó una dependencia amplia del volumen del tráfico y de la Temperatura. Y una ligera de la intensidad solar.



y=	<b>O<sub>3</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	16		520	350	1.1	24
	17		530	380	1.09	24.5
	18		540	422	1.05	25
	19		550	493	1.04	25.5
	27		555	550	1	27
	34		600	680	0.95	28
	39		716	770	0.8	30

Tabla 3-9: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de O<sub>3</sub> alta tal como el vector "y"

### 3.1.3. Para el MP<sub>10</sub> en las reglas de salida

- Baja: Se observó una alta influencia del volumen del tráfico en esta salida y una sutil de la intensidad solar

y=	<b>MP<sub>10</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	0		0	0	1.8	18
	15.26		200	52	1.78	19
	22.5		230	70	1.76	20
	27.9		250	96	1.7	21
	41.7		260	160	1.65	21.5
	80.78		451.5	221	1.6	22

Tabla 3-10: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP<sub>10</sub> baja tal como el vector “y”

- o Media: Se observó una dependencia fuerte del volumen del trafico

y=	<b>MP<sub>10</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	56.69		393	180	1.7	19
	67.85		422	200	1.65	20
	68.72		449	245	1.55	21
	72.07		480	300	1.5	21.5
	75.17		509	380	1.45	21.8
	84.64		716	400	1.4	22

Tabla 3-11: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP<sub>10</sub> media tal como el vector “y”

- o Alta: Continua con una marcada dependencia respecto al volumen del trafico

y=	<b>MP<sub>10</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	67.85		90	1.8	1.5	20
	68.72		92	2	1.45	20.5
	69		100	2.4	1.43	21
	78.05		180	2.5	1.4	24
	85		190	3	1.3	24.2
	98.26		200	3.5	1	24.5
	100		210	3.8	0.95	24.8
	104.52		220	4	0.9	25
	177.86		240	6.5	0.8	26

Tabla 3-12: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de MP<sub>10</sub> alta tal como el vector “y”

3.3.1.4. Para el NO en las reglas de salida

- o Baja

y=	NO	x=	VT	IS	VV	T
	0		50	0	0.71	17.5
	4		60	0	0.56	17.8
	12		80	0	0.50	17.9
	17		99	0	0.48	18.1
	21		100	0	0.4	18.2
	22		120	0	0.33	18.3
	24		130	0	0.3	19
	29		200	1	0.07	19.1

Tabla 3-13: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de NO baja tal como el vector "y"

- o Media

y=	NO	x=	VT	IS	VV	T
	22		120	80	1.48	19.3
	24		130	85	1.42	20
	26		200	90	1.4	20.3
	33		500	96	1.32	21.5
	51		520	100	1.09	21.6
	52		525	120	1.08	22.8
	58		530	160	1.06	23.6
	71		532	180	0.6	23.9
	73		534	200	0.58	24.2
	77		535	240	0.56	25.2
	86		686	250	0.5	25.1

Tabla 3-14: Matriz "x" de datos experimentales que generan una concentración de NO media tal como el vector "y"

Alta: Se observó una fuerte influencia directamente proporcional del volumen del tráfico y una fuerte pero inversamente proporcional de la velocidad del viento sobre esta salida.

y=	<b>NO</b>
	73
	96
	133
	159
	192
	199
	224
	243

x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	450	94	3.31	19.7
	455	132	3.3	19.8
	460	200	3.25	20.3
	470	300	3.24	21.5
	780	351	3.23	21.6
	490	360	2.51	22.8
	495	370	2.5	23.9
	500	389	1.87	24.2

*Tabla 3-15: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO alta tal como el vector “y”*

3.3.1.5. Para el NO<sub>2</sub> en las reglas de salida

- Baja: Se observa una dependencia fuerte en este subconjunto de salida de volumen del tráfico y de la temperatura más una ligera dependencia de la intensidad solar.

y=	<b>NO<sub>2</sub></b>
	0
	6
	12
	14
	15
	18
	20
	26
	28
	30

x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	100	0	1	16
	150	200	1.1	17
	200	220	1.2	17.5
	230	300	1.3	17.6
	300	340	1.4	18.1
	318	350	1.5	18.3
	363	360	1.6	18.4
	380	370	1.7	18.5
	400	380	1.6	18.7
	420	400	1.9	19.7

*Tabla 3-16: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO<sub>2</sub> baja tal como el vector “y”*

- o Media: Se observó una fuerte dependencia directa de esta salida respecto de el volumen de trafico y una inversa no tan fuerte de la velocidad del viento.

y=	<b>NO<sub>2</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	26		390	250	1.35	18.2
	28		392	320	1.3	18.3
	30		393	350	1.25	18.5
	32		422	380	1.248	19
	36		449	450	1.247	19.5
	38		467	500	1.24	20
	40		530	550	1.23	24
	56		716	600	1.2	26

*Tabla 3-17: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO<sub>2</sub> media tal como el vector “y”*

- o Alta: Tiene una marcada dependencia directamente proporcional del volumen del trafico y de la temperatura, más una inversa también fuerte y una inversa leve con respecto a la intensidad solar

y=	<b>NO<sub>2</sub></b>	x=	<b>VT</b>	<b>IS</b>	<b>VV</b>	<b>T</b>
	43		502	404	1.8	20
	45		508	350	1.75	20.5
	49		510	300	1.7	21
	51		520	200	1.6	21.5
	60		530	250	1.65	22
	63		544	101	1.59	22.5
	68		555	61	1.57	23
	74		716	52	1.09	30

*Tabla 3-18: Matriz “x” de datos experimentales que generan una concentración de NO<sub>2</sub> alta tal como el vector “y”*

### 3.3.2. Coeficientes Resultantes por Regla

	a	b	c	d	f
CO	0.03	1.1e-3	3.5e-4	-1.49e-4	9.34e-2
O <sub>3</sub>	0.023	1.03e-4	0.05	-0.31	1.003
MP <sub>10</sub>	0.06	3.9e-2	6.5e-4	-0.3	1.11e-4
NO	0.897	0.26	-1.916	-0.24	0.487
NO <sub>2</sub>	0.078	1.28e-2	0.005	-0.009	0.1469

Tabla 3-19: Coeficientes para las reglas cuya salida es baja por contaminante

	a	b	c	d	f
CO	2.3e-7	5e-5	0.0036	-6.5e-4	0.022
O <sub>3</sub>	0.04	2.4e-4	0.0168	-0.3069	2.68
MP <sub>10</sub>	0.162	0.0152	-6.4e-5	0.33	0.078
NO	0.205	0.18	-6.2	-0.38	0.27
NO <sub>2</sub>	0.09	0.027	6.75e-3	-0.048	0.21

Tabla 3-20: Coeficientes para las reglas cuya salida es media por contaminante

	a	b	c	d	f
CO	0.022	0.06	-0.08	0.02	-0.191
O <sub>3</sub>	0.0108	4.9e-4	3.6e-2	-0.3107	4.12
MP <sub>10</sub>	0.673	0.474	-1.7e-5	-0.002	2.07e-2
NO	0.74	0.0378	-3.178	-1.839	0.85
NO <sub>2</sub>	0.77	0.024	-2.3e-3	-0.025	0.27

Tabla 3-21: Coeficientes para las reglas cuya salida es alta por contaminante

Es de anotar que no fue posible validar alguna otra variable, debido a que las herramientas disponibles en la actualidad solo permiten un modelo con nueve variables.

### **3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS REGLAS DE INFERENCIA**

Para construir las reglas de inferencia se hizo un estudio cuidadoso del comportamiento de las variables de salida, teniendo en cuenta la influencia de los parámetros sugeridos sobre estas en los datos experimentales suministrados por la CDMB y el CEIAM (Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales). A partir de ahí se construyeron 8 reglas de inferencia las cuales son:

1. if (VolumenTrafico is Descongestionado) and (IntensidadSolar is Not MedioDía) and (VelocidadViento is Rápido) and (Temperatura is Frío) then (Concentración CO is baja)(Concentración O3 is baja)(Concentración MP10 is baja) (Concentración NO2 is baja) (Concentración NO is baja) (1)
2. if (VolumenTrafico is Semicongestionado) and (IntensidadSolar is Not MedioDía) and (VelocidadViento is Moderado) and (Temperatura is Templado) then (Concentración CO is media) (Concentración O3 is baja)((Concentración MP10 is media) (Concentración de NO2 is media) (Concentración NO is alta) (0.9)
3. if (VolumenTrafico is Congestionado) and (IntensidadSolar is MedioDía) and (VelocidadViento is Lento) and (Temperatura is Calor) then (Concentración CO is alta) (Concentración O3 is alta)(Concentración MP10 is alta)(Concentración NO2 is alta)(Concentración NO is alta) (1)
4. if (VolumenTrafico is Congestionado) and (IntensidadSolar is Noche) and (VelocidadViento is Moderado) and (Temperatura is Calor) then (Concentración CO is alta) (Concentración O3 is baja)(Concentración MP10 is alta) (Concentración NO2 is alta)(Concentración NO is alta) (0.9)
5. if (VolumenTrafico is Semicongestionado) or (IntensidadSolar is Not MedioDía) or (VelocidadViento is Rápido) or (Temperatura is not Calor) then

(Concentración CO is media) (Concentración O3 is media)(Concentración MP10 is baja) (Concentración NO2 is baja)(Concentración NO is media)(1)

6. if (VolumenTráfico is Descongestionado) and (IntensidadSolar is MedioDía) and (VelocidadViento is Lento) and (Temperatura is Calor) then (Concentración CO is baja)(Concentración O3 is alta)(Concentración MP10 is baja) (Concentración NO2 is baja)(Concentración de NO is baja)(1)

7. if (VolumenTráfico is Semicongestionado) and (IntensidadSolar is MedioDía) and (VelocidadViento is Rápido) and (Temperatura is Frío) then (Concentración CO is baja) (Concentración O3 is alta)(Concentración MP10 is media)(Concentración NO2 is baja)(Concentración NO is baja) (1)

8. if (VolumenTráfico is Semicongestionado) and (IntensidadSolar is MedioDía) and (VelocidadViento is Rápido) and (Temperatura is Frío) then (Concentración CO is baja)(Concentración O3 is alta) (Concentración MP10 is baja) (Concentración NO2 is media) (Concentración NO is baja) (1)

Donde (#) al final de las reglas es la prioridad dada a la regla dentro del modelo.

## **4. VALIDACIÓN DEL MODELO**

Con objeto de validar el modelo propuesto, se llegó a la conclusión de que lo mejor y al mismo tiempo más viable, era comparar los resultados obtenidos con los datos reales que suministra la CDMB en su página web. Además para estimar el error se utilizó el error medio cuadrático.

### **4.1. CÁLCULO DEL ERROR**

Para estimar la eficacia del modelo se calculó J (el error cuadrático) como sigue

$$J = (1/m) * \sum_{t=0}^{m-1} \sqrt{[(y(t+1) - y^*(t+1))/y(t+1)]^2} \quad (2)$$

Donde m es el número de datos de entrada y salida,  $y^*(t+1)$  son las salidas del modelo difuso y  $y(t+1)$  son los datos reales. Esta metodología para validar modelos de fenómenos complejos es clásica dentro de las avanzadas en el campo de las matemáticas [10]. En la siguiente tabla se describen los valores de J por contaminante criterio

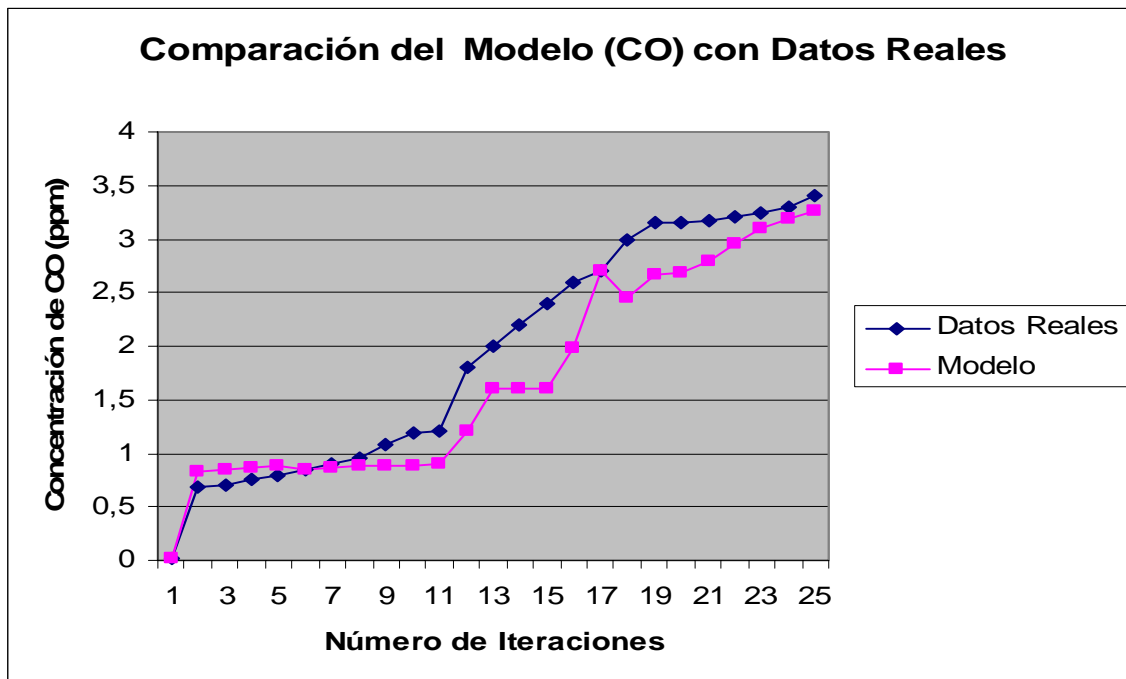
<b>Variable de Salida</b>	<b>J</b>
Concentración de CO	0,146271251
Concentración de O3	0,161755532
Concentración de MP10	0,086177101
Concentración de NO	0,136946378
Concentración de NO2	0,052113666

*Tabla 4-1: Validación de las variables de salida del modelo frente a datos experimentales*

Además de calcular el error por contaminante criterio, se realizaron unas gráficas bidimensionales donde se ilustran los datos confrontados; que corresponden al “y( vt, is, vv, T)” de los datos reales y al “y(vt, is)” de los resultados del modelo.

#### **4.2. Validación del Monóxido de Carbono**

Para realizar la siguiente gráfica fue necesario previo a esto construir la tabla 4-2.



*Figura 4-1: Validación del CO*

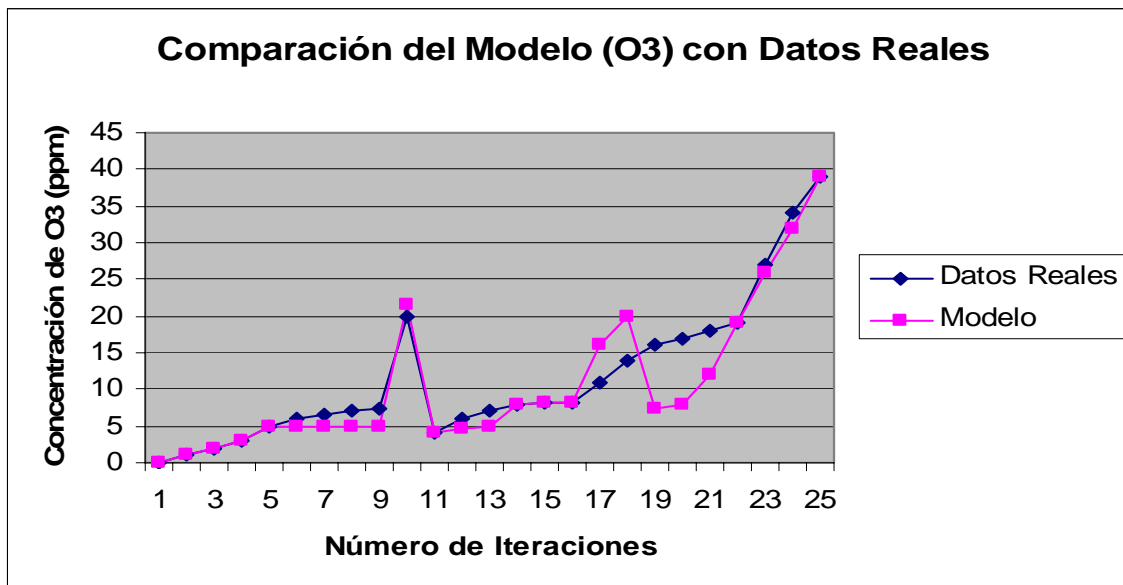
En la figura 4-1 se puede apreciar la buena concordancia entre los datos experimentales y los datos de predicción del modelo propuesto. El error es de 0,146271251.

