

**MODELAMIENTO DEL MICROCLIMA Y DE LAS ESTRATEGIAS DE  
CONTROL PARA CULTIVOS HORTOFRUTICOLAS EN LAS  
SABANAS DE DEPARTAMENTO DE SUCRE**

**CARLOS COHEN MANRIQUE, I.E**

Trabajo de Investigación para Optar el Título de:  
Magíster en Ingeniería – Énfasis en Ingeniería de Sistemas y Computación

**UNVIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ING. DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
CARTAGENA, 2013**

**MODELAMIENTO DEL MICROCLIMA Y DE LAS ESTRATEGIAS DE  
CONTROL PARA CULTIVOS HORTOFRUTICOLAS EN LAS  
SABANAS DE DEPARTAMENTO DE SUCRE**

**CARLOS COHEN MANRIQUE, I.E**

Directores:

**ISAAC ZUÑIGA SILGADO**

I.S, E.R, Msc. A.E

**JORGE ELICER DUQUE PARDO**

I.E, E. A.I, Msc. M.I

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ING. DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
CARTAGENA, 2013**

*Dedicación Especial:*

A ti Señor, Toda Gloria.

Salmo 115:1

---

# Índice General

---

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>i</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>ii</b>
<b>Planteamiento del Problema de Investigación.....</b>	<b>v</b>
<b>Objetivos de la Investigación.....</b>	<b>xii</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Alcances y Limitaciones.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 MARCO CONTEXTUAL.....	8
1.2.1 Humedad Relativa.....	9
1.2.2 Brillo Solar.....	10
1.2.3 Evapotranspiración.....	11
1.2.4 Vientos.....	11
1.2.5 Tensión de Vapor .....	12
1.2.6 Precipitación .....	12
1.3 BASES TEÓRICAS.....	15
1.3.1 Agua y Suelo .....	15
1.3.1.1 Propiedades Físicas de los Suelos.....	16

1.3.1.2 Coeficientes Hídricos del Suelo .....	19
1.3.2 Agua y Cultivos.....	20
1.3.2.1 Evapotranspiración.....	21
1.3.3 Sistemas de Control.....	25
1.3.3.1 Estabilidad.....	28
1.3.3.2 Control PID.....	30
1.3.3.3 Sintonización Ziegler – Nichols.....	35
1.3.3.4 Lógica Difusa.....	37
1.3.3.4 Controlador Difuso.....	39
2. ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	42
2.1 GENERALIDADES DEL CULTIVO SELECCIONADO: SANDÍA.....	43
2.1.1 Características Fisiológicas del Cultivo Seleccionado para el Proyecto.....	44
2.1.2 Etapas Fenológicas y Climatológicas del Cultivo de la Sandía.....	46
2.1.3 Sistema de Riego para Cultivos de Sandía .....	49
2.2 DISEÑO Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE RIEGO.....	53
2.3 ASPECTOS TÉCNICOS Y AGRÍCOLAS DEL CULTIVO SELECCIONADO.....	58
2.3.1 Cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo Elegido (Sandía: Citrullus Lantus)...	58
2.3.2 Cálculo Normalizado de la Lámina de Riego para la Sandía en base a Kc.....	63
2.4 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	65
2.4.1 Características de las Válvulas a Controlar .....	66
2.4.2 Diseño del Sistema de Control .....	71
2.4.2.1 Identificación de las Partes del Sistema .....	72
2.4.2.2 Especificaciones de las Partes del Sistema .....	72
2.5 IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL.....	81
2.5.1 Características del Cultivo .....	81

2.5.2 Características Climáticas y Micro climáticas.....	82
2.5.2.1 Evapotranspiración.....	82
2.5.2.2 Balance Hídrico .....	82
2.6 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL .....	83
2.6.1 Diseño Lógico del Sistema.....	85
2.6.1.1 Pruebas de Funcionamiento en Lazo Abierto de la Planta .....	85
2.6.2 Especificación de las Partes del Sistema en Matlab .....	87
2.6.2.1 Estimador de Radiación Neta.....	87
2.6.2.2 Estimador de la Evapotranspiración.....	90
2.6.2.3 Bloque Estimador del Balance Hídrico.....	92
2.6.2.4 Bloque Estimador del Coeficiente del Cultivo .....	96
2.6.2.5 Bloque Estimador de las propiedades del Suelo.....	97
2.6.2.6 Bloque Estimador de la Porosidad del Suelo.....	101
2.6.2.7 Bloque Estimador del Modelo de Crecimiento Radicular de la Planta.....	102
2.6.2.8 Bloque Estimador de la Humedad Deseada .....	103
2.6.2.9 Bloque Estimador de la Humedad Real.....	104
2.6.2.10 Bloque del Sistema de Control .....	105
3. ESTUDIO ECONOMICO DE LA PROPUESTA DE CONTROL.....	112
4. RESULTADOS .....	125
5. ANALISIS DE RESULTADOS .....	137
6. CONCLUSIONES.....	143
7. RECOMENDACIONES.....	148
ANEXOS.....	151

