Propuesta de un índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas

Jenniffer Henao Corrales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración, Departamento de Ingeniería

Palmira, Colombia

2016

Propuesta de un índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas

Jenniffer Henao Corrales

Trabajo final presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director (a):

PhD. Viviana Vargas Franco

Grupo de Investigación en Monitoreo, Modelación y Gestión de Cuencas Hidrográficas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración, Departamento de Ingeniería

Palmira, Colombia

2016

A Dios por todas las bendiciones que me ha regalado.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional para sacar adelante este proyecto.

A mi esposo Alexander por su amor, optimismo y apoyo permanente.

Resumen

El presente trabajo propone un índice de vulnerabilidad a sequías de fuentes de agua superficial – IVUSAS, a aplicarse en subcuencas andinas, éste índice fue construido utilizando como marco teórico el concepto de vulnerabilidad, que involucra las dimensiones de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación; para cada una de estas dimensiones se construyó un subíndice a partir de los indicadores seleccionados, el índice general a su vez se construyó a partir de la agregación de los subíndices construidos. El proceso de agregación se realizó utilizando un modelo de lógica difusa, conformado por funciones de pertenencia y reglas de lógica difusa de tipo *si- entonces.*

El índice IVUSAS tiene integrado una serie de recomendaciones en cuanto a las acciones de intervención a corto, mediano y largo plazo que pueden ser aplicadas en la subcuenca objeto de estudio, dichas acciones varían de acuerdo al resultado obtenido para el índice tras ser aplicado en determinada subcuenca andina.

La aplicación del IVUSAS se realizó en las zonas alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá - Valle del Cauca, Colombia, donde se obtuvo una calificación de vulnerabilidad alta para las zonas alta y baja de la subcuenca y una calificación de vulnerabilidad media para la zona media de la subcuenca en estudio.

Palabras clave: Vulnerabilidad, sequía, lógica difusa, índice, indicadores, exposición, sensibilidad, capacidad de adaptación.

Abstract

The present work proposes an index of vulnerability to droughts of surface water sources - IVUSAS, to be applied in Andean sub-basins, this index was constructed using as theoretical framework the concept of vulnerability, which involves the dimensions of exposure, sensitivity and adaptive capacity; For each of these dimensions a subscript was constructed from the selected indicators, the general index in turn was constructed from the aggregation of constructed sub-indices. The aggregation process was performed using a fuzzy logic model, consisting of membership functions and fuzzy logic rules of the si-then type.

The IVUSAS index has integrated a series of recommendations regarding short, medium and long-term intervention actions that can be applied in the sub-basin under study, these actions vary according to the result obtained for the index after being applied in a determined Andean sub-basin.

The application of the IVUSAS was carried out in the upper, middle and lower areas of the Baja California subbasin Tuluá - Valle del Cauca, Colombia, where a high vulnerability rating was obtained for the upper and lower zones of the sub - basin and a vulnerability rating Average for the middle zone of the sub-basin under study.

Keywords: Vulnerability, drought, fuzzy logic, index, indicators, exposure, sensitivity, adaptability.

Contenido

Resumen…… IV
Abstract…… V
Lista de figuras IX
Lista de tablas XII
Introducción…..... 1
1. Planteamiento y justificación del problema 3
1.1 Objetivos 9
1.1.1 Objetivo general 9
1.1.2 Objetivos específicos 9
2. Revisión de literatura 10
2.1 Definición de marco teórico 10
2.2 Vulnerabilidad 10
2.2.1 Exposición 11
2.2.2 Sensibilidad 11
2.2.3 Capacidad de adaptación 12
2.3 Sequía 12
2.4 Lógica difusa 13
2.4.1 Conjuntos difusos 13
2.4.2 Funciones de pertenencia 13
2.4.3 Sistema de inferencia difuso 14
2.4.4 Defusificación 15
2.5 Índices ambientales para la valoración de sequía 15
2.5.1 Índices de sequía hidrológica a nivel mundial 16
2.5.2 Índices de escasez de agua 17
2.5.3 Índices de riesgo de sequía y vulnerabilidad 19
2.6 Cuenca Hidrográfica del río Tuluá 21
2.6.1 Subcuenca zona baja río Tuluá 23
3. Materiales y métodos 26
3.1 Fase 1. Definición de indicadores 26
3.2 Fase 2. Diseño de un índice basado en un sistema difuso 26
3.2.1 Fusificación de los indicadores de entrada y la salida del sistema difuso. 26

3.2.2 Formulación de base de conocimiento y defusificación..... 27
3.2.3 Definición de acciones de intervención y ficha técnica del índice..... 28
3.3 Fase 3. Aplicación del índice formulado en la subcuenca: zona baja río Tuluá-Valle del Cauca, Colombia..... 28
4. Resultados y análisis 30
4.1 Definición de indicadores para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas. 30
4.1.1 Definición de marco teórico 30
4.1.2 Definición de indicadores..... 30
4.2 Desarrollo de un índice basado en un sistema difuso para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas…….. 42
4.2.1 Fusificación de las variables de entrada y de salida del sistema difuso. 42
4.2.2 Formulación de base de conocimiento y defusificación..... 55
4.2.3 Acciones de intervención corto, mediano y largo plazo..... 63
4.2.4 Ficha técnica índice IVUSAS 70
4.3 Aplicación del índice formulado en la subcuenca zona baja del río Tuluá, Valle del Cauca, Colombia 72
4.3.1 Exposición 72
4.3.2 Sensibilidad 80
4.3.3 Capacidad de adaptación 96
4.3.4 Índice de vulnerabilidad a sequías de fuentes de agua superficial - IVUSAS...107
5. Discusión general.....116
6. Conclusiones y recomendaciones 119
6.1 Conclusiones 119
6.2 Recomendaciones 120
A. Anexo. Entrevista usuarios del agua subcuenca zona baja río Tuluá 123
B. Anexo. Entrevista autoridad ambiental 124
C. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá.....125
D. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona media, subcuenca zona baja río Tuluá.....126
E. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá.....127
F. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá.....128
G. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona media, subcuenca zona baja río Tuluá.....129
H. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá.....131
I. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá 132
J. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona media, subcuenca zona baja río Tuluá 134

K. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá 136
L. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab índice IVUSAS zona alta y baja, subcuenca zona baja río Tuluá 138
M. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab índice IVUSAS zona media, subcuenca zona baja río Tuluá 139
Bibliografía..... 140

Lista de figuras

Figura 1-1. Imagen a) “Peces muertos por deshidratación en Casanare”; b) “Así luce el río Magdalena que le da agua a Santa Marta” ……4
Figura 1-2. Imagen a) “En Zarzal norte del Valle, sin agua 16 horas diarias” ; b) Alerta roja por los bajos niveles en las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, donde la sequía ha generado la formación de islotes 5
Figura 1-3. Índice de uso del agua. Condiciones hidrológicas de año medio 7
Figura 1-4. Índice de uso del agua. Condiciones hidrológicas de año seco 8
Figura 2-1 Factores claves de la vulnerabilidad.....11
Figura 2-2 Conjuntos difusos.....13
Figura 2-3. Funciones de pertenencia a) Triangular; b) Trapezoidal 14
Figura 2-4. Esquema general de un sistema de inferencia difuso.....14
Figura 2-5. Ubicación básica de la cuenca del río Tuluá.....22
Figura 2-6. Áreas de drenaje de la cuenca del río Tuluá 23
Figura 3-1. Esquema general del índice a formular 27
Figura 3-2. Esquema metodológico para proponer un índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas 29
Figura 4-1. Función de pertenencia indicador densidad poblacional - DP.....43
Figura 4-2. Función de pertenencia indicador anomalía de precipitación - AP.....43
Figura 4-3. Función de pertenencia subíndice de Exposición -E 44
Figura 4-4. Resumen funciones de pertenencia indicadores de Exposición -E.....44
Figura 4-5. Función de pertenencia indicador Franja forestal protectora -FFP 45
Figura 4-6. Función de pertenencia indicador uso de agua – IUA 46
Figura 4-7- Función de pertenencia indicador conflictos distribución de agua - CDA...46
Figura 4-8. Función de pertenencia subíndice de sensibilidad -S 47
Figura 4-9. Resumen funciones de pertenencia indicadores de sensibilidad 48
Figura 4-10. Función de pertenencia indicador gestión de demanda – GD.....49
Figura 4-11. Función de pertenencia indicador medidas de atención de emergencias-MAE……50
Figura 4-12. Función de pertenencia indicador sistema de alerta temprana – SAT 50
Figura 4-13. Función de pertenencia indicador asociación de usuarios del recurso hídrico - AURH 51
Figura 4-14. Función de pertenencia subíndice capacidad de adaptación –CA.....51

Figura 4-15. Resumen funciones de pertenencia indicadores de capacidad de adaptación…….52
Figura 4-16. Función de pertenencia índice IVUSAS 53
Figura 4-17. Resumen funciones de pertenencia subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación 54
Figura 4-18. Operación modelo lógica difusa exposición- zona alta- Activación regla 1: Si AP es Normal y DP es alta entonces Exposición es alta..... ..74
Figura 4-19. Operación modelo lógica difusa exposición- zona alta- Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es alta entonces Exposición es alta 74
Figura 4-20. Función para defusificación nivel de exposición zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá 75
Figura 4-21 Determinación del subíndice de exposición para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 75
Figura 4-22. Operación modelo lógica difusa exposición- zona media- Activación regla 1: Si AP es normal y DP es media entonces Exposición es Media 76
Figura 4-23. Operación modelo lógica difusa exposición- zona media- Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es media entonces Exposición es alta .....……. 76
Figura 4-24. Función para defusificación nivel de exposición zona media, subcuenca zona baja río Tuluá..... 77
Figura 4-25. Determinación del subíndice de exposición para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014……77
Figura 4-26. Operación modelo lógica difusa exposición - zona baja - Activación regla 1: Si AP es normal y DP es alta entonces Exposición es Alta..... 78
Figura 4-27. Operación modelo lógica difusa exposición - zona baja - Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es alta entonces Exposición es Alta 78
Figura 4-28. Función para defusificación nivel de exposición zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá 79
Figura 4-29. Determinación del subíndice de exposición para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 79
Figura 4-30. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona alta - Activación regla 1: Si FFP es baja, IUA es alta y CDA es bajo entonces sensibilidad es alta . 90
Figura 4-31. Operación modelo lógica difusa sensibilidad - zona alta - Activación regla 2: Si FFP es baja, IUA es media y CDA es bajo entonces sensibilidad es media 90
Figura 4-32 Función para defusificación nivel de sensibilidad zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá 91
Figura 4-33. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 91
Figura 4-34. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona media - Activación regla 1: Si FFP es media, IUA es alta y CDA es medio entonces sensibilidad es alta 92

Figura 4-35. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona media- Activación regla 2: Si FFP es media, IUA es media y CDA es medio entonces sensibilidad es Media 92
Figura 4-36. Función para defusificación nivel de sensibilidad zona media, subcuenca zona baja río Tuluá 93
Figura 4-37. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 93
Figura 4-38. Operación modelo lógica difusa sensibilidad - zona baja - Activación regla 1: Si FFP es baja, IUA es alta y CDA es alto entonces sensibilidad es Alta ... 94
Figura 4-39. Operación modelo lógica difusa sensibilidad - zona baja - Activación regla 2: Si FFP es baja, IUA es media y CDA es alto entonces sensibilidad es Alta 94
Figura 4-40. Función para defusificación nivel de sensibilidad zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá 95
Figura 4-41. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 95
Figura 4-42. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación - zona alta - Activación regla 1: Si GD es media, MAE es media y SAT no existe y AURH no existe entonces capacidad de adaptación es Baja 103
Figura 4-43. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación - zona media - Activación regla 1: Si GD es regular, MAE es alta y SAT no existe y AURH existe entonces capacidad de adaptación es Media 103
Figura 4-44. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación - zona baja - Activación regla 1: Si GD es regular, MAE es alta y SAT no existe y AURH no existe entonces capacidad de adaptación es Baja 103
Figura 4-45. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 104
Figura 4-46. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 105
Figura 4-47. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 106
Figura 4-48. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS - zona alta - Activación regla 1: Si E es alta, S es alta y CA es baja entonces IVUSAS es Alto 108
Figura 4-49. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS - zona media - Activación regla 1: Si E es media, S es alta y CA es media entonces IVUSAS es Medio 108
Figura 4-50. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS- zona baja -Activación regla 1: Si E es alta, S es alta y CA es baja entonces IVUSAS es Alto 108
Figura 4-51. Determinación del índice IVUSAS para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 109
Figura 4-52. Determinación del índice IVUSAS para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 110
Figura 4-53. Determinación del índice IVUSAS para la zona baja , subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014 111

Lista de tablas

Tabla 2-1. Descripción de índices de sequía hidrológica desarrollados a nivel mundial 16
Tabla 2-2. Descripción de índices de escasez de agua 18
Tabla 2-3. Descripción de índices de riesgo y vulnerabilidad 19
Tabla 2-4. División por zonas de la subcuenca zona baja río Tuluá 25
Tabla 4-1. Indicadores definidos para evaluar vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas 31
Tabla 4-2. Ficha técnica indicador densidad poblacional - DP 35
Tabla 4-3. Ficha técnica indicador Anomalía de precipitación - AP 35
Tabla 4-4. Fichas técnica indicador franja forestal protectora - FFP 36
Tabla 4-5. Ficha técnica indicador conflicto en la distribución del agua -CDA 37
Tabla 4-6. Ficha técnica indicador uso de agua - IUA 37
Tabla 4-7. Fichas técnica indicador gestión de demanda - GD 39
Tabla 4-8. Ficha técnica indicador medidas de atención de emergencias - MAE 40
Tabla 4-9. Ficha técnica indicador sistema de alerta temprana - SAT 41
Tabla 4-10. Ficha técnica indicador asociación de usuarios del recurso hídrico- AURH 41
Tabla 4-11. Reglas de decisión para el subíndice de exposición 55
Tabla 4-12. Reglas de decisión para el subíndice de sensibilidad 55
Tabla 4-13. Reglas de decisión para el subíndice de capacidad de adaptación 57
Tabla 4-14. Reglas de decisión para el índice IVUSAS 61
Tabla 4-15. Acciones de intervención en las diferentes zonas de la subcuenca a corto, mediano y largo plazo 64
Tabla 4-16. Ficha técnica Índice IVUSAS 70
Tabla 4-17. Densidad poblacional año 2016, zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 72
Tabla 4-18. Anomalía de precipitación - AP año 2015, zona baja, media y alta subcuenca zona baja río Tuluá 73
Tabla 4-19. Nivel de exposición para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 80
Tabla 4-20. Franja forestal protectora zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá 85

Tabla 4-21. Nivel de conflicto en la distribución del agua zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá 89
Tabla 4-22. Nivel de sensibilidad para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 96
Tabla 4-23. Gestión de la demanda zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá..... 98
Tabla 4-24. Medidas de atención de emergencias zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá 100
Tabla 4-25. Sistema de alerta temprana para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 101
Tabla 4-26. Asociación de usuarios zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 101
Tabla 4-27. Capacidad de adaptación zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 102
Tabla 4-28. Resumen valores de subíndices exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta, zonas alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá.....107
Tabla 4-29. Resumen resultados índice IVUSAS zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá 112
Tabla 4-30. Acciones recomendadas para ser implementadas en zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá, según resultados del índice IVUSAS 112

Introducción

El aumento de la demanda, junto con el cambio y la vulnerabilidad climática y la perspectiva de la sequía, hacen que el agua periódicamente se convierta en un recurso escaso (Mitchell y McDonald, 2015). El suministro de agua dulce en el mundo se está viendo amenazado por factores climáticos y antrópicos que conllevan a la disminución de los caudales de las fuentes de agua superficial, generando con ello múltiples afectaciones a nivel ambiental, social y económico. Todas las señales parecen indicar que el problema de desabastecimiento de agua superficial empeorará si no se toman acciones preventivas mediante la gestión de la vulnerabilidad (Singh, *et al.,* 2014).

La sequía hidrológica es considerada uno de los desastres naturales más dañinos en términos económicos y sociales (Carroll *et al.,* 2009 y Van Vliet *et al.*, 2012), por los impactos que genera sobre la producción de agua potable para el abastecimiento humano y el aumento de la mortalidad y el conflicto (García-Herrera *et al.*, 2010), así mismo genera graves impactos ecológicos sobre los ecosistemas acuáticos (Lewis *et al*, 2011 y Choat *et al* 2012).

La gestión de las sequías hidrológicas requiere la toma de acciones preventivas mediante la gestión de la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia frente a la misma (Singh *et al.,* 2014), por ello la evaluación de la vulnerabilidad es el punto de partida para determinar las medidas de mitigación de los impactos y las estrategias de respuesta y adaptación (Kelly y Adger, 2000).

Entre las herramientas que se han propuesto para evaluar la sequía de fuentes de agua superficial y para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad ante sequías, se encuentran los índices, sin embargo estos no abarcan las diferentes variables del problema (Chaves y Alipaz, 2007 citados por Jun *et al.,* 2011). Hace falta proponer índices integrales que permitan dimensionar el nivel de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial, considerando diversos factores desde el punto de vista social, ambiental e institucional.

El presente trabajo propone un índice integral para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial denominado IVUSAS, el cual se aplicó en la subcuenca zona baja del río Tuluá, ubicada en la zona andina colombiana ya que es la región natural que concentra el 77,4 % de la población y el 85% de la actividad económica colombiana (Bernal, *et al.,* 2010), pero paradójicamente posee tan sólo el 13% de la oferta hídrica del país (IDEAM, 2010), lo que demuestra la relevancia de concentrar esfuerzos en

proponer herramientas que puedan ser aplicadas en esta zona, de tal manera que permitan conocer el grado de vulnerabilidad que poseen con respecto a sequías de fuentes de agua superficial, para así poder implementar las acciones pertinentes.

El índice IVUSAS que se propuso en este trabajo, responde a la necesidad de dimensionar el nivel de vulnerabilidad a sequía hidrológica de fuentes de agua superficial, en subcuencas andinas, para efectos de que pueda servir como instrumento de apoyo y suministro de información más amplia para los tomadores de decisiones a nivel público y privado, para que así se pueda orientar mejor la planificación e implementación de acciones preventivas, de mitigación, de adaptación y reducción con respecto a sequías de fuentes de agua superficial.

La metodología utilizada partió de la identificación y selección de un marco teórico basado en el concepto de vulnerabilidad donde están involucradas la exposición, sensibilidad y la capacidad de adaptación, posteriormente se seleccionaron los indicadores más relevantes, para evaluar de manera integral la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial desde el punto de vista ambiental, social e institucional, dichos indicadores se agruparon bajo el marco teórico previamente definido, conformando subíndices que a su vez integran el índice general; para la operatividad del índice se utilizó como herramienta analítica la lógica difusa, por lo que se definieron funciones de pertenencia y una base de conocimientos conformada por un conjunto de reglas de tipo *si_entonces*. Finalmente el índice se aplicó en la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá – Valle del Cauca.

El índice formulado denominado índice de vulnerabilidad a sequías de fuentes de agua superficial – IVUSAS, puede ser calculado utilizando el software Matlab y está conformado por tres (3) subíndices: Exposición, Sensibilidad y Capacidad de Adaptación, el subíndice de exposición a su vez está conformado por los indicadores: densidad poblacional y anomalía de precipitación; el subíndice de sensibilidad está compuesto por franja forestal protectora, conflictos en la distribución del agua, uso de agua; y el subíndice de capacidad de adaptación se compone de los indicadores: gestión de demanda, medidas de atención a emergencias, sistemas de alerta temprana y asociación de usuarios del recurso hídrico. El índice IVUSAS tiene integrado una serie de recomendaciones en cuanto a las acciones de intervención a corto, mediano y largo plazo que pueden ser aplicadas en la subcuenca objeto de estudio, dichas acciones varían de acuerdo al resultado obtenido para el índice tras ser aplicado en determinada subcuenca andina.

La aplicación del IVUSAS en la subcuenca zona baja río Tuluá - Valle del Cauca, permitió determinar que la vulnerabilidad a sequía del río Tuluá en la zona alta y baja de la subcuenca tiene una calificación de alta, y en la zona media tiene una calificación de media, dichos resultados coinciden con la situación real de la subcuenca.

1. Planteamiento y justificación del problema

Las sequías afectan el suministro de agua y deterioran la calidad del agua (Riebsame *et al.,* 1990 citado por Momblanch *et al.,* 2015), provocando que los recursos hídricos sean escasos para el abastecimiento de las actividades económicas y el consumo humano (Momblanch *et al.,* 2015) y generando impactos severos en los ecosistemas (Maskey y Trambauer, 2015). Se estima que las sequías serán más frecuentes y graves, con el aumento de la demanda de agua asociada al crecimiento de la población, el impacto del cambio climático y la variabilidad climática (Fontaine y Steinemann, 2009) y el problema se acentúa porque las actividades humanas aportan factores agravantes tales como cultivos excesivos, riego excesivo, deforestación, sobreexplotación del agua disponible y erosión (Mishra y Singh, 2010).

Como resultado de las sequías y la presión ejercida por una población mundial que supera los 7.000 millones de personas, algunos países ya han alcanzado los límites de sus recursos hídricos y están experimentando una escasez de agua cada vez mayor. Se estima que para el año 2.030 casi la mitad de la población mundial vivirá en zonas con gran escasez de agua (UNESCO, 2009).

Los recursos hídricos colombianos están amenazados. En la década de los años 70 Colombia fue catalogada como una potencia hídrica, dado que se ubicaba entre los primeros cuatro puestos en la clasificación mundial en disponibilidad de recursos hídricos, sin embargo gracias a que la mayor parte de la población colombiana y sus principales actividades económicas, se encuentran ubicadas en regiones con oferta hídrica natural no significativa, ocasionando conflictos por uso y asignación del agua, en las últimas décadas Colombia ha pasado a ubicarse en el puesto número veinticuatro (Calle *et al.,* 2008). En 1998, los colombianos contaban con una disponibilidad anual de agua per cápita de alrededor de 60.000m^3/habitante/año, esta cifra para el año de 2003 disminuyó en un 33%, es decir pasó a ser 40.000m^3/habitante/año. La disponibilidad mencionada aún no es crítica (1.000 m^3/habitante/año), sin embargo la intensidad con que se reduce sí es alarmante. De seguir la tendencia actual, el valor crítico se alcanzaría en aproximadamente 40 años (Domínguez *et al.*, 2008).

Los desastres asociados a sequías, recientemente sucedidos a nivel mundial en países desarrollados y en desarrollo, así como los impactos y consecuencias generados, han subrayado la vulnerabilidad de todas las sociedades a las sequías (Wilhite et al., 2007 y Mishra y Singh, 2010).

En Colombia, los casos de sequía presentados durante el año 2014, en 25 municipio del país distribuidos en los departamentos de Chocó, Córdoba, Magdalena, Guajira, Santander, Boyacá y Casanare (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2014 citado por MVCT, 2014) (Ver Figura 1-1), y la declaración de calamidad pública por sequía en 36 municipios de siete departamentos de la Costa Caribe (El Tiempo, 2014), son una muestra de que el país es vulnerable a la sequía de las fuentes hídricas. Así mismo durante el año 2015 por la incidencia del fenómeno del Niño, el país dejó ver su vulnerabilidad, lo anterior teniendo en cuenta que 300 municipios del país reportaron desabastecimiento de agua (MVCT, 2015) (Ver Figura 1-2).

Figura 1-1. Imagen a) "Peces muertos por deshidratación en Casanare" (Revista Semana, 2014); b) "Así luce el río Magdalena que le da agua a Santa Marta" (El Tiempo, 2014)

Figura 1-2. Imagen a) "En Zarzal norte del Valle, sin agua 16 horas diarias" (El Tiempo, 2016); b) Alerta roja por los bajos niveles en las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, donde la sequía ha generado la formación de islotes (El Tiempo, 2016)

Las respuestas a las sequías suelen ser reactivas y consisten solo en gestionar las crisis (Zarafshani *et al.,* 2012; Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación - UNCCD, 2013; Mitchell y McDonald, 2015), por lo que se hace necesario la toma de acciones más preventivas mediante la gestión de la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia frente a la sequía (Singh *et al.,* 2014). La evaluación de la vulnerabilidad se cataloga como un punto de partida para determinar las medidas de mitigación de los impactos y las estrategias de respuesta y adaptación ante sequías (Kelly y Adger, 2000).

La vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial puede ser evaluada mediante índices ambientales. Varios investigadores indican que el análisis de la vulnerabilidad a menudo se basa en el uso y la agregación de los indicadores en índices, los cuales son eficaces para la planificación y toma de decisiones (Cutter *et al.*, 2000; Moss *et al.,* 2001; Yohe y Tol, 2002; Vicente, 2007; Abuodha y Woodroffe, 2010 y Giri *et al.,* 2012). Los índices pueden ayudar a identificar y priorizar regiones vulnerables, sectores o grupos de la población, aumentar la conciencia, y pueden ser parte de una estrategia de seguimiento (Thang *et al.,* 2016).

Gran parte de los índices que se han desarrollado para evaluar la sequía de fuentes de agua superficial, consideran solamente información hidrometeorológica, como son: el índice de sequía hidrológica de Palmer – PHDI (Heim, 2002), índice de suministro de agua superficial – SWSI e índice Regional de Tránsito de la Deficiencia – RSDI (Zargar *et al*.,2011); otros índices miden la escasez de agua dado que se basan en comparaciones entre oferta y demanda hídrica, como sucede con el índice de estrés hídrico relativo (UNESCO, 2009), índice de pobreza del agua – IWP (Komnenic *et al,*2009), índice de escasez o índice de uso del agua (IUA) (MAVDT, 2004), éstos índices no consideran otros componentes del concepto de vulnerabilidad como lo son la capacidad de

adaptación, la capacidad de respuesta y otros aspectos sociales, ambientales, e institucionales.

De otra parte se han desarrollado índices para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad ante sequías como son: el índice de riesgo de sequía – DRI (Kim *et al.,* 2013) y el índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IDEAM, 2010), dichos índices, tienen la característica común que se basan solo en información hidrológica y climática o consideran sólo algunos factores relevantes del concepto de vulnerabilidad, dejando de lado otros elementos que deben considerarse en el ámbito social, institucional y ambiental, para efectos de hacer una evaluación más integrada.

Algunos índices han pretendido ser más integrados para evaluar vulnerabilidad, como son: el índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico (Alessa *et al.,* 2008), el índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad (Kim y Chung, 2013) y el índice integrado de vulnerabilidad del agua (Plummer *et al.,* 2013), sin embargo son demasiado complejos y robustos para los tomadores de decisiones. El índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico incluye subíndices tales como: físico y social (Alessa *et al.,* 2008), su mayor limitación es que está conformado por veintiun (21) indicadores, lo que lo hace complejo; el índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad (Kim y Chung, 2013) está conformado por veinticuatro (24) indicadores enmarcados en tres (3) subíndices; exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación; el índice integrado de vulnerabilidad del agua (Plummer *et al,* 2013), se mide a escala de subcuenca, y se calcula sobre la base de cuatro dimensiones: recursos hídricos, entorno físico, economía, instituciones y entorno social, este índice es demasiado robusto y complejo dado que está conformado por ciento seis (106) indicadores.

Dado lo anterior, y considerando que en Colombia y específicamente en la región andina, los tomadores de decisiones presentan dificultades para la consecución de la información necesaria para la aplicación de los índices mencionados, en el presente trabajo se propone un índice sencillo para evaluar la vulnerabilidad ante sequía hidrológica de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas, una herramienta integrada que considera aspectos sociales, ambientales e institucionales, útil para los tomadores decisiones de tal manera que puedan direccionar mejor los recursos económicos disponibles para la gestión y las acciones de prevención, mitigación y adaptación, hacia aquellas subcuencas más vulnerables.

El índice propuesto se aplicó en la subcuenca baja del río Tuluá, en el Valle de Cauca, ubicada en la zona Andina colombiana porque en esta región natural se concentra el 77,4% de la población y el 85% de la actividad económica colombiana (Bernal, et al., 2010), pero paradójicamente posee tan sólo el 13% de la oferta hídrica del país (IDEAM, 2010), en esta región se presentan algunas subzonas hidrográficas con índice de uso de agua entre alto y muy alto en condiciones hidrológicas de año medio y año seco (IDEAM, 2014), (Ver Figura 1-3 y Figura 1-4) lo que demuestra la importancia de dirigir acciones

de mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante la sequía de fuentes de agua superficial en esta zona.

Por lo anterior el presente trabajo de profundización, plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible definir un índice que evalúe de manera integrada la vulnerabilidad ante sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas?

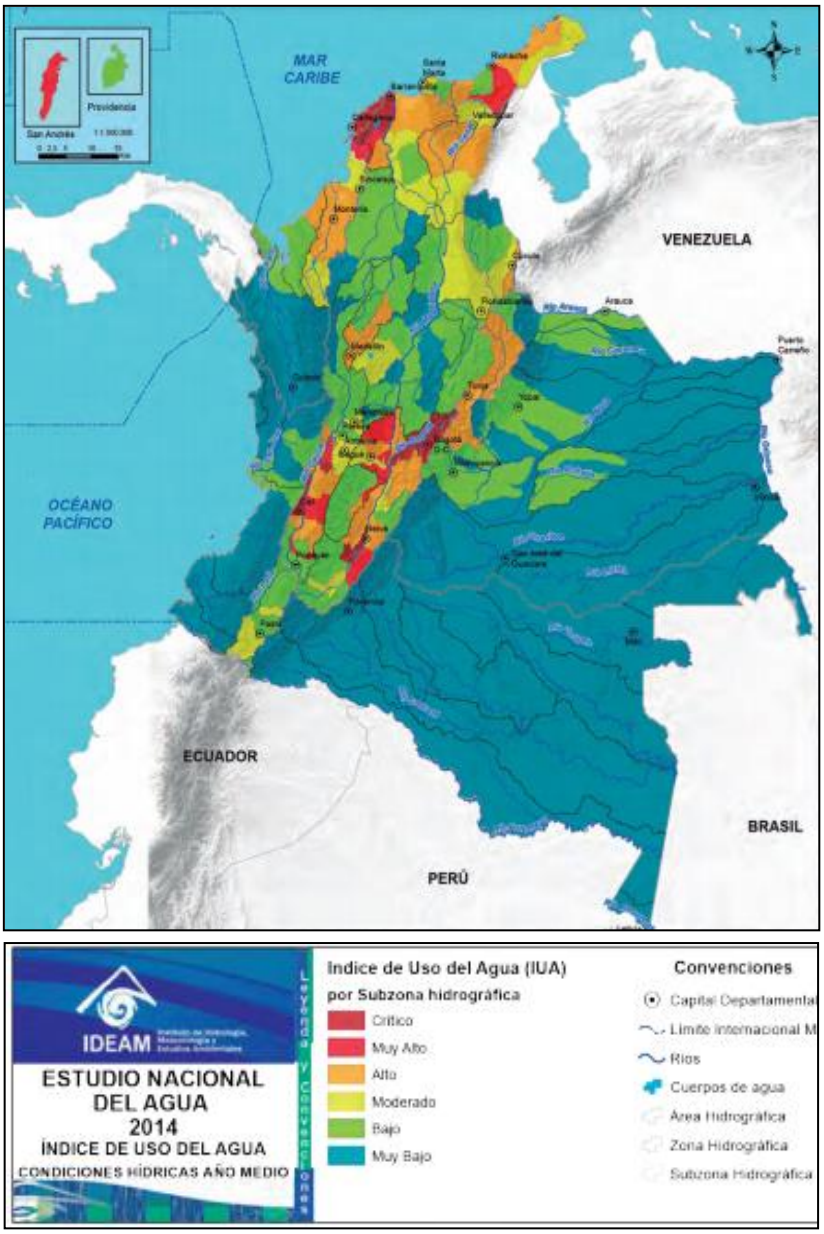


Figura 1-3. Índice de uso del agua. Condiciones hidrológicas de año medio (IDEAM, 2014)

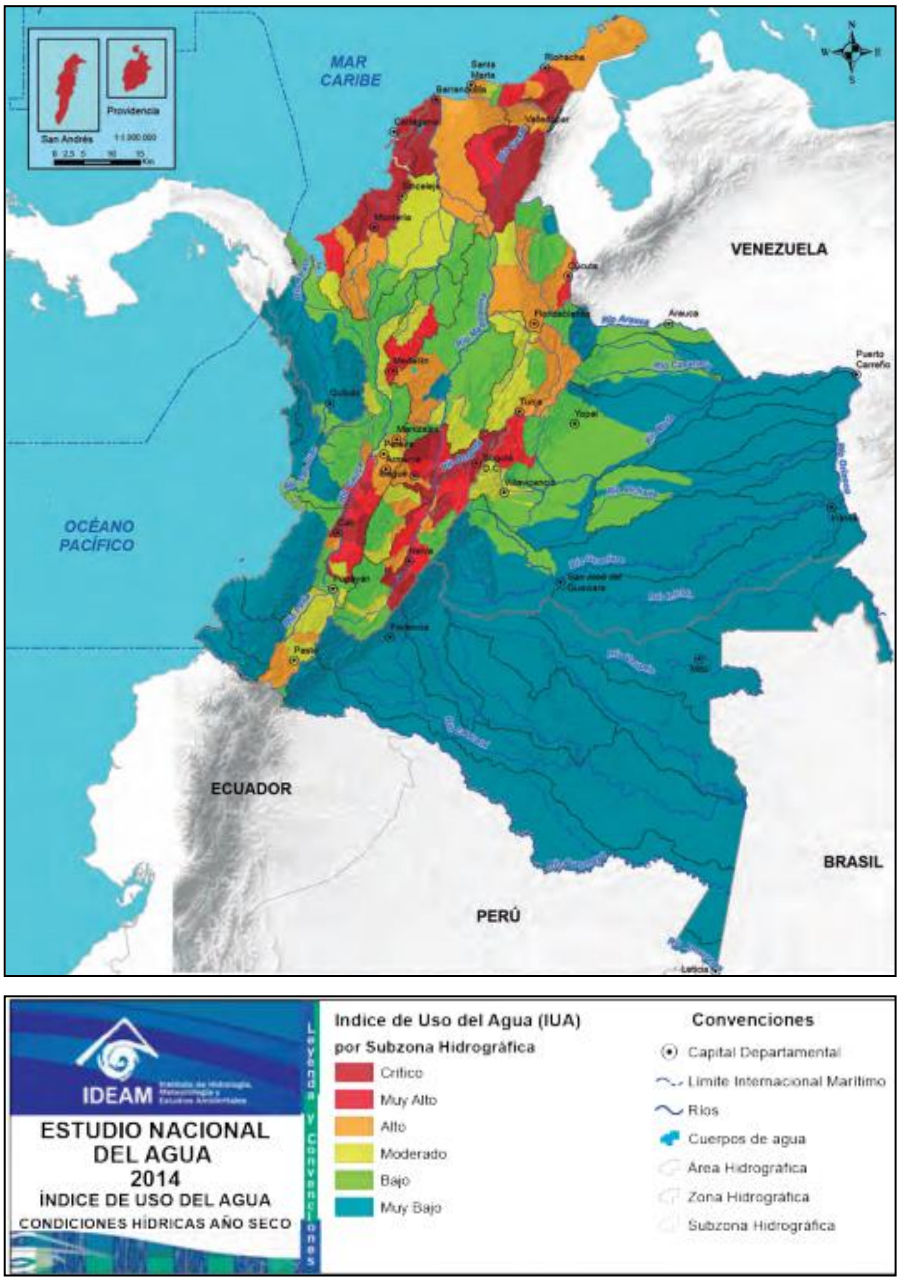


Figura 1-4. Índice de uso del agua. Condiciones hidrológicas de año seco (IDEAM, 2014)

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Proponer un índice para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir indicadores para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas.
- Desarrollar un índice basado en un sistema difuso para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas.
- Proponer acciones de intervención de acuerdo al valor del índice
- Aplicar el índice formulado en las zonas alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá, Valle del Cauca, Colombia.

2. Revisión de literatura

2.1 Definición de marco teórico

El primer paso clave que debe tenerse en cuenta cuando se construye un índice, es la definición del marco teórico (Hajkowicz, 2006; Dobbie y Dail, 2013; Fusco, 2015; García, *et al*., 2015), éste describe de qué manera ocurren las interacciones en el sistema a analizar, permitiendo soportar la selección de los indicadores y contribuir a establecer las relaciones entre ellos (Dobbie y Dail, 2013).

2.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se ha convertido en un tema central en los estudios del cambio global (IPCC, 2007).En la última década, la evaluación de la vulnerabilidad ha adquirido un papel cada vez más importante, para caracterizar cómo se manifiestan los impactos y para la planificación de estrategias de adaptación para la gestión de los recursos naturales (IPCC, 2007 y Malone y Engle, 2011).

De acuerdo con la definición del IPCC, la vulnerabilidad climática es una función de la exposición, la sensibilidad y la resistencia o la capacidad de adaptación del sistema (Turner *et al*., 2003 y IPCC, 2014).

El término vulnerabilidad ha sido definido como el "Grado en que un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluidas la variabilidad y los extremos del clima" (IPCC, 2001,p.5). "La vulnerabilidad determina la intensidad de los daños que produzca la ocurrencia efectiva del riesgo sobre la comunidad" (Wilches – Chaux, 1993, p.9).

Las ciencias naturales y sociales opinan que en un contexto de clima variable, la vulnerabilidad de un sistema socio ecológico depende de la exposición y la sensibilidad a condiciones meteorológicas extremas, y que la capacidad de adaptación significa el potencial del sistema para adaptarse a dichas condiciones climáticas. A mayor exposición y sensibilidad mayor vulnerabilidad, y a mayor capacidad de adaptación menor vulnerabilidad (Deressa *et al.,* 2008 y Fellmann, 2012).

En la Figura 2-1 se presenta un esquema de los factores claves de la vulnerabilidad.

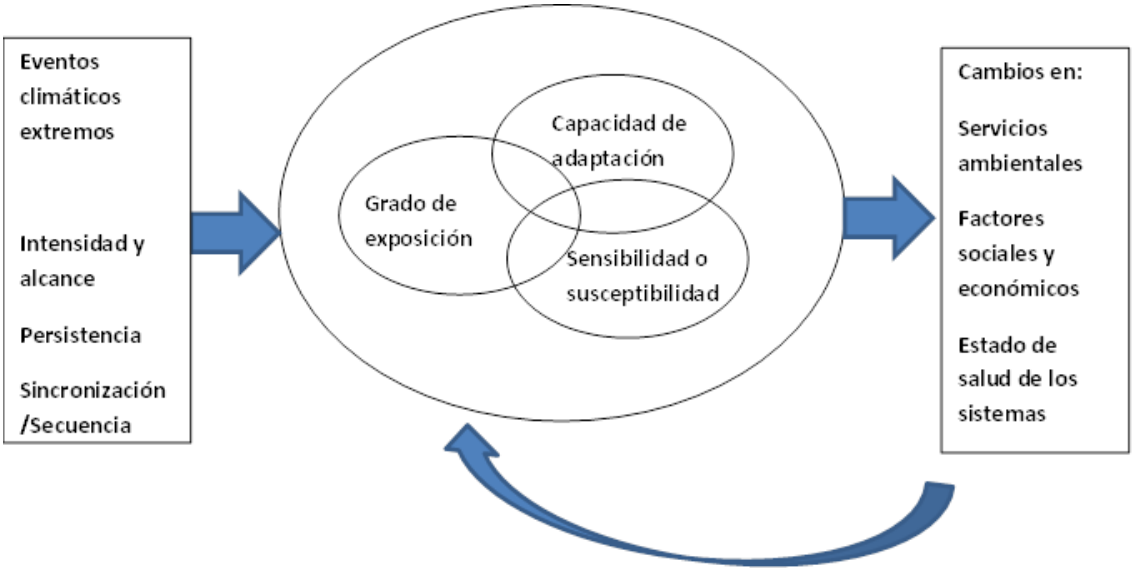


Figura 2-1 Factores claves de la vulnerabilidad
(Ebi y Bowen, 2016, p.96)

2.2.1 Exposición

Hace referencia a la presencia de seres humanos, servicios ambientales, recursos y bienes que a razón de su ubicación o localización pueden sufrir consecuencias por la materialización de una amenaza y por lo tanto están sujetos a potenciales daños en el futuro (IPCC, 2001; Congreso de Colombia, 2012). La exposición también involucra "el grado de estrés climático sobre una unidad particular de análisis, puede estar representada por cambios en las condiciones climáticas o bien por cambios en la variabilidad climática, donde se incluye la magnitud y frecuencia de eventos extremos" (Monterroso *et al.,* 2012, p.882-883).

2.2.2 Sensibilidad

La sensibilidad es definida por Rivas *et al,* (2012) como:

> "El grado en el que un sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio, interno, externo o un grupo de ellos. La medida determina el grado en el que un sistema se puede ver afectado por un estrés, son las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos por un determinado fenómeno" (p.883).

2.2.3 Capacidad de adaptación

"Capacidad de un sistema y de sus partes de anticipar, absorber, acomodar o recuperarse de los efectos de un disturbio de una forma oportuna y eficiente" (Minambiente, 2015, p.15). Es la capacidad de un sistema de hacer frente a las consecuencias del cambio climático, de ejecutar acciones dirigidas a disminuir los impactos. La capacidad de adaptación refleja la capacidad que tiene una población de modificar sus comportamientos para efectos de hacer frente o anticiparse a los cambios (Rivas *et al,* 2012).

2.3 Sequía

Las sequías son fenómenos naturales recurrentes y extremos muy perjudiciales desde el punto de vista ambiental, económico y social, que afectan a millones de personas en el mundo cada año (Wilhite, 2000 y Cooley, 2006). La gestión de las sequías en la mayor parte del mundo sigue siendo reactiva, las acciones de respuesta son tomadas después de la manifestación de los impactos (Svoboda *et al.,* 2015, *Wilhite et al.*, 2007 y Wilhite *et al.*, 2014).

Las definiciones de sequía varían, dependiendo de la variable utilizada para describirla (Mishra y Singh, 2010), por lo tanto, las definiciones de sequía se pueden clasificar en cuatro (4) categorías (Wilhite y Glantz, 1985 citado por Mishra y Singh, 2010) las cuales son descritas a continuación:

.

La sequía meteorológica es conceptualizada como la carencia de precipitación sobre un área y lapso de tiempo determinado (Keyantash y Dracup, 2002), puede ser provocada o acentuada por bajas lluvias, y altas temperaturas y evapotranspiración (Spinoni *et al.,* 2015).

La sequía hidrológica hace referencia a un período de tiempo con escasa cantidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos necesarios para los usos del agua de un determinado sistema de gestión de recursos hídricos (Keyantash y Dracup, 2002; Mishra y Singh, 2010).

La sequía agrícola, es el período durante el cual se presente disminución de la humedad del suelo, lo que genera a su vez pérdidas agrícolas (Mishra y Singh, 2010).

La sequía socioeconómica se manifiesta cuando a raíz de la carencia del agua de abastecimiento, la demanda de un bien supera su oferta. El recurso hídrico escasea trayendo como consecuencia pérdidas económicas (AMS, 2004).

2.4 Lógica difusa

Es “una técnica de la inteligencia computacional que permite trabajar con información que es imprecisa y no está bien definida. Pertenece a la lógica multivaluada pero la lógica difusa se diferencia de ésta en que permite introducir valores intermedios entre la afirmación completa y la negación absoluta” (Benito y Durán, 2011, p.1).