Datos Reales	Modelo	$y(vt, is, vv, T) - y(vt, T) / y(vt, is, vv, T)$
0,01	0,01	0
0,68	0,83	0,220588235
0,71	0,85	0,197183099
0,75	0,86	0,146666667
0,8	0,88	0,1
0,85	0,85	0
0,9	0,86	0,044444444
0,95	0,88	0,073684211
1,08	0,88	0,185185185
1,19	0,89	0,25210084
1,2	0,9	0,25
1,8	1,2	0,333333333
2	1,6	0,2
2,2	1,6	0,272727273
2,4	1,6	0,333333333
2,6	1,98	0,238461538
2,7	2,7	0
3	2,45	0,183333333
3,15	2,66	0,155555556
3,16	2,68	0,151898734
3,18	2,8	0,119496855
3,2	2,95	0,078125
3,25	3,1	0,046153846
3,3	3,19	0,033333333
3,4	3,26	0,041176471
<b>SUMATORIA</b>		<b>3,656781287</b>
SUMATORIA/25		0,146271251

Tabla 4-2: Validación del CO

### 4.3. Validación del Ozono

Para realizar la siguiente gráfica fue necesario previo a esto construir la tabla 5-3.



*Figura 4-2: Validación del O<sub>3</sub>*

En la figura 4-2 se muestra la buena concordancia entre los datos experimentales y los obtenidos por el modelo propuesto. El error es de 0,161755532.

Datos Reales	Modelo	$y(vt, is, vv, T) - y(vt, is) / y(vt, is, vv, T)$
0,1	0,1	0
1	1	0
2	2	0
3	3	0
5	4,95	0,01
6	4,9	0,183333333
6,5	4,9	0,246153846
7	4,9	0,3
7,5	4,9	0,346666667
20	21,5	0,075
4	4	0
6	4,75	0,208333333
7	4,89	0,301428571
8	8	0
8,1	8,1	0
8,15	8,15	0
11	16	0,454545455
14	20	0,428571429
16	7,5	0,53125
17	8	0,529411765
18	12	0,333333333
19	19	0
27	26	0,037037037
34	32	0,058823529
39	39	0
<b>SUMATORIA</b>		4,043888299
SUMATORIA/25		0,161755532

Tabla 4-3: Validación del O<sub>3</sub>

#### 4.4. Validación del Material Particulado Superior a 10 micras

Para realizar la siguiente gráfica fue necesario previo a esto construir la tabla 5-4.

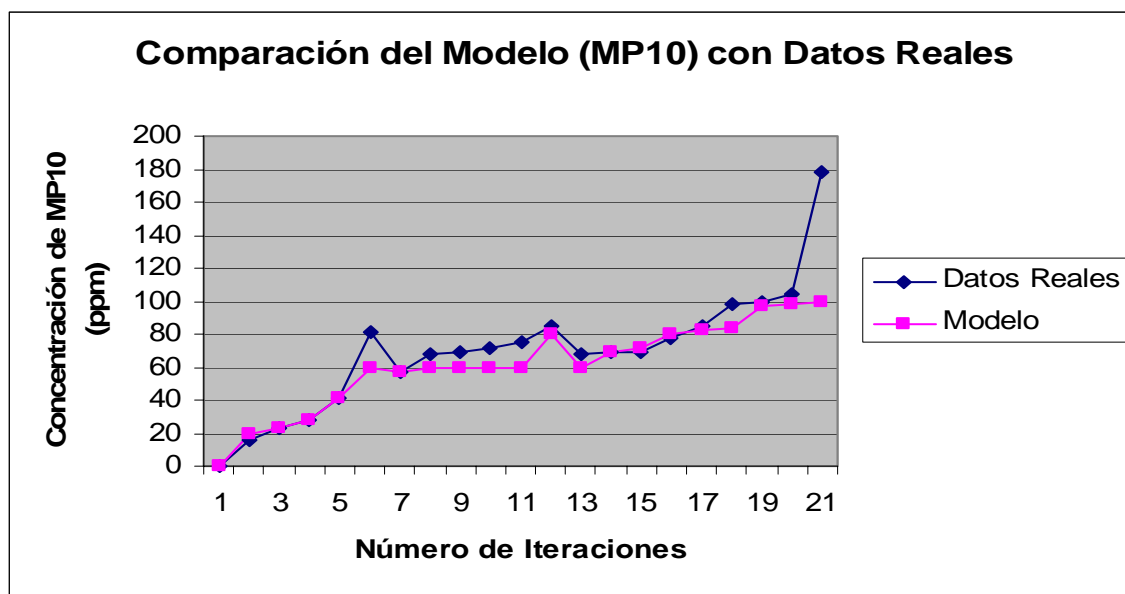


Figura 4-3: Validación del  $MP_{10}$

En la figura 4-3 se muestra la buena concordancia que existe entre los datos experimentales y los que genera el modelo propuesto. El error es de 0,086177101.

Datos Reales	Modelo	$y(vt, is, vv, T) - y(vt, is) / y(vt, is, vv, T)$
0,1	0,1	0
15,26	20	0,31061599
22,5	22,5	0
27,9	27,9	0
41,7	41,7	0
80,78	59	0,269621193
56,69	56,69	0
67,85	59,6	0,121591746
68,72	59,8	0,129802095
72,07	59,99	0,167614819
75,17	59,96	0,20234136
84,64	79,95	0,055411153
67,85	60	0,115696389
68,72	69,05	0,004802095
69	72	0,043478261
78,05	80,01	0,025112108
85	82,03	0,034941176
98,26	84,098	0,144127824
100	97,085	0,02915
104,52	98,002	0,062361271
177,86	100	0,437760036
<b>SUMATORIA</b>		<b>2,154427517</b>
SUMATORIA/25		0,086177101

Tabla 4-4: Validación del  $MP_{10}$

#### 4.5. Validación del Monóxido de Nitrógeno

Para realizar la siguiente gráfica fue necesario previo a esto construir la tabla 4-5

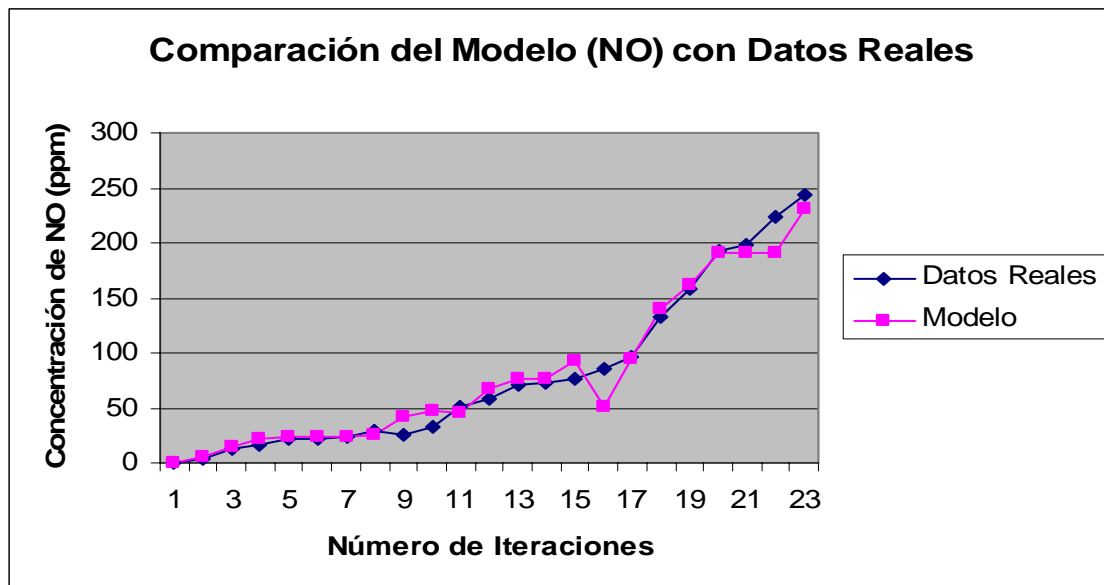


Figura 4-4: Validación del NO

En la figura 4-4 es posible apreciar la buena concordancia entre los datos experimentales y la concentración del NO que predice el modelo propuesto. El error es 0,136946378.

Datos Reales	Modelo	$y(vt, is, vv, T) - y(vt, is) / y(vt, is, vv, T)$
0,1	0,1	0
4	5,2	0,3
12	14,35	0,195833333
17	22,08	0,298823529
21	23,001	0,095285714
22	23,08	0,049090909
24	23,82	0,0075
29	26,09	0,100344828
26	41,07	0,579615385
33	48,089	0,457242424
51	46,089	0,096294118
58	67,002	0,155206897
71	76,057	0,071225352
73	77,038	0,055315068
77	92	0,194805195
86	50,08	0,417674419
96	94,03	0,020520833
133	140	0,052631579
159	162	0,018867925
192	190	0,010416667
199	190,35	0,043467337
224	190,4	0,15
243	230	0,053497942
<b>SUMATORIA</b>		<b>3,423659453</b>
SUMATORIA/25		0,136946378

Tabla 4-5: Validación del NO

#### 4.6. Validación del Dióxido de Nitrógeno

Para realizar la siguiente gráfica fue necesario previo a esto construir la tabla 4-6.

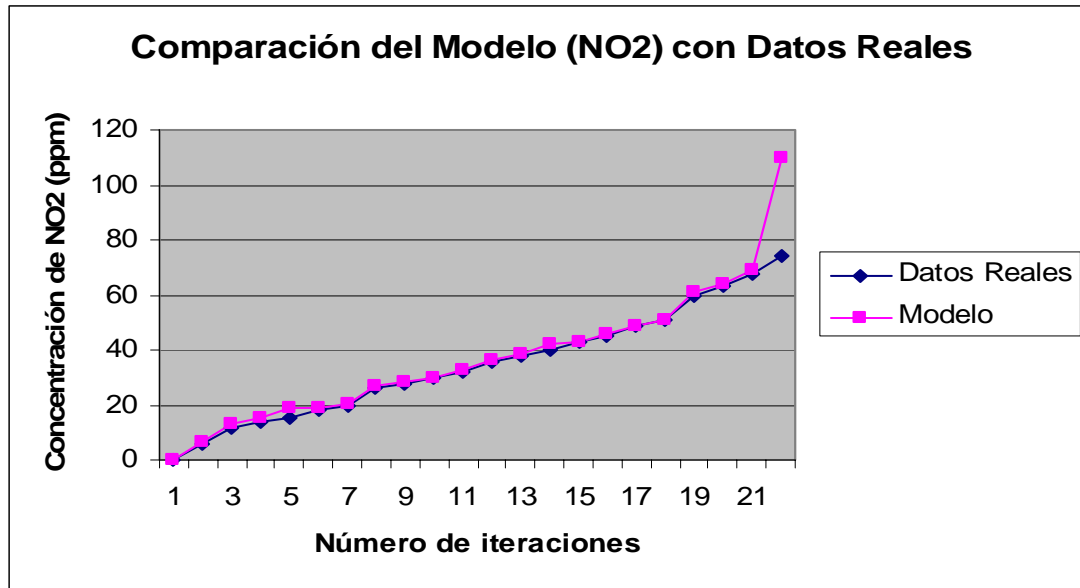


Figura 4-5: Validación del NO<sub>2</sub>

En la figura 4-5 es posible observar que la concordancia entre los datos experimentales y los datos de predicción del modelo, es buena. El error es de 0,052113666.

Datos Reales	Modelo	$y(vt, is, vv, T) - y(vt, T) / y(vt, is, vv, T)$
0,1	0,1	0
6	6,8	0,133333333
12	13	0,083333333
14	15	0,071428571
15	19,01	0,267333333
18	19	0,055555556
20	20,05	0,0025
26	26,6	0,023076923
28	28,09	0,003214286
30	30	0
32	33	0,03125
36	36,7	0,019444444
38	38,2	0,005263158
40	42	0,05
43	43,2	0,004651163
45	45,9	0,02
49	49	0
51	50,99	0,000196078
60	61	0,016666667
63	64	0,015873016
68	68,9	0,013235294
74	110	0,486486486
<b>SUMATORIA</b>		1,302841642
SUMATORIA/25		0,052113666

Tabla 4-6: Validación del NO<sub>2</sub>

Como se puede observar, a través de la validación; el modelo propuesto se aproxima bastante a los datos experimentales.

## 5 ESPECÍFICACIONES DEL PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN

### 5.1. Objetivo General

Desarrollar un **prototipo de software** para simular modelos difusos aplicados al diagnóstico de la calidad del aire de un área metropolitana de Bucaramanga.

### 5.2. Casos de Uso

Implementar los ambientes de Inicio principal, configuración del FIS (Sistema de Inferencia Difuso), partición de los conjuntos borrosos, variables de salida, reglas de inferencia y evaluación e implementación de los resultados.

1. Crear, Inicializar, añadir y remover los conjuntos de variables lógicas.
2. Graficar las funciones de pertenencia de acuerdo a la función elegida por el usuario (Lineal, Triangular, Trapezoidal, Gaussiana, Singleton, y Sigmoidea), el rango definido por el usuario para el término lingüístico correspondiente. El usuario podrá modificar en forma manual sobre el gráfico el rango y los parámetros de éste.
3. Almacenar toda la configuración del respectivo término lingüístico y asociarlo a la variable a la cual pertenece.

4. Operadores borrosos AND, OR, NOT, un defuzzificador por el método del centroide y algunos modificadores como; el NOT y el NO\_TANTO.
5. Concatenación de operaciones entre términos lingüísticos, con el objeto de conformar las reglas.
6. Concatenación de reglas para conformar los bloques de reglas y de esta manera aproximar la salida del sistema de inferencia definido por el usuario.
7. Graficar la salida de todas las reglas para todas las variables de salida propuestas por el usuario en dos dimensiones
8. Graficar la salida
9. Ayuda en Línea

### **5.3. Otros Objetivos Específicos**

- IV. Diseño de las ventanas.
- V. Diseño de alto nivel de perspectiva especificación, con UML.
- VI. Integración de todas las funciones descritas en la sección anterior.
- VII. Documentación de la GUI, con algunos diagramas de UML, como son los diagramas de caos de uso.
- VIII. Documentación de los diferentes módulos.

## 5.4. Diseño de Ventanas

A continuación se presenta la descripción de las ventanas, algunas de las cuales incluirán una barra de herramientas y una barra de menú que son de uso general dentro del ambiente de **SEXDP**. La primera incluye un botón de nuevo para construir un nuevo sistema de inferencia difuso residente en disco, un botón para actualizar y un último para imprimir la pantalla en curso. A la barra de menú de ámbito general se anexan el menú Archivo, Edición, Ventana y Ayuda. Archivo tiene las siguientes funciones: Abrir, Guardar, Guardar como. Edición tiene Deshacer y Cortar. Ventana ofrece la posibilidad de entrar a cualquiera de las ventanas que se describen en la siguiente sección. Mientras que ayuda ofrece un tutorial para facilitar el uso de la herramienta.

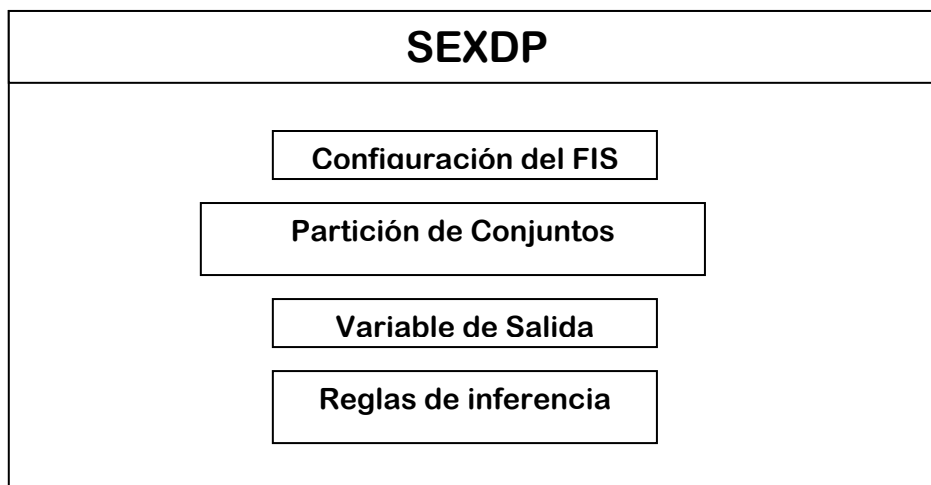
La descripción de las ventanas, junto con los casos de uso y en general todos los objetivos específicos relacionados, con el desarrollo del prototipo de software de simulación; suman los alcances de esta tarea específica. En otras palabras definen los requerimientos de los usuarios potenciales de **SEXDP**. Miembros del CEIAM y de GIEMA.