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Radiación solar semanal de la Subregión Sabanas (Sincelejo) entre 1984 - 1996.....	10
Figura 2. Evapotranspiración de Sincelejo para los años 1999 y 2009.....	11
Figura 3. Precipitación mensual de Sincelejo para el año 2008.....	13
Figura 4. Triángulo de textura de suelos.....	17
Figura 5: Estructura Granular .....	18
Figura 6: Estructura Subangular .....	18
Figura 7: Estructura Columnar .....	19
Figura 8: Estructura Laminar .....	19
Figura 9. Representación gráfica de la evapotranspiración. ....	21
Figura 10. Representación gráfica de la evapotranspiración .....	25
Figura 11. Representación de un proceso .....	26
Figura 12. Control en lazo abierto .....	27
Figura 13. Esquema típico para Control en lazo cerrado .....	27
Figura 14. Comparación un sistema estable con un sistema inestable .....	29
Figura 15. Diagrama de bloques de un control PID .....	30
Figura 16. Comportamiento de $E_{SS}$ .....	32
Figura 17. Diagrama de bloques de control PID de una planta .....	34
Figura 18. Ejemplo de sintonización para obtener la ganancia crítica $K_{cr}$ y el periodo crítico $P_{cr}$ ...	36
Figura 19. Arquitectura controlador difuso .....	41
Figura 20. Tipos de Goteros .....	51
Figura 21. Distancia en la que se ubicarán los emisores (goteros) .....	54
Figura 22. Ubicación de la cintilla para el riego por goteo en el cultivo de la sandía .....	55
Figura 23. Cabezal de Riego por Goteo .....	57
Figura 24. Curva generalizada del coeficiente del cultivo de la Sandía .....	62
Figura 25. Modelo Conceptual de un proceso de infiltración del agua .....	68

Figura 26. Ecuaciones de Balance de Flujo .....	69
Figura 28. Esquema general del sistema de control .....	85
Figura 29. Respuesta del Sistema en Lazo Abierto .....	86
Figura 30. Error presentado por el sistema de control en lazo abierto .....	87
Figura 31. Esquema externo del estimador de radiación neta .....	88
Figura 32. Esquema interno del convertidor de energía a potencia .....	88
Figura 33. Esquema interno del calculador de radiación neta .....	89
Figura 34. Esquema interno del estimador de evapotranspiración .....	91
Figura 35. Esquema interno con la programación del estimador de evapotranspiración .....	92
Figura 36. Representación gráfica ecuación de balance de humedad .....	93
Figura 37. Bloque de balance hídrico .....	95
Figura 38. Bloque de coeficiente de suelo .....	96
Figura 39. Propiedades del suelo .....	97
Figura 40. Bloque capacidad del campo para suelo arcilloso .....	98
Figura 41. Bloque capacidad del campo para suelo franco arcilloso .....	99
Figura 42. Bloque capacidad del campo para suelo franco .....	100
Figura 43. Bloque de cálculo de la velocidad de infiltración .....	101
Figura 44. Bloque para el cálculo de la porosidad del suelo .....	102
Figura 45. Bloque crecimiento radicular de la planta .....	102
Figura 46. Bloque para el cálculo de la humedad deseada .....	103
Figura 47. Bloque para determinar la humedad actual .....	104
Figura 48. Controlador difuso con variables de entrada y salida .....	105
Figura 49. Función de pertenencia para la señal del error .....	106
Figura 50. Función de pertenencia para el control de la válvula .....	108
Figura 51. Sistema completo con controlador difuso .....	109
Figura 52. Sistema completo con controlador PID .....	111
Figura 53. Comparación entre la Humedad Real y la H. Deseada en el Suelo para el Controlador PID	126
Figura 54. Señal error para el Controlador PID .....	127