El método de la lógica difusa también puede involucrar el juicio humano para definir las variables y sus relaciones, lo que le permite ser más específica y cercana a la realidad en comparación con otros métodos (Aras *et al.,* 2014).

2.4.1 Conjuntos difusos

Un conjunto difuso es un conjunto donde a cada elemento del universo se le asocia un grado de pertenencia, que es un número entre 0 y 1, entre más cerca a uno (1) se encuentre el grado de pertenencia, más estará el elemento en el conjunto y cuando el grado de pertenencia sea más cercano a cero (0) en menor proporción estará el elemento en el conjunto (Morales, 2002). En la Figura 2-2 se presenta el esquema de un conjunto difuso.

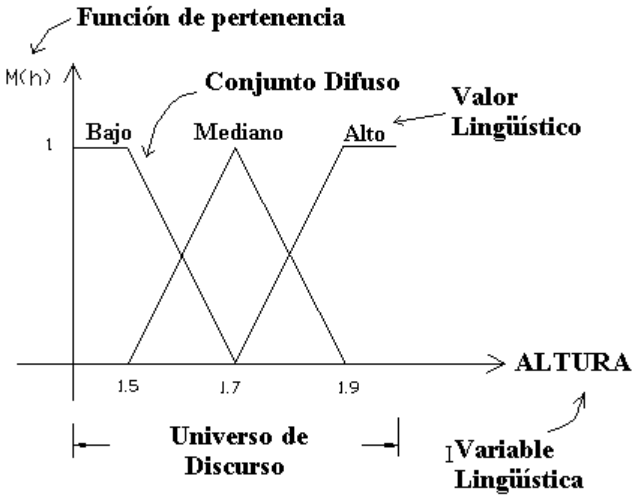


Figura 2-2 Conjuntos difusos (Maguiña, 2010)

2.4.2 Funciones de pertenencia

Una función de pertenencia denota el grado con el que un elemento pertenece a un conjunto difuso, asocia los elementos de un universo de discurso con un elemento del intervalo [0,1]. Las formas de funciones de pertenencia típicas son de tipo triangular, trapezoidal, gaussina, función tipo “s” y singleton entre otras (Maguiña, 2010). En la

Figura 2-3 se presentan algunas de las funciones más usadas para la representación de conjuntos difusos.

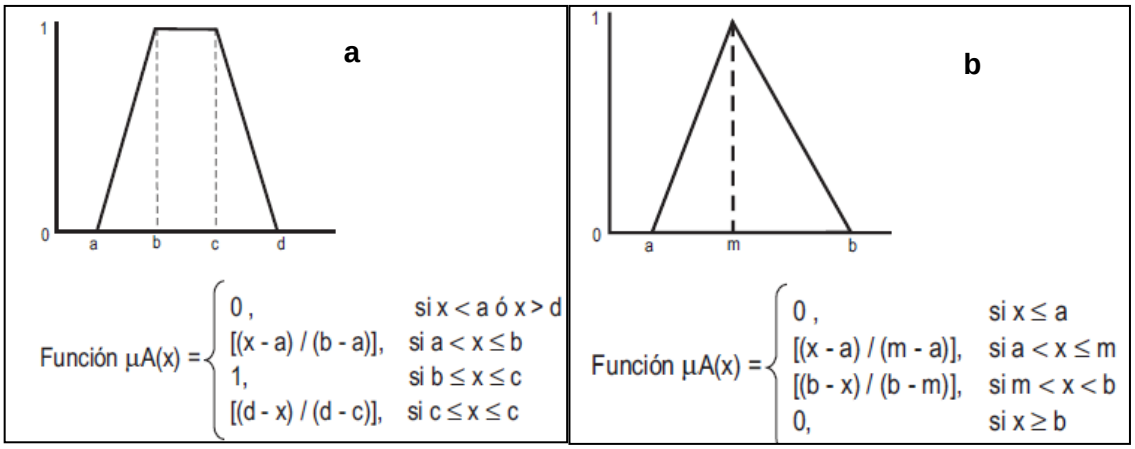


Figura 2-3. Funciones de pertenencia a) Triangular; b) Trapezoidal (Maguiña, 2010)

2.4.3 Sistema de inferencia difuso

"Un sistema de inferencia difuso es un sistema experto con razonamiento aproximado que mapea un vector de entrada a una salida única (escalar). Se basa en la lógica difusa para realizar ese mapeo" (Maguiña 2010, p. 95). El sistema está compuesto principalmente por un fusificador, una base de reglas difusas, un mecanismo o dispositivo de inferencia y un desfusificador, en la Figura 2-4**,** se presenta el esquema general de un sistema de inferencia difuso.

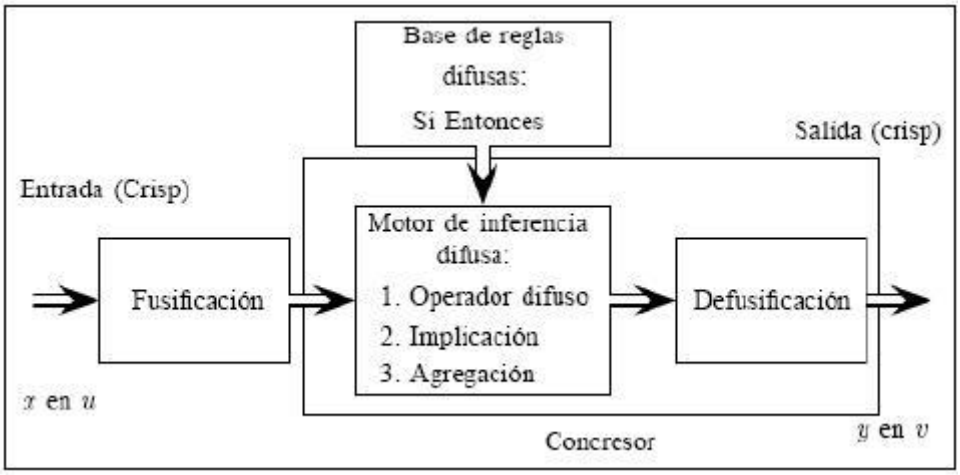


Figura 2-4. Esquema general de un sistema de inferencia difuso (Morales *et al.,* 2010)

2.4.4 Defusificación

Según Delgado *et al., (*2014), la defusificación es el proceso matemático que convierte un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia obtiene una conclusión en términos difusos a partir de la información de entrada, por lo que se requiere aplicar un método de defusificación, que provea una salida discreta y determinística.

Existen diferentes métodos de defusificación, algunos de ellos son descritos por Delgado *et al., (*2014) como sigue:

- Centroide: Es uno de los métodos más utilizados, transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada (x) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida, (ver Ecuaciones 2.1 y 2.2).

$$COA = \frac{\int_Z \ \mu_A(z).z\ dz}{\int_z \ \mu_A(z)dz} \tag{2.1}$$

- Donde μ_A es la función de pertenencia del conjunto de salida A, cuya variable de salida es z.

$$COA = \frac{\sum_{z=a}^{b} \ \mu_A(z).z}{\sum_{z=a}^{b} \ \mu_A(z)} \tag{2.2}$$

- Bisector de área. La salida es el valor que separa el área bajo la curva en dos sub-áreas iguales (…).

- El método de la media de máximo (MOM, middle of maximum). La salida es el valor medio de los valores cuyas funciones de membresía alcanzan el valor máximo.

- El método del máximo más chico (SOM, smallest of maximum). La salida es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía.

- El método del máximo más grande (LOM, largest of maximum). La salida es el máximo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de membresía (…) (p.320).

2.5 Índices ambientales para la valoración de sequía

Un índice es una combinación de varios indicadores; proporciona un resumen del sistema evaluado (Barnett *et al.,* 2008).

Un índice se forma cuando los indicadores individuales se integran. El índice es utilizado para medir conceptos multidimensionales que no pueden ser capturados por un único indicador (OECD, 2008).

Frecuentemente se comete el error de concluir a partir de un solo indicador. Los conjuntos de indicadores sobre un sistema particular deben proporcionar información para dar una imagen amplia y clara sobre el estado del sistema evaluado; y proveer información para la toma de decisiones, encaminadas a dirigir el sistema o fenómeno hacia los objetivos buscados (SEMARNAT, 2009).

Los indicadores son medidas cualitativas o cuantitativas que pueden dar cuenta del cambio a través del tiempo, permiten analizar tendencias, y constituyen herramientas para identificar prioridades de las políticas (OECD, 2008).

2.5.1 Índices de sequía hidrológica a nivel mundial

La construcción de índices para la evaluación de la sequía hidrológica ha sido un tema de investigación de diversos autores. En la Tabla 2-1, se presenta un listado de índices desarrollados y reconocidos a nivel mundial para la evaluación de sequía hidrológica los cuales han sido utilizados ampliamente en diversas investigaciones. Dichos índices caracterizan los eventos de sequía hidrológica especialmente en términos de su intensidad, duración, magnitud y extensión espacial, se basan principalmente en información hidrometeorológica como precipitación, caudal, temperatura, humedad, escorrentía, evapotranspiración, nieve, etc.

Tabla 2-1. Descripción de índices de sequía hidrológica desarrollados a nivel mundial

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)	Analiza la precipitación y la temperatura en el modelo de balance de agua PDSI; compara la sequía meteorológica y la sequía hidrológica a través del espacio y el tiempo (Heim, 2002). Permite detectar las anomalías de humedad que impactan las corrientes de agua superficial, la disponibilidad de agua en el suelo y el nivel de agua en embalses y lagos (Valiente, 2001).
Índice de Suministro de Agua Superficial (SWSI)	Desarrollado como complemento del índice de Palmer, contempla la nieve acumulada, incorpora hidrología y climatología, permite conocer las condiciones de humedad superficial (Zargar *et al.,* 2011).

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice Monitor de sequía de los Estados Unidos (USDM)	Índice compuesto que integra los índices SPI y PDSI, y otros indicadores como la vegetación e hidrología en un mapa semanal de sequía, provee información que luego es sometida a la interpretación de expertos. Este índice puede responder a los requerimientos de diferentes usuarios del agua (Zargar *et al.,* 2011)
Índice Regional de Tránsito de la Deficiencia (RSDI)	Caracteriza la sequía dentro de cada región homogénea. Utiliza la serie de tiempo de caudal, un índice de deficiencia se calcula para identificar regiones homogéneas mediante análisis de conglomerados (Zargar *et al.,* 2011).
Índice de balance de agua derivado de la sequía	Utiliza el modelo de balance de agua UTHBAL (Loukas *et al.,* 2007) para modelar la escorrentía. Este índice se deriva de la normalización y estandarización de la escorrentía sintética para la escorrentía media (Zargar *et al.*, 2011)
Índice de déficit de articulación (JDI)	Refleja las sequías emergentes y prolongadas en tiempo y forma, permite una evaluación de la sequía mes a mes y permite el cálculo de la precipitación requerida para el logro de las condiciones normales en el futuro (Kao y Govindaraju, 2010)
Índice agregado de sequía (ADI)	Es un índice agregado que introduce las variables de precipitación, caudal, almacenamiento, evapotranspiración, humedad del suelo y el contenido de agua de la nieve (Zargar *et al.*, 2011)

2.5.2 Índices de escasez de agua

Dada la necesidad de contar con herramientas que permitan medir la disminución de los recursos hídricos, otros instrumentos se han desarrollado para medir la escasez del agua, si bien es cierto que algunos de éstos índices no incluyen dentro de su definición el término sequía de manera específica, son presentados dado que miden y caracterizan la insuficiencia de los recursos hídricos.

En la Tabla 2-2 se presenta un listado de índices desarrollados y utilizados para medir la escasez de agua, como resultado del uso no sustentable de los recursos hídricos por parte de los diferentes sectores usuarios, éstos índices se caracterizan por realizar comparaciones entre el uso o demanda del agua y la oferta o disponibilidad de la misma.

Tabla 2-2. Descripción de índices de escasez de agua

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice de estrés hídrico relativo	Este indicador proporciona una medida de las presiones de la demanda de agua de los sectores domésticos, industriales y agrícolas en relación con las fuentes locales de agua. Este indicador se basa actualmente en las estimaciones a nivel nacional de la demanda de agua y puede mejorarse mediante el uso de estadísticas de demanda de agua sub-nacionales. La escala de aplicación es a nivel local para las cuencas superiores a 25.000 km^2 (dentro de una ciudad o comunidad); también se puede aplicar a nivel regional, nacional e internacional (UNESCO, 2009).
Índice de Falkenmark (FI)	Se define como el volumen promedio de agua disponible por habitante al año Cuando los suministros de agua se encuentran por debajo de 1700 m^3/habitante/año se presentan problemas de estrés de agua, por debajo de los 1000 m^3/habitante/año existe escasez de agua y por debajo de los 500 m^3/habitante/año se interpreta que hay presencia de escasez absoluta (Perveen y James, 2011).
Razón de criticidad (CR)	Es la relación entre el uso del agua y la disponibilidad de los recursos hídricos. (Perveen y James, 2011); cuando el resultado del índice es inferior al 10% el estrés del agua es bajo, entre 10 y 20% el estrés del agua está entre bajo y medio; si es entre 20 y 40% el estrés es medio alto y cuando supera el 40% se habla de alto estrés hídrico (ONU / OMM / SEI 1997 citado por Perveen y James, 2011).
Índice de pobreza del agua (IWP)	Es un índice que mide la escasez hídrica a partir en cinco componentes: recursos, acceso, capacidad, uso y medio ambiente, cada uno de ellos con un peso en el cálculo final que representa el índice. Permite comprender la relación entre la disponibilidad hídrica y el bienestar de las personas, es una herramienta para evaluar la situación de las poblaciones que se enfrentan a escasa disponibilidad de agua (Lawrence *et al.,* 2002 citado por Komnenic *et al,*2009). El IWP es el promedio ponderado de los cinco componentes cuyos valores se estandarizan en un rango con un valor adimensional entre 0 a 100. Ha sido aplicado a diferentes escalas espaciales: mundial, nacional, regional y local o de comunidad (Komnenic *et al,*2009)

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice de escasez o índice de uso del agua (IUA)	El índice de escasez fue desarrollado en Colombia, por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, representa la relación porcentual entre la demanda de agua para uso y aprovechamiento por parte de las actividades económicas y sociales frente a la oferta hídrica superficial disponible (neta), en un período determinado. Es una herramienta para evaluar si el recurso hídrico de un país, área hidrográfica, región, municipio ó cabecera es suficiente o no (MAVDT, 2004).

2.5.3 Índices de riesgo de sequía y vulnerabilidad

En la Tabla 2-3 se presenta un listado de índices desarrollados y utilizados para valorar sequía desde el punto de vista de riesgo y vulnerabilidad, éstos índices en su mayoría consideran solamente aspectos climáticos e hidrológicos, dejando de lado otros factores del ámbito social, ambiental e institucional.

Algunos índices que miden vulnerabilidad han pretendido ser más integrados, sin embargo son demasiado robustos y complejos para los tomadores de decisiones, dado que están compuestos por gran cantidad de indicadores, lo que puede dificultar su utilización.

Tabla 2-3. Descripción de índices de riesgo y vulnerabilidad

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice de riesgo hidrológico combinado (IRHC)	Se trabajó con base en la división del territorio bonaerense en regiones hidrogeológicas, se hizo análisis de antecedentes de inundaciones y sequías reportados en bases internacionales de registros de eventos extremos, también se utilizó información climatológica, y documentación referente a análisis de sensibilidad y vulnerabilidad ambiental, contaminación de fuentes de agua y panorama ambiental de los recursos hídricos subterráneos. Fue desarrollado a partir de la experiencia y criterio de expertos. Aplicado a nivel de provincia (Rommanazzi *et al.,* 2014).
Índice de riesgo de sequía (DRI)	El riesgo de sequía (DRI) se obtiene multiplicando el índice de peligro de sequía (DHI) con el índice de vulnerabilidad a la sequía (DVI) (Kim *et al.,* 2013). El índice de peligro de sequía incorpora la frecuencia y severidad de las sequías. Los pesos del índice de peligro de sequía fueron asignados de acuerdo con el EDI y las calificaciones se asignaron basados en rangos de probabilidades de ocurrencia. El índice de vulnerabilidad de sequía se compuso por siete indicadores como Regadío (IL), Oficio agrícola (AO), la producción

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	de cultivos (CP), Densidad de Población (PD), Agua Municipal (MW), agua Industrial (IW), y agua para la Agricultura (AW), basado en la disponibilidad de datos fiables. (Kim *et al.,* 2013).
Índice de riesgo dinámico de escasez de agua	Mide el riesgo de escasez de agua teniendo en cuenta no solo la disponibilidad y la demanda de agua sino también incluye factores biofísicos y socioeconómicos; el índice fue construido a partir de la conceptualización del riesgo como función de la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición, para cada uno de estos componentes se identificaron indicadores específicos los cuales fueron agregado en el índice a partir de la participación de partes interesadas. En el componente de amenaza el indicador seleccionado fue la escasez de agua, en el componente de exposición se encuentra los indicadores de densidad de la población, el área con cultivo de arroz, y en el componente de vulnerabilidad se encuentran los indicadores de gobernabilidad del agua, el nivel de pobreza, vegetación río arriba, ocupación agrícola, producción de alimentos y tasa de dependencia (Gain y Giupponi, 2015).
Índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico	Permite evaluar la capacidad de recuperación y la vulnerabilidad de las personas en el Ártico a los cambios en los recursos hídricos, puede ser utilizado por las comunidades para evaluar su vulnerabilidad relativa o resistencia a los factores que influyen en los recursos de agua dulce a escala de cuencas; el índice incluye dos (2) subíndices tales como: Físico y Social, éstos a su vez contienen cinco (5) y cuatro (4) índices constitutivos respectivamente relacionados con suministro natural, suministro municipal, calidad de agua, hábitat de subsistencia, capacidad de conocimiento, capacidad económica, capacidad institucional, capacidad cultural, otros; luego cada índice contiene diferentes indicadores, en total son 21 indicadores. El valor global del índice se obtiene de promediar los valores obtenidos para cada subíndice, el valor de cada subíndice se obtienen de la sumatoria simple de los indicadores que los constituyen (Alessa *et al*., 2008).
Índice de vulnerabilidad del agua	El índice se construyó bajo el marco conceptual conformado por las dimensiones de: recursos hídricos, entorno físico, economía, instituciones y entorno social, así mismo cuenta con 23 subdimensiones y 106 indicadores que alimentan el índice, la asignación de pesos a las subdimensiones y a los indicadores fue realizada a partir de la opinión de diversos participantes; para la construcción del índice de vulnerabilidad se utiliza un promedio ponderado como técnica de agregación (Plummer *et al.,* 2013).

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad agregados en un enfoque Vikor difuso	Como marco conceptual se empleó el concepto de vulnerabilidad del Panel intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), que define la vulnerabilidad como una función de la sensibilidad, la capacidad de adaptación y la exposición climática, bajo estos tres elementos se clasificaron los indicadores desarrollados. Los indicadores claves de la vulnerabilidad se perfilaron con las encuestas Delphi; el enfoque difuso Vikor se utilizó para agregar los indicadores claves en una puntuación de la vulnerabilidad. El índice es aplicado a nivel de provincia (Kim y Chung, 2013).
Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento	Desarrollado y utilizado por el IDEAM en Colombia, mide la vulnerabilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas como períodos de estiaje o eventos como el fenómeno cálido del pacífico "Niño", puede generar riesgo de desabastecimiento. El índice IVH depende a su vez del índice de uso de agua (IUA) y el índice de retención y regulación hídrica (IRH) también desarrollados por el IDEAM. El IVH permite el análisis de zonas y subzonas hidrográficas y es también aplicado en fuentes de abastecimiento de acueductos municipales (IDEAM, 2010).

2.6 Cuenca Hidrográfica del río Tuluá

Una cuenca hidrográfica es un área drenada por un curso principal de agua, sus límites se definen de manera natural y corresponden a las partes más altas del área que circunda un río. En una cuenca se interrelacionan componentes biofísicos, biológicos, socioeconómicos, culturales, entre otros; es por ello que cuando se presenta una afectación de uno de estos componentes se generan repercusiones sobre el equilibrio del sistema (Ramakrishna, 1997).

Dependiendo de la escala, las cuencas están ordenadas en sistemas: cuencas, subcuencas y microcuencas (Lee, 1999 citado por Hernández, 2002). "(…) la subcuenca está delimitada por la divisoria de aguas de un afluente, que forma parte de una cuenca, que es la del cauce principal al que fluyen sus aguas" (Ramakrishna, 1997, p.19).

La cuenca hidrográfica del río Tuluá perteneciente al departamento del Valle del Cauca, se localiza entre las coordenadas geográficas 902.500 – 954.700 Norte y 1.091.600 – 1.138.600 Este. Se estima que posee un área total de 91485 hectáreas; dentro de la cuenca se ubica parte de los municipios de Tuluá, Buga, San Pedro, Ginebra y El Cerrito. El río Tuluá nace en el Parque Natural Páramo Las Hermosas a una altura de 4100 msnm y desciende hasta los 900 msnm para entregar sus aguas al río Cauca; los principales afluentes del río Tuluá son: Cofre, Río Loro, San Antonio, San Marcos, Nogales (CVC y Univalle, 2006). En la Figura 2-5 se presente la ubicación básica de la cuenca del río Tuluá.

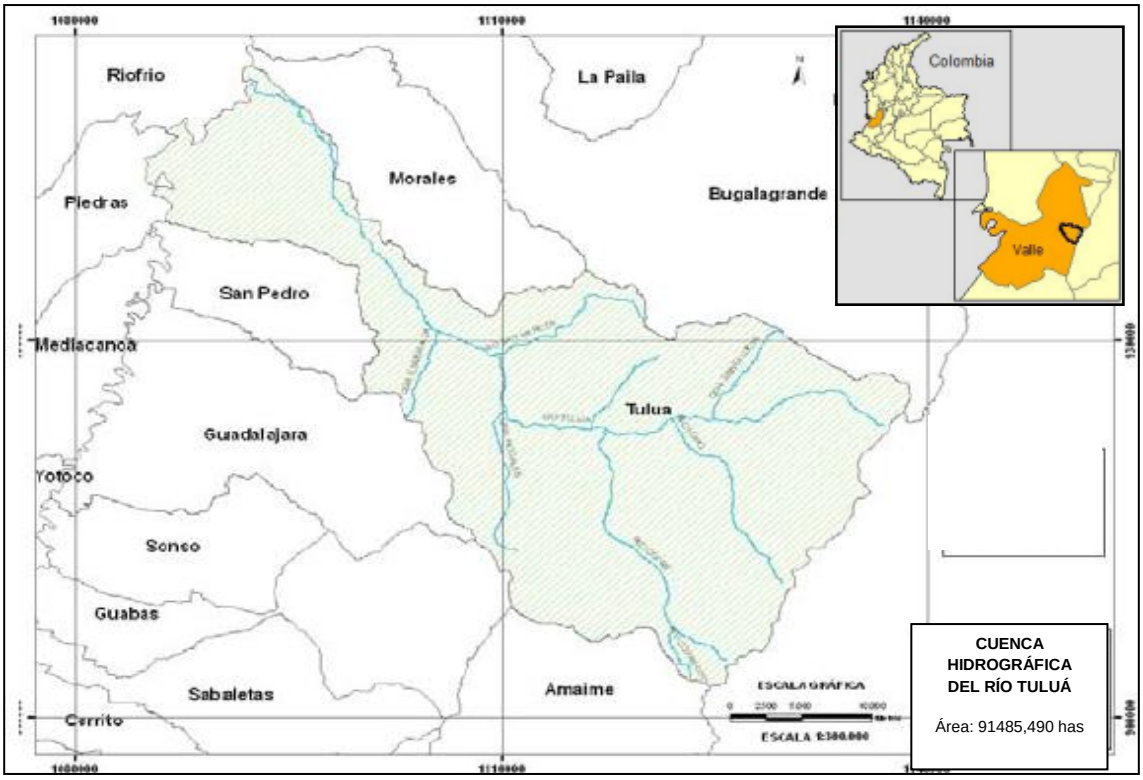


Figura 2-5. Ubicación básica de la cuenca del río Tuluá (Adaptado de: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Univalle, 2006

Las cuencas hidrográficas se pueden subdividir en sub - cuencas debido a criterios morfométricos y de distribución de las corrientes de agua. Las subcuencas resultantes para la cuenca del río Tuluá se presentan en la Figura 2-6.

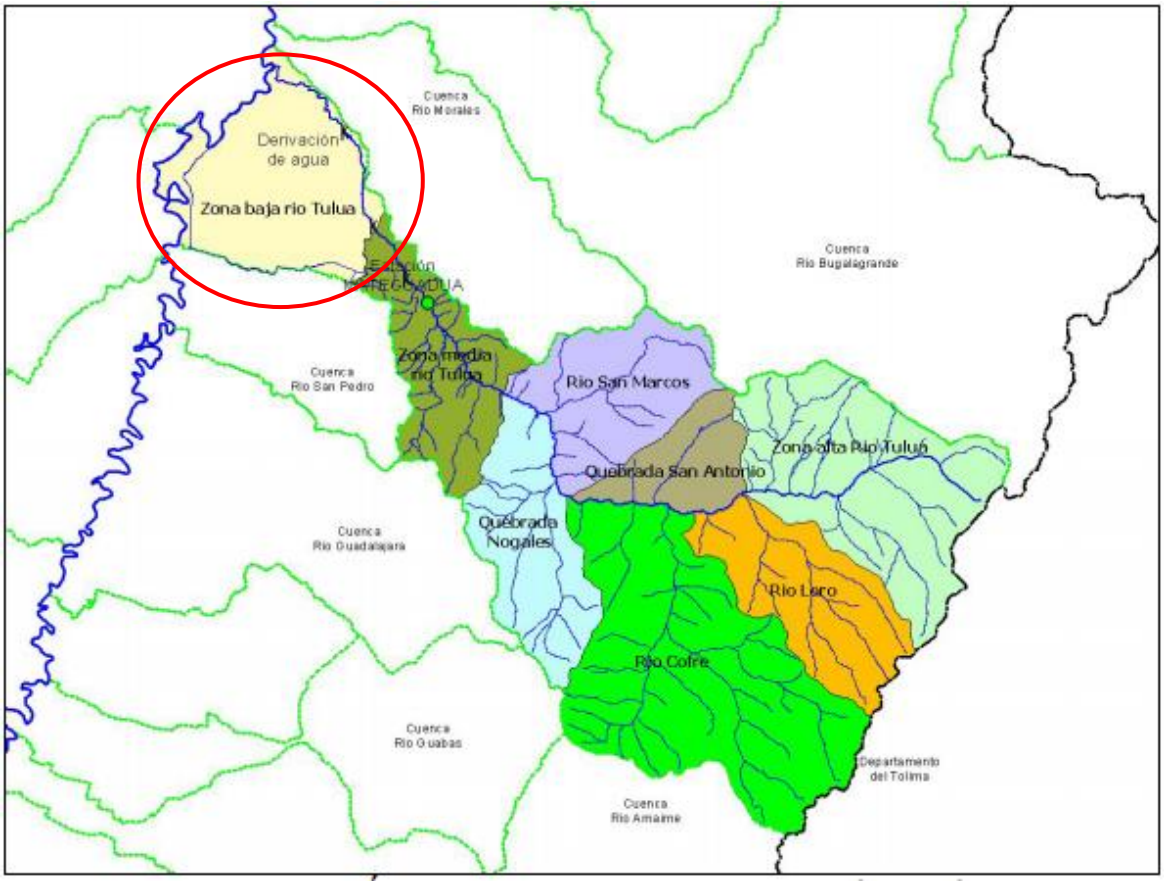


Figura 2-6. Áreas de drenaje de la cuenca del río Tuluá (Adaptado de: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y Gaiacol, 2007)

2.6.1 Subcuenca zona baja río Tuluá

Se ubica en la parte baja de la cuenca del río Tuluá, entre la cota 1000 msnm y la desembocadura del río Tuluá al Cauca. Limita al norte con la cuenca Morales y Riofrío, al sur con la cuenca San Pedro, al occidente con la cuenca Riofrío y Piedras y al oriente con la subcuenca zona media río Tuluá y la cuenca Morales. La subcuenca zona baja río Tuluá representa una participación territorial equivalente al 13,87 % del área total de la cuenca del río Tuluá (CVC y Corpocuencas, 2011).

En la subcuenca de la zona baja del río Tuluá, se encuentra ecosistema bosque seco tropical, con una temperatura promedio de 24°C, área dominada por cultivos de caña de azúcar. En esta zona hay presencia de humedales, que han sido formados paulatinamente por la llanura de inundación del río Cauca (Fundación ciudad verde y CIAT, 2011).

Dentro de la subcuenca se ubican el centro urbano y los corregimientos de Campoalegre, Nariño, Bocas de Tuluá, Tres esquinas, La Palmera, Aguaclara y Los Caimos. El

municipio de Tuluá en el sector urbano se encuentra divido en 135 barrios organizados en nueve (9) comunas. El área urbana es cruzada de sur a norte por el río Tuluá. (Alcaldía Municipal de Tuluá, 2014).

En esta subcuenca se presenta una alta demanda de agua, debido a que es donde se concentra el mayor porcentaje de la población total de la cuenca, al igual que es donde se realizan las actividades productivas de mayor consumo de agua. En la subcuenca existe una problemática asociada al manejo ineficiente del recurso hídrico, los usuarios muestran baja organización en cuanto a la administración y distribución del recurso, se presentan agresiones entre empleados y propietarios de predios, principalmente por la cantidad de agua que toman y el tiempo durante el cual disponen de ella. En la actualidad hay 381 derivaciones para riego, acueducto y otros usos que abastecen de agua a aproximadamente 320 predios. De manera adicional en la subcuenca zona baja río Tuluá, el cultivo de la caña de azúcar es el que tiene el mayor porcentaje de asignación del agua, no se cuenta con obras de distribución con medición que permita que cada usuario tome solamente la cantidad de agua asignada sin afectar a los demás usuarios(CVC y Corpocuencas, 2011).

- **Zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá**

Utilizando como criterio la altura (msnm), la subcuenca zona baja río Tuluá puede dividirse en tres (3) zonas. A una altura superior a los 950 msnm, se encuentra la zona alta en la que se ubican los corregimientos de Campoalegre, Aguaclara y el centro urbano; la zona media la constituyen los corregimientos de los Caimos, Nariño y Tres esquinas y se localiza a una altura superior a los 930 msnm y menor o igual a 950 msnm; finalmente la zona baja se ubica a una altura menor o igual a los 930 msnm, allí se encuentran los corregimientos de Bocas de Tuluá y la Palmera. En la
Tabla **2-4**, se presenta la división por zonas de la subcuenca zona baja río Tuluá.

Tabla 2-4. División por zonas de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA DE LA SUBCUENCA ZONA BAJA DEL RÍO TULUÁ		**ALTURA msnm ***
ZONA ALTA (Altura > 950 msnm)	Campoalegre	976
	Aguaclara	958
	Centro Urbano	968
ZONA MEDIA (Altura >930 msnm y ≤ 950 msnm	Los Caimos	943
	Nariño	950
	Tres esquinas	945
ZONA BAJA ≤ 930 msnm	Bocas de Tuluá	927
	La Palmera	930

***Fuente: © Google Earth, DigitalGlobe, 2016**

3. Materiales y métodos

La metodología desarrollada estuvo conformada por tres (3) fases de trabajo las cuales se describen a continuación:

3.1 Fase 1. Definición de indicadores

Inicialmente se realizó revisión de literatura con el objetivo de identificar el marco teórico a usar para efectos de enmarcar los indicadores a definir, se hizo una revisión de conceptos para determinar con claridad las relaciones que deben existir entre los indicadores.

Posteriormente y con base en revisión de literatura, se identificaron y seleccionaron los indicadores más relevantes que permitieron evaluar de manera integral la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial desde el punto de vista ambiental, social e institucional, dichos indicadores se agruparon bajo el marco teórico previamente definido conformando subíndices que a su vez integran el índice general.

Para cada uno de los indicadores definidos se construyó una ficha técnica, la cual favorece la conservación de la identidad de los indicadores para aplicaciones y réplicas futuras, la información incluida fue la siguiente: nombre del indicador, descripción, dimensión, zona de aplicación, cálculo / estimación, categorías de respuesta, posibles fuentes de información.

3.2 Fase 2. Diseño de un índice basado en un sistema difuso

3.2.1 Fusificación de los indicadores de entrada y la salida del sistema difuso.

Para cada uno de los indicadores definidos previamente, los cuáles son las variables lingüísticas de entrada para el sistema difuso así como para las variables lingüísticas de salida que son los subíndices y el índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial, se definieron los correspondientes universos de discursos (rango de valores que puede tomar la variable lingüísticas), se definieron los conjuntos difusos

conformados por los valores lingüísticos, y las funciones de pertenencia de tipo triangular, trapezoidal y singleton.

3.2.2 Formulación de base de conocimiento y defusificación

Para la conformación de la base de conocimiento, inicialmente se definieron reglas de lógica difusa de tipo *si – entonces* para cada una de los subíndices que conforman el índice general, la parte *si* de las reglas está conformada por dos o más indicadores seleccionados y el *entonces* representa la conclusión con respecto a cada subíndice, así mismo se definió un grupo adicional de reglas de lógica difusa para el índice general, donde la parte *si* de las reglas está conformada por los subíndices y el *entonces* representa la conclusión con respecto a la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial. En la Figura 3-1 se presenta la estructura general del índice a formular

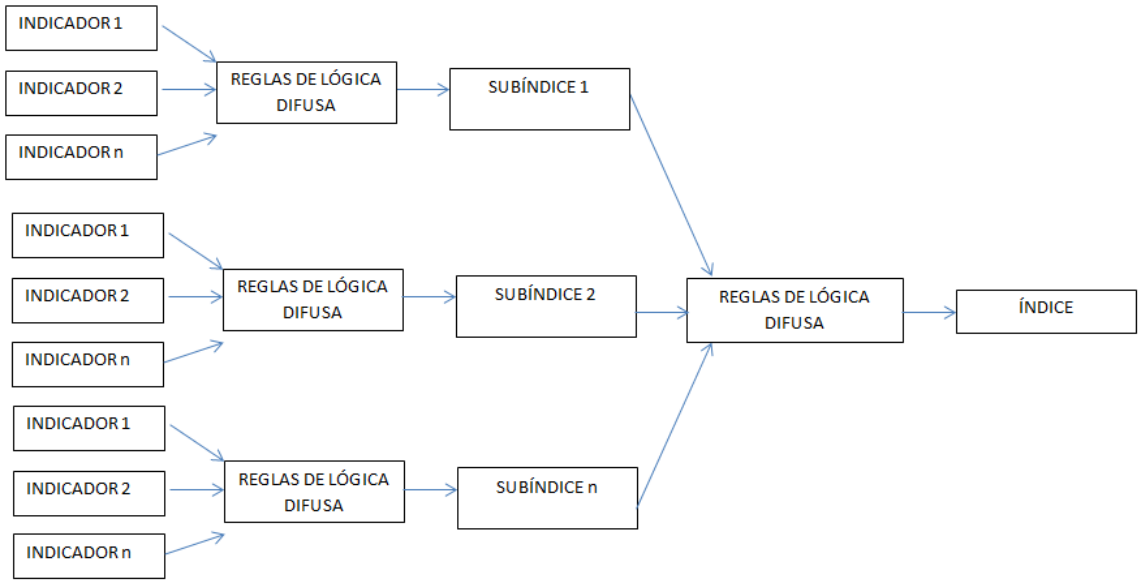


Figura 3-1. Esquema general del índice a formular

3.2.3 Definición de acciones de intervención y ficha técnica del índice

Para cada posible resultado del índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial: alto, medio o bajo, se definieron acciones de intervención a ser implementadas a corto, mediano y largo plazo, en la subcuenca que se evalúe.

Finalmente se construyó la ficha técnica del índice formulado donde se incluyó la información referente a: nombre del indicador, descripción, dimensión, zona de aplicación, cálculo /estimación, categorías de respuesta, posibles fuentes de información.

3.3 Fase 3. Aplicación del índice formulado en la subcuenca: zona baja río Tuluá- Valle del Cauca, Colombia

Para la aplicación del índice formulado, se seleccionó la subcuenca zona baja río Tuluá del departamento del Valle del Cauca, por lo cual se efectuó la recolección de la información requerida para el cálculo de los indicadores previamente definidos. La recolección de información se realizó a través de entrevistas a usuarios del recurso hídrico y a la autoridad ambiental (Ver anexos A y B), visitas institucionales, revisión de literatura, recorridos de campo y recorridos aéreos, posteriormente se ingresaron los datos de cada indicador al sistema difuso para determinar cuáles eran las reglas de lógica difusa que se activaban; para unificar la salida del sistema y obtener la correspondiente conclusión se procedió a unir las áreas bajo la curva de las reglas que se activaron y mediante el método del centroide se determinó el único valor real que permitió conocer el valor de cada subíndice y el del índice general que da cuenta del nivel de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial de la subcuenca donde se realizó la aplicación. En el proceso de aplicación del índice se utilizó el software Matlab 2014.

Finalmente, para cada nivel de vulnerabilidad resultante, se identificaron las posibles acciones que deben implementarse a corto, mediano y largo plazo en las diversas zonas (alta, media y baja) de la subcuenca estudiada.

En la Figura 3-2 se presenta el esquema metodológico del presente trabajo.

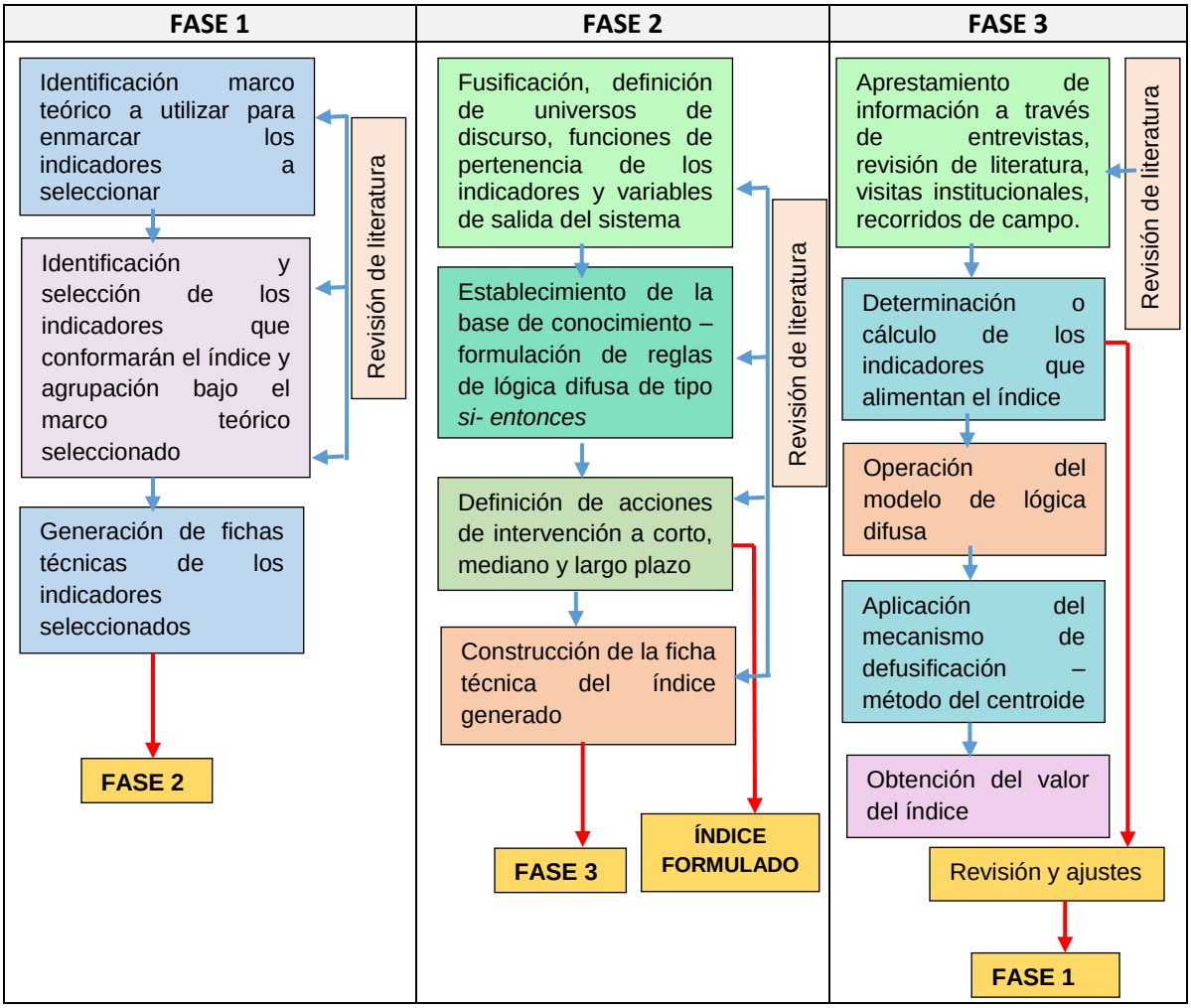


Figura 3-2. Esquema metodológico para proponer un índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas

4. Resultados y análisis

4.1 Definición de indicadores para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas.

4.1.1 Definición de marco teórico

Inicialmente se procedió a realizar revisión de literatura con el fin de identificar el marco teórico más adecuado para enmarcar los indicadores que se seleccionarían y que a su vez conformarán el índice en proceso de construcción, finalmente se concluyó que el modelo más óptimo es el basado en el concepto de vulnerabilidad que involucra las dimensiones de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación y que se interrelacionan como lo definen CIAT (2012); Monterroso *et al., (*2014); Rojas *et al.,(*2014); así:

VULNERABILIDAD = EXPOSICIÓN + SENSIBILIDAD – CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

4.1.2 Definición de indicadores

Teniendo en cuanta el marco teórico seleccionado, se definieron indicadores para las dimensiones de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. Para la dimensión de exposición se definieron dos (2) indicadores: Densidad poblacional y anomalía de precipitación (Indicador existente formulado por el IDEAM).

Para la dimensión de sensibilidad se definieron tres (3) indicadores: Franja forestal protectora, conflictos en la distribución del agua y uso de agua (Indicador existente formulado por el IDEAM).

Para la dimensión de capacidad de adaptación se definieron cuatro (4) indicadores: Gestión de la demanda, gestión de la oferta, sistema de alerta temprana y asociación de usuarios del recurso hídrico.

En la Tabla 4-1 se presentan los indicadores definidos para cada una de las dimensiones anteriormente referenciadas.

Tabla 4-1. Indicadores definidos para evaluar vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas

DIMENSIÓN	INDICADOR	SIGLA	COMPONENTE	RANGO DE VALORES QUE PUEDE TOMAR	OBSERVACIONES
EXPOSICIÓN	Densidad poblacional	DP	Social	0 - 5000	De acuerdo a la revisión de literatura, el indicador ha sido utilizado y reconocido como un indicador de exposición por autores tales como (Hahn *et al.,* 2003), (Carreño *et al,* 2005), (Gain y Giupponi, 2015), (BID, 2015). El rango de valores, así como la escala de valoración (alta, media y baja) se definió y adaptó con base en revisión de literatura de acuerdo a lo considerado por los autores: IDEAM (1996), (Medina, 2003), DANE (2005) y (Salazar, 2010).
	Anomalía de precipitación	AP	Ambiental	0-170%	Los autores (Montero, 2010) y (Monterroso, 2012) identifican y utilizan indicadores que miden cambios en la precipitación como parte del componente de exposición. El rango de valores fue definido por el IDEAM, dado que es un indicador existente formulado por este instituto.