### 5.4.1. Inicio

Esta ventana como su nombre lo indica es una caja de dialogo que presenta las características generales de la herramienta al usuario, tales como su nombre, la plataforma, a quienes pertenece los derechos reservados. Más los logos del centro y grupo de investigación que intervienen en el desarrollo de **SEXDP**. **CEIAM** y **GIEMA**

### 5.4.2. Principal

La ventana principal de las herramientas se titula bajo su mismo nombre “SEXDP”. Y le permite al usuario abrir cualquiera de las ventanas disponibles en el software o efectuar cualquier función sobre un sistema de inferencia que resida en disco, tal como abrir, imprimir o incluso borrar.

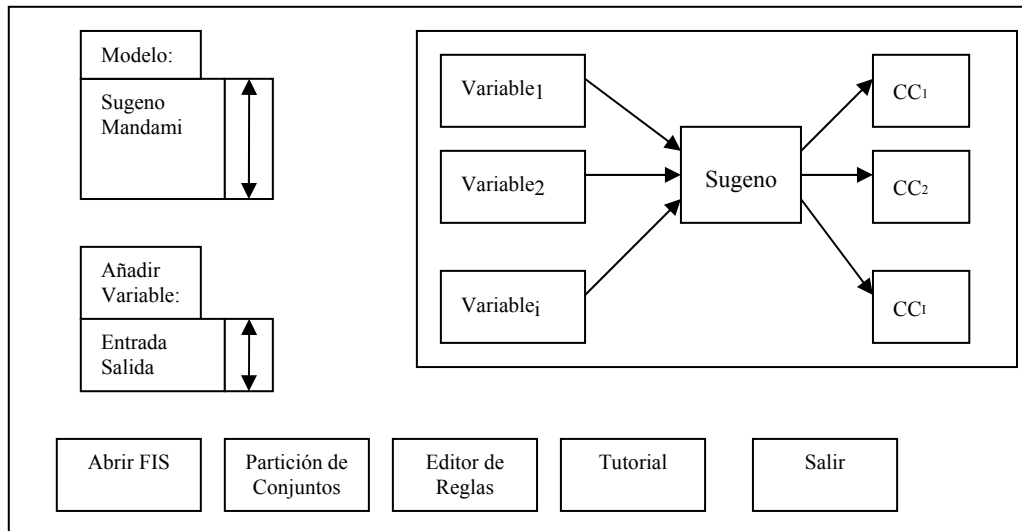


*Figura 5-1: Diseño del Panel de Inicio*

Todo esto es posible a través de la barra de menú y la barra de herramienta acoplada a la ventana.

### 5.4.3. Configuración del FIS

Esta ventana es útil para configurar de manera global un sistema de inferencia difuso. Definiendo cuales serán las variables de entrada del modelo, cuales las de salida y que modelo se va a seguir.



*Figura 5-2: Diseño de la Ventana “Configuración del FIS”*

Tal como se observa en la figura, esta cuenta con los siguientes controles:

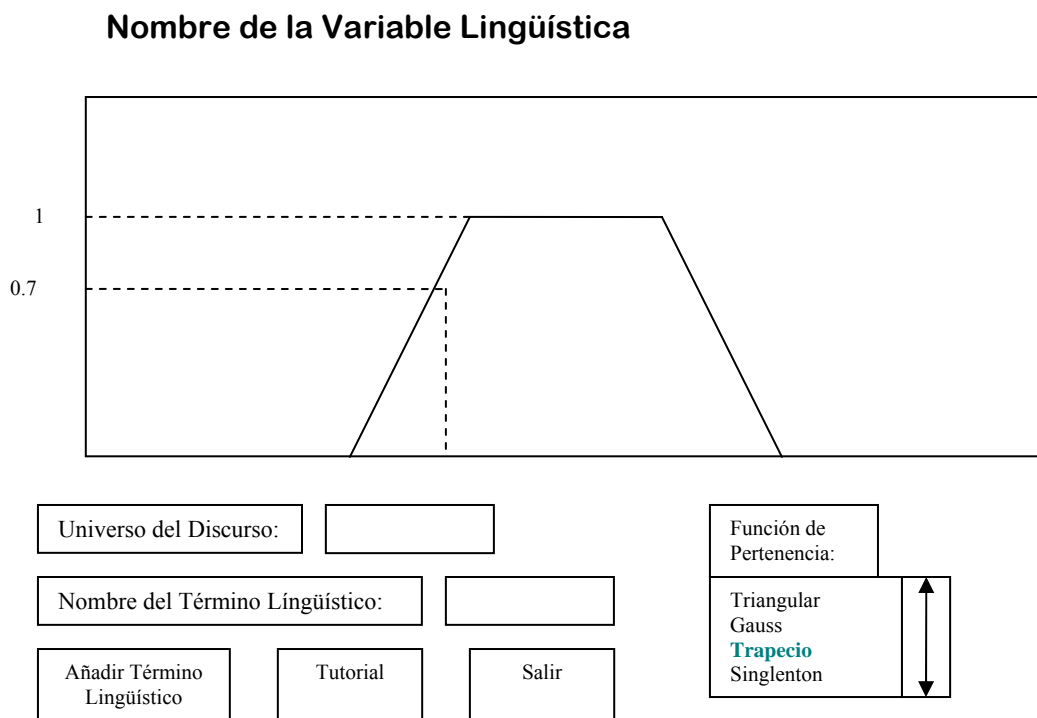
1. Un label titulado “Modelo” que me indica que la caja de lista que está situada debajo de él permite seleccionar el modelo entre Mamdani y Sugeno.
2. Un Frame “Añadir” con dos opciones, variables de entrada o variable de salida.
3. Un área para manipular de forma gráfica la configuración del FIS, solo desde esta es posible remover variables.
4. Un botón para abrir un FIS que resida en disco,
5. Otro botón para entrar a la ventana “Partición de Conjuntos Borrosos”,
6. Otro para entrar a la ventan que edita las reglas,
7. Otro para entrar al tutorial

8. Y un último que permite salir de **SEXDP**

Además esta ventana incluye la barra de herramientas general de **SEXDP**

#### 5.4.4. Partición de Conjuntos Borrosos

Esta ventana se titula “Partición de Conjuntos Borrosos”. Y como su nombre lo indica permite partir las variables lingüísticas en términos lingüísticos. Ella tiene nueve controles como se observa en la figura 4-3 a saber:



*Figura 5-3: Diseño de la Ventana “Partición de Conjuntos Borrosos”*

- Un label, en el cual **SEXDP** escribe el nombre de la variable.
- Un área para graficar las funciones de pertenencia de los diferentes términos lingüísticos asociados.

- Un label que indica que en la caja de texto delante tiene la función de pedirle al usuario los límites de la variable.
- Un label que indica que en la caja de texto enfrente se le pide al usuario el nombre del término lingüístico a definir en forma gráfica. Dicha caja de texto permanece por defecto inactiva, pero al oprimir el botón “Añadir Término Lingüístico” ella se habilita.
- Un label que permite seleccionar de una gama de funciones para definir la función de pertenencia que corresponde al término lingüístico. Entre estas; gaussiana, lineal, sigmoidea, pi, singleton, triangular y trapezoidal.
- Si el usuario elige esta última deberá aparecer una caja de texto que por lo general está oculta para solicitar al usuario que defina la función.
- Más un botón que imparte la orden de habilitar los controles correspondientes para definir un nuevo término lingüístico.

#### **5.4.5. Reglas de Inferencia**

Esta ventana edita las reglas de inferencia que el usuario según el conocimiento del comportamiento de los fenómenos que intervienen considere construir.

If término lingüístico<sub>1</sub> AND término lingüístico<sub>2</sub> THEN CC<sub>1</sub> IS Término de Salida<sub>1</sub> AND CC<sub>2</sub> IS

Por favor escriba una regla por renglón, solo se permite un espacio entre palabras y solo use los operadores de la caja de lista

Operadores:	
AND	↑ ↓
OR	
NOT	
NO_TANTO	

Figura 5-4: Diseño de la Ventana "Reglas de Inferencia"

Tal como se observa en la figura 4-4, esta se compone principalmente de tres controles; un dialogo común, el cual no es otra cosa que un área disponible para que el usuario escriba las reglas, de acuerdo a la forma como se le indique en los demás controles. Ya que estos lo guiarán para tal efecto. El usuario debe ser muy disciplinado en cuanto a las normas, porque de lo contrario se producirán excepciones y esto evitará en cierta medida un correcto funcionamiento de **SEXDP**. Por lo tanto su contenido debe ser claro.

Una caja de lista que contiene la lista de operadores disponibles. Como son las funciones "And" y "Or", más los modificadores "Not" y "No Tanto". Es de anotar que al implementar esta lista debe tener precauciones necesarias porque estas suelen ser palabras reservadas de los lenguajes de propagación (Las funciones *Tnorm* y *Tconorm*, más el *Hedge*). Si el usuario intenta usar alguno diferente, el sistema debe validar.

### 5.4.6. Variable de Salida

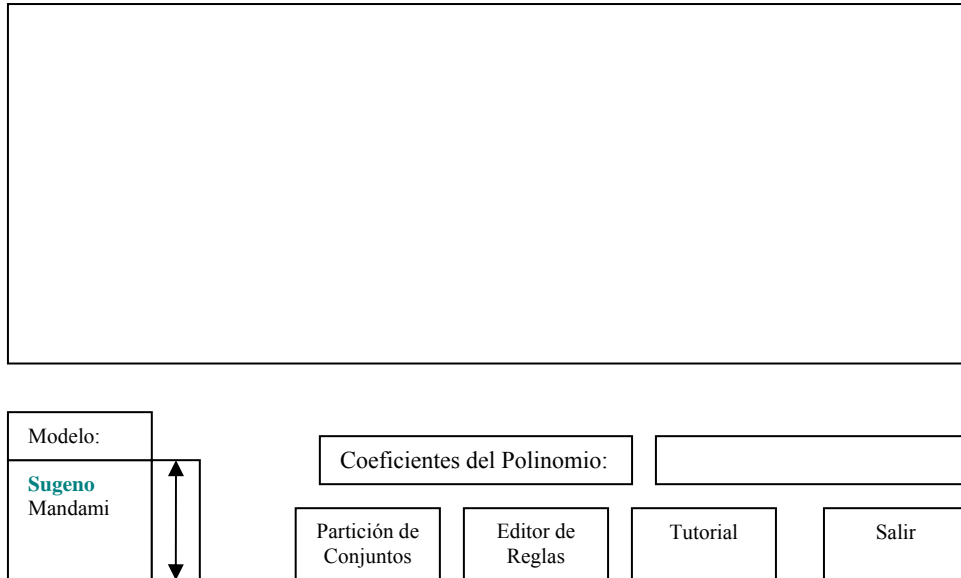


Figura 5-5: Diseño de la Ventana “Variable de Salida”

Al abrir esta ventana debe aparecer una caja de dialogo que le consulte al usuario que variable de salida desea. La otra alternativa es dar doble clic sobre su icono correspondiente en el gráfico de la ventana “configuración del FIS”.

Esta debe tener un área para el gráfico, por defecto la salida que se despliega es difusa, pero la ventana tiene un frame donde el usuario podrá cambiar a salida crisp; si el usuario elige esta última deberá aparecer la salida resultante después de aplicar el método del centroide; tanto en datos numéricos como en una gráfica. Además deben estar presentes pero ocultos un label más una caja de texto que le corresponda para pedir los coeficientes del polinomio de salida del modelo de Sugeno, en caso de ser este el seleccionado por el usuario en la ventana “Configuración del FIS”, esta caja de texto deberá sugerirle al usuario que entre estos coeficientes en el formato (##.#####, ##.#####, ##.#####, etc.) y en lo posible permitirle al usuario hasta diez decimales ya que tal precisión es de considerar en el fenómeno de la contaminación del aire.

Adicionalmente esta ventana tiene acoplada la barra de herramientas general de **SEXDP**.

## **6. Diseño de Alto Nivel del Prototipo de Software de Simulación**

De acuerdo con los objetivos específicos de esta investigación y en particular al tercero. “Desarrollo de un prototipo de software de simulación empleando la lógica borrosa para fenómenos ambientales que sirva de base para futuras investigaciones en la calidad del aire”, y como se esboza con más detalle en el capítulo V “Especificaciones del Prototipo de Software de Simulación”, lo que se pretende es construir una herramienta software para el uso del CEIAM y el GIEMA con el fin de facilitar el desarrollo de modelos de contaminación del aire producido por fuentes móviles en el área urbana de la meseta de Bucaramanga. En otras palabras, le permitirá a los usuarios elaborar sus propios sistemas de inferencia con sus elementos básicos como son la creación de los conjuntos borrosos, la partición de dichos conjuntos, algunos operadores borrosos tales como “And”, “Or”, “Not” y algunos operadores avanzados como el “Hedge”; más un editor de reglas de inferencia y la generación de dos posibles salidas para un determinado sistema de inferencia, una según el modelo de Mamdani y la otra según el modelo de Sugeno que es precisamente el sugerido para el fenómeno de interés a partir del estudio de esta investigación.

Adicionalmente con el objeto de enfocar al modelador más nuevo en el tema, la herramienta software planteará algunas de las variables que se consideran relevantes en el fenómeno de estudio. Y se dejará abierto el camino para continuar con el desarrollo de una base de datos asociada con la arquitectura de esta herramienta con la elaboración del diseño de dicha base de datos. La cual permitirá registrar y administrar los datos históricos recientes de tales variables y además tendrá otro importantísimo valor agregado, al poder generar de manera automática los coeficientes del polinomio de salida en el modelo de Sugeno.

También es importante para nosotros lograr un ambiente más amigable que las que actualmente están disponibles en el INTERNET y que son de dominio público. Ya que las que son de dominio privado son sumamente costosas y del orden de los doce millones de pesos aunque no incluyen el código fuente.

Ya entrando en materia con lo que se refiere al diseño, fue decisión unánime por parte de la dirección de este proyecto que se usara notación UML, en especial porque los diagramas son de gran ayuda para la comprensión del funcionamiento del software tanto para el mismo diseñador como para el resto de miembros del equipo [11]. Y porque además el UML como su nombre lo indica es el lenguaje unificado para el modelado. En particular para el diseño de alto nivel se emplearon los diagramas de clase.

Por otra parte el diseño orientado a objetos que es el corazón y el alma del UML [12]. Se considero emplear en la elaboración de este software para facilitar la reutilización del código. Por ser este el prototipo; es decir la primer versión. Y de esta manera promover la actualización a futuras versiones.

Para terminar este preámbulo nosotros le hemos denominado a este proyecto que como acabamos de mencionar se refiere al tercer objetivo específico de esta investigación. “PROTOTIPO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN QUE EMPLEA LA LÓGICA DIFUSA PARA MODELOS DE LA POLUCIÓN DEL AIRE” **(SEXDP)**

## **6.1. División del “Sistema Experto Difuso para la Polución”, en Paquetes**

Gracias al uso que se hace de la metodología “Orientada a Objetos” en este proyecto y con el propósito de facilitar la dirección y coordinación del desarrollo de este proyecto se dividió el sistema en paquetes [11] y [12].

Por un lado el paquete **Dominio de Arquitectura** agrupa los paquetes para la plataforma del software sobre los cuales la aplicación funciona:

- I. La **Interface Gráfica del Usuario**. Que comprende todo lo relacionado con las ventanas que interactúan con el usuario, y que desde el punto de vista del reparto de tareas incluye el diseño de las ventanas, el diagrama de clases de perspectiva especificación más la implementación.
- II. Más la **Base de Datos** para administrar y almacenar toda la información referente a las variables de mayor incidencia en la polución del aire del casco urbano de la meseta de Bucaramanga producida por el flujo de los diferentes tipo de vehículos.

Y por otro lado el paquete **Motor de Inferencia**. En el cual se asocian de manera sistemática las diferentes clases que finalmente concatenan las variables lingüísticas que están relacionadas con términos lingüísticos, con los diferentes operadores borrosos disponibles en la herramienta computacional, para finalmente asociar un conjunto de reglas de inferencia con los operadores y variables necesarias para generar una salida crisp o borrosa según como lo desee el usuario.