Figura 55. Reacción del Controlador PID Sintonizado ante una alimentación constante .....	128
Figura 56. Comparación entre la H. Real y la H. Deseada en el Suelo para el Controlador Fuzzy .....	129
Figura 57. Señal error para el Controlador Fuzzy .....	130
Figura 58. Señal de trabajo de la válvula para los Controladores Fuzzy .....	131
Figura 59. Señal de trabajo del Controlador PID .....	134
Figura 60. Señal de trabajo del Controlador Fuzzy .....	134
Figura 61. Comportamiento de la Evapotranspiración .....	135
Figura 62. Comparación del Error en el Controlador PID y Fuzzy .....	137
Figura 63. Comparación Trabajo del Controlador PID y Fuzzy .....	138
Figura 64. Comparación Acción de la válvula en el Controlador PID y Fuzzy .....	140
Figura 65. Respuesta del Controlador para la humedad deseada durante un mes de crecimiento .....	152
Figura 66. Error del sistema de control (PID/FL) durante el mes de simulación (720 Hrs) .....	152
Figura 67. Comportamiento del Controlador (PID/FL) durante el mes de simulación (720 Horas) .....	153
Figura 68. Comparación del trab. realizado por la válvula del Controlador durante el 1 de simulación .....	153
Figura 69. Respuesta del Controlador para la H. deseada en toda la etapa de cultivo (4 m/2928 hrs) ...	154
Figura 70. Error del sistema de control (PID/FL) durante el tiempo de siembra de 4 mes (2928 Horas)	154
Figura 71. Comparación del trabajo de los Controladores durante el tiempo de siembra de 4 mes .....	155
Figura 72. Comparación del trabajo realizado por la válvula del Controlador en el tiempo de siembra ..	155
Figura 73. Comparación de la Evapotranspiración durante un mes de simulación .....	156
Figura 74. Comparación de la Evapotranspiración durante cuatro meses de simulación .....	156
Figura 75. Grafica de la superficie de control y el visor de reglas (Error Vs acción de la Válvula).....	157

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Uso del suelo .....	ix
Tabla 2. Dimensiones aproximadas de las partículas comunes del suelo .....	16
Tabla 3. Regla de sintonización de Ziegler – Nichols basada en la gan. $K_{cr}$ y en el periodo critico $P_{cr}$ .	36
Tabla 4. Etapas fenológicas de la Sandía - días desde la siembra .....	47
Tabla 5. Tabla de Fertilizantes y sus Dosis .....	58
Tabla 6. Etapas fenológicas de la sandía - días desde la siembra .....	60
Tabla 7. Periodicidad de cada una de las variables censadas en la Estación .....	67
Tabla 8. Conjunto de reglas del controlador difuso .....	107
Tabla 9. Cotización General Materiales para Sistema de Riego Diseñado .....	118
Tabla 10. Especificaciones de los sensores incorporados en la 2900ET .....	120
Tabla 11. Análisis Económico del Beneficio del Sistema de Riego en Cultivos de Sandía .....	123

# Agradecimientos

Al Señor Dios Todopoderoso, quién me sustenta y que a través de su gracia pude soportar las inclemencias y dificultades durante toda mi vida. Me aferro a Su Palabra: “Al que cree todo le es posible” Mar 9:24

A mi bella familia, mi linda esposa María Claudia, el Amor de mi vida y la dueña de mi corazón. Mis hermosos hijos: Juan Diego y David José, mi razón vivir y de luchar.

Mis padres, Carlos nuestra guía y testimonio permanente hacía la Luz. Mercedes, la nobleza y el amor hecha mujer, gracias de verdad por protegernos y amarnos sin límites.

Mis hermanos, Darwin, ejemplo de vida y dedicación. A la memoria de mi amado hermano David José, Siempre te amaremos hermanito.

A mis directores y maestros Isaac Zúñiga y Jorge Duque, por sus valiosos aportes y por el acompañamiento incondicional en la realización de este trabajo: Su ánimo, dedicación, actitud siempre amable y respetuosa, y esa personalidad sencilla que anteponen a sus logros, hacen de ustedes un motivo de admiración, respeto y ejemplo a seguir. Gracias.

Al Doctor José Luis Villa Ramírez, es impresionante que un ser de sus calidades académicas, posea tanta calidez y sencillez de corazón. Es usted una viva imagen de la virtud que encierra la profesión de la Ingeniería.