DIMENSIÓN	INDICADOR	SIGLA	COMPONENTE	RANGO DE VALORES QUE PUEDE TOMAR	OBSERVACIONES
SENSIBILIDAD	Franja forestal protectora	FFP	Ambiental	Alta- Media - Baja	Los autores (Hahn *et al.,* 2003), y (BID, 2015) consideran la degradación ambiental y la pérdida de cobertura vegetal como condición que agrava los efectos directos causados por fenómenos peligrosos como la sequía.
	Conflictos en la distribución del agua	CDA	Social	Alto- Medio - Bajo	La autora (Ávila, 2008), considera que los conflictos y disputas por el agua es uno de los factores agravantes que aumenta la vulnerabilidad a la pérdida de seguridad hídrica.
	Uso del agua	IUA	Ambiental	0 – 100%	El autor (IMTA, 2009) identifica un indicador que relaciona la demanda /oferta dentro de la dimensión de sensibilidad. Así mismo, (Ávila, 2008) identifica la escasez de agua como uno de los factores agravantes que aumenta la vulnerabilidad a la pérdida de seguridad hídrica. El rango de valores fue definido por el IDEAM, dado que es un indicador

DIMENSIÓN	INDICADOR	SIGLA	COMPONENTE	RANGO DE VALORES QUE PUEDE TOMAR	OBSERVACIONES
					existente formulado por este instituto
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN	Gestión de la demanda	GD	Institucional	Alta- Media - Baja	Los autores (García *et al,* 2007) y (Bokova, 2012) reconocen que la gestión integral del recurso hídrico es una forma de adaptación a la variabilidad climática y cambio climático.
	Medidas de atención de emergencias	MAE	Institucional Social	Alta- Media - Baja	De acuerdo a la revisión de literatura el indicador ha sido utilizado y reconocido como un indicador de capacidad de adaptación por autores tales como (Hahn *et al.,* 2003), y (Salinas, 2015).
	Sistema de alerta temprana	SAT	Institucional Social	Existe – No existe	Los autores (Hahn *et al.,* 2003), y (Salinas, 2015), consideran la disponibilidad de información climática como elemento importante de la capacidad de adaptación. La hipótesis es que personas informadas tienen ventajas para prepararse e implementar medidas de adaptación así como para motivarse a recibir nuevos conocimientos y actitudes favorables necesarias para remover barreras que

DIMENSIÓN	INDICADOR	SIGLA	COMPONENTE	RANGO DE VALORES QUE PUEDE TOMAR	OBSERVACIONES
					faciliten la implementación de medidas de adaptación.
	Asociaciones de usuarios del recurso hídrico	AURH	Social	Existe – No existe	Autores como (Monterroso, 2012) y (Salinas, 2015), consideran el grado de organización y cohesión social como elemento de importancia dentro de la capacidad de adaptación.

- **Fichas técnicas de los indicadores**

A continuación desde la Tabla 4-2 a la Tabla 4-10, se presentan las fichas técnicas para cada uno de los indicadores definidos, herramienta que favorecerá la conservación de la identidad de los indicadores definidos, lo anterior para aplicaciones y réplicas futuras. La información incluida es la siguiente: nombre del indicador, descripción, dimensión, cálculo, categorías de respuesta, posibles fuentes de información.

Tabla 4-2. Ficha técnica indicador densidad poblacional - DP

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Densidad poblacional - DP
Descripción	Hace referencia al número de habitantes promedio por unidad de área en el territorio evaluado
Dimensión	Exposición
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	$DP = \frac{Número\ de\ habitantes}{Área\ (Km^2)}$
Categoría de respuesta	Baja Media Alta
Posibles fuentes de información	✓ Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas ✓ Censo DANE (cabecera municipal, centros poblados, resto) ✓ Anuario estadístico municipal

Tabla 4-3. Ficha técnica indicador Anomalía de precipitación - AP

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Anomalía de precipitación - AP
Descripción	La anomalía de la precipitación mide la desviación en porcentaje, de la precipitación de un periodo determinado con relación al valor medio histórico de un periodo de referencia (en este caso, se considera que 30 es el número de años adecuado para establecer una precipitación normal climatológica) (González y Casallas, 2014).
Dimensión	Exposición
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Cálculo /estimación	$AP = \frac{PA}{PT} x\ 100$ En donde : **AP** = Anomalía de precipitación anual de la unidad espacial de referencia **PA**= Precipitación total durante el año de análisis **PT** = Precipitación total anual promedio multianual El promedio multianual se obtiene a partir del promedio aritmético de los valores de precipitación anual total de una serie histórica de por lo menos treinta años para cada estación Fuente: (González y Casallas, 2014).
Categoría de respuesta	Por debajo de lo normal Normal Por encima de lo normal
Posibles fuentes de información	✓ Red de estaciones meteorológicas

Tabla 4-4. Fichas técnica indicador franja forestal protectora - FFP

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Franja forestal protectora - FFP
Descripción	Se refiere al nivel de presencia de cobertura vegetal en la franja protectora de la fuente de agua superficial del área de evaluación.
Dimensión	Sensibilidad
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	El valor del indicador es obtenido a través de la observación
Categoría de respuesta	Baja Media Alta

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Posibles fuentes de información	✓ Recorridos a lo largo de la fuente de agua superficial ✓ Fotografías aéreas ✓ Otros

Tabla 4-5. Ficha técnica indicador conflicto en la distribución del agua -CDA

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Conflictos en la distribución del agua -CDA
Descripción	Se refiere al nivel de conflictos que se dan en el área de estudio por motivos de administración y distribución del agua de la fuente de agua superficial.
Dimensión	Sensibilidad
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	El indicador es cualitativo estimado a partir de la percepción de los usuarios de la fuente de agua superficial
Categoría de respuesta	Bajo Medio Alto
Posibles fuentes de información	✓ Entrevistas con usuarios de la fuente de agua superficial ✓ Autoridad ambiental ✓ Otros

Tabla 4-6. Ficha técnica indicador uso de agua - IUA

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Uso de agua – IUA
Descripción	Relación entre la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios; en un periodo determinado (anual o mensual) y en una unidad espacial de análisis; y la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales (IDEAM, 2010). Se aplica para condiciones hidrológicas promedio.
Dimensión	Sensibilidad

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	$IUA = \left[\frac{Dh}{Oh}\right] \times 100$ Donde: **Dh:** Demanda hídrica sectorial **Oh:** Oferta hídrica superficial disponible (esta última resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental). Dh = **Σ** (Volumen de agua extraída para usos sectoriales en un periodo determinado) Dh = Ch + Csp + Csm + Css +Cea + Ce +Ca +Aenc Donde: Ch: Consumo humano o doméstico Csp: Consumo del sector agrícola Csm: Consumo del sector industrial Css: Consumo del sector servicios Ce: Consumo del sector energía Ca: Consumo del sector acuícola Aenc: agua extraída no consumida $Oh = O_{htotal} - Oh_{Qamb}$ Dónde: $\mathbf{O_{htotal}}$ = Es el volumen total de agua superficial en una unidad de análisis espacial y temporal determinada $\mathbf{O_{Qamb}}$ = Es el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental en la misma unidad de análisis espacial y de tiempo de la oferta total.
Categoría de respuesta	Baja Media Alta
Posibles fuentes de información	✓ Estudio Nacional del agua ✓ Autoridad ambiental ✓ Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales – IDEAM.

Tabla 4-7. Fichas técnica indicador gestión de demanda - GD

<table>
<tr><th colspan="2">FICHA TÉCNICA INDICADOR</th></tr>
<tr><td>Nombre indicador</td><td>Gestión de la demanda – GD</td></tr>
<tr><td>Descripción</td><td>El indicador permite medir el nivel de avance con respecto a la implementación de estrategias dirigidas a reducir la demanda de agua superficial por parte de los usuarios.</td></tr>
<tr><td>Dimensión</td><td>Capacidad de adaptación</td></tr>
<tr><td>Zona de aplicación</td><td>Subcuenca Región Andina</td></tr>
<tr><td>Cálculo /estimación</td><td>El valor del indicador es obtenido a partir de la aplicación de criterios definidos para la categorización</td></tr>
<tr><td>Categoría de respuesta</td><td>
<table>
<tr><th>CATEGORÍA</th><th>CRITERIO</th></tr>
<tr><td>BAJA</td><td>No se han ejecutado acciones dirigidas a disminuir la demanda de agua superficial</td></tr>
<tr><td>REGULAR</td><td>Se ha ejecutado por lo menos una (1) acción dirigida a reducir la demanda de agua superficial como sensibilización en uso eficiente de agua, gestión de pérdidas, reasignación de agua, otros.</td></tr>
<tr><td>MEDIA</td><td>Se ha ejecutado por lo menos dos (2) acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial como sensibilización en uso eficiente de agua, gestión de pérdidas, reasignación de agua, otros.</td></tr>
<tr><td>ALTA</td><td>Se ha ejecutado más de dos (2) acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial como sensibilización en uso eficiente de agua, gestión de pérdidas, reasignación de agua, otros.</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Posibles fuentes de información</td><td>✓ Entrevistas
✓ Visitas a instituciones
✓ Autoridad ambiental
✓ Plan de ordenamiento y manejo de cuenca hidrográfica
✓ Otros.</td></tr>
</table>

Tabla 4-8. Ficha técnica indicador medidas de atención de emergencias - MAE

<table>
<tr><th colspan="2">FICHA TÉCNICA INDICADOR</th></tr>
<tr><td>Nombre indicador</td><td>Medidas de atención emergencias - MAE</td></tr>
<tr><td>Descripción</td><td>El indicador permite medir el nivel preparación para responder a una emergencia asociada a la manifestación de una sequía hidrológica de la fuente de agua superficial</td></tr>
<tr><td>Dimensión</td><td>Capacidad de adaptación</td></tr>
<tr><td>Zona de aplicación</td><td>Subcuenca Región Andina</td></tr>
<tr><td>Cálculo /estimación</td><td>El valor del indicador es obtenido a partir de la aplicación de criterios definidos para la categorización.</td></tr>
<tr><td>Categoría de respuesta</td><td>
<table>
<tr><th>CATEGORÍA</th><th>CRITERIO</th></tr>
<tr><td>BAJA</td><td>No se cuentan con medidas de atención para responder ante la manifestación de una sequía hidrológica de agua superficial</td></tr>
<tr><td>REGULAR</td><td>Se cuenta por lo menos con una (1) medida de atención para responder ante la manifestación de una sequía hidrológica de agua superficial. Medidas tales como fuentes alternas de abastecimiento de agua, almacenamiento, turnos de riego, otros.</td></tr>
<tr><td>MEDIA</td><td>Se cuenta por lo menos con dos (2) medidas de atención para responder ante la manifestación de una sequía hidrológica de agua superficial. Medidas tales como fuentes alternas de abastecimiento de agua, almacenamiento, turnos de riego, otros.</td></tr>
<tr><td>ALTA</td><td>Se cuenta con más de dos (2) medidas de atención para responder ante la manifestación de una sequía hidrológica de agua superficial. Medidas tales como fuentes alternas de abastecimiento de agua, almacenamiento, turnos de riego, otros.</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Posibles fuentes de</td><td>✓ Entrevistas
✓ Visitas a instituciones</td></tr>
</table>

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
información	✓ Autoridad ambiental ✓ Plan de ordenamiento y manejo de cuenca hidrográfica ✓ Otros.

Tabla 4-9. Ficha técnica indicador sistema de alerta temprana - SAT

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Sistema de alerta temprana – SAT
Descripción	El indicador permite determinar si los usuarios de la fuente de agua superficial cuentan o no con mecanismos óptimos para la medición y monitoreo continuo del caudal de la fuente de agua como herramienta para la generación de alertas tempranas.
Dimensión	Capacidad de adaptación
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	El valor del indicador es obtenido a partir de la información recogida de instituciones, revisión de literatura, otros.
Categoría de respuesta	Existe / No existe
Posibles fuentes de información	✓ Entrevistas ✓ Visitas a instituciones ✓ Autoridad ambiental ✓ Plan de ordenamiento y manejo de cuenca hidrográfica ✓ Otros.

Tabla 4-10. Ficha técnica indicador asociación de usuarios del recurso hídrico - AURH

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Nombre indicador	Asociación de usuarios del recurso hídrico - AURH
Descripción	El indicador determina si en el área de análisis, existen asociaciones de usuarios del recurso hídrico las cuales se han organizado para participar en los procesos decisorios referente al manejo adecuado del agua.

FICHA TÉCNICA INDICADOR	
Dimensión	Capacidad de adaptación
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	El valor del indicador es obtenido a partir de la información recogida de instituciones, revisión de literatura, otros.
Categoría de respuesta	Existe / No existe
Posibles fuentes de información	✓ Entrevistas ✓ Visitas a instituciones ✓ Autoridad ambiental ✓ Plan de ordenamiento y manejo de cuenca hidrográfica ✓ Otros.

4.2 Desarrollo de un índice basado en un sistema difuso para evaluar la vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas.

4.2.1 Fusificación de las variables de entrada y de salida del sistema difuso.

A continuación se presentan las funciones de pertenencia para cada uno de los indicadores definidos para las dimensiones de Exposición, Sensibilidad y Capacidad de Adaptación.

- **Funciones de pertenencia indicadores de exposición**

Para los indicadores de exposición se utilizan funciones de pertenencia de tipo trapezoidal, es así que para el indicador de densidad poblacional - DP, se define una función de tipo trapezoidal que muestra una calificación de “Baja” para valores por debajo de 40%, calificación “Media” para valores entre 30% y 100% y una calificación “Alta” para valores superiores a 90%.

Para el indicador de anomalía de precipitación - AP, se define una función de pertenencia trapezoidal, la calificación “Por debajo de lo normal” se da para valores inferiores a 90%, la calificación “Normal” se asigna a valores entre 60% y 140% y “Por encima de lo normal” para valores por encima del 110%.

Finalmente para el subíndice de exposición se define una función de pertenencia triangular con calificaciones de baja, media y alta.

En las Figura 4-1 y Figura 4-2 se presentan las funciones de pertenencia definidas para los indicadores de Exposición: Densidad poblacional - DP y Anomalía de precipitación - AP y en la Figura 4-3 se muestra la función de pertenencia para el subíndice de exposición - E.

Finalmente en la Figura 4-4 se muestra el resumen de las funciones de pertenencia definidas para los indicadores de exposición.

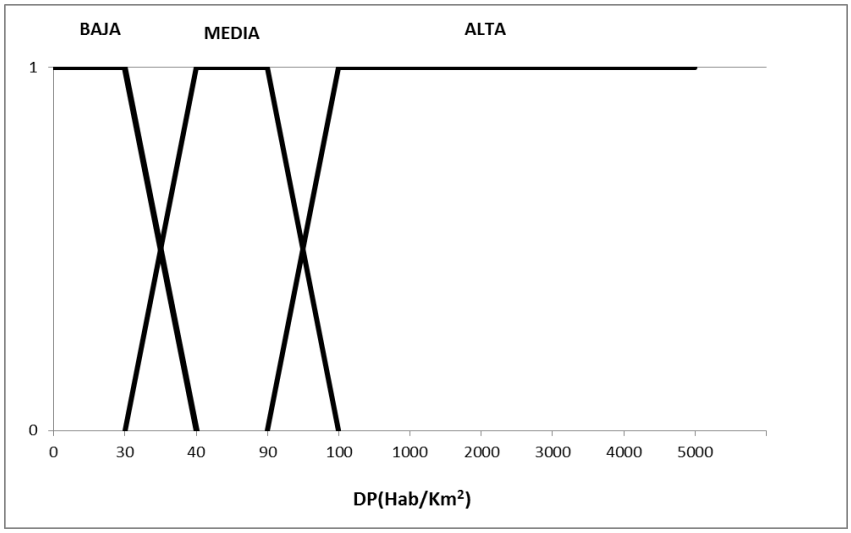


Figura 4-1. Función de pertenencia indicador densidad poblacional - DP

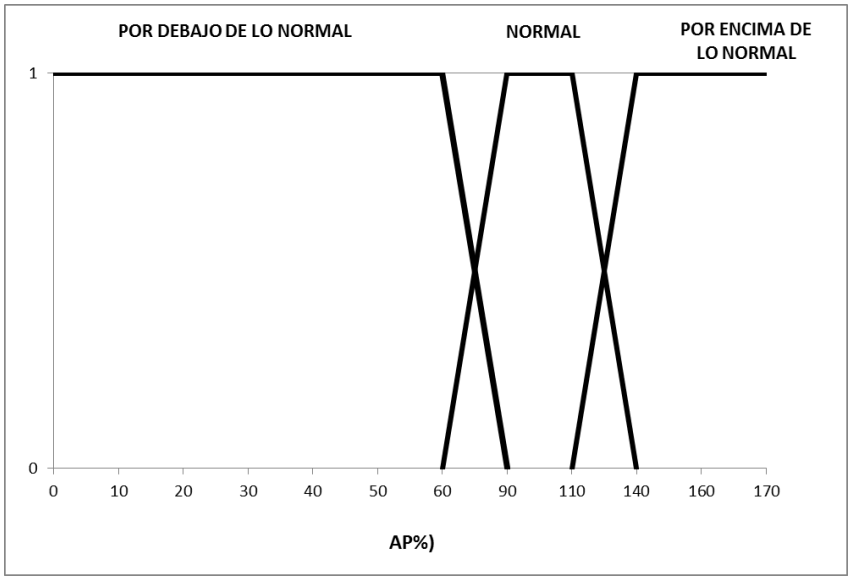


Figura 4-2. Función de pertenencia indicador anomalía de precipitación - AP

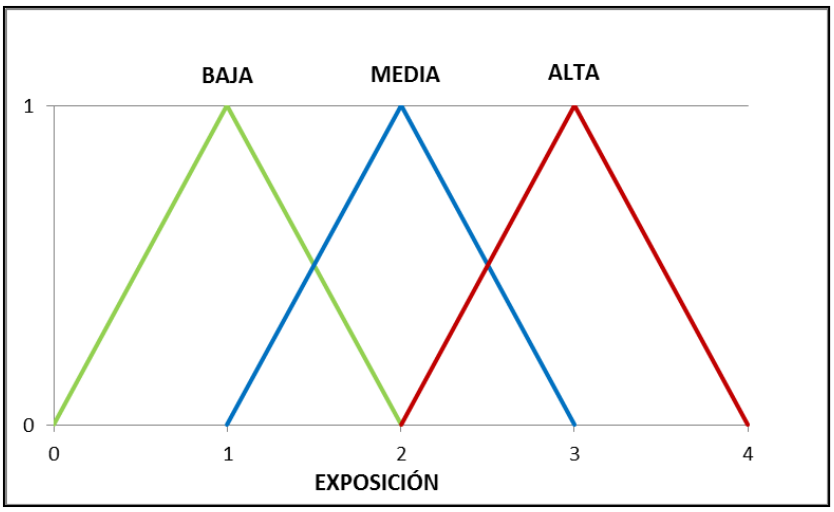


Figura 4-3. Función de pertenencia subíndice de Exposición -E

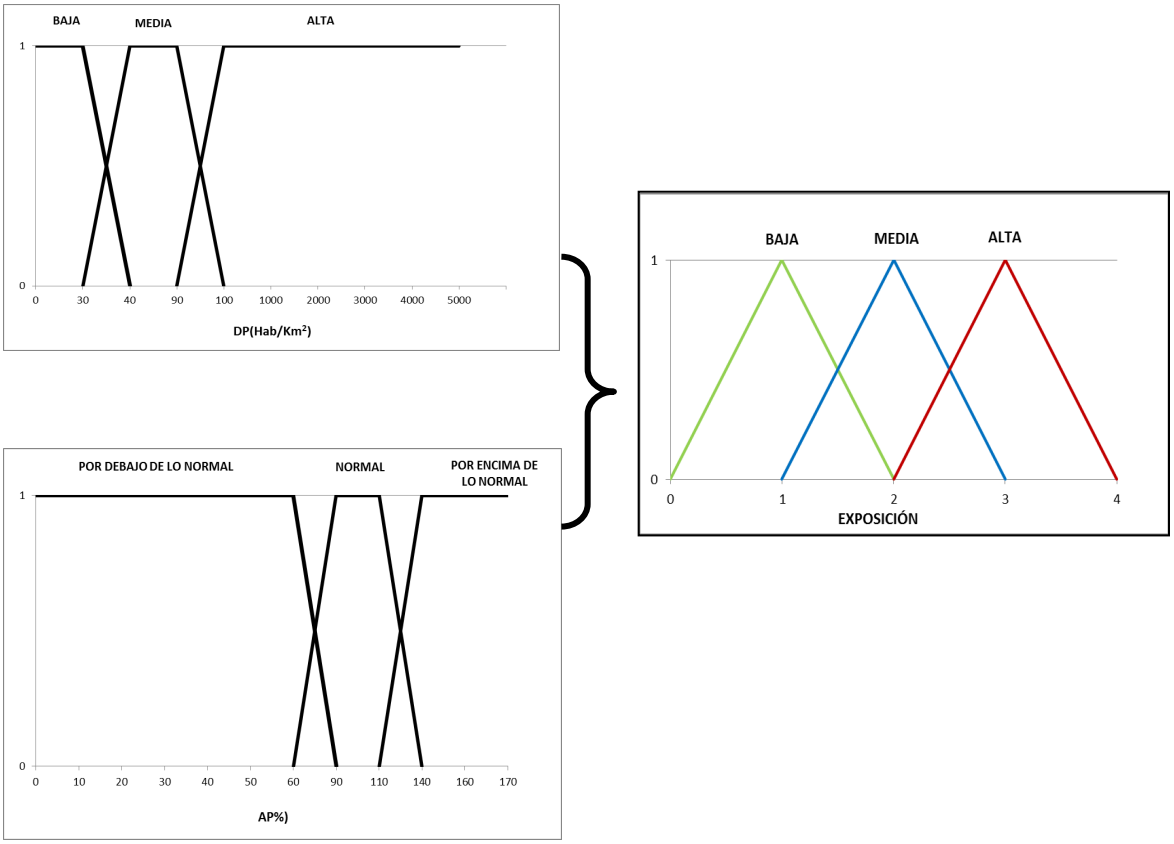


Figura 4-4. Resumen funciones de pertenencia indicadores de Exposición -E

- **Funciones de pertenencia indicadores de sensibilidad**

Para el caso de los indicadores de sensibilidad se utilizan funciones de pertenencia de tipo trapezoidal y triangular, es así que para los indicadores de franja forestal protectora –FFP y conflictos distribución de agua- CDA, se definen funciones de pertenencia de tipo triangular que muestra una calificación de “Baja” “Media” y “Alta”; de otra parte el indicador uso de agua - IUA tiene definida una combinación entre funciones de pertenencia de tipo trapezoidal y triangular que asignan calificación de “Baja” para valores de IUA inferiores a 15 %, “Media” a valores entre 10 y 30 %, y “Alta” entre 20 % y 100%.

Finalmente para el subíndice de sensibilidad se define una función de pertenencia triangular con calificaciones de baja, media y alta.

En las Figura 4-5, Figura 4-6 y Figura 4-7 se presentan las funciones de pertenencia definidas para los indicadores franja forestal protectora- FFP, uso de agua - IUA (IDEAM, 2010) y conflictos distribución de agua -CDA. En la Figura 4-8 se muestra la función de pertenencia para el subíndice de sensibilidad - S.

Finalmente en la Figura 4-9 se muestra el resumen de las funciones de pertenencia definidas para los indicadores de sensibilidad.

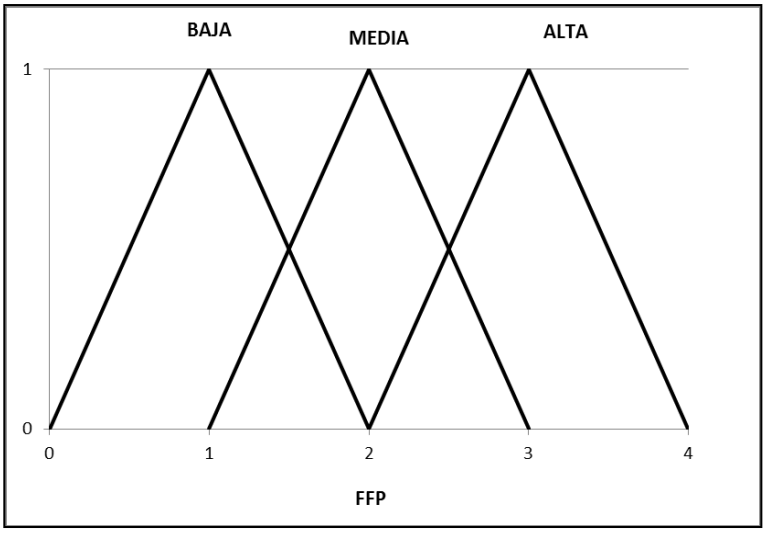


Figura 4-5. Función de pertenencia indicador Franja forestal protectora -FFP

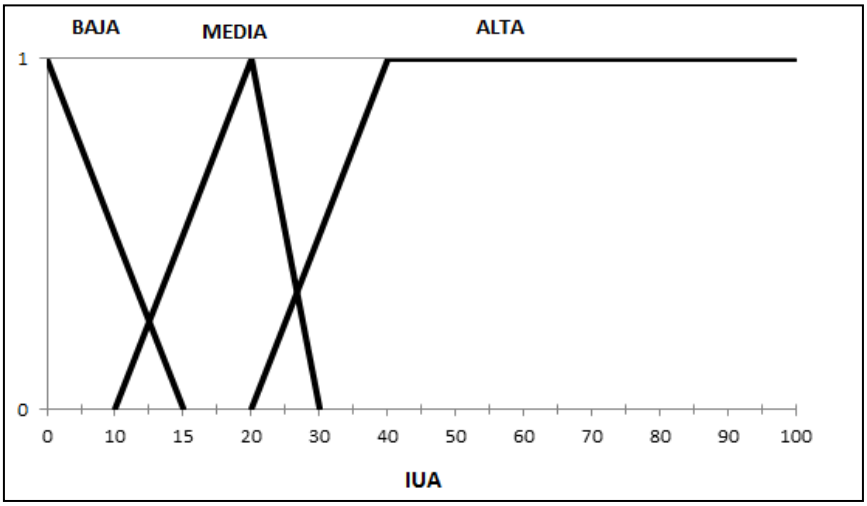


Figura 4-6. Función de pertenencia indicador uso de agua – IUA (IDEAM, 2010)

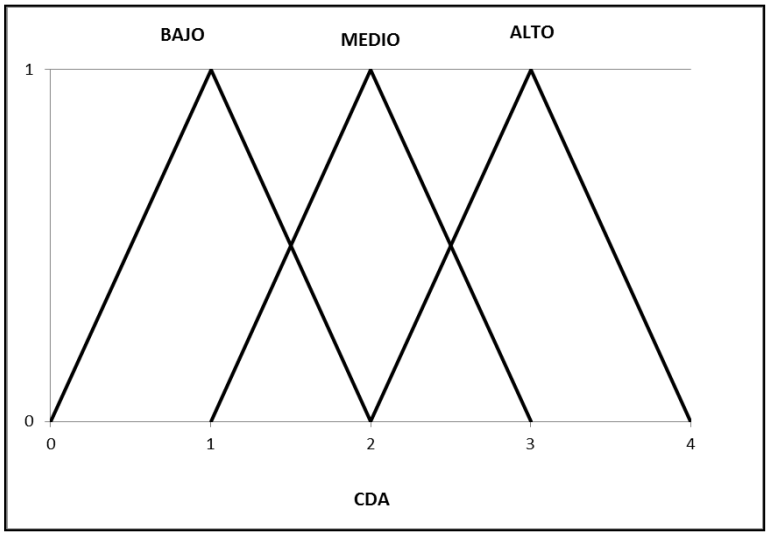


Figura 4-7- Función de pertenencia indicador conflictos distribución de agua - CDA

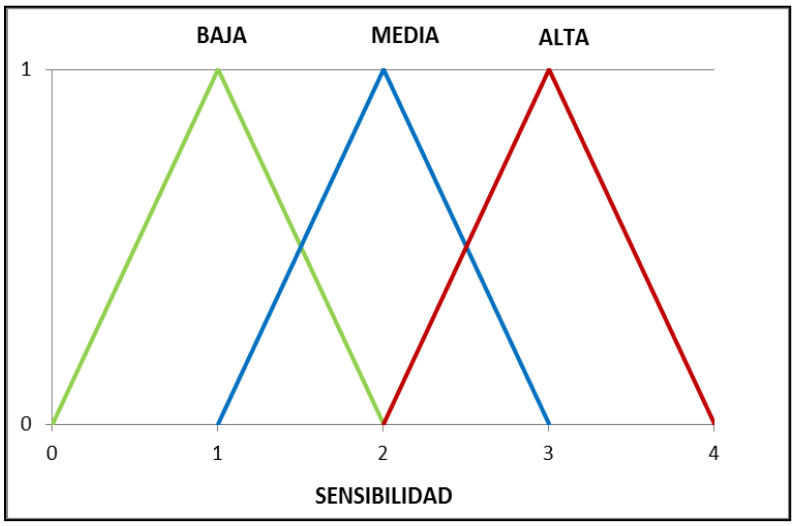


Figura 4-8. Función de pertenencia subíndice de sensibilidad -S

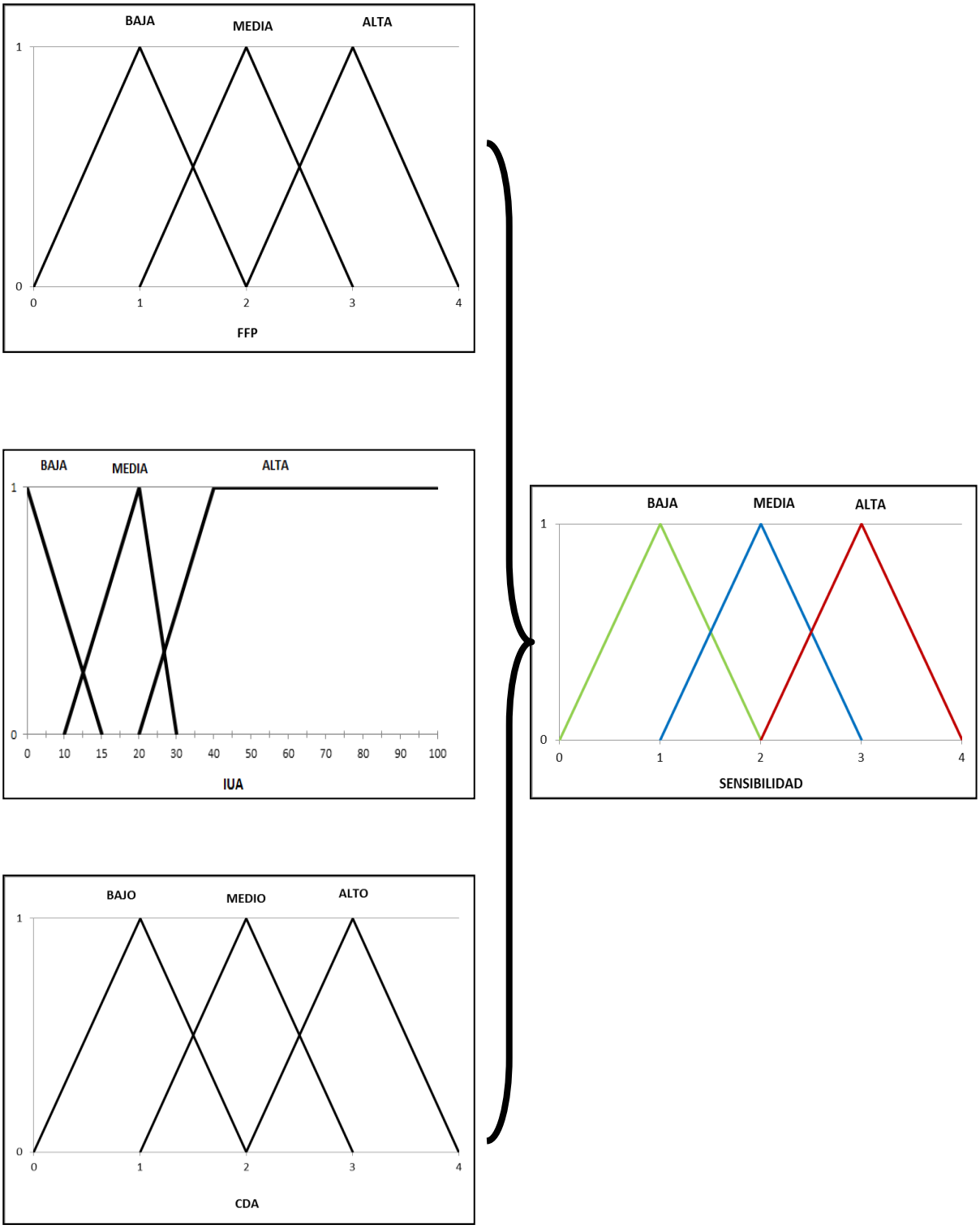


Figura 4-9. Resumen funciones de pertenencia indicadores de sensibilidad

- **Funciones de pertenencia indicadores de capacidad de adaptación**

Para los indicadores de gestión de demanda – GD y medidas de atención de emergencias - MAE se definen funciones de pertenencia de tipo triangular que muestran una calificación de “Baja”, “Regular”, “Media” y “Alta”; de otra parte los indicadores sistema de alerta temprana –SAT y asociaciones de usuarios del recurso hídrico – AURH, tienen definidas funciones singleton con calificación de No existe = 0 y Existe = 1.

Finalmente para el subíndice de capacidad de adaptación se define una función de pertenencia triangular con calificaciones de baja, media y alta.

En las Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12 y Figura 4-13 se presentan las funciones de pertenencia definidas para los indicadores de Capacidad de adaptación: Gestión de Demanda - GD, Medidas de atención de emergencias – MAE, Sistema de alerta temprana – SAT, y asociación de usuarios del recurso hídrico – AURH. En la Figura 4-14 se muestra la función de pertenencia para el subíndice de capacidad de adaptación - CA.

Finalmente en la Figura 4-15 se muestra el resumen de las funciones de pertenencia definidas para los indicadores de capacidad de adaptación.

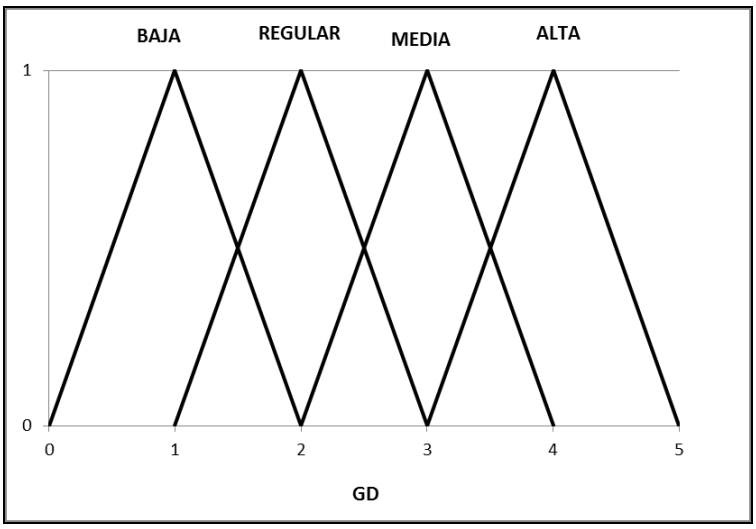


Figura 4-10. Función de pertenencia indicador gestión de demanda – GD

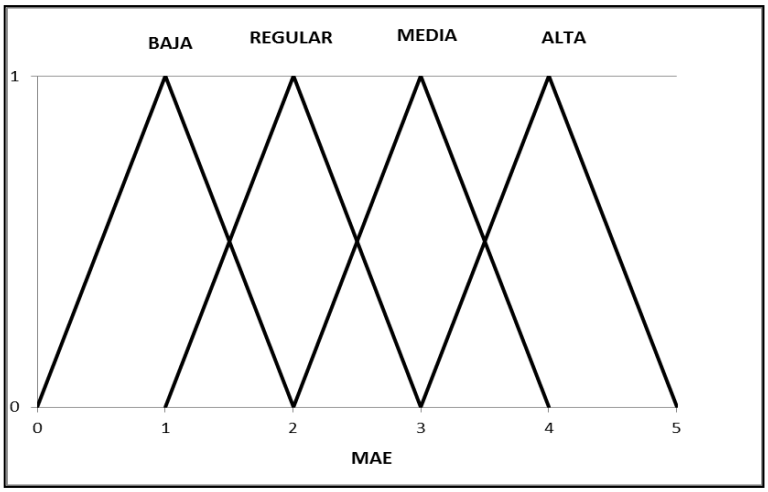


Figura 4-11. Función de pertenencia indicador medidas de atención de emergencias- MAE

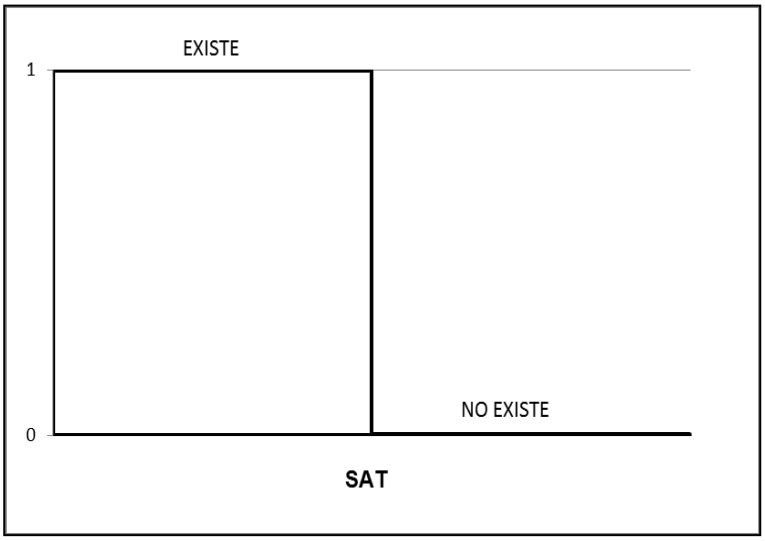


Figura 4-12. Función de pertenencia indicador sistema de alerta temprana – SAT

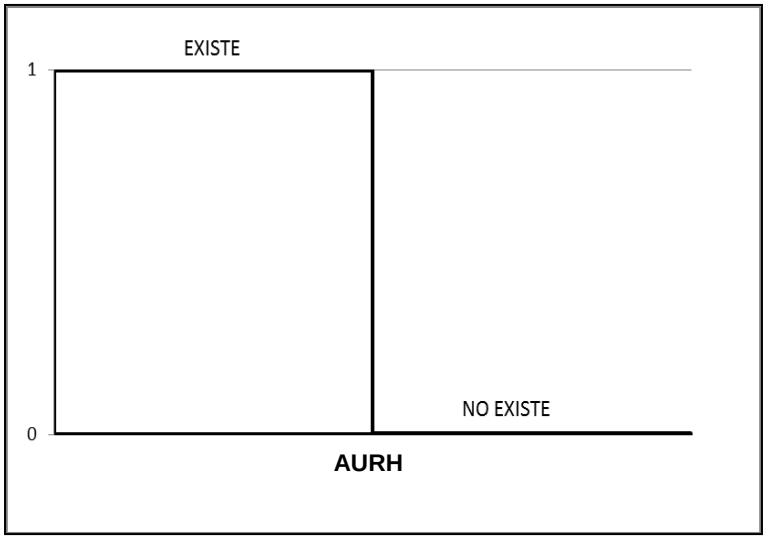


Figura 4-13. Función de pertenencia indicador asociación de usuarios del recurso hídrico - AURH

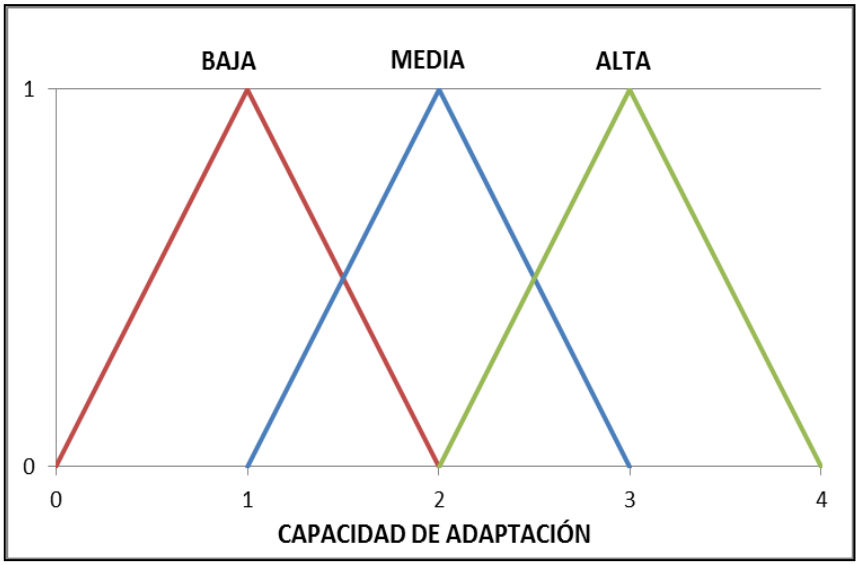


Figura 4-14. Función de pertenencia subíndice capacidad de adaptación –CA

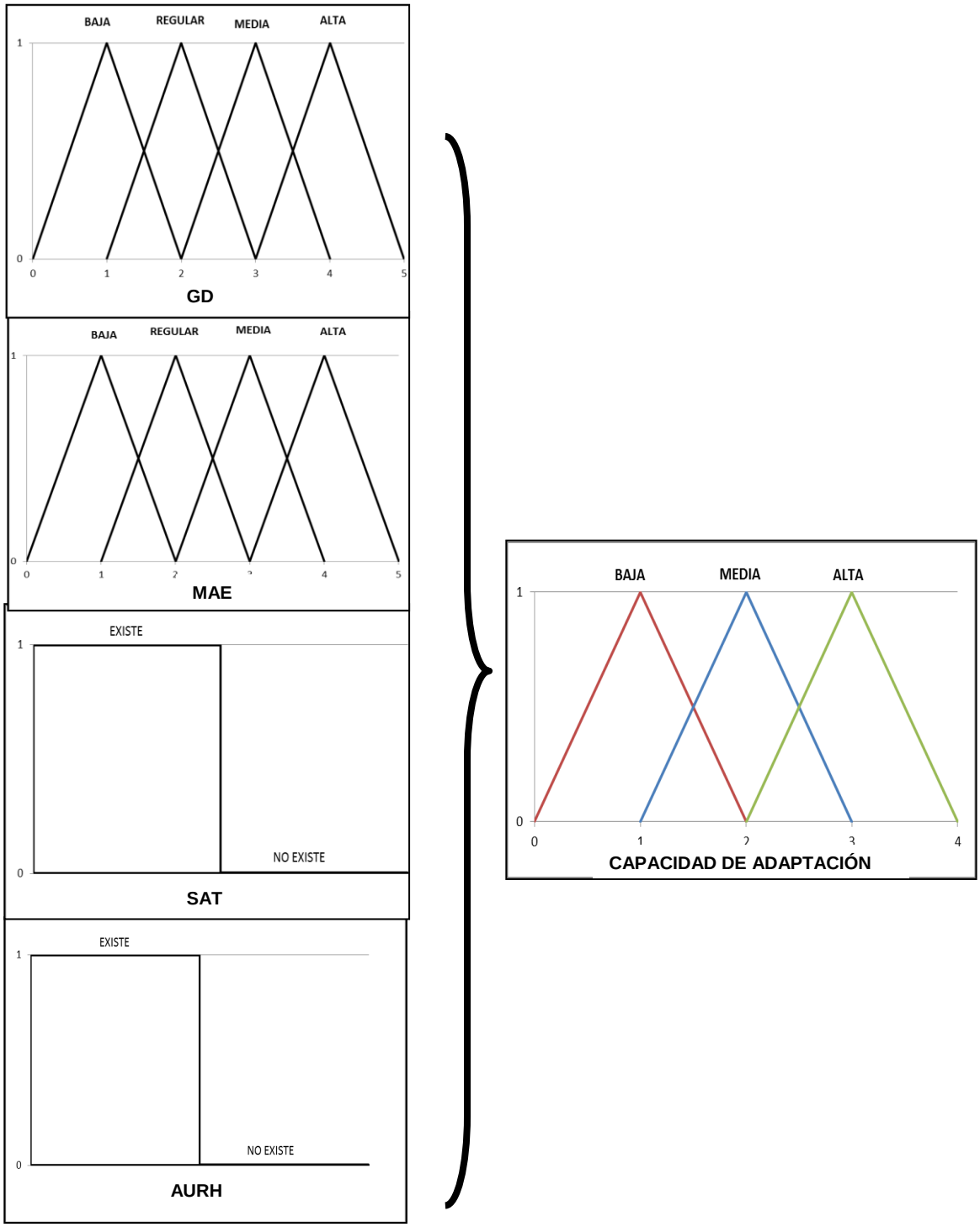


Figura 4-15. Resumen funciones de pertenencia indicadores de capacidad de adaptación

- **Función de pertenencia índice vulnerabilidad sequía de fuentes de agua superficial – IVUSAS**

  En la Figura 4-16 se presenta la función de pertenencia triangular definida para el índice IVUSAS.