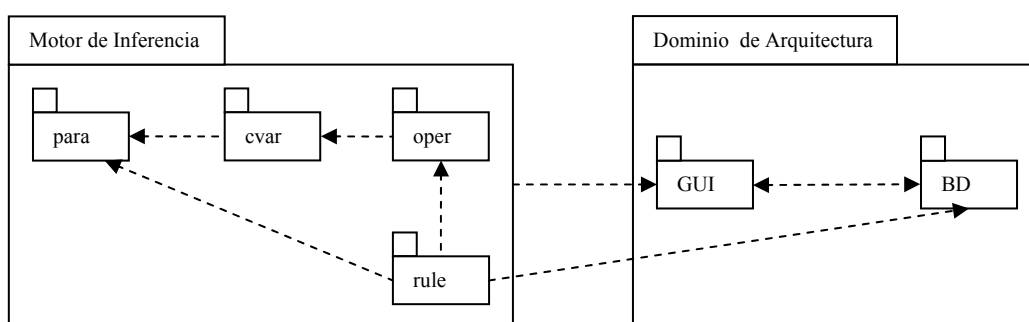


Figura 6-1: Diagrama de Paquetes de **SEXDP**

## 6.2. Paquete librería “Interfase Gráfica del Usuario”

Este paquete librería provee al programador de la herramienta con las clases necesarias para desarrollar la interfase gráfica del usuario; tales como ventana, y del tipo caja: caja de texto, caja de lista, caja combo y botón. También es importante la clase menú que es de tipo ventana y la barra de menús. El objeto principal de este módulo es construir estos objetos que acabos de mencionar que ya están disponibles en el lenguaje de programación ya definido para este paquete librería “java” con las características que identifiquen este sistema, permitiendo agilizar el trabajo de programación.



Figura 6-2: Paquete “*Interfase Gráfica del Usuario*”

## 6.3. Paquete “Motor de Inferencia”

Para lograr una mayor fiabilidad en el funcionamiento de este sistema se partió de una librería que fue encontrada durante la revisión del estado del arte, la cual se encuentra disponible como software de dominio público en la web. Sin embargo fue necesario un arduo trabajo para comprender su funcionamiento y además para elaborar los modelos UML ya que esta librería no viene acompañada de ellos. Por otra parte se amplió el diseño con nuevas clases y atributos para poder extenderlo de acuerdo al alcance de esta herramienta software, ya que esta librería es demasiado básica. Después de estas modificaciones este nuevo diseño al igual que el software que se desarrollará en base a este pasa a ser de dominio privado para el CEIAM y el GIEMA.

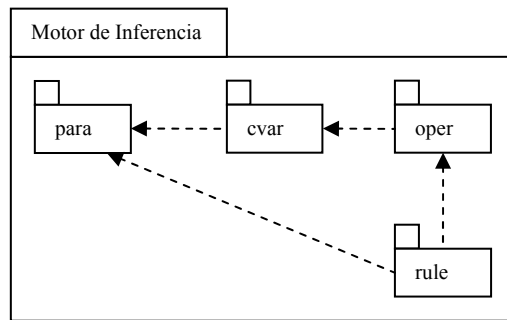


Figura 6-3. Diagrama de Paquetes del Paquete **“Motor de Inferencia”**

Es importante tener presente que los nombres que se le han dado a los paquetes módulos que conforman el **Motor de Inferencia** son de sólo cuatro caracteres y todos en minúscula como lo requiere el c++ que es uno de los lenguajes opcionales para implementar el motor de inferencia.

Más aún el diseño se elaboró para programar en lenguaje c++, puede que esto no sea recomendable pero para el caso el investigador quien diseña, participa en la implementación y codirige los investigadores auxiliares encargados de parte de la implementación es al mismo tiempo experto en el dominio. Con esto también se logra según los tres amigos Rumbaugh, Jacobson y Booch una mayor facilidad a la hora de implementar.

### 6.3.1. Módulo “para”

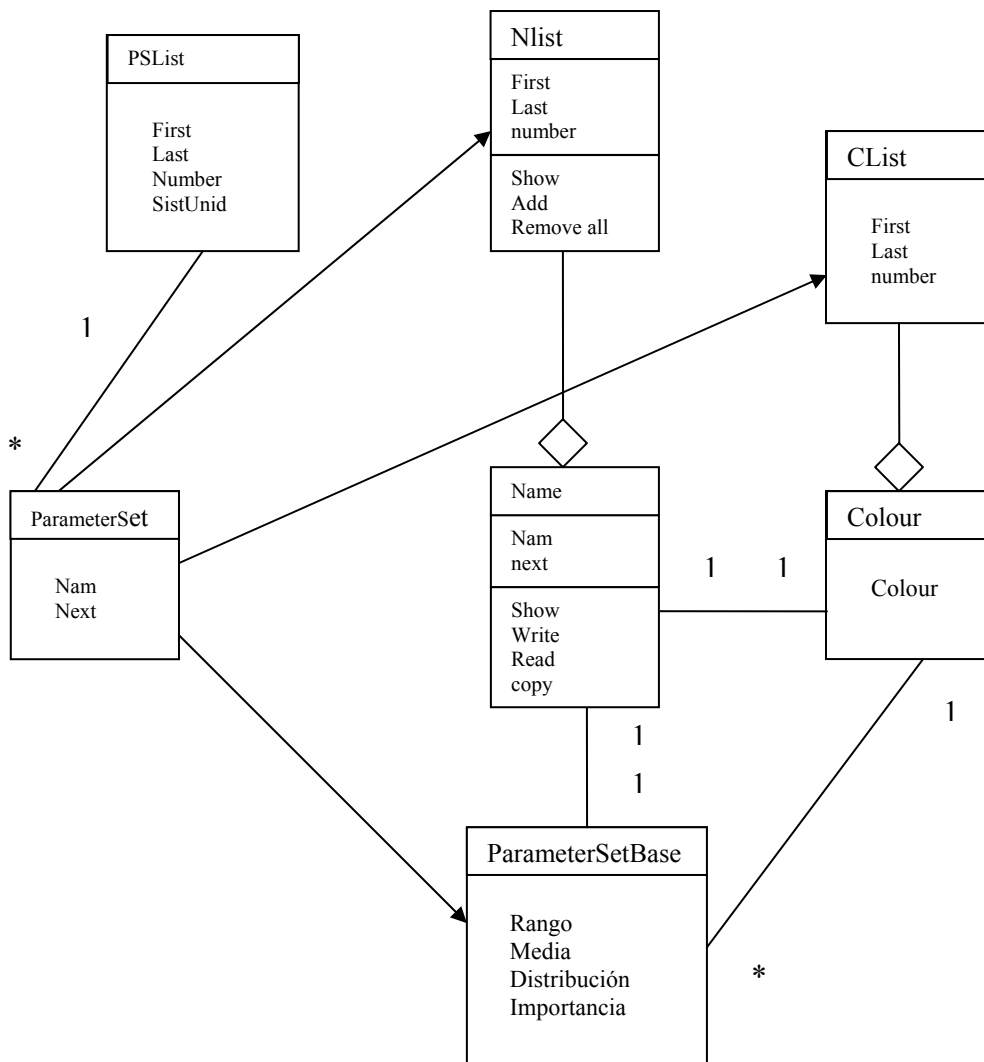


Figura 6-4: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo “para”

Este paquete módulo provee al desarrollador con las funciones más básicas con el objeto de manejar “las tareas administrativas” necesarias para la definición de variables lingüísticas. Entre estas tareas se incluyen: Crear, inicializar, añadir y remover conjuntos de variables lingüísticas y además funciones básicas de entrada/salida. El concepto más importante de este módulo es la lista. Cada clase básica está fuertemente relacionada con otra clase, la cual es una lista lineal simple de objetos de la clase básica. La lista

que se muestra a continuación muestra las clases (de lista) contenidas en este módulo y que están previamente relacionadas con la clase básica correspondiente. A continuación se da una descripción detallada de la funcionalidad de cada clase es dada.

- Name / NList
- Colour / CList
- ParameterSetBase
- ParameterSet / PSList

#### **6.3.1.1. Name**

Esta clase es usada para representar el nombre de un termino lingüístico, hecho explicito en el atributo “nam”, cuyo tipo es un tipo definido string permitiendo un máximo de 40 caracteres para ser usados en un string. Como ya se mencionó antes cada clase básica es usada como una “clase lista”, lo cual es posible gracias a la existencia del atributo “next” que es el puntero para el siguiente objeto “Name” en la lista.

El método *show* se usa para escribir el valor actual de nam, el método *read* y *write* manejan la salida y la entrada a archivos previamente creados, el método *copy* graba el atributo nam en otro objeto Name.

#### **6.3.1.2. Nlist**

Esta clase es una lista lineal de objetos de la clase “Name”. Se usa para representar todos los diferentes “términos lingüísticos” que pueden ser asignados a una “variable lingüística” específica. Los objetos Name son “referidos a” como elementos de la lista. Nlist tiene tres atributos “first”, “last” y “number”, donde “first” es un puntero al primer elemento en la lista, “last” es un puntero al último elemento de la lista, y “number” almacena el número de los elementos contenidos actualmente en la lista.

El método *show* es una simple extensión del objeto *Name* y escribe los valores de la lista entera. El método *read* and *write* manejan la salida y la entrada a archivos. El método *add* añade un elemento a la lista. El método *find* accesa un elemento con cierto índice y retorna un puntero al elemento. El método *remove\_all* borra todos los elementos de la lista.

### 6.3.1.3 Colour

Esta clase almacena el valor “*colour*” de otro objeto. Esta es principalmente usado para la representación gráfica de “términos lingüísticos” y “variables lingüísticas” respectivamente. Los atributos de la clase son “*colour*”, el cual almacena el valor del color y es de un tipo de enumeración (*colourtyp*), y *next*, el cual es usado para implementar el concepto de lista ya familiarizado.

También tiene los métodos *show*, *read*, *write*, *copy* y otros métodos para colocar el atributo *colour* y métodos para colocar y conseguir los valores de los atributos *colour* y *next*.

### 6.3.1.4. CList

Esta clase es una lista lineal de objetos de la clase *Colour*. Esta puede ser vista como una lista de diferentes valores del atributo *colour* de términos lingüísticos de una variable lingüística. Como otra descripción los objetos *Colour* de la lista son “referidos a” como elementos de la lista. Los tres atributos son *first* y *last*, los cuales son punteros a un objeto del tipo *Colour*, y *number* que es una variable entera con el número de elementos actualmente contenidos en la lista.

### 6.3.1.5. ParameterSetBase

Esta clase contiene todos los parámetros que son requeridos para describir una *variable* lingüística; entre estos están el *rango* con su más bajo y alto valor, la *media*, la *distribución* y la *importancia*, esta última se refiere a la prioridad de la

variable dentro del modelo. Luego los atributos del objeto son *range\_lower\_end*, *range\_upper\_end*, *median* e *importance*. Todos estos atributos son valores flotantes simples.

El método *show* escribe los valores de los parámetros. Los métodos *read* y *write* hacen lo mismo excepto que ellos escriben estos valores en el archivo correspondiente y no en la pantalla. El método *copy* copia los parámetros de un objeto *ParameterSetBase* existente a otro objeto de la misma clase.

#### **6.3.1.6. ParameterSet**

Esta clase es una agregación de las tres clases NList, CList y ParameterSetBase, o expresado más técnicamente, esta se deriva de la herencia múltiple de estas tres clases. De aquí que esta combina las descripciones de los términos lingüísticos, con los atributos de una variable lingüística. Esta clase se define como un elemento de una lista, llamada PSList la cual será descrita a continuación. Los atributos son *ps\_name* que contiene el nombre de ParameterSet y *next* que se refiere a otro objeto de la clase *ParameterSet* que le sigue dentro de la clase PSList.

Otra vez están presentes los métodos *show*, *read*, *write*, *copy* y existen métodos *get* para conseguir los atributos de la clase además de otros métodos *get* para extraer una clase completa Nlist o Clist contenida en un objeto de esta clase.

#### **6.3.1.7. PSList**

La clase introduce un concepto ya familiar que es la clase lista. Esta representa una lista lineal de objetos ParameterSet, la cual puede ser vista como una agregación de *ParameterSets* de varias variables lingüísticas. Los atributos de esta clase son *first* y *last*, los cuales son punteros a los objetos *ParameterSet*, *SistUnid* el cual define el sistema de unidades que el usuario ha

elegido y *number*, el cual es un entero que almacena el número de elementos en la lista.

El método *find* es usado para encontrar un elemento por su índice, y se reitera la aparición de los métodos *show*, *read*, *write*, *add*, *remove\_all* y *remove*.

### 6.3.2. Módulo “cvar”

Este paquete módulo se enfoca en los detalles de una variable lingüística. Primero, las clases FuzzySetBase, PlimFuzzySet y PlimList definen las características de los términos lingüísticos, en especial el manejo de las funciones de pertenencia y sus instancias. Luego las clases CombinedVariable y CVList agregan los términos lingüísticos que están en PlimList con los atributos de la variable lingüística asociada presentes en ParameterSetBase. A continuación usted puede ver una lista de las clases contenidas en este módulo.

- FloatValue / FList
- Point / PList
- FuzzySetBase
- PlimFuzzySet / PlimList
- CombinedVariable / CVList
- Gaussian
- Lineal
- S
- Pi
- Trapezoidal
- Rectangular
- Triangular
- Singlenton

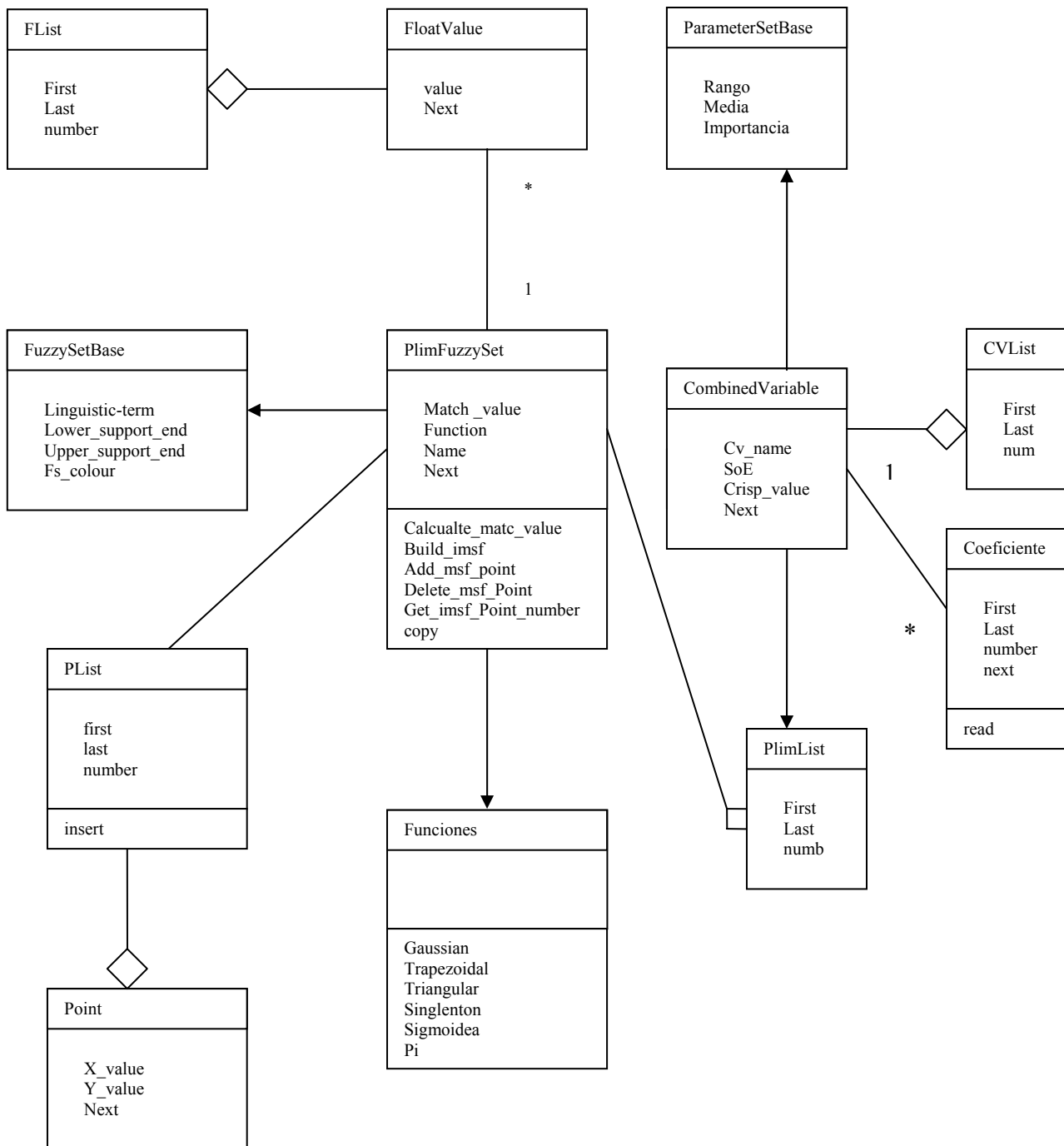


Figura 6-5: Diagrama de clases de perspectiva Implementación del módulo “cvar”

### 6.3.2.1. FloatValue

Este representa un valor flotante, el cual es usado como un elemento de una lista lineal provista por la clase FList. El atributo *value* es una variable flotante, el atributo *next* es una referencia a otro objeto FloatValue, el cual es requerido para construir una lista lineal de objetos FloatValue tal en la clase Flist. Esta técnica es la misma que se aplicó en el módulo anterior con los siguientes objetos Name, Colour, ParameterSet, NList, CList, y PSList respectivamente.

