



**LÓGICA DIFUSA COMO HERRAMIENTA PARA APOYAR LA TOMA DE
DECISIONES EN PROYECTOS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS TRATADAS.**

**MARIA CAMILA ESCOBAR ROJAS
LUIS FELIPE TOVAR BONILLA.**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA AGRÍCOLA
NEIVA
2014.**



**LÓGICA DIFUSA COMO HERRAMIENTA PARA APOYAR LA TOMA DE
DECISIONES EN PROYECTOS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS TRATADAS.**

**MARIA CAMILA ESCOBAR ROJAS
LUIS FELIPE TOVAR BONILLA.**

**TRABAJO DE GRADO
PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA.**

**Director:
JONATHAN ROMERO CUELLAR
I.A, MSc.
Universidad Surcolombiana.**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA AGRÍCOLA
NEIVA
2014.**

ACEPTACIÓN

Nota de Aceptación

**DIRECTOR PROYECTO DE GRADO
ING. JONATHAN ROMERO CUELLAR
IA, MSc.
Universidad Surcolombiana**

**JURADO PROYECTO DE GRADO
ING. MIGUEL ANGEL VALENZUELA.
IA, MSc.
Universidad Surcolombiana**

**JURADO PROYECTO DE GRADO
ING. MAURICIO DUARTE TORO
Magíster en Ingeniería Civil
Universidad Surcolombiana**

FECHA: NEIVA, OCTUBRE DE 2014

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente al Señor Jesús por ser mi fortaleza y guía en los momentos de debilidad, por acompañarme a lo largo de mi existir y mostrarme siempre el mejor camino, brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo por derramar infinitas bendiciones sobre mí y toda mi familia.

A mis padres Carlos Alberto y Lidia, por ser el motor de mi vida, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, por sus grandes esfuerzos por sacarme adelante, ayudarme y formarme para ser quien soy hoy en día. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Todo lo que soy se los debo a ustedes. Los amo.

A mis hermanas Jessica María y María Alejandra, por ser parte importante de mi vida y representar la unión familiar, compartir conmigo momentos de alegría y tristeza, y ser el ejemplo claro que en la vida a pesar de atravesar por duras situaciones, siempre estaremos apoyándonos unas a otras.

Mil gracias a mi jefe Edilberto Sánchez Cortes, Director de la Oficina de Desarrollo Rural Integral DDRI del municipio de Neiva, y a todo su equipo de colaboradores, por el apoyo, cariño y amistad que me brindaron a lo largo de la experiencia vivida en esta dependencia, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y aprender nuevas cosas para un futuro mejor.

A Felipe por ser un excelente compañero de tesis, por su apoyo incondicional, por su compañía, y por ser la persona con la que espero compartir muchos más logros juntos.

A mi mejor amiga Natalia Tovar, por ser un apoyo en mi vida, por creer y confiar en mí y darme ánimos para poder culminar esta etapa, escucharme y aconsejarme cuando más lo necesito.

*A todas aquellas personas que aunque ya no estén físicamente, siempre estarán presentes en mi corazón, por haber creído en mí hasta el último momento y con honores hoy poder decir **¡YA SOY INGENIERA!***

María Camila Escobar Rojas

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

Para mis padres Evelio y Carmenza, por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis Abuelos Abel y Mariela, personas trabajadoras que con su compañía, consejos y valores inculcados cada día me hacen mejor persona.

A María Camila, Compañera de tesis, por su compañía y apoyo en momentos difíciles, este logro es tanto tuyo como mío y es el primero de los muchos que vendrán de aquí en adelante.

A mis primos Jaime, Chiqui, Vivi, Ulises, Fabi, Toto, Cesar, Diego, Carito, quisiera nombrarlos a cada uno de ustedes pero son muchos, no quiere decir que no me acuerde de cada uno de ustedes, de cierta manera influyeron en mi proceso de aprendizaje y aportaron un granito de arena para mi formación como profesional.

A mis Compañeros y amigos Víctor, Cristian, Juan Carlos, Nini, Milena, Bonilla, Vicky, Tata, Andrés, Andrés Buitrago, David que sin ellos a mi lado un hubiese sido posible, tantas desveladas sirvieron de algo y aquí está el fruto. Les agradezco el compartir momentos agradables y momentos tristes, pero esos momentos son los que lo hacen crecer y valorar a las personas que nos rodean

A mis compañeros de trabajo de Palmares HDB y Cia, El Ing. David de León, La ing. Dannilis Carrillo, Elkin, Lugo, Andrés, Luz y Eva por su colaboración en el desarrollo de la tesis.

“Dada las circunstancias adecuadas, sin más base que los sueños, la determinación y la libertad de intentarlo, personas muy corrientes hacen constantemente cosas extraordinarias” (Dee Ward Hock)

Luis Felipe Tovar Bonilla

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El Señor Jesús por permitirnos formarnos y lograr esta meta.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

A la Universidad Surcolombiana y Docentes del programa de Ingeniería Agrícola por abrirnos sus puertas, dándonos la oportunidad de formarnos como grandes profesionales y personas útiles para la sociedad.

Agradecemos inmensamente a nuestro director de grado, Ingeniero Agrícola, MSc. Jonathan Romero Cuellar, por su apoyo incondicional, confianza y dedicación, por brindarnos parte de su valioso tiempo en sus detalladas correcciones, por su gran colaboración en la dirección permanente de este proyecto, además por brindarnos la oportunidad y confiar en nosotros.

A nuestros jurados Ingeniero Agrícola MSc. Miguel Ángel Valenzuela e Ingeniero Agrícola MSc. Mauricio Duarte Toro, por aportar sus conocimientos, correcciones y brindarnos su asesoría para la ejecución de este trabajo.

A Cristo Fernando Facundo, Jaime A. Lara y Eduardo Valencia, expertos en saneamiento básico y legislación ambiental por la colaboración en el diligenciamiento de las encuestas elaboradas y el aporte de su gran conocimiento y de esta manera poder alimentar el sistema.

Al Dr. Oscar Iván Santofimio, personero municipal de Nátaga, por su amable colaboración, apoyo y compañía en la visita de reconocimiento a la PTAR y relación con el funcionario encargado de la misma.

A Fortunato Noscue Palma, funcionario de la alcaldía municipal de Nátaga, encargado de la supervisión de la PTAR, por su compañía y valiosa explicación del proceso que se lleva a cabo en la PTAR; por facilitarnos amablemente información valiosa para poder alimentar las variables, expuestas en la metodología desarrollada.

Al Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM, por facilitar la información de los datos de las estaciones hidroclimatológicas y así, poder calcular el índice de escasez de la zona de estudio, variable de entrada al sistema de lógica difusa.

A la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena CAM, en cabeza del Ing. William Pinto, por brindarnos la colaboración y apoyo para adquirir la información del POMCH del Río Páez.

CONTENIDO

RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	19
1.1 GENERAL	19
1.2 ESPECÍFICOS.....	19
MARCO TEÓRICO	21
2.1 REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES (AR).....	21
2.2 AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	25
2.2.1 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AR.....	25
2.2.2 TRATAMIENTO DEL AR.	26
2.2.2.1 TRATAMIENTO ANAERÓBICO DEL AR.	26
2.3 GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO	28
2.3.1 BALANCE HÍDRICO EN COLOMBIA.	28
2.3.1.1 OFERTA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA.....	29
2.3.1.2 DEMANDA DE AGUA.....	32
2.3.1.3 RELACIONES DEMANDA-OFFERTA DE AGUA.....	40
2.4 LÓGICA DIFUSA	40
2.4.1 CONJUNTOS DIFUSOS O BORROSOS	41
2.4.1.1 FUNCIONES DE MEMBRESÍA.....	41
2.4.1.2 OPERACIONES DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS.....	42
2.4.2 VARIABLE LINGÜÍSTICA	44
2.4.3 REGLAS DIFUSAS.....	44
2.4.3.1 REGLAS DIFUSAS DE MAMDANI.....	45
2.4.3.2 REGLAS DIFUSAS DE TAKAGI-SUGENO.....	46
2.4.4 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA	47
2.4.4.1 FUZZIFICACION	48
2.4.4.2 BASE DE CONOCIMIENTO.....	48
2.4.4.3 DEFUZIFICACIÓN	49
MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO:.....	51

3.1.1 CLIMATOLOGÍA.....	52
3.1.2 HIDROLOGÍA	53
3.1.3 ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO.....	55
3.1.4 ACTIVIDAD ECONÓMICA PREDOMINANTE.....	56
3.2 METODOLOGÍA.....	57
3.2.1 FASE: IBÚSQUEDA DE ANTECEDENTES.....	58
3.2.2 FASE: II DESCRIPTIVA-ANALÍTICA.....	58
3.2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA AL SISTEMA.....	58
3.2.2.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA COMO MEDIRLAS Y VALIDARLAS.....	59
3.2.3 FASE III: DE EXPOSICIÓN O SISTEMATIZACIÓN.....	67
RESULTADOS	69
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE NÁTAGA.	69
4.2 INDICE DE ESCASEZ.....	73
4.2.1 OFERTA HÍDRICA.....	73
4.2.2 DEMANDA HIDRÍCA	78
4.3 EFICIENCIA DE TRATAMIENTO.	81
4.3.1 MUESTRA DE CÁLCULOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN	81
4.4 ESQUEMA METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS TRATADAS..	84
4.5 TABULACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	86
4.5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA	86
4.5.2 VARIABLES DE ENTRADA	87
4.5.3 VARIABLES DE SALIDA	89
4.5.4 BASE DE REGLAS	90
CONCLUSIONES.....	96
RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	104

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CATEGORÍAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUA Y SUS APLICACIONES.....	22
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DE LAS AR DE LAS AR Y FUENTES DE ORIGEN.	24
TABLA 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS ANAEROBIOS	28
TABLA 4. VALORES DE ESCORRENTÍA Y RENDIMIENTO HÍDRICO REGIONES DE COLOMBIA.....	30
TABLA 5. CONTAMINACIÓN DE FUENTES HÍDRICAS EN EL HUILA.....	37
TABLA 6. PLANIFICACIÓN, ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS	39
TABLA 7. CLIMAS PREDOMINANTES EN NÁTAGA.	52
TABLA 8. PRINCIPALES QUEBRADAS QUE SURCAN EL MUNICIPIO.	53
TABLA 9. NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO	62
TABLA 10. POBLACIÓN POR ZONAS SEGÚN CENSOS	63
TABLA 11. NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	63
TABLA 12. CULTIVOS PRESENTES EN LA ZONA CON SU COEFICIENTE DE CULTIVO	64
TABLA 13. CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE ESCASEZ.....	65
TABLA 14. CATEGORÍAS DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	66
TABLA 15. CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DEL REÚSO.....	67
TABLA 16. RESUMEN HISTÓRICO ÍNDICE CALÓRICO 1993-2013.....	75
TABLA 17. RESUMEN HISTÓRICO EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MÉTODO DE THORNTHWAITE 1993-2013.....	76
TABLA 18. RESULTADOS MUESTRA DE AGUA RESIDUAL.....	81
TABLA 19. BASES DE REGLAS-PUNTO DE VISTA DE LOS EXPERTOS... 	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	21
FIGURA 2. COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS AR.....	23
FIGURA 3. COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS AR.....	27
FIGURA 4. PROCESO ANAEROBIO DE LAS AR.	27
FIGURA 5. VOLUMEN DE AGUA EN ÁREAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS (KM³).....	29
FIGURA 6. OFERTA HÍDRICA TOTAL ANUAL EN COLOMBIA.....	31
FIGURA 7. DEMANDA DE AGUA PARA LAS ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS.....	32
FIGURA 8. DEMANDA DE AGUA EN COLOMBIA	33
FIGURA 9. CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA.....	35
FIGURA 10. CATEGORÍAS DE PRIORIZACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	36
FIGURA 11. ESTADO DE LAS CUENCAS ABASTECEDORAS EN EL DEPARTAMENTO.....	38
FIGURA 12. ORDENACIÓN DE CUENCAS EN EL HUILA.....	39
FIGURA 13. EJEMPLO CONJUNTOS DIFUSOS.....	41
FIGURA 14. FORMAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA.....	42
FIGURA 15. INTERSECCIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS.....	43
FIGURA 16. UNIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS	43
FIGURA 17. VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE EDAD.	44
FIGURA 18. ESTRUCTURAS DE UN MODELO DIFUSO.....	48
FIGURA 19. LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE NÁTAGA.....	51
FIGURA 20. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA NÁTAGA.	52
FIGURA 21. USO ACTUAL DEL SUELO	57
FIGURA 22. METODOLOGÍA.	57
FIGURA 23. REJILLAS DE CRIBADO.	69
FIGURA 24. DESARENADOR	70
FIGURA 25. REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE RAFA... 	71
FIGURA 26. FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE FAFA	72
FIGURA 27. LECHOS DE SECADO.	73
FIGURA 28. VALORES DE PRECIPITACIÓN ESTACIÓN NÁTAGA 1993-2013.....	73
FIGURA 29. RESUMEN HISTÓRICO DE TEMPERATURA MÍNIMA, MEDIA Y MÁXIMA ESTACIÓN LA PLATA1993-2013	75
FIGURA 30. EVAPORACIÓN Vs ETR TORNTHWAITTE (mm) 1993-2013.....	77
FIGURA 31. PRECIPITACIÓN VS ESCORRENTÍA	78

FIGURA 32. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DEL REÚSO DE ARDT.....	85
FIGURA 33. SISTEMA DE INFERENCIA PARA EL REÚSO DE AGUA.....	86
FIGURA 34. FUNCIONES DE MEMBRESÍA EN FUZZY LOGIC TOOLBOX. .	87
FIGURA 35. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE ÍNDICE DE ESCASEZ (%).	88
FIGURA 36. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO (%).	89
FIGURA 37. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE REUSO DEL AGUA (%).	90
FIGURA 38. BASE DE REGLAS DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA. .	92
FIGURA 39. ESQUEMA TRIDIMENSIONAL EVALUACIÓN DEL SISTEMA CON BASE A LAS REGLAS ESTABLECIDAS.....	93
FIGURA 40. EVALUACION DEL SISTEMA PARA IE 28.5% Y E. TRATAMIENTO 88.7%.....	94

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 VALORES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN ESTACIÓN NÁTAGA (1993-2013).	104
ANEXO 2 VALORES DE TEMPERATURA MEDIA (oC) ESTACIÓN LA PLATA (1993-2013).	104
ANEXO 3 ÍNDICE CALÓRICO MENSUAL THORNWHITE (1993-2013).	105
ANEXO 4 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL THORNWHITE (MM) (1993-2013).	105
ANEXO 5 ESCORRENTÍA TOTAL (mm) (1993-2013)	106
ANEXO 6 PERFIL DE LOS EXPERTOS	107
ANEXO 7 ENCUESTA A EXPERTOS	108
ANEXO 8. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PÁEZ	113

LISTA DE ECUACIONES

EC 1. INTERSECCIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS	43
EC 2. UNIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS	43
EC 3. ÍNDICE DE ESCASEZ.....	59
EC 4. ÍNDICE DE CALOR MENSUAL	60
EC 5. ÍNDICE DE CALOR ANUAL.....	60
EC 6. ETR TORNTHTWAITE	60
EC 7. ESCORRENTÍA TOTAL.....	60
EC 8. REDUCCIÓN TOTAL OFERTA HÍDRICA.....	61
EC 9. REDUCCIÓN POR CAUDAL ECOLÓGICO.....	61
EC 10. DEMANDA HÍDRICA TOTAL.....	62
EC 11. DUD.....	62
EC 12. POBLACION FUTURA.....	63
EC 13. DUA	64
EC 14. ETP.....	65
EC 15. CARGA DE CONTRO DE VERTIMIENTO.....	65
EC 16. PORCENTAJE DE REMOCIÓN.....	66

ABREVIATURAS

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
AR: Aguas Residuales.
ARI: aguas residuales industriales
ARA: Aguas Residuales Agrícolas
ARD: Aguas Residuales Domésticas.
DBO: Demanda biológica de oxígeno
DT= Demanda total del Agua
DUD= Demanda agua uso domestico
DUI= Demanda agua uso industrial
DUA= Demanda agua uso agrícola
DUP= Demanda agua uso pecuario
OF= Oferta hídrica
DH= Demanda hídrica
IE= Índice de escasez.
EF= Eficiencia de Tratamiento.
ETR= Evapotranspiración real.
ETP= Evapotranspiración potencial.
LD= Lógica difusa.

Los proyectos de reutilización de aguas residuales son complejos debido a que se desconoce su potencialidad considerando aspectos normativos, culturales, socioeconómicos y ambientales; y buscar una respuesta resulta ser una difícil tarea a la hora de tomar una decisión, ya que requiere soluciones apoyadas en información de calidad.

Teniendo en consideración lo anterior se propone desarrollar una metodología para el análisis de reutilización de aguas residuales domésticas tratadas apoyada en lógica difusa, una herramienta hidroinformática para apoyar la toma de decisiones, basada en el conocimiento de especialistas, en la planta de tratamiento de aguas residuales-PTAR del municipio de Nátaga, departamento del Huila.

El proyecto para el análisis de reutilización de aguas residuales, se diseña en tres fases: una fase inicial donde se realiza una búsqueda de antecedentes que incluye estudios y análisis de la bibliografía existente, estudios y análisis de experiencias previas, visita de reconocimiento a la PTAR del municipio de Nátaga y consulta con especialistas en la temática de saneamiento básico rural y legislación ambiental.

Para la segunda fase se realizó una evaluación descriptiva-analítica, en donde se identificaron las dos variables de entrada, y la variable de salida del sistema; como primera variable de entrada el índice de escasez (%), teniendo en cuenta el cálculo de la oferta y demanda hídrica, y el factor de reducción por calidad del agua y caudal ecológico, según la resolución 0865 del 22 de julio de 2004, obteniendo un valor de 28.5, que corresponde a un índice de escasez MEDIO ALTO; como segunda variable, la eficiencia del tratamiento (%), evaluada con el decreto 1591 de 1984, de acuerdo con los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente, analizados por el laboratorio de aguas ASINAL LTDA, con un valor de 88.7, que indica una eficiencia Muy Buena; y como variable de salida, Reúso de Agua(%) con un valor de 92.2, luego de evaluar las variables de entrada.

Una tercera fase de exposición o sistematización donde se presenta un esquema metodológico general, que permite realizar el control y vigilancia de la PTAR, y de la zona de estudio; con la ayuda de la caja de herramientas de Matlab® (*fuzzylogictoolbox*), se diseña un sistema de lógica difusa tipo Mamdani, basado en las reglas del conocimiento experto, se asignan las funciones de membresía, y se evalúa el sistema dando como resultado un 92.2% para el Reúso de Agua que corresponde a una **REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA**.

PALABRAS CLAVES: reutilización de aguas residuales, saneamiento básico rural, índice de escasez, lógica difusa, eficiencia del tratamiento.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación propone una nueva metodología, aplicada a la PTAR del Municipio de Nátaga, departamento del Huila, generando no solo nuevos modelos conceptuales si no también una nueva herramienta informática para la toma de decisiones en proyectos de reutilización de aguas residuales domésticas tratadas.

En la actualidad el mundo demanda decisiones de manera informada, los problemas son tan complejos que requieren soluciones apoyadas en información de calidad.

Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, permiten resolver problemas, bajo un ambiente de incertidumbre en el menor tiempo posible, con el fin de escoger la respuesta más adecuada.

Debido a las bondades que trae la reutilización de aguas residuales tratadas, como estrategia de adaptación, su aplicación se ha visto limitada porque se desconoce su potencialidad, considerando aspectos normativos, culturales, socioeconómicos, ambientales e institucionales, en el contexto local. (MAVDT, 1997) y resultan ser complejos, que se hace necesario abordarlos con una información, veraz y confiable, debido a la complejidad de la temática de los mismos.

Las aguas residuales son una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso, a causa de la disponibilidad limitada de agua potable para cubrir los requerimientos de las poblaciones, sus principales beneficios están relacionados con la parte económica, ambiental y sociocultural. Sin embargo, el predominio del uso de aguas residuales crudas o diluidas con aguas superficiales y el bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en Colombia en general, generan riesgos en la salud pública, en especial cuando se utilizan para riego de cultivos para consumo directo. Para el reúso de aguas residuales se aconseja realizar siempre un tratamiento preliminar y primario; el tratamiento secundario, además de remover de manera eficiente materia orgánica y sólidos suspendidos, influye directamente sobre la estructura de algunos compuestos, como los de nitrógeno. (Silva, *et al*, 2008)

En las últimas décadas en el campo de la ingeniería agrícola, se ha venido trabajando con herramientas hidroinformáticas para mejorar el desarrollo sostenible del medio ambiente y aumentar la producción agropecuaria, que mediante la entrada de variables que no son muy precisas o inciertas se pueden aplicar modelos computacionales para obtener una conclusión adaptable a cada una de las situaciones (Romero, 2014).

Matlab® cuenta con un importante instrumento para la modelación de sistemas difusos: la caja de herramientas de lógica difusa (*fuzzylogictoolbox*). Esta caja de herramientas se emplea ya que es de fácil entendimiento, además de tolerar información imprecisa y el modelamiento de funciones no lineales, se puede construir un sistema basado en el conocimiento de expertos con la utilización de un lenguaje neutral (Méndez, *et al* 2005).

La lógica difusa, ha sido una herramienta muy utilizada, tanto a nivel mundial como en nuestro país, para el estudio y solución de problemas en diversas áreas del saber y la ciencia, pero su empleo ha sido mucho más reciente para el estudio de ambientes con incertidumbre, para la toma de decisiones y la gestión de expertos (Lira, *et al*, 2000).

Hasta el 2010 se encontraron 136 artículos y reportes donde utilizan la lógica difusa (LD) para resolver problemas del sector agrícola a nivel mundial. Dentro de las principales aplicaciones se encontró: modelamiento y predicción (24%), control (28%), clasificación (24%), agrupación difusa (9%), inferencia a base de reglas (7%), fusión de datos multisensores (4%), optimización (1%) y otros (3%) (Huang *et al.* 2010).

Adicionalmente, (Pydipati *et al.* 2005) utilizó un algoritmo LD para manejar las plagas en cultivos de cítricos. Aplicando el método de color de ocurrencia y analizando las texturas de las hojas identificaba las dañadas. También (Yang *et al.*, 2000) reporta la implementación del proceso de captura de imágenes para identificar malezas en el cultivo y con LD desarrollo un sistema de apoyo a la toma de decisiones para saber cuándo y cómo aplicar el herbicida en campo.

En Colombia se han implementado metodología para el diagnóstico del saneamiento en comunidades de desplazados en situación de emergencia (Villegas, *et al* 2009), teoría de conjuntos fuzzy aplicada al estudio de la dinámica del agua y de los solutos en el suelo (Souza, *et al* 2005), Los Sistemas Difusos como Herramienta de Modelación de la Producción Frutícola, (Méndez, *et al* 2005), entre otras.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pese a las bondades que trae reutilizar el agua, en pro de conservar el medio ambiente y aumentar la producción, se convierte un problema ambiental, en un recurso potencial, siendo la reutilización de aguas residuales tratadas tal vez la única opción de aumentar la disponibilidad del recurso hídrico en zonas donde haya escasez del mismo.

La reutilización de aguas residuales es una estrategia que forma parte de ese concepto, que a diferencia del concepto convencional de tratamiento del agua, presenta enfoque más lógico centrado en la minimización de las aguas residuales, refinamiento de materias primas y procesos de producción y reutilización de los residuos (Larsen *et al*, 1999). Ésta estrategia es reconocida a nivel nacional e internacional, sin embargo, su aplicación adecuada se ha visto limitada porque se desconoce su potencialidad considerando aspectos normativos, culturales, socioeconómicos, ambientales e institucionales, en el contexto local. (MAVDT, 1997a).

De acuerdo con las ideas presentadas anteriormente, emprender un proyecto de reutilización de aguas residuales es una decisión muy compleja que requiere de diferentes enfoques y herramientas que propendan por una toma de decisiones de manera informada y una búsqueda de soluciones bajo un ambiente de incertidumbre en el menor tiempo posible.

La utilización de dichas herramientas han permitido el avance tecnológico en muchos campos de la ciencia, para facilitar las operaciones y hacerlas más simples. Por estas razones, se hace necesario proponer una metodología, para apoyar la toma de decisiones de un proyecto de reutilización de aguas residuales, utilizando herramientas hidroinformáticas que permitan estimar el potencial de reutilización del agua, contribuyendo así con la planificación de actividades en estudios de este tipo para uso agrícola mediante la toma de decisiones de manera informada.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

- Proponer una metodología para el análisis de reutilización de aguas residuales domésticas tratadas a través de la implementación de herramientas hidroinformáticas.

1.2 ESPECÍFICOS

- Desarrollar el marco conceptual y metodológico de una propuesta para analizar proyectos de reutilización de aguas residuales domésticas tratadas.
- Evaluar la propuesta metodológica en la PTAR del Municipio de Nátaga, Departamento del Huila.



CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1 REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES (AR)

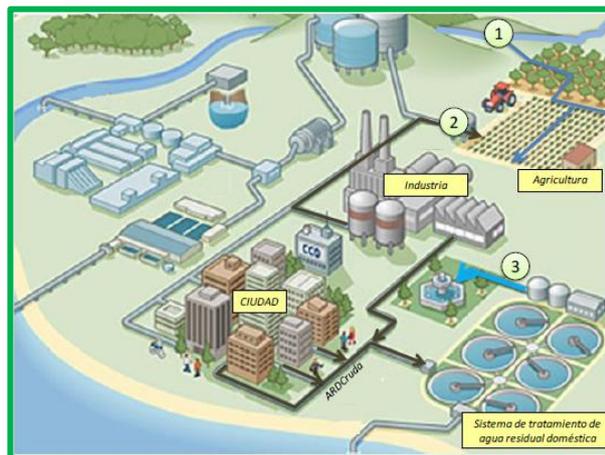
Se conoce por recuperación de las aguas residuales al tratamiento o proceso que sufren las mismas para poder ser reutilizadas, con fines beneficiosos.

Las aguas residuales se pueden clasificar de manera directa o indirecta (ver figura 1):

La reutilización directa, también llamada **REUTILIZACIÓN DIRECTA PLANEADA** requiere la existencia de tuberías u otros medios de conducción para la distribución del agua recuperada, y ocurre cuando los efluentes tratados son empleados directamente en alguna aplicación de reutilización local.

La reutilización indirecta, ocurre mediante el vertido de afluentes residuales en un agua receptora, para su asimilación y retirada aguas abajo. (Asano, 2005).

En la **REUTILIZACIÓN INDIRECTA NO PLANEADA** el agua es utilizada y descargada en forma diluida en los cuerpos de agua receptores y posteriormente es utilizada de manera no intencional; en la **REUTILIZACIÓN INDIRECTA PLANEADA**, los efluentes tratados son descargados de manera planeada a los cuerpos receptores para ser utilizados de forma intencional y controlada en algún uso beneficioso.



Fuente: Lavrador, 1987.

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

1. Reúso indirecto no planeado. 2. Reúso indirecto planeado 3. Reúso directo planeado.

De igual manera, los tipos y aplicaciones de Aguas residuales se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el agrícola, en la irrigación de cultivos, el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; y el industrial, que ha sido muy empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias. (Silva, *et al*, 2009).

Las principales categorías de aplicación de reutilización de aguas residuales se encuentran en la **Tabla 1**, en orden descendente de acuerdo al volumen de uso. (Metcalf & Eddy, 1995)

TABLA 1. CATEGORÍAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUA Y SUS APLICACIONES

CATEGORIA	APLICACIÓN
Riego agrícola	Riego de cultivos
	Viveros Comerciales
Riego de paisajes	Parques
	Campos Escolares
	Separadores de Vías
	Campos de Golf
	Cementerios
	Residencias
Reciclaje industrial y reutilización	Refrigeración
	Alimentación de Calderas
	Procesos con Agua
	Contracción Pesada
Recarga de acuíferos	Reposición de Acuíferos
	Control de Intrusión de Agua Salina
	Control de Hundimientos
Usos recreacionales y ambientales	Lagos y Estanques
	Mejoramiento de Pantanos
	Aumento de Caudales
	Zona de Pesca
Usos no potables	Protección Contra Incendios
	Aire Acondicionado
	Descarga de Inodoros
Reutilizaciones potables.	Mezcla en suministro en reserva de Aguas
	Mezcla en Acuíferos
	Suministro de Agua directo a la tubería.