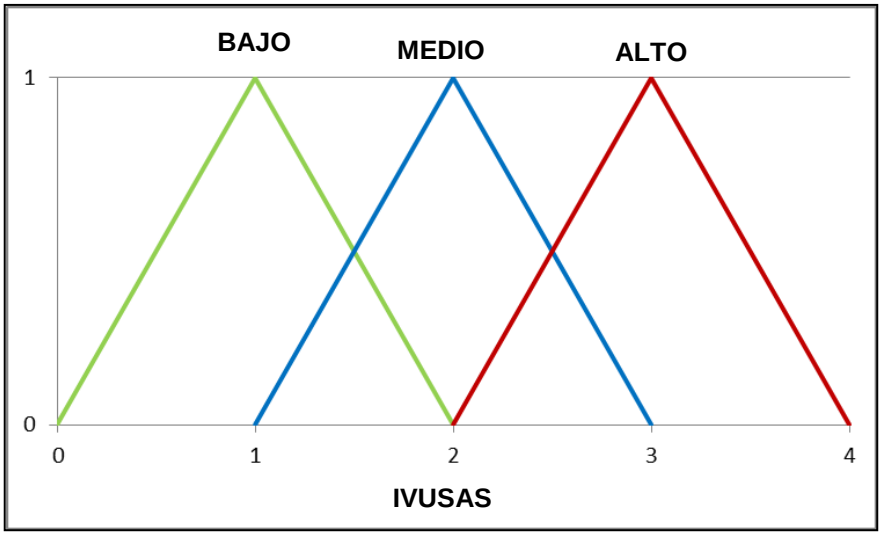


Figura 4-16. Función de pertenencia índice IVUSAS

En la Figura 4-9 se muestra el resumen de las funciones de pertenencia definidas para los subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación que conforman el índice general.

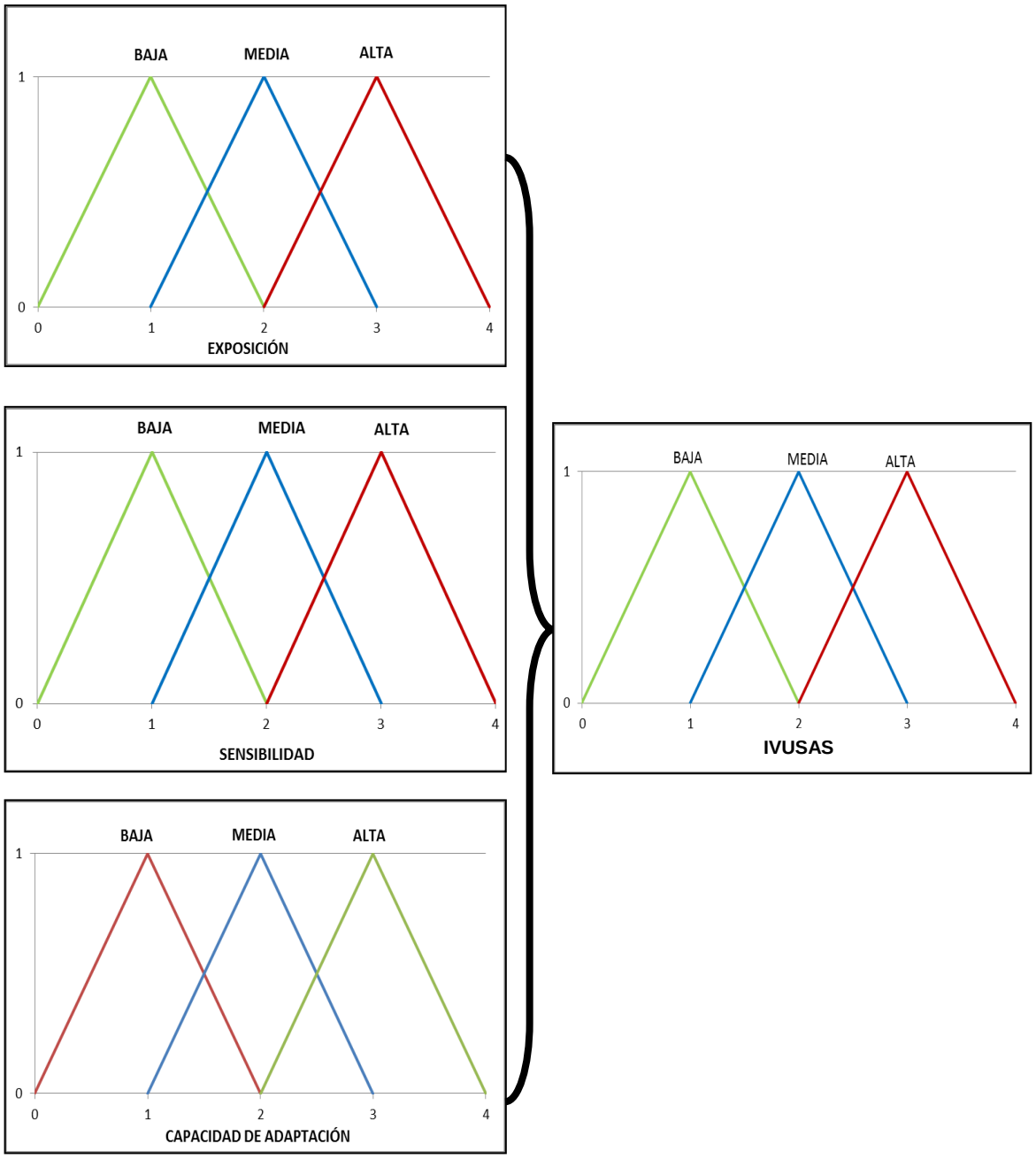


Figura 4-17. Resumen funciones de pertenencia subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación

4.2.2 Formulación de base de conocimiento y defusificación

Teniendo en cuenta los diferentes niveles de los indicadores definidos, se procede a construir las reglas de decisión de tipo *si_ entonces* para dar valor al índice IVUSAS. Las reglas combinan conjuntos difusos de entrada denominados antecedentes con un conjunto difuso llamado consecuente.

- **Reglas de decisión para el subíndice de exposición**

En primer lugar se definen las reglas de decisión para el subíndice de exposición, donde la parte *si* corresponde a los indicadores anomalía de precipitación – AP y densidad poblacional -DP, y el *entonces* concluye con respecto a la exposición - E, en total se definen 9 reglas las cuales se presenta en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Reglas de decisión para el subíndice de exposición

No. Regla	AP	DP	E	REGLA
1	PEN	B	B	If (AP is POR ENCIMA DE LO NORMAL) and (DP is BAJA) then (EXPOSICIÓN is BAJA)
2	PEN	M	B	If (AP is POR ENCIMA DE LO NORMAL) and (DP is MEDIA) then (EXPOSICIÓN is BAJA)
3	PEN	A	M	If (AP is POR ENCIMA DE LO NORMAL) and (DP is ALTA) then (EXPOSICIÓN is MEDIA)
4	N	B	B	If (AP is NORMAL) and (DP is BAJA) then (EXPOSICIÓN is BAJA)
5	N	M	M	If (AP is NORMAL) and (DP is MEDIA) then (EXPOSICIÓN is MEDIA
6	N	A	A	If (AP is NORMAL) and (DP is ALTA) then (EXPOSICIÓN is ALTA)
7	PDN	B	M	If (AP is POR DEBAJO DE LO NORMAL) and (DP is BAJA) then (EXPOSICIÓN is MEDIA)
8	PDN	M	A	If (AP is POR DEBAJO DE LO NORMAL) and (DP is MEDIA) then (EXPOSICIÓN is ALTA)
9	PDN	A	A	If (AP is POR DEBAJO DE LO NORMAL) and (DP is ALTA) then (EXPOSICIÓN is ALTA)

PEN: Por encima de lo normal
N: Normal
PDN: Por debajo de lo normal

- **Reglas de decisión para el subíndice de sensibilidad**

En las reglas de decisión para el subíndice de sensibilidad, la parte *si* corresponde a los indicadores franja forestal protectora –FFP, conflictos en la distribución del agua -CDA y uso del agua -IUA, y el *entonces* concluye con respecto a la sensibilidad – S. Para este subíndice se definen 27 reglas que se presentan en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12. Reglas de decisión para el subíndice de sensibilidad

No. Regla	FFP	IUA	CDA	S	REGLA
1	B	B	B	M	If (FFP is BAJA) and (IUA is BAJA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
2	B	B	M	M	If (FFP is BAJA) and (IUA is BAJA) and (CDA is MEDIO) then

No. Regla	FFP	IUA	CDA	S	REGLA
					(SENSIBILIDAD is MEDIA)
3	B	B	A	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is BAJA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
4	B	M	B	M	If (FFP is BAJA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
5	B	M	M	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
6	B	M	A	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
7	B	A	B	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is ALTA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
8	B	A	M	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is ALTA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
9	B	A	A	A	If (FFP is BAJA) and (IUA is ALTA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
10	M	B	B	B	If (FFP is MEDIA) and (IUA is BAJA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is BAJA)
11	M	B	M	M	If (FFP is MEDIA) and (IUA is BAJA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
12	M	B	A	M	If (FFP is MEDIA) and (IUA is BAJA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
13	M	M	B	M	If (FFP is MEDIA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
14	M	M	M	M	If (FFP is MEDIA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
15	M	M	A	A	If (FFP is MEDIA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
16	M	A	B	A	If (FFP is MEDIA) and (IUA is ALTA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
17	M	A	M	A	If (FFP is MEDIA) and (IUA is ALTA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
18	M	A	A	A	If (FFP is MEDIA) and (IUA is ALTA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
19	A	B	B	B	If (FFP is ALTA) and (IUA is BAJA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is BAJA)
20	A	B	M	B	If (FFP is ALTA) and (IUA is BAJA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is BAJA)
21	A	B	A	M	If (FFP is ALTA) and (IUA is BAJA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
22	A	M	B	M	If (FFP is ALTA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
23	A	M	M	M	If (FFP is ALTA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is MEDIA)
24	A	M	A	A	If (FFP is ALTA) and (IUA is MEDIA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
25	A	A	B	A	If (FFP is ALTA) and (IUA is ALTA) and (CDA is BAJO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
26	A	A	M	A	If (FFP is ALTA) and (IUA is ALTA) and (CDA is MEDIO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)
27	A	A	A	A	If (FFP is ALTA) and (IUA is ALTA) and (CDA is ALTO) then (SENSIBILIDAD is ALTA)

- **Reglas de decisión para el subíndice de capacidad de adaptación**

En las reglas de decisión para el subíndice de capacidad de adaptación, la parte *si* corresponde a los indicadores gestión de la demanda –GD, medias de atención de emergencias – MAE, sistema de alerta temprana - SAT y asociación de usuarios del recurso hídrico – AURH, y el *entonces,* concluye con respecto a la capacidad de adaptación – CA. Para este subíndice se definen 64 reglas, las cuales se presenta en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13. Reglas de decisión para el subíndice de capacidad de adaptación

No. Regla	GD	MAE	SAT	AURH	CA	REGLA
1	B	B	EXISTE	EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
2	B	B	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
3	B	B	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
4	B	B	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
5	B	R	EXISTE	EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
6	B	R	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
7	B	R	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
8	B	R	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
9	B	M	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is BAJA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
10	B	M	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
11	B	M	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
12	B	M	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
13	B	A	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is BAJA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
14	B	A	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is BAJA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
15	B	A	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is BAJA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)

No. Regla	GD	MAE	SAT	AURH	CA	REGLA
16	B	A	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is BAJA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
17	R	B	EXISTE	EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
18	R	B	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
19	R	B	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
20	R	B	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
21	R	R	EXISTE	EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
22	R	R	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
23	R	R	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
24	R	R	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
25	R	M	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is REGULAR) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
26	R	M	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is REGULAR) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
27	R	M	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is REGULAR) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
28	R	M	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
29	R	A	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is REGULAR) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
30	R	A	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is REGULAR) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
31	R	A	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is REGULAR) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
32	R	A	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is REGULAR) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
33	M	B	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
34	M	B	EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is MEDIA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then

No. Regla	GD	MAE	SAT	AURH	CA	REGLA
						(CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
35	M	B	NO EXISTE	EXISTE	B	If (GD is MEDIA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
36	M	B	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is MEDIA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
37	M	R	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
38	M	R	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
39	M	R	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
40	M	R	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is MEDIA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
41	M	M	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is MEDIA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
42	M	M	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
43	M	M	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
44	M	M	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is MEDIA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
45	M	A	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is MEDIA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
46	M	A	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
47	M	A	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
48	M	A	NO EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is MEDIA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
49	A	B	EXISTE	EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
50	A	B	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is BAJA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
51	A	B	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
52	A	B	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is ALTA) and (MAE is BAJA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
53	A	R	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is ALTA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)

No. Regla	GD	MAE	SAT	AURH	CA	REGLA
54	A	R	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
55	A	R	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
56	A	R	NO EXISTE	NO EXISTE	B	If (GD is ALTA) and (MAE is REGULAR) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is BAJA)
57	A	M	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is ALTA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
58	A	M	EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
59	A	M	NO EXISTE	EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
60	A	M	NO EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is MEDIA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)
61	A	A	EXISTE	EXISTE	A	If (GD is ALTA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
62	A	A	EXISTE	NO EXISTE	A	If (GD is ALTA) and (MAE is ALTA) and (SAT is EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
63	A	A	NO EXISTE	EXISTE	A	If (GD is ALTA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is ALTA)
64	A	A	NO EXISTE	NO EXISTE	M	If (GD is ALTA) and (MAE is ALTA) and (SAT is NO_EXISTE) and (AURH is NO_EXISTE) then (CAPACIDAD_DE_ADAPTACIÓN is MEDIA)

- **Reglas de decisión para el índice IVUSAS**

En las reglas de decisión para obtener el valor del índice IVUSAS, la parte *si* corresponde a los subíndices de exposición – E, sensibilidad – S y capacidad de adaptación – CA, y el *entonces,* concluye con respecto al valor del índice IVUSAS, como se presenta en la Tabla 4-14.

Incluyendo las reglas paras los subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, así como las reglas requeridas para generar el valor del índice IVUSAS, éste último cuanta con un total de 127 reglas las cuales se aplican para cada una de las zonas de la subcuenca andina (zona baja, media y alta).

Tabla 4-14. Reglas de decisión para el índice IVUSAS

No. Regla	E	S	CA	IVUSAS	REGLA
1	B	B	B	M	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is MEDIO)
2	B	B	M	M	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
3	B	B	A	B	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is BAJO)
4	B	M	B	M	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is MEDIO)
5	B	M	M	M	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
6	B	M	A	B	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is BAJO)
7	B	A	B	A	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
8	B	A	M	M	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
9	B	A	A	B	If (EXPOSICIÓN is BAJA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is BAJO)
10	M	B	B	M	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is MEDIO)
11	M	B	M	M	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and

No. Regla	E	S	CA	IVUSAS	REGLA
					(CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
12	M	B	A	B	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is BAJO)
13	M	M	B	A	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
14	M	M	M	M	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
15	M	M	A	B	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is BAJO)
16	M	A	B	A	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
17	M	A	M	M	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
18	M	A	A	M	If (EXPOSICIÓN is MEDIA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is MEDIO)
19	A	B	B	A	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
20	A	B	M	M	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
21	A	B	A	B	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is BAJA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then

No. Regla	E	S	CA	IVUSAS	REGLA
					(IVUSAS is BAJO)
22	A	M	B	A	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
23	A	M	M	M	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is MEDIO)
24	A	M	A	M	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is MEDIA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is MEDIO)
25	A	A	B	A	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is BAJA) then (IVUSAS is ALTO)
26	A	A	M	A	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is MEDIA) then (IVUSAS is ALTO)
27	A	A	A	M	If (EXPOSICIÓN is ALTA) and (SENSIBILIDAD is ALTA) and (CAPACIDAD_ADAPTACIÓN is ALTA) then (IVUSAS is MEDIO)

4.2.3 Acciones de intervención corto, mediano y largo plazo

En la Tabla 4-15, se presentan las acciones de intervención a corto, mediano y largo plazo recomendadas según el resultado obtenido para el índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial- IVUSAS, dichas acciones aplican para cualquiera de las zonas (alta, media y baja) de la subcuenca que se esté analizando.

Tabla 4-15. Acciones de intervención en las diferentes zonas de la subcuenca a corto, mediano y largo plazo

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
ALTO	Conformar y/o fortalecer asociación(e)s de usuarios del recurso hídrico de tal manera que se reduzcan los conflictos en la distribución y se fomente el uso sostenible del recurso	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora
	Realizar diagnóstico de las áreas pertenecientes a franja forestal protectora de fuentes de agua superficial, que requieren ser recuperadas y donde se debe establecer cobertura vegetal protectora.	Implementar acciones coordinadas por parte de los entes involucrados, dirigidas a recuperar la cobertura vegetal protectora de la franja forestal protectora de las fuentes de agua superficial	Mantener la cobertura vegetal protectora establecida, realizar seguimiento y control
	*Implementar y/o fortalecer sistema (s) de alerta temprana de la sequía hidrológica con entrega de información oportuna a los diferentes sectores de usuarios. *Fortalecer las capacidades de los usuarios para el uso de lo(s) sistemas de alerta temprana implementados, el acceso oportuno a la información y la interpretación de la información suministrada. * Establecer y/o fortalecer acuerdos entre los diferentes	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado * Realizar la preparación de un plan de respuestas especificando qué acciones debe tomar los diferentes actores involucrados, antes, durante y después de la emergencia * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado *Ejecutar simulacros para determinar el grado de preparación de los sistemas de alerta y los mecanismos de respuesta * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	actores para la definición de protocolos operativos de alerta temprana: quién emite el aviso y utilizando qué vía de difusión		
	Formular e implementar medidas de atención de emergencias asociadas a sequía hidrológica de agua superficial, tales como almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego, otros.	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas.
	Implementar acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial tales como gestión de pérdidas, reasignación de agua, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras.	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial
	Conformar y/o fortalecer asociación(e)s de usuarios del recurso hídrico de tal manera que se reduzcan los conflictos en la distribución y se fomente el uso sostenible del recurso	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
MEDIA	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, realizar diagnóstico del área que requiere ser recuperada y donde se debe establecer cobertura vegetal protectora. Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta se requiere implementar acciones de conservación	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, implementar acciones coordinadas por parte de los entes involucrados, dirigidas a recuperar la cobertura vegetal protectora de la franja forestal protectora de las fuentes de agua superficial Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta, mantener la cobertura vegetal protectora existente realizar seguimiento y control	Mantener la cobertura vegetal protectora existente y/o establecida, realizar seguimiento y control
	*Implementar y/o fortalecer sistema (s) de alerta temprana de la sequía hidrológica con entrega de información oportuna a los diferentes sectores de usuarios. *Fortalecer las capacidades de los usuarios para el uso de lo(s) sistemas de alerta temprana implementados, el acceso oportuno a la información y la interpretación de la información suministrada. * Establecer y/o fortalecer acuerdos entre los diferentes actores para la definición de protocolos operativos de alerta temprana: quién emite el aviso y utilizando qué	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado * Realizar la preparación de un plan de respuestas especificando qué acciones debe tomar los diferentes actores involucrados, antes, durante y después de la emergencia * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado *Ejecutar simulacros para determinar el grado de preparación de los sistemas de alerta y los mecanismos de respuesta * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	vía de difusión		
	Formular e implementar medidas de atención de emergencias asociadas a sequía hidrológica de agua superficial, tales como almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego, otros.	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas.
	Implementar acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial tales como gestión de pérdidas, reasignación de agua, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras.	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial
BAJA	Conformar y/o fortalecer asociación(e)s de usuarios del recurso hídrico de tal manera que se reduzcan los conflictos en la distribución y se fomente el uso sostenible del recurso	Mantener la asociación de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora	Mantener la asociación de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, realizar diagnóstico del área que requiere ser recuperada y donde se debe establecer cobertura vegetal protectora. Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta se requiere implementar acciones de conservación	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, implementar acciones coordinadas por parte de los entes involucrados, dirigidas a recuperar la cobertura vegetal protectora de la franja forestal protectora de las fuentes de agua superficial Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta, mantener la cobertura vegetal protectora existente realizar seguimiento y control	Mantener la cobertura vegetal protectora existente y/o establecida, realizar seguimiento y control
	*Implementar y/o fortalecer sistema (s) de alerta temprana de la sequía hidrológica con entrega de información oportuna a los diferentes sectores de usuarios. *Fortalecer las capacidades de los usuarios para el uso de lo(s) sistemas de alerta temprana implementados, el acceso oportuno a la información y la interpretación de la información suministrada. * Establecer y/o fortalecer acuerdos entre los diferentes actores para la definición de protocolos operativos de alerta temprana: quién emite el aviso y utilizando qué	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado * Realizar la preparación de un plan de respuestas especificando qué acciones debe tomar los diferentes actores involucrados, antes, durante y después de la emergencia * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado *Ejecutar simulacros para determinar el grado de preparación de los sistemas de alerta y los mecanismos de respuesta * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados

VALOR DEL ÍNDICE IVUSAS	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	vía de difusión		
	Dar continuidad y fortalecer las medidas de atención de emergencias asociadas a sequía hidrológica de agua superficial, tales como almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego, otros.	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas.
	Dar continuidad y fortalecer las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial

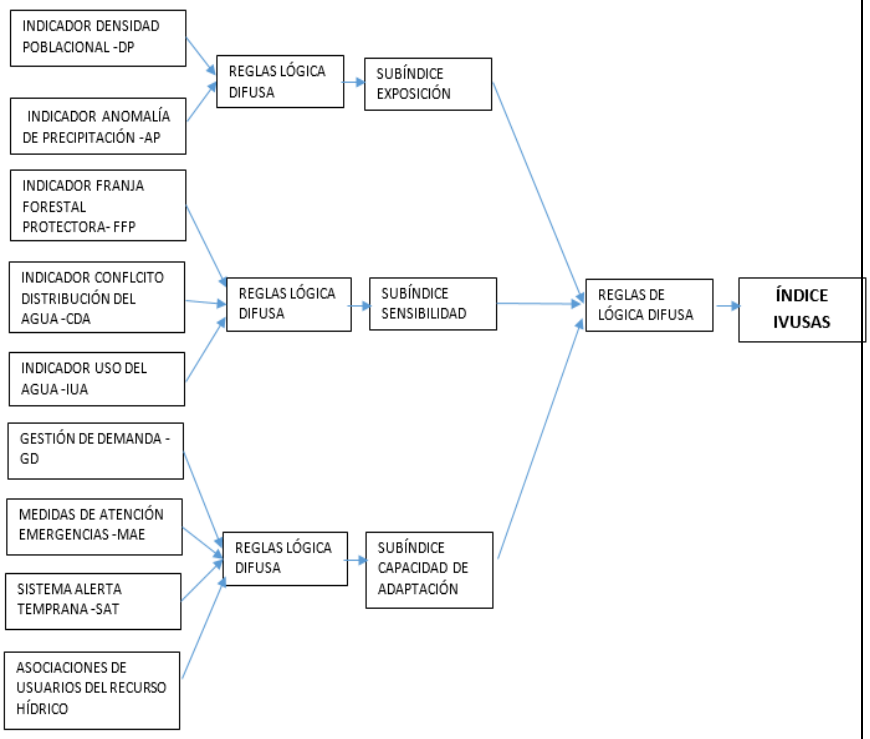
4.2.4 Ficha técnica índice IVUSAS

A continuación en la Tabla 4-16, se presenta la ficha técnica para el índice IVUSAS, herramienta que favorecerá su compresión y aplicación, la información incluida es la siguiente: nombre del indicador, descripción, zona de aplicación, cálculo, categorías de respuesta, posibles fuentes de información.

Tabla 4-16. Ficha técnica Índice IVUSAS

FICHA TÉCNICA ÍNDICE IVUSAS	
Nombre del índice	Índice de vulnerabilidad a sequía de fuentes de agua superficial - IVUSAS
Descripción	El índice permite medir el nivel de vulnerabilidad de una subcuenca andina a sequías hidrológicas de fuentes de agua superficial El índice puede ser aplicado en la zona alta, media y baja de la subcuenca o en la subcuenca en general.
Zona de aplicación	Subcuenca Región Andina
Cálculo /estimación	El valor del índice es obtenido a partir de la operación de un modelo de lógica difusa cuyas variables de entrada son indicadores agrupados en tres (3) subíndices los que a su vez alimentan el índice IVUSAS, tal como se muestra en el siguiente esquema.

FICHA TÉCNICA ÍNDICE IVUSAS



Categoría de respuesta

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
BAJO	La subcuenca o zona de la subcuenca tiene una vulnerabilidad baja a sequía de fuentes de agua superficial
MEDIO	La subcuenca o zona de la subcuenca tiene una vulnerabilidad media a sequía de fuentes de agua superficial
ALTO	La subcuenca o zona de la subcuenca tiene una vulnerabilidad alta a sequía de fuentes de agua superficial

Posibles fuentes de información

- ✓ Entrevistas
- ✓ Visitas a institucionales
- ✓ Autoridad ambiental
- ✓ Plan de ordenamiento y manejo de cuenca hidrográfica
- ✓ Recorridos de campo
- ✓ Fichas técnicas indicadores

4.3 Aplicación del índice formulado en la subcuenca zona baja del río Tuluá, Valle del Cauca, Colombia

4.3.1 Exposición

- **Densidad poblacional**

En la Tabla 4-17, se presenta la densidad poblacional del año 2016, calculada para cada una de las zonas (alta, media y baja) de la subcuenca zona baja del río Tuluá, cabe anotar que en la zona alta se ubican los corregimiento de Campoalegre, Aguaclara y el centro urbano; la zona media la constituyen los corregimientos de Los Caimos, Nariño y Tres esquinas; y en la zona baja se encuentran Bocas de Tuluá y La Palmera.

Tabla 4-17. Densidad poblacional año 2016, zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA DE LA SUBCUENCA ZONA BAJA DEL RÍO TULUÁ		ÁREA (Km^2) *	POBLACIÓN 2016*	DENSIDAD POBLACIONAL
ZONA ALTA	Campoalegre	21,97	2156	4593,3
	Aguaclara	10,99	14960	
	Centro Urbano	11,02	184899 **	
	TOTAL ZONA ALTA	43,98	202015	
ZONA MEDIA	Los Caimos	2,89	408	40,6
	Nariño	69,72	820	
	Tres esquinas	8,52	2068	
	TOTAL ZONA MEDIA	81,13	3296	
ZONA BAJA	Bocas de Tuluá	7,29	916	123,3
	La Palmera	8,19	992	
	TOTAL ZONA BAJA	15,48	1908	

Fuente. * (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, comunicación personal, 2016).
** (DANE, 2005).

- **Anomalía de precipitación**

El indicador de anomalía de precipitación (AP), se calcula a partir de datos de precipitación del año 2015, de la estación meteorológica Aeropuerto Farfán (coordenadas geográficas 04° 05’ 25’’ de latitud norte y 76° 13’ 23’’ de longitud oeste, elevación 955m), ubicada en la subcuenca zona baja del río Tuluá y administrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales – IDEAM. Dado que la estación aeropuerto Farfán es la única con suficientes datos para el cálculo del AP, el resultado obtenido se aplica para las tres zonas (baja, media y alta) de la subcuenca en estudio. En la Tabla 4-18 se presenta el valor del indicador para la zona, baja, media y alta de la subcuenca.

Tabla 4-18. Anomalía de precipitación - AP año 2015, zona baja, media y alta subcuenca zona baja río Tuluá

PRECIPITACIÓN TOTAL AÑO 2015 (mm)	**876,0**
PROMEDIO HISTÓRICO PRECIPITACIÓN ANUAL	**1293,3**
ANOMALÍA DE PRECIPITACIÓN-AP (%)	**67,7**

Fuente. (IDEAM, comunicación personal, 2015)

- **Determinación del subíndice de exposición – zona alta subcuenca**

Una vez calculados los indicadores DP y AP, se procede a activar el sistema difuso definido para el nivel de exposición. El valor de cada indicador, obtenido para la zona alta de la subcuenca, se ubica dentro de la función de pertenencia correspondiente, con lo anterior se activan dos (2) reglas de decisión de la base de conocimiento. En la Figura 4-18 y Figura 4-19, se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de exposición de la zona alta de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-20 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación. En la Figura 4-21 se presenta la determinación del subíndice de exposición para la zona alta de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

El proceso de defusificación se realiza a partir de la determinación del centro de gravedad de la figura, para el caso C_g= 3, entonces la exposición para la zona alta de la subcuenca zona baja río Tuluá es ALTA.

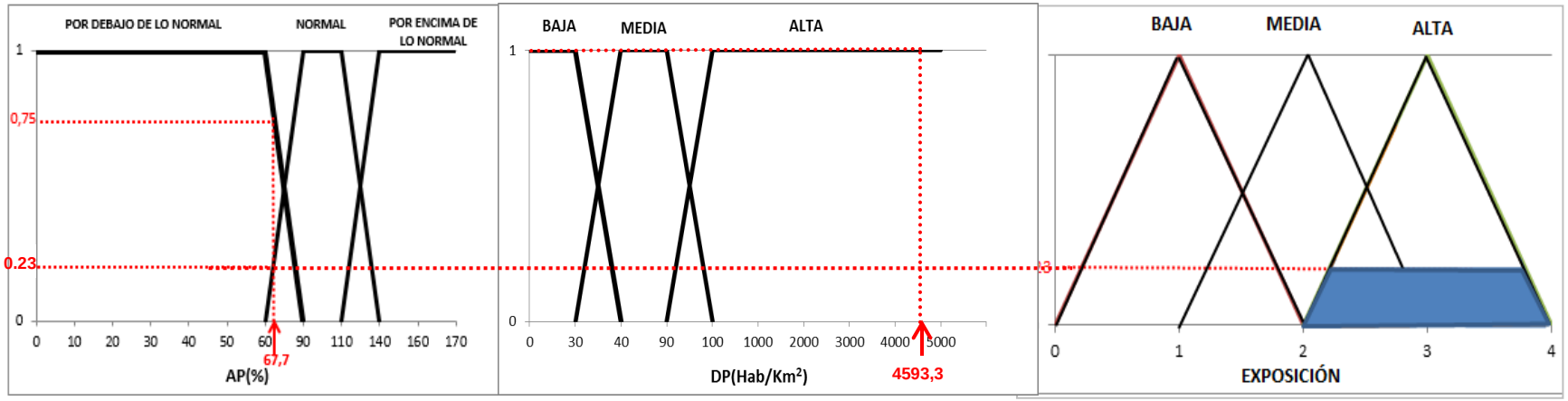


Figura 4-18. Operación modelo lógica difusa exposición- zona alta- Activación regla 1: Si AP es Normal y DP es alta entonces Exposición es alta

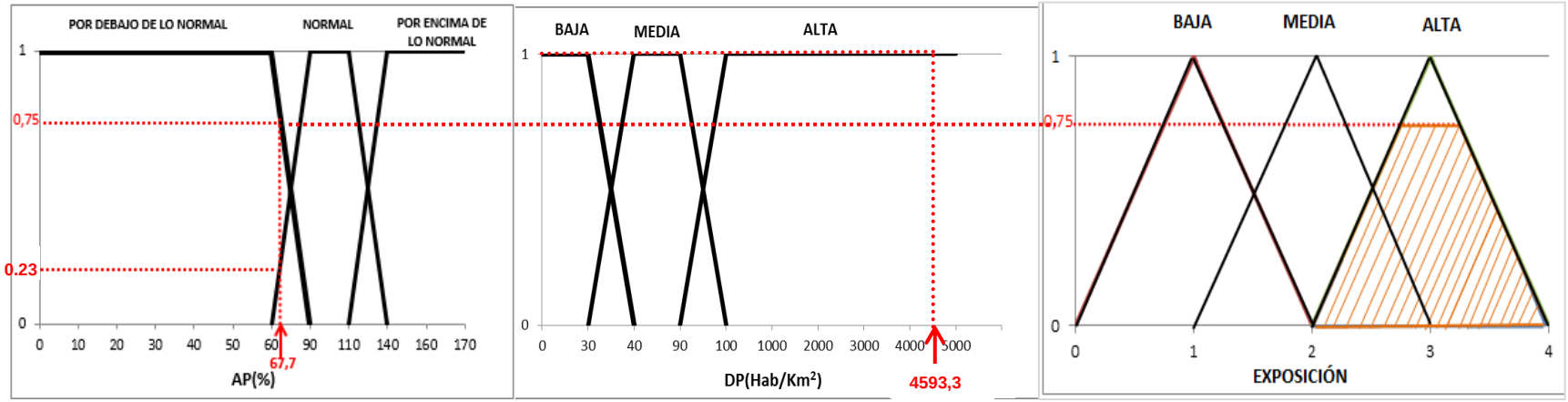


Figura 4-19. Operación modelo lógica difusa exposición- zona alta- Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es alta entonces Exposición es alta

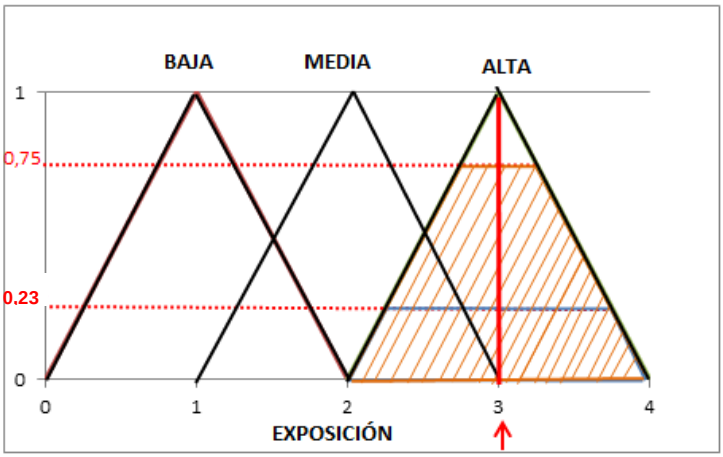


Figura 4-20. Función para defusificación nivel de exposición zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá

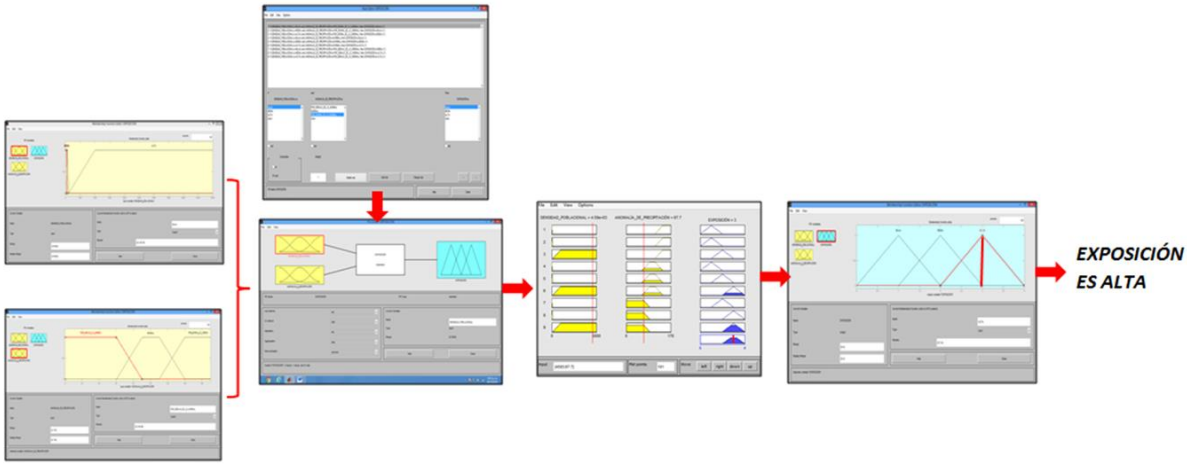


Figura 4-21 Determinación del subíndice de exposición para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

- **Determinación del subíndice de exposición – zona media subcuenca**

En la Figura 4-22 y Figura 4-23, se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de exposición de la zona media de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-24 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación.