A los ingenieros Giovanny Rafael Vásquez y a todos mis profesores de la maestría que con sus enseñanzas lograron despertar en mí el interés hacia la investigación y la búsqueda continua del conocimiento.

Y a mis grandes y estimados amigos, a quienes no podría nombrar sin el temor de olvidar alguno de sus nombres. Gracias por su apoyo, bendición y amistad.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación es un estudio de modelamiento y simulación del microclima que rodea un cultivo hortofrutícola en el departamento de Sucre – Colombia, teniendo en cuenta la mayoría de elementos y aspectos tanto climáticos como del suelo, y que influyen en los requerimientos mínimos de agua en cultivos artesanales, y de medianas y amplias extensiones de tierra. De modo que se puedan implementar diferentes estrategias de control basadas en diferentes tecnologías como la lógica difusa y tradicional, orientados a sistemas de irrigación de cultivos hortofrutícolas

La principal motivación para adelantar éste tipo de investigación, es la necesidad de impulsar proyectos de impacto social en el departamento de Sucre, que promuevan la competencia, desarrollo y progreso regional en los ámbitos económico, social y ambiental. Además, aportar al campo de la investigación en ingeniería aplicada al renglón agrícola, contribuyendo al desarrollo científico y tecnológico, y a la aplicabilidad del conocimiento en soluciones concretas para la región.

Según Aguilera (2005), el departamento de Sucre tiene suelos poco utilizados y con baja producción agrícola, debido al escaso nivel de inversión y tecnología (riego, drenaje, transferencia tecnológica e investigación) que se reflejan en los bajos rendimientos por

hectárea. Además, según la FAO, en su boletín anual de desarrollo agrícola y social, señala que la agricultura es el sector de mayor consumidor mundial de agua dulce extraída de lagos, ríos y de la atmósfera. De manera que, es esencial que el agua se use efectiva y eficientemente con ese propósito, especialmente cuando su disponibilidad es limitada.

De ahí la importancia de los sistemas de riego, cuyo propósito es suministrar a las plantas la humedad y requerimientos *suplementarios* necesarios para su crecimiento y desarrollo, asegurando una adecuada y oportuna disponibilidad de agua. En ese mismo sentido, la clave en irrigación es alcanzar el balance correcto para el desarrollo de la planta con un uso óptimo de agua, incorporando ciertas tecnologías de control que permitan mantener variables en puntos con el ajuste deseado. Por tal motivo, el objeto de este proyecto de investigación es presentar mediante un estudio de simulación una alternativa de control automático para sistemas de riego con base en la utilización de un controlador tradicional e inteligente basado en lógica difusa capaz de decidir el momento y la cantidad de agua requerida por una plantación, alimentándose de variables climáticas y edafológicas en tiempo real.

Para determinar los requerimientos y necesidades de agua de un cultivo se debe conocer la cantidad de agua perdida mediante la evapotranspiración (ET), definida como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del

aire, la humedad atmosférica, y la velocidad del viento. Para calcular la evapotranspiración se utilizará el método combinado de Penman-Monteith avalado por la FAO como el procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia. Además se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método de la FAO Penman-Monteith con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua en los cultivos a nivel general y específico. Éste método ha sido utilizado en muchas regiones del mundo, tales como (Aguila, 2003), pero en Colombia (Ramírez, Mejía, Marín, & Arango, 2010) y Latinoamérica son muy pocos los trabajos adelantados en éste sentido (Silva, Meza, & Varas, 2010)

Para diseñar y simular el comportamiento del controlador se utilizará el entorno de modelado y simulación para sistemas dinámicos MATLAB® R2011b (debidamente licenciado por la Corporación Universitaria del Caribe CECAR) y su herramienta Fuzzy Logic Toolbox™ y Simulink™. El toolbox permite modelar el comportamiento de sistemas complejos usando simples reglas lógicas y luego implementar esas reglas en un sistema de inferencia difusa y Simulink™ es un entorno gráfico para diseñar y simular mediante diagramas de bloques el sistema completo.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El riego agrícola es considerado una de las prácticas más antiguas utilizadas por el hombre para producir sus alimentos, y por ende, a lo largo del tiempo ha sido una de sus principales estrategias de sostenibilidad. Según la (FAO & IWMI, 2010), actualmente se demanda aproximadamente el 70% del total de agua dulce mundial captada de lagos, ríos y napas subterráneas. Si se mantienen los niveles actuales de consumo, dos de cada tres personas del planeta vivirán en una situación de déficit hídrico (escasez de agua, moderada o severa) para el año 2025 (ONU, 2003). Por tal motivo, los sistemas de riego cobran gran importancia, ya que son vistos como un importante medio para incrementar la productividad y la intensidad de los cultivos y fomentar su diversidad, objetivo de la mayor parte de las políticas agrarias de los gobiernos. (AquaStat, 2013)