Fuente: (Asano, et al, 2007)

2.1.1. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Los constituyentes más importantes de los residuos líquidos confieren al agua residual propiedades físicas, químicas o biológicas indeseables. La composición del agua residual está determinada por el caudal y por su fuente.

Las aguas residuales consisten básicamente en: agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Los sólidos son la fracción más pequeña (representan menos del 0.1 % en peso), pero representa el mayor problema a nivel del tratamiento. El agua provee sólo el volumen y el transporte de los sólidos. (Sterling, 1987).

Los residuos sólidos están conformados por materia inorgánica y materia orgánica.

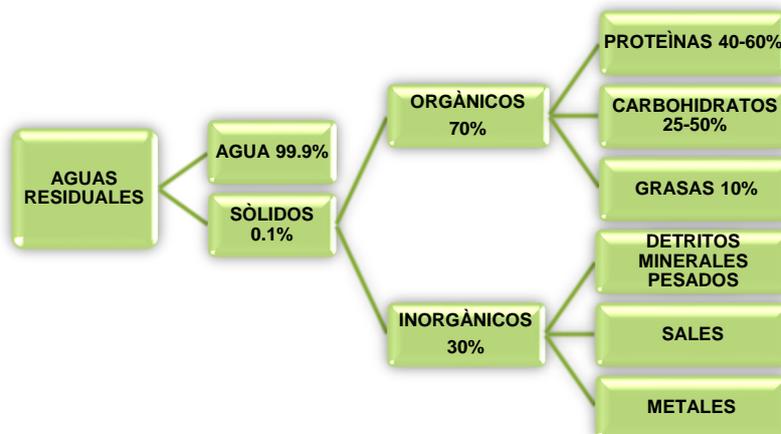
La materia inorgánica proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por carbohidratos, proteínas y grasas.

Las proteínas constituyen del 40 al 60% de la materia orgánica y están representadas por los complejos de amino ácidos y proporcionan la mayor parte de los nutrientes bacterianos.

Los carbohidratos están representados por los hidratos de carbono y que a su vez están constituidos por los almidones, los azúcares y la celulosa, siendo los dos primeros degradados con facilidad en un 25-50%. Los porcentajes de hidratos de carbono que se encuentran en forma disuelta y sedimentable son semejantes a las proteínas.

Las grasas incluidas en los ácidos grasos representan el 10%, no suelen ser solubles y se degradan más lentamente.

La figura 2, muestra la relación porcentual de los componentes de las aguas residuales.



Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).

FIGURA 2. COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS AR

El lugar de procedencia de las aguas residuales, prevalece en las características de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de las mismas, en la tabla 2, se muestran algunas características y su fuente de origen.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DE LAS AR DE LAS AR Y FUENTES DE ORIGEN.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos • Temperatura • Color • Olor 	Suministro de agua, Residuos industriales y domésticos. Residuos industriales y domésticos. Residuos industriales y domésticos. Descomposición de residuos líquidos.
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
ORGÁNICOS <ul style="list-style-type: none"> • Proteínas • Carbohidratos • Aceites y grasas • Fenoles • Pesticidas 	Residuos comerciales y domésticos. Residuos comerciales y domésticos. Residuos comerciales, industriales y domésticos. Residuos industriales. Residuos agrícolas.
INORGÁNICOS <ul style="list-style-type: none"> • Ph • Cloruros • Nitrógeno • Fósforo • Azufre • Tóxicos • Metales pesados 	Residuos industriales. Suministro de agua, Residuos industriales e infiltraciones. Residuos agrícolas y domésticos. Residuos agrícolas, industriales y domésticos. Suministro de agua, Residuos industriales Residuos industriales. Residuos industriales.
GASES <ul style="list-style-type: none"> • Oxígeno • Hidrógeno sulfarado • Metano 	Suministro de agua e infiltraciones. Residuos domésticos. Residuos domésticos.
CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	
<ul style="list-style-type: none"> • Virus • Bacterias • Protozoarios • Nematodos 	Residuos domésticos. Residuos domésticos. Residuos domésticos. Residuos domésticos.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2 AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

El agua residual municipal es el término utilizado para designar el residuo líquido recogido mediante la red de alcantarillado para enviarla a una planta de tratamiento de agua residual municipal. Los componentes que configuran el agua residual que genera una comunidad, dependen del tipo de sistema de recogida que se utiliza y pueden incluir (Metcalf & Eddy, 1991):

- **AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA- ARD (O SANITARIA):** Es el agua que residencias, instalaciones comerciales, públicas y similares han utilizado de las fuentes de abastecimiento para usos diversos.
- **AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL- ARI:** Es el agua que proviene de las actividades industriales, luego de que se realicen los diferentes procesos.
- **INFILTRACIONES Y CONEXIONES INCONTROLADAS:** Son aguas de escorrentía, que acceden a la red de alcantarillado a través de los pozos de registro y de otros dispositivos, así como del agua subterránea que se infiltra a la red de alcantarillado a través de las uniones incorrectamente realizadas o deterioradas y de grietas en las conducciones.

2.2.1 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL ARD.

El diseño y manejo de las plantas de tratamiento de aguas residuales requieren de una evaluación de la calidad de las aguas residuales. Los principales parámetros a ser evaluados a este respecto son:

- **SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST):** Están compuestos por partículas orgánicas o inorgánicas fácilmente separables del líquido por sedimentación, filtración o centrifugación.
- **DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO):** Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química (destrucción) de la materia orgánica. Esta prueba proporciona un medio indirecto de la concentración de materia orgánica en el agua residual.
- **DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN CINCO DÍAS (DBO₅):** Es la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable durante cinco días y a 20°C y corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica. La relación DQO/DBO₅ proporciona una indicación de la biodegradabilidad de las aguas residuales.

2.2.2 TRATAMIENTO DEL ARD.

El tratamiento de las aguas residuales domésticas, es realizado con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radioactiva de los cursos y cuerpos de agua receptores.

De un modo general, el tratamiento persigue evitar daños a los abastecimientos públicos, privados e industriales de suministro de agua, daño a las aguas destinadas a la recreación y el esparcimiento, a las actividades piscícolas, perjuicios a la agricultura y depreciación del valor de la tierra e impacto al entorno ecológico.

De igual manera dicho tratamiento, permite corregir sus características indeseables, de tal manera que su uso o disposición final pueda ocurrir de acuerdo con las reglas y criterios definidos por las autoridades legislativas. Los mismos, incluirán la reducción de la concentración de por lo menos uno de los cinco constituyentes más importantes del agua residual:

- Sólidos en suspensión.
- Material orgánico (biodegradable).
- Nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo).
- Organismos patógenos.
- Metales pesados.

Los diferentes tipos de tratamientos de las aguas residuales se han desarrollado en forma sencilla y general hacia dos propósitos, en primer lugar la captación o separación de los sólidos de acuerdo a su sedimentabilidad; y en segundo lugar a la estabilización biológica de los sólidos restantes. La magnitud de estos propósitos dependerá del tipo de tratamiento empleado. (Quintero, 2007)

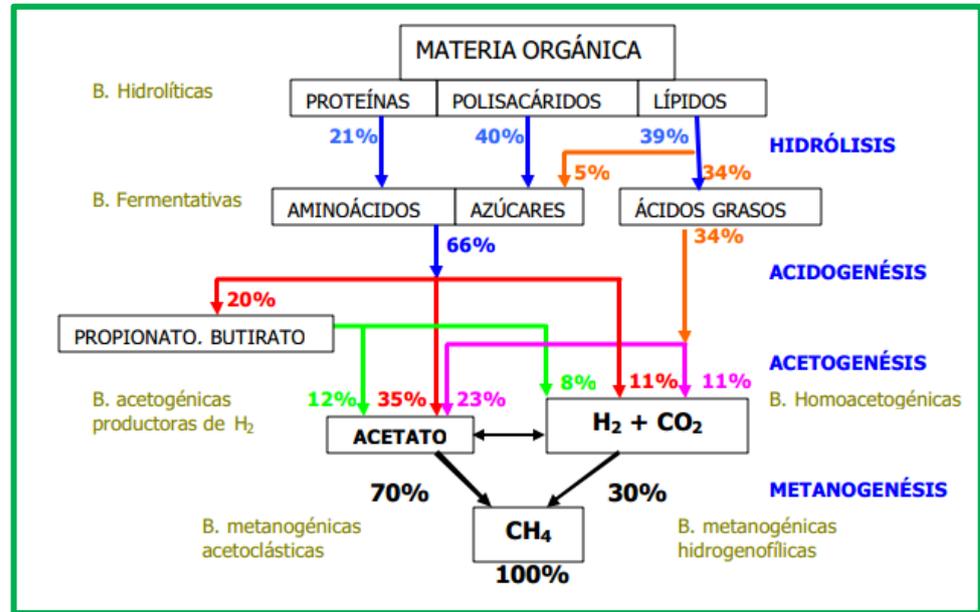
Actualmente existe una gran variedad de sistemas para el tratamiento de aguas residuales sin embargo, estos deberían ser seleccionados sobre la base del contexto local específico donde serán aplicados.

2.2.2.1 TRATAMIENTO ANAERÓBICO DEL AR.

A través de los últimos años, la digestión anaerobia ha tomado una gran acogida y se ha venido implementando, con numerosos problemas, en el tratamiento de aguas residuales municipales.

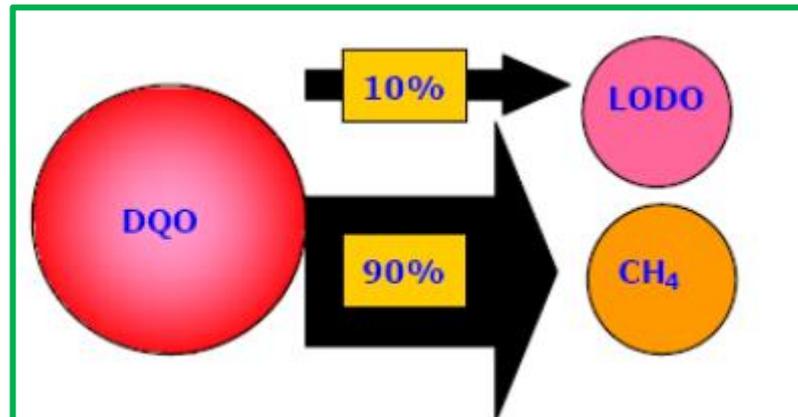
La digestión anaerobia es un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%) ver figura 4. En las reacciones bioquímicas que ocurren en la

digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía libre es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido. (Díaz, *et al*, 2002). La figura 3, representa el proceso de digestión anaerobia, para obtener metano.



Fuente: (Madigan, *et al*, 1997).

FIGURA 3. COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS AR



Fuente, (Collazos, 2008)

FIGURA 4. PROCESO ANAEROBIO DE LAS AR.

Al igual que los sistemas aeróbios, los sistemas anaeróbios tienen unos pro y contra, la tabla 3, representa cada una de esas ventajas y desventajas de dicho proceso.

TABLA 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS ANAEROBIOS

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Proceso simple y sencillo de operar. • Aplicable en pequeña, mediana y gran escala, para residuos industriales y domésticos. • Presenta una baja producción de lodos (estabilizados). • Bajo o nulo consumo de energía (eventualmente bombeo). • Son instalaciones compactas que demandan poco espacio. • Constituyen una fuente de energía alternativa (CH₄). • Permiten la aplicación de elevadas cargas orgánicas (superiores a 30 kg DQO/m³.d). • El lodo anaerobio puede permanecer sin alimento mucho tiempo. • El arranque de los reactores es rápido con una apropiada inoculación 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisión de olores desagradables (H₂S) • Sensibilidad a bajas temperaturas, al cambio brusco de Ph y a la presencia de oxígeno disuelto. • Lento proceso de arranque y por ello largos períodos para estabilización (inóculos). • Complejidad en los consorcios bacterianos • Calidad de efluente inferior a los procesos aeróbicos. Por ello se requiere un postratamiento para cumplir con los niveles de calidad usualmente exigidos • La agresividad de algunos subproductos que demandan atención en la protección de las estructuras (corrosión).

Fuente: (Collazos, 2008).

2.3 GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

2.3.1 BALANCE HÍDRICO EN COLOMBIA.

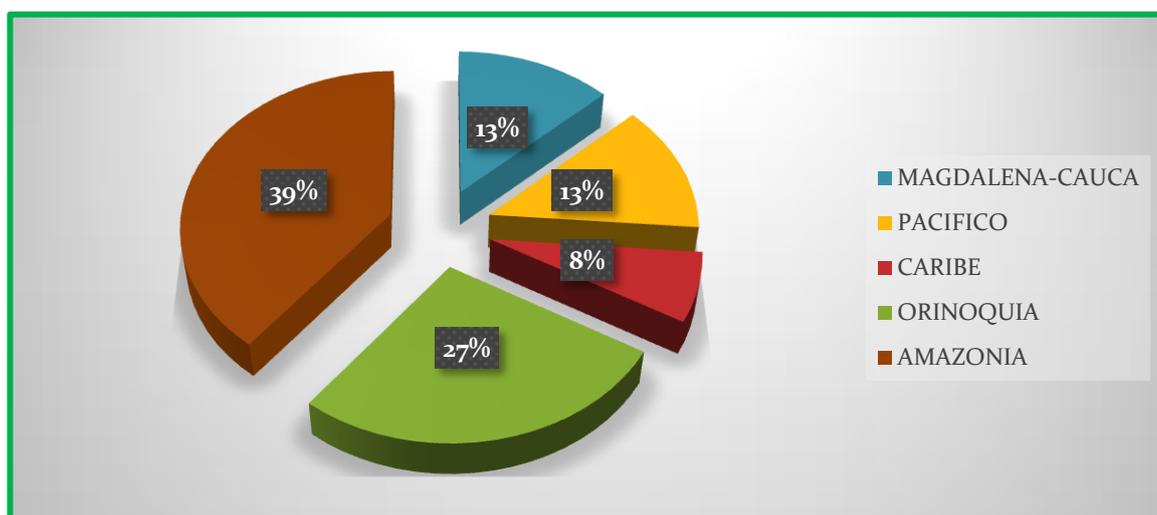
La oferta hídrica de los cuerpos de agua lóticos se refiere al volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo, se cuantifica a través de la escorrentía y rendimientos hídricos (l/s-km²).

La escorrentía media anual en Colombia y su variación a través del año es muy heterogénea en la distribución, tanto espacial como temporal y determina la oferta hídrica superficial del país, de manera general puede afirmarse que desde el mes de abril hasta el mes de noviembre, hay altos excedentes de agua en casi todo el país, con mayor afectación mensual en las áreas hidrográficas del Pacífico, Orinoquia y Amazonia, y que las escorrentías más

bajas se presentan en las áreas Magdalena-Cauca, Caribe y Orinoquia, en el trimestre enero-febrero-marzo, siendo el mes de febrero el más crítico del año.

Este régimen hidrológico se caracteriza por tener una escorrentía promedio de 1.988 mm, con rangos que van desde una escorrentía media de 100 mm al año en La Guajira hasta escorrentías mayores de 6.000 milímetros en el Pacifico. En el Caribe, con excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta y la cuenca del rio Atrato, tiene normas de escorrentía bajas, la mayoría menores de 400 mm, mientras que regiones como el Pacifico, en particular la cuenca alta del rio San Juan, presenta escorrentías muy altas, mayores de 5.000 mm.

De los 71.800 m³/s de escorrentía superficial de Colombia, la cuenca Magdalena-Cauca contribuye con el 13% (9.500 m³/s), la Amazonia con 39%(27.830 m³/s), la Orinoquia con 27% (19.230 m³/s), el Caribe –incluida la cuenca del rio Catatumbo– contribuye con el 8% y el Pacifico aporta el 13% (9.629 m³/s). (Ver figura 5) (Colombia MAVDT, 2010).



Fuente: IDEAM, 2010

FIGURA 5. VOLUMEN DE AGUA EN ÁREAS HIDROGRÁFICAS REPRESENTATIVAS (KM³).

2.3.1.1 OFERTA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA.

Estimaciones realizadas por el IDEAM en sus diferentes estudios, anotan que la escorrentía superficial per cápita total del país es de 57.000 m³/año, en cuanto a la oferta neta en la cual se incorporan reducciones tanto por alteración de la calidad como por regulación natural, se alcanzan apenas los 1260 km³ que corresponden a una disponibilidad de 34.000 metros cúbicos por persona al año. En las condiciones de año seco consideradas, esta disponibilidad se reduce a 26.700 m³ por persona al año. (Colombia MAVDT, 2010).

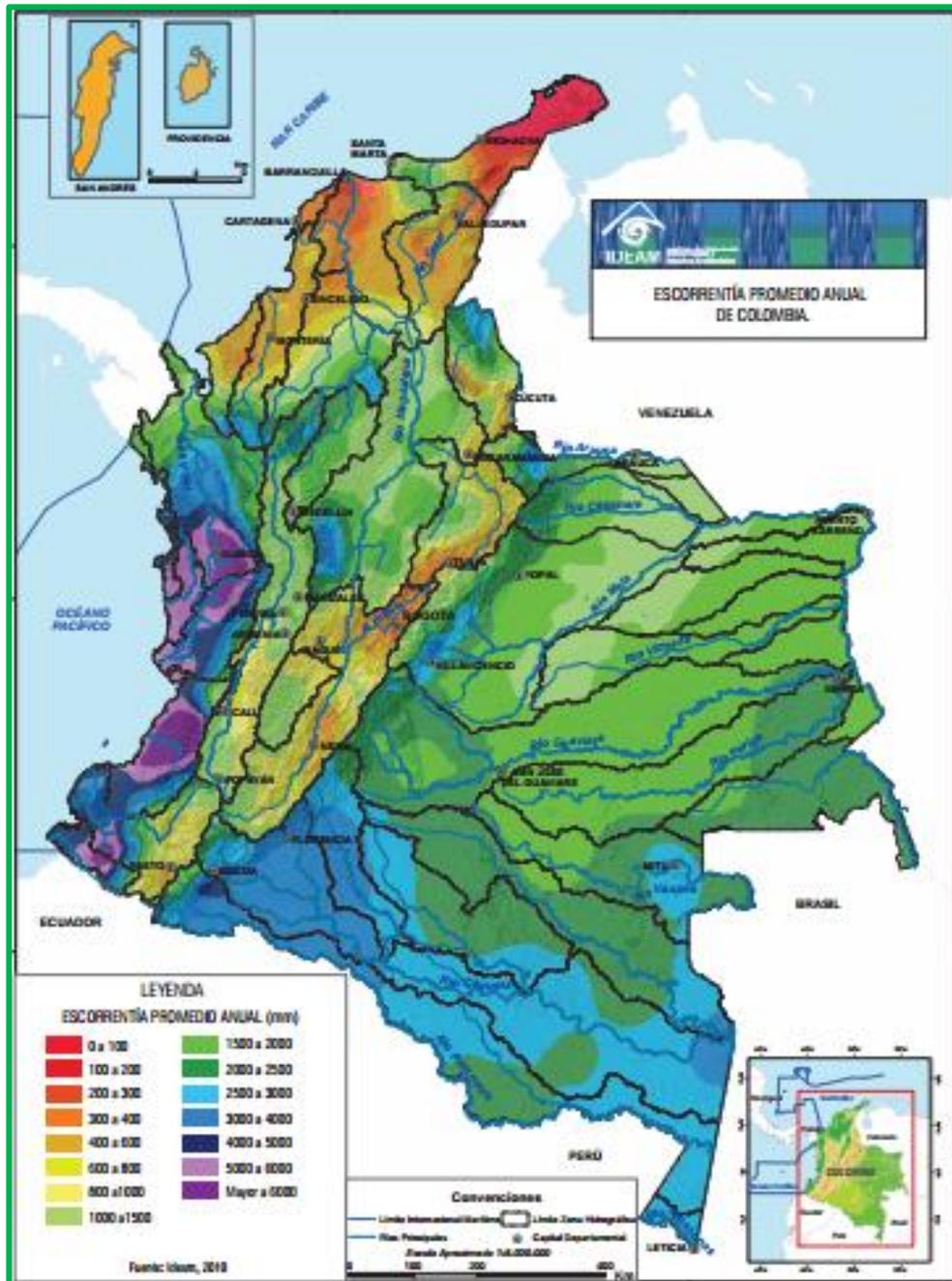
La abundancia hídrica colombiana puede ser cuantificada mediante valores de escorrentía y rendimientos, se manifiesta mediante una densa red fluvial superficial (con una oferta de 2084 m³ de escorrentía anual que equivale a un caudal de 67000 m³/s) que, dependiendo de determinadas condiciones, es favorable para el almacenamiento de aguas subterráneas. Adicionalmente se han estimado 38 km³ almacenados en ciénagas, lagunas, lagos y embalses. (IDEAM, 2001).

TABLA 4. VALORES DE ESCORRENTÍA Y RENDIMIENTO HÍDRICO REGIONES DE COLOMBIA.

REGIÓN	CORRIENTE	ESCORRENTÍA (mm)	RENDIMIENTO (L/S*Km ²)
ANDINA	Magdalena	854	27
	Páez	1.180	37
	Saldaña	1.170	37
	Bogotá	320	10
	La Piel	2.900	92
	Carare	1.480	47
	Sogamoso	890	28
	Lebrija	950	30
	Cauca	1.684	53
	La Vieja	1.220	39
	Palo	770	24
	Risaralda	1.170	37
	San Juan	1.100	35
	Tarasa	3.570	113
	Otún	1.160	37
Nechi	1.830	58	
CARIBE	Ranchería	300	10
	Sinú	1.010	32
	Atrato	3.350	106
	Catatumbo	1.550	49
	Zulia	890	28
ORINOQUÍA	Arauca	3.020	96
	Meta	1.520	48
	Guaviare	1.720	55
	Vichada	1.540	49
AMAZONÍA	Caquetá	2.420	77
	Orteguaza	3.110	99
	Caguán	2.350	75
	Yarí	1.850	59
	Apaporis	2.270	72
	Putumayo	2.700	86
PACÍFICO	San Juan	4.550	144
	San Juan de Micay	5.320	169
	Patía	2.110	67

Fuente: IDEAM, 2010.

De acuerdo con la tabla 4 y la figura 6, se deduce que en Colombia la oferta hídrica natural no se distribuye parcialmente entre regiones, presentando algunas zonas abundancia de agua, y otras, escasez debido a la alta variabilidad espacial y temporal.

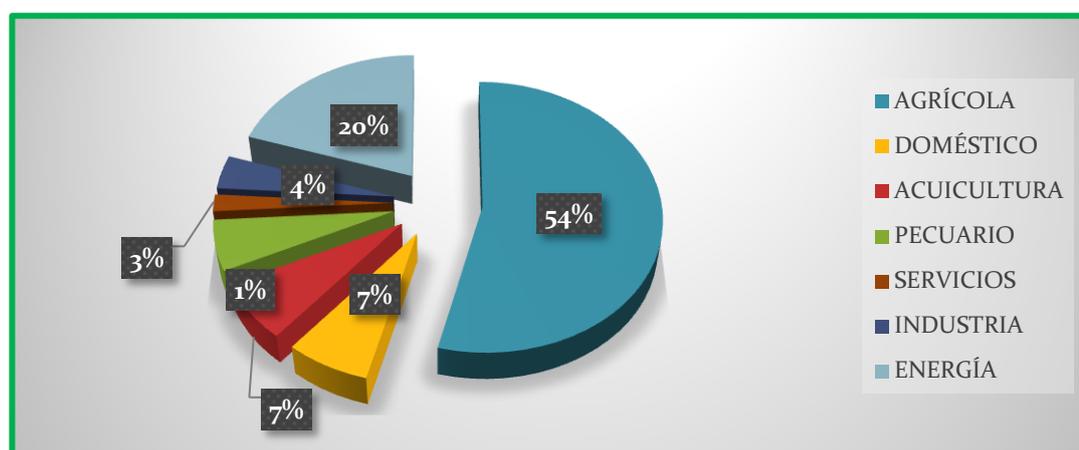


Fuente: IDEAM, 2010.

FIGURA 6. OFERTA HÍDRICA TOTAL ANUAL EN COLOMBIA.

2.3.1.2 DEMANDA DE AGUA

La demanda de agua se define como la cantidad de agua requerida para el desarrollo de las actividades socioeconómicas. En Colombia se representa principalmente mediante los usos agrícola, doméstico, industrial, pecuario y uso servicios (ver figura 7).

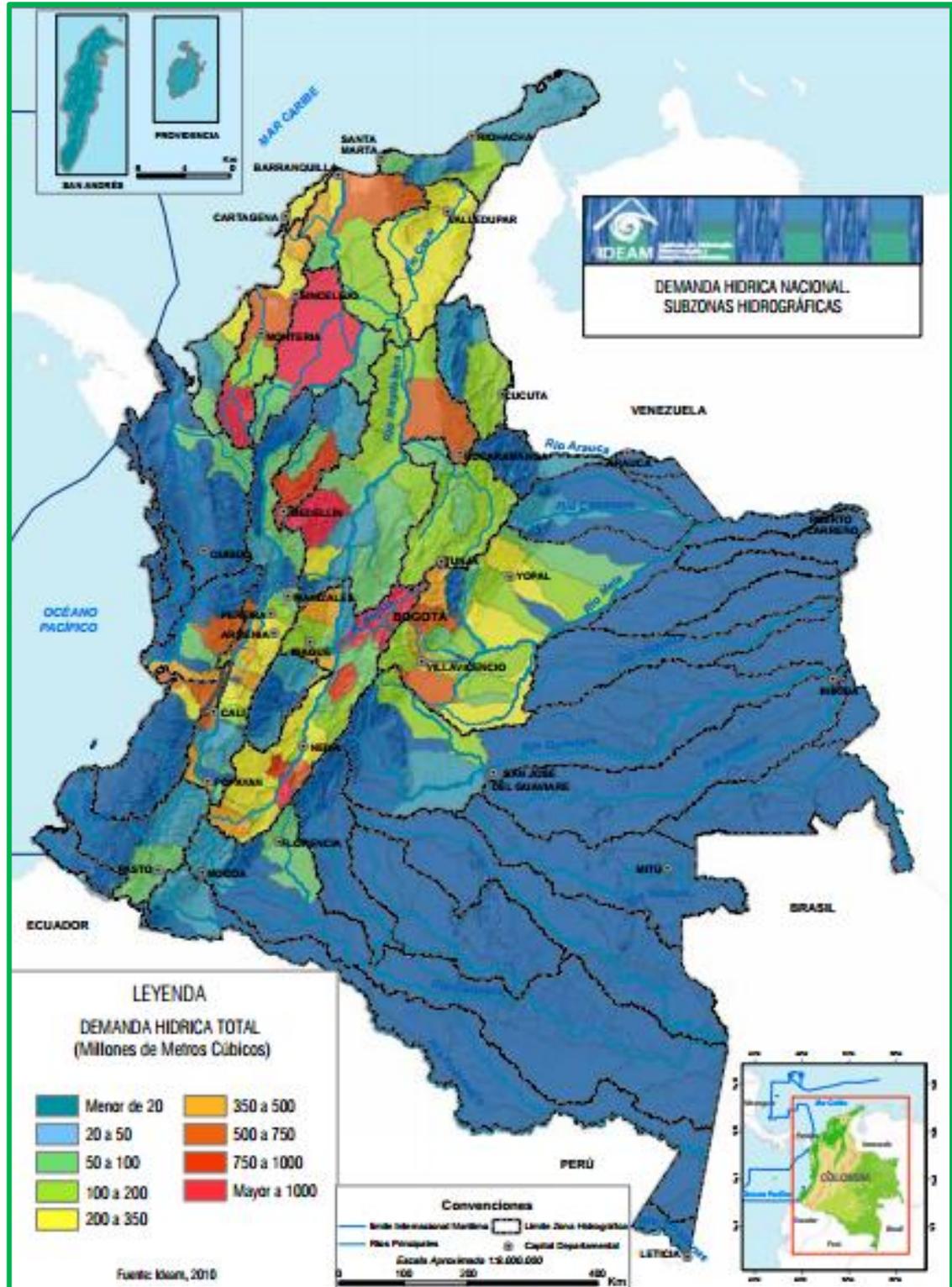


Fuente: IDEAM, 2010.