El centro de gravedad de la figura es C_g= 2,71, entonces la exposición para la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá es MEDIA. En la Figura 4-25 se presenta la determinación del subíndice de exposición para la zona media de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

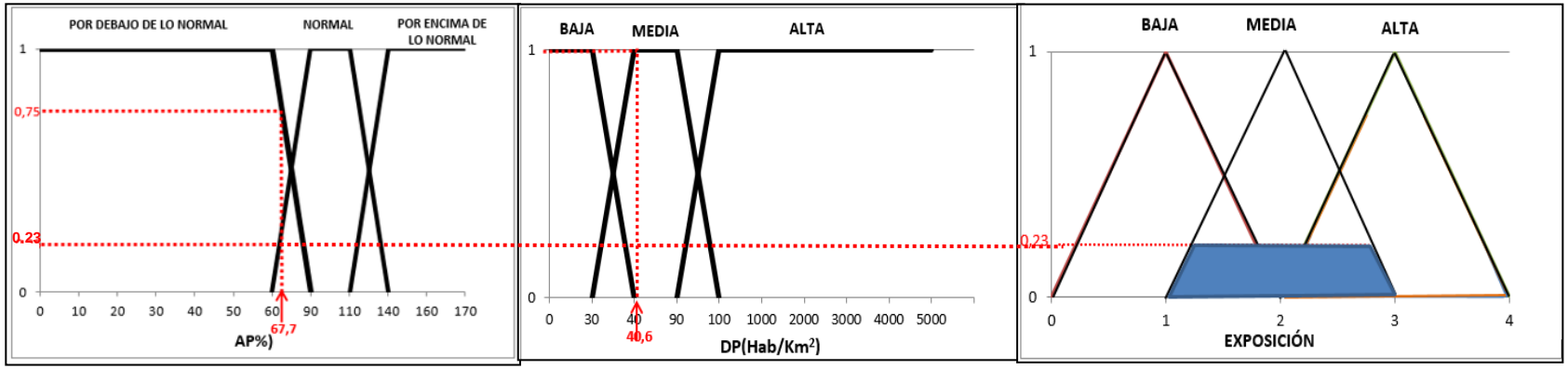


Figura 4-22. Operación modelo lógica difusa exposición- zona media- Activación regla 1: Si AP es normal y DP es media entonces Exposición es Media

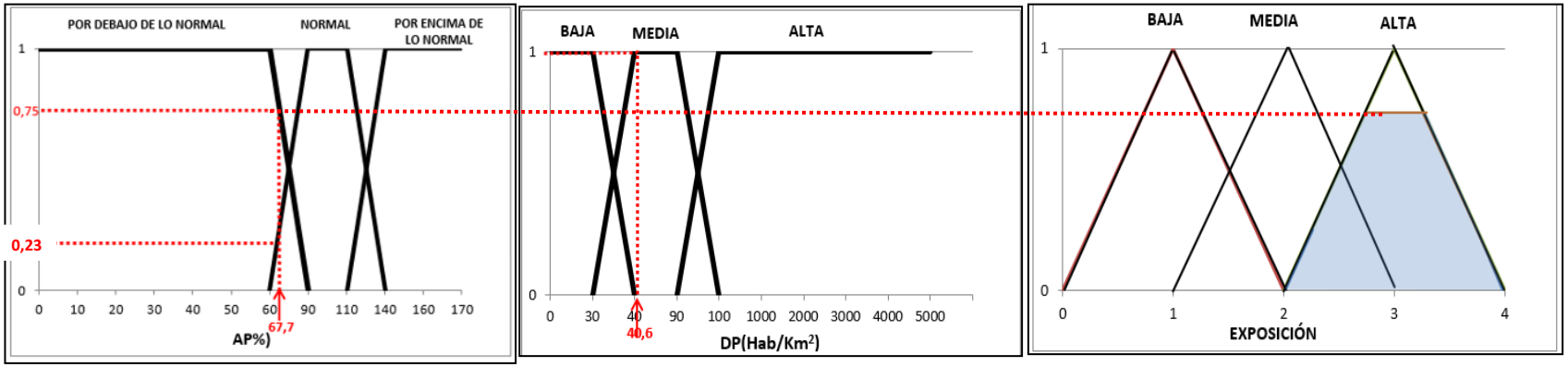


Figura 4-23. Operación modelo lógica difusa exposición- zona media- Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es media entonces Exposición es alta

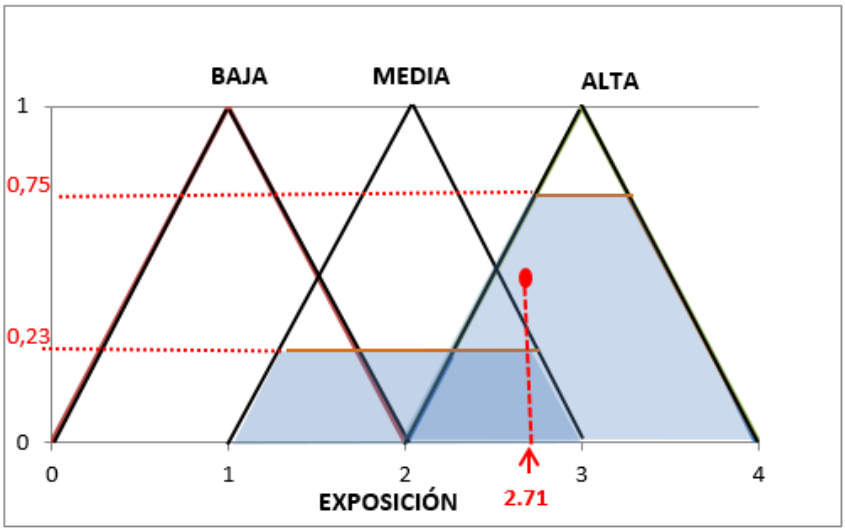


Figura 4-24. Función para defusificación nivel de exposición zona media, subcuenca zona baja río Tuluá

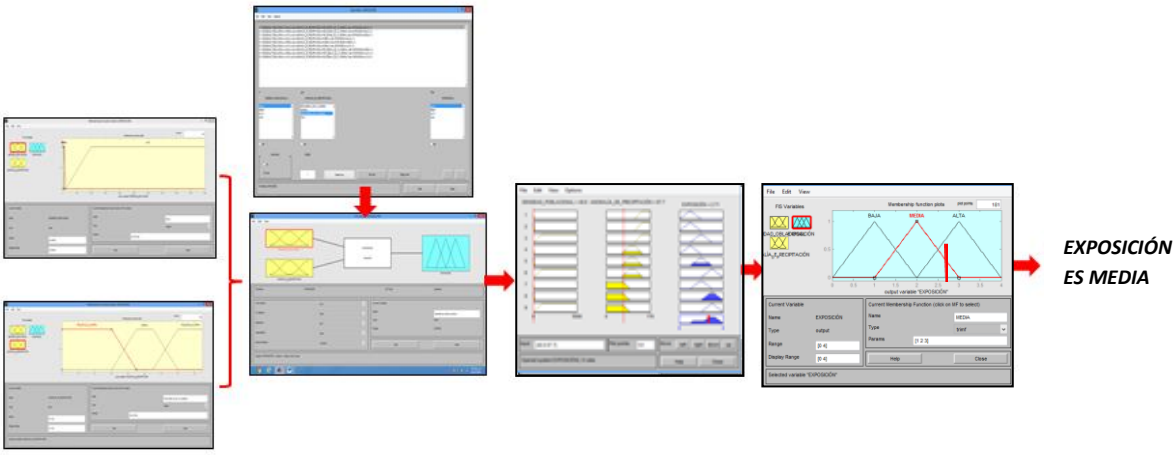


Figura 4-25. Determinación del subíndice de exposición para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

- **Determinación del subíndice de exposición – zona baja subcuenca**

En la Figura 4-26 y Figura 4-27 se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de exposición de la zona baja de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-28 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación, donde el centro de gravedad de la figura es C_g= 3, entonces la exposición para la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá es ALTA. En la Figura 4-29 se presenta la determinación del subíndice de exposición para la zona baja de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

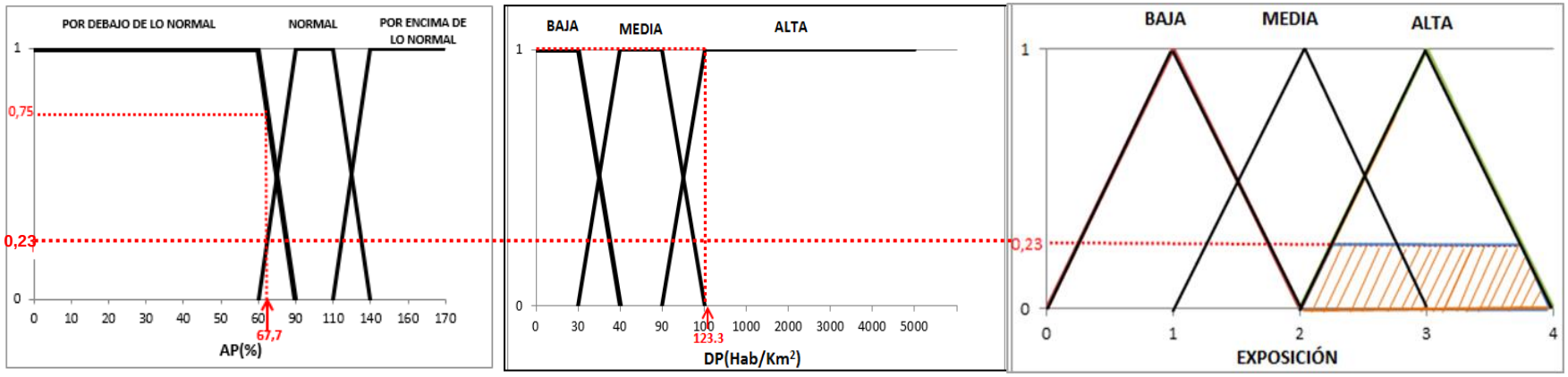


Figura 4-26. Operación modelo lógica difusa exposición- zona baja- Activación regla 1: Si AP es normal y DP es alta entonces Exposición es Alta

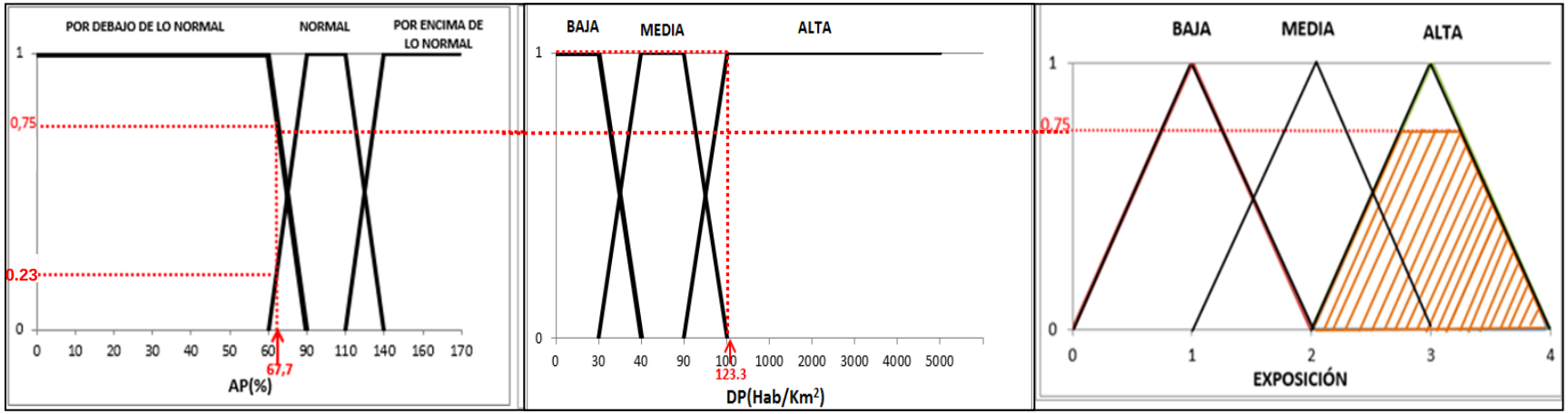


Figura 4-27. Operación modelo lógica difusa exposición- zona baja- Activación regla 2: Si AP es por debajo de lo normal y DP es alta entonces Exposición es Alta

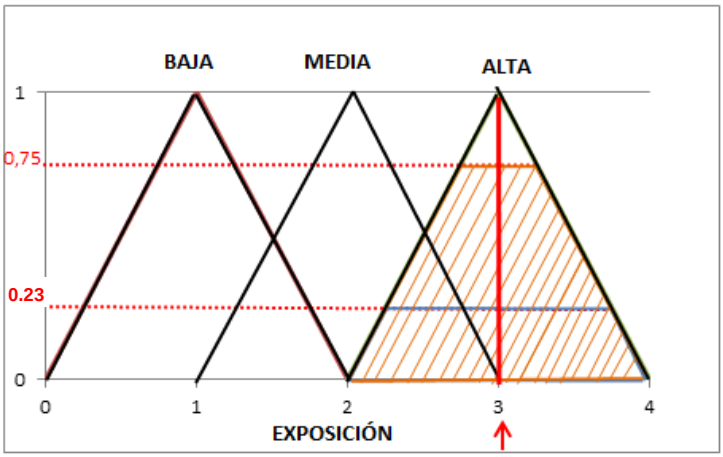


Figura 4-28. Función para defusificación nivel de exposición zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá

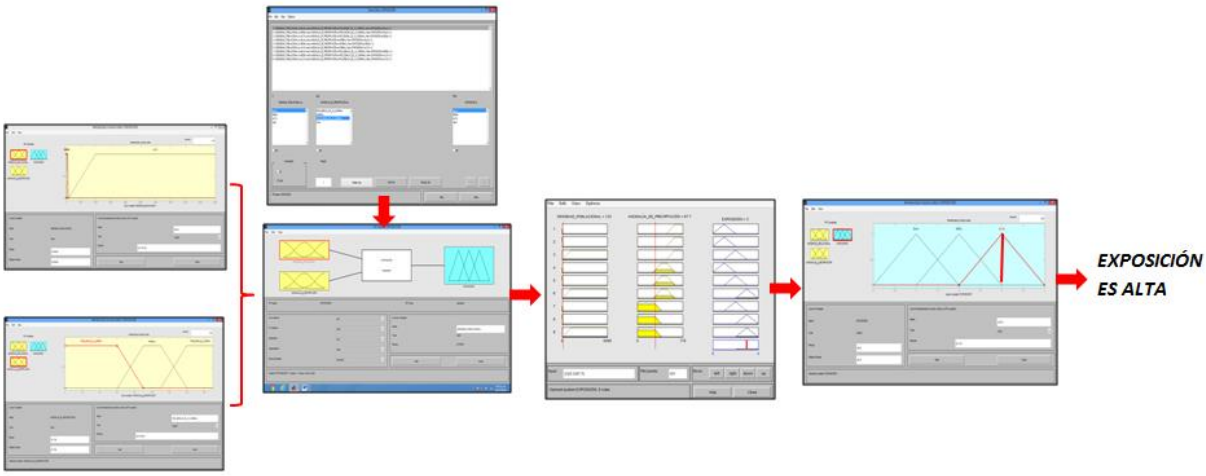


Figura 4-29. Determinación del subíndice de exposición para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

En los Anexos C, D y E se muestra respectivamente el proceso de defusificación realizado en Matlab para el subíndice de exposición para la zona alta, media y baja de la subcuenca estudiada.

En la Tabla 4-19 se presenta el resumen del nivel de exposición determinado para la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

Tabla 4-19. Nivel de exposición para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

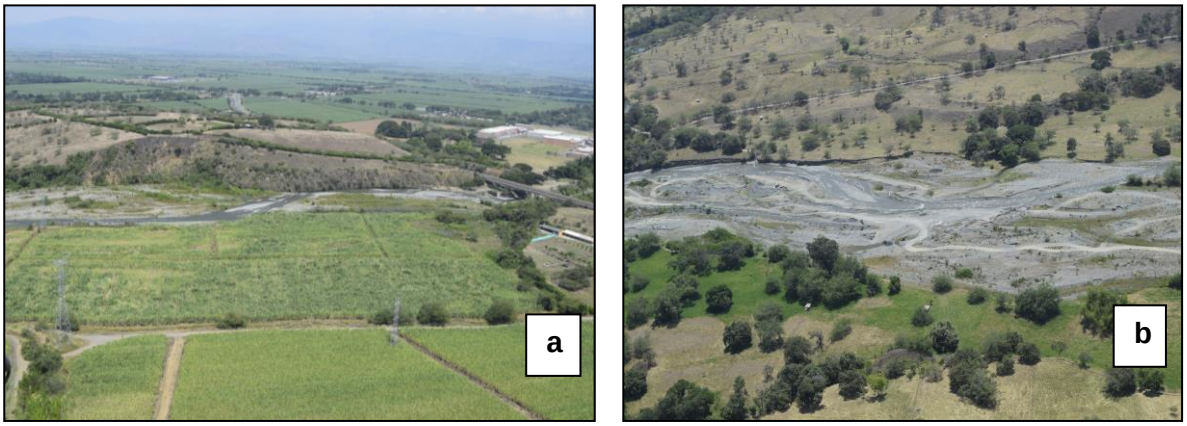
ZONA SUBCUENCA	EXPOSICIÓN
ALTA	ALTA
MEDIA	MEDIA
BAJA	ALTA

4.3.2 Sensibilidad

- **Franja forestal protectora**

Con el objetivo de determinar el nivel de presencia de cobertura vegetal en la franja protectora del río Tuluá, en la subcuenca objeto de análisis; se realizaron recorridos por tierra y aéreos que permitieron visualizar el estado actual de la subcuenca con relación a este tema.

En la Fotografía 4-1, Fotografía 4-2, Fotografía 4-3 y Fotografía 4-4, se muestra el nivel de presencia actual de cobertura vegetal en la franja protectora del río en la zona alta subcuenca zona baja río Tuluá, allí se puede observar que la franja protectora en esta zona se encuentra en gran parte ocupada por cultivos de caña de azúcar, zonas dedicadas a la ganadería, en algunas áreas se encuentra población asentada en la franja protectora y en general se evidencia presencia de árboles aislados o hay carencia de cobertura vegetal en la ribera del río, por lo anterior se concluye que la franja forestal protectora del río Tuluá en la zona alta de la subcuenca en estudio es BAJA. En la Fotografía 4-5 se presenta una panorámica de esta zona donde puede apreciarse la baja presencia de cobertura vegetal.

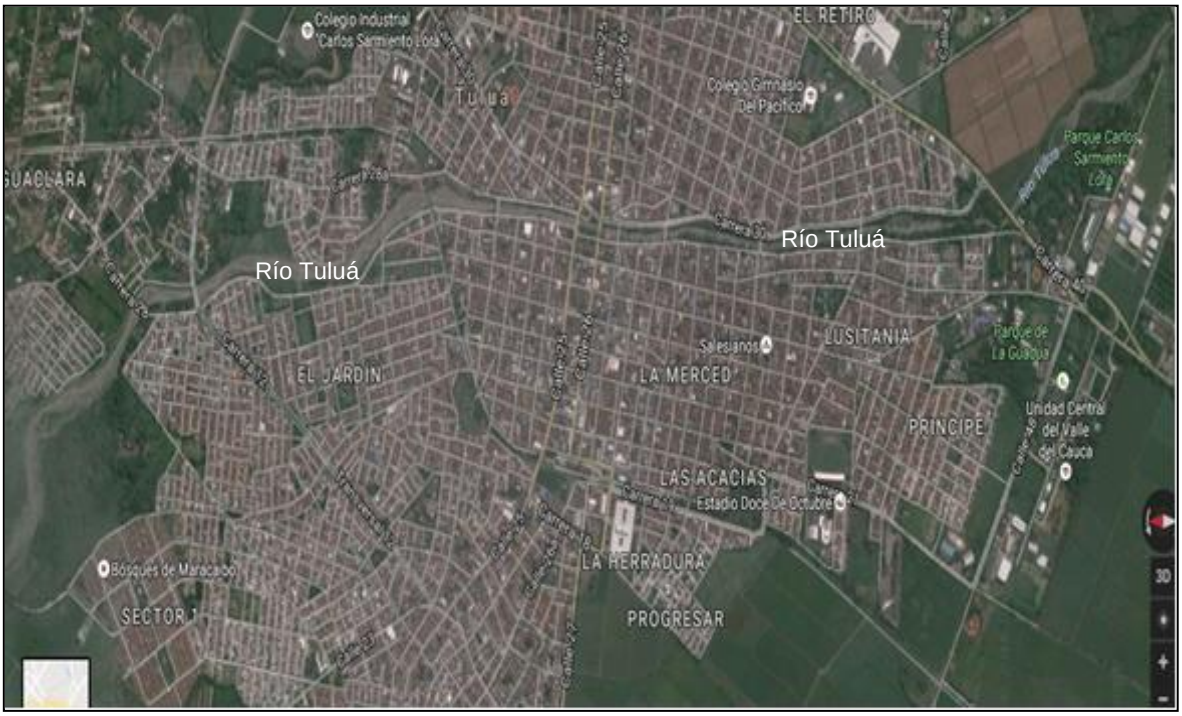


Fotografía 4-1. Río Tuluá zona alta subcuenca zona baja río Tuluá, tramo entre bocatoma el Rumor y puente doble calzada; a) Cultivo de caña en zona forestal protectora b) zona dedicada a ganadería en zona forestal protectora

Fotografía 4-2. Río Tuluá zona alta subcuenca zona baja río Tuluá, tramo entre puente doble calzada y la Cra 40 - Cultivo de caña en zona forestal protectora

Fotografía 4-3. Río Tuluá zona alta subcuenca zona baja río Tuluá, casco urbano presencia algunos árboles aislados.

Fotografía 4-4. Río Tuluá zona alta subcuenca zona baja río Tuluá - casco urbano, franja forestal protectora con asentamientos humanos



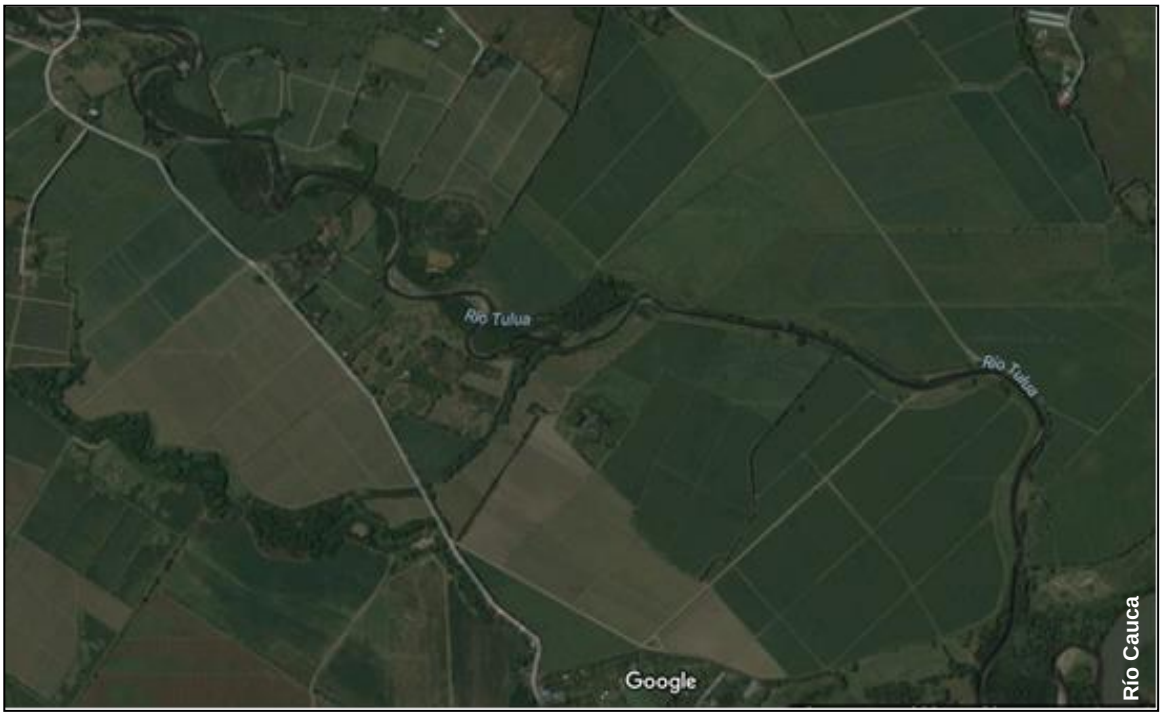
Fotografía 4-5. Panorámica río Tuluá – zona alta, franja forestal protectora (Google, DigitalGlobe, 2014)

En lo que respecta a la zona media de la subcuenca en estudio, en la Fotografía 4-6, y Fotografía 4-7 se presentan imágenes que muestran el nivel de presencia actual de cobertura vegetal en la franja protectora del río Tuluá, allí se puede observar que a pesar de que en algunas áreas se encuentra cultivo de caña ocupando la franja protectora, en términos generales se evidencia que hay cobertura vegetal en buena parte de la ribera del río, por lo anterior se concluye que la franja forestal protectora del río Tuluá en la zona media de la subcuenca en estudio es MEDIA.

Fotografía 4-6. Río Tuluá zona media subcuenca zona baja río Tuluá, Tres esquinas - franja forestal protectora

Fotografía 4-7. Panorámica río Tuluá – zona media, franja forestal protectora (Google, DigitalGlobe, 2014)

Finalmente, para la zona baja de la subcuenca en estudio, en la Fotografía 4-6, se presenta una imagen panorámica del río Tuluá en esta zona, allí se puede observar la alta presencia de actividad agrícola, principalmente cultivos de caña ocupando la franja protectora del río, por lo que la franja forestal protectora del río Tuluá en la zona baja de la subcuenca en estudio es BAJA.



Fotografía 4-8. Panorámica río Tuluá – zona baja, franja forestal protectora (Google, DigitalGlobe, 2014)

En la Tabla 4-20 se presenta el resumen de franja forestal protectora determinado para la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

Tabla 4-20. Franja forestal protectora zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá

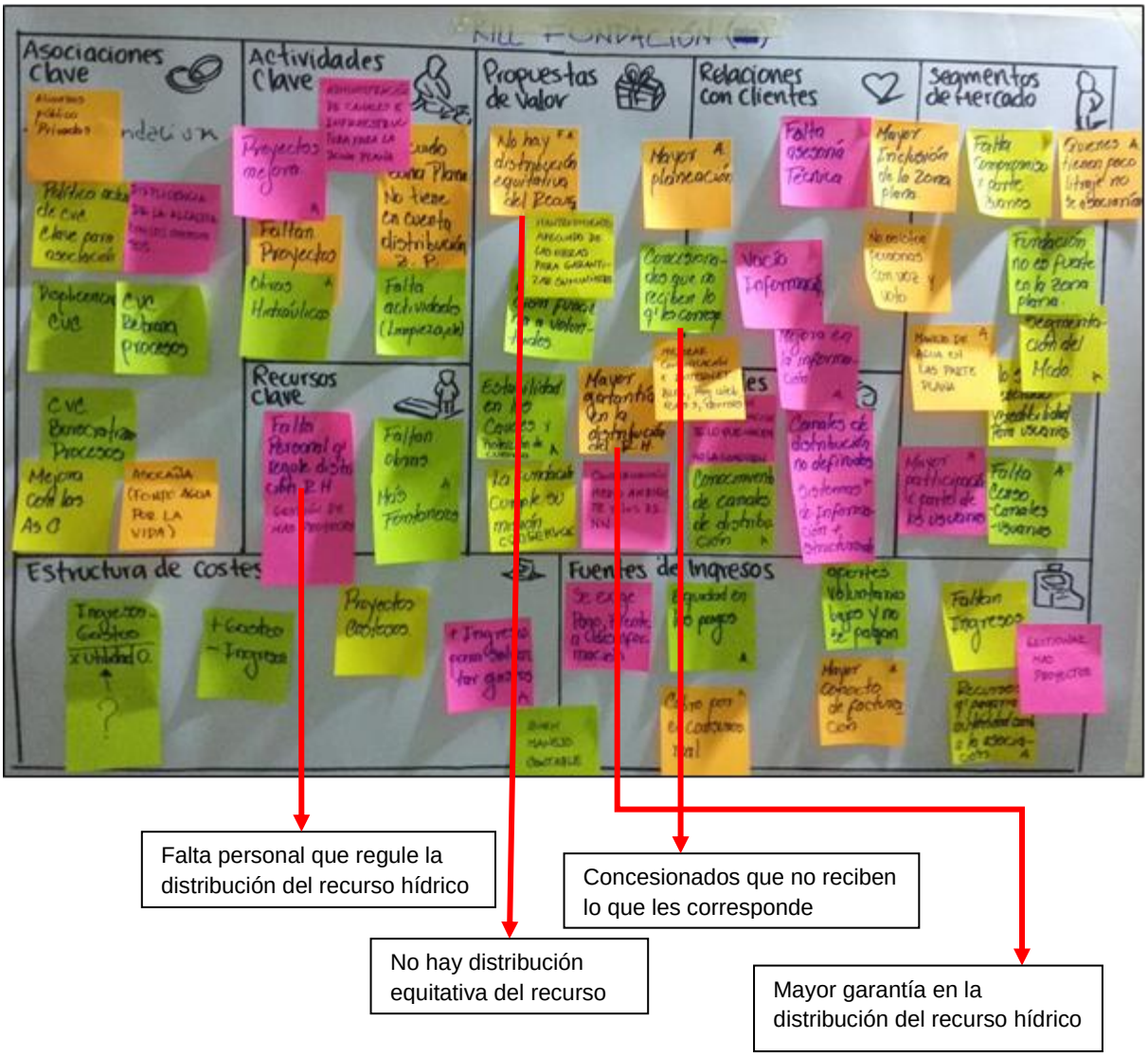
ZONA SUBCUENCA	FRANJA FORESTAL PROTECTORA
ALTA	BAJA
MEDIA	MEDIA
BAJA	BAJA

- **Conflictos en la distribución del agua**

Para la determinación del nivel de conflictos existentes con relación a la distribución del agua, se toman como referencia los resultados obtenidos en el año 2016 por la Fundación Ríos Tuluá y Morales durante el proceso de definición del lienzo de modelo de negocio y de la aplicación de la metodología del mapa de empatía, en el que participaron los usuarios de la subcuenca zona baja del río Tuluá y cuya finalidad fue visualizar las necesidades reales de los usuarios del recurso hídrico a partir de las preguntas de ¿Qué

oye?, ¿Qué piensa y siente?,¿Qué ve?, ¿Qué dice y hace?, los resultados obtenidos permitieron visualizar existencia de conflictos en la distribución del agua en la subcuenca zona baja del río Tuluá, principalmente en zona media y baja. En la Fotografía 4-9 y Fotografía 4-10 se muestran algunos de los comentarios textuales de los usuarios del recurso hídrico.

Fotografía 4-9. Comentarios de los usuarios del río Tuluá durante la aplicación de la metodología de mapa de empatía (Fundación ríos Tuluá y Morales – FURTUMO, comunicación personal, 2016)



Fotografía 4-10. Comentarios de los usuarios del río Tuluá durante la elaboración del lienzo del modelo de negocio (Fundación ríos Tuluá y Morales – FURTUMO, comunicación personal, 2016)

La información previamente expuesta coincide con lo incluido en el Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del río Tuluá en el que se expone que el conflicto en la distribución del agua en la subcuenca zona baja del río Tuluá, se da por la inexistencia de infraestructura adecuada para el uso eficiente del agua (captación, conducción, distribución, y monitoreo), deficiente administración del recurso hídrico (organización, mantenimiento y operación de la infraestructura), uso irracional del agua por parte de los usuarios y derivaciones ilegales. El conflicto existente en la distribución del agua está representado por agresiones entre los usuarios del recurso hídrico, y la situación se acentúa en épocas críticas de verano, cuando algunos usuarios empiezan a realizar

trinchos para subir el nivel del agua y tomar la cantidad de agua que desea, pero afectando a usuarios aguas abajo quienes no pueden captar el caudal de agua que requieren para sus actividades (CVC, 2011).

De manera complementaria en estudio realizado por PROAGUAS y CVC en el año 2013, mediante el cual se realizó un diagnóstico de las condiciones de manejo del agua en la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá, se deja evidencia que gran parte de las obras de distribución de agua ubicadas en esta zona presentan deterioro, lo que a su vez propicia que los usuarios alteren la funcionalidad de las estructuras a través de la colocación de trinchos que favorecen que el agua se distribuya en proporciones diferentes a las legalmente asignadas. En la Fotografía 4-11 se muestran trinchos construidos por algunos usuarios en la zona media de la subcunca zona baja río Tuluá.

Fotografía 4-11 Conflictos distribución del agua - Trinchos derivaciones de agua (PROAGUAS – CVC, 2013)

Finalmente el nivel de conflicto en la distribución del agua en las diferentes zonas de la subcuenca, se obtiene de la información previamente expuesta, y de la percepción que tienen los usuarios del agua quienes fueron entrevistados sobre este tema, (Ver Tabla 4-21).

Tabla 4-21. Nivel de conflicto en la distribución del agua zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	NIVEL CONFLICTO DISTRIBUCIÓN DEL AGUA
ALTA	BAJA
MEDIA	MEDIA
BAJA	ALTA

- **Uso del agua**

Para la cuenca del río Tuluá el índice de uso de agua – IUA, tiene un valor de 23,25 (IDEAM, 2014), éste valor se aplica para las tres zonas (baja, media y alta) de la subcuenca en estudio.

- **Determinación del subíndice de sensibilidad zona alta subcuenca**

Una vez calculados los indicadores FFP, CDA y IUA, se procede a activar el sistema difuso definido para el nivel de sensibilidad. El valor de cada indicador obtenido para la zona alta de la subcuenca, se ubica dentro de la función de pertenencia correspondiente, con lo anterior se activan dos (2) reglas de decisión de la base de conocimiento. En la Figura 4-30 y Figura 4-31 se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de sensibilidad de la zona alta de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-32 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación. En la Figura 4-33 se presenta la determinación del subíndice de sensibilidad para la zona alta de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

El proceso de defusificación se realiza a partir de la determinación del centro de gravedad de la figura, para el caso C_g= 2,22, entonces la sensibilidad para la zona alta de la subcuenca zona baja río Tuluá es ALTA.

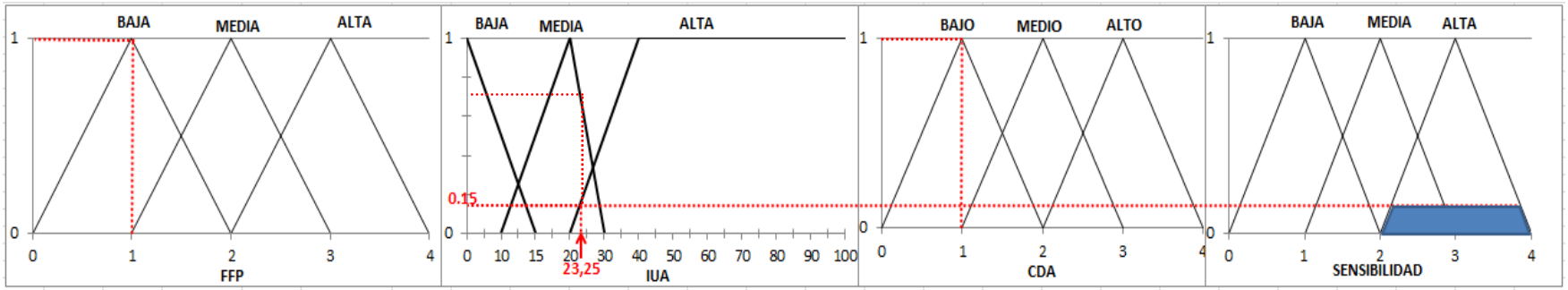


Figura 4-30. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona alta- Activación regla 1: Si FFP es baja, IUA es alta y CDA es bajo entonces sensibilidad es alta

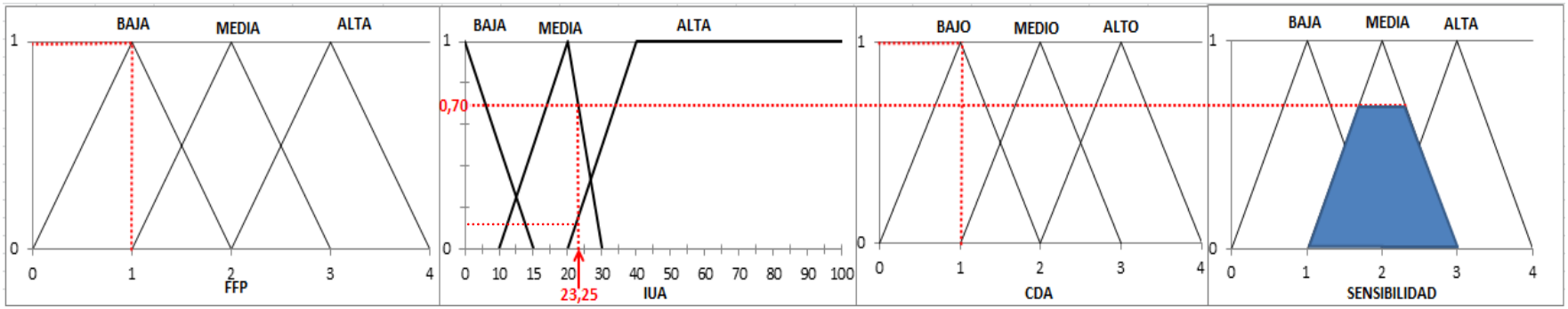


Figura 4-31. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona alta- Activación regla 2: Si FFP es baja, IUA es media y CDA es bajo entonces sensibilidad es media

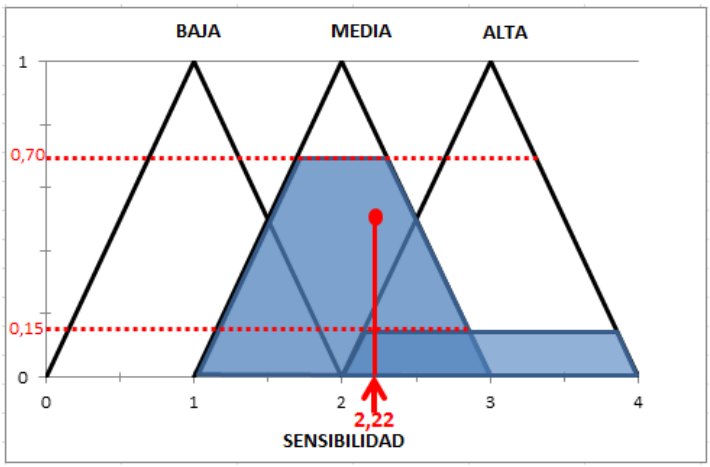


Figura 4-32 Función para defusificación nivel de sensibilidad zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá

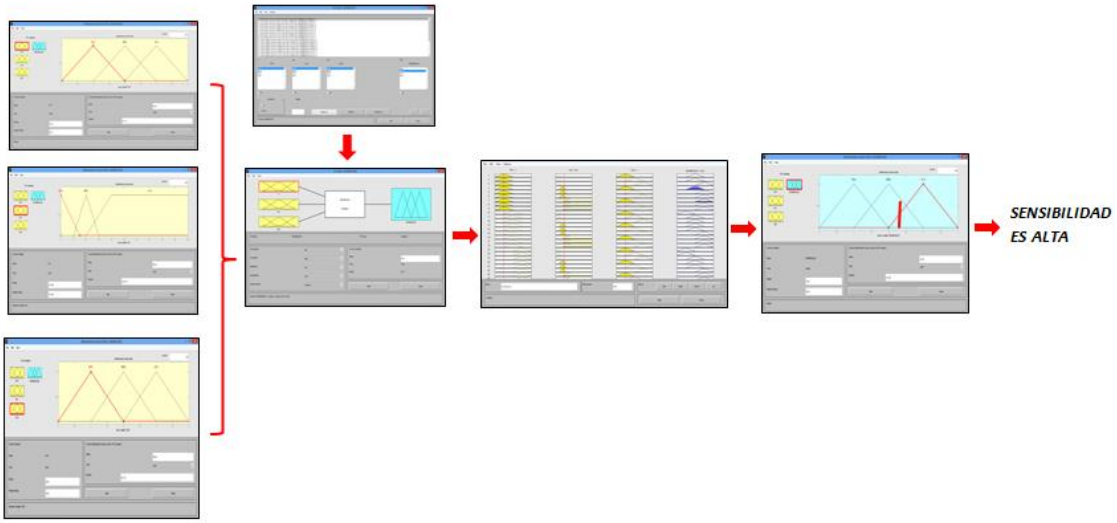


Figura 4-33. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

- **Determinación del subíndice de sensibilidad zona media subcuenca**

En la Figura 4-34 y Figura 4-35 se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de sensibilidad de la zona media de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-36 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación. En la Figura 4-37 se presenta la determinación del subíndice de sensibilidad para la zona media de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

El proceso de defusificación se realiza a partir de la determinación del centro de gravedad de la figura, para el caso C_g= 2,22, entonces la sensibilidad para la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá es ALTA

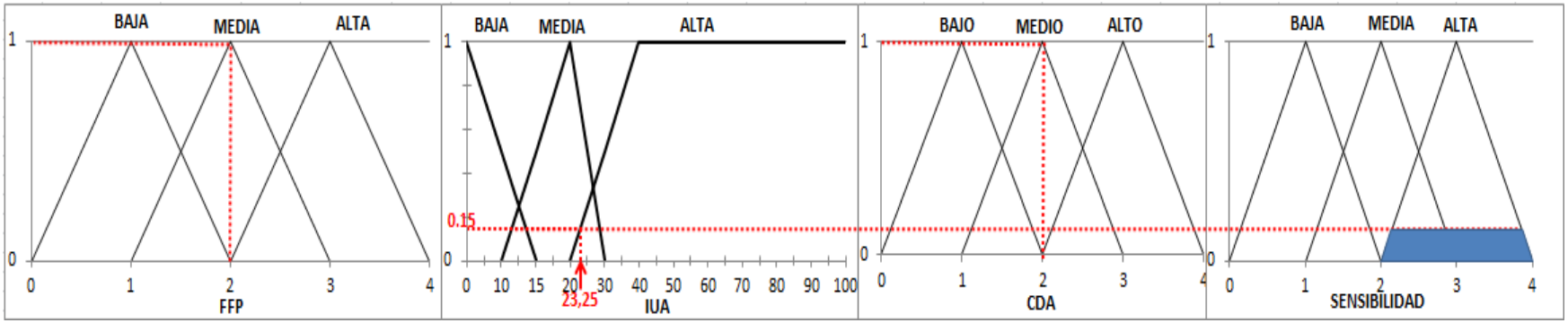


Figura 4-34. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona media- Activación regla 1: Si FFP es media, IUA es alta y CDA es medio entonces sensibilidad es alta

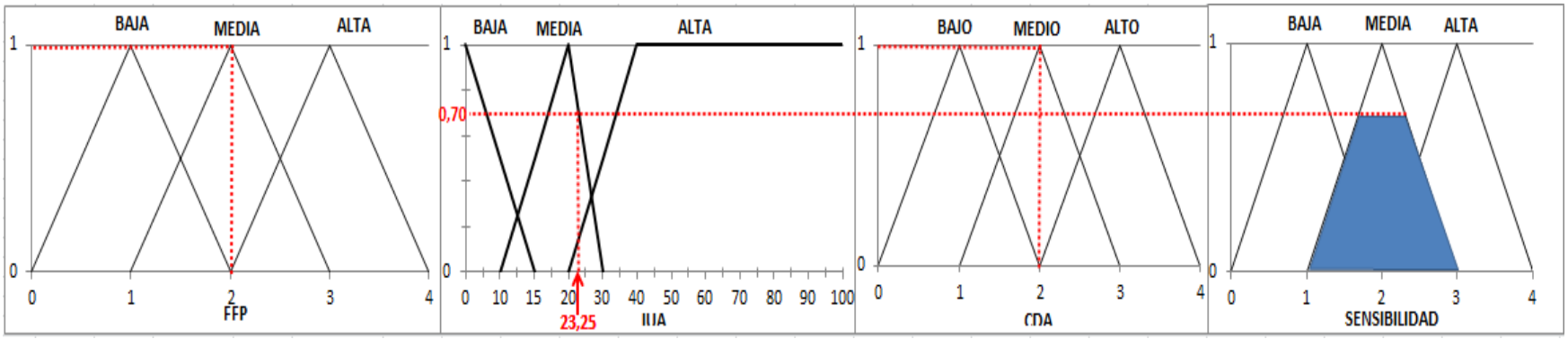


Figura 4-35. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona media- Activación regla 2: Si FFP es media, IUA es media y CDA es medio entonces sensibilidad es Media

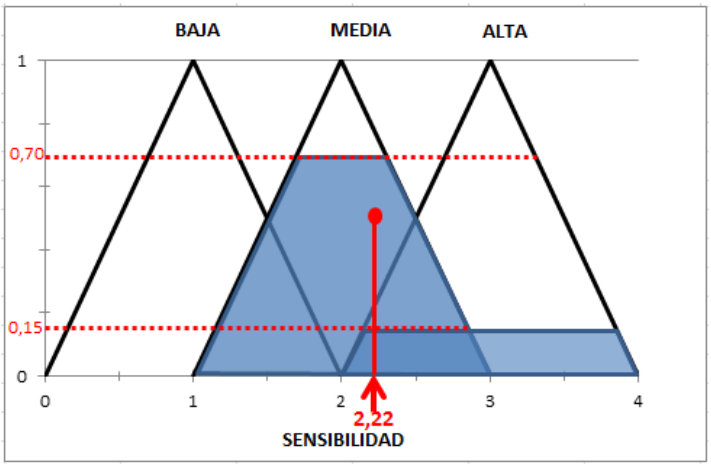


Figura 4-36. Función para defusificación nivel de sensibilidad zona media, subcuenca zona baja río Tuluá

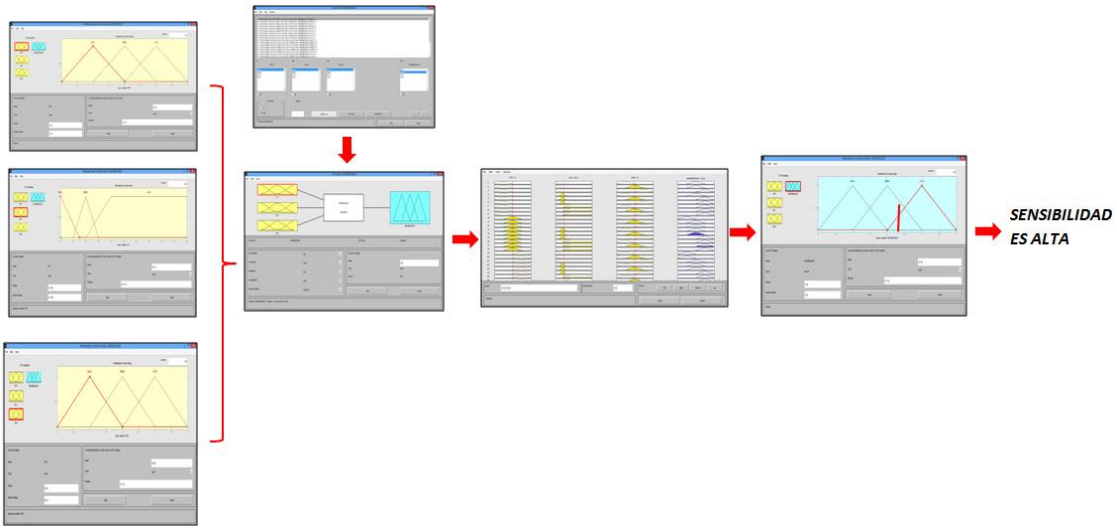


Figura 4-37. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

- **Determinación del subíndice de sensibilidad zona baja subcuenca**

En la Figura 4-38 y Figura 4-39 se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de sensibilidad de la zona baja de la subcuenca en estudio, y en la Figura 4-40 se muestra la función para realizar el proceso de defusificación. En la Figura 4-41 se presenta la determinación del subíndice de sensibilidad para la zona baja de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014. El proceso de defusificación se realiza a partir de la determinación del centro de gravedad de la figura, para el caso C_g= 3, entonces la sensibilidad para la zona baja de la subcuenca zona baja río Tuluá es ALTA

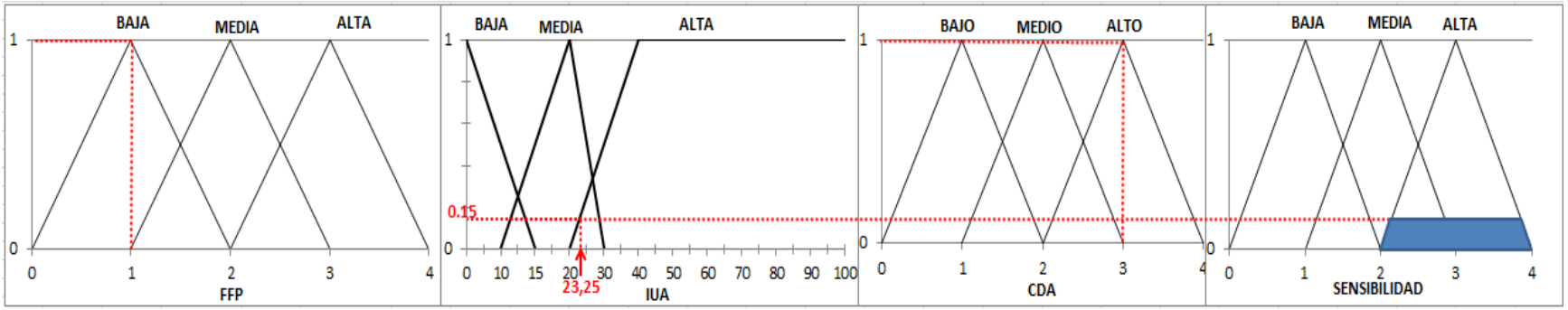


Figura 4-38. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona baja- Activación regla 1: Si FFP es baja, IUA es alta y CDA es alto entonces sensibilidad es Alta

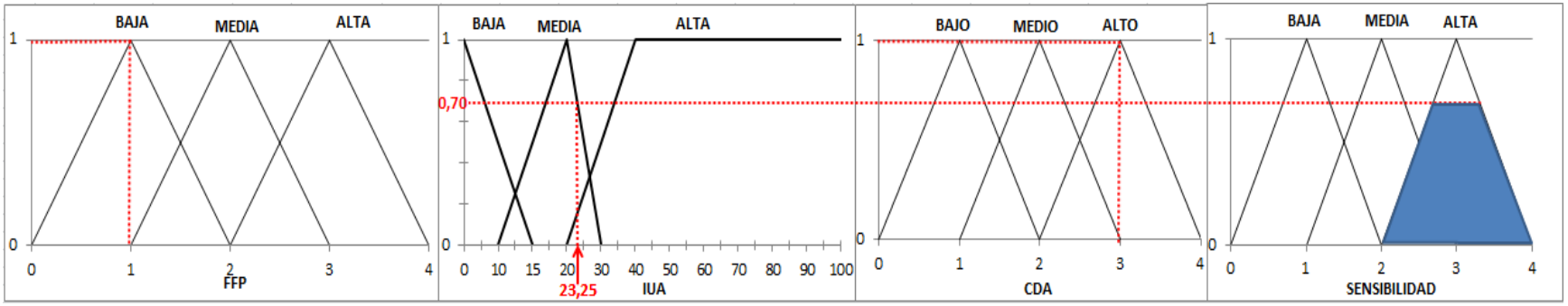


Figura 4-39. Operación modelo lógica difusa sensibilidad- zona baja- Activación regla 2: Si FFP es baja, IUA es media y CDA es alto entonces sensibilidad es Alta

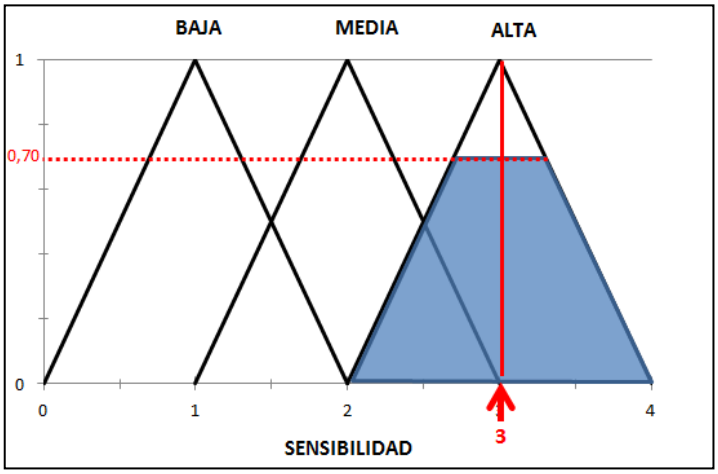


Figura 4-40. Función para defusificación nivel de sensibilidad zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá

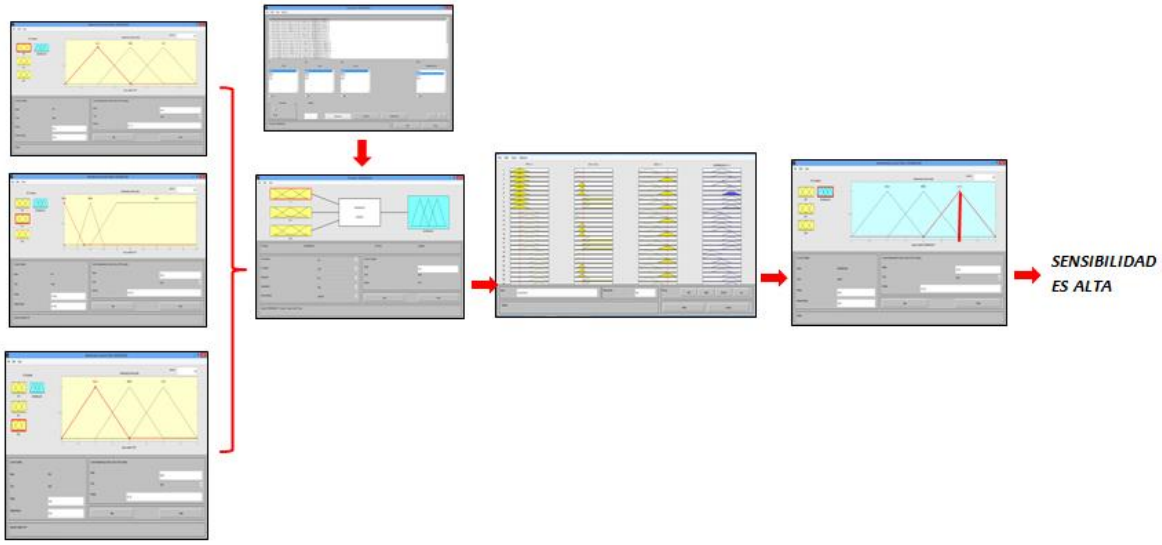


Figura 4-41. Determinación del subíndice de sensibilidad para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

En los Anexos F, G y H se muestra respectivamente el proceso de defusificación realizado en Matlab para el subíndice de sensibilidad para la zona alta, media y baja de la subcuenca estudiada.