### 6.3.2.2. FList

Esta clase es una lista lineal de objetos FloatValue. El conjunto de atributos está conformado por *first* y *last* que son punteros del primer y último objetos FloatValue contenidos en la lista, más *number*, el cual es una variable entera que almacena el número de elementos contenidos en la lista.

### 6.3.2.3. Point

Esta clase representa un punto de una función de pertenencia, la cual consiste de varios puntos que describen su forma. Los atributos de la clase son *x\_value* y *y\_value* que son valores simples flotantes y que representan las coordenadas del punto mas el atributo *next*, el cual hace referencia a otro objeto Point tal como sea requerido por el objeto de lista PList, técnica ya familiar para el lector atento de la sección anterior.

El constructor inicializa el objeto por defecto en el punto (0,-1). El constructor alternativo inicializa el objeto con el punto especificado por los atributos para las coordenadas x y y. Se repite la aparición de los métodos *show* que escribe las coordenadas en la pantalla. Los métodos *read* y *write para la salida y entrada de datos a archivo*. Más los métodos simples *get* y *set*.

#### 6.3.2.4. PList

Esta clase es la representación de una lista lineal de objetos Point. Los atributos son *first* y *last* que son punteros de los objetos Point, y *number*, el cual es un entero y almacena el número de elementos de la lista.

El método *show* escribe todos los valores de todos los elementos, también puede hacer uso de los métodos *add*, el método *find* que accesa un elemento de la lista por su índice y retorna un puntero al objeto Point encontrado, este tiene dos modificaciones *find\_x* y *find\_y* que también accesan un elemento por su índice pero además retornan sus coordenadas "x" y "y" respectivamente. El métodos *revome*, *remove\_all* mas el método *insert* por medio el cual un nuevo elemento es insertado en la lista.

#### 6.3.2.5. FuzzySetBase

Esta clase contiene algunos parámetros básicos de un término lingüístico, los cuales son su nombre, sus límites inferior y superior que definen el universo del discurso hablando en términos más técnicos; y su color. Los atributos del objeto corresponden a los parámetros del FuzzySetBase, a saber *linguistic\_term* del tipo Name, *lower\_support\_end* y *upper\_support\_end* de tipo flotante, y *fs\_colour* del tipo Colour.

#### 6.3.2.6. PlimFuzzySet

Esta clase se deriva de FuzzySetBase, como una extensión esta contiene el valor por defecto (default) y la función de pertenencia instanciada de un término lingüístico. Los atributos de la clase son los dos objetos PList *msf* e *imsf* para la función de pertenencia y la función de pertenencia instanciada, el *match\_value*, el cual es un valor flotante, la *function*, la cual es el nombre de la función de pertenencia y un objeto Name, más el puntero *next* a otro PlimFuzzySet.

*Match\_value* representa el valor de la intersección entre el valor crisp y la función de pertenencia de un término lingüístico específico. El método *show* escribe el FuzzySetBase en ejecución, el *match\_value* y los puntos por defecto más la función de pertenencia instanciada; en la pantalla. El mismo procedimiento se aplica en los métodos *read* y *write*, con la excepción de que la entrada y salida de estos valores vienen o van a archivos. El método *calculate\_match\_value* calcula el *match value* de la función de pertenencia para un valor crisp específico. El cálculo es una simple intersección entre la línea vertical definida por el valor crisp y el polígono definido por los puntos de la función de pertenencia. El *match\_value* (la coordenada “y” del punto de inserción) indica la satisfacción del término lingüístico alcanzada por un valor crisp. El método *build\_imsf* simplemente calcula la función de pertenencia instanciada de acuerdo con el *match\_value* actual. El método *add\_msf\_point* añade un nuevo punto a la función de pertenencia, el punto es especificado por sus coordenadas y es adjuntado a través del método *insert* en la clase Plist. Los métodos *Get\_msf\_Point\_number* y *Get\_imsf\_Point\_number* retornan el número de puntos contenidos en los polígonos de la función de pertenencia y la función de pertenencia instanciada.

Con el objeto de **SEXDP** pueda ofrecer toda una gama de posibles funciones tales como la Gaussiana, Lineal, Sigmoidea, Pi, Trapezoidal, Rectangular, Triangular y Singleton para definir una función de pertenencia. Es necesario implementar sus constructores y llamarlos de acuerdo al atributo *Function* de la clase PlimFuzzySet que es seleccionado por el usuario desde la GUI.

#### **6.3.2.7. PlimList**

Esta clase se usa para crear una lista lineal que contiene objetos PlimFuzzySet. Esta puede ser vista como una variable lingüística que consiste de varios términos lingüísticos. Los tres atributos adicionales aparte de los heredados son “*first*” y “*last*”, punteros al primer y último elemento en la lista, y “*number*”, el cual almacena el número de elementos contenidos en la lista.

Su constructor crea una lista vacía que no tiene parámetros. El destructor borra todos los elementos. El método *show* escribe todos los parámetros de cada elemento de la lista en la pantalla. El método *add* añade un nuevo elemento al final de la lista. Sin parámetros un PLimFuzzySet es agregado a la lista mientras que los parámetros del nuevo objeto PLimFuzzySet se especifican para definir la forma de la “función de pertenencia”. El método *find* accesa un elemento de la lista por su índice, de forma alterna el operador array [ ] puede ser usado. El método *get\_fs\_index* accesa un elemento de la lista por el nombre del “término lingüístico” y retorna su índice en caso de existir. El método *check\_match* chequea si la variable lingüística ya tiene definido los términos lingüísticos. Además existe una restricción que dice que la función de pertenencia debe tener al menos tres puntos.

#### **6.3.2.8. CombinedVariable**

Su origen se deriva de la clase ParameterSetBase y de la clase PLimList, donde ésta, es una representación de una variable lingüística consistente de varios términos lingüísticos con sus propios parámetros, las funciones de pertenencia y las funciones de pertenencia instanciadas. Los atributos de la variable lingüística son el *cv\_name* (del tipo Name), *SoE* el cual es una variable booleana que me indica si la variable lingüística es de salida o de entrada, el *crisp\_value* (del tipo float), y *next* el cual se refiere a la siguiente variable lingüística en la lista.

#### **6.3.2.9. CVList**

Esta clase pone varias variables lingüísticas juntas en una lista lineal. Los atributos de la lista son *first* y *last*, los cuales referencian variables lingüísticas, y *number*, la cual almacena el número de elementos en la lista.

### 6.3.3. Módulo “Oper”

Este paquete módulo provee todas las clases y métodos necesarios usados para operadores borrosos. A continuación veremos una lista de las clases contenidas en este módulo. Una descripción en detalle de esta lista puede ser vista posterior a esta.

- FuzzyOperator
- DeFuzzyOperator
- ConcatOperator
- TNorm
- TCoNorm
- CompOp
- DefOp
- OperatorSet
- ModiFunction
- Not
- Hedge

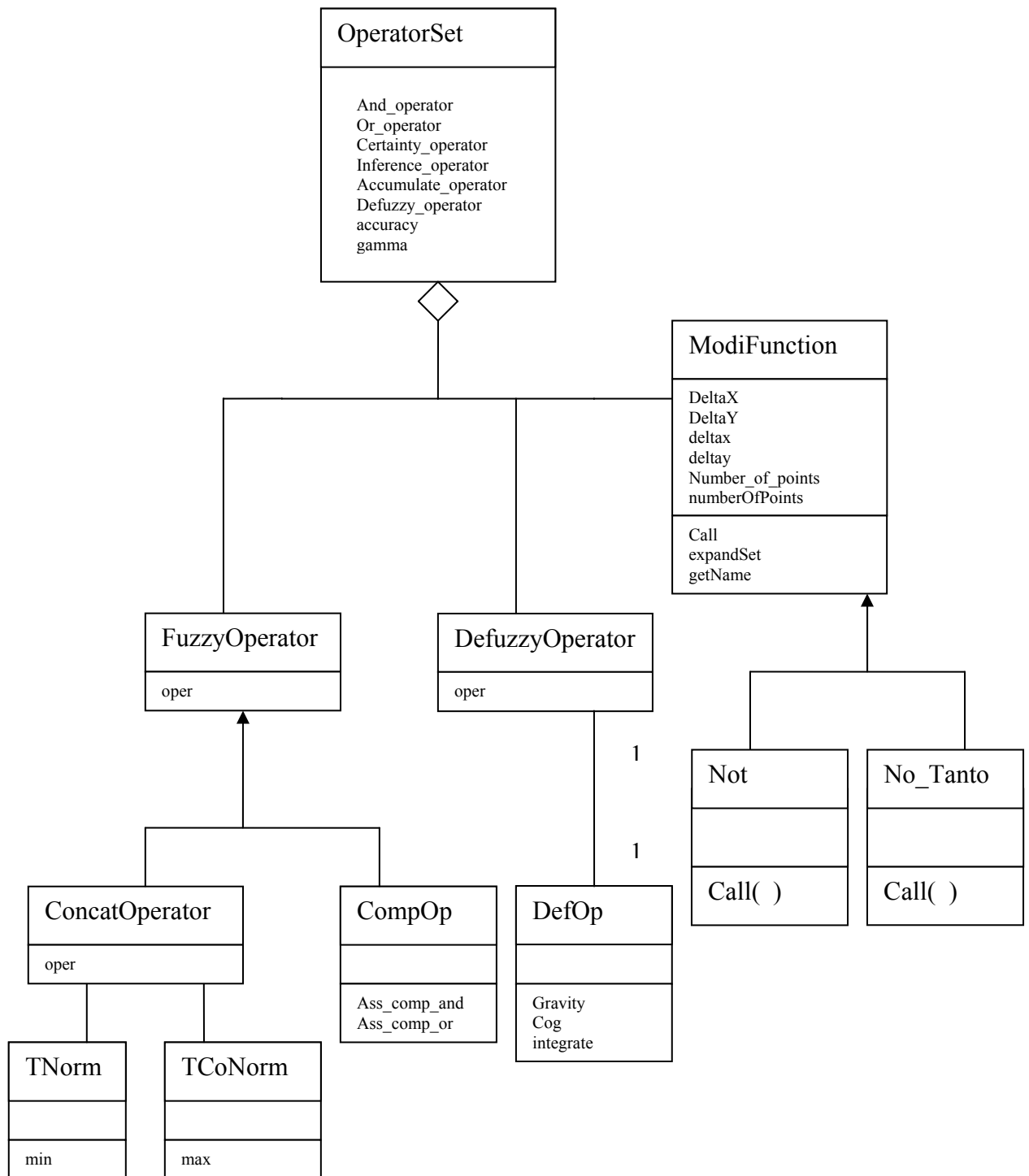


Figura 6-6: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo "Oper"

#### 6.3.3.1. FuzzyOperator

Esta es una simple clase que representa el tipo de un FuzzyOperator, el cual es usado para la conexión de términos, generalmente los operadores pueden ser interpretados como las relaciones “and” y “or”. De hecho es el operador borroso más usado. El único atributo de la clase es el tipo de operador *oper*, el cual es del tipo enumeración *fuzzy\_operator*.

#### 6.3.3.2. DeFuzzyOperator

Esta clase representa el tipo de un DeFuzzyOperator, la cual es usada para recuperar una desborrificación, un valor crisp del resultado borroso del proceso de inferencia. El único atributo de la clase es el operador *oper*, el cual es del tipo de enumeración *defuzzification\_operator*.

#### 6.3.3.3. ConcatOperator

Esta clase es la representación de un ConcatOperator, el cual es usado para concatenar varios objetos Terms. El único atributo de la clase es el tipo de operador *oper*, el cual es del tipo de enumeración *concat\_operator*.

El constructor por defecto inicializa el objeto colocando el valor *no\_cop* en su atributo. El constructor alternativo toma el tipo de operador como entrada. El método *show* escribe el tipo de operador en la pantalla. Los métodos *read* y *write* hacen lo mismo pero en archivos.

#### 6.3.3.4. TNorm

Esta clase no tiene atributos y suministra métodos para aplicar un operador mínimo mediante el uso de un calculo T-Norm. El método *min* con una

referencia a un objeto FList como parámetro calcula simplemente el mínimo de los valores flotantes contenidos en la FList.

#### **6.3.3.5. TcoNorm**

Esta clase no tiene atributos y suministra métodos para aplicar un operador máximo mediante el uso de un calculo T-Conorm. El método *max* con una referencia a un objeto FList como un parámetro simplemente calcula el máximo de los valores flotantes contenidos en la FList.

#### **6.3.3.6. CompOp**

Esta clase es un conjunto de operadores compensatorios. Los operadores *ass\_comp\_and* y el *ass\_comp\_or* se basan en la función tangente, y suministran asociatividad y operadores compensatorios.

#### **6.3.3.7. DefOp**

Esta clase no tiene atributos y suministra métodos para aplicar el operador defuzzification. El procedimiento usado para conseguir esto es el método *center of gravity*. El método *cog* por lo tanto genera la cubierta de la CombinedVariable referenciada en el parámetro y luego el método *integrate* integra la cubierta vía. Este método es responsable para el cálculo del centro de gravedad y retorna un valor flotante, el cual es el valor crisp, el cual es el valor desfuzzificado de la variable lingüística.

#### **6.3.3.8. ModFunction**

Es la clase madre de las funciones que implican una modificación de la función de pertenencia actual. Sus atributos son DeltaX, DeltaY, deltax, deltay, Number\_of\_points y numberofPoints. Ella requiere del método call para pedirle

a la clase `PlimFuzzySet` la función de pertenencia actual y modificarla según el criterio del usuario, además cuenta con los métodos `expandSet` y `getName`.

#### 6.3.3.8.1. Not

Hereda todos los atributos y métodos de la clase `ModFunction` y tiene sus propias variaciones del método `call`. Retorna el complemento del *match\_value* según los argumentos

- if ( $0.0 \leq y \leq 0.5$ ),  $y = 1 - y$

#### 6.3.3.8.2. No Tanto

Todos sus atributos son heredados de la clase `ModFunction`, pero utiliza unos métodos `call` que son propios de su clase. Retorna el *match\_value* expandido según los argumentos que precise el usuario, elevando todos los valores de pertenencia que corresponden a valores difusos a la potencia (1/3)

- if ( $0.0 \leq y \leq 0.5$ ),  $y = y^{1/3}$

#### 6.3.3.9. OperatorSet

Esta clase agrega los operadores y los métodos necesarios para SEXDP para hacer cálculos con una variable lingüística. Existen cuatro importantes pasos para archivar resultados de una regla base. Estos son *aggregation*, *certification*, *inference* y *accumulation*. De acuerdo con estos cuatro pasos hay cuatro funciones aggregate, certify, inference y accumulate. Los atributos del OperatorSet son los FuzzyOperators *and\_operator*, *or\_operator*, *certainty\_operator*, *inference\_operator*, *accumulate\_operator*, *importance\_operator* -, el *defuzzy\_operator*, y los enteros *accuracy* y *gamma*.

## Global functions

- `join_mv_with_importance`
- `aggregate`
- `certify`
- `inference`
- `accumulate`

### 6.3.3.9.1 `join_mv_with_importance`

Esta función combina un *match value* y una importancia con el operador importancia de un objeto OperatorSet

### 6.3.3.9.2. `agrégate`

Esta función agrega el *match values* de todas las funciones de pertenencia instanciadas almacenadas en un objeto FList a un *overall match value* mediante la aplicación del operador *concat operator* especificado por el parámetro a través de los operadores del objeto referenciado OperatorSet.

### 6.3.3.9.3. `certify`

Esta función calcula el *overall certified match value* mediante aplicación del operador *certainty operator* del objeto referenciado OperatorSet al *overall match value* y a el *certainty value*

#### 6.3.3.9.4. inference

Esta función calcula un nuevo *match value* mediante la aplicación del operador *inference operator* a el *overall certified match value* y el *match value* anterior del PlimFuzzySet referenciado.