FIGURA 7. DEMANDA DE AGUA PARA LAS ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS EN COLOMBIA AÑO 2008.

De acuerdo con la información de estudios realizados por el IDEAM, se tiene que las ciudades en Colombia con mayor demanda de agua doméstica e industrial son Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla y Cartagena. Con respecto a la demanda para uso agrícola, que además de la precipitación requiere 4,05 Km³ para el riego de los cultivos son los departamentos de Tolima, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, La Guajira, Nariño, Norte de Santander, Santander y Valle del Cauca.

La Isla de San Andrés, las alta y media Guajira y el Departamento de Sucre y Tolima utilizan básicamente el agua subterránea para abastecimiento doméstico; el Valle del Cauca, la Sabana de Bogotá, el Urabá antioqueño, la zona bananera de Santa Marta y, Huila, lo utilizan para uso agrícola o industrial. La mayor cantidad de captaciones en el país se realiza de acuíferos someros, relacionados con valles de los ríos principales y son usados para abastecimiento doméstico, como en el caso de los Llanos Orientales, Cesar y muchas poblaciones de la Costa Atlántica y a lo largo del valle del río Magdalena, donde se convierte en unas de las principales fuentes abastecedoras en las zonas rurales por su fácil captación. (IDEAM, 2010) (Ver figura 8).



Fuente: IDEAM, 2010.

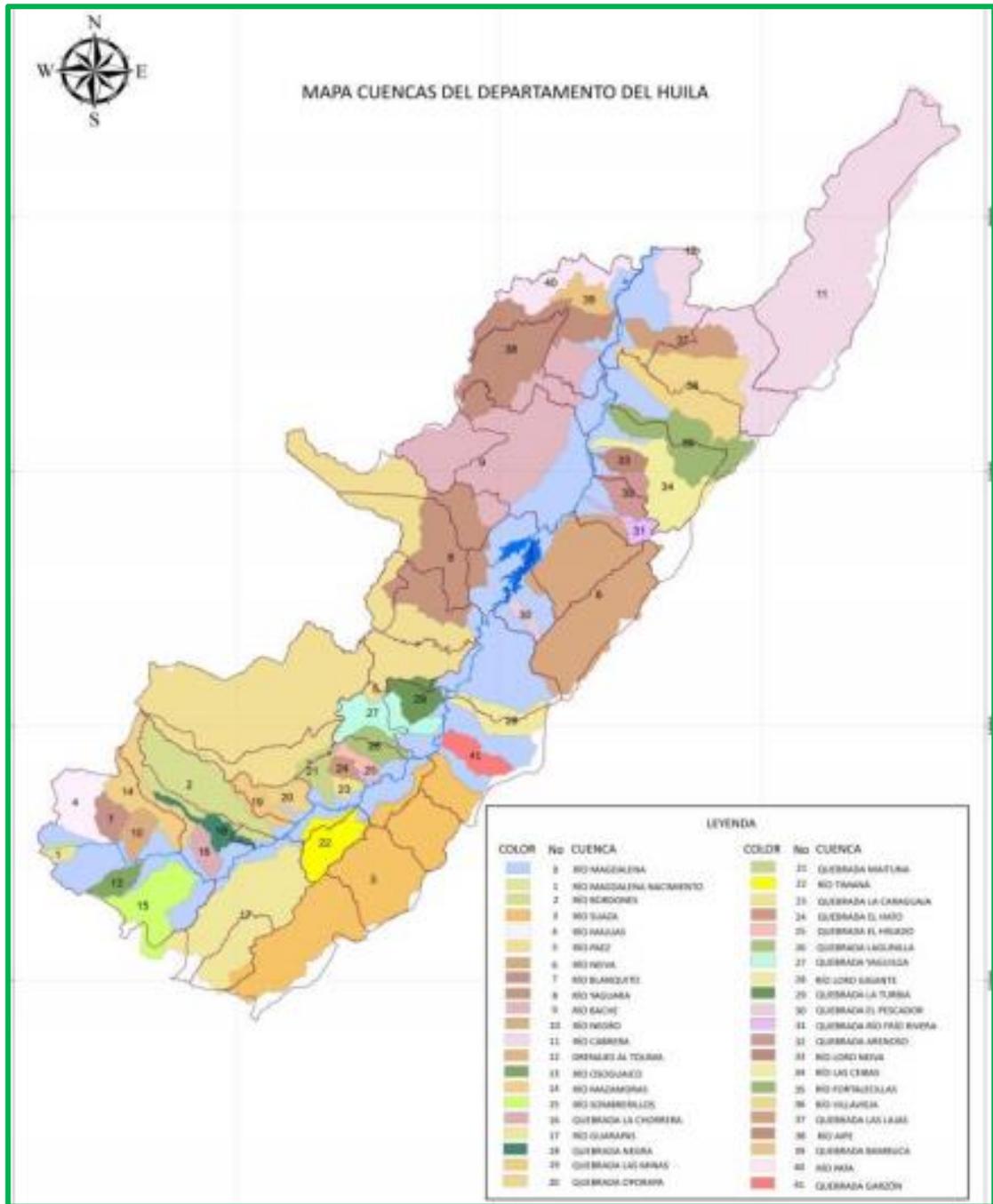
FIGURA 8. DEMANDA DE AGUA EN COLOMBIA

El consumo básico de agua potable en Colombia es de 20 m³/vivienda-mes, equivalente a 133 litros/habitante –día. El consumo promedio de los hogares urbanos con servicio de agua potable es de 200 litros/habitante -día y de 120 litros/habitante–día para los rurales, cifras superan el volumen de 80 litros mínimo necesario para la calidad de vida razonable. Dos problemas que enfrenta el agua potable son las grandes pérdidas en su distribución y la deficiente calidad.

En el abastecimiento del agua potable y el saneamiento básico es muy importante el aumento de la cobertura del servicio y la calidad del agua suministrada, sin embargo está muy descuidado el control de las aguas residuales. Las aguas residuales son tratadas en un bajo porcentaje, lo cual hace necesario mejorar los sistemas de tratamiento de agua potable y buscar agua en otras cuencas para minimizar el problema. Con los actuales costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, las grandes y medianas ciudades no están en capacidad de hacer las inversiones que requieren los sistemas de control y de atender los costos mensuales de operación y mantenimiento por la vía tarifaria. Es necesario un enfoque de financiamiento diferente al existente. (IDEAM, 2010).

De acuerdo a la codificación del IDEAM el departamento del Huila cuenta con:

- 13 Subzonas Hidrográficas, una Zona Hidrográfica “Alto Magdalena” y una Área Hidrográfica “Magdalena Cauca”.
- 41 subcuencas hidrográficas.
- 535 microcuencas, debidamente delimitadas y codificadas, incluyendo el cauce del río Magdalena y el Embalse de Betania.
- 146 pequeños afluentes directos del Magdalena que corresponden a las zonas propuestas por el IDEAM. (Borbón, 2013) que se ilustran claramente en la figura 9.

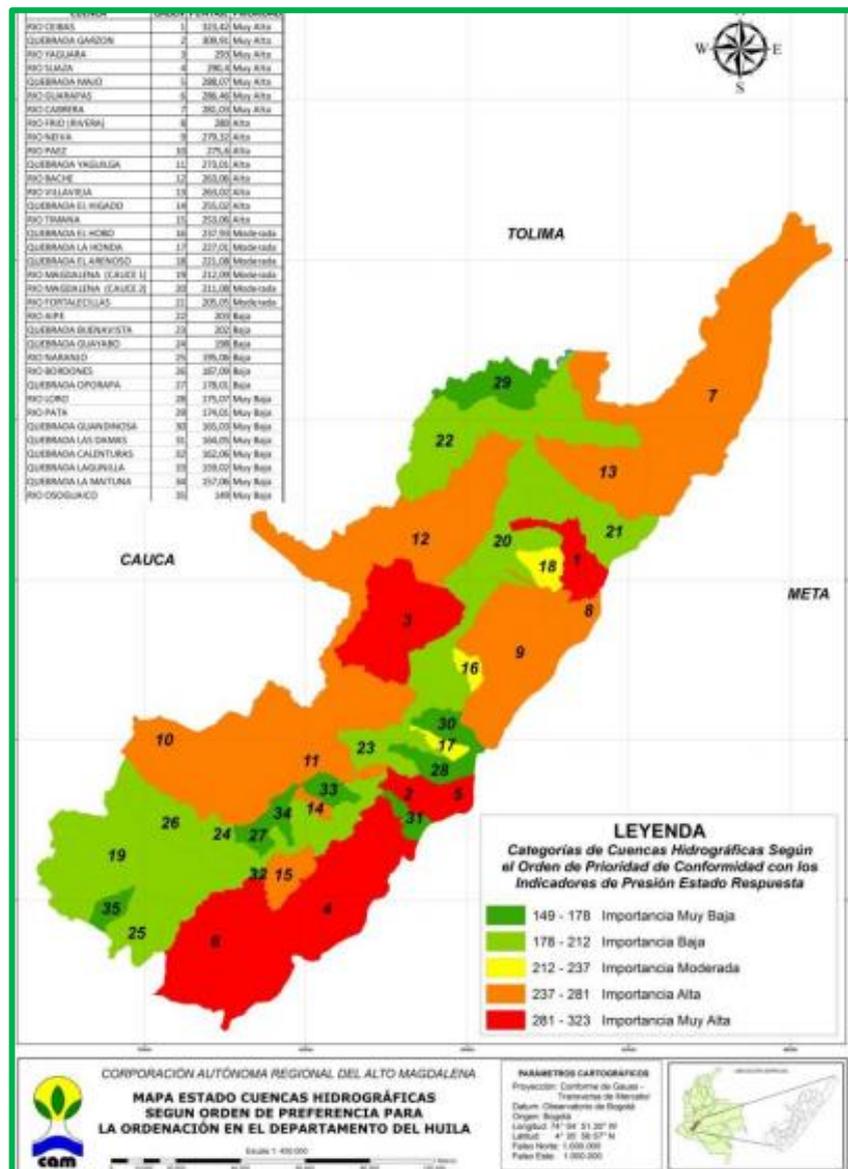


Fuente: (Borbón, 2013).

FIGURA 9. CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL DEPARTAMENTO DEL HUILA.

Al realizar el ejercicio de priorización de cuencas para el departamento se obtuvo el orden de preferencia para la ordenación, no obstante, para efectos de llevar a cabo los procesos de ordenación, se estableció un orden de preferencia por subregión, teniéndose las siguientes cuencas prioritarias para cada una de ellas (ver figura 10):

- Subregión Norte: 1) Río Las Ceibas; 2) Río Yaguará.
- Subregión Centro: 1) Quebrada Garzón; 2) Río Suaza; 3) Quebrada La Yaguilga.
- Subregión Sur: 1) Río Guarapas; 2) Río Timaná; 3) Quebrada Guayabo.
- Subregión Occidente: Río Páez.



Fuente: (Borbón, 2013).

FIGURA 10. CATEGORÍAS DE PRIORIZACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

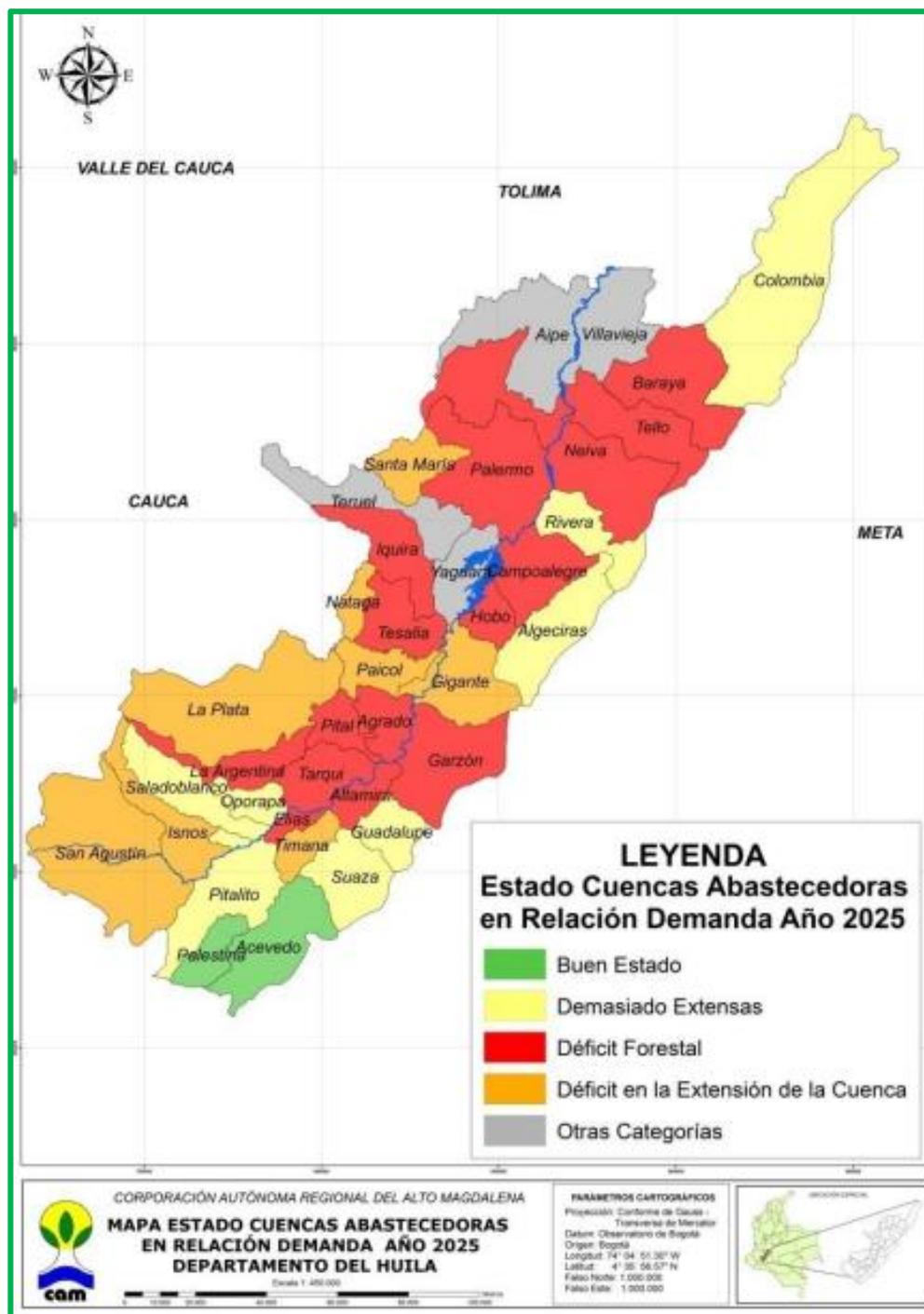
En el departamento del Huila se han realizado avances para la adaptación al cambio climático por el que se atraviesa actualmente, y concientización a las personas de los recursos hídricos, ya que muchos con los que cuenta el departamento, se encuentran en déficit hídrico, con peligro a desaparecer por la falta de uso racional del mismo y la contaminación excesiva de las fuentes principales, debido a que no existe un tratamiento previo del efluente que se vierte a las aguas superficiales. En la tabla 5 se observan cada una de las fuentes hídricas y la situación en la que se encuentra de acuerdo con el uso que se le está dando.

De igual manera, la figura 11 representa el estado de las cuencas abastecedoras en el departamento del Huila, en el año 2005.

TABLA 5. CONTAMINACIÓN DE FUENTES HÍDRICAS EN EL HUILA

MUNICIPIO	FUENTE HÍDRICA ACUEDUCTO	% USO	SITUACIÓN
San Agustín	Quebradon	110	Déficit
Elías	Q. Olicual	93	Déficit
Garzón	Garzón	84	Crítica
Altamira	La Perica	63	Alto Riesgo
Pital- agrado	Yaguailga- El Burro	62	Alto Riesgo
La plata	Q. Barbillas	59	Alto Riesgo
Neiva	Las Ceibas- El Tomo	57	Alto Riesgo
Oporapa	Q. Oporapa	52	Alto Riesgo
Isnos	Q. El Heluchal	52	Alto Riesgo
Paicol	Q. Santa Inés (moyas)	49	Alto Riesgo
	Afluente Quebrada Santa Inés	49	Alto Riesgo
Nátaga	Q. El Lindero	49	Alto Riesgo
	Q. El Orozco	49	Alto Riesgo

Fuente: (Borbón, 2013).



Fuente: (Borbón, 2013).

FIGURA 11. ESTADO DE LAS CUENCAS ABASTECEDORAS EN EL DEPARTAMENTO.

De acuerdo al ejercicio de priorización hasta el momento, se han iniciado procesos de ordenación en las siguientes cuencas, registrándose el avance a nivel de fases como se indica en la tabla 6 y se ilustra en la figura 12:

TABLA 6. PLANIFICACIÓN, ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

CUENCA	ÁREA CUENCA (HA)	FASE DEL POMCH
Río Ceibas	28.165	Ejecución
Río Guarapas	70.936	Formulado
Quebrada Garzón	11.354	Ejecución
Río Yaguará	80.244	Formulado
Río Páez	257.962	Diagnóstico
Río Timaná	19.994	Formulado
Quebrada Yaguilga	21.398	Formulado

Fuente: (Borbón, 2013)



Fuente: (Borbón, 2013)

FIGURA 12. ORDENACIÓN DE CUENCAS EN EL HUILA

2.3.1.3 RELACIONES DEMANDA-OFFERTA DE AGUA

Con base en las estimaciones de oferta y de demanda del recurso hídrico en Colombia se han determinado varios índices que permiten establecer el balance de agua:

- **ÍNDICE DE PRESIÓN DE LA DEMANDA SOBRE LA OFERTA:** Para las 45 cuencas hidrográficas que cubren el país y su variación espacial, se ha encontrado que para un año medio, la alta presión por demanda del recurso se encuentra en la zona Andina que soporta aproximadamente el 70% de la población y genera el 85% del PIB.
- **ÍNDICE DE ESCASEZ:** En las áreas municipales y las áreas que surten de agua las cabeceras municipales, se determinó el Índice de Escasez así: a) En condición con índice de escasez medio alto y alto, evaluada en año medio, se encuentra el 5% de los municipios del país. Durante el año seco este porcentaje se incrementa al 11.5% debido a la fragilidad de los sistemas hidrográficos de abastecimiento, b) En condiciones hidroclimáticas normales (media multianual), el 11% de los municipios del país, correspondientes al 13% de la población, acusan un índice de escasez mayor del 20%, c) En las cabeceras municipales, la condición más crítica se presenta en los meses más deficitarios de agua de los años secos. Para un año de condiciones secas, el 14% de las cabeceras municipales correspondientes a una población del 61% alcanzan índices de escasez con categorías de alto, medio alto y medio.

2.4 LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una lógica multivariada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones convencionales. De esta forma, no se determina si un elemento pertenece o no a un conjunto, sino la calidad de la pertenencia evaluada en un rango completo desde la no pertenencia hasta la pertenencia con la máxima calidad posible. Esta característica permite el análisis del razonamiento aproximado, menos estricto que la lógica bivaluada tradicional.

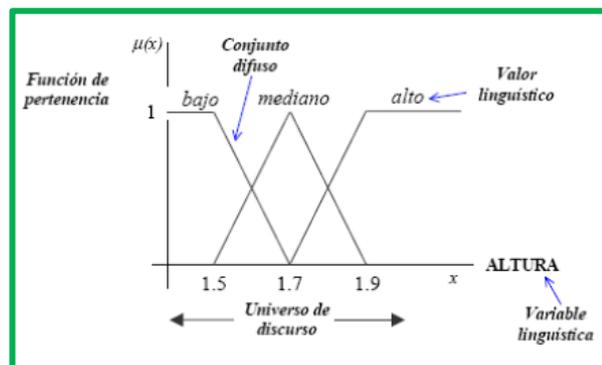
Tomando como base la imprecisión del razonamiento humano, pero bajo un planteamiento matemático, es capaz de generar la respuesta a una situación basándose en el conocimiento adquirido sobre ésta, que podrá ser inexacto e incompleto, permitiendo establecer límites suaves (o difusos) para los conjuntos, haciendo que no todo tenga que ser blanco o negro, sino que es posible la existencia de niveles de grises. (Barragán, 2009).

La lógica difusa, permite trabajar con variables tanto cuantitativas como cualitativas, lo cual representa una herramienta muy importante. Las variables cualitativas generalmente son obtenidas a través del conocimiento de un experto y disminuyen el error inducido al truncar las variables en rangos cerrados. (Duarte, 1997).

2.4.1 CONJUNTOS DIFUSOS O BORROSOS

Los conjuntos difusos son una extensión de los conjuntos ordinarios que permiten tratar la imprecisión de forma matemática, mientras que un conjunto ordinario contiene la totalidad de los entes que poseen una propiedad común (ver figura 13).

La diferencia entre un conjunto difuso y uno ordinario es que los límites de los difusos no están definidos de forma estricta, sino mediante una función denominada función de pertenencia, definida esta como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto difuso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A . (Salazar, 2012).



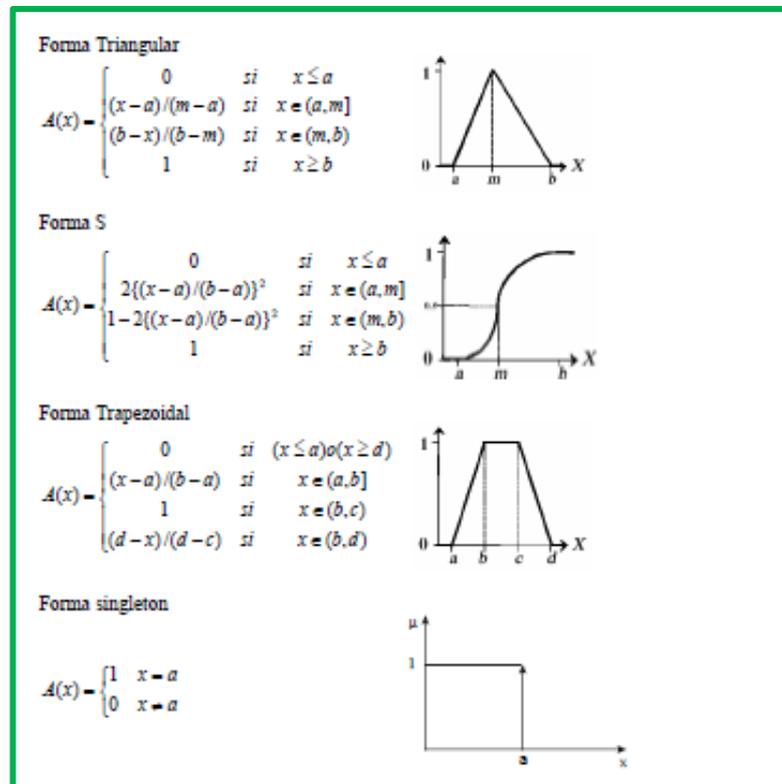
Fuente: (Salazar, 2012).

FIGURA 13. EJEMPLO CONJUNTOS DIFUSOS.

2.4.1.1 FUNCIONES DE MEMBRESÍA

Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta.

Existe una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son del tipo triangular, S, trapezoidal y singleton (ver figura 14) .



Fuente: (Salazar, 2012).

FIGURA 14. FORMAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA.

2.4.1.2 OPERACIONES DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS.

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, para la evaluación del antecedente de reglas.

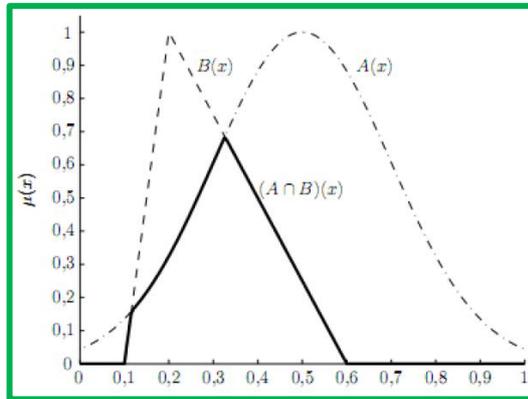
Se definen a continuación 2 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos:

- **INTERSECCIÓN:** La operación intersección de dos conjuntos difusos A y B, cuyas funciones de pertenencia son $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, respectivamente, se define como un conjunto borroso $C = A \cap B$ cuya función de pertenencia se relaciona con las de A y B mediante la **EC 1**. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de la operación intersección entre dos conjuntos difusos.

EC 1.

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in X$$

$$\mu_C = \mu_A \wedge \mu_B$$



Fuente: (Salazar, L.A, 2012).

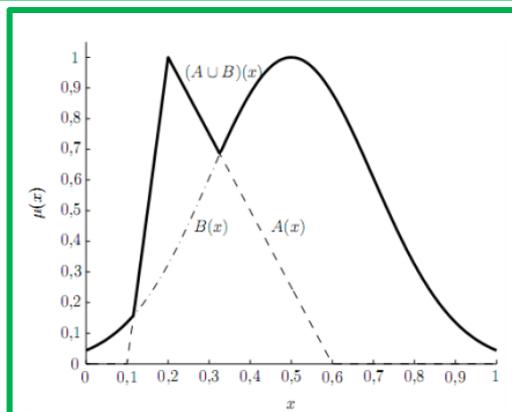
FIGURA 15. INTERSECCIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS.

- **UNIÓN:** De forma análoga a la operación intersección, la unión de dos conjuntos difusos A y B, cuyas funciones de pertenencia son $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, respectivamente, puede definirse como un conjunto difuso $C = A \cup B$ cuya función de pertenencia se relaciona con las de A y B mediante la EC 2. Una muestra de la operación de unión clásica puede verse en figura 16.

EC 2.

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in X$$

$$\mu_C = \mu_A \vee \mu_B.$$



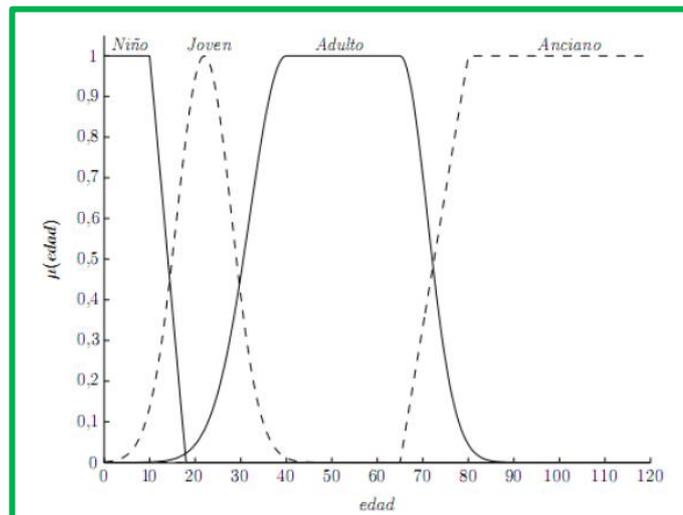
Fuente: (Salazar L.A, 2012).

FIGURA 16. UNIÓN ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS

2.4.2 VARIABLE LINGÜÍSTICA

Una variable lingüística es una variable cuyos valores son palabras o sentencias en un idioma natural o artificial; permiten el acercamiento de la lógica difusa al lenguaje natural, facilitando la utilización lógica del lenguaje ordinario y eludiendo así las deficiencias del lenguaje preciso en el área del control (Salazar, 2012).

Tal como se puede ver en la figura 17, cada término lingüístico se representa de forma cuantitativa mediante una función de pertenencia o distribución de posibilidad. En este caso, la variable lingüística edad se ha representado mediante las etiquetas lingüísticas niño, joven, adulto y anciano. Los términos niño y anciano se han creado utilizando funciones de pertenencia trapezoidales, la etiqueta joven mediante una función gaussiana, y adulto empleando una gaussiana doble (Salazar, 2012).