En la Tabla 4-22 se presenta el resumen del nivel de sensibilidad determinado para la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá.

Tabla 4-22. Nivel de sensibilidad para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	SENSIBILIDAD
ALTA	ALTA
MEDIA	ALTA
BAJA	ALTA

4.3.3 Capacidad de adaptación

- **Gestión de la demanda (GD) – Zona alta subcuenca**

En la zona alta de la subcuenca zona baja río Tuluá, se identifica la ejecución de dos (2) acciones dirigidas a la reducción de la demanda del agua superficial: gestión de pérdidas y sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, las cuales se describen a continuación

- **Gestión de pérdidas – zona alta subcuenca**

Con el fin de reducir el volumen de pérdidas técnicas del sistema, la empresa prestadora del servicio de acueducto en el casco urbano del municipio de Tuluá, la que a su vez presta sus servicios al corregimiento de Aguaclara, implementa un plan de reducción de pérdidas del sistema de acueducto en el cual incluyen diferentes actividades tales como: Búsqueda y reparación de fugas no visibles a través de la utilización de sistemas de geofonía, regulación de presiones, reducción del tiempo de atención a daños de red matriz y de acometida y la reposición de antiguas redes de asbesto cemento, las cuales por su antigüedad presentan la mayor cantidad de fugas en el sistema de distribución.

- **Sensibilización sobre uso eficiente y ahorro de agua**

La empresa prestadora del servicio de acueducto en el municipio de Tuluá, ejecuta dos (2) programas sociales dirigidos a sensibilizar sobre uso eficiente y ahorro de agua, dichos programas se describen a continuación:

Jornadas educativas comunitarias. Incluye la ejecución de visitas puerta a puerta, donde se educa a la comunidad de los diferentes barrios del casco urbano así como de Aguaclara y los Caimos en el uso racional y cuidado del agua.

El agua nuestro mayor tesoro. A través de este programa se sensibiliza y capacita sobre el uso racional del agua, a los niños y jóvenes de las instituciones educativas, así como a personal de entidades comerciales e industriales ubicados en la zona atendida. Las actividades educativas se realizan a través de talleres, dinámicas lúdico-pedagógicas, recorridos por la planta de tratamiento de agua

potable, buscando generar así, hábitos y acciones hacia la preservación del recurso hídrico.

A través de la ejecución de los programas descritos, anualmente se capacitan entre 7000 y 8000 personas asentadas en la zona atendida.

Fotografía 4-12 Sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua (CENTROAGUAS S.A ESP, 2015)

- **Gestión de la demanda – Zona media y baja subcuenca**

En la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá, se identifica la ejecución de una (1) acción dirigida a la reducción de la demanda del agua superficial: gestión de pérdidas la cual se describe a continuación.

- **Gestión de pérdidas – zona media y zona baja subcuenca**

  De acuerdo a la información recolectada a través de entrevistas, en la zona media y baja de la subcuenca, el agua superficial es utilizada principalmente para agricultura, en ésta actividad utilizan principalmente la alternativa de riego por ventana o riego por surco alterno, tecnologías que disminuyen el desperdicio de agua en comparación con otras tecnologías utilizadas para este fin. El riego por ventana permite reducir las pérdidas de agua en la conducción, interrumpir el flujo de agua de manera más oportuna antes de que llegue al final del surco, el riego por surco alterno a su vez permite que los volúmenes de agua aplicados al campo se disminuyan entre 25 y 50% con respecto a las aplicaciones por surco continuo (Cenicaña, 2015).

De manera complementaria se utiliza la herramienta de balance hídrico la cual permite priorizar el riego en el campo de forma técnica, reduciendo las pérdidas de agua.

La gestión de la demanda en las diferentes zonas de la subcuenca, se resume en la Tabla 4-23.

Tabla 4-23. Gestión de la demanda zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	GESTIÓN DE LA DEMANDA
ALTA	MEDIA
MEDIA	REGULAR
BAJA	REGULAR

- **Medidas de atención de emergencias (MAE) - Zona alta subcuenca**

En la zona alta de la subcuenca zona baja río Tuluá, se cuenta con dos (2) medidas de atención de emergencias asociadas a la manifestación de sequía de fuentes de agua superficial: Fuentes alternas de abastecimiento y acciones reglamentarias, las cuales se describen a continuación.

- **Fuentes alternas de abastecimiento**

  La empresa prestadora del servicio de acueducto en el municipio de Tuluá, cuenta con tres (3) pozos de agua subterránea los cuales son utilizados para el abastecimiento de agua potable en situaciones de emergencia asociadas a la imposibilidad de captar agua del río Tuluá.

  De otra parte para el caso de la generación de energía eléctrica, en situaciones de emergencia la demanda de energía se suple a partir de la generación del recurso en otras hidroeléctricas.

- **Acciones reglamentarias**

  En situaciones de emergencia asociadas a la manifestación de sequía de fuentes de agua superficial, la autoridad ambiental emite instrumentos normativos (Resoluciones) mediante las cuales ordena acciones tales como:

  - ✓ Destrucción de trinchos y barreras que conlleven a la captación, desvío o toma del recurso sin la respectiva autorización y que impida el normal discurrir por los cauces y derivaciones
  - ✓ Suspensión temporal de las captaciones concesionadas para llenado de piscinas y estanques ornamentales, riego de jardines y zonas verdes, lavado de vehículos
  - ✓ Suspensión de las captaciones concesionadas para riego agrícola y uso ornamental durante el día domingo

- **Medidas de atención de emergencias (MAE) - Zonas media y baja subcuenca**

En la zonas media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá, se cuenta con tres (3) medidas de atención de emergencias asociadas a la manifestación de sequía de fuentes de agua superficial: Fuentes alternas de abastecimiento, acciones reglamentarias y turnos de riego, las cuales se describen a continuación.

- **Fuentes alternas de abastecimiento**

  Gran parte de los usuarios de las zonas media y baja de la subcuenca en estudio cuentan con pozos de agua subterráneas para realizar la actividad de riego en situaciones de emergencia asociadas a la sequía de la fuente de agua superficial

- **Acciones reglamentarias**

  En situaciones de emergencia asociadas a la manifestación de sequía de fuentes de agua superficial, la autoridad ambiental emite instrumentos normativos (Resoluciones) mediante las cuales ordena acciones tales como:

  - ✓ Destrucción de trinchos y barreras que conlleven a la captación, desvío o toma del recurso sin la respectiva autorización y que impida el normal discurrir por los cauces y derivaciones
  - ✓ Suspensión temporal de las captaciones concesionadas para llenado de piscinas y estanques ornamentales, riego de jardines y zonas verdes, lavado de vehículos
  - ✓ Suspensión de las captaciones concesionadas para riego agrícola y uso ornamental durante el día domingo

- **Turnos de riego**

  Los usuarios de la fuente de agua superficial en la zona media, se han organizado y han establecido turnos de riego para ser aplicados en situaciones de emergencia asociadas a la manifestación de sequía de fuentes de agua superficial, el objetivo es lograr que cada usuario pueda utilizar el agua equitativamente por turnos, teniendo en cuenta el caudal asignado para dicha tarea, el horario y cantidad de días; permitiéndole así poder realizar sus actividades agrícolas.

El indicador medidas de atención de emergencias para las diferentes zonas de la subcuenca, se resume en la Tabla 4-24

Tabla 4-24. Medidas de atención de emergencias zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	MEDIDAS DE ATENCION DE EMERGENCIAS
ALTA	MEDIA
MEDIA	ALTA
BAJA	ALTA

- **Sistema de alerta temprana**

La Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca - CVC, tiene instalada y en funcionamiento una estación hidrométrica automática, la cual se ubica el sector de Mateguadua en el municipio de Tuluá, que registra datos con frecuencia de 10 minutos, y los transmite vía satélite hacia el centro de control. La estación cuenta con un sistema autónomo de alimentación eléctrica compuesto por panel solar, regulador, batería y transmisor satelital, así mismo un sensor de nivel por radar, y un sensor de precipitación. Con los datos proporcionados por la estación se caracteriza el régimen de caudales de la cuenca, permitiendo determinar la oferta hídrica del río Tuluá en eventos extremos como el fenómeno de “El Niño” o en época de fuertes precipitaciones (CVC, 2016). Esta estación es la única que existe en la cuenca del río Tuluá que puede medir caudales del río.

La estación hidrométrica descrita proporciona datos de caudales del río Tuluá que abastecen la zona alta de la subcuenca en estudio, a pesar de la existencia de la estación, no existe un sistema de alerta temprana como tal en esta zona, lo anterior en consideración a que no se cuenta con un programa de difusión y comunicación claro y oportuno que permita advertir a las personas sobre posibles sequías hidrológicas y facilitar el intercambio de información que pueda ser utilizada en la toma de decisiones, de manera adicional la información proporcionada por la estación es demasiado técnica y detallada lo que dificulta su utilización e interpretación por parte de algunos usuarios.

De igual manera para las zonas media y baja de la subcuenca objeto de análisis, no se encuentra evidencia de la existencia de sistemas de alerta temprana.

En la Tabla 4-25 se resumen los resultados del indicador para la zona alta, media y baja de la subcuenca en análisis.

Tabla 4-25. Sistema de alerta temprana para zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
ALTA	NO EXISTE
MEDIA	NO EXISTE
BAJA	NO EXISTE

- **Asociación de usuarios del recurso hídrico**

La zona alta y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá, no cuenta con asociaciones de usuarios constituidas como tal, actualmente existe la fundación ríos Tuluá y Morales, la cual es una organización no gubernamental sin ánimo de lucro de la cual hacen parte varios usuarios del recurso hídrico de la zona alta, media y baja de la subcuenca en estudio, sin embargo esta fundación realiza principalmente programas relacionados con el manejo del agua, pero no realiza la administración para la distribución del recurso hídrico, de manera adicional ha concentrado sus acciones en la zona alta de la cuenca del río Tuluá; dicha fundación actualmente se encuentra realizando actividades de acercamiento con los usuarios para determinar la pertinencia de transformarse de fundación a asociación de usuarios del recurso hídrico.

Por su parte, la zona media de la subcuenca zona baja río Tuluá, cuenta con la Asociación de Usuarios de la Acequia Primavera y Nariño – ASOPRINA, ésta se encarga de administrar la distribución del agua en estas subderivaciones del río Tuluá.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 4-26 se resumen los resultados del indicador para la zona alta, media y baja de la subcuenca en análisis.

Tabla 4-26. Asociación de usuarios zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	ASOCIACIÓN DE USUARIOS DEL RECURSO HÍDRICO
ALTA	NO EXISTE
MEDIA	SI EXISTE
BAJA	NO EXISTE

- **Determinación del subíndice de capacidad de adaptación zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá**

Una vez calculados los indicadores GD, MAE, SAT y AURH, se procede a activar el sistema difuso definido para capacidad de adaptación. El valor de cada indicador obtenido para la zona alta de la subcuenca, se ubica dentro de la función de pertenencia correspondiente, con lo anterior se activa una (1) regla de decisión de la base de conocimiento con lo que se concluye directamente que la capacidad de adaptación en zona alta de la subcuenca en estudio es BAJA. En la Figura 4-42 se opera el proceso de lógica difusa para el subíndice de capacidad de adaptación de la zona alta de la subcuenca analizada.

Al operar el modelo de lógica difusa para el subíndice capacidad de adaptación para la zona media y zona baja de la subcuenca en estudio, en cada caso, se activa una (1) regla de decisión de la base de conocimiento con lo que se concluye directamente que la capacidad de adaptación en zona media es MEDIA y en zona baja es BAJA. En la Figura 4-43 y Figura 4-44 se opera respectivamente el proceso de lógica difusa para el subíndice de capacidad de adaptación de la zona media y zona baja de la subcuenca analizada.

En la Figura 4-45, Figura 4-46 y Figura 4-47 se presenta respectivamente la determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona alta, zona media y zona baja de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 4-27 se resumen los resultados del subíndice capacidad de adaptación para la zona alta, media y baja de la subcuenca en análisis.

Tabla 4-27. Capacidad de adaptación zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN
ALTA	BAJA
MEDIA	MEDIA
BAJA	BAJA

En los Anexos I, J y K se muestra respectivamente el proceso de defusificación realizado en Matlab para el subíndice de capacidad de adaptación para la zona alta, media y baja de la subcuenca estudiada.

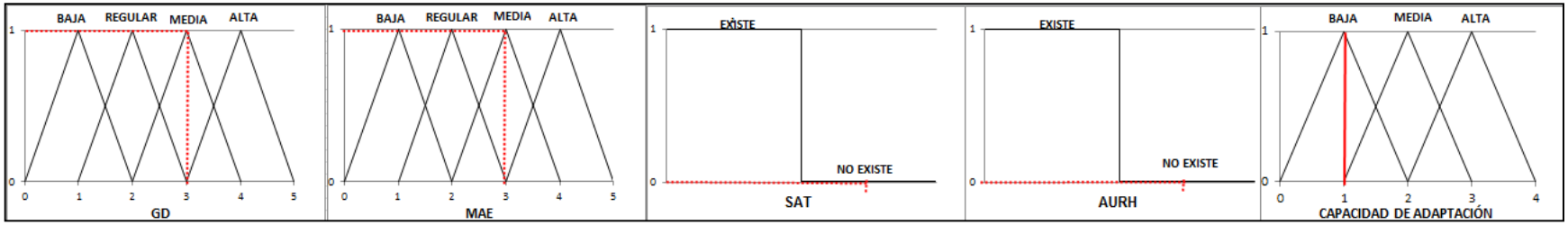


Figura 4-42. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación- zona alta- Activación regla 1: Si GD es media, MAE es media y SAT no existe y AURH no existe entonces capacidad de adaptación es Baja

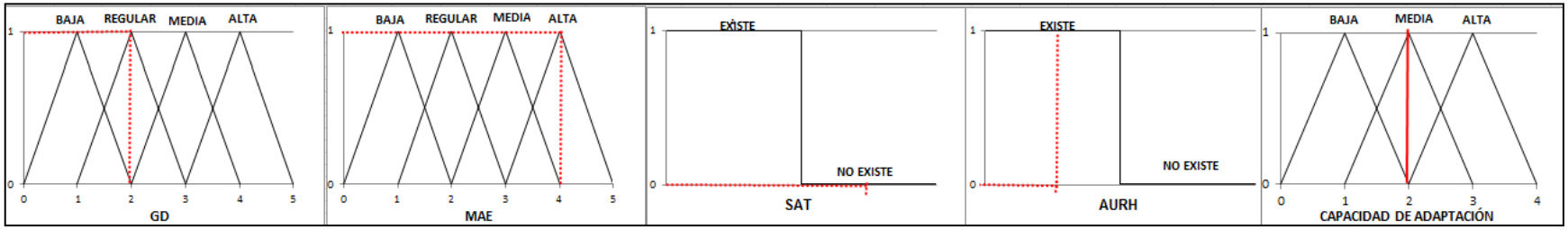


Figura 4-43. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación- zona media -Activación regla 1: Si GD es regular, MAE es alta y SAT no existe y AURH existe entonces capacidad de adaptación es Media

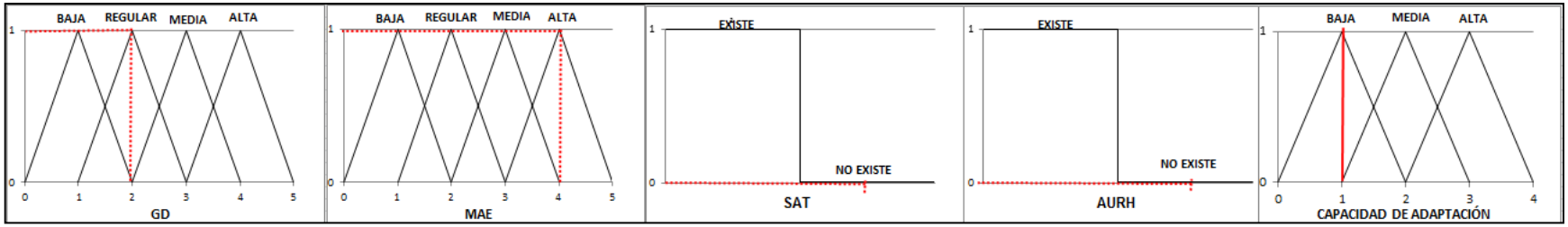


Figura 4-44. Operación modelo lógica difusa capacidad de adaptación- zona baja-Activación regla 1: Si GD es regular, MAE es alta y SAT no existe y AURH no existe entonces capacidad de adaptación es Baja

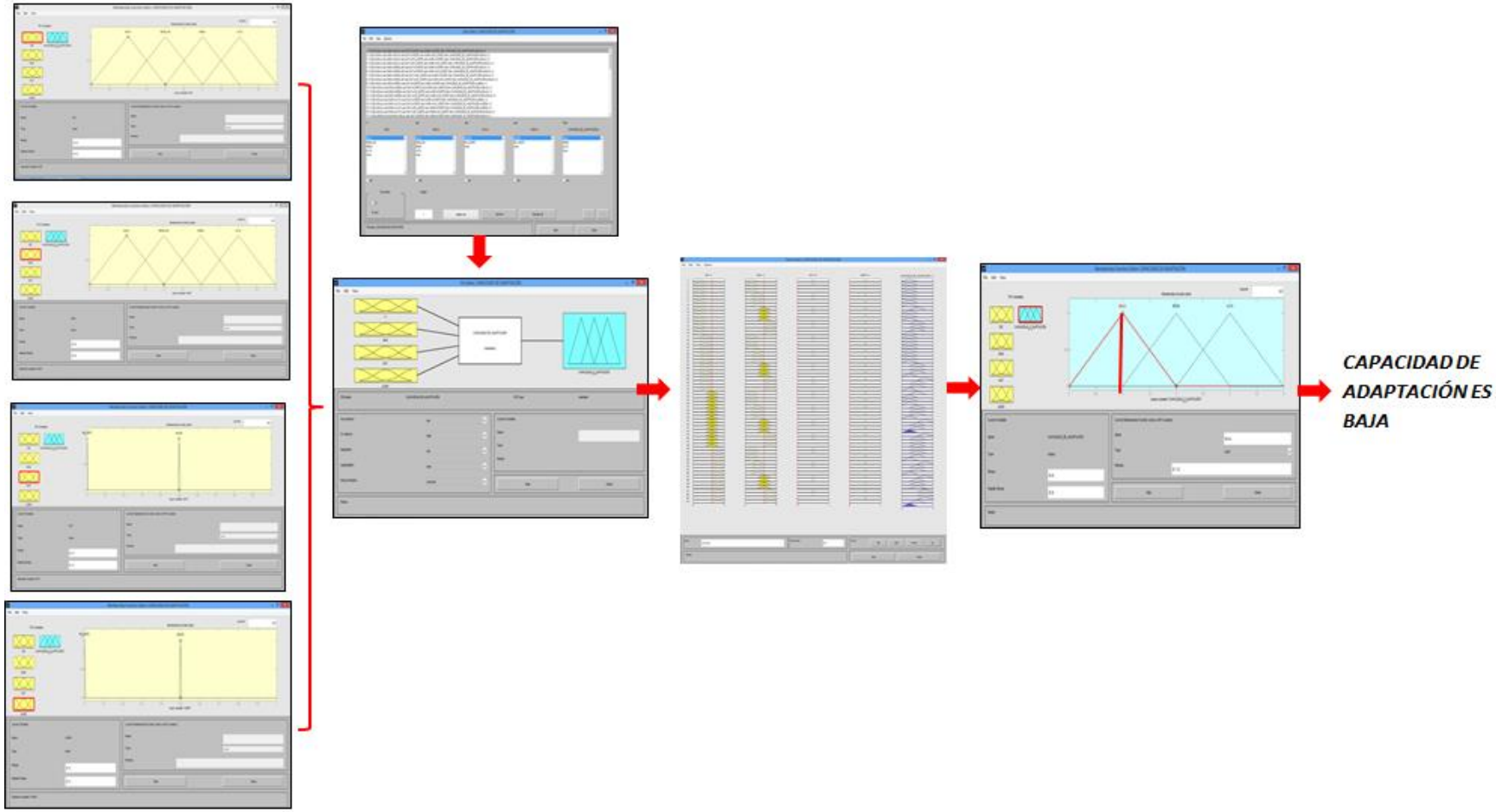


Figura 4-45. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

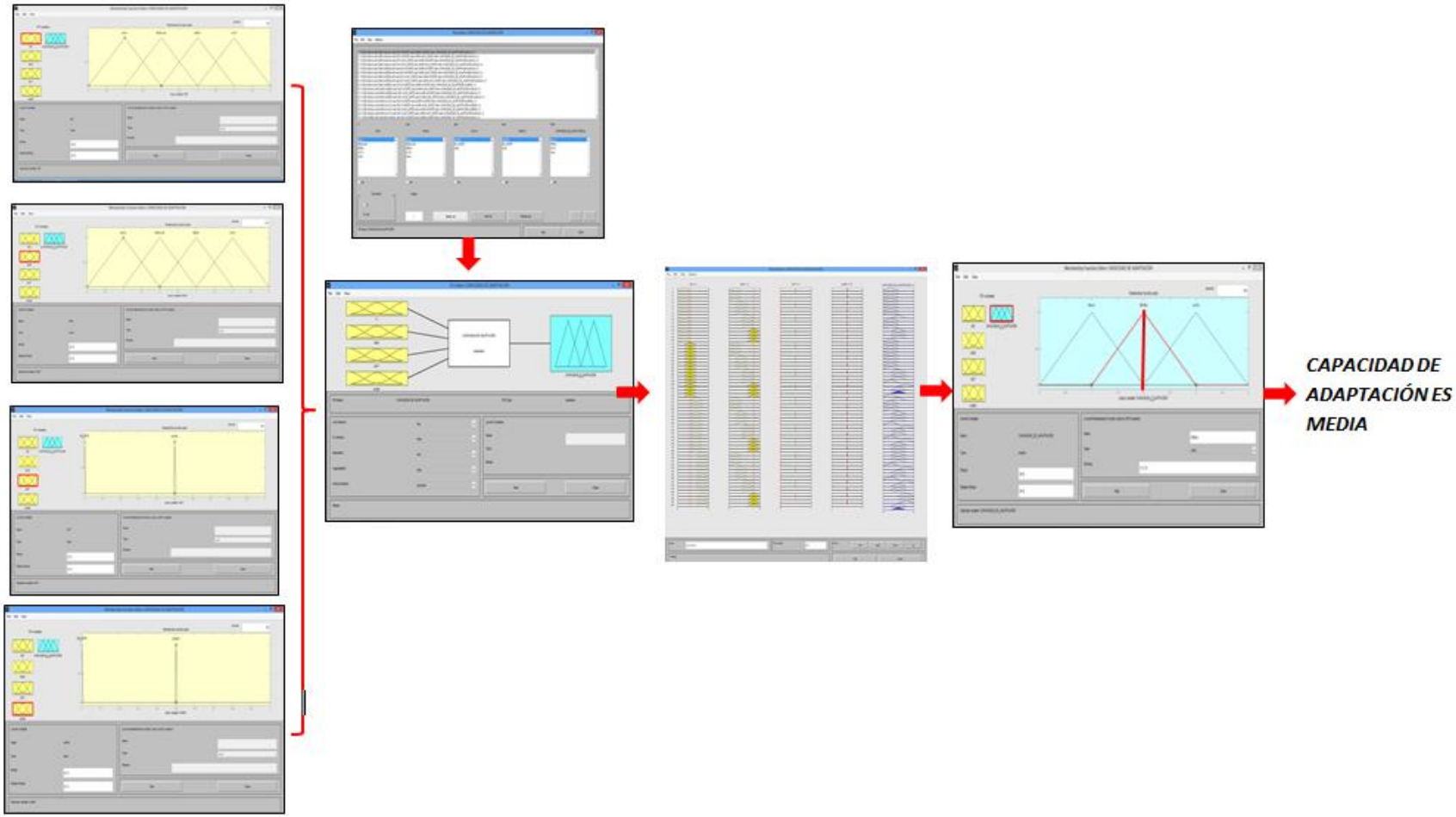


Figura 4-46. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

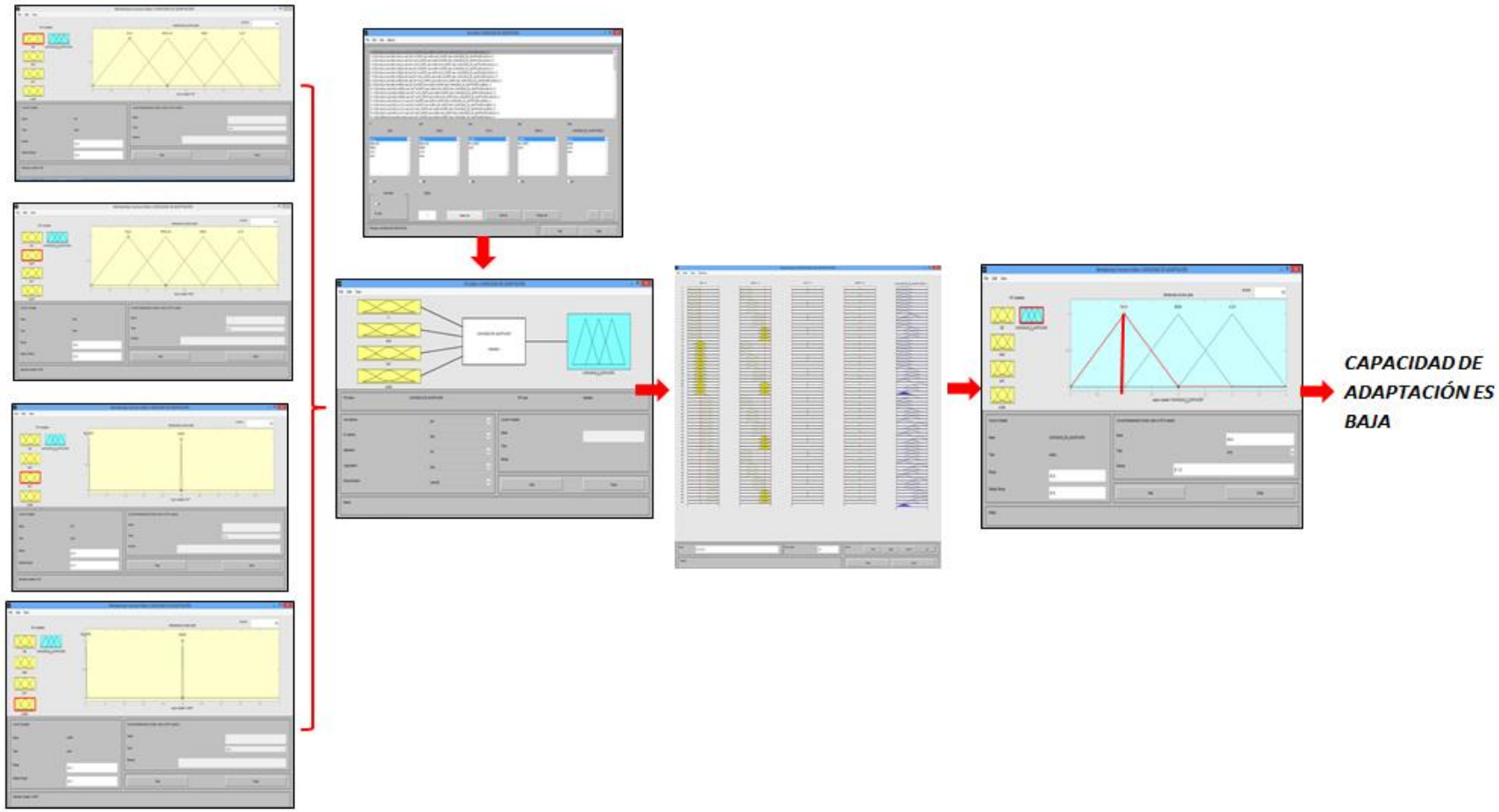


Figura 4-47. Determinación del subíndice de capacidad de adaptación para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

4.3.4 Índice de vulnerabilidad a sequías de fuentes de agua superficial - IVUSAS

Una vez determinados los subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación para las zonas alta, media y baja de la subcuenca en estudio como se muestra en la Tabla 4-28, se procede a activar el sistema difuso definido para el índice IVUSAS. El valor de cada subíndice obtenido para la zona alta de la subcuenca, se ubica dentro de la función de pertenencia correspondiente, con lo anterior se activa una (1) regla de decisión de la base de conocimiento, con lo que se concluye directamente, que la vulnerabilidad a sequías de la fuente de agua superficial en zona alta de la subcuenca en estudio es ALTA. En la Figura 4-48 se opera el proceso de lógica difusa para el índice IVUSAS de la zona alta de la subcuenca analizada.

Tabla 4-28. Resumen valores de subíndices exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta, zonas alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	EXPOSICIÓN	SENSIBILIDAD	CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN
ALTA	ALTA	ALTA	BAJA
MEDIA	MEDIA	ALTA	MEDIA
BAJA	ALTA	ALTA	BAJA

Al operar el modelo de lógica difusa para el índice IVUSAS para la zona media y zona baja de la subcuenca en estudio, en cada caso, se activa una (1) regla de decisión de la base de conocimiento, con lo que se concluye directamente que el IVUSAS en zona media es MEDIA y en zona baja es ALTA. En la Figura 4-49 y Figura 4-50 se opera respectivamente el proceso de lógica difusa para el índice IVUSAS de la zona media y zona baja de la subcuenca analizada.

En la Figura 4-51, Figura 4-52 y Figura 4-53 se presenta respectivamente la determinación del índice IVUSAS para la zona alta, zona media y zona baja de la subcuenca analizada utilizando como herramienta el software Matlab 2014.

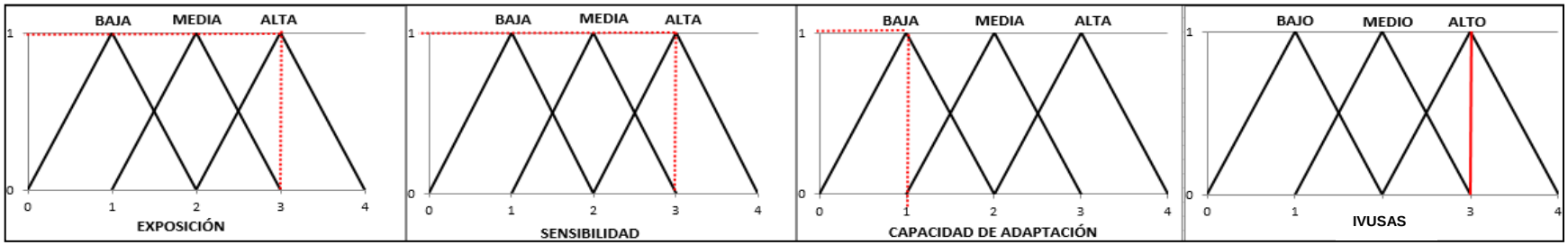


Figura 4-48. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS- zona alta -Activación regla 1: Si E es alta, S es alta y CA es baja entonces IVUSAS es Alto

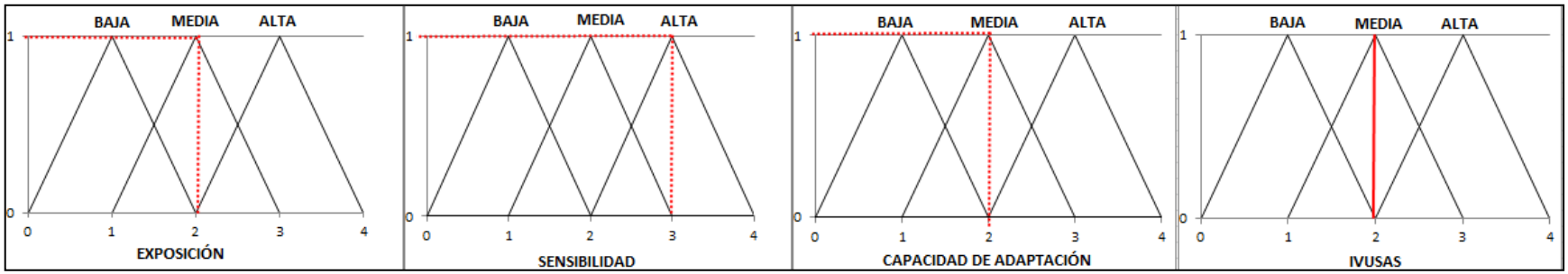


Figura 4-49. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS- zona media -Activación regla 1: Si E es media, S es alta y CA es media entonces IVUSAS es Medio

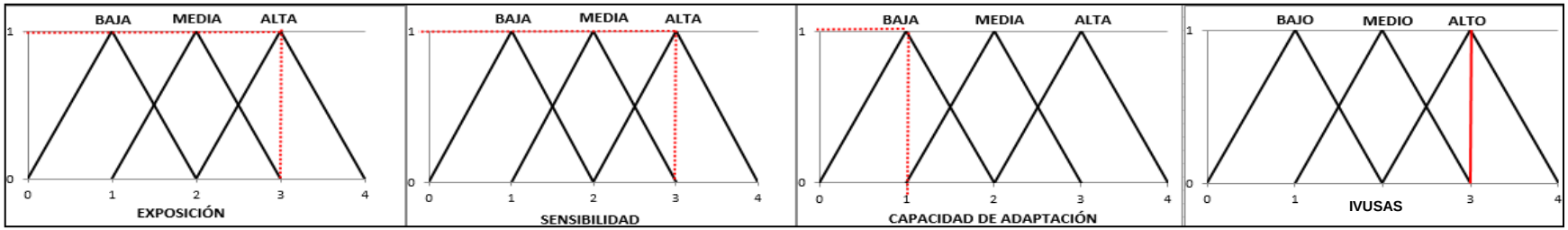


Figura 4-50. Operación modelo lógica difusa índice IVUSAS- zona baja -Activación regla 1: Si E es alta, S es alta y CA es baja entonces IVUSAS es Alto

Figura 4-51. Determinación del índice IVUSAS para la zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

Figura 4-52. Determinación del índice IVUSAS para la zona media, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

Figura 4-53. Determinación del índice IVUSAS para la zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá utilizando el software Matlab 2014

En el Anexo L se muestra el proceso de defusificación realizado en Matlab para el índice IVUSAS para la zona alta y baja de la subcuenca, y en el Anexo M se presenta el proceso de defusificación realizado para el índice en la zona media de la subcuenca en estudio.

Finalmente, en la Tabla 4-29 se resumen los resultados del índice IVUSAS para la zona alta, media y baja de la subcuenca en análisis, de manera complementaria en la Tabla 4-30 se presentan las acciones recomendadas para las diferentes zonas de la subcuenca zona baja rio Tuluá, según los resultados obtenidos para el índice IVUSAS.

Tabla 4-29. Resumen resultados índice IVUSAS zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá

ZONA SUBCUENCA	ÍNDICE IVUSAS
ALTA	ALTO
MEDIA	MEDIO
BAJA	ALTO

Tabla 4-30. Acciones recomendadas para ser implementadas en zona alta, media y baja subcuenca zona baja río Tuluá, según resultados del índice IVUSAS

ZONA DE APLICACIÓN ACCIONES	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)	LARGO PLAZO (>5 años)
ZONA ALTA Y ZONA BAJA SUBCUENCA ZONA BAJA RÍO TULUÁ	Conformar y/o fortalecer asociación(e)s de usuarios del recurso hídrico de tal manera que se reduzcan los conflictos en la distribución y se fomente el uso sostenible del recurso	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora
	Realizar diagnóstico de las áreas pertenecientes a franja forestal protectora de fuentes de agua superficial, que requieren ser recuperadas y donde se debe establecer cobertura vegetal protectora.	Implementar acciones coordinadas por parte de los entes involucrados, dirigidas a recuperar la cobertura vegetal protectora de la franja forestal protectora de las fuentes de agua superficial	Mantener la cobertura vegetal protectora establecida, realizar seguimiento y control

ZONA DE APLICACIÓN ACCIONES	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	*Implementar y/o fortalecer sistema (s) de alerta temprana de la sequía hidrológica con entrega de información oportuna a los diferentes sectores de usuarios. *Fortalecer las capacidades de los usuarios para el uso de lo(s) sistemas de alerta temprana implementados, el acceso oportuno a la información y la interpretación de la información suministrada. * Establecer y/o fortalecer acuerdos entre los diferentes actores para la definición de protocolos operativos de alerta temprana: quién emite el aviso y utilizando qué vía de difusión	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado * Realizar la preparación de un plan de respuestas especificando qué acciones debe tomar los diferentes actores involucrados, antes, durante y después de la emergencia * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado *Ejecutar simulacros para determinar el grado de preparación de los sistemas de alerta y los mecanismos de respuesta * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados
	Formular e implementar medidas de atención de emergencias asociadas a sequía hidrológica de agua superficial, tales como almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego, otros.	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas.
	Implementar acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial tales como gestión de pérdidas, reasignación de agua, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras.	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial
	Conformar y/o fortalecer asociación(e)s de usuarios del recurso hídrico de tal	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar las acciones y	Mantener la(s) asociación(es) de usuarios, evaluar

ZONA DE APLICACIÓN ACCIONES	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
ZONA MEDIA SUBCUENCA ZONA BAJA RÍO TULUÁ	manera que se reduzcan los conflictos en la distribución y se fomente el uso sostenible del recurso	gestión implementada y tomar acciones de mejora	las acciones y gestión implementada y tomar acciones de mejora
	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, realizar diagnóstico del área que requiere ser recuperada y donde se debe establecer cobertura vegetal protectora. Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta se requiere implementar acciones de conservación	Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es baja o media, implementar acciones coordinadas por parte de los entes involucrados, dirigidas a recuperar la cobertura vegetal protectora de la franja forestal protectora de las fuentes de agua superficial Si la cobertura vegetal de la franja forestal protectora es alta, mantener la cobertura vegetal protectora existente realizar seguimiento y control	Mantener la cobertura vegetal protectora existente y/o establecida, realizar seguimiento y control
	*Implementar y/o fortalecer sistema (s) de alerta temprana de la sequía hidrológica con entrega de información oportuna a los diferentes sectores de usuarios. *Fortalecer las capacidades de los usuarios para el uso de lo(s) sistemas de alerta temprana implementados, el acceso oportuno a la información y la interpretación de la información suministrada. * Establecer y/o fortalecer acuerdos entre los diferentes actores para la definición de protocolos operativos de	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado * Realizar la preparación de un plan de respuestas especificando qué acciones debe tomar los diferentes actores involucrados, antes, durante y después de la emergencia * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados	* Mantener y mejorar el sistema(s) de alerta temprana implementado *Ejecutar simulacros para determinar el grado de preparación de los sistemas de alerta y los mecanismos de respuesta * Fortalecer la capacidad técnica de los actores involucrados

ZONA DE APLICACIÓN ACCIONES	ACCIONES RECOMENDADAS		
	CORTO PLAZO (< 2 años)	**MEDIANO PLAZO (Entre 2 y 5 años)**	**LARGO PLAZO (>5 años)**
	alerta temprana: quién emite el aviso y utilizando qué vía de difusión		
	Formular e implementar medidas de atención de emergencias asociadas a sequía hidrológica de agua superficial, tales como almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego, otros.	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas	Evaluar y mejorar las medidas de atención implementadas.
	Implementar acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial tales como gestión de pérdidas, reasignación de agua, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras.	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial	Evaluar y mejorar las acciones implementadas dirigidas a reducir la demanda de agua superficial

5. Discusión general

El presente trabajo, logró proponer el índice IVUSAS, que sirve para el monitoreo y seguimiento del nivel de vulnerabilidad a sequía hidrológica de fuente de agua superficial, en subcuencas andinas; constituye una herramienta para la toma de decisiones, que puede ser utilizada por parte de los entes encargados de implementar acciones preventivas, de mitigación y adaptación a la sequía dentro del territorio evaluado.