#### 5.3.3.9.5. accumulate

Esta función acumula el valor de la variable lingüística mediante el calculo de su valor crisp a través del proceso defuzzification a través del método centroide o centro de gravedad.

#### 6.3.4. Módulo “Rule”

Este paquete módulo configura y enlista los diferentes términos lingüísticos, para luego concatenarlos con los otros y los operadores que conforman una regla. Posteriormente almacena todo el conjunto de reglas de inferencia que propone el usuario para un sistema de inferencia y utilizando el modelo borrosos previamente seleccionado por el usuario, con dos posibilidades, Mamdini o Sugeno. Para finalmente asociarlos con los distintos operadores y generar una salida del sistema de inferencia.

- Term
- TList
- Rule
- RuleBlock
- RuleSet
- Coeficientes

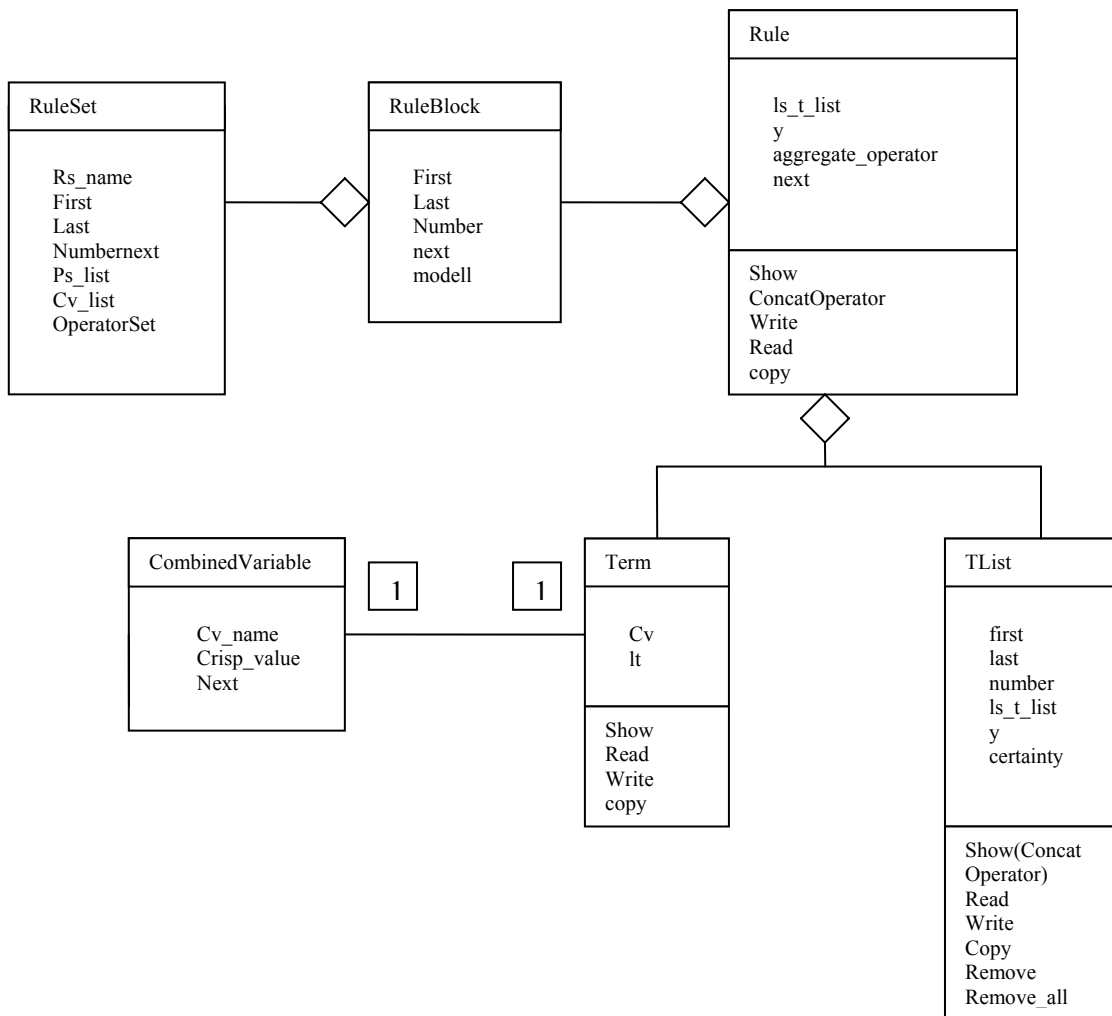


Figura 6-7: Diagrama de clase de perspectiva Implementación del módulo “Rule”

### 6.3.4.1. Term

Esta clase representa una variable lingüística y un término lingüístico asociado, por ejemplo “TEMPERATURE is HIGH”. Esta clase también representa el concepto de lista ya familiar de **SEXDP**, esta es la clase elemento que es agregada en una lista lineal en la clase TList. Los atributos del objeto son una

referencia al objeto CombinedVariable *cv*, un string *lt* para el término lingüístico (de tipo Name ), y una referencia a otro Term el cual es usado en la clase TList.

El constructor por defecto inicializa un objeto vacío sin referenciar una variable lingüística y con un término lingüístico por defecto. El destructor vacía mediante disolución de alguna referencia al objeto CombinedVariable y a otro Term. El método *Show* escribe el término de una forma idéntica al ejemplo dado, en la pantalla. Lo mismo es hecho por los métodos *read* y *write*, excepto que estos leen y escriben en archivo. El método *read* también chequea si el término leído es formado con una variable lingüística válida, dada una lista de variables lingüísticas,

#### **6.3.4.2. TList**

Esta clase es una lista lineal de objetos Term. Los atributos de la lista son las referencias al objeto *first* y *last* en la lista, mientras que *number* indica el número de elementos contenidos en la lista.

El constructor por defecto crea una lista vacía. El destructor desocupa la lista borrando todos sus elementos. El método *show* sin parámetros despliega todos los términos contenidos en la lista desde la pantalla. En forma alterna, el método *show* tiene un *ConcatOperator* como parámetro y concatena todos los términos de la lista con este parámetro.

#### **6.3.4.3. Rule**

Esta clase representa una regla que consiste de una lista de términos sobre el lado izquierdo y un término sobre el lado derecho. Los términos del lado izquierdo son agregados por un operador *concat*, adicionalmente, cada regla tiene un grado de certeza ligado a esta. De nuevo, varias reglas son combinadas en una lista de reglas, ver la clase RuleBlock para más detalles. De aquí que esta también necesite tener una referencia a otra regla. El formato

de una regla es IF Term-List THEN Term WITH CERTIDUMBRE c. Entre los atributos están los términos del lado izquierdo almacenados en un objeto TList llamado "*ls\_t\_list*", el lado derecho "*y*", la "*certainty*" (un valor flotante), el Concat Operator "*aggregate\_operator*" para agregación de los términos del lado izquierdo, y "*next*" que es la referencia a la otra regla.

El constructor inicializa un objeto vacío. El destructor borra todos los términos referenciados por la regla e inicializa los otros atributos. El método *show* escribe la regla en el formato ya presentado, en la pantalla. De la misma manera el método *write* maneja la salida a archivos y el método *read* desde archivos. El método *copy* copia una regla que ya existe al objeto regla que esta en curso. Además los métodos de acceso simples permiten que sea posible recuperar o manipular los parámetros de una regla, en particular sus variables lingüísticas y términos lingüísticos del lado izquierdo, la variable lingüística y el término lingüístico del lado derecho, la *certainty*, el número de términos del lado izquierdo y el *concat operator*. Además, los atributos de la regla pueden ser recuperados y colocados.

#### **6.3.4.4. RuleBlock**

Esta clase es la agregación de varios reglas a un ruleblock, el cual es normalmente utilizado para colocar todas las reglas con la misma variable lingüística del lado derecho juntas.

En la próxima clase RuleSet varios objetos RuleBlock son combinados en una lista lineal. Los atributos de la clase son la referencias *first* y *last* a la primera y última regla de la lista, con *number* indicando el número de reglas contenidas en el RuleBlock, y *next* refiriéndose a otro RuleBlock.

#### 6.3.4.5. Coeficientes

Es una clase tipo lista que pide al usuario los parámetros según las diferentes variables borrosas y reglas de inferencia propuestas por el usuario para colocarlos como coeficientes del polinomio de salida del modelo de Sugeno. Por lo que requiere de un método *get*. Esta clase está asociada uno a uno con una regla de salida baja, media o alta por variable lingüística de salida.

#### 6.3.4.6. RuleSet

Esta clase finalmente agrega todos los diferentes RuleBlocks dentro de una lista lineal, llamada RuleSet, la cual incluye parámetros adicionales. Entre estos están una lista de variables lingüísticas contenidas en la RuleSet, una lista de ParameterSets y un OperatorSet, de tal manera que esta clase combina toda la funcionalidad contenida en SEXDP. Los atributos de esta clase aparte de los heredados son *rs\_name*, el nombre de RuleSet del tipo Name, *ps\_list*, la lista lineal de parameter sets, *cv\_list*, una lista de variable lingüística, *operator\_set*, la agregación de todos los operadores requeridos, y los atributos para la lista lineal de RuleSet *first*, *last*, y *number*.

## 7. Validación del Prototipo de Software de Simulación

Con respecto al tercer objetivo específico de esta investigación. Desarrollo de un prototipo software de simulación empleando la lógica borrosa para fenómenos ambientales que sirvan de base para futuras investigaciones en la calidad del aire. Se inicio con una etapa previa del ***Diseño de Alto Nivel***; el cual se encuentra ampliamente explicado en el capítulo anterior del presente documento.

Luego se continuó con una etapa de ***Construcción***, es decir, una etapa en la cual se trabajó en el desarrollo y al mismo tiempo se adecuaba el diseño con objeto de mejorar el funcionamiento del prototipo de software y, por otra parte, sesgar el mismo de acuerdo a la viabilidad de su desarrollo. Este es el proceso recomendado por los tres amigos [11].

Las figuras que siguen a continuación corresponden a la Interface Gráfica de Usuario del prototipo de software ya construido. Además, al final de este capítulo se encuentra la validación de los resultados del mismo, frente a las herramientas disponibles en la actualidad, como por ejemplo el Toolbox de Matlab.

En la figura 7-1 se puede observar Panel de Inicio.



Figura 7-1. Panel de Inicio, con las variables sugeridas por la herramienta

En la figura 7-2 se puede observar una forma de ingresar al módulo “para” o de los parámetros

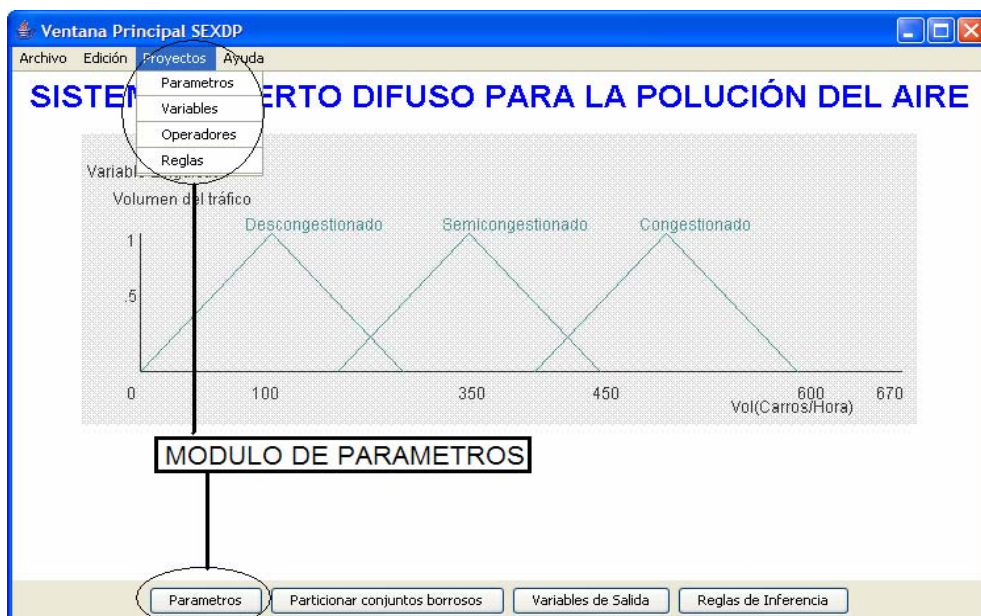


Figura 7-2. Ingreso desde el Panel de Inicio a la ventana de los “Parámetros”

En la figura 7-3 se puede apreciar la ventana de los “Parámetros”. En esta es posible definir cuales serán las variables de entrada o parámetros del modelo sugerido por el usuario.

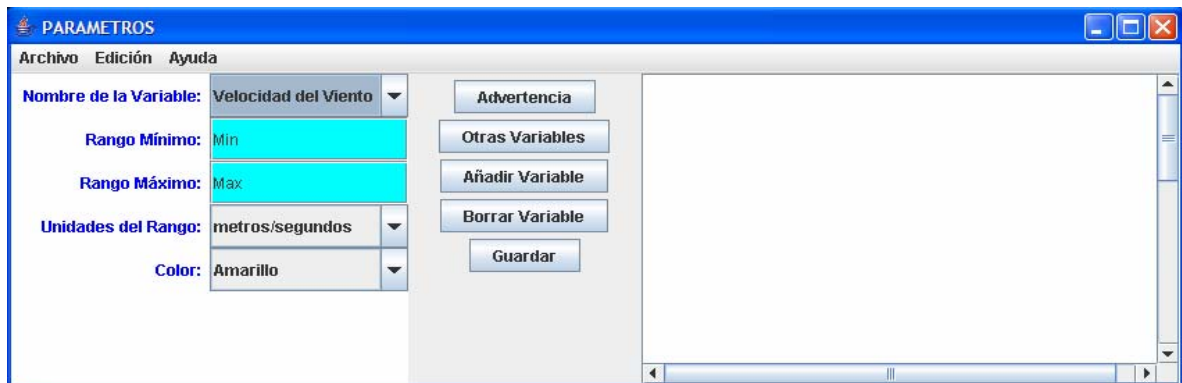


Figura 7-3. Ventana de los “Parámetros”

Como se podrá observar en figura 7-4, desde esa ventana es posible acceder a otros modos del prototipo de software, a través de las fichas: Variables lingüística, Reglas, Resultados, etc.

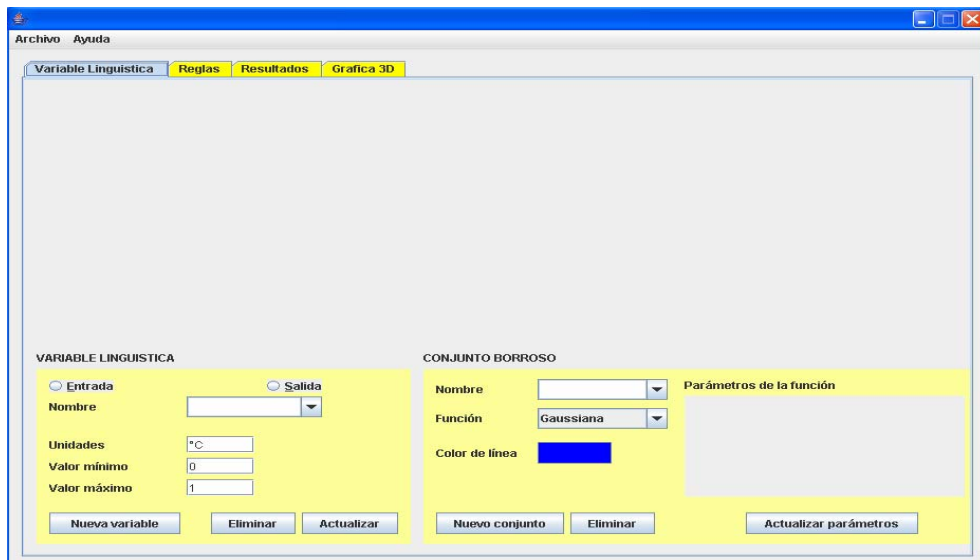


Figura 7-4. Ventana General para las Variables Lingüísticas y las Reglas.

En la figura 7-5 se puede observar la ventana “Variable Lingüística”. Desde esta es posible subdividir las variables lingüísticas sugeridas por el usuario, en subconjuntos o términos lingüísticos.