Fuente: (Salazar L.A, 2012).

FIGURA 17. VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE EDAD.

2.4.3 REGLAS DIFUSAS

Los controladores difusos usan reglas, estas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas borrosas o difusas o fuzzy rules. Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCES. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc. (Valverde, 1996).

Las reglas borrosas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para

expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control. (Valverde, 1996).

La base de reglas suele representarse por tablas. Esta es clara en el caso de 2 variables de entrada y una de salida. En la medida que la cantidad de variables lingüísticas crece, también lo hará la tabla, y más difícil se hará su edición. (Valverde, 1996).

Junto a cada regla puede estar asociado un valor entre cero y uno que pesa a tal regla, esto puede ser importante cuando una regla tiene menor fuerza que otras de la base de reglas (Valverde, 1996).

Existe una gran variedad de tipos de reglas, dos grandes grupos son los que en general se emplean, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno (TS, para abreviar).

La estructura de las reglas es la misma tanto para controladores como para modelos, simplemente cambiarán las variables implementadas (Valverde, 1996).

2.4.3.1 REGLAS DIFUSAS DE MAMDANI

(IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C THEN u1 is D, u2 is E)

Donde x1, x2 y x3 son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A, B y C son funciones de membresía de entrada (p.ej., alto, medio, bajo), u1 y u2 son las acciones de control (p.ej., apertura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, AND es un operador lógico difuso, podría ser otro. La primera parte de la sentencia "IF x1 is A AND x2 is B AND x3 is C" es el antecedente y la restante es el consecuente.

Un ejemplo es IF error is Positivo Grande AND derivada del error is Positiva Baja THEN u is Positiva Chica.

El esquema de control difuso de Mamdani consta, de un motor de inferencia, una base de conocimiento y unos interfaces tanto de fusificación como de defusificación para procesar las entradas y salidas del sistema. Los sistemas

difusos de tipo Mamdani presentan una serie de ventajas que propician su utilización en el ámbito del control:

- Los modelos de tipo Mamdani se comportan como aproximadores universales.
- Pueden utilizarse en aplicaciones reales, ya que tratan con facilidad entrada y salida reales.
- Proporcionan un marco natural para la inclusión del conocimiento de expertos en forma de reglas lingüísticas.
- Existe gran libertad a la hora de escoger el método de inferencia difusa, así como los interfaces de fusificación y defuzificación.

Por el contrario, también poseen una serie de limitaciones:

- Falta de flexibilidad debido a la rigidez con que se particionan los espacios de entrada y salida.
- No existe una distinción clara entre el conocimiento experto y la definición de las variables lingüísticas incluidas en las reglas difusas.
- Cuando las variables de entrada al sistema dependen unas de otras, es muy complicado obtener una partición difusa adecuada de los espacios de entrada.
- El tamaño de la base de conocimiento depende directamente del número de variables y términos lingüísticos que existan en el sistema.

2.4.3.2 REGLAS DIFUSAS DE TAKAGI-SUGENO

(IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C THEN $u_1=f(x_1, x_2, x_3)$, $u_2=g(x_1, x_2, x_3)$)

En principio es posible emplear $f()$ y $g()$ como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales.

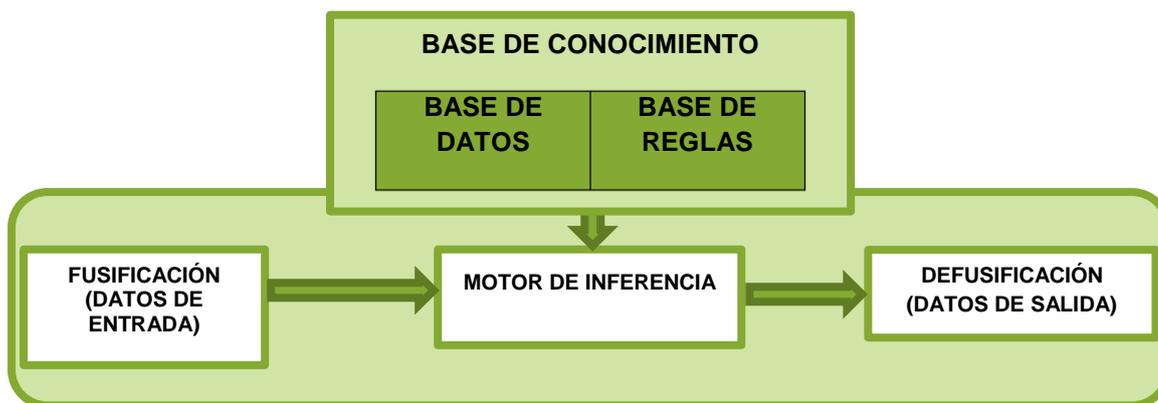
Ventajas

- Es computacionalmente eficiente.
- Trabaja bien con técnicas lineales (por ejemplo como lo disponible para controladores PID).
- Trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable.
- Tiene garantizada una superficie de control continua.
- Está bien adaptado al análisis matemático.

2.4.4 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

El motor de inferencia difusa es el mecanismo que permite obtener la salida de un sistema difuso en función de sus reglas y las entradas que le sean aplicadas. Esta salida puede ser tanto un conjunto difuso como un valor numérico, según se requiera por la aplicación. Para realizar la inferencia se deben seguir los pasos siguientes:

- En primer lugar es necesario calcular el grado de cumplimiento de cada antecedente en función de la entrada del sistema.
- Una vez calculados todos los antecedentes de cada regla, se componen según la definición lingüística de la misma, es decir, aplicando los operadores de intersección para condiciones Y, y los de unión para condiciones O. Esta medida proporciona un valor que representa la calidad con la que las reglas son satisfechas por la condición de entrada del sistema difuso, esto es, su grado de activación.
- Mediante el operador de implicación, Entonces, se obtiene el consecuente resultante de cada regla. En aplicaciones relacionadas con el control de procesos, los operadores de implicación más utilizados son las T–normas mínimos y producto. Al emplear el operador mínimo, la función de pertenencia del consecuente es recortada a la altura definida por el grado de veracidad de la regla; mientras que si se emplea el operador producto, la salida es escalada según dicho grado de veracidad.
- Por último, la regla composicional u operador de agregación, combina los resultados de todas las reglas, esto es, el resultado de la base de reglas, en un único conjunto difuso. El máximo y la suma acotada suelen ser las S–normas más utilizadas para obtener el conjunto difuso de salida.
- Si la aplicación requiere que la salida del sistema difuso sea numérica, se necesitará aplicar una defuzificación a la misma.



Fuente: (Salazar, 2012).

FIGURA 18. ESTRUCTURAS DE UN MODELO DIFUSO

El motor de inferencia puede verse matemáticamente como un esquema de Interpolación no lineal, ya que permite la fusión de la información de múltiples reglas en una conclusión única. Esta conclusión se obtiene a partir de la combinación de los consecuentes de las reglas del sistema como lo muestra la Figura 18, ponderadas según una función del grado de cumplimiento de cada una de ellas (Guzmán, 2006).

2.4.4.1 FUSIFICACION

En la lógica difusa el proceso de fusificación es de gran importancia ya que esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de interferencia difusa. Este es un procedimiento en el que se convierte un elemento del universo del discurso (Variables de Entrada al Sistema) en un valor en cada función de membresía. (Duarte, 1997).

2.4.4.2 BASE DE CONOCIMIENTO

La base de conocimiento almacena las relaciones existentes entre las entradas y salidas del sistema. Basándose en este conocimiento, el proceso de inferencia obtendrá las salidas asociadas a las entradas del mismo. Este elemento puede subdividirse en dos partes: la base de datos y la base de reglas. La base de datos contiene la definición de las variables lingüísticas empleadas en las reglas, es decir, las funciones de pertenencia que definen cada una de las etiquetas lingüísticas. La base de reglas contiene la colección de reglas lingüísticas del sistema (Salazar, 2012).

Ésta puede representarse como una lista de reglas, que es la forma más habitual, o mediante una tabla o matriz de decisión, que proporciona un formato más compacto si existen pocas variables.

Existen varios métodos para la obtención de las reglas de un sistema difuso, entre los que cabe destacar:

- Basados en el conocimiento de un experto, o heurísticos. Generalmente se obtiene su conocimiento mediante unos cuestionarios cuidadosamente organizados que permitan la generación de reglas del tipo Si–Entonces.
- Basados en las acciones de control de un operador, en función de los datos de entrada–salida observados durante un período suficientemente amplio de operación.
- Basados en aprendizaje mediante algoritmos automáticos.

2.4.4.3 DEFUSIFICACIÓN

Cuando la salida del sistema de inferencia es un conjunto difuso pero la aplicación requiere que sea un valor numérico concreto, es necesario emplear defuzificación. Este elemento convierte dicho conjunto en un valor numérico del universo de discurso de salida que será representativo de la conclusión obtenida (Salazar, 2012).



CAPÍTULO 3.
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 3.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO:

El municipio de Nátaga está localizado en la región sur-occidental del Departamento del Huila y su cabecera Municipal se encuentra a 2° y $34''$ de latitud norte y 75° $49''$ de longitud oeste; a una distancia de 120 Km del Municipio de Neiva, capital del Departamento, en las laderas de una ramificación de la cordillera central. Tiene una superficie de 132.87 Km², que equivalen a 13.286,88 hectáreas de las cuales solamente 44.6 pertenecen al perímetro urbano actual. (Bohórquez, *et al*, 2007). (Ver figura 19).

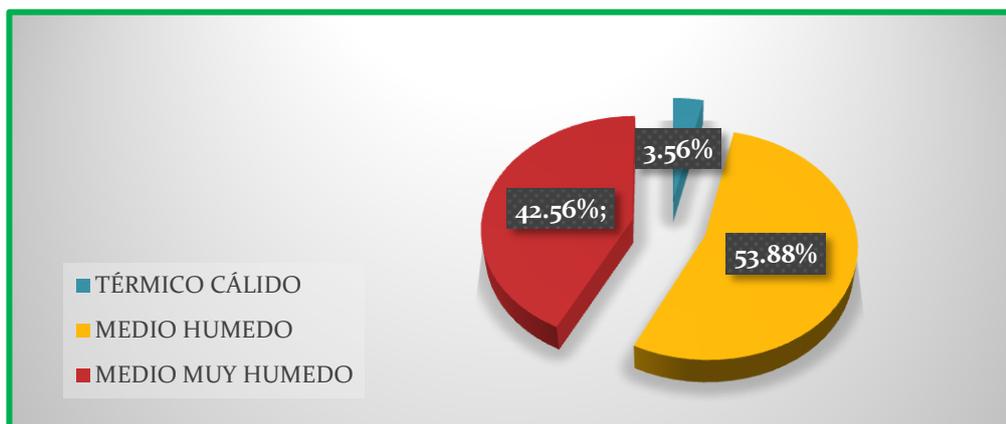


Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 19. LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE NÁTAGA.

3.1.1 CLIMATOLOGÍA

Las características del municipio de Nátaga lo ubican dentro de unos pisos térmicos frío a piso térmicos medios los cuales comprende temperaturas entre los 12°C hasta 24°C. a una altura sobre el nivel del mar de 1.480 metros; en su fisiografía presenta el aspecto de un plano inclinado cuya pendiente topográfica se halla al sur enfrentada al valle estrecho del río Páez y su pendiente estructural, al norte, con el valle amplio de Tesalia.



Fuente: (Bohórquez, et al, 2007).

FIGURA 20. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA NÁTAGA.

De acuerdo con (Bohórquez, et al, 2007), el clima medio húmedo comprende la zona sur del Municipio en las veredas de la Cascajosa, el Socorro, el Triunfo, la Pringamosa, la Cabaña, la Estrella, Alto Carmelo, los Laureles las Mercedes y el Orozco.

El clima medio muy húmedo predomina en la zona norte en las veredas de Buena Vista, San Isidro, la Hondura, las Mercedes, el Teniente, la Esmeralda, la Mesa, Patio Bonito y Yarumal (ver figura 20 y tabla 7).

TABLA 7. CLIMAS PREDOMINANTES EN NÁTAGA.

SIMBOLO	NOMBRE	ALTITUD MÍNIMA M.S.N.M	ALTITUD MÁXIMA M.S.N.M.	TEMPERATURA		PRECIPITACIÓN		AREA Km2
				MINIMA	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	
MMH	Clima medio y muy húmedo	1000	2.000	18°C	24°C	2.000	4000	71.86
MH	Clima medio y Húmedo	1.000	2.000	18°C	24°C	1.000	2.000	55.40

Fuente: (Bohórquez, et al, 2007).

3.1.2 HIDROLOGÍA

Nátaga cuenta con bastantes fuentes hídricas, el río Negro de Narvéez y la cuenca del río Páez forman la hoya hidrográfica de Nátaga al igual que la subcuenca del Yaguaracito; pero debido al mal uso del agua, la tala de árboles en los nacimientos y contaminación, los mismos han perdido su caudal, hasta tal punto que tienden a desaparecer con el transcurso de los años (ver tabla 8).

La zona occidental esta surcada por el río Negro de Narvéez, que presenta un caudal grande con posibilidades para implementar un distrito de riego para los municipio vecinos de Tesalia y Paicol, pues dada la topografía no permite la utilización de estas aguas en las veredas de Nátaga. (Bohórquez, *et al*, 2007).

TABLA 8. PRINCIPALES QUEBRADAS QUE SURCAN EL MUNICIPIO.

NOMBRE	CAUDAL MEDIO (L/S)	LONGITUD CAUCE (Metros)	VEREDAS	ESTADO CUENCA
Río Negro de Narvéez		33.000	Límite con el Dpto. del Cauca en todo el Occidente	Por la forma del Municipio más del 80% de las quebradas desembocan en este río por lo cual su cuenca es esa misma proporción, más parte del Departamento
Q. El pueblo	3.2	4.100	Estrella Orozco, Triunfo Pringamosa.	Desprotegida, altamente contaminada en todo su cauce por las aguas negras del casco urbano.
Q. Chirirí	2.0	2.750	Cascajosa	Desprotegida todo el cauce
Q. Los Jazmines	1.2	2.250	Cascajosa	Desprotegida todo el cauce, afluente de la Q Yapona
Q. Yapona	1.5	3.100	Cascajosa	Desprotegida toda el cauce
Q. El Estoraque	2.5	4.650	Cascajosa	Desprotegida toda el cauce
Q. La Laja	4.0	3.600	Límite Cascajosa Socorro	Desprotegida en su mayor parte, surte el acueducto vereda la Cascajosa y es sitio de interés ecoturístico
Q. La Lajita	0.5	2.150	Cascajosa	Desprotegida todo el cauce, afluente de la Q. La Laja
Q. La Honda	3.0	3.100	Socorro	Desprotegida todo el cauce
Q. El Mulato	1.5	2.200	Socorro	Desprotegida todo el cauce, afluente de la Q. La Honda
Q. El Lindero	4.0	7.007	Triunfo Socorro	Surte el Acueducto Municipal, medianamente protegida en la parte alta, se seca en verano y tiene fuerte presión por tala y contaminación diversa.
Q. Orozco	4.5	7.438	Buena Vista Orozco, Triunfo	Altamente Contaminada por aguas servidas y pulpa de café, desprotegida en su cauce y protegida en el nacimiento. Surte el acueducto Municipal, deforestación controlada

Q. El Poléo	0.8	1.850	Triunfo Socorro	Afluente de la Q el Lindero, medianamente con protección.
Q. EL Guadual	3.6	4.300	Triunfo Socorro	Afluente de la Q. El lindero, medianamente protegida
Q. El Putio	0.6	2.550	La Estrella Pringamosa.	Desemboca en la Q. El pueblo, contaminada por el alcantarillado. Desprotegida totalmente
Q. La Pringamosa	6.0	5.950	Alto Carmelo, Laureles Pringamosa.	Medianamente protegida en todo el cauce
Q. el Teniente	2.6	2.900	Alto Carmelo	Desprotegida en todo el cauce y contaminada por aguas servidas
Q. de Golondrinas	3.0	3.150	Teniente Esmeralda	Desprotegida en todo el cauce, contaminada por aguas servidas
Q. La Cueva	3.5	4.550	Esmeralda Teniente La Mesa	Surte el acueducto de las veredas la Mesa y la Esmeralda, pero es insuficiente, se halla desprotegida.
Q. La Esperanza	3.8	3.800	Patio Bonito, la Mesa	Desprotegida en su cauce y contaminada por aguas servidas
Q. Las Golondrinas	3.5	5.550	Yarumal, La Mesa	Desprotegida y contaminada
Q. el Venado	1.2	2.100	Yarumal	Afluente de la Q. Golondrinas
Q. la pedregosa	4.5	2.650	Yarumal. Límite con Iquira	Surte el acueducto de Yarumal y el Cabildo Llano Buco, se halla con buena vegetación
Q. Los Medios	3.6	3.100	Teniente	Vierte sus aguas la río Yaguaracito, se halla contaminada
Q. Piedra Gorda	2.5	2.750	San Isidro	Afluente del Yaguaracito, se halla contaminada.
Q. La Murciélagu	4.0	3.800	San Isidro	Límite con Tesalia, desemboca al Río Yaguaracito, surte el acueducto de San Isidro y le falta reforestación.
Río Yaguaracito	15.0	7.600	Nace en la Hondura	Esta longitud es desde su nacimiento hasta el límite con Tesalia, presenta deforestación en su parte alta

Fuente: (Bohórquez, et al, 2007)

Actualmente son de importancia por sus usos, potencialidades y caudales las quebradas de las cuales se abastecen los acueductos, y presentan las siguientes características adicionales:

- **QUEBRADA EL PUEBLO:** Fue la primera fuente abastecedora del acueducto municipal y por sus altos niveles de contaminación se dejó de captar agua de la misma. Actualmente aguas abajo recibe las aguas reutilizadas tratadas en la PTAR luego de que recibir un tratamiento especial.
- **QUEBRADA EL LINDERO:** Es la fuente que abastece el acueducto urbano, se halla contaminada y deforestada, en épocas de verano presenta un caudal muy reducido, requiere de ser reforestada en su nacimiento y cauce.

- **QUEBRADA EL OROZCO:** Utilizada como alternativa para el acueducto urbano, pero tiene unos niveles de contaminación que la hacen no apta para el consumo humano, pero mantiene buenos caudales a pesar de las épocas de sequía.
- **QUEBRADA LA PEDREGOSA:** Presenta gran importancia para el municipio dado a que de la misma, se capta agua para el acueducto de la vereda Yarumal, el Cabildo de Llano Buco y puede ser una alternativa para hacer un acueducto regional que beneficie las veredas el Teniente, las Mercedes y el Alto Carmelo las cuales carecen de fuentes de agua apropiadas para la construcción de acueductos por gravedad.

3.1.3 ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO

El suministro de agua para el consumo humano proviene de la quebrada el Lindero, fuente superficial que presenta problemas de deforestación y contaminación de su cuenca aguas arriba de la bocatoma principal, con un caudal medio captado de 12 l/s y con una cobertura del servicio del 95% de la población de la zona urbana, servicio administrado por La Empresa de Servicios públicos de acueducto y alcantarillado que presta el servicio las 24 horas del día.

La zona Urbana del municipio cuenta con el servicio de alcantarillado en un 80%. Mientras que la zona rural del Municipio de Nátaga, no cuenta con sistema de alcantarillado, si no pozos sépticos, o en su defecto depositan a campo abierto sus desechos afectando las fuentes hídricas aledañas y causando graves problemas de salud a los habitantes del sector; lo que se relaciona directamente con los índices de morbilidad del municipio.

Desde el año 2007, se ha venido adelantando la construcción y puesta en funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, de la zona urbana lo cual permitirá una mejor disposición final de ellas, y evitar la contaminación de la quebrada el Pueblo, lugar donde se vierte el efluente tratado en la misma. (Plan de Desarrollo, 2011)

Las causas más importantes de contaminación hídrica son el vertimiento de aguas residuales domésticas (sin tratamiento), aguas provenientes del lavado del café, uso indiscriminado de agroquímicos cerca a los cuerpos de agua, mala disposición de desechos sólidos, erosión de los suelos y explotaciones mineras.

3.1.4 ACTIVIDAD ECONÓMICA PREDOMINANTE.

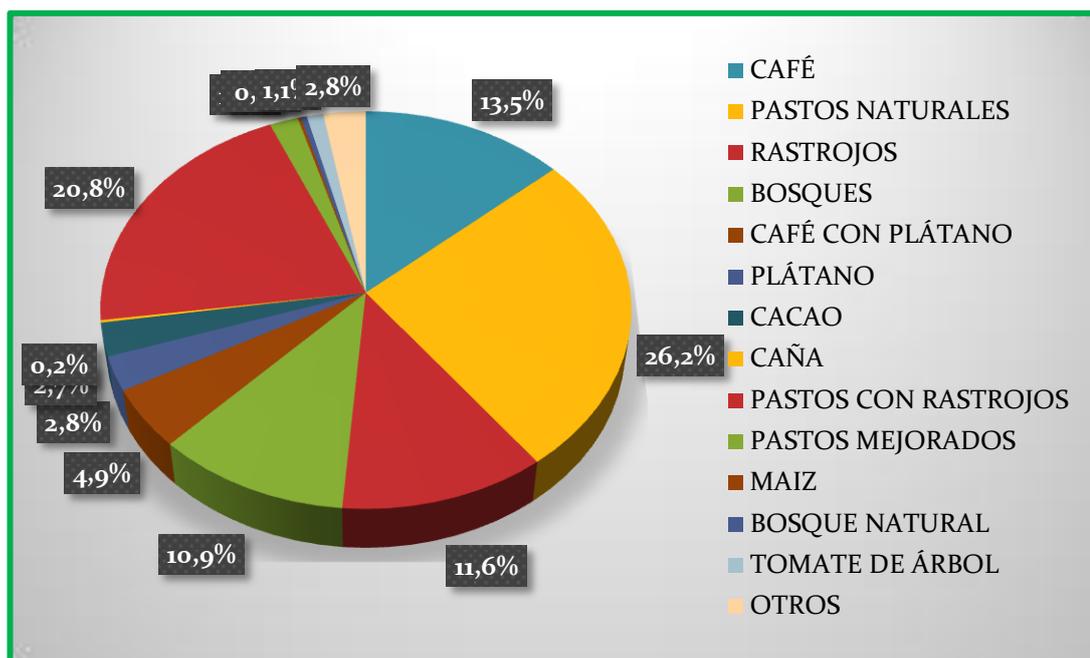
En la zona de estudio, los recursos naturales agua y suelo se utilizan principalmente para la agricultura y se estima que el 80% de su población se dedica exclusivamente a ella.

La actividad predominante es la agricultura, caracterizada por una estructura económica ejemplar, donde el productor – propietario, involucra su trabajo y el de su familia en la explotación de la finca, pero los ingresos así obtenidos son de subsistencia, y no se generan utilidades que pueda emplearlas en mejorar su propiedad y el bienestar social de su familia, y menos, para realizar ahorros que puedan solucionar situaciones presupuestales críticas en tiempos futuros. (Plan de Desarrollo, 2011) (Ver figura 21).

El café es el cultivo de mayor importancia en el municipio, seguido del plátano en su mayoría de autoconsumo que se destina en un 20% para el auto consumo familiar y para la alimentación animal, al igual que la caña panelera que destina un 75% para autoconsumo y el 25% restante para comercializar entre el municipio. El cacao toma importancia debido a que en muchas veredas se ha tenido que eliminar el cultivo de café, por la presencia de broca, el 58% de la producción se exporta al municipio de la Plata o a la capital huilense.

Los cultivos menos significativos son el del frijol y el del maíz, debido a la baja tecnificación de los mismo, lo que conlleva a que la rentabilidad sea baja.

Se considera que el mayor problema en el sector agrícola es la ausencia total de tecnología, puesto que no se cuenta con ningún tipo de maquinaria agrícola debido a que las condiciones topográficas del terreno impiden llevar las mismas al lugar de trabajo, causando que todas las labores sean desarrolladas manualmente, afectando de manera directa la producción y obteniendo bajos rendimientos en el campo, además de obtener semillas criollas y no de alta calidad.



Fuente: (Vargas, 2011).

FIGURA 21. USO ACTUAL DEL SUELO

3.2 METODOLOGÍA.

La metodología empleada para la realización del presente proyecto, consta de 3 fases, las cuales se resumen por medio de la figura 22 y se especifican claramente a continuación de la misma.

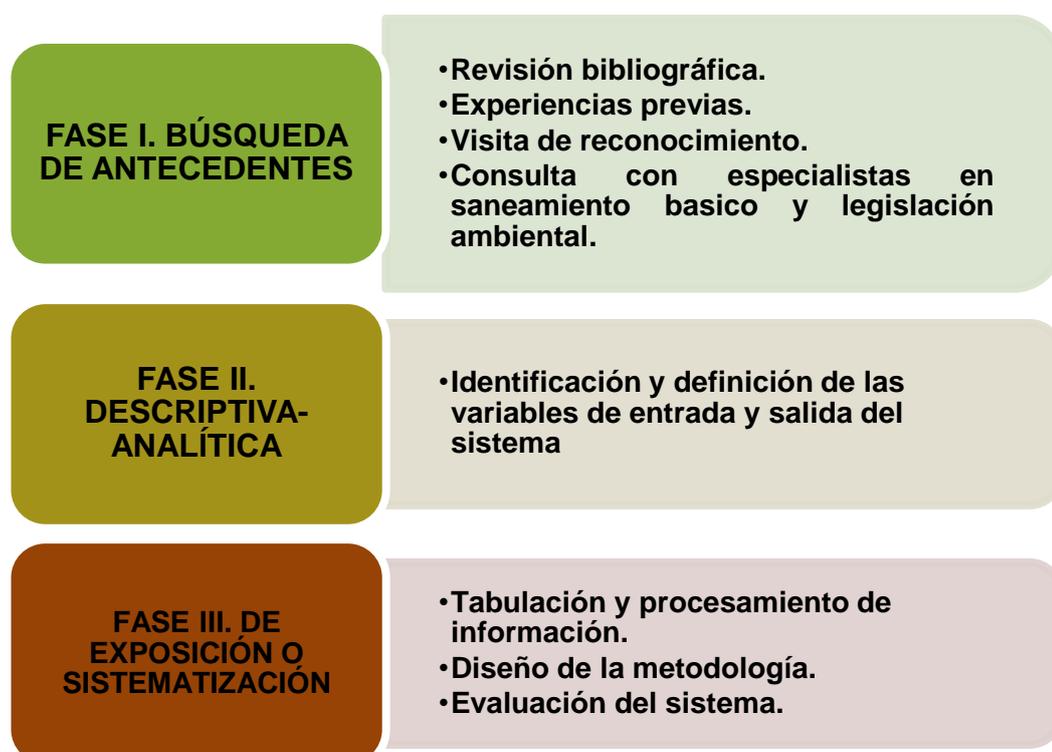


FIGURA 22. METODOLOGÍA.

3.2.1 FASE I: BÚSQUEDA DE ANTECEDENTES

- **ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE**

Investigación en bases de datos no especializadas, revistas científicas como SciELO, U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, ELSEVIER, EIDENAR, entre otras.

- **ESTUDIO Y ANÁLISIS DE EXPERIENCIAS PREVIAS**

Consulta en proyectos de grado con temas afines, tratamiento de aguas residuales domésticas tratadas, y herramientas hidroeinformáticas, consulta en el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM), para la compra de información de los parámetros de precipitación (mm), evaporación (mm) y temperatura media (°C) de la(s) estacione(s) hidroclimatológicas Nátaga y estación Agraria La Plata, datos mensuales, con un periodo de 20 años (1993-2013).

- **VISITA DE RECONOCIMIENTO A LA PTAR DEL MUNICIPIO DE NÁTAGA.**

Se hizo el reconocimiento y visita del área de estudio, el día 21 de Marzo, en compañía del personero Municipal de Nátaga Dr. Oscar Iván Santofimio, y el funcionario encargado de la PTAR, Fortunato Noscue Palma, en donde además de observar los respectivos tratamientos del agua residual, se recolecta la información del diseño y monitoreo de la PTAR, datos e información sobre la unidades del sistema de tratamiento y Georreferenciación del área de estudio.