El objetivo de los sistemas de riego es poner a disposición de los cultivos el agua necesaria para que cubran sus necesidades, complementando la recibida en forma de precipitaciones naturales. Cuando se distribuye agua por una parcela de cultivo, existen dificultades que ocasionan pérdidas e impiden que el agua se reparta de forma homogénea. Es importante solventar estas dificultades, pero lo es aún mayor cuando el agua es un recurso de escasez creciente. Un aspecto crucial en el riego de plantaciones comerciales o tradicionales de

frutales es la determinación del consumo y requerimientos de agua (Doorenbos & Pruitt, 1975)

Los métodos de riego más utilizados hacen poca contribución a una buena gestión de los recursos hídricos, lo que implica que su disponibilidad y sostenibilidad se vean amenazadas; como también la fertilidad de los suelos a causa de la erosión, anegamiento y salinización por la sobre estimación de las necesidades de agua de los cultivos.

En concreto, el crecimiento galopante de la demanda de productos pecuarios está provocando un aumento de la demanda de agua. Se espera que la demanda mundial de alimentos crezca un 70% hasta 2050.

Sin embargo, según se indica en el Informe Mundial del Agua (UNESCO, 2012), el verdadero desafío al que hoy ha de hacer frente el mundo no es tanto conseguir un 70% más de alimentos dentro de 40 años, sino lograr que ese 70% adicional llegue a la mesa de la gente. Las mejores estimaciones del consumo mundial de agua para la agricultura (tanto de secano como de regadío) prevén un aumento aproximado del 19% hasta 2050, que podría incrementarse si no mejoran sustancialmente el rendimiento de los cultivos y la eficacia de la producción agrícola. La mayor parte de este aumento del agua de riego se producirá en regiones ya afectadas por la escasez de recursos hídricos. La gestión responsable del agua



para fines agrícolas contribuiría notablemente a la seguridad de los recursos hídricos del planeta en el futuro.

Además, el gravamen del aumento exponencial de la población humana exigirá una demanda en la producción de alimentos que se estima sea del 70% en relación a la actual, en 2050, lo que traerá consigo una alta presión sobre los recursos hídricos y las necesidades alimentarias alrededor del globo. (Bardon, 2012)

Otros factores que influyen en la disponibilidad de agua son las características geográficas y climáticas de las diferentes zonas del planeta, debido a su irregularidad en el suministro de agua, lo que debe implicar su protección y optimización en su uso.

La agricultura juega un papel crucial en la economía de los países, y de manera especial en los países en desarrollo, brindando la principal fuente de alimentos, ingresos y empleos a sus poblaciones rurales. La realización de mejoras en agricultura y uso de tierras es fundamental para alcanzar la seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza y un desarrollo integral sostenible. (FAO, Corporate Document Repository, 2012)

En Colombia, las áreas destinadas a la actividad agrícola superan el 7% del área total del país, y se puede afirmar que un 60% de estas áreas se destinan al crecimiento de cultivos

permanentes mientras que un 38% corresponden a las áreas destinadas al desarrollo de cultivos transitorios y lotes en barbecho listos para cultivar (2% lotes en descanso). En el Tabla 1 se presentan los resultados de la actividad agrícola por departamento. Claramente se observa una mayor actividad de cultivos permanentes sobre los cultivos transitorios, los departamentos donde se hace evidente esta diferencia son los del Eje Cafetero, consecuencia de la vocación cafetera de la región y la considerable superficie sembrada en plátano y frutales.

Por otro lado, los departamentos que presentan una marcada actividad relacionada con los cultivos transitorios son Sucre, Córdoba y Bolívar, en estos departamentos es mucho mayor la proporción de hectáreas dedicadas a cultivos de ciclo corto sobre las hectáreas dedicadas a los cultivos permanentes. Por esta misma razón, es fácilmente asumible la inmensa necesidad que existe en estos departamentos costeros, de la existencia de sistemas de riego. Pues los ciclos cortos de estos cultivos, los tipos de terreno y las variables meteorológicas, respaldan a la necesidad de ciertas cantidades de agua de manera casi permanente en los grandes y pequeños distritos de riego.