El índice IVUSAS considera aspectos ambientales referentes a la comparación entre la oferta y la demanda del agua, pero además contempla otros aspectos ambientales, sociales e institucionales, lo anterior difiere de los índices que miden la escasez de agua dado que éstos se basan únicamente en comparaciones entre oferta y demanda hídrica, como sucede con el índice de estrés hídrico relativo (UNESCO, 2009), índice de pobreza del agua – IWP (Komnenic *et al,* 2009) e índice de escasez o índice de uso del agua (IUA) (MAVDT, 2004).

Al igual que los índices de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico (Alessa *et al.,* 2008), el índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad (Kim y Chung, 2013) y el índice integrado de vulnerabilidad del agua (Plummer *et al.,* 2013), el índice IVUSAS permite una evaluación integrada de la vulnerabilidad, sin embargo difiere de los otros tres índices, en que es más sencillo dado que está constituido solamente por nueve (9) indicadores, mientras que el índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico (Alessa *et al.,* 2008), el índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad (Kim y Chung, 2013) y el índice integrado de vulnerabilidad del agua (Plummer *et al.,* 2013), están conformados por 21, 24 y 106 indicadores respectivamente, lo que los hace demasiado complejos y robustos para los tomadores de decisiones.

El índice IVUSAS, está conformado por tres (3) subíndices: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación; mientras otros estudios como el índice de vulnerabilidad del agua (Plummer *et al.,* 2013) incluye las dimensiones de: recursos hídricos, entorno físico, economía, instituciones y entorno social; el índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos está compuesto por las dimensiones de subsistema hidrológico, subsistema socioeconómico, subsistema ecoambiental y susbsistema de ingeniería hidráulica (Wang *et al*.,2012); el índice de vulnerabilidad de los recursos de agua dulce (Babel *et al,* 2011) incluye dos (2) subíndices: estrés hídrico y capacidad de adaptación y el índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico incluye dos (2) subíndices tales como:

físico y social (Alessa *et al*., 2008); el índice de vulnerabilidad del suministro de agua al cambio climático y la variabilidad (Kim y Chung, 2013) es el que más se asemeja al IVUSAS en relación a los subíndices que lo conforman, dado que también está compuesto por los subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, sin embargo difiere del índice IVUSAS en que los indicadores son diferentes y no involucra recomendaciones en cuanto a las acciones de intervención.

Los indicadores que hacen parte del índice IVUSAS, están enmarcados en el concepto de vulnerabilidad, y son agregados a través del uso de la lógica difusa, lo que constituye un elemento innovador en cuanto a las metodologías tradicionalmente usadas para la construcción de índices, la lógica difusa resultó ser un método adecuado y útil para la construcción del índice propuesto; de los estudios revisados donde se han desarrollado índices de riesgo y vulnerabilidad del recurso hídrico, ninguno utiliza esta metodología; para la construcción del índice de pobreza del agua (IWP) (Komnenic et al, 2009) y el índice de vulnerabilidad del agua (Plummer et al., 2013) utilizaron un método de agregación simple como lo es el promedio ponderado; por su parte para la formulación del índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos del Ártico (Alessa *et al*., 2008), el índice de riesgo hidrológico combinado (IRHC) (Rommanazzi *et al.,* 2014) y el índice de riesgo dinámico de escasez de agua (Gain y Giupponi, 2015), usaron métodos participativos como Delphi o panel de expertos.

De manera adicional dentro de las fortalezas que posee el índice IVUSAS, se debe mencionar que éste cuenta con una serie de recomendaciones en cuanto a las acciones de intervención a corto, mediano y largo plazo que pueden ser aplicadas en la subcuenca objeto de estudio, dichas acciones varían de acuerdo al resultado obtenido para el índice, lo anterior es un elemento que fortalece el IVUSAS, dado que no se limita a emitir una calificación sobre el nivel de vulnerabilidad de la subcuenca o la zona de la subcuenca analizada, sino que también guía al usuario o tomador de decisión, sobre las acciones que se deben implementar.

Así mismo, la conformación de fichas técnicas para cada uno de los indicadores definidos así como para el índice propuesto – IVUSAS, constituye una fortaleza del presente trabajo, dado que son herramientas útiles para los futuros usuarios del índice, puesto que provee información necesaria sobre el alcance de cada uno, zona de aplicación, fórmula o forma de estimación, categorías de respuesta, posibles fuentes de datos; dicha información facilita al usuario la comprensión y uso del índice propuesto.

La aplicación del índice IVUSAS en las zonas alta, media y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá, Valle del Cauca, tuvo una calificación de alto para las zonas alta y baja, y una calificación de medio para la zona media de la subcuenca, de lo que se deduce que se hace necesario la implementación de acciones a corto, mediano y largo plazo en la subcuenca zona baja del río Tuluá, que permita disminuir la vulnerabilidad existente a sequía hidrológica del río Tuluá. La valoración obtenida para el índice IVSAS coincide con situación real de la subcuenca y con los resultados del análisis de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico realizado por (IDEAM, 2014) donde concluye que para la

subzona hidrográfica del río Tuluá existe una vulnerabilidad alta de desabastecimiento hídrico.

De otra parte, es pertinente mencionar que el índice IVUSAS, requiere ser aplicado en otras subcuencas de la zona andina para efectos de fortalecerlo y ajustarlo.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Los indicadores seleccionados para integrar el índice IVUSAS, se enmarcan dentro del modelo teórico basado en el concepto de vulnerabilidad, que involucra las dimensiones exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación; en la dimensión de exposición se incluyen dos (2) indicadores: Anomalía de precipitación (AP) y densidad poblacional (DP), en la dimensión de sensibilidad se encuentran: franja forestal protectora (FFP), uso de agua (IUA) y conflictos en la distribución del agua (CDA) y en la dimensión de la capacidad de adaptación se involucran los indicadores de gestión de la demanda (GD), medidas de atención de emergencias (MAE), sistema de alerta temprana (SAT) y asociaciones de usuarios del recurso hídrico (AURH).

- Para cada uno de los indicadores que alimenta el índice IVUSAS, se construyó una ficha técnica, la cual resume la información referente a nombre, descripción, dimensión, zona de aplicación, cálculo/estimación, categoría de respuesta y posibles fuentes de información, dichas fichas constituyen una herramienta que facilita a los usuarios la compresión y uso de cada uno de los indicadores que integran el índice ya que les permite visualizar mejor sus características.

- El índice IVUSAS, fue construido utilizado un modelo basado en lógica difusa en el cual se usaron funciones de pertenencia triangulares, trapezoidales y tipo singleton, se estableció una base de conocimientos conformada por 127 reglas de decisión de tipo *si – entonces.*

- El índice IVUSAS, se propone como un herramienta sencilla e integrada que considera aspectos sociales, ambientales e institucionales para evaluar la vulnerabilidad ante sequías de fuentes de agua superficial en subcuencas andinas, útil para los tomadores decisiones de tal manera que puedan direccionar los recursos económicos disponibles para la gestión y las acciones de prevención, mitigación y adaptación, hacia aquellas subcuencas más vulnerables.

- El índice IVUSAS no se limita a concluir si la vulnerabilidad de sequía de la fuente de agua superficial en la subcuenca es alta, media o baja, sino que involucra un

valor agregado que consiste en la definición de 45 acciones de intervención que orientan al tomador de decisiones acerca de cómo puede actuar frente a determinado resultado obtenido para el índice IVUSAS. Para cada uno de las posibles conclusiones del índice: alto, medio o bajo, corresponden 15 acciones de intervención, las cuales se recomiendan sean aplicadas a diferentes plazos (corto, mediano y largo plazo) en la subcuenca evaluada.

- Los indicadores definidos para la dimensión de exposición, se determinaron para las diferentes zonas de la subcuenca zona baja del río Tuluá – Valle del Cauca, permitiendo concluir que para la zona alta, media y baja, la exposición es alta, media y alta respectivamente.

- Los indicadores incluidos en la dimensión de sensibilidad, se determinaron para la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá, permitiendo concluir que la sensibilidad es alta para las tres zonas de la subcuenca.

- La capacidad de adaptación fue determinada para las diferentes zonas de la subcuenca zona baja del río Tuluá, resultando que la capacidad de adaptación es baja para la zona alta y zona baja, y es media para la zona media de la subcuenca estudiada.

- En las zonas alta y baja de la subcuenca zona baja río Tuluá, el índice IVUSAS resultó ser alto y en la zona media el IVUSAS es medio.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda aplicar el índice IVUSAS en otras subcuencas andinas que posean condiciones ambientales diferentes, con la finalidad de evaluar la idoneidad del índice propuesto en el presente trabajo.

- Se recomienda aplicar el índice IVUSAS en otras escalas espaciales como microcuencas andinas, con la finalidad de evaluar la pertinencia y funcionalidad del índice propuesto en el presente trabajo en áreas más pequeñas.

- A pesar de que el índice IVUSAS puede ser determinado de manera manual, se recomienda la utilización del software Matlab, para facilitar y agilizar la determinación del índice.

- Al iniciar el proceso de aplicación del índice se recomienda que el usuario revise detenidamente las fichas técnicas de los indicadores que alimentan el índice para efectos de que visualicen claramente el alcance de cada indicador, la información que se debe recolectar y las posibles fuentes de información.

- Se recomienda que el índice se aplique con una frecuencia anual para monitorear el avance en la reducción de los niveles de vulnerabilidad a sequias de agua superficial en subcuencas andinas.

A. Anexo. Entrevista usuarios del agua subcuenca zona baja río Tuluá

Usuario:_____

Uso principal del agua superficial_____

Ubicación_____

1. ¿Cuál o cuáles de las siguientes acciones implementa para reducir la demanda del río Tuluá: gestión de pérdidas, tecnología eficiente usada para riego, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras?. En caso de que la respuesta sea otras ¿Cuáles?.

2. Ha implementado algún mecanismo de alerta temprana que le permita detectar sequías del río Tuluá? Si o no, justifique respuesta.

3. Por favor indicar con base en su percepción, si el nivel de conflictos en la distribución del agua existente en la zona donde se ubica su captación se considera alto, medio o bajo. Por favor justificar respuesta.

4. ¿En caso de que se presente una situación de sequía del río Tuluá, que ocasione que usted no pueda captar el caudal asignado del río Tuluá, ¿cuál o cuáles de las siguientes acciones implementa para atender esta emergencia: sistemas de almacenamiento, fuentes alternas de abastecimiento, turnos de riego u otras acciones para atender la emergencia?. En caso de que haya respondido otras acciones ¿cuáles?.

5. ¿Conoce de la existencia de alguna asociación de usuarios del recurso hídrico en su territorio?¿Cuál?; ¿Pertenece a dicha asociación?.

B. Anexo. Entrevista autoridad ambiental

Entidad:_____

Nota. Previo al desarrollo de la entrevista se delimita al entrevistado el área de estudio, y se aclara exactamente cuál es la zona considera como alta, media y baja de la subcuenca en estudio.

1. ¿La autoridad ambiental ha implementado o apoyado la implementación de acciones dirigidas a reducir la demanda de agua superficial en la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá, tales como gestión de pérdidas, reasignación de agua, sensibilización en uso eficiente y ahorro de agua, otras? En caso de que la respuesta sea otras ¿Cuáles?.

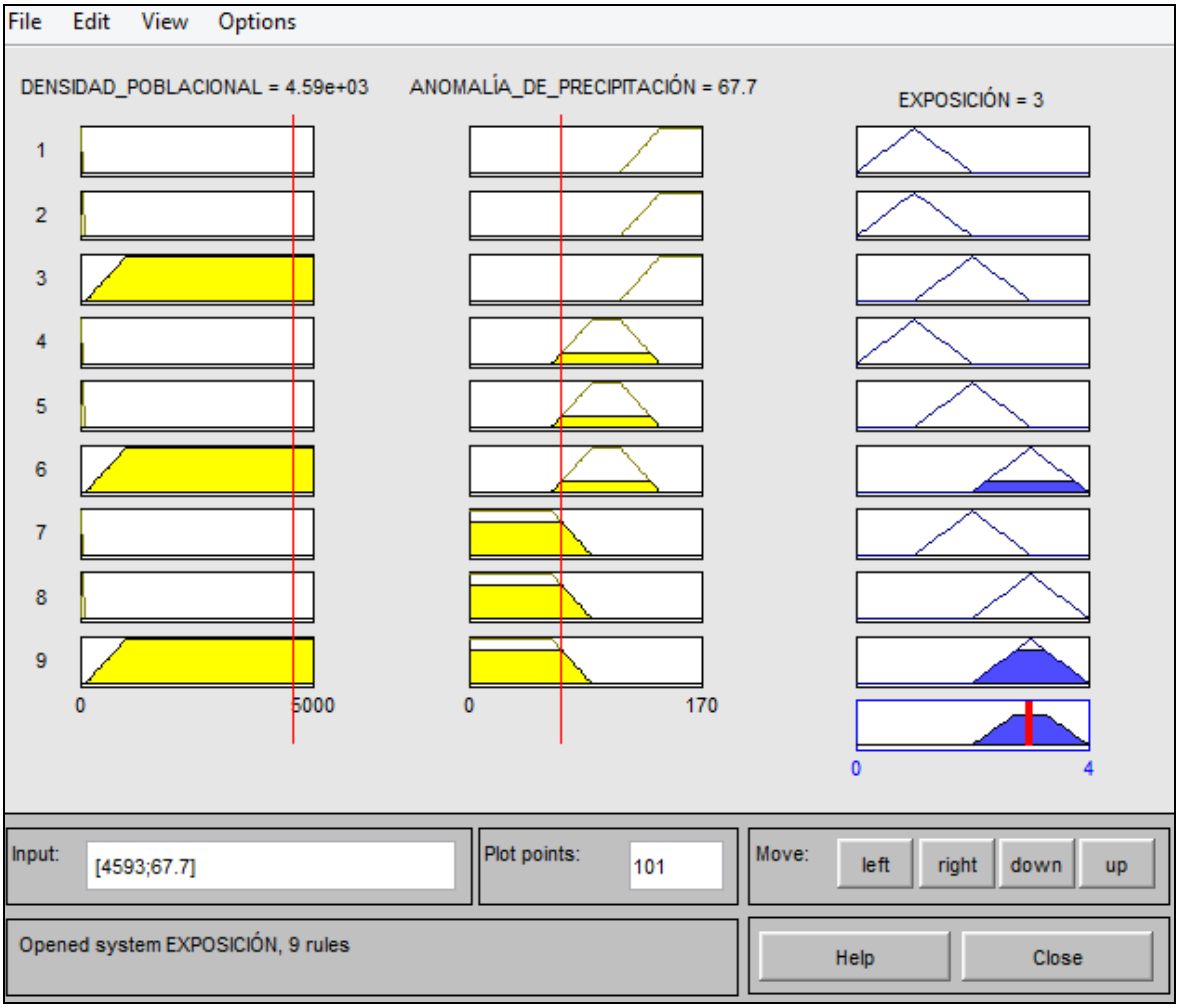
2. ¿La autoridad ambiental ha implementado o apoyado la implementación de mecanismos de alertas tempranas en la zona alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá, que permitan caracterizar el régimen de caudales, para así determinar la oferta hídrica del río Tuluá en época de sequía? En caso de que la respuesta sea afirmativa describir los mecanismos implementados.

3. Califique como alto, medio o bajo el nivel de conflictos en la distribución del agua existentes en las zonas alta, media y baja de la subcuenca zona baja del río Tuluá (Se debe asignar una calificación independiente para cada zona de la subcuenca).

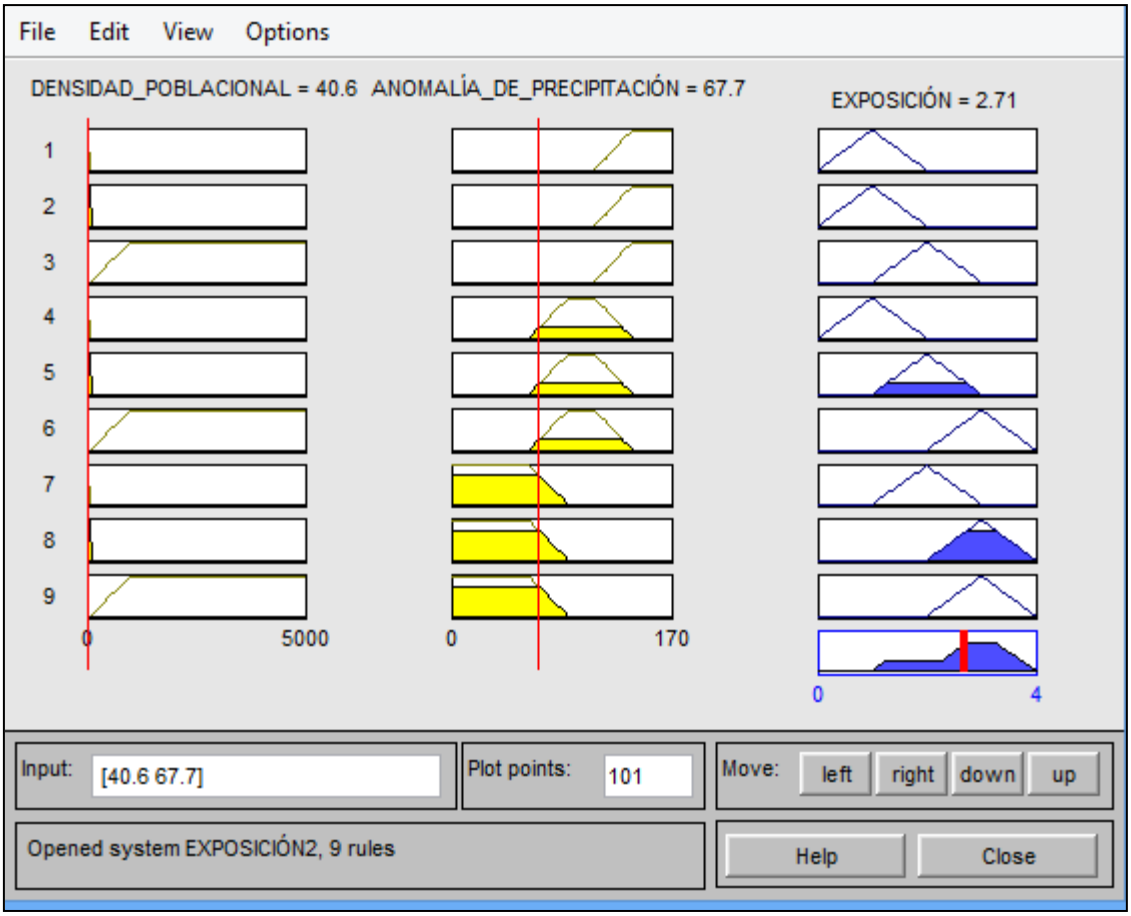
4. ¿Qué asociaciones de usuarios del recurso hídrico existen y operan en cada una de las zonas (alta, media y baja) de la subcuenca zona baja del río Tuluá?.

5. ¿En caso de que se presente una situación de sequía del río Tuluá, que ocasione imposibilidad de captar agua del río Tuluá para los diferentes usos, ¿Qué acciones implementa o apoya la autoridad ambiental para atender este tipo de emergencias?.

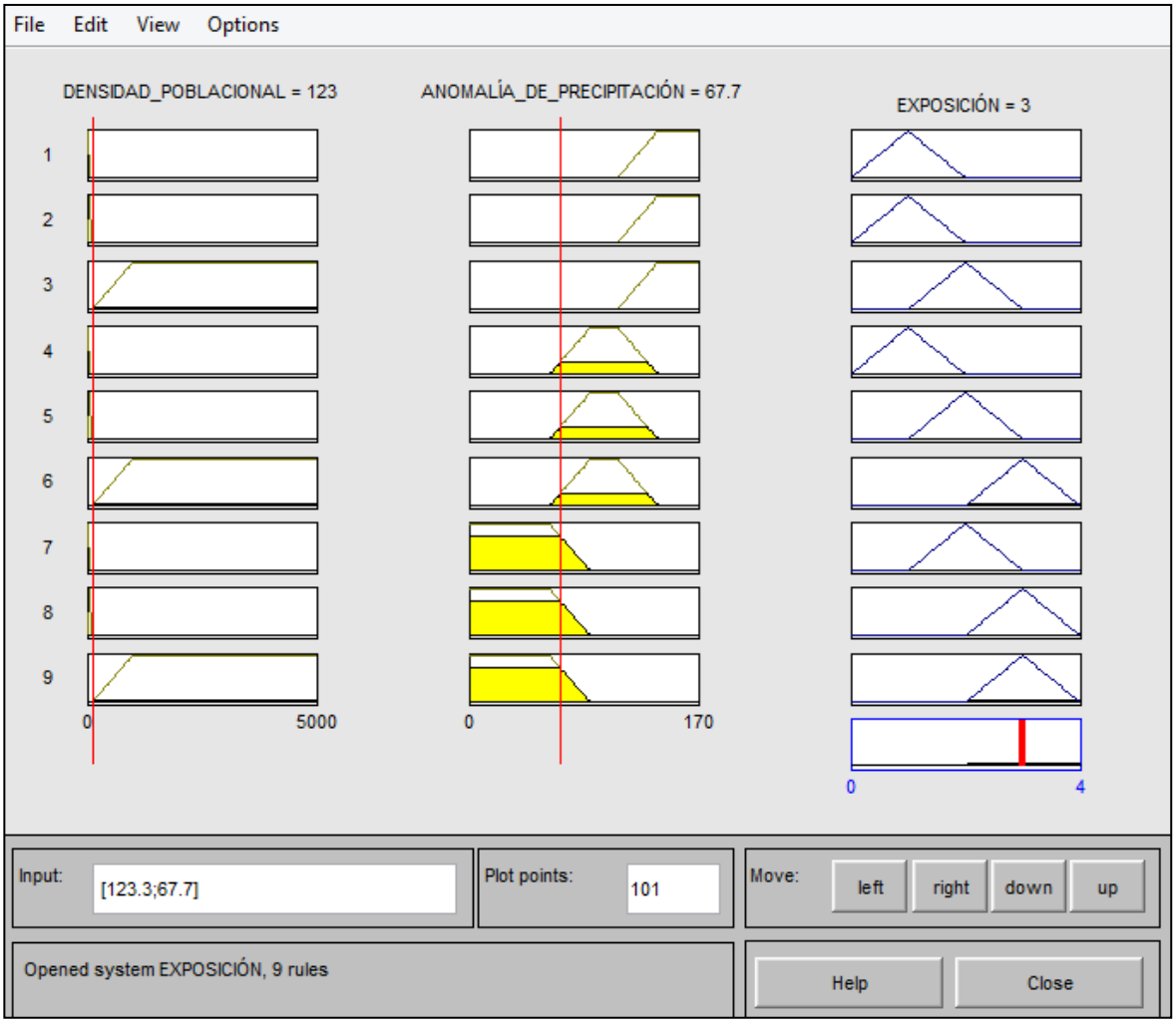
C. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá



D. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona media, subcuenca zona baja río Tuluá

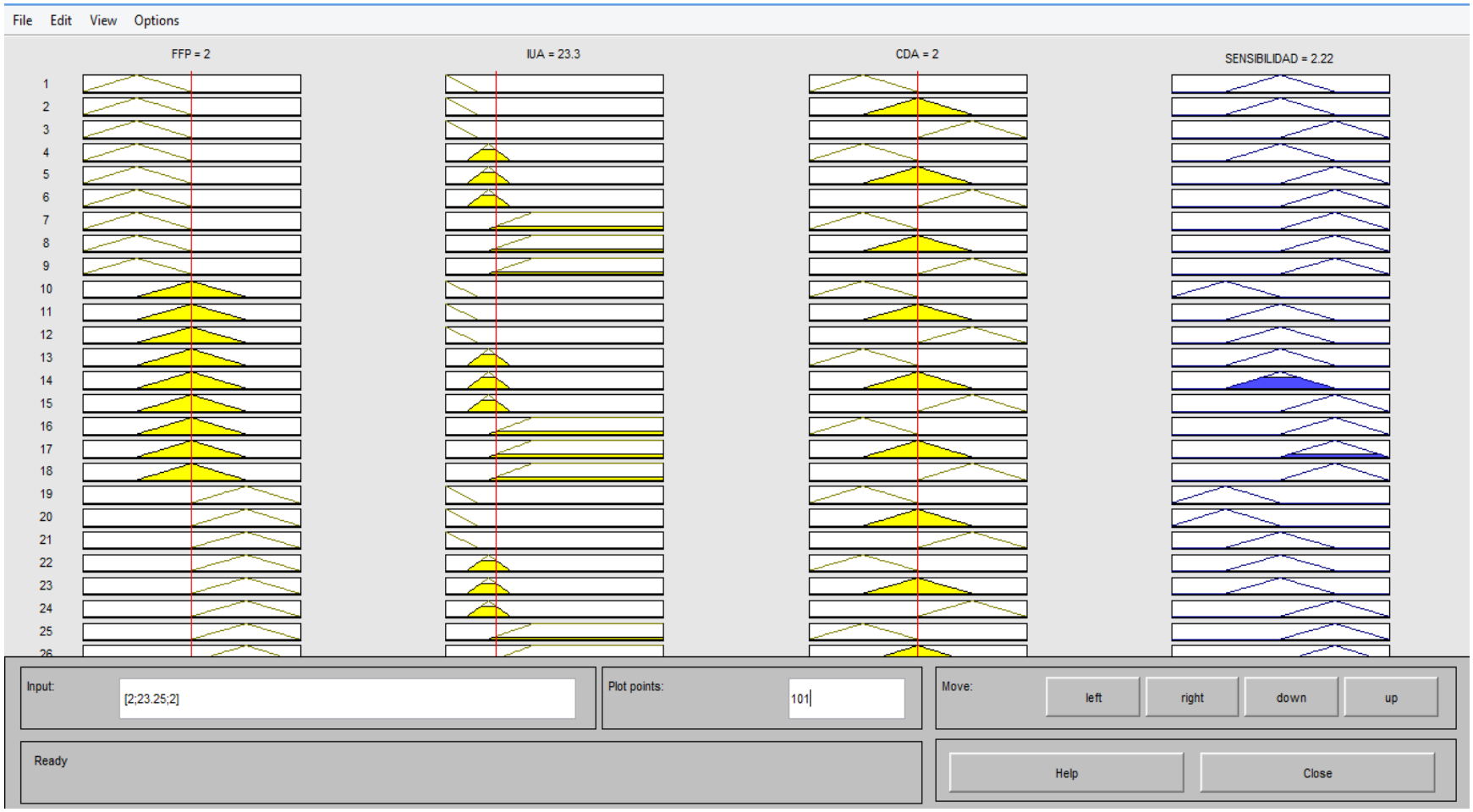


E. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de exposición zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá

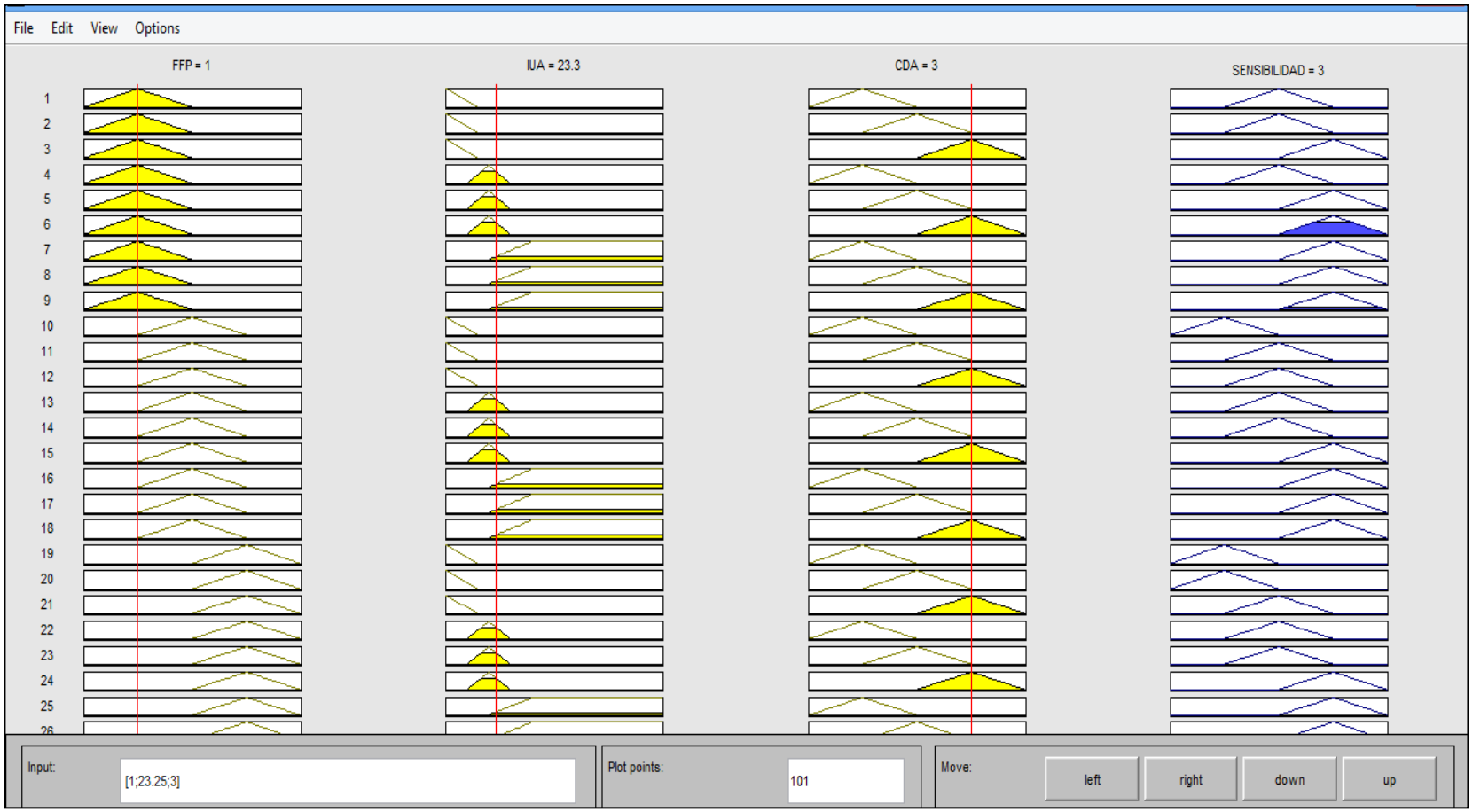


F. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá

G. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona media, subcuenca zona baja río Tuluá

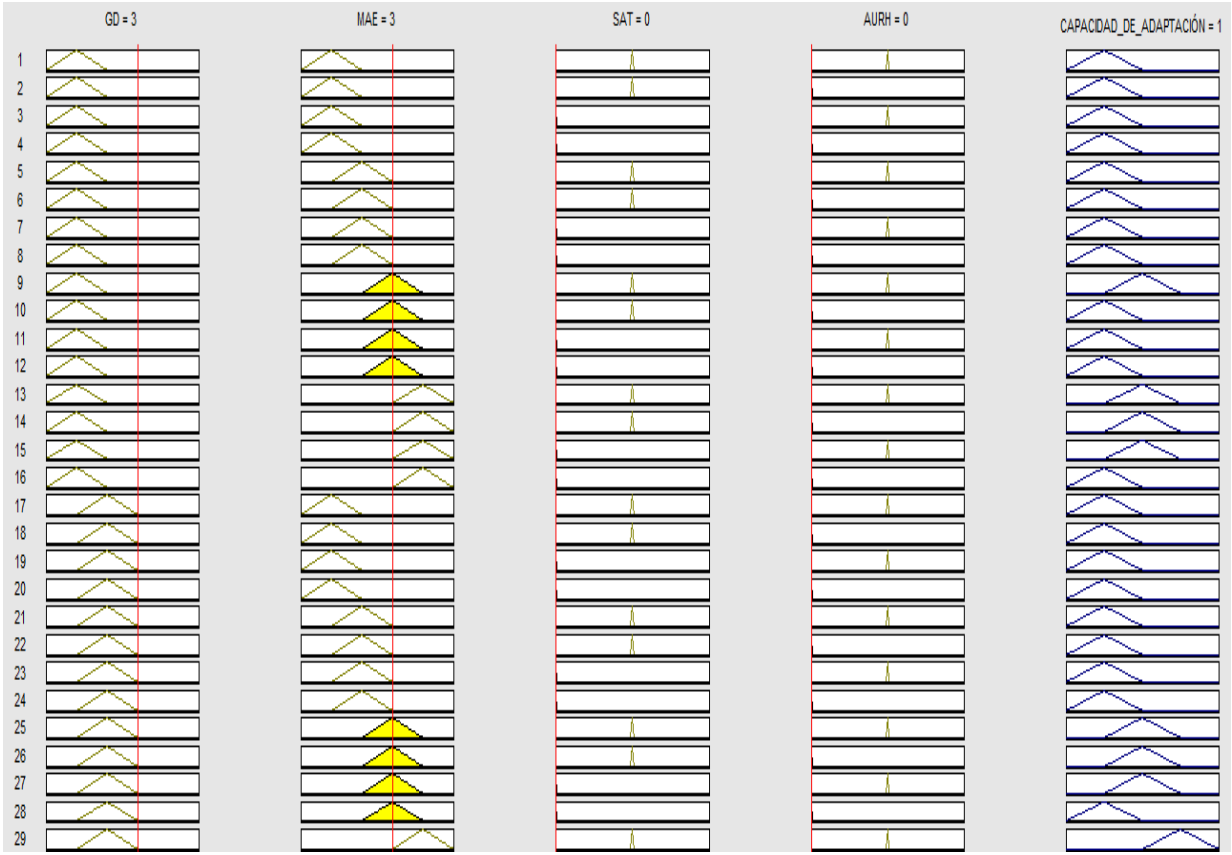


H. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de sensibilidad zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá

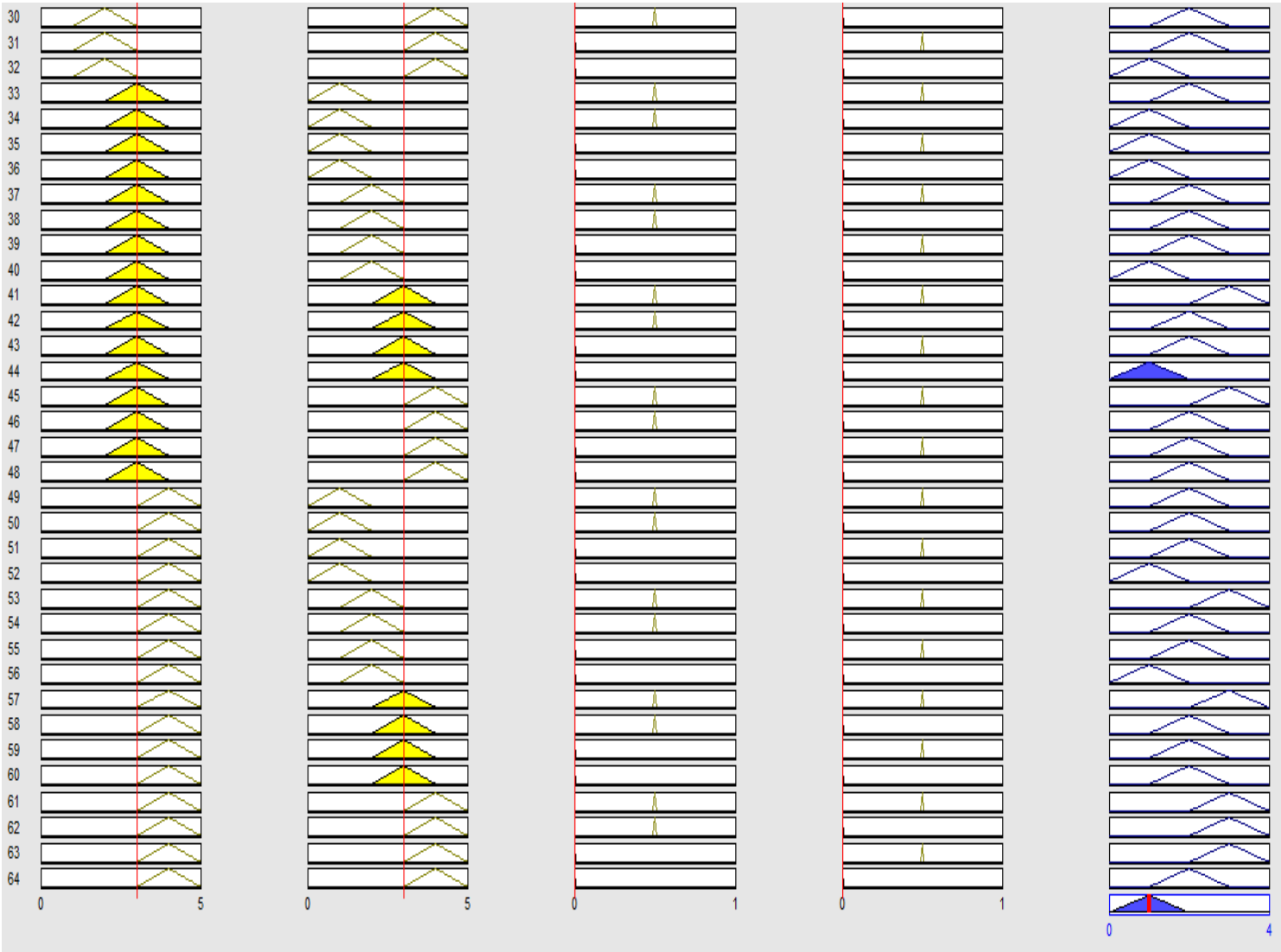


I. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona alta, subcuenca zona baja río Tuluá

Parte 1.

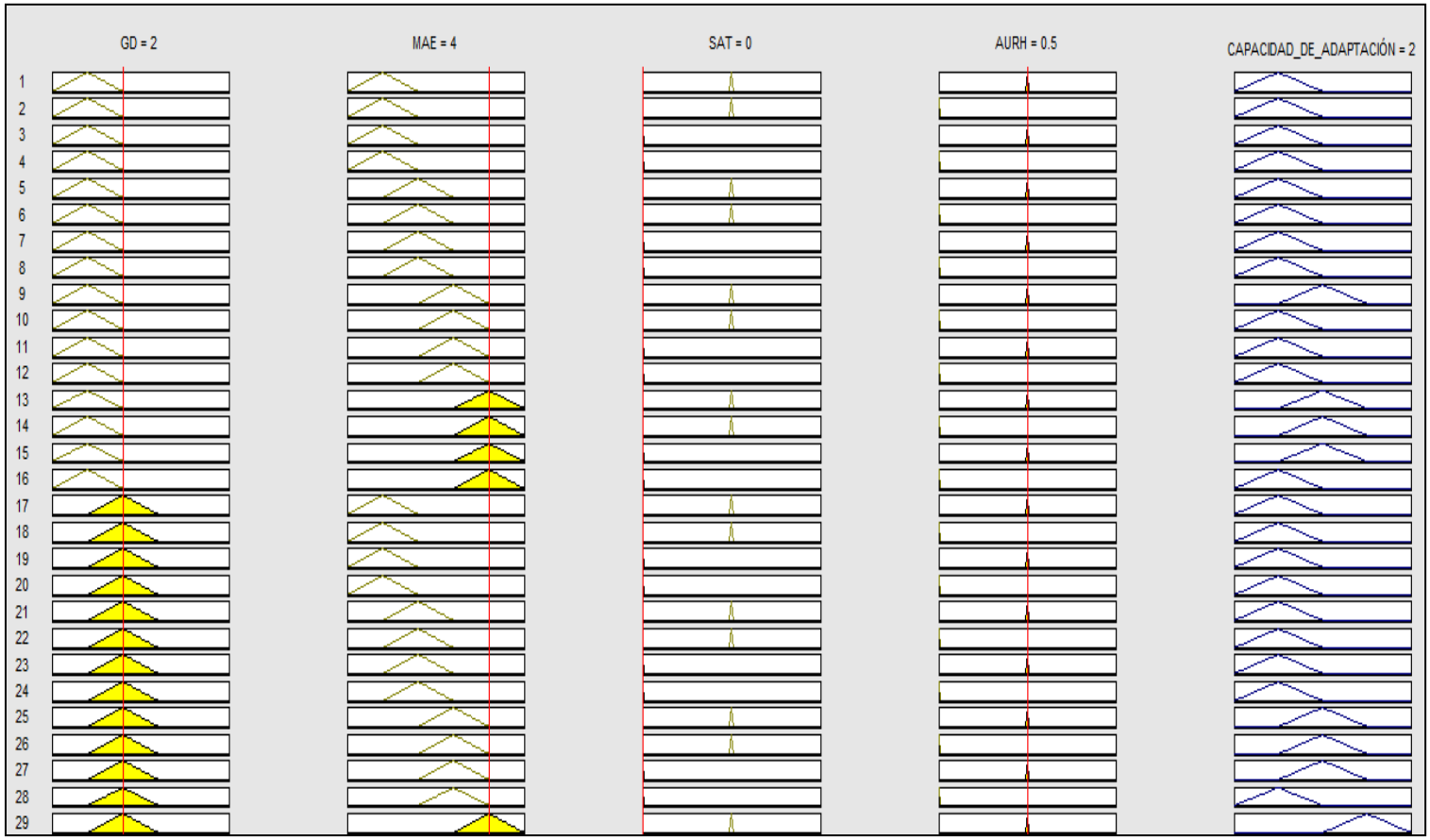


Parte 2.