- **CONSULTA CON ESPECIALISTA EN LA TEMÁTICA.**

Una vez calculadas las variables de índice de escasez y eficiencia de tratamiento, se aplica una encuesta a tres especialistas con conocimiento en saneamiento básico rural y legislación ambiental (ver perfiles en los anexos), que cuenta con preguntas de selección múltiple con única respuesta tipo condicional (**SI** el IE es **NO SIGNIFICATIVO Y** la ET es **ALTA ENTONCES**, la reutilización es), relacionadas con diferentes situaciones que puedan presentarse en donde se involucran las variables de estudio.

3.2.2 FASE II: DESCRIPTIVA-ANALÍTICA.

3.2.2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA AL SISTEMA.

- Índice de escasez (%). Variable de entrada
- Eficiencia del tratamiento. (%) Variable de entrada
- Reutilización del agua (%) Variable de salida

3.2.2.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA COMO MEDIRLAS Y VALIDARLAS.

- ✓ **ÍNDICE DE ESCASEZ (%):** para el cálculo de dicha variable se tendrá en cuenta la oferta y demanda hídrica de la zona de estudio, según la resolución 0865 del 22 de Julio de 2004, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del Índice de Escasez para aguas superficiales, desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, de acuerdo con el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL; definiéndose este como la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible, luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y caudal ecológico (ver EC. 3); se trabaja con datos de temperatura media, precipitación y evaporación de las estaciones hidroclimatológicas de La Plata y Nátaga.

EC 3.

$$Ie = \frac{Dh}{Oh} * Fr * 100$$

Dónde:

Ie: Índice de escasez en porcentaje. (%)

Dh: Demanda hídrica en metros cúbicos (m³).

Oh: Oferta hídrica superficial neta en metros cúbicos (m³).

Fr: Factor de reducción por calidad del agua y el caudal ecológico.

100: Para expresarlo en porcentaje.

✚ **CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA.**

✓ **Precipitación**

Para el cálculo del resumen histórico de precipitación de la zona de estudio, se adquirieron datos mensuales de precipitación, en un periodo de 20 años (1993-2013) de la Estación Hidroclimatológica de Nátaga y que por medio de promedio aritmético se obtuvieron los datos, para efectos del cálculo del índice de escasez.

✓ **Evapotranspiración**

Para el cálculo de la evapotranspiración, se analizan los resultados de dos métodos; la ecuación de TURC, y el método de THORNTHWAITE. Conociendo de antemano las condiciones ambientales de la cuenca y la clasificación climática de acuerdo con el EOT, el cual denomina la zona como zona húmeda, se puede concluir que la ecuación de TURC no es APLICABLE a esta zona de

estudio, sino en zonas secas, por consiguiente, se calcula la evapotranspiración con la siguiente ecuación:

✓ **Evapotranspiración Potencial método de THORNTHWAITE:**

- Se calcula un índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual °C (t)

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

EC 4.

- Se calcula el índice de calor anual (I) sumando los 12 valores del año

EC 5.

$$I = \sum i$$

- Se calcula la evapotranspiración real ETP mediante la ecuación:

EC 6.

$$ETR = 16 \left(\frac{10 t}{I} \right)^a$$

ETR = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 y 31 y 12 horas de sol (Teórico).

Dónde:

t = Temperatura media mensual °C

I = Índice de calor anual

a = $(675 * 10^{-9} * I^3) - (711 * 10^{-7} * I^2) + (1792 * 10^{-5} * I) + 0.49239$

✓ **Escorrentía total**

El método recomendado para el cálculo de la escorrentía propuesto por la UNESCO, que a partir de los parámetros observados directamente como la precipitación y la escorrentía que mediante la aplicación de la ecuación simple de balance hídrico simplificado se obtienen los valores medios de ETR para las cuencas hidrográficas o regiones de interés.

EC 7.

$$ESC.TOTAL = P - ETR$$

Dónde:

Esc. total = Escorrentía media total (mm)

P = precipitación media multianual (mm)

ETR = evapotranspiración Real media multianual (mm)

✓ **CUANTIFICACIÓN DE LA OFERTA NETA HÍDRICA DISPONIBLE.**

EC 8.

REDUCCIÓN TOTAL DE LA OFERTA HÍDRICA
= REDUCCIÓN POR CAUDAL ECOLÓGICO 25%)

✓ **REDUCCIÓN DE LA ESCORRENTÍA POR CAUDAL ECOLÓGICO.**

El caudal mínimo, ecológico o caudal mínimo remanente es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua. El IDEAM ha adoptado como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual. (MAVDT, 2004)

Debido a que la Quebrada el Pueblo no cuenta con una estación limnimétrica, y la estación más cercana de este tipo es la estación puente Itaibe en el Municipio de Paicol, cuya corriente es el río Páez, que ya ha sido afectada aguas arriba por el Río Negro de Narváez, y por la misma microcuenca Quebrada El Pueblo, el cálculo de caudal ecológico se calcula como:

EC 9.

CAUDAL ECOLÓGICO = (ESC. TOTAL * 0,25)

✚ **CÁLCULO DE LA DEMANDA HÍDRICA.**

El país no cuenta con un sistema de información continua y sectorial de uso del agua, ni ha contabilizado históricamente el agua usada de fuentes superficiales y subterráneas. El volumen de agua usada para el desarrollo de actividades socioeconómicas, debe ser el resultado de las mediciones efectuadas por los usuarios y reportadas a las instituciones relacionadas y autoridades ambientales regionales. Para el cálculo de la demanda hídrica, se presentan los siguientes escenarios (MAVDT, 2004):

- ❖ CUANDO EXISTE INFORMACIÓN MEDIDA
- ❖ CUANDO EXISTE INFORMACIÓN MEDIDA, PERO ESTA ES INSUFICIENTE.
- ❖ CUANDO NO EXISTE INFORMACIÓN.

Para efectos del cálculo del índice de escasez en este problema en particular se adoptó el caso cuando NO existe información, ya que solo existe información de censos en la zona urbana y rural del Municipio de Nátaga.

En este escenario se debe estimar potencialmente el volumen de agua demandada en millones de metros cúbicos a nivel sectorial. Estas estimaciones se basan principalmente en la asociación de dos variables: el volumen de producción sectorial y un factor de consumo de agua por tipo de bien, con el limitante de que estas estimaciones no contemplan las pérdidas de los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua en el suministro de agua potable y a nivel de la industria, tampoco tienen en consideración el nivel tecnológico, los métodos de producción limpia y el uso que del agua hace la industria extractiva (MAVDT, 2004).

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

EC 10.

Dónde:

DT= Demanda Total de agua

DUD= Demanda de Agua para Uso Doméstico

DUS = Demanda de Agua para el Sector Servicios.

DUA= Demanda de Agua para uso Agrícola.

Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

- ✓ **DUD= Demanda de Agua para Uso Doméstico:** es la cantidad de agua consumida por la población urbana y rural para suplir sus necesidades. El cálculo de la demanda de agua para consumo humano se realiza utilizando la siguiente expresión:

EC 11. $DUD = \text{Demanda per cápita rural} * \text{número de habitantes rurales}$

Los datos del censo de 1.993, arrojan una población total de 5.102 habitantes (ver tabla 10). De acuerdo con la tabla 9, se calculará la población utilizando por lo menos los siguientes modelos matemáticos: Aritmético, Geométrico y Exponencial

TABLA 9. NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO

MÉTODO POR EMPLEAR	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Aritmético, Geométrico y Exponencial	X	X		
Aritmético, Geométrico, Exponencial y otros			X	X
Por componentes (demográfico)			X	X
Detallar por zonas y detallar densidades			X	X

Fuente: (RAS, 2000).

De acuerdo con el (RAS, 2000). Para el cálculo de la demanda de agua en este problema se optó por utilizar el modelo aritmético ya que el nivel de complejidad del sistema es bajo y el cual supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

EC 12.

$$P_f = P_{UC} + \frac{P_{UC} - P_{Ci}}{T_{UC} - T_{Ci}} * (T_F - T_{UC})$$

Donde P_f es la población (hab.) correspondiente al año para el que se quiere proyectar la población, P_{UC} es la población (hab.) correspondiente al último año censado con información, P_{Ci} es la población (hab.) correspondiente al censo inicial con información, T_{UC} es el año correspondiente al último año censado con información, T_{Ci} es el año correspondiente al censo inicial con información y T_F es el año al cual se quiere proyectar la información.

TABLA 10. POBLACIÓN POR ZONAS SEGÚN CENSOS

CENSO	P. URBANA	P. RURAL	P. TOTAL
1964	707	1.568	2.275
1973	1.351	2.065	3.416
1985	2.388	3.101	4.489
1993	2.753	2.349	5.012
2006	2.235	4.550	6.785

Fuente: (Bohórquez, et al, 2007).

La demanda de agua de uso doméstico por persona esta condicionada por el nivel de complejidad del sistema de acueducto cuyos valores estan consignados en la **TABLA 11.**

TABLA 11. NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	DOTACION NETA MÍNIMA (L/Hab Día)	DOTACION NETA MÁXIMA (L/Hab Día)
Bajo	100	150
Medio	120	175
Medio alto	130	-
Alto	150	-

Fuente: RAS 2000

- ❖ **DUA=** Demanda de Agua para Uso Agrícola, la principal fuente de agua para la agricultura es la precipitación, los volúmenes adicionales necesarios para el desarrollo de cultivos, deben ser previstos por sistemas de riego. Cuando la precipitación es menor que el uso consuntivo de un cultivo (ETP*kc) el agua debe ser suministrada a través de sistemas de riego.

EC 13.

$$DUA = [P - (ETP * kc)] * ha$$

Dónde:

DUA= Demanda de agua para el sector agrícola

P= Precipitación

ETP= Evapotranspiración potencial

Kc= Coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 33)

Ha= Número de hectáreas cultivadas.

Para efectos de cálculo de la demanda de agua de uso agrícola se deben tener en cuenta las clases de cultivos existentes en la zona y que para el cálculo se estimara y se promediara el Kc del cultivo de acuerdo a los datos de los cultivos presentes, consignados en la tabla 12.

TABLA 12. CULTIVOS PRESENTES EN LA ZONA CON SU COEFICIENTE DE CULTIVO

TIPO DE CULTIVO	AREA (Ha)	COEFICIENTE DE CULTIVO Kc
Café	1.784	1,1
Plátano	368	1,2
Cacao	353	1,05
Caña	21	1,25
Maíz	29	1,15
Café con plátano	643	1,15
Tomate de árbol	147	0,9
Total Ha cultivadas	3.345	∑kc=1,11

Fuente: (Área Has) (Bohórquez, *et al*, 2007), (Coeficiente de cultivo) FAO, Estudio de riego y drenaje 56, Evapotranspiración de cultivo.

El coeficiente de cultivo Kc que se manejara para calcular la demanda de agua de uso agrícola (DUA) es de 1,11 que corresponde al promedio de los coeficientes de cultivo presentes en la zona.

Para calcular la evapotranspiración potencial en la zona se tomara en cuenta en coeficiente que depende de la distribución de las lluvias en el mes y de la capacidad del suelo para almacenar humedad. Valor que oscila entre (0,5-0,9). En el caso de estudio presente se toma un coeficiente de (0,7) de acuerdo con la distribución de las lluvias y la evapotranspiración real antes calculada. (MAVDT, 2004)

EC 14.

$$ETR = k ETP$$

$$ETP = ETR / k$$

Dónde:

ETR= Evapotranspiración Real (mm)

ETP = Evapotranspiración Potencial (mm)

k = Coeficiente del Régimen de Lluvias de la zona.

Para el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial de Colombia, de acuerdo con la resolución número 0865 del 22 de Julio de 2004, se establece la escala de valoración, ilustrada en la tabla 13, para las categorías del índice de escasez:

TABLA 13. CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE ESCASEZ

CATEGORÍA	RANGO (%)	EXPLICACIÓN
Alto	>50	Alta
Medio alto	21-50	Apreciable
Medio	11-20	Baja
Mínimo	1-10	Muy baja
No significativo	<1	No significativa

Fuente: (Resolución 0864,2004)

- ✓ **EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO (%):** Para determinar el rango de la eficiencia del tratamiento, se analizan los resultados de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del efluente, determinados por el laboratorio de aguas ASEBIOL SAS (ver tabla 14).

De acuerdo al decreto 1591 de 1984 los valores permisibles de eficiencias de tratamiento son mayores a 80% en carga, lo cual se encuentra entre los valores que son aceptables para el tratamiento de agua residual doméstica, es decir una eficiencia de tratamiento MUY BUENA, y que con base a la opinión de expertos en saneamiento básico, fueron determinados los otros rangos.

Artículo 75. La carga de control de un vertimiento que contenga las sustancias de que trata el artículo anterior, se calculará mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones.

EC 15.

$$A = (Q) (CDC) (0.0864)$$

$$B = (Q) (CV) (0.0864)$$

Parágrafo 1. Para los efectos de las ecuaciones a que se refieren el presente artículo adóptense las siguientes convenciones:

Dónde:

A: Carga de control, Kg/día.

Q: Caudal promedio del vertimiento, l/seg.

B: Carga en el vertimiento Kg/día.

CDC: Concentración de control, mg/l.

CV: Concentración en el vertimiento, mg/l.

0,0864: Factor de conversión.

✓ **MUESTRA DE CÁLCULOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN.**

El porcentaje de remoción se representa de acuerdo con la siguiente ecuación:

EC 16.

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = \left(100 - \frac{\text{SALIDA} \cdot 100}{\text{ENTRADA}}\right)$$

TABLA 14. CATEGORÍAS DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

CATEGORÍA	RANGO (%)	EXPLICACIÓN
Muy buena	>80	Alta
Buena	60-80	Apreciable
Regular	40-59	Baja
Mala	20-39	Muy baja
Deficiente	<20	No significativa

Fuente: (Elaboración propia).

- ✓ **REUTILIZACIÓN DEL AGUA (%):** Las posibles respuestas son las categorías de la variable de salida del sistema, basado en el conocimiento de expertos en temas afines (ver tabla 15). La confiabilidad o no confiabilidad de la reutilización de la misma depende del tratamiento efectivo que se le proporcione al afluente en la PTAR, y la justificación o injustificación de reutilizarla, depende de los factores socioeconómicos, culturales y el índice de escasez de la zona de estudio.

TABLA 15. CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DEL REÚSO.

CATEGORÍA	RANGO (%)
REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA	80-100
REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA	60-80
REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA	40-60
REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE INJUSTIFICADA	20-40
NO REUTILIZAR	0-20

Fuente: (Elaboración propia).

3.2.3 FASE III: DE EXPOSICIÓN O SISTEMATIZACIÓN.

Una vez identificadas y definidas las variables de estudio de acuerdo con los resultados obtenidos a partir de las encuestas aplicadas a expertos, se tabulan y procesa la información.

Con la ayuda de la caja de herramientas de Matlab® (*fuzzylogictoolbox*), se diseña un sistema de lógica difusa, se definen las reglas del mismo basadas en el conocimiento experto, se prueban las funciones de membresía y se escoge la que más se ajuste al modelo.

Una vez diseñada la metodología y corrido el sistema, se implementa al caso de estudio, y se ejecuta, evaluando y verificando si cumple o no con las necesidades expuestas anteriormente.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE NÁTAGA.

El municipio de Nátaga, en el 2006, contaba con 6.785 habitantes, de los cuales, 4.550 pertenecían a la zona rural y 2.235, a la zona urbana; es de vocación agrícola y su principal cultivo es el café. (Romero, *et al*, 2006). Cuenta con los servicios públicos básicos, y el porcentaje poblacional aumenta más cada año.

La PTAR del Municipio se encuentra ubicada a 2°32'28" latitud norte y 75°48'38.2" longitud oeste; la misma cuenta con un tratamiento preliminar y uno secundario para la recuperación de aguas residuales del centro poblado.

- **TRATAMIENTO PRELIMINAR**

Consta de una tubería de entrada, un canal de aproximación, un vertedero de excesos, dos rejillas, dos desarenadores en paralelo y una canaleta Parshall.

- **REJILLAS DE CRIBADO**

Para realizar el proceso de cribado, la planta de tratamiento debe tener rejillas que tienen como fin separar los sólidos gruesos mayores a una pulgada de diámetro para así evitar que lleguen a las siguientes unidades del tratamiento (ver figura 23).



Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 23. REJILLAS DE CRIBADO.

- **DESARENADOR**

La planta de tratamiento posee una caja desarenadora para la separación de las arenas de las aguas residuales que presentan diámetros menores de 2 mm, esta caja es de sección cuadrada y el objeto de esta es que las arenas se sedimenten por la acción de la gravedad (ver figura 24).



Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 24. DESARENADOR

- **CANALETA PARSHALL**

Al final de las cajas desarenadoras se tiene instalado un aforador tipo Parshall para cuantificar la cantidad de agua que ingresa a la planta.

- **TRATAMIENTO SECUNDARIO**

Conformado por cuatro UASB (Upflow anaerobic sludge blanket), dos Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) (ver figura 26), con lechos filtrantes plásticos; y cuatro lechos de secado (ver figura 27); finalmente, el efluente tratado es vertido a la Quebrada El Pueblo a pocos metros.

- **REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA)**

En este reactor se lleva a cabo el proceso de degradación anaerobia y tiene como objetivo fundamental, disminuir la concentración de sólidos suspendidos y de la materia orgánica medida como DBO (ver figura 25). Los productos finales de la digestión anaerobia son: agua, material celular y biogás. El biogás generalmente constituido por metano (70%), bióxido de carbono (29.5%) y trazas de ácido sulfhídrico y nitrógeno (0.5%).

El agua residual que proviene de la caja para dar carga hidráulica, se envía a la caja de entrada del reactor RAFA, que se encuentra ubicada inmediatamente después del pretratamiento y que esta a su vez es distribuida por una serie de tuberías verticales que se localizan en el interior del reactor, de tal forma que el agua residual llegue al fondo y se produzca un flujo ascendente, para que mediante este proceso, se pueda sedimentar un gran porcentaje de los sólidos en suspensión y además, el agua residual pueda entrar en contacto con la biomasa formada por los mismos lodos, para su biodegradación, es decir, a medida que el agua sube a través del reactor, queda en contacto con los sólidos biológicos formados principalmente por los sólidos en suspensión, que es el mecanismo por la cual la materia orgánica se va biodegradando.



Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 25. REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE RAFA.

○ FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA).

En virtud de que el agua tratada por el reactor RAFA, no cumple con los límites permisibles establecidos por la normatividad vigente en materia de agua, el efluente de este reactor se enviara al filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), con el objetivo de disminuir la DBO presente en el agua residual, en forma de solido coloidales y disueltos.

El agua es conducida por tuberías verticales hasta el fondo del filtro y de esta forma se permia el flujo ascendente. A diferencia del RAFA, el FAFA contienen en su interior un material de empaque con el fin de crear una biopelícula de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica del agua residual que viene en forma de residuos disueltos, al pasar el agua a través de un flujo ascendente.

En virtud de los altos tiempos de retención celular, los lodos de exceso producidos, se encuentran estabilizados. No obstante, como en el caso del reactor RAFA, se requiere de efectuar purgas para extraer dichos lodos y que serán conducidos a los lechos de secado.



Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 26. FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE FAFA

○ LECHOS DE SECADO

Los lodos digeridos y que se generaron en los reactores RAFA y FAFA, deben deshidratarse antes de su disposición final, de manera que el producto sea fácilmente manejable. Fundamentalmente, la deshidratación se lleva a cabo mediante procedimientos mecánicos o mediante el uso de lechos de secado.

Estos lechos de secado presentan una gran ventaja ya que estos pueden ser operados por cualquier tipo de personal aunque demande mayores extensiones que con el uso de otros métodos para la deshidratación de los lodos.

El mecanismo de secado de los lodos en estos lechos, actúa el proceso de percolación del agua a través del lecho de secado. La proporción de agua eliminada por este mecanismo, es de tal forma que la concentración de sólidos

alcanza de 20 al 25%, con lo cual hace que el lodo sea susceptible de removerse con pala.



Fuente: (Elaboración propia).

FIGURA 27. LECHOS DE SECADO.

4.2 INDICE DE ESCASEZ

4.2.1 OFERTA HÍDRICA

✓ PRECIPITACIÓN

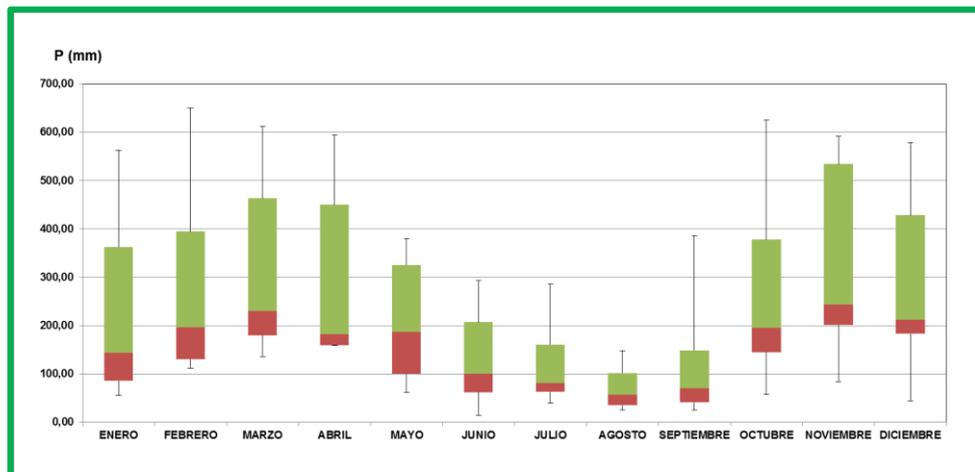


FIGURA 28. VALORES DE PRECIPITACIÓN ESTACIÓN NÁTAGA 1993-2013.

En la Figura 28 (Grafico de caja y bigotes) se visualizan las Precipitaciones Máximas y Mínimas correspondientes a los bigotes superiores e inferiores de

cada diagrama para cada mes del año, las cajas representan los valores del primer cuartil y tercer cuartil que enmarcan el 50% de los datos de precipitación y refleja justo en el cambio de color la precipitación media.

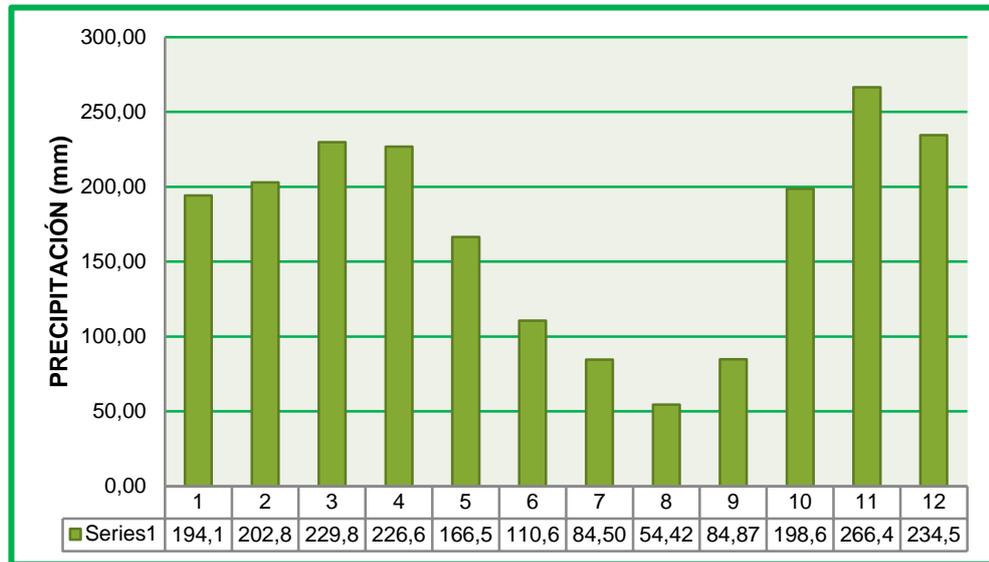


FIGURA 29. RESUMEN HISTÓRICO DE PRECIPITACIÓN (mm) 1993-2013.

De acuerdo con la figura 28 y 29, en el municipio de Nátaga, existe un régimen de lluvias bimodal, es decir que en el año se presentan dos eventos claramente demarcados; en el primer semestre del año, en los meses de Marzo y Abril las lluvias superan los 200 mm en promedio, al igual que en los meses de Noviembre y Diciembre para el segundo semestre del año, tiempo que conocemos como invierno debido a que las lluvias aumentan de manera significativa; y el segundo evento de verano el cual se presenta pasando la mitad de año, en los meses de Julio, Agosto y Septiembre, siendo el mes de Agosto el de menor precipitación con solo 54,42 mm. El promedio anual de las lluvias es de 2054,10 mm.

✓ **Evapotranspiración Método de TORNTHWAITE**

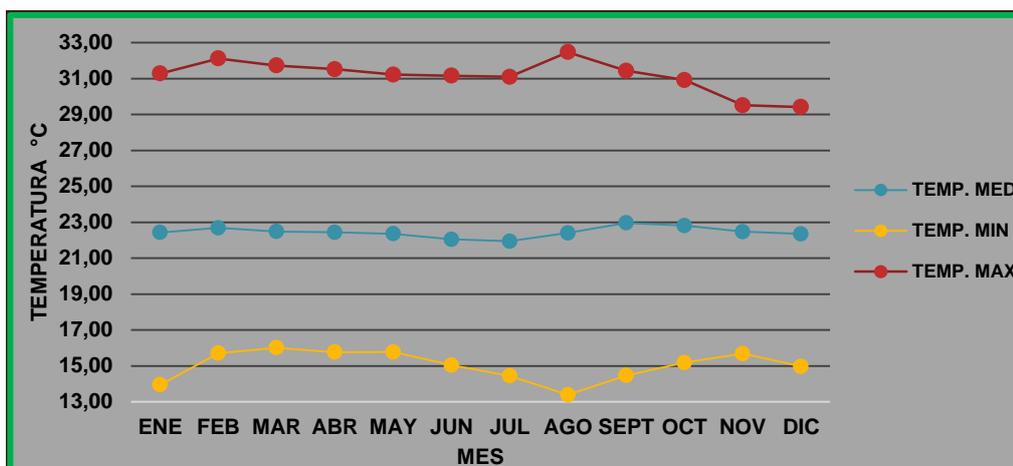


FIGURA 29. RESUMEN HISTÓRICO DE TEMPERATURA MÍNIMA, MEDIA Y MÁXIMA ESTACIÓN LA PLATA 1993-2013

En la figura 29. Se observan las temperaturas máximas, mínimas y medias de la zona, que se relacionan con el régimen de lluvias presente, ya que la misma es un factor incidente en la temperatura, el delta de temperatura oscila en 20 °C con temperaturas mínimas de 13°C aproximadamente y máximas de 33°C; en la zona de estudio se presentan temperaturas medias de 22°C durante gran parte del año.

❖ **Cálculo para el mes de Enero**

Para el índice de calor mensual se tiene que:

$$i = \left(\frac{22.43 \text{ °C}}{5} \right)^{1.514}$$

$$i = 9.70$$

En la tabla 16 se observa el valor del índice de calor mensual de los doce meses del año, durante el periodo de (1993-2013).