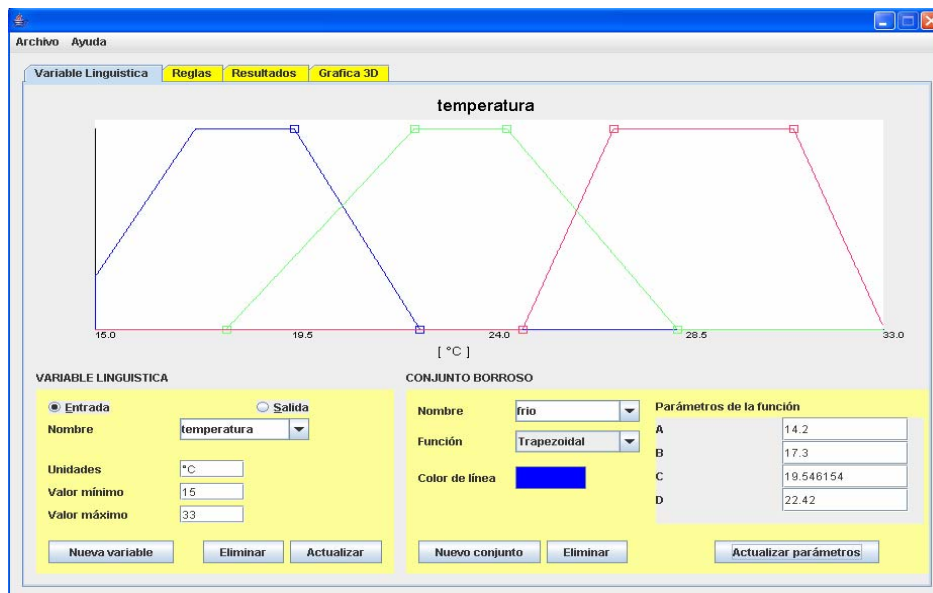


Figura 7-5. Ventana “Variable Lingüística”

En la figura 7-6 se puede observar la ventana “Reglas de Inferencia”. Desde esta es posible ingresar las reglas al modelo.

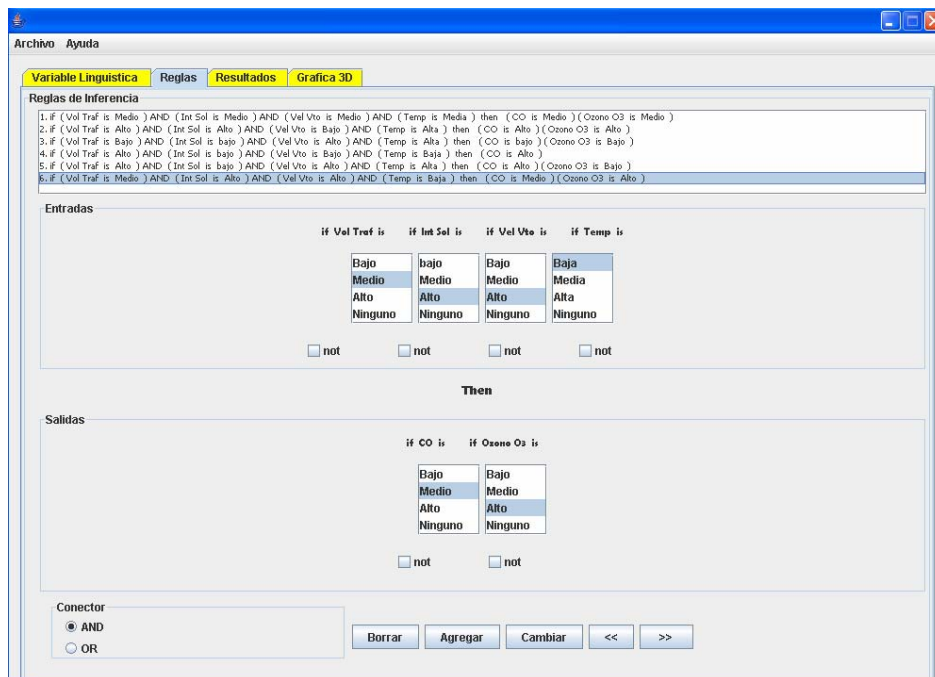
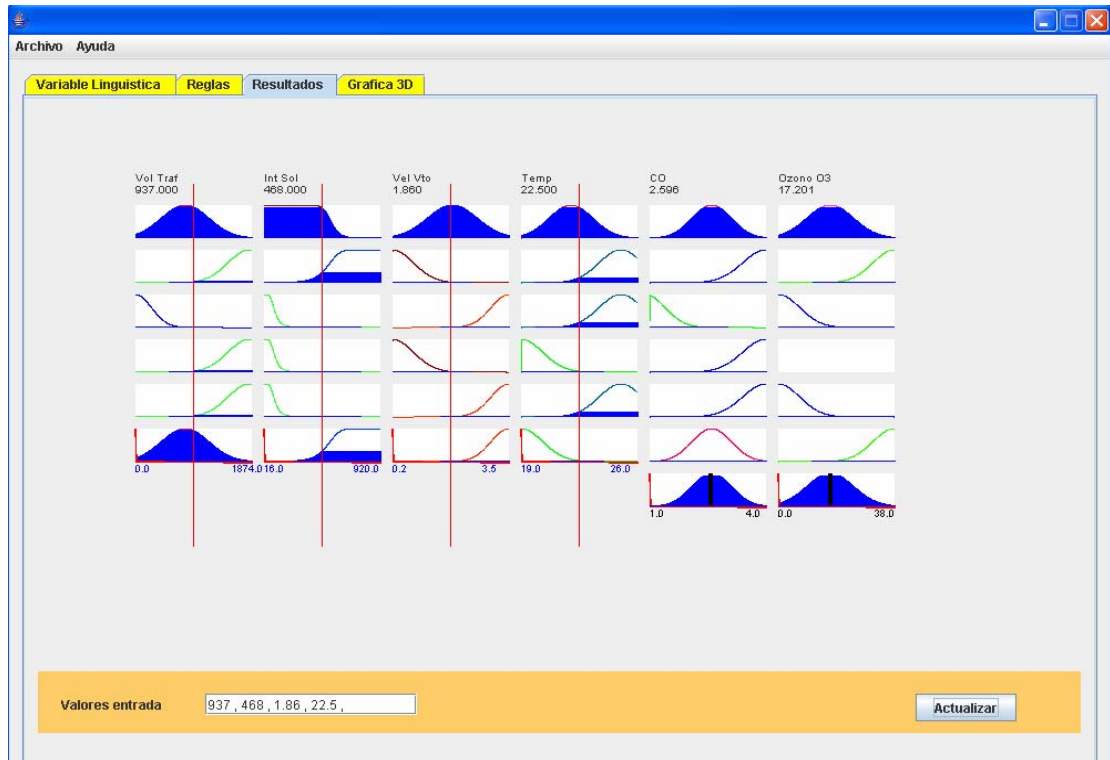


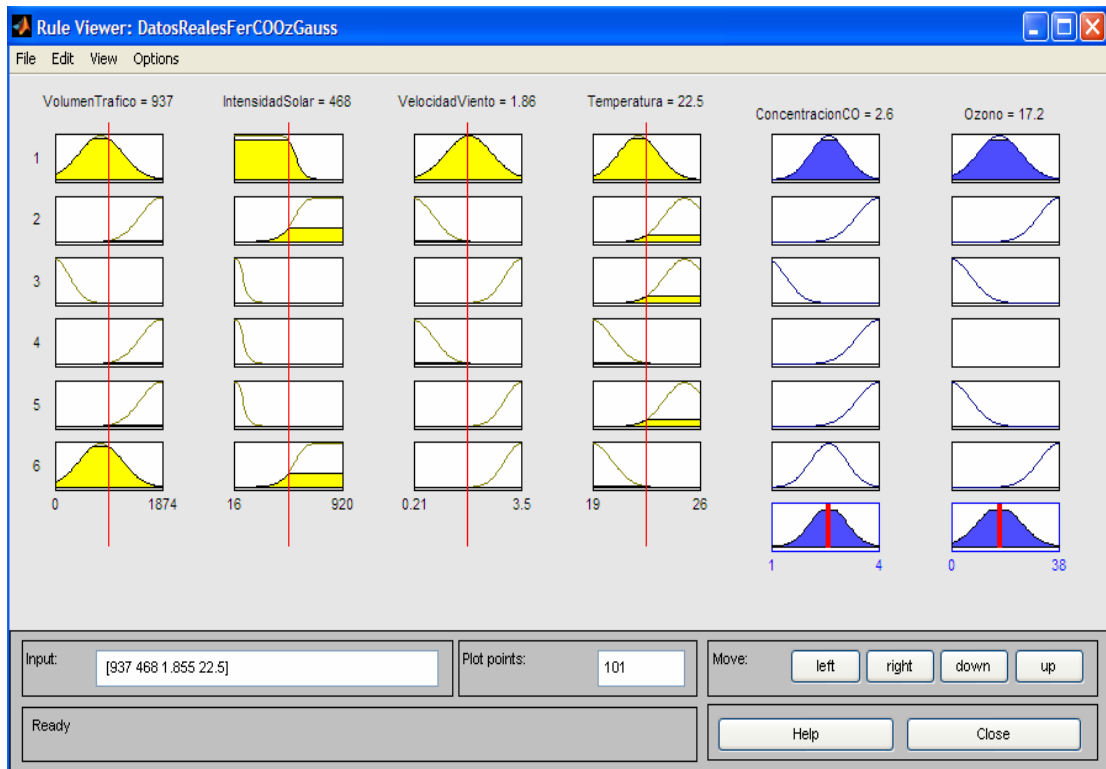
Figura 7-6. Ventana “Reglas de Inferencia”

La siguiente ventana permite ver tanto los resultados parciales como el final del modelo sugerido por el usuario. Por fila se observan los resultados de la reglas y, al final de las columnas, los resultados del modelo por variable de salida; el prototipo de software utiliza el método del centroíde para arrojar un resultado final definido o crisp. Previo a esto el software realiza un “OR” para encontrar una región difusa de salida.



*Figura 7-7. Ventana de los “Resultados”*

En la figura 7-7 además se muestran los resultados de un modelo propuesto que también se configuró sobre una herramienta disponible para modelos con lógica difusa (Toolbox de Matlab), ver en la figura 7-8. Con objeto de confrontar los resultados arrojados en ambas plataformas.



*Figura 7-8. Ventana que Arroja los Resultados del Modelo Sugerido sobre el Toolbox de Matlab*

Como se puede observar en la tabla 7-1 los resultados son bastante aproximados.

	SEXDP	Toolbox de Matlab
Concentración de CO	2.506	2.6
Concentración de O <sub>3</sub>	17.201	17

*Tabla 7-1. Tabla Comparativa de los Resultados Arrojadados por SEXDP Frente al Toolbox de Matlab para un Mismo Modelo Sugerido.*

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo de investigación se han encontrado las siguientes conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros:

- El modelo se basa en la teoría de los conjuntos borrosos debido a la escasez de datos experimentales en el medio y, porque además, ésta teoría permite modelar con variables que inciden en la emisión, dispersión e inmisión de los contaminantes en el aire que no es tan fácil modelar con las metodologías químicas tradicionales.
  
- Más aún en el desarrollo del modelo de la Contaminación del Aire se encontró que además de la lógica difusa ser una teoría adecuada, se puede decir, que es una buena alternativa para el modelado de la contaminación del aire en el área metropolitana de Bucaramanga, debido a que existen contaminantes criterio tales como el CO<sub>2</sub> en donde ni siquiera existen datos (falta de información), y es allí, en la escasez de información donde la lógica difusa da respuesta, debido a que, “el principal objetivo de la teoría computacional de las percepciones es el desarrollo de una herramienta para computar y razonar con percepciones” [2].
  
- Con el desarrollo del modelo de la Contaminación del Aire se encuentra que, algunos de los contaminantes criterio reciben una muy fuerte influencia del **tráfico vehicular** en esta zona del área urbana de Bucaramanga. Entre estos están el material particulado, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre. Y en general, todos los contaminantes criterio están influenciados por este parámetro. Luego desde el punto de vista de esta investigación se considera necesario tomar medidas para regular el tráfico automotor de vehículos diesel y gasolina principalmente, como también planear la aplicación de tecnologías de transporte con otros combustibles que permitan un desarrollo sostenible.

- Las funciones de pertenencia que mejor se adoptaron al modelo fueron la campana de gauss, la trapezoidal y la de singlenton. Las reglas del modelo fueron nueve y permiten representar la contaminación del aire de acuerdo al conocimiento de los expertos de una manera eficaz.
  
- Se encontraron varias limitaciones en las herramientas disponibles en la actualidad para el desarrollo de modelos difusos de problemas complejos como es el de la contaminación del aire; como por ejemplo el toolbox de Matlab. Entre estas, cabe mencionar que solo permite un máximo de cuatro variables de entrada más cinco de salida, faltan algunos operadores que en esta investigación se han considerado pertinentes, en especial los intensificadores. Además serviría de bastante ayuda que la herramienta calcule el error por si misma.
  
- El UML facilita la comprensión y la comunicación del funcionamiento global y parcial en el desarrollo de una herramienta software cuando el equipo de trabajo y los alcances del mismo son extensos. Adicionalmente facilita el desarrollo de futuras versiones.
  
- El prototipo de software para simular modelos de calidad del aire desarrollado permite un fácil manejo incluso para los usuarios nuevos en el tema.
  
- Se recomienda que en futuras versiones se trabaje en convertir la aplicación en un applet, implementar otros modificadores y otros desborrificadores.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] LAZAR MAG, Reinhold y EDER, Josef. (2001). **Estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga**. Convenio de cooperación entre el Municipio de Bucaramanga, la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la Kart Franzes \_ Universitaet Graz (Austria).
- [2] KLIR, George J. YUAN, Bo. (1995). **Fuzzy Sets And Fuzzy Logic, Theory and Applications**. Prentice Hall.
- [3] ZADETH, Lofti A. (2001). **A new direction in AI: Toward a computational theory of perceptions**. @ProQuest.
- [4] CDMB <http://www.cdmb.gov.co/plan/35aire.htm>
- [5] LORENZ o Lorenzo. (1972). **Técnicas para la Defensa del Medio Ambiente**.
- [6] IDEAM <http://www.ideam.gov/publica/gases/gasesma.pdf>  
Módulo “Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, 1990”. Y modulo “Anexo Energía”
- [7] FORD, Andrew. (1999). **Modeling Environment**. Prentice Hall.

[8] AMADO, Juan Pablo. CASTRO, Juan Carlos y otros. (2004). **Estudio Comparativo de Contaminación atmosférica por la operación de un S.I.T.M en Bucaramanga**. Proyecto de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga

[9] CDMB <http://www.cdmb.gov.co/conozca/paginas/ibuca.htm>

[10] ANTON, Howard. (1998). **Introducción al Álgebra Lineal**. Noriega Limusa Editores.

[11] FOWLER, Martin. Scott Kendall. (1997). **UML Gota a Gota**. Addison-Wesley

[12] BOOCH, Grady. JACOBSON, Ivar. RUMBOUGH, James. (2001). **Fundamentals of Object – Oriented Desing in UML**. Addison-Wesley.

[13] CUEVA LOVELLE, J:M. (2004). **Cuadernos Didácticos Análisis y Diseño Orientado a Objetos**. España. SERVITEC. <http://site.ebrary.com/lib/bibliouis>

[14] BOOCH, Grady. JACOBSON, Ivar. RUMBOUGH, James. (1999). **Unified Modeling Language Reference Manual**. Addison-Wesley

[15] ANDO, Bruno. BAGLIO, Salvatore. GRAZIANI, Salvatore. Pecora, Emilio. (1997). **A predictive model for urban air pollution evaluation**. @IEEE

[16] DE SOUZA, Paulo A. LAMEGO, MM. GARG, Viyagendra K. (1998). **A new receptor model in the análisis of industrial pollution using fuzzy set systems**. @IEEE

[17] EPA <http://www.epa.gov/ebtpages/airpollutants.html>

[18] EPA [http://www.epa.gov/global\\_warning](http://www.epa.gov/global_warning)

[19] Environment, **Toward Ecological Cities**. June 2004. Volume 46. Number 5. páginas 16, 17 y 18.

[20] Environment, **Cleaning Up Delhi's Air**. April 2004. Volume 43. Number 2. páginas 22, 23, 24, 25 y 26

[21] FEDOSSOVA, Alina. KAFAROV, V. BOHÓRQUEZ, Mahecha D.P. (2004). **Solución Numérica al Problema del Control de contaminación del Aire**. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Laboratorio de Computo Especializado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química.

[22] IDEAM <http://www.ideam.gov/publica/gases/gasesma.pdf>

Módulo “**Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, 1990**”. Y módulo “**Anexo Energía**”

[23] KAZUO, Tanaka. MANABU, Sano. HIROYUKI, Watanabe. (1992). Identification and Análisis of Fuzzy Model for Air Pollution – An approach to self-learning control of CO Concentration. @IEEE

[24] MARTÍNEZ, Alvaro I. (2004). **El Control de la Contaminación de Aire**. Editor Especialización en Ingeniería Ambiental.