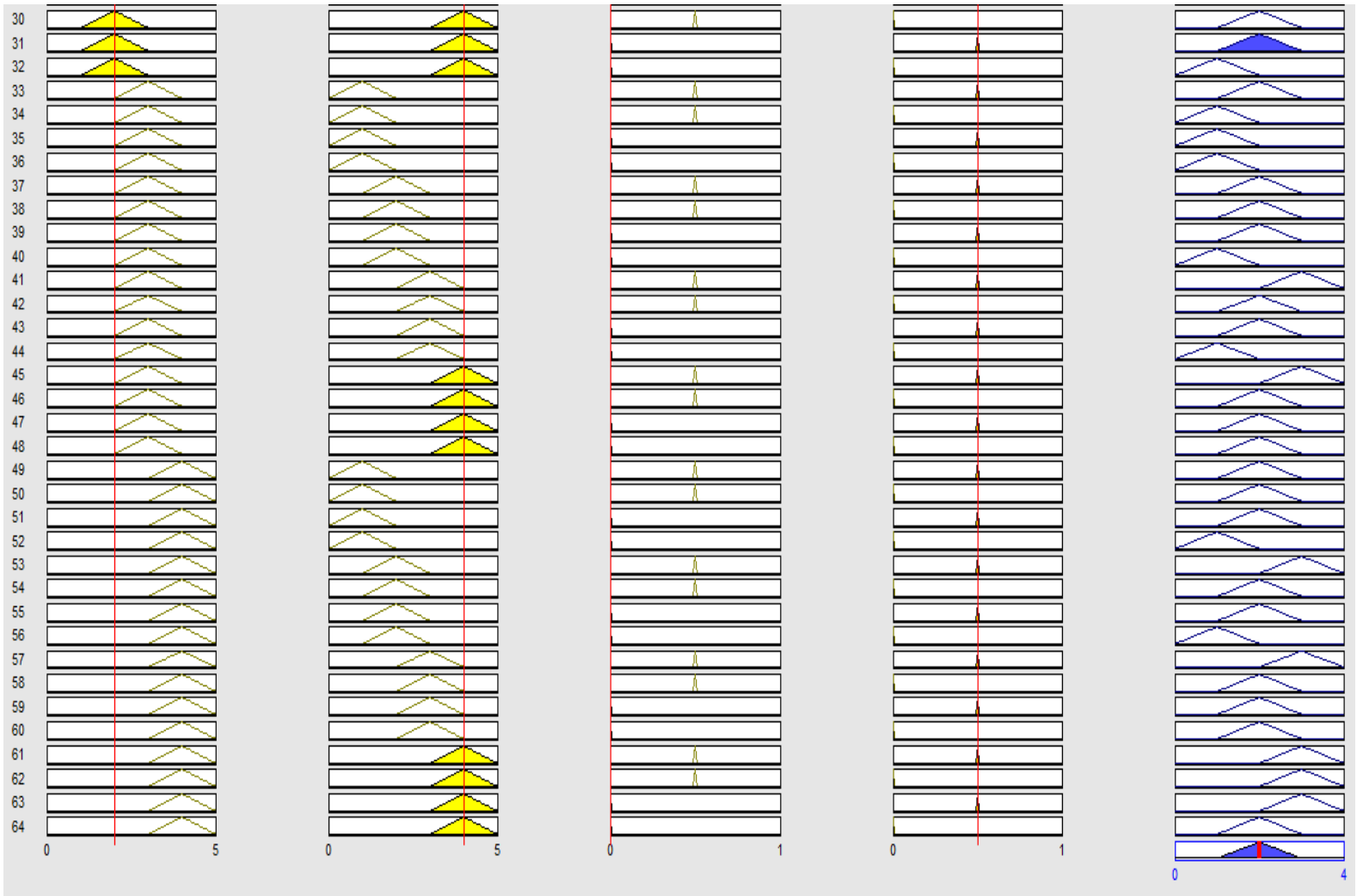

30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
0
5
0
5
0
1
0
1
0
4

J. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona media, subcuenca zona baja río Tuluá

Parte 1.

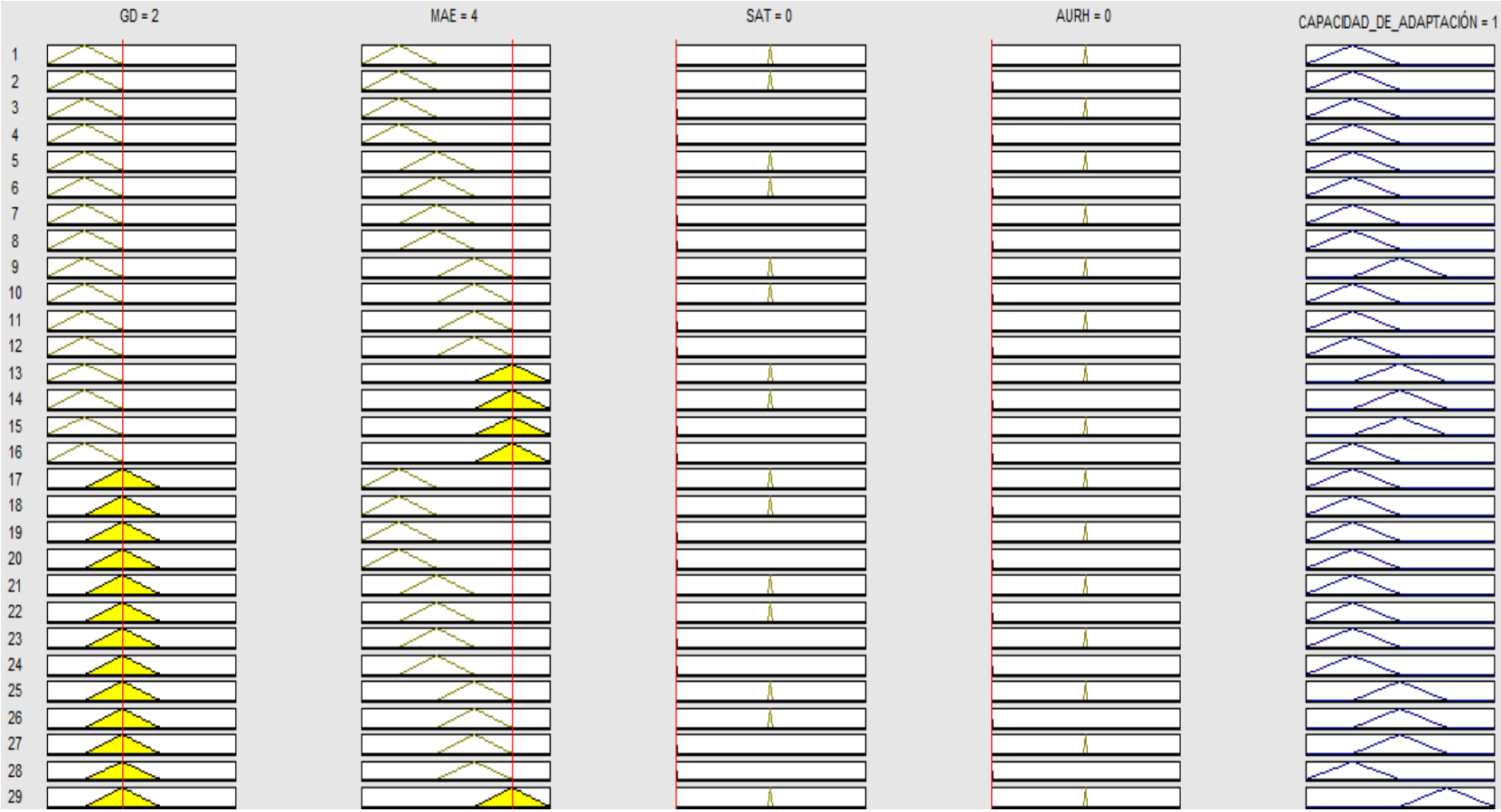


Parte 2.

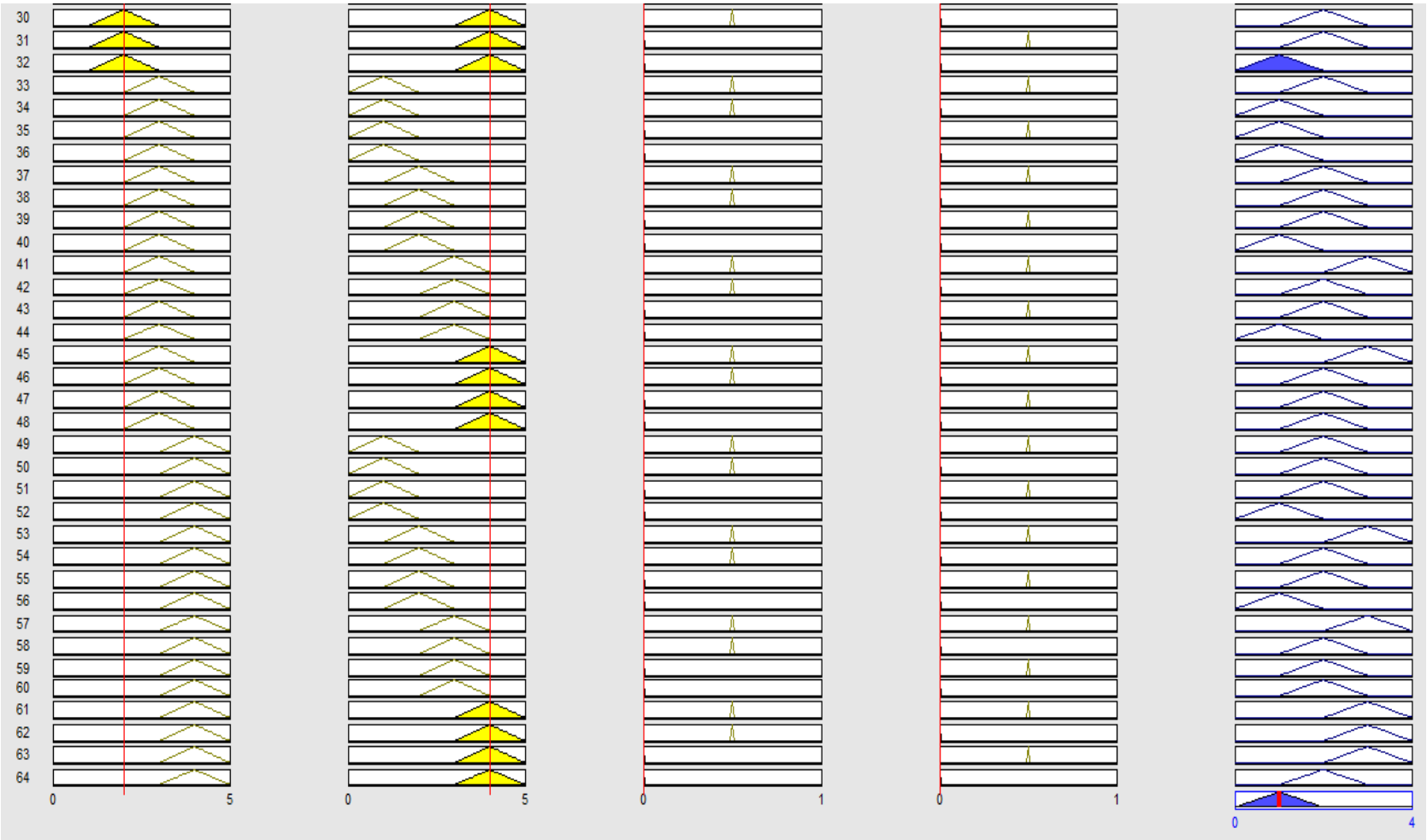

30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
0
5
0
5
0
1
0
1
0
4

K. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab subíndice de capacidad de adaptación zona baja, subcuenca zona baja río Tuluá

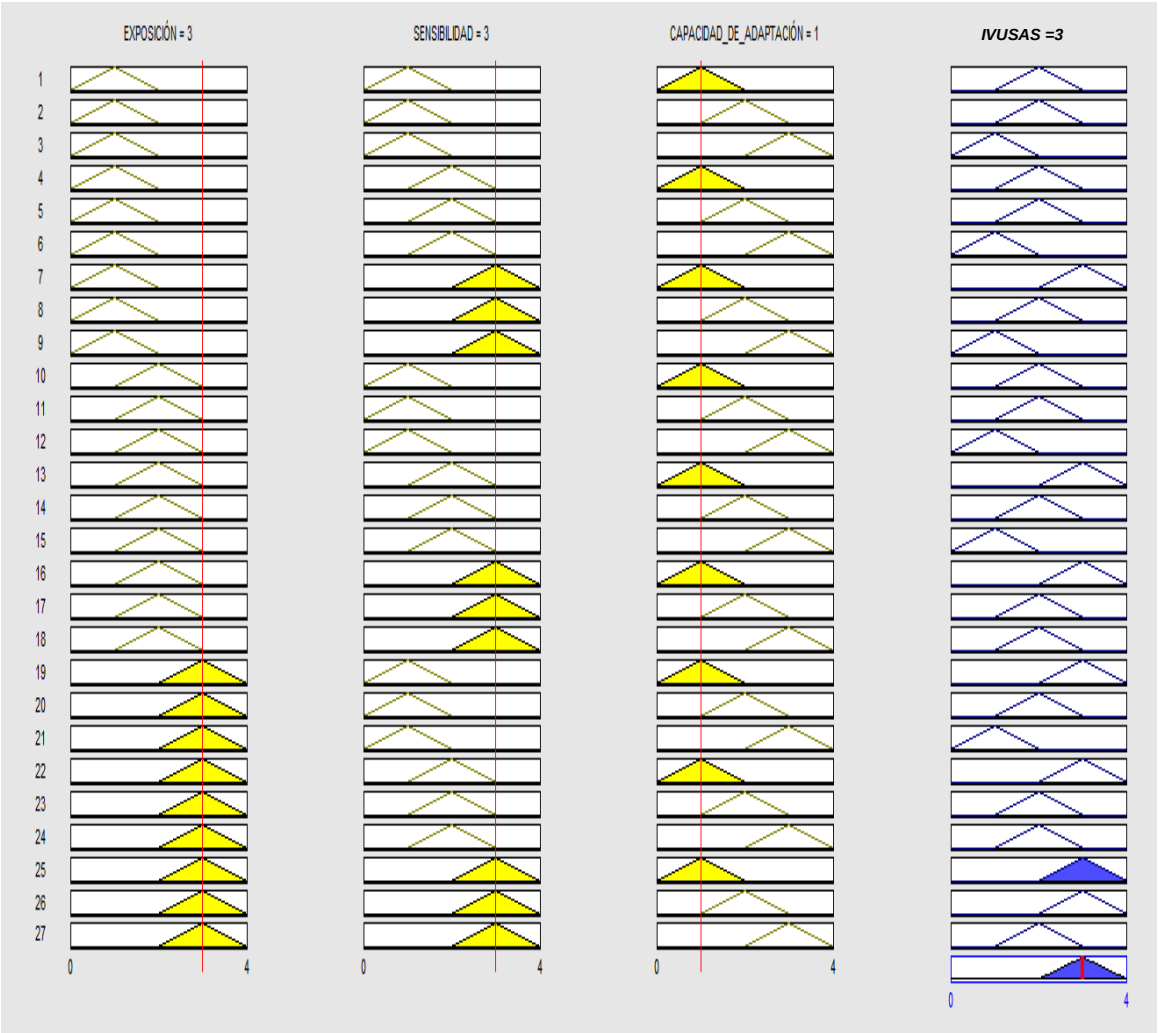
Parte 1.



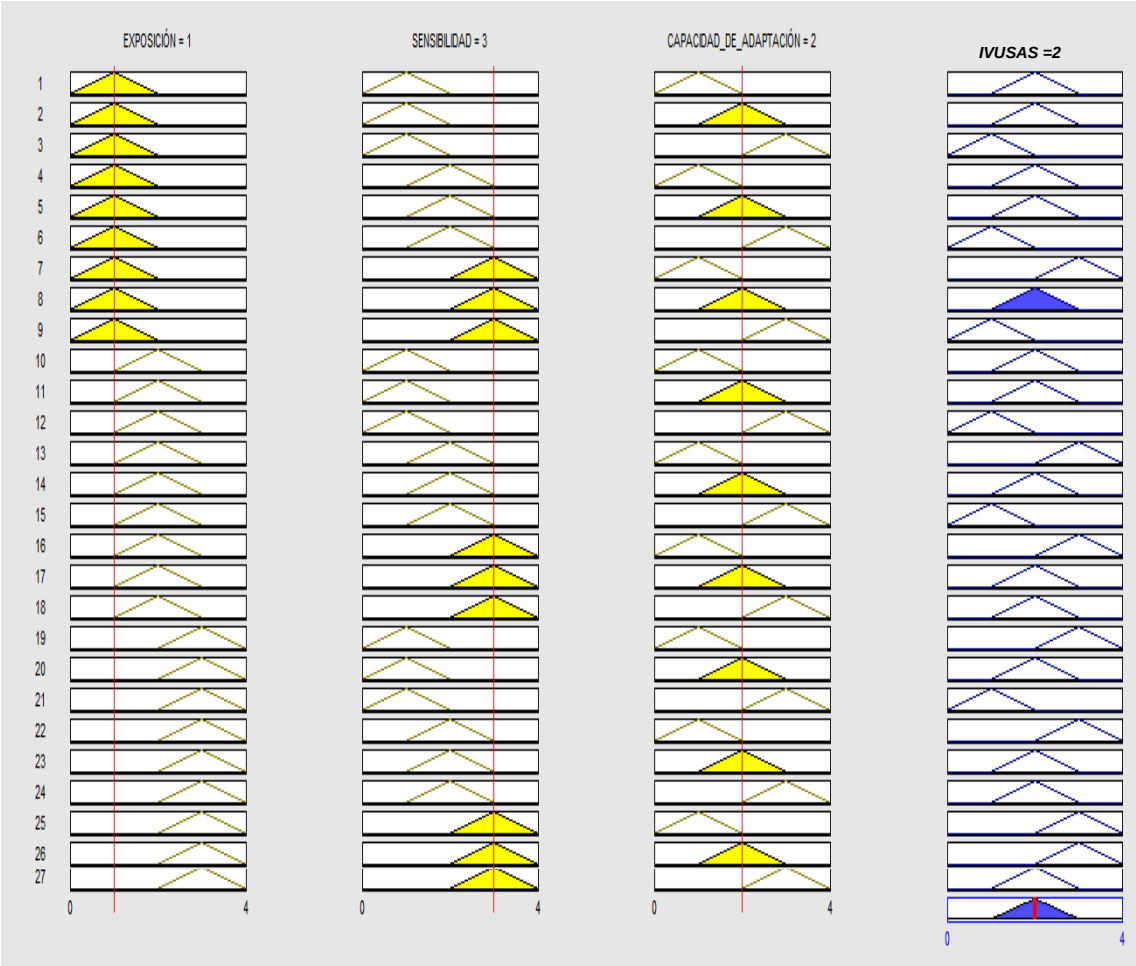
Parte 2.


30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
0
5
0
5
0
1
0
1
0
4

L. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab índice IVUSAS zona alta y baja, subcuenca zona baja río Tuluá



M. Anexo. Proceso de defusificación en Matlab índice IVUSAS zona media, subcuenca zona baja río Tuluá



Bibliografía

Abuodha, P., Woodroffe, C.D.(2010).Vulnerability assessment D.R. Green (Ed.), Coastal Zone Management, Thomas Telford Ltd, London, pp. 262‑290

Alcaldía Municipal de Tuluá, 2014. *Anuario estadístico municipio de Tuluá 2014*. Recuperado el 20 de febrero de 2016, obtenido de http://tulua.gov.co/documentos.shtml

Alessa, L., Kliskey, A., Lammers, R., Arp, C., White, D., Hinzman, L.,(2008). An integrated freshwater resilience index for the arctic. Journal of Environmental Management, Vol. 42, pp. 523-541.

American Meteorological Society (AMS) (2004). *Statement on meteorological drought*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 85 pp. 771‑773

Aras F., Karakaş E., Biçen Y. (2014). Fuzzy logic-based user interface design for risk assessment considering human factor: A case study for high-voltage cell, Safety Science, Volume 70, Pages 387-396

Ávila, P. (2008). *Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México Ciencias*, Núm. 90, abril-junio, 2008, pp. 46-57 Universidad Nacional Autónoma de México. *Ciencias*, (90), 46-57.

Babel, M. S., Pandey, V. P., Rivas, A. A., & Wahid, S. M. (2011). *Indicator-based approach for assessing the vulnerability of freshwater resources in the Bagmati River basin, Nepal*. Environmental management, 48(5), 1044-1059.

Bakova I. (2012). *Discurso ofrecido al panel de debate de alto nivel organizado por el gobierno de Finlandia durante la Conferencia de Río+20.*

Banco Interamericano de desarrollo – BID (2015). *Indicadores de Riesgo de Desastre y de Gestión de Riesgos Programa para América Latina y el Caribe.* Recuperado el 14 de abril de 2015, obtenido de https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7001/Indicadores_Riesgo_Desastre_Gestion_Riesgos_Colombia.pdf?sequence=1

Barnett J.,Lambert S., Fry, I., (2008). The Hazards of Indicators: Insights from the Environmental Vulnerability Index, Annals of the Association of American Geographers, Vol. 98, , pp. 102-119

Benito, T. y Durán, M.I. (2011). *Lógica borrosa.* Recuperado el 14 de abril de 2014, obtenido de http://ingtecnologia.files.wordpress.com/2011/06/logica-difusa2pdf.pdf

Bernal, N., Martínez, J., Pabón J.D., (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos.* Bogotá D.C, Colombia: Instituto de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Calle, E. D., Rivera, H. G., Sarmiento, R. V., & Moreno, P. (2008). *Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano.* Rev. Acad. Colomb. Ciencia, 32(123), 195-212.

Carreño Tibaduiza, M. L., Cardona Arboleda, O. D., & Barbat Barbat, H. A. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

Carroll, N., Frijters, P., Shields, M.A. (2009). Quantifying the costs of drought: new evidence from life satisfaction data, J. Population Econ., 22 (2), pp. 445–461

Cenicaña, 2015.*Riego por surco alterno.* Recuperado el 26 de septiembre de 2016, obtenido de http://www.cenicana.org/web/programas-de-investigacion/agronomia/manejo-de-aguas/metodos-de-aplicacion-del-riego/riego-por-surcos.

Centroaguas S.A ESP (2015). El agua nuestro mayor tesoro. Recuperado el 02 de agosto de 2016, obtenido de http://www.centroaguas.com/index.php/responsabilidad-social/gestion-social/el-agua-nuestro-mayor-tesoro.

Centroaguas S.A ESP (2015). El agua nuestro mayor tesoro. Recuperado el 02 de agosto de 2016, obtenido de http://www.centroaguas.com/index.php/responsabilidad-social/gestion-social/jornadas-educativas.

CIAT, (2012). *Vulnerabilidad y estrategias de adaptación al cambio climático en los medios de vida de las familias cafetaleras del El Salvador*. Recuperado el 10 de febrero de 2016, obtenido de: http://dapa.ciat.cgiar.org/wp-content/uploads/2012/05/Informe_final_de_Vulnerabilidad-CUP-ES-2012.pdf.

Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (2013). *Marco normativo de promoción sobre la cuestión temática de la sequía, incluida la escasez de agua.* Recuperado el 22 de octubre de 2014, obtenido de http://www.unccd.int/Lists/OfficialDocuments/cric11/17spa.pdf

Cooley, H. (2006). Floods and droughts, P. Gleick, G. Wolff, H. Cooley, M. Palaniappan, A. Samulon, E. Lee, J. Morrison, D. Katz (Eds.), The World's Water 2006‑2007: The Biennial Report on Freshwater Resources, Island Press, p. 392

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC.y Universidad del Valle. (2006). *Planes de ordenamiento ambiental y manejo de cuencas hidrográficas. Informe preliminar de diagnóstico, cuenca del río Tuluá*.. Documento sin publicar.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y Gaiacol (2007). *Caudales específicos para las cuencas en el departamento del Valle del Cauca.* Recuperado el 27 de febrero de 2016, obtenido de *http://www.cvc.gov.co/cvc/RecursoHidrico/aplicativos/RendimientoCaudales/documentos/marcoTeorico/caudalEspecifico.pdf*

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y Corpocuencas (2011). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Tuluá.* Recuperado el 27 de febrero de 2016, obtenido de http://www.cvc.gov.co/images/CVC/Gestion_Corporativa/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/Tulua/POMCH%20TULUA_1.pdf

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC (2016). *Nueva estación hidrométrica y pluviométrica*. Recuperado el 19 de agosto de 2016, obtenido de http://www.cvc.gov.co/index.php/carousel/2284-nueva-estacion-hidrometrica-y-pluviometrica

Choat,B., Jansen,S., Brodribb,T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Feild, T.S. , Gleason, S.M., Hacke, U.G., Jacobsen, A.L., Lens, F., Maherali, H., Martinez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J., Zanne, A.E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought, Nature, 491 (7426), pp. 752–755

Cutter, S.L., Mitchell, J.T., Scott, M.S. (2000).Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown county, South Carolina, Ann. Assoc. Am. Geogr., 90, pp. 713–737

Delgado, G. B., Delgado, J. B., El Burrioncito, E., & Guasave, S. (2014). *Metodología para la implementación de sistemas difusos tipo mamdani en lenguajes de programación de propósito general.* In *Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica* (Vol. 36, pp. 318-323).

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, 2005. *Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020.* Recuperado el 25 de agosto de 2016, obtenido de http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

Deressa, T., Hassan, R.M., Ringler, C.(2008). *Measuring Ethiopian farmers' vulnerability to climate change across regional states.* Environment and Production Technology Division, IFPRI Discussion Paper

Domínguez, C. E. A., Gonzalo, R. H., Vanegas, S., Raquel y Moreno, P. (2008). *Relaciones Demanda-Oferta de Agua y el Índice de Escasez de Agua como Herramientas de Evaluación del Recurso Hídrico Colombiano*. Revista de la Academia Colombiana de la Ciencia., XXXII, 195-212.

Dobbie M.J, Dail D.(2013). *Robustness and sensitivity of weighting and aggregation in constructing composite indices*, Ecological Indicators, Vol. 29, pp. 270-277

Ebi, Kristie L. y Bowen Kathryn. (2016). *Extreme events as sources of health vulnerability: Drought as an example*, Weather and Climate Extremes, Volume 11, pp 95-102

El Congreso de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. *Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Recuperado el 14 de abril de 2014, obtenido de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47141

El fenómeno del Niño habría llegado a su máxima intensidad (4 de enero de 2016). El Tiempo. Recuperado el 22 de mayo de 2016, obtenido de http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/impacto-del-fenomeno-del-nino-en-colombia/16473058

En Zarzal, norte del Valle, sin agua 16 horas diarias (18 de febrero de 2016). El Tiempo. Recuperado el 22 de mayo de 2016, obtenido de http://www.eltiempo.com/colombia/cali/zarzal-norte-del-valle-sin-agua/16514224

Fellmann,T. (2012).*The Assessment of Climate Change Related Vulnerability in the Agricultural Sector: Reviewing Conceptual Frameworks in FAO/OECD Workshop on* Building Resilience for Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector, RedRoom

Fontaine M.M y Steinemann A.C (2009). Assessing vulnerability to natural hazards: impact-based method and application to drought in Washington state. Nat. Hazards Review. NHR, Volume 10, pages 11–18.

Fundación ciudad verde y CIAT(2011). *Taller "Construcción y socialización de la estrategia de adaptación al cambio climático en la cuenca Tuluá Morales del Valle del Cauca priorizando acciones de conservación de fauna vulnerable".* Recuperado el 27 de febrero de 2016, obtenido de http://dapa.ciat.cgiar.org/wp-content/uploads/2011/12/Estrategia-de-adaptaci%C3%B3n-al-cambio-clim%C3%A1tico-en-la-Cuenca-Tulu%C3%A1-Morales-del-Valle-del-Cauca-priorizando-acciones-de-conservaci%C3%B3n-de-fauna-vulnerable.pdf

Fusco E. (2015). Enhancing non-compensatory composite indicators: A directional proposal, European Journal of Operational Research, Vol. 242, pp. 620-630

Gain A.K., Giupponi C., (2015). A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach, Ecological Indicators, Vol. 48, pp. 120-131

García, M. L., Carvajal, Y., y Jiménez, H. (2007). *La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático*. Revista Ingeniería y Competitividad, 9(1), 19-29.

García-Herrera, R., Daz,J., Trigo, R.M, Luterbacher, J., Fischer, E.M. (2010).*A review of the european summer heat wave of 2003.Crit. Rev. Environ*. Sci. Technol., 40 (4), pp. 267–306

García I.M., Neves Almeida T.A y Paes de Barros Camara R. (2015). *A proposal for a Composite Index of Environmental Performance (CIEP) for countries,* Ecological Indicators, Vol. 48, pp. 171-188

Giri S., Nejadhashemi A.P., Wonzicki S.A. (2012). Evaluating of targeting methods for implementation of best management practices in the Saginaw River Watershed. J Environ Manage, Volume 103, pp. 24–40

Google, DigitalGlobe, 2014. Mapa Tuluá, Colombia en Google maps. Recuperado el 14 de septiembre, 2016, obtenido de: https://www.google.es/maps/@4.0755626,-76.1881374,9004m/data=!3m1!1e3

Google, DigitalGlobe, 2014. Mapa Tuluá, Colombia en Google maps. Recuperado el 14 de septiembre, 2016, obtenido de: https://www.google.es/maps/@4.1224651,-76.2130331,3604a,20y,90h/data=!3m1!1e3

Google, DigitalGlobe, 2014. Mapa Tuluá, Colombia en Google maps. Recuperado el 14 de septiembre, 2016, obtenido de: https://www.google.es/maps/@4.1362766,-76.2310067,10206a,20y,90h/data=!3m1!1e3

Google, DigitalGlobe, 2016. Google Earth (Versión 7.1.7.2606) [Sofware]. Obtenido de https://www.google.es/intl/es_es/earth/download/thanks.html#os=win#updater=yes

González O. C. y Casallas I.M. (2014). Hoja metodológica del indicador Anomalía de precipitación (Versión 1,10). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Servicio de Información Ambiental. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 9 p.

Hajkowicz S. (2006). *Multi-attributed environmental index construction*, Ecological Economics, Vol. 57, pp. 122-139

Hahn, Villagran y Hidajat (2003). *Manejo integral de riesgos por comunidades y gobiernos locales: Componente III: Indicadores y otros instrumentos para el manejo de riesgo por desastre para comunidades y gobiernos locales*. Recuperado el 06 de ocubre de 2015, obtenido de: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5880/Manejo%20Integral%20De%20Riesgos%20Por%20Comunidades%20Y%20Gobiernos%20Locales.pdf?sequence=4

Heim (2002). *A review of twentieth-century drought indices used in the United States* Bull. Am. Meteorol. Soc., 83, pp. 1149‑1165

Hernández Carvajal, J. I. (2002). Comparación costo-beneficio entre sistemas productivos y su relación con el estado nutricional de los suelos en tres microdrenajes en la microcuenca El Zapotillo, Güinope, Honduras.

IMTA. (2009). Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores. Recuperado el 25 de junio de 2015, de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: http://www.pigoo.gob.mx

IDEAM, (1996). La población, los asentamientos humanos y el medio ambiente. Revisado el 07 de julio de 2016, obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap9.pdf

IDEAM, 2010. Estudio nacional del agua. Recuperado el 14 de febrero de 2015, obtenido de https://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Agua/3_Estado/20120928_Agua_superificial_ENA2010Cap3.pdf

IDEAM, 2014. Estudio nacional del agua. Recuperado el 28 de febrero de 2016, obtenido de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

INDEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos (1984). *La pobreza en la Argentina*, Buenos Aires.

IPCC, (2001). Cambio Climático 2001: Impactos, Vulnerabilidad adaptation Contribution del Grupo de Trabajo II al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático ChangeUNEP / OMM. Recuperado el 15 de abril de 2014, obtenido de http://ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf

IPCC, 2014. Cambio climático 2007, informe de síntesis. Recuperado el 15 de abril de 2014, obtenido de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf

Jun K., Chung E., Sung J., Lee K., (2011). Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts, Science of The Total Environment, Volume 409, Issue 24, Pages 5228-5242.

Kao S., Govindaraju R.S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts, Journal of Hydrology, Volume 380, Issues 1–2, Pages 121-134.

Kelly P.M., Adger W.N. (2000). Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. Climate Change, Volume 47, Pages. 325–352

Keyantash J. and Dracup J.A, (2002). *The quantification of drought: an evaluation of drought indices*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1167–1180.

Kim H., Park J., Yoo J., Kim T., (2013). Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea, Journal of Hydro-environment Research.

Kim Y., Chung E. (2013). Fuzzy VIKOR approach for assessing the vulnerability of the water supply to climate change and variability in South Korea, Applied Mathematical Modelling, Volume 37, Issue 22, Pages 9419-9430.

Komnenic V., Ahlers R., Van der Zaag P. (2009). *Assessing the usefulness of the water poverty index by applying it to a special case: Can one be water poor with high levels of access?, Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, Vol. 34, pp 219-224

Loukas, A., Mylopoulos, N., Vasiliades, L. (2007). A modeling system for the evaluation of water resources managemen strategies in Thessaly, Greece. Water Resources Management, 21 (10), pp. 1673‑1702.

Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L.,Van der Heijden, G.M.F., Nepstad, D.(2011). The 2010 Amazon drought, Science, 331 (6017), p. 554

Maguiña, R.A. (2010).*Sistemas de inferencia basados en lógica borrosa: fundamentos y caso de estudio. R*ecuperado el 20 de abril de 2014, obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/risi/2010_n1/v7n1/a09v7n1.pdf

Malone, E. L., & Engle, N. L. (2011). *Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(3), 462-474.

Maskey S. and Trambauer, P. (2015). Chapter 10 - Hydrological Modeling for Drought Assessment, In Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters, edited by John F. ShroderPaolo ParonGiuliano Di Baldassarre, Elsevier, Pages 263-282

Medina (2003) .*Estudio Prospectivo Situación Actual y Perspectivas de la Educación Agrícola Media y Superior en la Región Andina.* Caracas: Ediciones Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura – IICA, pag 21. Revisado el 05 de julio de 2016, obtenido de: https://books.google.com.co/books?id=ZCZtAAAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Minambiente, 2015. Diagnóstico de indicadores de adaptación utilizados en Colombia

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 0865 - Adopción de la Metodología para el cálculo de Índice de Escasez. Recuperado 27 de octubre de 2014, obtenido de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_est_prop_met_vul_cc.pdf

Ministerio de vivienda, ciudad y territorio – MVCT (2014). *Ante la sequía que se vive en varios departamentos del país Minvivienda urge a los colombianos a hacer un uso racional del agua.* Recuperado el 25 de abril de 2014; obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Prensa/Noticias%202014/Paginas/Ante-la-sequ%C3%ADa-que-se-vive-en-varios-departamentos-del-pa%C3%ADs-Minvivienda-urge-a-los-colombianos-a-hacer-un-uso-racional-del-.aspx

Ministerio de vivienda, ciudad y territorio – MVCT (2015). *Atención oportuna del Gobierno logró mitigar en 62% los municipios con desabastecimiento de agua": Minvivienda.* Recuperado el 28 de febrero de 2016; obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/sala-

de-prensa/noticias/2015/diciembre/atencion-oportuna-del-gobierno-logro-mitigar-en-62-los-municipios-con-desabastecimiento-de-agua-minvivienda

Mishra A. K., y Singh V.P. (2010). *A review of drought concepts*, Journal of Hydrology, Volume 391, Issues 1–2, Pages 202-216

Mitchell G., McDonald A. (2015). Developing resilience to England's future droughts: Time for cap and trade?, Journal of Environmental Management, Volume 149, Pages 97-107

Momblanch A., Paredes J., Munné A. (2015). Manzano A., Arnau J., Andreu J., *Managing water quality under drought conditions in the Llobregat River Basin,* Science of The Total Environment, Volumes 503–504, Pages 300-318

Montero Martínez, M. J. (2010). *Escenarios climáticos en México poyectados para el siglo XXI: precipitación y temperaturas máxima y mínima*. En P. F. Martínez Austria, & C. Patiño Goméz, Atlas de Vulnerabilidad Hídirca en México ante el Cambio Climático (págs. 39-63). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Monterroso, A., Conde, C., Gay, C., Gómez, J. y López, J. (2012). *Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México.*

Monterroso, A., Fernández, A., Trejo, R.I., Conde, A.C., Escandón, J.,Villers, L.,Gay, C (2014). Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de investigación en cambio climático (UNAM), Unidad de informática para las ciencias atmosféricas y ambientales (UNAM). Recuperado el 10 de febrero de 2016, obtenido de: http://atlasclimatico.unam.mx/VyA/#4/z.

Morales G. (2002). *Conjuntos difusos*. Recuperado el 14 de febrero de 2014; obtenido de http://delta.cs.cinvestav.mx/~gmorales/ldifll/node2.html

Morales Laguado, L., Espitia Cuchango, H., y Soriano Méndez, J. (2010). *Propuesta de un sistema neuro-DBR y su aplicación en la predicción de la serie de tiempo de Lorenz*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 20(2), 31-51.

Moss, R.H., Brenkert, A.L., Malone, E.L. (2001).*Vulnerability to Climate Change: a Quantitative Approach Prepared for the US Department of Energy Technical Report* PNNL-SA-33642 .

OECD, (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*., ISBN 978-92-64-04345-9.

Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura- UNESCO, (2009*). Water in a changing world*. Recuperado el 30 de octubre de 2014; obtenido de http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001819/181993e.pdf

Perveen S., James L.A, (2011). Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability, Applied Geography, Vol. 31, pp. 321-328.

Plummer R., Grosbois D., Armitage D., Loë R.C, (2013), *An integrative assessment of water vulnerability in First Nation communities in Southern Ontario*, Canada, Global Environmental Change, Vol. 23, pp. 749-763

PROAGUAS – CVC, (2013). Formular de manera concertada la estructura organizativa más apropiada para apoyar a la CVC en la administración del agua en la derivación 2 – acequia grande del río Tuluá y realizar el levantamiento de la información técnica requerida para priorizar la problemática del agua en la zona de estudio. Santiago de Cali, Colombia.

Ramakrishna, B. (1997). *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencia.* Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 338 p.

Rivas, A. M., Álvarez, C. C., García, C. G., Díaz, J. G., y García, J. L. (2012). *Indicadores de Vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México.*

Rojas, M. P. V., Casas, A. F., Ordóñez, D. M. R., Sarmiento, J. D. O., Idrobo, J. P. M., Sarria, V. E. C., & Quijano, D. G. (2014). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad en cuencas abastecedoras de agua ante la variabilidad climática. Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *13*(25).

Rommanazzi P.G., Espósito M.E., Calvetty Ramos M.G.(2014). *Construcción de un índice de riesgo hidrológico para el desarrollo de infraestructura social básica en Provincia de Buenos Aires, Argentina*. Recuperado 27 de octubre de 2014, obtenido de http://hdl.handle.net/10915/40963

Salazar, (2010). *Geografía económica de la región Andina Oriental*. Revisado el 06 de julio de 2016, obtenido de: http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/DTSER-121.pdf

Salinas Rios, M. A. (2015). *Determinar el nivel de vulnerabilidad y adaptabilidad climática de los sistemas de producción agroecológica y otros sistemas de producción de las familias de la parroquia San Joaquín en el cantón Cuenca, provincia del Azuay.* Recuperado 06 de octubre de 2015, obtenido de http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8225/1/UPS-CT004919.pdf

Svoboda, M.D., Fuchs, B.A., Poulsen, C.C., Nothwehr, J.R. (2015). *The drought risk atlas: enhancing decision support for drought risk management in the United States*, J. Hydrol., 526, pp. 274–286

Se agota el agua. (05 de junio de 2010) *Revista Semana.* Recuperado el 04 de mayo de 2014, obtenido de http://www.semana.com/nacion/articulo/se-agota-agua/117619-3

SEMARNAT. (2009). *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México*. Recuperado el 12 de abril de 2014, obtenido de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_2010_web/index.html

Singh N.P., Bantilan C., Byjesh K. (2014). *Vulnerability and policy relevance to drought in the semi-arid tropics of Asia – A retrospective analysis, Weather and Climate Extremes*, Volume 3, June 2014, Pages 54-61,

Spinoni J., Naumann G., Vogt J., Barbosa P.(2015), *European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach, Global and Planetary Change*, Volume 127, pp. 50-57

Thang T.X. Nguyen, Jarbas Bonetti, Kerrylee Rogers, Colin D. (2016). *Woodroffe, Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability índices Ocean & Coastal Management*, Volume 123, Pages 18-43

The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2006). *La reducción del riesgo de desastres y la federación internacional*. Recuperado el 17 de abril de 2014, obtenido de http://www.ifrc.org/Global/Publications/disasters/disaster-reduction-sp.pdf

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... & Polsky, C. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, *100*(14), 8074-8079.

UNESCO, (2009). *Ficha de perfil del indicador*, obtenido de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_A3_Relative_water_stress_index.pdf

Valiente O.M (2001). *Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación*, Investigaciones geográficas, 26, pp. 59-80

Van Vliet, M.T.H., Yearsley, J.R., Ludwig,F., Vogele, S., Lettenmaier, D.P.,Kabat, P. (2012). *Vulnerability of US and European electricity supply to climate change*, Nature Clim. Change, 2 (9), pp. 676–681

Vincent, K. (2007). *Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale Glob.* Environ. Change, 17, pp. 12‑24

Wang, X., Ma, F.B., Li, J.Y. (2012). *Water Resources Vulnerability Assessment based on the Parametric-system Method: a Case Study of the Zhangjiakou Region of Guanting Reservoir Basin, North China,* Procedia Environmental Sciences, Volume 13, Pages 1204-1212

Wilches-Chaux, G. (1993). *La vulnerabilidad global. In Los desastres no son naturales* (pp. 9-50). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Wilhite, D.A (2000). *Drought as a natural hazard: concepts and definitions, D.A. Wilhite (Ed.), Drought: A Global Assessment, Natural Hazards and Disasters Series*, Routledge Publishers, UK, pp. 213‑230

Wilhite, D.A., Svoboda, M.D.,Hayes., M.J.(2007). *Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness, Water Resour. Manag*., 21, pp. 763‑774

Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V., Pulwarty, R. (2014). *Managing drought risk in a changing climate: the role of national drought policy, Weather Clim*. Extremes, 3 pp. 4–13

Yohe, G., Tol, R.S.J.(2002). *Indicators for social and economic coping capacity ‑ moving toward a working definition of adaptive capacity, Glob. Environ*. Change, 12 , pp. 25‑40

Zarafshani K., Sharafi L., Azadi H., Hosseininia G., Maeyer F., Witlox F. (2012), *Drought vulnerability assessment: The case of wheat farmers in Western Iran*. Global and Planetary Change, Volumes 98–99, Pages 122-130.

Zargar A., Sadiq R., Naser B., & Khan F. I. (2011). *A review of drought indices.* Environmental Reviews, 19(1), 333-349.

36 municipios, en calamidad pública por falta de agua (04 de agosto de 2014). *El Tiempo*. Recuperado el 23 de octubre de 2014, obtenido de http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/crisis-de-sequia-en-colombia/14338595