TABLA 16. RESUMEN HISTÓRICO ÍNDICE CALÓRICO 1993-2013.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
9,70	9,88	9,74	9,71	9,66	9,45	9,39	9,69	10,05	9,96	9,73	9,65	116,60

El índice de calor anual quedaría de esta manera

$$I = 116.6$$

Por consiguiente la evapotranspiración real sería:

$$ETP = 16 \left(\frac{10 * 22.43 \text{ } ^\circ\text{C}}{116.6} \right) (675 * 10^{-9} * 116.6^3) - (711 * 10^{-7} * 116.6^2) + (1792 * 10^{-5} * 116.6) + 0.49239$$

$$ETP \text{ (mm/mes)} = 87.85$$

TABLA 17. RESUMEN HISTÓRICO EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MÉTODO DE THORNTHWAITE 1993-2013

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
87,85	90,58	88,45	87,95	87,14	84,04	82,99	87,62	93,42	91,86	88,33	87,08	1057,31

❖ **Escorrentía total**

❖ **Cálculo para el mes de Enero**

Precipitación multianual = 194.27 mm

ETP media multianual = 87.85 mm

Para el cálculo de la escorrentía total se tiene en cuenta el coeficiente del régimen de lluvias citado anteriormente para obtener la ETR por medio de la **EC 14.**

ETR media multianual = 87.85 mm *0.7

ETR media multianual = 61.49 mm

TABLA 18. RESUMEN HISTÓRICO EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL 1993-2013

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
61,49	63,41	61,92	61,57	61,00	58,83	58,09	61,33	65,39	64,30	61,83	60,96	740,12

$$\text{Esc. Total (mm)} = 194.27 - 61.49 \text{ mm}$$

$$\text{Esc. Total} = 132.67 \text{ mm}$$

TABLA 19. RESUMEN HISTÓRICO ESCORRENTÍA TOTAL 1993-2013

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
132,67	139,42	167,90	165,12	105,55	51,81	26,41	-6,91	19,48	134,32	204,59	173,62	1313,98

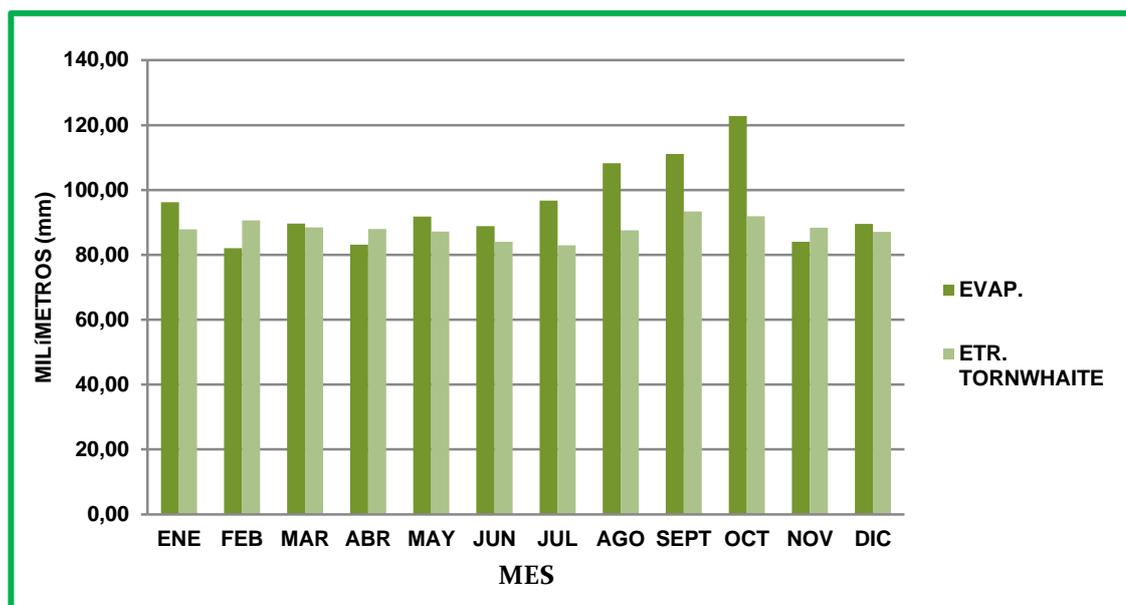


FIGURA 30. EVAPORACIÓN Vs ETR THORNTHWAITE (mm) 1993-2013

TABLA 20. RESUMEN HISTÓRICO ESCORRENTÍA TOTAL SIN EL CAUDAL ECOLÓGICO.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
99,50	104,57	125,93	123,84	79,16	38,86	19,81	-5,18	14,61	100,74	153,44	130,21	985,48

La escorrentía en la zona presenta un déficit en un mes del año (Agosto) (ver tabla 19), es decir que en estos meses no circula agua por la superficie ni la cuenca a causa de que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, de acuerdo con la figura 31 y teniendo en cuenta de antemano que la zona presenta un régimen de lluvias bimodal, la misma presenta dos pendientes ascendentes que se relacionan directamente con el aumento de precipitación por las épocas de lluvias y una zona de déficit por las bajas en las precipitaciones lo que se evidencia que es una época de sequía.

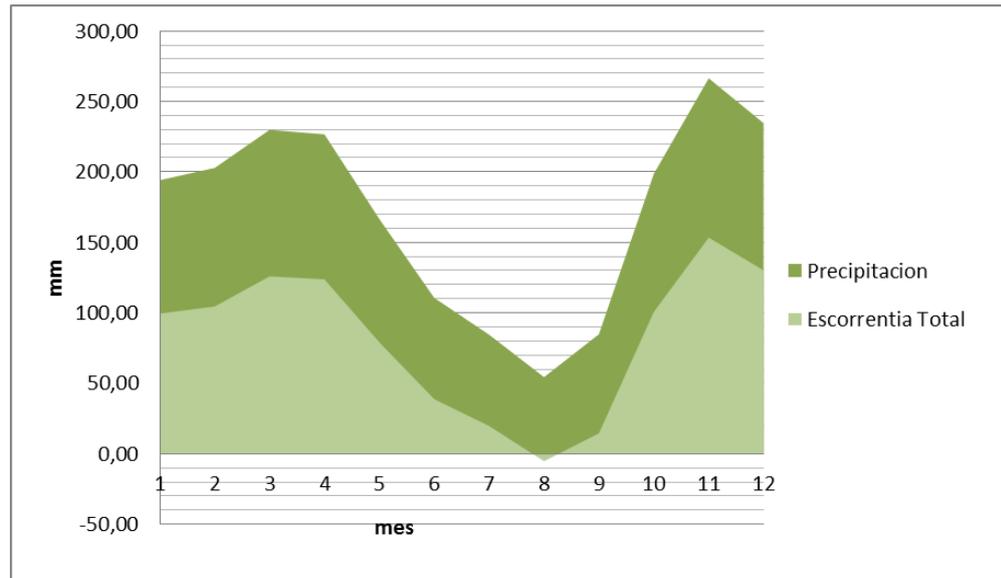


FIGURA 31. PRECIPITACIÓN VS ESCORRENTÍA.

4.2.2 DEMANDA HIDRÍCA

✓ **Población Urbana:**

$$P_f = 2235 + \frac{2235 - 707}{2006 - 1964} * (2013 - 2006)$$

$$P_f = 2.490 \text{ Hab}$$

✓ **Población Rural:**

$$P_f = 4550 + \frac{4550 - 1568}{2006 - 1964} * (2013 - 2006)$$

$$P_f = 5.047 \text{ Hab.}$$

✓ **Población Total:**

$$P_f = 7.537 \text{ Hab}$$

La demanda de agua de uso doméstico por persona esta condicionada por el nivel de complejidad del sistema de acueducto cuyos valores estan consignados en la **TABLA 11.**

El nivel de complejidad del sistema en este caso es bajo por lo tanto se tomaran las dotaciones netas de 100 L/ Hab. Día para la población rural y de 150 L/Hab. Día para la población urbana.

$$\text{DUD} = 100 \text{ L/ Hab. Día} * 2.490 \text{ Hab.} + 150 \text{ L/ Hab. Día} * 5.047 \text{ Hab.}$$

$$\text{DUD} = 1.006.050 \text{ L/Día}$$

$$\text{DUD} = 1006,05 \text{ m}^3/\text{Día}$$

$$\text{DUD} = 367.208,25 \text{ m}^3/\text{Año}$$

✓ **Evapotranspiración Potencial (mm)**

Se toman valores totales multianuales para la Evapotranspiración Potencial (Ver tabla 17) y precipitación y se reemplazan en la **EC 13**.

$$\text{ETP} = 1057,31 \text{ mm}; 1,05731 \text{ m}$$

$$\text{P} = 2054,10 \text{ mm}; 2,05410 \text{ m}$$

$$\text{Kc} = 1,1$$

$$\text{Ha} = 3.345 \text{ Ha cultivadas}, 33.450.000 \text{ m}^2$$

$$\text{DUA} = [2,05410 \text{ m} - (1,05731 \text{ m} * 1,1)] * 33.450.000 \text{ m}^2$$

$$\text{DUA} = 29.805.923,55 \text{ m}^3/\text{año}$$

De acuerdo con los resultados la Demanda total de agua es:

$$\text{DT} = 367.208,25 \text{ m}^3/\text{Año} + 29.805.923,55 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\text{DT} = 30.173.131,8 \text{ m}^3/\text{Año}$$

Para el cálculo del índice de escasez se debe tener en cuenta el área de la cuenca de estudio y el área de influencia de las estaciones Climatológicas consultadas.

La cuenca hidrográfica del río Páez cuenta con un área aproximada de 579.460 ha (Ver anexo 9), que se extienden sobre la jurisdicción de los departamentos del Cauca y Huila. De esta superficie, 257.730 ha corresponden

al departamento del Huila, específicamente a territorios de los municipios de La Plata, Paicol, La Argentina, Tesalia, Nátaga, Íquira, Teruel y El Pital, y de las que pertenecen Municipio de Nátaga 10.597,37 Ha hacen del área de estudio. (Henaó, 2009).

Para la oferta Hídrica se estimara el valor total multianual de la Escorrentía con sus respectivas reducciones de caudal ecológico (25%).

Escorrentía Total = 985,48 mm/año; 0,98548 m/año

Oferta Hídrica Teniendo en cuenta el área de influencia (10.597,37 Ha= 105.973.700m²).

- **Oferta Hídrica = 105.973.700m² * 0,98548 m/año**
- **Oferta Hídrica = 105.973.961.9 m³/año**
- **Demanda Hídrica = 30.173.131,8m³/año**

$$Ie (\%) = \frac{\text{Demanda Hidrica}}{\text{Oferta Hidrica}} * 100$$

$$Ie (\%) = \frac{30.173.131,8 \text{ m}^3/\text{año}}{105.973.961.9 \text{ m}^3/\text{año}} * 100$$

$$Ie (\%) = 28.5\%$$

De acuerdo a la **TABLA 13** el índice de escasez para la alimentación del modelo informático para la toma de decisiones se encuentra en la etiqueta de **MEDIO ALTO** al ser de **28.5%**.

4.3 EFICIENCIA DE TRATAMIENTO.

TABLA 18. RESULTADOS MUESTRA DE AGUA RESIDUAL

PARAMETRO	UNIDADES	TECNICA ANALITICA	ENTRADA	SALIDA	% REMOCIÓN	LIMITES DECRETO 1594/84 Art. 72-75
Temperatura	°C	Termométrica	22,93	23,54	N.A	<40
pH	Unidades	Potenciómetro /SM 4500 HB	6,06	6,85	N.A	5 - 9
caudal	L/s	Volumétrico	0,83	0,28	N.A	N.E
DBO ₅	mg O ₂ /L	SM, 5210B incubación 5 días	1260	420	N.A	N.E
DBO ₅	Kg O ₂ / Día	Ecuación Art. 75	90,35	10,23	88,67%	>80
DQO	mg O ₂ /L	SM 5220 Digestión Espectrofotométrica	3030	1675	N.A	N.E
DQO	Kg O ₂ / Día	Ecuación Art. 75	217,51	40,76	81,26%	>80
Nitratos	mg/ L NO ₃	Fotométrico	4,3	2,2	N.A	N.E
Fosfatos	mg/ L PO ₄	Fotométrico	4,3	17,1	N.A	N.E
Turbiedad	NTU	Nefelómetro/ SM 2130B	255	54,1	N.A	N.E
Solidos Disueltos Totales	mg/L	Electrométrico	168	332	N.A	N. E
Solidos Suspendedos Totales	mg/L	Gravimetría	161,05	84,2	N.A	N.E
Solidos Suspendedos Totales	Kg/Día	Ecuación Art. 75	11,56	2,04	82,31%	>80
Solidos Sedimentables Totales	ml/L	Gravimetría	168	0,46	N.A	N. E
Grasas y Aceites	mg/L	Extracción Soxhlet	277,66	182,27	N.A	N. E
Grasas y Aceites	Kg/Día	Ecuación Art. 75	19,93	4,43	77,75%	>80

Fuente: ASEBIOL SAS

4.3.1 MUESTRA DE CÁLCULOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN

✓ PARA DBO₅

- Caudal promedio a la entrada de la PTAR= 0,830 l/s
- Concentración de control = 1260 mg o₂/l

$$DBO_5 = 0,830 * 1260 * 0,0864$$

$$DBO_5 = 90,35 \text{ Kg o}_2/\text{día}$$

- Caudal promedio a la salida de la PTAR= 0,282 l/s
- Concentración de vertimiento = 420 mg o₂/l

$$DBO_5 = 0,282 * 420 * 0,0864$$

$$DBO_5 = 10,23 \text{ Kg o}_2/\text{día}$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = (100 - \frac{10,23*100}{90,35})$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = 88,67$$

✓ PARA DQO

- Caudal promedio a la entrada de la PTAR= 0,830 l/s
- Concentración de control = 3030 mg o₂/l

$$DQO = 0,830 * 3030 * 0,0864$$

$$DQO = 217,51 \text{ Kg o}_2/\text{día}$$

- Caudal promedio a la salida de la PTAR= 0,282 l/s
- Concentración de vertimiento = 1675 mg o₂/l

$$DQO = 0,282 * 1675 * 0,0864$$

$$DQO = 40,76 \text{ Kg o}_2/\text{día}$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = (100 - \frac{40,76*100}{217,51})$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = 81,26$$

✓ PARA SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

- Caudal promedio a la entrada de la PTAR= 0,830 l/s
- Concentración de control = 161,05 mg /l

$$SST = 0,830 * 161,05 * 0,0864$$

$$SST = 11,56 \text{ Kg / día}$$

- Caudal promedio a la salida de la PTAR= 0,282 l/s
- Concentración de vertimiento = 84,02 mg/l

$$SST = 0,282 * 84,02 * 0,0864$$

$$SST = 2,04 \text{ Kg / día}$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = \left(100 - \frac{2,04 * 100}{11,56}\right)$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = 82,31$$

✓ PARA GRASAS Y ACEITES

- Caudal promedio a la entrada de la PTAR= 0,830 l/s
- Concentración de control = 277,66 mg/l

$$GYA = 0,830 * 277,66 * 0,0864$$

$$GYA = 19,93 \text{ Kg / día}$$

- Caudal promedio a la salida de la PTAR= 0,282 l/s
- Concentración de vertimiento = 182,27 mg/l

$$GYA = 0,282 * 182,27 * 0,0864$$

$$GYA = 4,43 \text{ Kg / día}$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = \left(100 - \frac{4,43 \cdot 100}{19,93}\right)$$

$$\text{Porcentaje de remoción (\%)} = 77,75$$

De acuerdo a la **TABLA 14**, los parámetros DBO_5 , DQO y SST, tienen una eficiencia de tratamiento MUY BUENA al ser los resultados $>80\%$, mientras que las grasas y aceites, tienen una eficiencia buena, al estar en un rango entre el 60 y 80%; sin embargo la eficiencia de tratamiento del caso de estudio es medida en base a los valores del parámetros de DBO_5 con un 88.7%, eficiencia MUY BUENA.

4.4 ESQUEMA METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS TRATADAS.

La figura 32 representa el esquema utilizado para la reutilización de aguas residuales tratadas, aplicado a la zona de estudio, y apoyado en la herramienta hidroinformática.

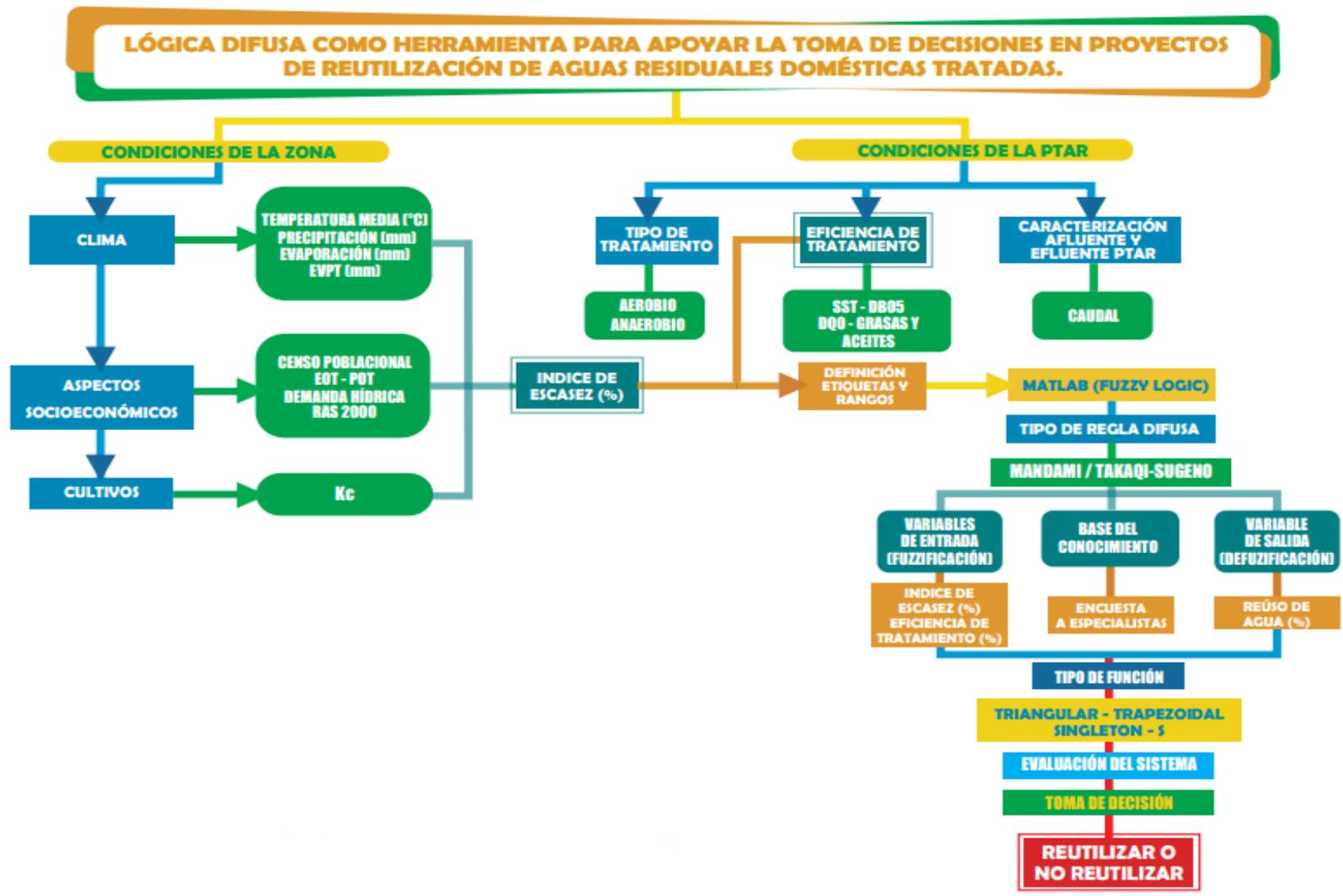


FIGURA 32. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DEL REUSO DE ARDT.

4.5 TABULACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.

4.5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA

Para el diseño de la metodología para la reutilización de aguas residuales domésticas tratadas aplicando herramientas hidrofornmáticas, se elabora un sistema de lógica difusa tipo Mamdani, ya que consta, de un motor de inferencia, una base de conocimiento y unos interfaces tanto de fusificación como de defusificación para procesar las entradas y salidas del sistema, creado con la *Fuzzy Logic Toolbox* de MatLab para determinar si el agua a reutilizar es confiable o no, y si la zona lo requiere, y bajo qué condiciones, en la PTAR del Municipio de Nátaga- Huila.

En la figura 33. Se muestra el Sistema de Inferencia Difusa para determinar el reúso de agua en la PTAR del Municipio de Nátaga- Huila.

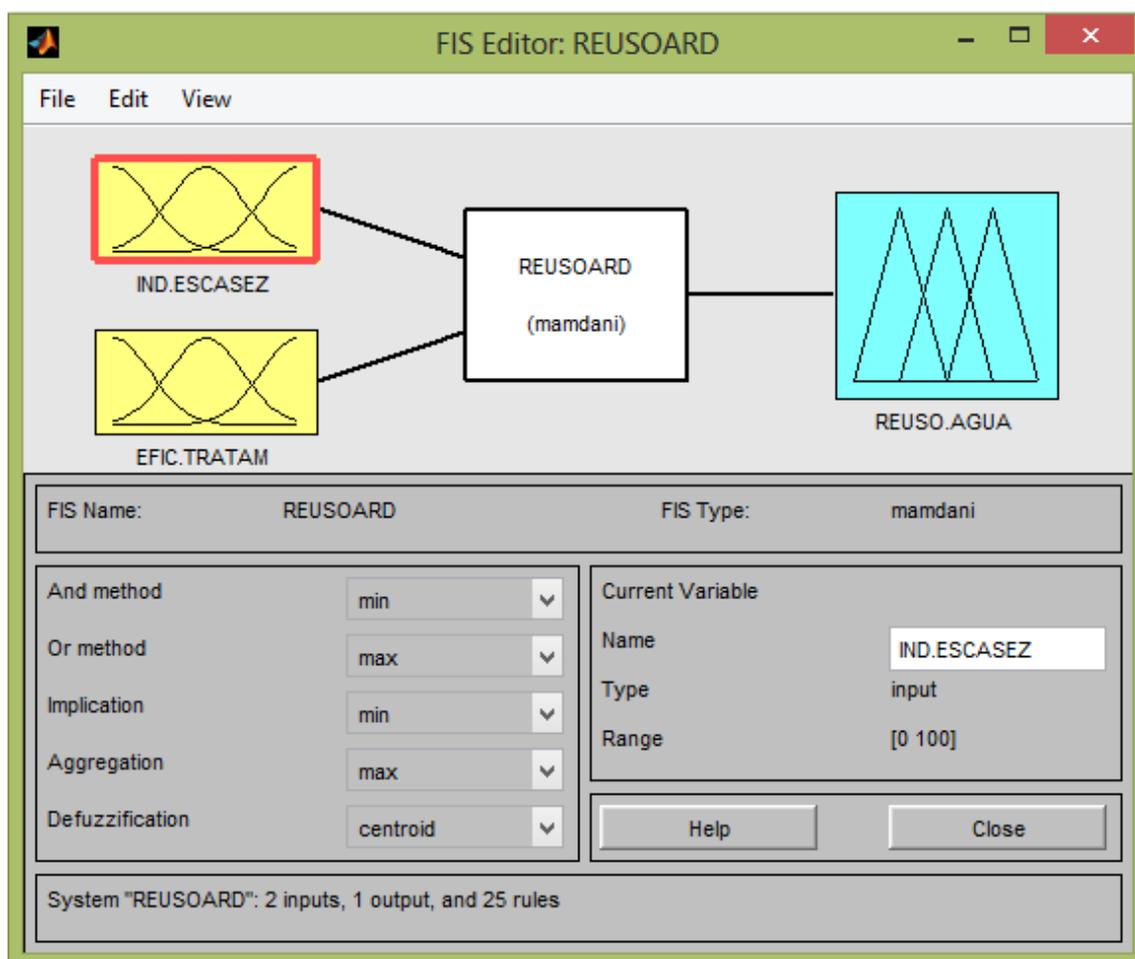


FIGURA 33. SISTEMA DE INFERENCIA PARA EL REÚSO DE AGUA.

El sistema presente de lógica difusa nos muestra las dos variables de entrada y la variable de salida agregadas al mismo, expresadas de manera lingüística.

Posteriormente se definió el rango, y los subrangos de cada una de las etiquetas lingüísticas fijadas anteriormente para incluir en el sistema las reglas con el fin de darle funcionamiento y relacionar las variables de entrada con la encuesta realizada a los expertos.

Las funciones de membresía disponibles en la *Fuzzy Logic Toolbox* se muestran en la Figura 34, que en el caso de estudio se escoge la tipo triangular debido a los subrangos de cada una de las etiquetas de las variables tanto de entrada como de salida.

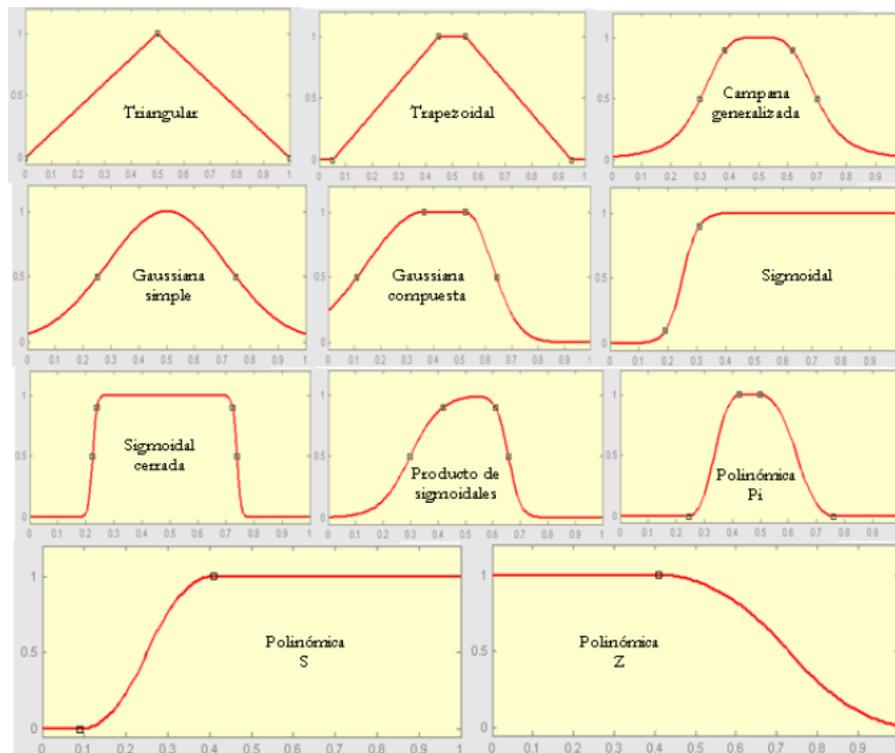


FIGURA 34. FUNCIONES DE MEMBRESÍA EN FUZZY LOGIC TOOLBOX.

4.5.2 VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada deben expresarse lingüísticamente, identificando el nombre de la variable, el rango, y la función de membresía.