Según los Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA R. E., 2011), Sucre tiene 883.102 hectáreas en suelos aptos para usos agropecuarios, equivalentes al 81,2% de la superficie total del Departamento. Sin embargo, sus suelos están poco utilizados en agricultura. En el 2003, del área total agropecuaria solo había 105.452 hectáreas dedicadas a

cultivos agrícolas (11,9%), en pastos el 67,3%, en malezas y rastrojos el 16,5% y en bosques el 1,7%. Esta baja utilización de la capacidad de producción agrícola obedece a los bajos niveles de inversión, y en especial, de inversión en tecnologías (riego, drenaje, transferencia tecnológica e investigación) que se reflejan en los bajos rendimientos por hectáreas (DIAZ AGUILERA, 2005).

<b>Actividad Agrícola</b>				
<b>Departamento</b>	<b>Total Superficie</b>	<b>Cultivos Transitorios y Berbecho</b>	<b>Cultivos Permanentes</b>	<b>Descanso</b>
<i>Hectáreas</i>				
<b>Total Nacional</b>	3.354.349	1.283.427	1.998.209	72.713
Antioquia	281.508	34.246	244.045	3.218
Atlántico	5.638	4.132	1.501	5
Bolívar	79.710	52.832	23.846	3.032
Caldas	89.084	3.271	85.508	305
Cesar	145.027	23.006	116.522	5.499
Córdoba	119.224	44.787	72.480	1.957
Guajira	19.883	15.586	4.297	
Quindío	104.230	39.721	63.439	1.067
Risaralda	52.018	1.138	50.509	376
<b>Sucre</b>	<b>216.753</b>	<b>42.906</b>	<b>170.632</b>	<b>3.215</b>
Otros Departamentos	2.241.274	1.021.802	1.165.430	54.039

Tabla 1: Uso del suelo (ENA, 2009) Modificada por autor

El departamento de Sucre por su ubicación, hidrografía, clima y relieve presenta irregularidades en el suministro de agua, dando origen a que la zona norte posea menos disponibilidad de fuentes de agua y una baja tasa de precipitación, comparados con los datos relacionados con la zona sur, por lo cual los tipos de cultivos transitorios ocupan una gran

parte de la actividad agrícola a diferencia de los cultivos permanentes (ENA, 2009) lo que da origen a una baja producción alimenticia y a depender, en muchas ocasiones, de los periodos de lluvia, para recolectar y almacenar agua para los extensos períodos secos.

Así mismo, en el departamento de Sucre es muy frecuente encontrar cuerpos de agua, resultados en su mayoría del represamiento de las lluvias. Estos cuerpos de agua, llamados jagüeyes, son utilizados en las fincas, para muchas actividades, entre las que encuentra la agricultura, pero su uso en esta actividad, es muy limitado e inclusive, en muchas ocasiones, artesanal, debido a que no se posee un sistema de riego de altas prestaciones que permita llevar el agua a las áreas más alejadas. Además de esto, en la agricultura los productores enfrentan problemas de lluvias irregulares. A lo largo del tiempo el agricultor ha adquirido una gran experiencia para encontrar soluciones a estos fenómenos; sin embargo, hoy día, éstas predicciones basadas en la experiencia pierden algún grado de validez debido a que nuestros climas se están haciendo cada vez más extremos, es decir, en épocas de verano, la radiación solar y el calor se ha incrementado, mientras que en épocas de invierno las lluvias arrecian cada vez en mayor intensidad y causan, en muchos casos, terribles estragos en la población y en sus cultivos (Larios Martón, 2008). Si se observa a nivel general en el país y en el mundo, los cambios climáticos se manifiestan ferozmente en desastres naturales como son las inundaciones, sequías, fenómenos como el del Niño o la Niña, que sin duda han aumentado los problemas del agua en el sector agrícola. Es sobre todo, el aumento de dichas sequías y la prolongación de las mismas en los últimos años, lo que ha causado grandes

pérdidas en las cosechas con impactos económicos muy negativos. Adicionalmente, en muchos lugares los niveles de los mantos acuíferos están bajando a una escala alarmante (Obando, 2006). Nuestra región no es ajena a este fenómeno, y los esfuerzos por brindar a la comunidad cuerpos de agua son cada vez más difíciles y en cierta medida costosos, por la dificultad de encontrar acuíferos naturales donde se pueda extraer el líquido.