[25] MENDEL, Jerry M. (2001). **Uncertain. Rule – based Fuzzy Logic Sistem, Introduction and new directions**. Prentice Hall PTR.

[26] MORABITO, Francesco C. VERSACI, Mario. MARINARO, Maria. Tagliaferri, Roberto. (2001). **Fuzzy time series for forecasting pollutants concentration in the air.** INTERNET.

[27] ORCHARD, Robert Bob. (2002). **Java library for Building Fuzzy Systems.** @National Research Council Canada.

[28] MATHWORKS <http://www.MathWorks/Matlab>

[29] COX, Earl. (1994). **The Fuzzy Systems Handbook, A Practitioner's Guide to Building, Using and Maintaining Fuzzy Systems.** Ap Professional

## Apendice I. Regla Composicional Difusa de Inferencia

Un razonamiento monótono distinto, el espacio de implicación generado por las reglas composicionales de inferencia se deriva de los espacios difusos correlacionados y agregados producidos por la interacción de muchas sentencias. En efecto todas las proposiciones corren en paralelo para crear un subconjunto de salida que contiene información de todas las proposiciones. Cada proposición condicional valor de verdad del predicado evaluado es superior al umbral  $\alpha_{cut}$  corriente contribuye a la forma de la representación difusa de la variable. **Existen dos métodos principales de inferencia en sistemas difusos: El método min\_max y el método aditivo difuso.** Estos métodos se diferencian en la forma en que ellos actualizan la representación difusa de la variable de salida.

### I.1 Reglas Min\_Max de Implicación

La operación composicional deriva su nombre del método para esta contribución. La región difusa consecuente es restringida al mínimo de los predicados. Mientras el subconjunto de salida corresponde al máximo entre estos conjunto borrosos minimizados.

$$\mu_{cfs}[x_i] \leftarrow \min(\mu_{pt}, \mu_{cfs}[x_i])$$

*Ecuación I:1. Mínima correlación del consecuente con Predicado*

La ecuación I:1 indica que el conjunto difuso onsecuente (cfs) es modificado antes de ser usado. Esta modificación coloca cada elemento de la función al mínimo entre la función o el predicado de la proposición (pt).

$$\mu_{\text{sfs}}[X_i] \leftarrow \max(\mu_{\text{sfs}}, \mu_{\text{cfs}}[X_i])$$

*Ecuación 1.II Máxima correlación de la salida y el consecuente correlacionado*

En la ecuación 1.II indica que el subconjunto difuso de salida (sfs). Resulta en reducir la intensidad (la altura efectiva) del conjunto difuso de salida igual al máximo, mediante el uso del operador OR. Cuando todas las proposiciones han sido evaluadas, la salida contiene su contribución.

## ***1.II Reglas Aditivas de implicación***

El método aditivo resuelve muchos problemas en modelos de decisión, tales con el de la polución del aire, donde se desea que todas la reglas contribuyan de alguna manera a la solución final del modelo. Usando el método min\_max, solo las reglas que tienen un valor de verdad más grande tendrán alguna contribución a la salida. Para ilustrarlo, considere las siguientes proposiciones.

**[P1] if project.duración es LARGA then riesgo is INCREMENTADO;**

**[P2] if project.TamañoPersonal es GRANDE then riesgo is INCREMENTADO;**

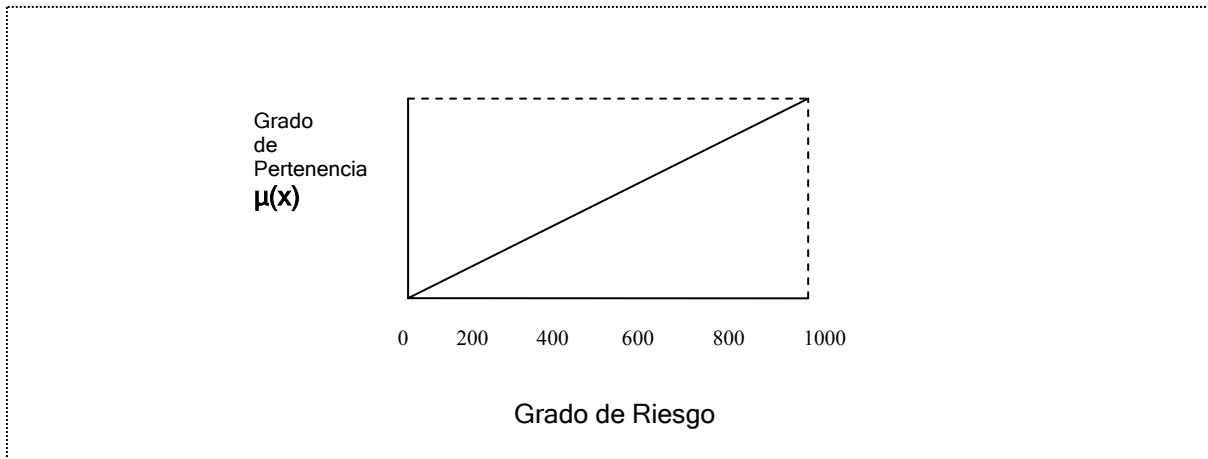
**[P3] if project. Inversion es BAJA then riesgo is INCREMENTADO;**

**[P4] if project.complejidad es ALTA then riesgo is INCREMENTADO;**

**[P5] if Project.prioridad es ALTA then riesgo is INCREMENTADO;**

**[P6] if Project.visibilidad es ALTA then riesgo is INCREMENTADO;**

Se desea determinar el grado del riesgo en asumir un proyecto, a partir una serie de proposiciones que actualizan el grado de riesgo basado en tales factores tales como la longitud del proyecto, la complejidad, el tamaño del personal, la inversión, etc. En cada proposición el grado del riesgo es asociado con el valor de verdad de la proposición (para un valor más alto de verdad de la proposición, el grado de riesgo es más alto).



*Figura I-I. Conjunto Difuso del Incremento del Riesgo*

Cuando la primera proposición es evaluada, la premisa

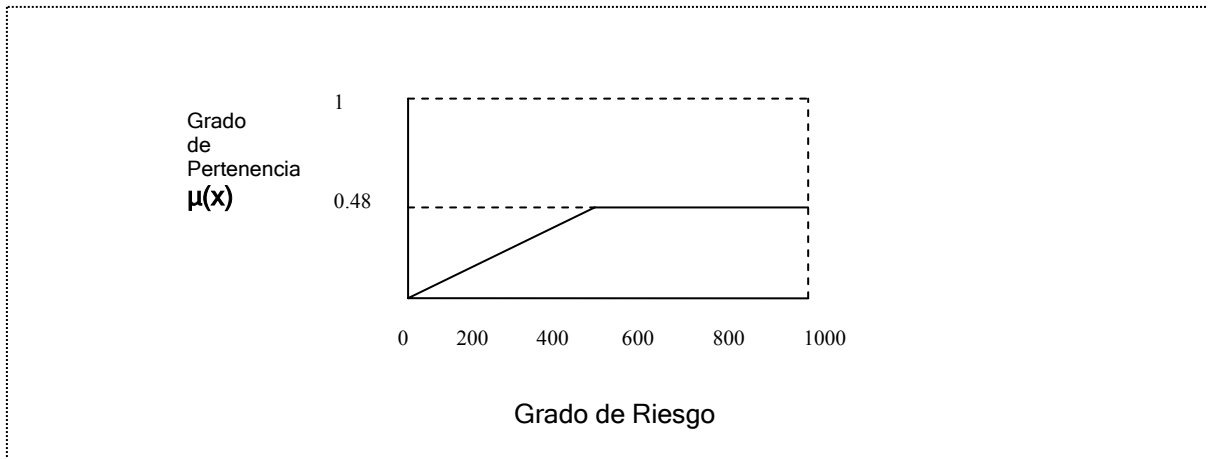
**Project.duración is LARGA**

Cuyo valor de verdad es [0.48]. El subconjunto difuso solución es actualizado con este valor. Ver figura 2.

Cuando la segunda proposición es ejecutada, su predicado

**Project.TamañoPersonal is GRANDE**

Con un valor de verdad de [0.33]. La figura 3 muestra la correlación correspondiente a este valor de verdad.



*Figura I-II. Variable Solución RIESGO después de la primera proposición*

Aplicando a esta región de riesgo el método min\_max de implicación con la segunda proposición no tendría efecto en la solución, ya que

$$\max ( [0.48], [0.33] ) = [0.48]$$

*Ecuación I.III. Aplicación del método max*

Solo proposiciones que tienen un grado de verdad mayor contribuyen a la variable de solución. **De esta manera el método aditivo difuso es el más apropiado en problema que acumulan evidencia, tales como el del riesgo o incluso el de la polución del aire**, debido a que este sí considera todas las funciones de pertenencia que cubren el mismo dominio. Para el ejemplo el riesgo es ahora:

$$[0.48] + [0.33] = [0.81]$$

*Ecuación I:IV. Aplicación del Método Aditivo Difuso*

La figura 4 muestra el estado del RIESGO de la variable solución después de la aplicación de las primeras dos proposiciones. El RIESGO continua creciendo en la medida de que las siguientes reglas introducen un nueva evidencia acerca del grado del riesgo en el proyecto.

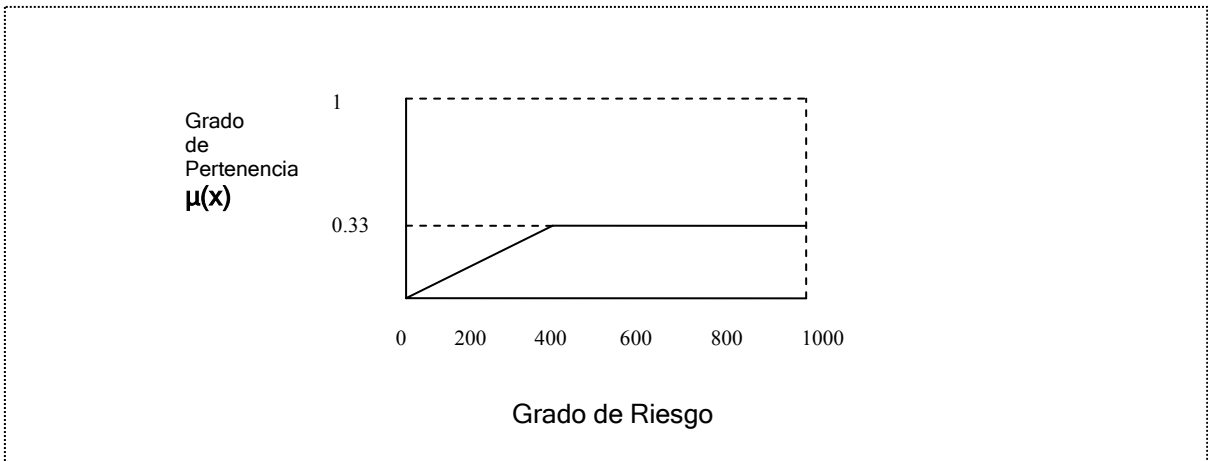


Figura I-III. Incremento correlacionado al nivel [0.33]

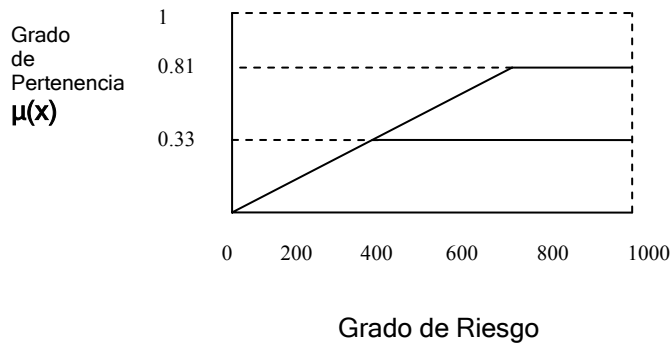


Figura I.IV. Solución de la Variable RIESGO Después de Actualizar el Método Adictivo de Implicación

### I.III Ejemplo de Implicación Difusa

La figura 5 ilustra el método usado en la técnica de inferencia  $\mu_{\max}$  para manejar proposiciones difusas condicionales. Esta figura muestra el efecto sobre el consecuente **THROTTLE.ACTION** en la aplicación de dos reglas.

**If presión(t) is LOW and temperatura(t) is COOL then detener.action is POSITIVEMODERATE**

**If presión(t) is OK and temperature(t) is COOL then detener.action is ZERO**

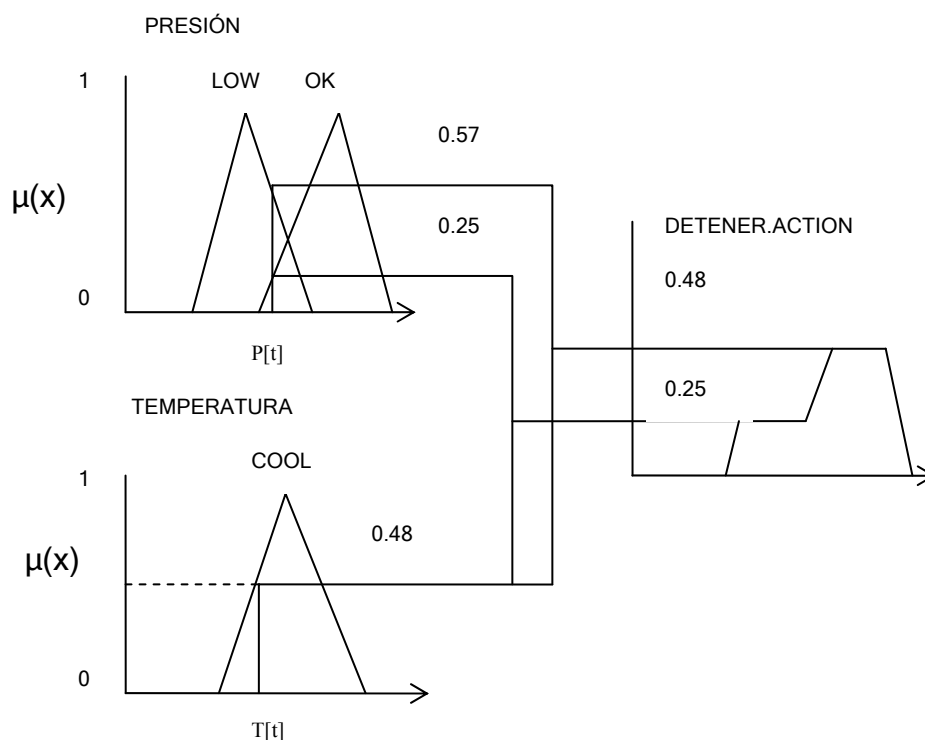


Figura I.V. Aplicación de las Reglas Usando la Técnica de Inferencia Min\_Max

Cada regla actualiza el subconjunto de salida de la variable solución. En la primera, la presión leída para un tiempo  $P(t)$  tiene un valor de [0.57] en LOW y la temperatura leída en el mismo tiempo  $T(t)$  tiene un valor de [0.48] en COOL. El mínimo ([0.48]) es usado para truncar el subconjunto de salida a este nivel.

En la segunda regla, la presión leída al tiempo  $t$   $P(t)$  tiene un valor de [0.25] en OK y la temperatura leída a ese mismo tiempo  $T(t)$  tiene un valor de [0.48] en COOL. El mínimo ([0.25]) es usado para truncar en ZERO. La región truncada difusa luego se le aplica el OR. Tomando en cada punto el máximo valor.

#### ***I.IV Métodos de Correlación***

Ambos mecanismos de implicación el min\_max y el aditivo, para proposiciones difusas envuelven la reducción del valor de verdad del subconjunto consecuente con través del valor de verdad de la premisa. En este proceso de correlación entre el consecuente y el valor de verdad de las piezas del predicado donde el valor de verdad de la salida no puede ser mayor que el valor de verdad de la premisa de la proposición; existen dos métodos principales para restringir la altura del conjunto difuso consecuente: Correlación mínima y Correlación producto.

#### ***I.V Correlación Mínima***

El método de correlación más común. Este es llamado correlación mínima. Este mecanismo usualmente crea una meseta desde donde la cabeza de la región difusa es rebanada por el valor de verdad del predicado. Esto introduce una cierta cantidad de pérdida de información. Si el conjunto difuso es multimodal o irregular, la topología de la superficie arriba del nivel del valor de verdad del predicado es descartada. Sin embargo se prefiere con mayor frecuencia, ya que envuelve menos complejidad y una aritmética más rápida, lo cual es una importante consideración para microprocesadores y microcontroladores.