En la metodología para la reutilización de ARDT existen dos variables de entrada

- VARIABLE No 1**
Nombre variable: Índice de Escasez (%)
Rango: 0-100%
Clasificaciones: Alto, Medio Alto, Medio, Mínimo, No Significativo.
Funciones de membresía: Triangular (ver figura 35)

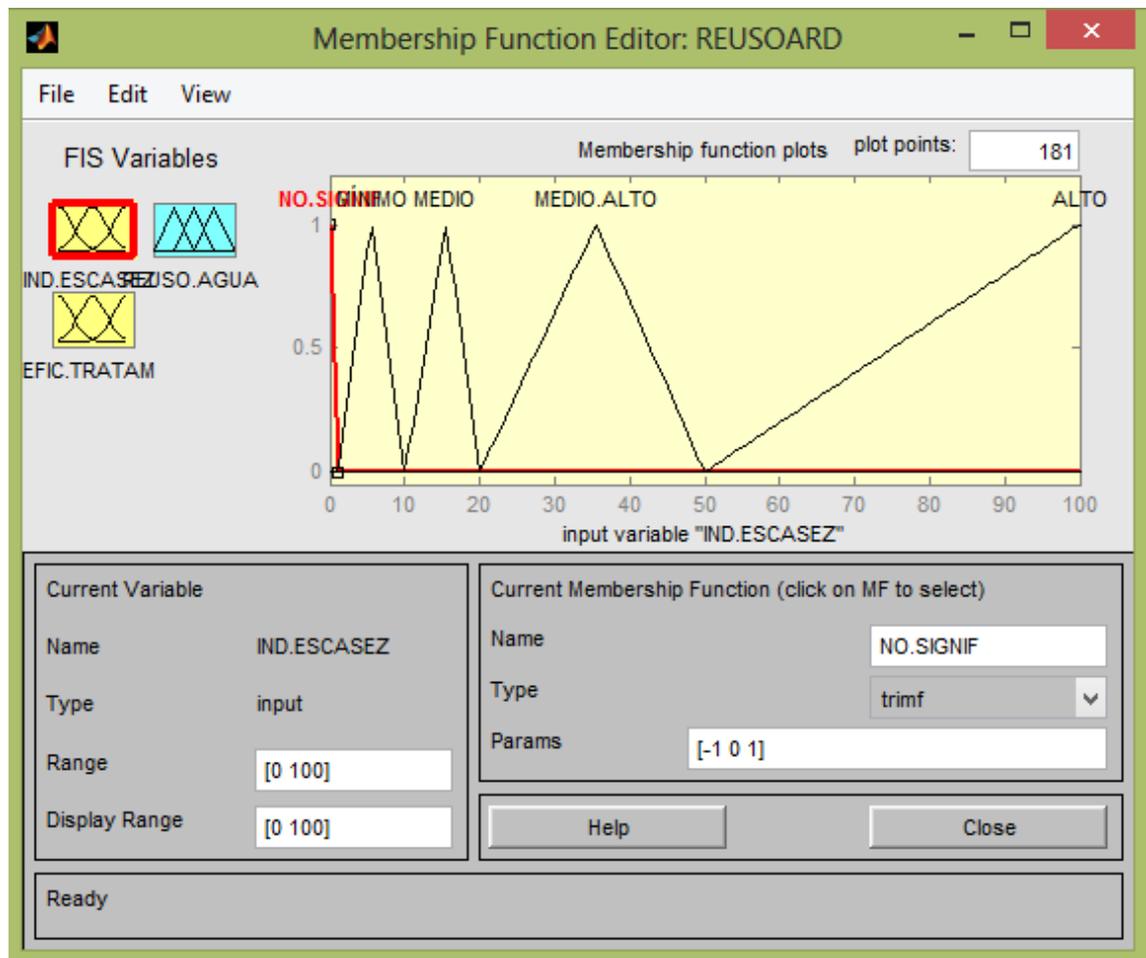


FIGURA 35. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE ÍNDICE DE ESCASEZ (%).

Para cada una de las variables de entrada y de salida se debe definir el rango de manera numérica y la cantidad de subrangos de manera alfanumérica, el tipo de función (Triangular para este Caso) para darle correcto funcionamiento al sistema ya que con respecto a los rangos digitados en esta interfaz se definirán las reglas y posteriormente estas mostrara un resultado de acuerdo a las condiciones de la planta de tratamiento (PTAR) en estudio.

- VARIABLE No 2**
Nombre variable: Eficiencia de Tratamiento
Rango: 0-100%
Clasificaciones: Muy Buena, Buena, Regular, Mala, Deficiente.
Funciones de membresía: Triangular. (Ver figura 36).

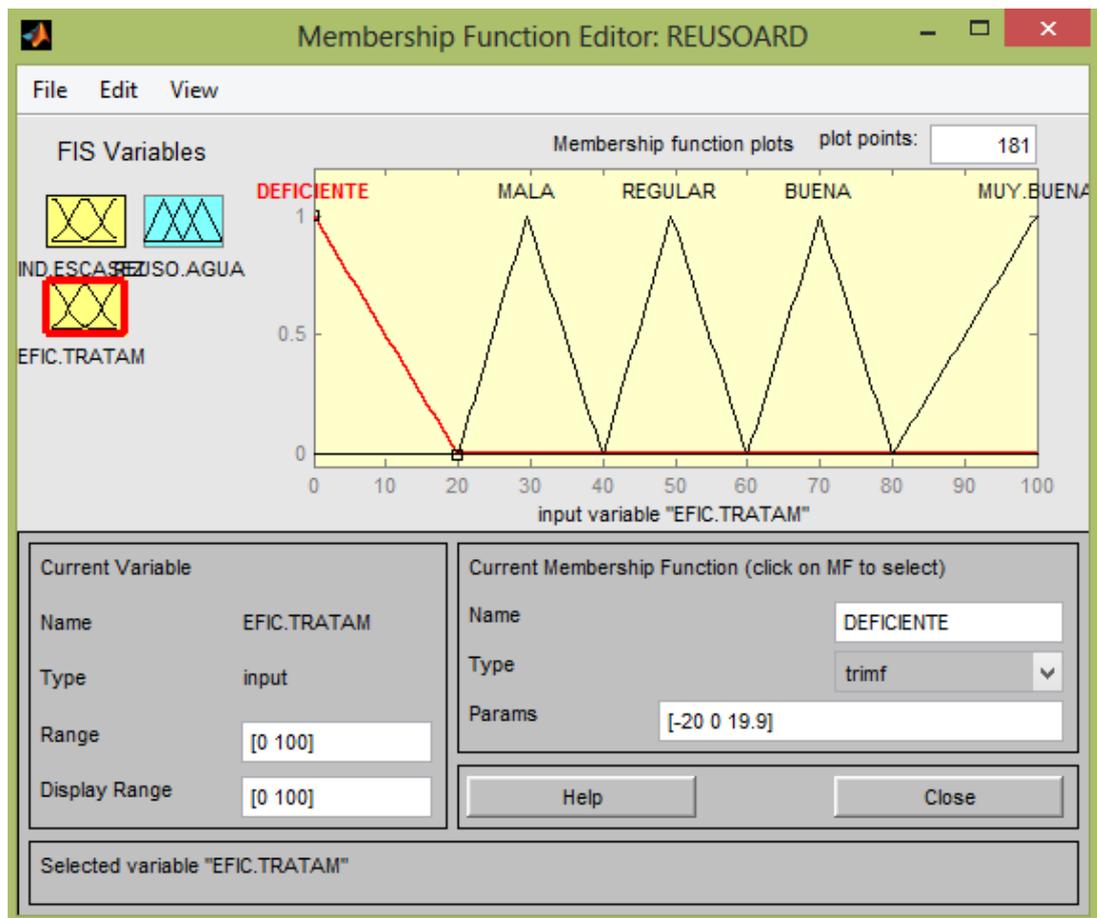


FIGURA 36. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO (%).

4.5.3 VARIABLES DE SALIDA

La variable de salida debe expresarse también lingüísticamente, identificando el nombre de la variable, el rango, las clasificaciones y las funciones de membresía.

Nombre variable: Evaluación de reúso.

Rango: 0-100%

Clasificaciones: Reutilización Confiable Justificada, Reutilización Confiable Injustificada, Reutilización NO confiable Justificada, Reutilización NO confiable Injustificada, NO REUTILIZAR.

Funciones de membresía: Triangular. (Ver figura 37).

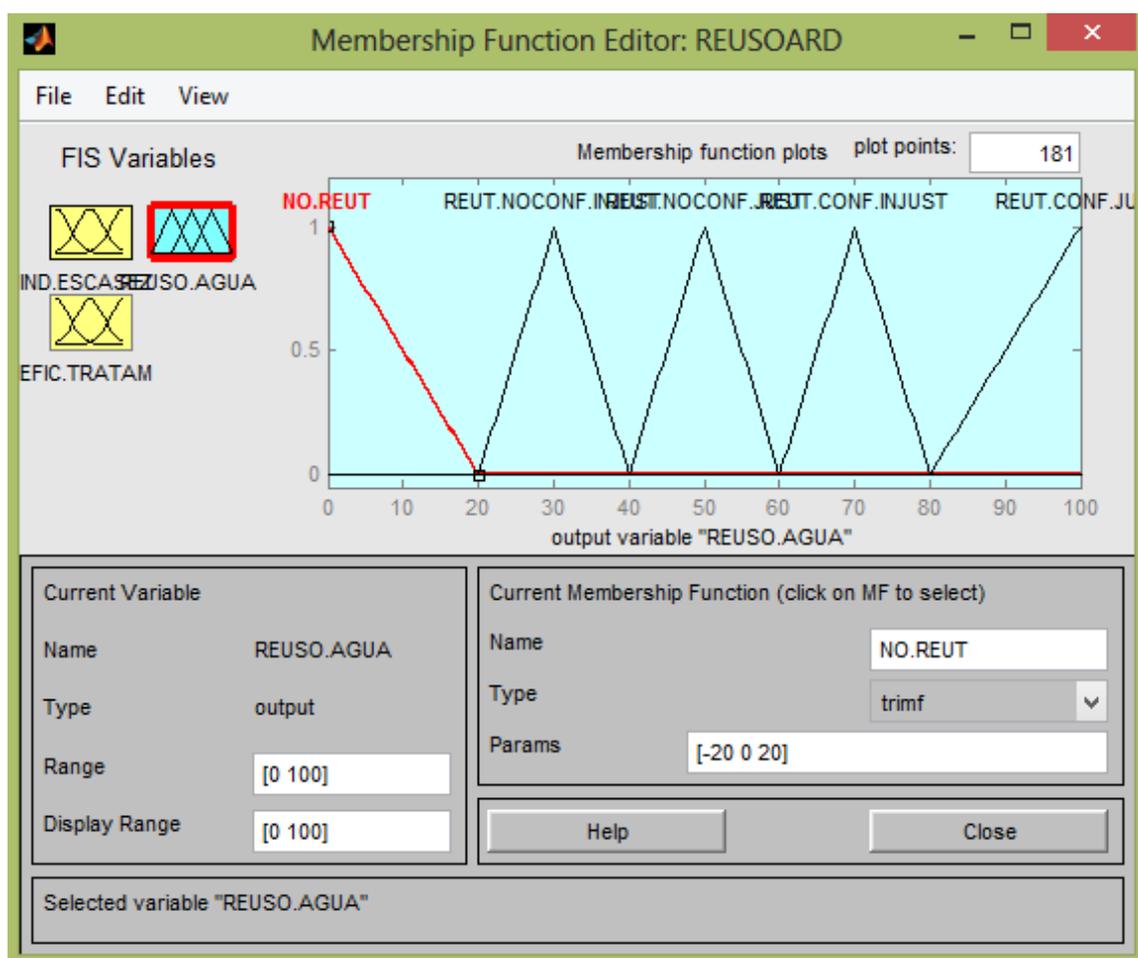


FIGURA 37. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LA VARIABLE REUSO DEL AGUA (%).

4.5.4 BASE DE REGLAS

Las bases de reglas son la respuesta del promedio del conocimiento de tres expertos en el tema de saneamiento básico rural y legislación ambiental. (Ver tabla 22).

TABLA 19. BASES DE REGLAS-PUNTO DE VISTA DE LOS EXPERTOS.

REGLA	ÍNDICE DE ESCASEZ	EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	REÚSO
1.	ALTO	MUY BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
2.	ALTO	BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
3.	ALTO	REGULAR	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
4.	ALTO	MALA	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
5.	ALTO	DEFICIENTE	NO REUTILIZAR
6.	MEDIO ALTO	MUY BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
7.	MEDIO ALTO	BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
8.	MEDIO ALTO	REGULAR	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
9.	MEDIO ALTO	MALA	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
10.	MEDIO ALTO	DEFICIENTE	NO REUTILIZAR
11.	MEDIO	MUY BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
12.	MEDIO	BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA
13.	MEDIO	REGULAR	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
14.	MEDIO	MALA	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
15.	MEDIO	DEFICIENTE	NO REUTILIZAR
16.	MINIMO	MUY BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA
17.	MÍNIMO	BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA
18.	MÍNIMO	REGULAR	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
19.	MÍNIMO	MALA	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA
20.	MÍNIMO	DEFICIENTE	NO REUTILIZAR
21.	NO SIGNIFICATIVO	MUY BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA
22.	NO SIGNIFICATIVO	BUENA	REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA
23.	NO SIGNIFICATIVO	REGULAR	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE INJUSTIFICADA
24.	NO SIGNIFICATIVO	MALA	REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE INJUSTIFICADA
25.	NO SIGNIFICATIVO	DEFICIENTE	NO REUTILIZAR

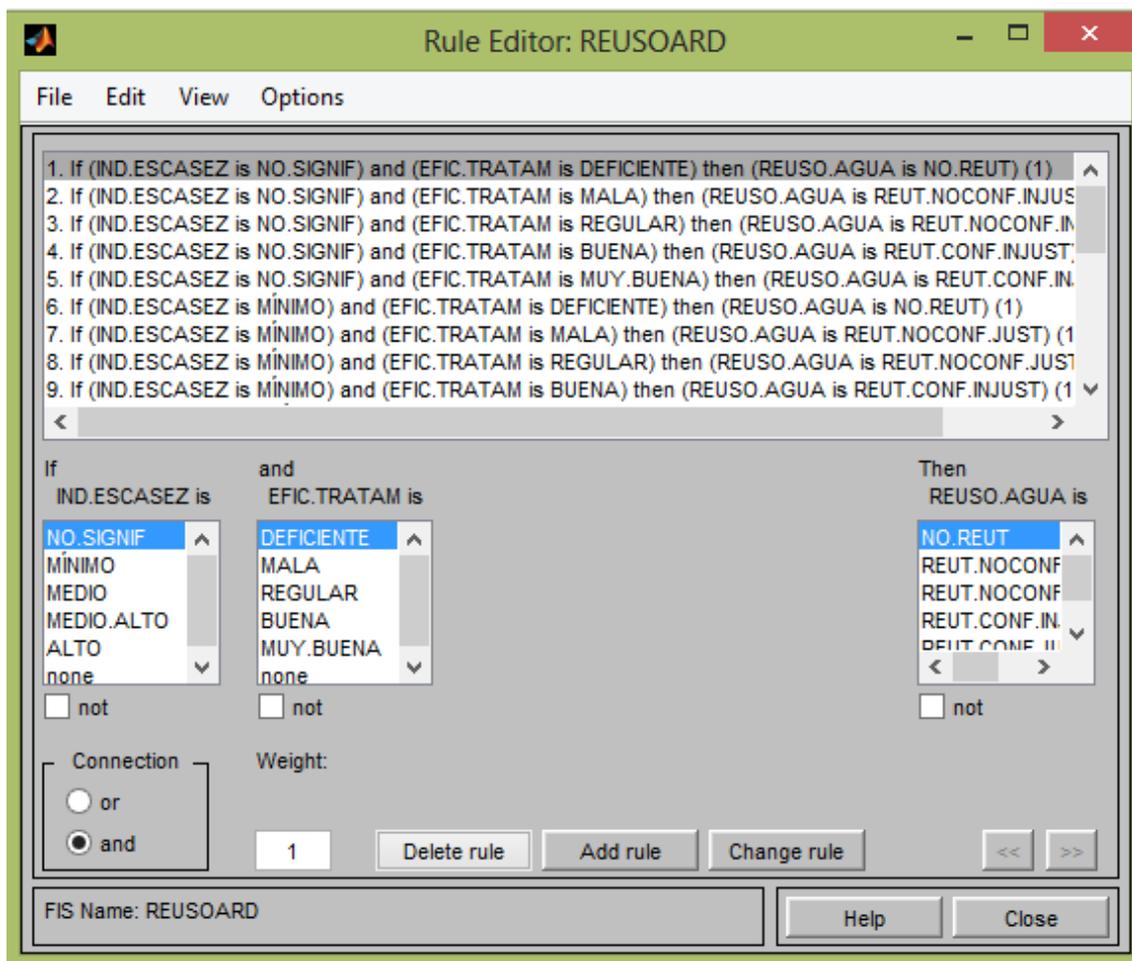


FIGURA 38. BASE DE REGLAS DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA.

Como se puede observar en la figura 38, las reglas son implicaciones definidas a través de una proposición condicional de la forma si-entonces y un operador lógico que en este caso es Y. El antecedente y el consecuente son proposiciones no condicionales:

Si el Índice de Escasez es alto Y la Eficiencia de Tratamiento es Muy Buena entonces el reúso es **REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA**.

En la Figura 39. Se presenta un esquema tridimensional del sistema.

Una vez definidas las variables de entrada, la variable de salida y la base de reglas es posible evaluar el sistema.

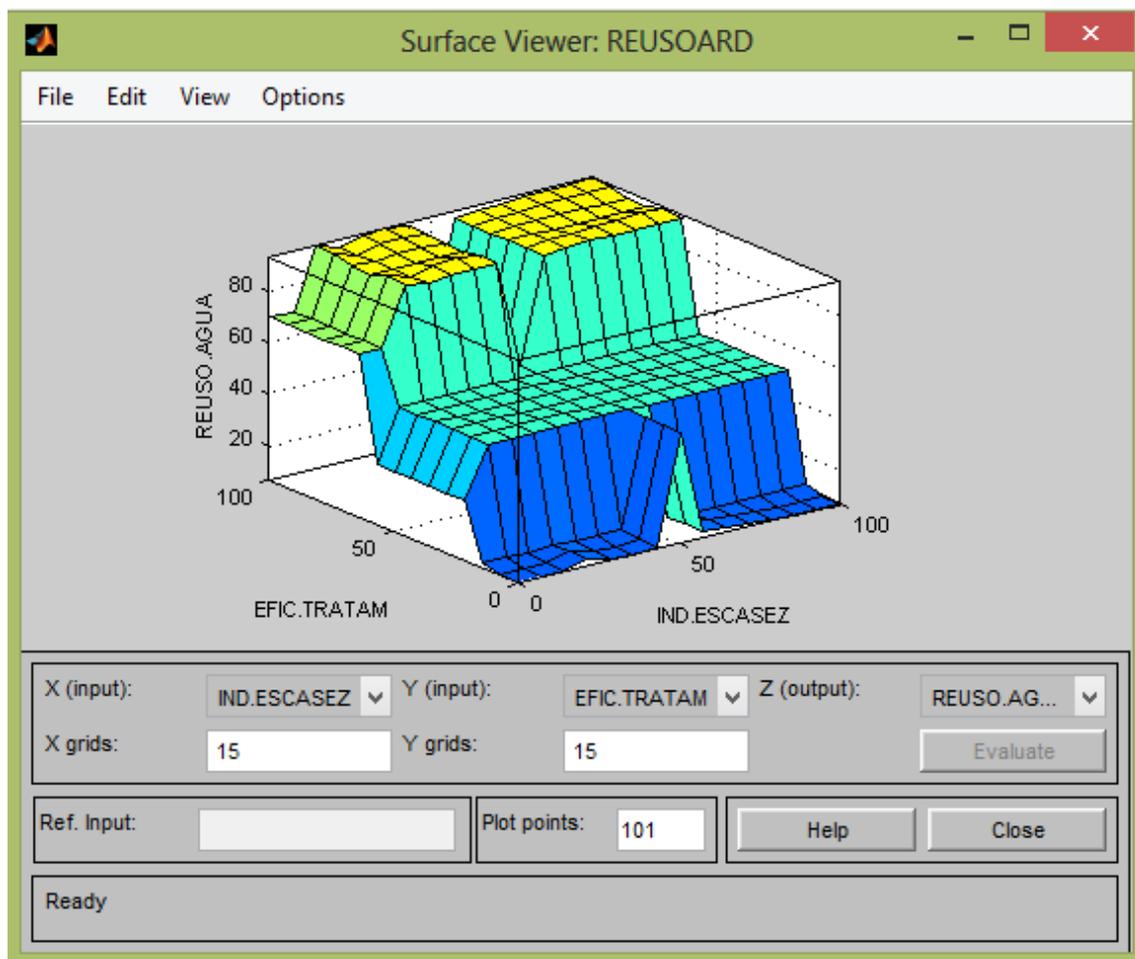


FIGURA 39. ESQUEMA TRIDIMENSIONAL EVALUACIÓN DEL SISTEMA CON BASE A LAS REGLAS ESTABLECIDAS.

Este tipo de esquema generado por el *toolbox* de MatLab nos permite visualizar de manera más general los resultados de las diferentes reglas establecidas para alimentar el sistema, también permite ubicar por medio de un gráfico 3D el reúso de agua para cualquier porcentaje de las dos variables de entrada, por consiguiente este sistema es de utilidad para cualquier tipo de planta de tratamiento, solo se necesita conocer la eficiencia de tratamiento y el índice de escasez.

Básicamente la utilidad de esta herramienta hidroeinformática aplicado al saneamiento básico rural es prescindir de la presencia de personal experto en el tema en la toma de decisiones respecto a la reutilización de aguas residuales, ya que por lo general estas decisiones son tomadas por servidores públicos que en algunos casos tienen muy poco conocimiento de AR, además este sistema está hecho en una interfaz de fácil entendimiento y manipulación en donde solo basta digitar los valores de cada una de las variables para obtener un resultado y por consiguiente una decisión a tomar.

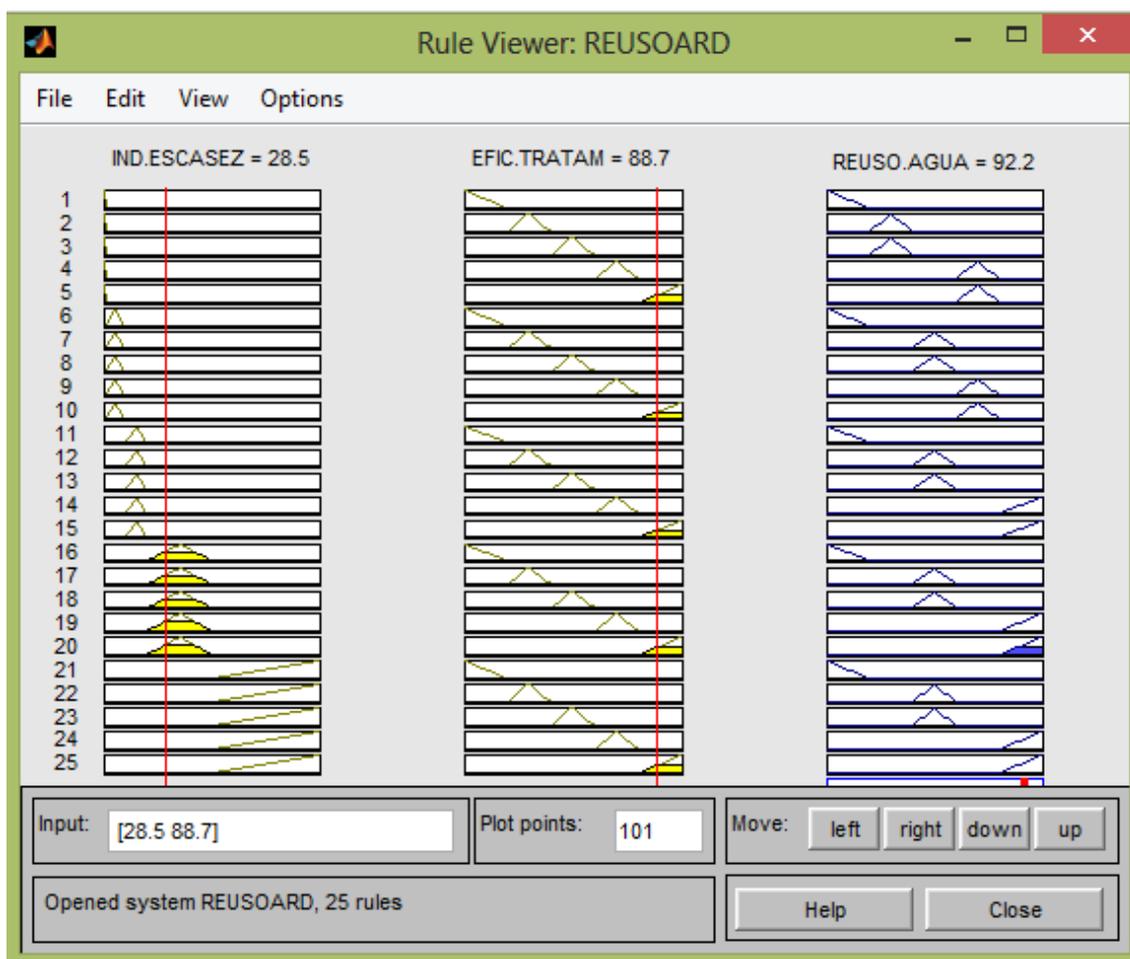


FIGURA 40. EVALUACION DEL SISTEMA PARA IE 28.5% Y E. TRATAMIENTO 88.7%

En la figura 40, se muestra la evaluación del sistema de control difuso con el caso de estudio (PTAR Nátaga) cuyo índice de escasez de 28.5% y Eficiencia de tratamiento de 88.7% fueron los datos de las variables de entrada para la alimentación del sistema que dieron como resultado un 92.2% para el Reúso de Agua que corresponde a una **REUTILIZACION CONFIABLE JUSTIFICADA**. Este porcentaje generado por el sistema difuso se debe a que el índice de escasez es bajo, esto quiere decir que la zona no presenta un déficit de agua considerable para contemplar una reutilización con algún fin específico.



CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

- Para la zona de estudio, el índice de escasez es de 28.5 que corresponde a un índice de escasez MEDIO ALTO, lo que indica que la oferta hídrica no supe completamente la necesidad de la población teniendo en cuenta los factores hidrológicos para el cálculo de la oferta de agua superficial.
- Los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del efluente con base al DBO_5 , arrojan una eficiencia del tratamiento de 88.7%, es decir que el tratamiento que se le realiza en la PTAR al afluente es confiable, y que el efluente no contamina el recurso hídrico donde es vertido, en este caso la Quebrada el Pueblo.
- De acuerdo con los resultados del índice de escasez y la eficiencia de tratamiento, y evaluando el sistema de lógica difusa, se concluye que el reúso de agua para el municipio de Nátaga- Huila se encuentra en el rango de **REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA**, con un porcentaje del 92.2%.
- En el diseño del sistema de lógica difusa se determinó que el índice de escasez en parámetros de cantidad y el porcentaje de remoción en parámetros de calidad, son los factores más importantes para evaluar el sistema, y determinar la reutilización de aguas residuales domesticas tratadas en cualquier zona de estudio.
- Se evidencio que para darle aplicación al sistema de control difuso en el reúso de agua residual doméstica se debe tener en cuenta el cálculo del índice de escasez el método del cálculo de la Evapotranspiración Real ya que estas ecuaciones son de tipo experimental y algunas de ellas no se ajustan a diversas zonas de estudio.



CAPÍTULO 6.
RECOMENDACIONES.

CAPÍTULO 6.

RECOMENDACIONES

- Hacer uso de las herramientas hidroyinformáticas para la solución de problemas complejos, apoyados en información de calidad, y la experiencia de especialistas en temas afines.
- Es importante tener información verídica, confiable y actualizada de los datos de precipitación, temperaturas mínimas y máximas y evaporación de las estaciones hidroclimatológicas influyentes en la zona de estudio, para el cálculo del índice de escasez, y los porcentajes de remoción de la PTAR, en el caso que sea evaluado en otra zona.
- Los resultados presentados en este proyecto pueden ser complementados por trabajos futuros donde determinen factores económicos (costos) y usos del efluente recuperado, ya sea para riego agrícola, doméstico o industrial.
- Aplicar la metodología a todas las PTAR del departamento del Huila, teniendo en cuenta los parámetros del índice de escasez y la eficiencia de tratamiento de la zona de estudio, para obtener un diagnóstico general de la calidad y la cantidad de agua que puede ser recuperada, sin que afecte las fuentes hídricas donde se depositen.

BIBLIOGRAFÍA

- Asano, T. La recuperación de las aguas residuales municipales como nuevo recurso hídrico. Actas Jornadas Internacionales, Agua horizonte, 2005.
- Barragán P.A. Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estables por Diseño, Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva, España, 2009.
- Borbón R.A. Avances en adaptación al cambio climático, 2013. Disponible en <http://www.cam.gov.co/Rey%20Ariel%20Borbón%20Ardila,%20CAM.pdf>.
- Bohórquez, P.A, Leiva, L, Noscue, F. Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio De Nátaga, 2007.
- Collazos, C.J. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería cátedra internacional, Curso en Salud Pública y Saneamiento Ambiental, 2008. Disponible en <http://www.ing.unal.edu.co/catedra/drs_diaz_collazos/Salud,%20Calidad%20y%20Tratamiento%20de%20AR/TRATAMIENTO%20ANAEROBIO%20DE%20LAS%20AGUAS%20RESIDUALES%20BASICO.pdf>.
- Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA YDESARROLLO TERRITORIAL. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.124 p.
- Choque A, Guillermo, Sistemas difusos, 2010, en línea. Disponible en <<http://menteerrabunda.blogspot.com/2010/12/sistemas-difusos.html>>.
- DÍAZ, M., Espitia, S. y Molina, F. Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología. UNIBIBLIOS. Bogotá, Colombia, 2002.
- Domínguez, E.A., H.G. Rivera, R. Vanegas Sarmiento, P. Moreno: Relaciones demanda- oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano, 2008.