Es por esto, que la utilización y aplicación de nuevas herramientas informáticas y el uso de nuevas tecnologías de la información, tales como el Control Automático y la Inteligencia Artificial aplicados al riego (Aguila, Sinn, & Kleisinger, 2008) sugieren nuevas formas o metodologías de sustentabilidad apoyados en la gestión del riego, y que sin lugar a dudas, han superado las estimaciones relacionadas con el riego tradicional en los últimos años.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál será el mejor modelo micro climático para cultivos hortofruticulturas que garantice el buen funcionamiento de diferentes estrategias de control y optimice los recursos hídricos, con bajos costos de implementación y bajos índices de aridez del suelo en sistemas de riego en el municipio de Sincelejo?

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Objetivo General**

Plantear y Evaluar un modelo micro climático para cultivos hortofrutícolas aplicable en sistemas de riego mediante estrategias de control moderno en el municipio de Sincelejo - Sucre.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar y definir el índice de aridez del suelo mediante el modelo matemático ajustado de Penman – Monteith, utilizando datos suministrados por las unidades experimentales y con datos históricos generados por el Himat.
- Seleccionar los sensores de humedad del suelo, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa con base en las características del suelo relacionadas con su índice de aridez.

- Escoger la estrategia de control adecuada con base en la caracterización del suelo y las especificaciones de humedad y aridez del cultivo para ser sugeridas en grandes distritos de riego.
- Simulación del modelo hídrico propuesto y de la implementación de las estrategias de control para determinar su estabilidad y rendimiento.
- Realizar un estudio económico de la implementación del sistema a pequeña y gran escala para orientar al agricultor en términos de inversión y beneficio de los sistemas de control.

## JUSTIFICACIÓN

La población mundial crece vertiginosamente. Según las proyecciones (ONU, 2010) el raudo aumento en la población mundial en los últimos 50 años continuará, principalmente en los países menos desarrollados, donde la población está creciendo a un ritmo cinco veces superior al de los países desarrollados. Se prevé que la población mundial llegará 9.100 millones hacia 2050. En esa fecha habrán de producirse al año otros 1 000 millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas adicionales de productos pecuarios (FAO, Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura, 2011). El imperativo de alcanzar ese crecimiento agrícola es mayor en los países en desarrollo, donde el reto no consiste únicamente en producir alimentos, sino en garantizar que las familias tengan un acceso a los mismos con la consiguiente mejora de la seguridad alimentaria. Actualmente, casi 1 000 millones de personas están sub nutridas, en particular en el África subsahariana (239 millones) y Asia (578 millones). En los países en desarrollo, incluso si se duplica la producción agrícola para el año 2050, una persona de veinte años todavía corre el riesgo de la subnutrición –el equivalente a 370 millones de personas que padecen hambre, la mayoría de las cuales estará de nuevo en África y Asia–. Este crecimiento implicaría que la agricultura seguiría siendo un motor de crecimiento esencial para el desarrollo económico y los servicios ambientales, y para reducir la pobreza rural. (FAO, Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura, 2011)



Para que la nutrición mejore y la inseguridad alimentaria y la subnutrición retrocedan, la producción agrícola en el futuro tendrá que aumentar más rápidamente que el crecimiento de la población. En vista de esta escasez y dificultad, corresponde a la agricultura –el mayor consumidor de agua- tomar medidas para hacer un uso más eficiente del agua. Es por esto que muchas las herramientas tecnológicas han virado hacia aplicaciones agrícolas, dirigidas a la optimización del consumo de agua y el aumento de la producción agrícola. (Gómez Meléndez, 2008)

La automatización de los sistemas de irrigación se ha convirtiendo en un asunto estratégico en diversas partes del mundo, implementando todo tipo de sistemas de control automático y modelamientos matemáticos orientados a la simulación de los comportamientos de las plantas en relación a su consumo de agua, logrando con ello algunos resultados importantes en cuanto a la gestión en el riego de cultivos. (Aguilar, Angarita, A, & Rodellar, 2009)