- Domínguez E. Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos en Meteorología Colombiana, No 2. Bogotá, 2000.
- Duarte, O. UNFUZZY - Software para el Diseño, Análisis, Simulación e Implementación de Sistemas de Lógica Difusa. Tesis de Magíster. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1997.
- HAANDEL, A. y Lettinga G. Tratamiento Anaerobio de Esgotos. Editora EPGRAF. Campina Grande, Brasil, 1994.
- Helmer, R., y Hespanhol, I. (1999). "Políticas y Principios." En: Control de la contaminación del agua, CEPIS OPS/OMS, ed., Lima, Perú, 1-9.
- Henao, J.E, FASE DE DIAGNÓSTICO DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (POMCH) DEL RÍO PÁEZ, SECTOR HUILA, la Plata Huila, Mayo, 2009.
- Huang Y, Lan Y, Thomson S, Fang A, Hoffmann W & Lacey R. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. Computers and Electronics in Agriculture. Vol 71 (2010), pp 107-127, 2010.
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua. IDEAM. Bogotá D.C, 1998. 253 p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES –IDEAM. Informe anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia, Estudio Nacional del Agua – Relaciones de Demanda de Agua y Oferta Hídrica. Bogotá D.C., 2008.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES –IDEAM. Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C., 2001.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES –IDEAM. El Estudio Nacional del agua un compendio sobre el recurso hídrico en Colombia. Bogotá D.C., 2004.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS-IDEAM, Estudio Nacional del Agua, Bogotá D.C, 2010.

- La escasez de agua dulce, el gran reto del futuro; Redacción, artículo 2009, en línea. Disponible en <www.fundacion-antama.org>.
- Lavrador, J. "Contribuição para o entendimento do reutilización planejado da água e algunas considerações sobre suas posibilidades no Brasil. 1987.
- Madigan, M., Mertinko, J. y Parker, J. *Biology of Microorganisms*. Prentice Hall. New Jersey, USA, 1997.
- MAVDT."Guía Técnica para el Desarrollo de Reuso de Aguas Residuales." 1994.
- MAVDT - Grupo de Análisis Económico. Metodología para el cálculo del índice de escasez. Documento preliminar, Bogotá, D.C., 2004.
- Méndez, Z y Villegas, P. Los Sistemas Difusos como Herramienta de Modelación de la Producción Frutícola, A Día MATLAB, Ponencia no.1, 2005.
- Metcalf & Eddy, *Ingeniería Sanitaria*. Mc Graw Hill, Barcelona, 1991.
- Metcalf & Eddy, *Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización*. Editorial Mc Graw Hill, Madrid, España, 1995. *Tercera edición. Volumen 10*
- Metcalf and Eddy, Asano, T.,Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G., *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications*, 2007.
- MUJERIEGO, R. Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1990.
- Moscoso, J., Egocheaga, L., Ugaz, R., y Tréllez, E. "Guía para la formulación de proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas." ,1994.

- Moscoso, J., y Young, L. E. "Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial.", 2002. Pág. 589.
- Mr. Jean Margat, Renewable water resources in the world by country. Roma 2003. tabla 4. febrero 2007. en línea. Disponible en <www.fao.org>.
- Pérez Capdevila, J, Revista Avanzada Científica, Enero – Abril 2012, Vol. 15, No. 1. Disponible en línea <<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/42bbd89447f87.pdf>>.
- Pydipati, Y., Burks, T.F., Lee, W.S., 2005. Statistical and neural network classifiers for citrus disease detection using machine vision. Transactions of the ASAE 48 (5), 2007-2014.
- Plan de Desarrollo 2.008 – 2.011, proyecto de acuerdo “POR EL CUAL SE ADOPTA EL PLAN DE DESARROLLO “SEMBRANDO EL CAMBIO COSECHAMOS PROGRESO”, periodo 2.008-2.011, para el Municipio de Nátaga- Huila, 2011.
- Ramírez Ramos, O, Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap, Universidad de las Américas Puebla, 2008. EN LINEA. Disponible en <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mt/ramirez_r_o/>
- Romero, J, Aragón, R.A y Valencia, E. Potencial de reutilización del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Nátaga en cultivo de cacao. En: Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, junio 2012, vol. 15, no.1.
- Salazar, L.A. Diseño e implementación de un controlador difuso en un dspic30f4011 para una hélice de paso variable, Universidad Politécnica de Pachuca, Enero 2012.
- Silva, J; Torres, P; Madera, C. Reuso de Aguas Domesticas en la Agricultura. Una Revisión. En: Revista SciELO, Agronomía Colombiana, Diciembre 2008, vol.26, no. 2

- Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO, Resumen general de América Latina y el Caribe, 2013. en línea. Disponible en <www.fao.org>.
- Sistemas de apoyos a la toma de decisiones, en línea. Disponible en <<http://www.slideshare.net/heynan/sistemas-de-apoyo-a-la-toma-de-decisiones-12905870>>.
- Souza, A. L., Matsura, E. E. y Miranda, J. H. teoría de conjuntos fuzzy aplicada al estudio de la dinámica del agua y de los solutos en el suelo. En: revista Estudios de la zona no saturada del suelo, 2005, Vol 7.
- Suarez, B., Paola, D., Zea, C., y Amparo, D. "Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una metodología con énfasis en aspectos tecnológico.", 2003.
- Vargas, T. Plan de Desarrollo de Nátaga, Municipio De Nátaga, 2008-2011.
- Villegas, P.A, Obregón, N, Lara, J.A, Méndez, S y Luna, A. Herramienta informática como apoyo en la toma de decisiones en proyectos de agua y saneamiento en comunidades indígenas. En: Avances en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. Octubre-Junio, 2009, pp. 39-54, núm. 19,
- Westerhoff, G. P. "Un update of research needs for water reuse. 1984.
- World Health Organization. (2006). "Guidelines for the Safe Use of Wastewater. Excreta and Greywater in Agriculture. ." 2006, ed., Francia.
- Yang, C.C., Prasher, S.O., Landry, J.A., Perret, J., Ramaswamy, H.S., 2000. Recognition of weeds with image processing and their use with fuzzy logic for precision farming. Canadian Agricultural Engineering 42 (4), 195-200.

ANEXO 1 VALORES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN ESTACIÓN NÁTAGA (1993-2013).

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
1993	187,00	274,00	376,00	211,00	233,00	69,00	82,00	45,00	40,00	145,00	362	212	2236,00
1994	302,00	250,00	432,00	0,00	279,00	179,00	39,00	58,00	66,00	248,00	333	154	2340,00
1995	50,00	119,00	180,00	291,00	68,00	79,00	119,00	69,00	70,00	221,00	333	188	1787,00
1996	277,00	263,00	283,00	381,00	152,00	145,00	46,00	78,00	39,00	480,00	179	185	2508,00
1997	361,00	165,00	180,00	179,00	196,00	178,00	81,00	35,00	16,00	196,00	201	183	1971,00
1998	31,00	130,00	230,00	297,00	225,00	127,00	116,00	67,00	114,00	233,00	360	224	2154,00
1999	463,00	520,00	308,00	148,00	279,00	231,00	97,00	32,00	345,00	163,00	332	391	3309,00
2000	257,00	287,00	287,00	158,00	212,00	124,00	23,00	95,00	118,00	128,00	231	235	2155,00
2001	114,00	196,00	290,00	153,00	181,00	100,00	87,00	35,00	130,00	232,00	243	245	2006,00
2002	45,00	18,00	230,00	178,40	151,50	117,60	67,30	67,10	41,00	87,70	116,6	139	1259,20
2003	60,60	185,50	116,80	179,70	100,30	152,30	35,00	9,70	105,70	125,40	189,2	178,9	1439,10
2004	85,70	138,50	43,90	434,80	117,00	55,70	89,80	25,40	53,60	173,20	302,5	186,7	1706,80
2005	89,10	211,40	278,90	159,20	77,60	47,20	49,40	56,60	112,40	123,20	217,4	238	1660,40
2006	266,20	108,60	206,30	234,60	41,60	168,00	128,30	37,50	52,40	183,30	390,9	395,5	2213,20
2007	113,60	55,70	220,10	233,70	187,80	97,20	97,90	112,40	54,90	266,80	312,5	313,1	2065,70
2008	257,60	153,40	234,70	235,10	251,00	56,80	81,40	57,70	84,10	260,90	225,7	236,1	2134,50
2009	323,60	264,60	224,10	156,30	66,60	89,00	62,70	64,30	40,40	147,90	188,4	178,7	1806,60
2010	106,60	303,20	67,60	181,70	186,70	60,60	223,70	50,10	95,00	95,80	318,5	186	1875,50
2011	143,50	278,50	205,80	365,00	214,40	124,90	64,10	23,00	107,80	254,00	368	386	2535,00
2012	477,00	104,00	283,00	405,00	39,00	60,00	70,00	45,00	19,00	212,00	173	290	2177,00
2013	67,00	234,00	149,00	179,00	239,00	62,00	115,00	80,00	78,00	195,00	218	181	1797,00

ANEXO 2 VALORES DE TEMPERATURA MEDIA (°C) ESTACIÓN LA PLATA (1993-2013).

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
1993	22,13	22,23	21,33	22,13	22,33	22,13	21,83	21,93	22,83	22,83	21,9	22,23	22,13
1994			21,63	22,23	22,13	21,93	21,3	21,63	22,5	22,4	21,8	21,9	21,93
1995	22,2	22,6	22,33	22,03	21,93	21,53	21,93	22,1	23,1	22,43	22,33	22,23	22,23
1996	21,63	21,63	21,83	22,3	21,93	21,73	21,43	21,73	22,73	22,1	22,63	21,63	21,93
1997	21,7	22,03	22,93	22,53	22,13	22,13	21,5	22,3	23,7	24,33	22,83	23,03	22,63
1998	23,83	24,73	23,63	23,8	23,23	22,53	21,8	23,1	23,03	23,5	22,03	22,13	23,13
1999	21,63	21,73	22,03	21,63	21,73	21,73	21,53	22,03	22,33	21,53	22,53	21,93	21,83
2000	21,6	21,83	22,03	21,33	22,03	21,93	21,63	22,13	21,93	22,03	22,03	21,73	21,83
2001	21,53	22,93	22,53	22,03	22,03	21,53	21,93	22,03	22,83	23,73	22,23	22,43	22,33
2002	22,63	23,03	22,93	22,23	22,33	21,53	22,13	21,83	22,93	22,63	22,33	23,03	22,43
2003	23,33	22,93	22,93	22,53	22,43	22,03	22,33	23,53	23,03	23,03	22,73	22,43	22,73
2004	22,63	23,13	23,43	22,63	23,03	21,63	22,43	22,43	22,63	22,73	22,63	22,33	22,63
2005	22,33	22,93	22,73	22,73	22,23	22,33	22,63	22,93	23,43	22,73	22,83	22,63	22,73
2006	22,03	22,73	22,53	22,63	22,73	22,13	21,73	22,43	23,13	23,03	22,43	22,13	22,43
2007	22,73	22,83	22,23	22,73	22,43	21,63	22,23	22,03	23,13	22,73	22,23	21,83	22,43
2008	21,98	22,03	21,93	21,93	21,93	22,13	21,53	22,53	22,53	22,43	22,23	21,93	22,13
2009	22,13	22,33	21,83	22,13	22,13	21,83	21,43	22,43	23,33	22,93	22,73	23,4	22,43
2010	23,1	24,4	23,7	23,73	23,3	22,3	22,2	22,2	22,7	22,43	21,93	21,93	22,83
2011	22,33	22,13	22,03	22,23	22,43	21,83	22,03	23,13	23,03	22,23	22,63	22,63	22,43
2012	22,53	22,63	22,33	22,33	22,43	23,23	22,63	23,13	23,73	23,43	23,83	23,03	22,93
2013	24,53	23,03	23,33	23,33	22,63	23,23	22,6	22,9	23,63	23,9	23,1	22,83	23,23

ANEXO 3 ÍNDICE CALÓRICO MENSUAL THORNWHITE (1993-2013).

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DIEMBRE	VR. ANUAL
1993	9.51	9.57	8.99	9.51	9.64	9.51	9.31	9.38	9.97	9.97	9.36	9.57	114.28
1994	0.00	0.00	9.18	9.57	9.51	9.38	8.97	9.18	9.75	9.68	9.29	9.36	93.88
1995	9.55	9.81	9.64	9.44	9.38	9.12	9.38	9.49	10.15	9.70	9.64	9.57	114.87
1996	9.18	9.18	9.31	9.62	9.38	9.25	9.06	9.25	9.90	9.49	9.83	9.18	112.64
1997	9.23	9.44	10.03	9.77	9.51	9.51	9.10	9.62	10.55	10.97	9.97	10.10	117.79
1998	10.63	11.25	10.50	10.61	10.23	9.77	9.29	10.15	10.10	10.41	9.44	9.51	121.90
1999	9.18	9.25	9.44	9.18	9.25	9.25	9.12	9.44	9.64	9.12	9.77	9.38	112.02
2000	9.16	9.31	9.44	8.99	9.44	9.38	9.18	9.51	9.38	9.44	9.44	9.25	111.93
2001	9.12	10.03	9.77	9.44	9.44	9.12	9.38	9.44	9.97	10.57	9.57	9.70	115.56
2002	9.83	10.10	10.03	9.57	9.64	9.12	9.51	9.31	10.03	9.83	9.64	10.10	116.72
2003	10.30	10.03	10.03	9.77	9.70	9.44	9.64	10.43	10.10	10.10	9.90	9.70	119.15
2004	9.83	10.17	10.37	9.83	10.10	9.18	9.70	9.70	9.83	9.90	9.83	9.64	118.10
2005	9.64	10.03	9.90	9.90	9.57	9.64	9.83	10.03	10.37	9.90	9.97	9.83	118.62
2006	9.44	9.90	9.77	9.83	9.90	9.51	9.25	9.70	10.17	10.10	9.70	9.51	116.78
2007	9.90	9.97	9.57	9.90	9.70	9.18	9.57	9.44	10.17	9.90	9.57	9.31	116.19
2008	9.41	9.44	9.38	9.38	9.38	9.51	9.12	9.77	9.77	9.70	9.57	9.38	113.80
2009	9.51	9.64	9.31	9.51	9.51	9.31	9.06	9.70	10.30	10.03	9.90	10.35	116.12
2010	10.15	11.02	10.55	10.57	10.28	9.62	9.55	9.55	9.88	9.70	9.38	9.38	119.62
2011	9.64	9.51	9.44	9.57	9.70	9.31	9.44	10.17	10.10	9.57	9.83	9.83	116.12
2012	9.77	9.83	9.64	9.64	9.70	10.23	9.83	10.17	10.57	10.37	10.63	10.10	120.48
2013	11.11	10.10	10.30	10.30	9.83	10.23	9.81	10.01	10.50	10.68	10.15	9.97	122.99

ANEXO 4 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL THORNWHITE (MM) (1993-2013)

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DIEMBRE	VR. ANUAL
1993	84.86	85.86	77.10	84.86	86.87	84.86	81.89	82.87	92.02	92.02	82.58	85.86	85.14
1994	0.00	0.00	79.95	85.86	84.86	82.87	76.82	79.95	88.60	87.58	81.60	82.58	69.22
1995	85.56	89.63	86.87	83.86	82.87	79.00	82.87	84.56	94.88	87.88	86.87	85.86	85.89
1996	79.95	79.95	81.89	86.56	82.87	80.92	78.04	80.92	90.98	84.56	89.94	79.95	83.05
1997	80.63	83.86	93.08	88.91	84.86	84.86	78.71	86.56	101.43	108.61	92.02	94.14	89.81
1998	102.89	113.32	100.66	102.55	96.28	88.91	81.60	94.88	94.14	99.22	83.86	84.86	95.26
1999	79.95	80.92	83.86	79.95	80.92	80.92	79.00	83.86	86.87	79.00	88.91	82.87	82.25
2000	79.67	81.89	83.86	77.10	83.86	82.87	79.95	84.86	82.87	83.86	83.86	80.92	82.13
2001	79.00	93.08	88.91	83.86	83.86	79.00	82.87	83.86	92.02	101.77	85.86	87.88	86.83
2002	89.94	94.14	93.08	85.86	86.87	79.00	84.86	81.89	93.08	89.94	86.87	94.14	88.30
2003	97.36	93.08	93.08	88.91	87.88	83.86	86.87	99.55	94.14	94.14	90.98	87.88	91.48
2004	89.94	95.20	98.45	89.94	94.14	79.95	87.88	87.88	89.94	90.98	89.94	86.87	90.09
2005	86.87	93.08	90.98	90.98	85.86	86.87	89.94	93.08	98.45	90.98	92.02	89.94	90.75
2006	83.86	90.98	88.91	89.94	90.98	84.86	80.92	87.88	95.20	94.14	87.88	84.86	88.37
2007	90.98	92.02	85.86	90.98	87.88	79.95	85.86	83.86	95.20	90.98	85.86	81.89	87.61
2008	83.37	83.86	82.87	82.87	82.87	84.86	79.00	88.91	88.91	87.88	85.86	82.87	84.51
2009	84.86	86.87	81.89	84.86	84.86	81.89	78.04	87.88	97.36	93.08	90.98	98.13	87.56
2010	84.88	109.42	101.43	101.77	97.04	86.56	85.56	85.56	90.67	87.88	82.87	82.87	92.21
2011	86.87	84.86	83.86	85.86	87.88	81.89	83.86	95.20	94.14	85.86	89.94	89.94	87.51
2012	88.91	89.94	86.87	86.87	87.88	96.28	89.94	95.20	101.77	98.45	102.89	94.14	93.26
2013	110.95	94.14	97.36	97.36	89.94	96.28	89.63	92.76	100.66	103.68	94.88	92.02	96.64

ANEXO 5 ESCORRENTÍA TOTAL (mm) (1993-2013)

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VR. ANUAL
1993	102.14	188.14	298.90	126.14	146.13	-15.86	0.11	-37.87	-52.02	52.98	279.42	126.14	101.20
1994	302.00	250.00	352.05	-85.86	194.14	96.13	-37.82	-21.95	-22.60	160.42	251.40	71.42	125.78
1995	-35.56	29.37	93.13	207.14	-14.87	0.00	36.13	-15.56	-24.88	133.12	246.13	102.14	63.02
1996	197.05	183.05	201.11	294.44	69.13	64.08	-32.04	-2.92	-51.98	395.44	89.06	105.05	125.95
1997	280.37	81.14	86.92	90.09	111.14	93.14	2.29	-51.56	-85.43	87.39	108.98	88.86	74.44
1998	-71.89	16.68	129.34	194.45	128.72	38.09	34.40	-27.88	19.86	133.78	276.14	139.14	84.24
1999	383.05	439.08	224.14	68.05	198.08	150.08	18.00	-51.86	258.13	84.00	243.09	308.13	193.50
2000	177.33	205.11	203.14	80.90	128.14	41.13	-56.95	10.14	35.13	44.14	147.14	154.08	97.45
2001	35.00	102.92	201.09	69.14	97.14	21.00	4.13	-48.86	37.98	130.23	157.14	157.12	80.34
2002	-44.94	-76.14	136.92	92.54	64.63	38.60	-17.56	-14.79	-52.08	-2.24	29.73	44.86	16.63
2003	-36.76	92.42	23.72	90.79	12.42	68.44	-51.87	-89.85	11.56	31.26	98.22	91.02	28.45
2004	-4.24	43.30	-54.55	344.86	22.86	-24.25	1.92	-62.48	-36.34	82.22	212.56	99.83	52.14
2005	2.23	118.32	187.92	68.22	-8.26	-39.67	-40.54	-36.48	13.95	32.22	125.38	148.06	47.61
2006	182.34	17.62	117.39	144.66	-49.38	83.14	47.38	-50.38	-42.80	89.16	303.02	310.64	96.07
2007	22.62	-36.32	134.24	142.72	99.92	17.25	12.04	28.54	-40.30	175.82	226.64	231.21	84.53
2008	174.23	69.54	151.83	152.23	168.13	-28.06	2.40	-31.21	-4.81	173.02	139.84	153.23	93.36
2009	238.74	177.73	142.21	71.44	-18.26	7.11	-15.34	-23.58	-56.96	54.82	97.42	80.57	62.99
2010	11.72	193.78	-33.83	79.93	89.66	-25.96	138.14	-35.46	4.33	7.92	235.63	103.13	64.08
2011	56.63	193.64	121.94	279.14	126.52	43.01	-19.76	-72.20	13.66	168.14	278.06	296.06	123.74
2012	388.09	14.06	196.13	318.13	-48.88	-36.28	-19.94	-50.20	-82.77	113.55	70.11	195.86	88.15
2013	-43.95	139.86	51.64	81.64	149.06	-34.28	25.37	-12.76	-22.66	91.32	123.12	88.98	53.11

ANEXO 6 PERFIL DE LOS EXPERTOS

❖ JAIME ANDRÉS LARA BORRERO

Ingeniero Civil la Pontificia Universidad Javeriana, MSc en Ingeniería y Gestión Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña y PhD en Territorio y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Asociado y director de la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Interés investigativo: Tratamiento y Reutilización de Aguas Residuales.

❖ EDUARDO VALENCIA GRANADA.

Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle. Magister en Ingeniería Sanitaria y ambiental. Universidad del Valle. Proyectos en reutilización de aguas residuales domesticas tratadas en riego.

❖ CRISTO FACUNDO PÉREZ P.

Ingeniero Agrícola, Universidad Surcolombiana, proyecto de grado: Impacto sobre el Balance de los Macronutrientes (N, P, K) de un Suelo Inceptisol Plantado con Caña de Azúcar y Regado con Efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo - Cali, Colombia.

Joven Investigador - Titulo: Vulnerabilidad en Suelos Productivos por Factores de Salinización. Caso de Estudio: Distrito de Riego RUT, Valle del Cauca, Colombia Febrero 2013 Abril 2014.

Pasantías - Titulo: Potencial de reúso del efluente de la PTAR-C en irrigación de Caña de Azúcar en el Valle del Cauca. Febrero 2011 Abril 2012.

Investigador Grupo REGAR- Escuela EIDENAR, Universidad del Valle.

ANEXO 7 ENCUESTA A EXPERTOS



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
NEIVA, 2014



PROYECTO DE GRADO: METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS INCLUYENDO HERRAMIENTAS HIDROINFORMÁTICAS.

AUTORES: MARÍA CAMILA ESCOBAR ROJAS (Estudiante 10° semestre de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana).

LUIS FELIPE TOVAR BONILLA (Estudiante 10° semestre de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana).

DIRECTOR: JONATHAN ROMERO CUELLAR. (I.A, MSc. Universidad Surcolombiana)

De antemano los autores del proyecto de grado antes mencionado, agradecen su amable colaboración en la realización de esta encuesta, por sus grandes aportes del conocimiento en las áreas de saneamiento básico y legislación ambiental, el tiempo empleado para la realización de la misma; y de esta manera poder alimentar el sistema inteligente.

El proyecto “**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS INCLUYENDO HERRAMIENTAS HIDROINFORMÁTICAS**” tiene como objetivo, proponer una metodología para el análisis de reutilización de aguas residuales tratadas a través de la implementación de herramientas hidroinformáticas, evaluando la misma en la PTAR del Municipio de Nátaga, Departamento del Huila.

Para el diseño de la metodología será empleada la caja de herramientas de Matlab® (*fuzzylogictoolbox*), en la cual se definen dos variables de entrada al sistema. Se considera que ésta propuesta al igual que en la zona de estudio, podrá ser validada en cualquier otra planta de tratamiento de aguas residuales.

- **ÍNDICE DE ESCASEZ:** para el cálculo de dicha variable se tiene en cuenta la resolución 0865 del 22 de Julio de 2004 del Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del Índice de Escasez para aguas superficiales, desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, definiéndose este como la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible, luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y caudal ecológico.

$$Ie = \frac{Dh}{Oh} * Fr * 100$$

EC X.

Para evaluar la primera variable índice de escasez, se tienen en cuenta las siguientes categorías:

TABLA X. CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE ESCASEZ

ETIQUETA	RANGO (%)
Alto	>50
Medio alto	21-50
Medio	11-20
Mínimo	1-10
No significativo	<1

Fuente: (Resolución 0864,2004).

- **EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO:** Esta variable se determina evaluando la eficiencia de tratamiento de la PTAR en función del parámetro DBO.

TABLA X. CATEGORÍAS DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO

ETIQUETA	RANGO (%)
Muy buena	>80
Buena	60-80
Regular	40-59
Mala	20-39
Deficiente	<20

La metodología propuesta, de igual manera podrá ser evaluada a otras PTAR, en diferentes zonas del país, conociendo de ante mano las características del área de estudio, para poder definir los rangos de las etiquetas de eficiencia de tratamiento.

A continuación se presentan una serie de situaciones que resultan importantes a la hora de tomar medidas, pero que debido a la complejidad de las mismas, no es fácil tomar una decisión sin tener una información y conocimiento previo.

Las posibles respuestas serán las etiquetas de la variable de salida del sistema, y las preguntas, las bases de reglas del mismo, basado en el conocimiento de expertos en temas afines.

TABLA X. CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DEL REUSO.

ETIQUETA	RANGO (%)
REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA	80-100
REUTILIZACIÓN CONFIABLE INJUSTIFICADA	60-80
REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE JUSTIFICADA	40-60
REUTILIZACIÓN NO CONFIABLE INJUSTIFICADA	20-40
NO REUTILIZAR	0-20

NOTA: Los rangos de las etiquetas de salida del sistema califican la posibilidad de reutilizar el efluente tratado de una PTAR en función de la necesidad del recurso hídrico en la zona de estudio (índice de escasez), si se justifica o no reutilizar el líquido vital y la confiabilidad del mismo (eficiencia de tratamiento en la PTAR) si es confiable o no en base a los resultados de los parámetros evaluados (apta para ser reutilizada).

NOMBRE:

PROFESIÓN:

INSTITUCIÓN DONDE LABORA:

Marca con una equis (X) frente a cada una la respuesta que mejor represente tu opinión.

	INDICE DE ESCASEZ	EFICIENCIA DE TRATAMIENTO	NO REUTILIZAR	REUTILIZACIÓN CONFIABLE JUSTIFICADA	REUTILIZACION CONFIABLE INJUSTIFICADA	REUTILIZACION NO CONFIABLE JUSTIFICADA	REUTILIZACION NO CONFIABLE INJUSTIFICADA
1.	ALTO	MUY BUENA					
2.	ALTO	BUENA					
3.	ALTO	REGULAR					
4.	ALTO	MALA					
5.	ALTO	DEFICIENTE					
6.	MEDIO ALTO	MUY BUENA					
7.	MEDIO ALTO	BUENA					
8.	MEDIO ALTO	REGULAR					
9.	MEDIO ALTO	MALA					
10.	MEDIO ALTO	DEFICIENTE					
11.	MEDIO	MUY BUENA					
12.	MEDIO	BUENA					
13.	MEDIO	REGULAR					
14.	MEDIO	MALA					
15.	MEDIO	DEFICIENTE					

16	MINIMO	MUY BUENA					
17	MÍNIMO	BUENA					
18	MÍNIMO	REGULAR					
19	MÍNIMO	MALA					
20	MÍNIMO	DEFICIENTE					
21	NO SIGNIFICATIVO	MUY BUENA					
22	NO SIGNIFICATIVO	BUENA					
23	NO SIGNIFICATIVO	REGULAR					
24	NO SIGNIFICATIVO	MALA					
25	NO SIGNIFICATIVO	DEFICIENTE					

ANEXO 8. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PÁEZ