Una forma de alcanzar la optimización en la utilización del recurso hídrico en la agricultura y elevar la productividad agrícola, sugiere utilizar sistemas automatizados y estrategias de control avanzado para determinar cuándo, cómo y en qué cantidad de agua debe ser provista a una superficie de cultivo, especialmente cuando su disponibilidad es limitada, como en el municipio de Sincelejo, en donde no hay grandes afluentes que suministren permanentemente el recurso hídrico, tan vital para la agricultura, como para la vida ya que permite sostenerla en cantidades correctas y ponerla en peligro cuando no está disponible o cuando es sobreabundante. (ICER, 2006)

El departamento de Sucre se ha caracterizado por ser una economía que principalmente depende de la ganadería y del sector público, específicamente de las transferencias del gobierno nacional (CEPAL, 2012). Del suelo del departamento de Sucre, el 40% es apto para la agricultura pero con la ayuda de técnicas de manejo de suelos y riego y fertilizantes para aumentar la productividad, siendo la subregión sabanas la que padece con mayor rigor la estación seca (entre siete u ocho meses al año), cuya precipitación fluctúa entre 990 y 1.275 mm promedio anual y la humedad relativa es del 80% en promedio (GDS, 2012)

Los avances en tecnologías de control tales como lógica difusa, redes neuronales artificiales, los sistemas de control modernos, las redes de computadores y las telecomunicaciones, están abriendo una nueva perspectiva para la obtención de una mayor precisión en el control de sistemas físicos orientados al agro, lo que hoy se conoce como la *agricultura de precisión*, y que pueden ser aplicados al control de sistemas de irrigación. Empero, para implementar un proyecto basado en estas tecnologías es necesario realizar un estudio de simulación para medir su impacto y que tan eficiente puede llegar a ser el consumo de agua, ya que puede ser extremadamente costoso observar ciertos procesos en su forma real, sumado a la característica de que la realidad es incierta, y como tal, sus resultados son variables, con lo cual no se incurriría en gastos innecesarios de dinero y tiempo, ni caer en falsas suposiciones guiadas por acciones que involucran prueba de ensayo y error, y que pueden llegar a un ambiente de confusión.

En el estudio de simulación se parte del hecho de que se tienen las variables que describen el sistema y aún su flexibilidad, planteé la opción de introducir datos generados aleatoriamente, pero suficientemente validados bajo pruebas estadísticas que garanticen un auténtico nivel confianza para su uso, por eso es pertinente, porque propone la oportunidad de estudiar el sistema en condiciones casi reales, reduciendo dudas de sus posibles implicaciones en el futuro y poder tomar mejores decisiones con respecto a su implementación e implantación.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede afirmar con claridad que la tecnología ofrece una gran cantidad de alternativas en lo referente a sistemas de riego, y entorno a éste particular, gira toda la intencionalidad investigativa del presente proyecto que pretende encontrar la mejor opción en términos de optimización de consumo de agua, mediante la combinación de ciencias agropecuarias, la teoría del control moderno, la sensórica, las redes de computadores y la inteligencia artificial. Una solución rentable, sencilla y eficiente, adaptada a las condiciones propias de nuestra geografía y a las características únicas de nuestros suelos, que ayude al desarrollo de la agricultura en la región.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **ALCANCES**

Con la ejecución de este proyecto se lograrán determinar en base a simulaciones alimentadas por parámetros y modelos mundialmente reconocidos, cuál de los tipos de sistemas seleccionados de Control Difuso y Control Tradicional (PID Sintonizado) ofrece la mejor alternativa para la optimización de los recursos hídricos en lo relacionado con sistemas de riego, y de manera especial, lo relacionado con los requerimientos hídricos de un cultivo, en términos de estabilidad, usabilidad y costo; que sea capaz de compensar el deterioro generado por diferentes causas en los suelos por salinidad y erosión, agravados en los últimos años por los efectos producidos por la escasez y exceso de agua debidos a los fenómenos del niño y la niña que se han presentado a lo largo de las últimas décadas, en el país y el mundo. (FAO & IWMI, Informe: Agua para la Alimentación y para la Vida, 2010)

### **LIMITACIONES**

Los obstáculos y limitaciones presentados giran en torno a los recursos de hardware y software disponibles para la implementación de la simulación, para esto se ha decidido dividir el proyecto de modo que la implementación pueda ser adelantada con el auspicio de la Corporación Universitaria del Caribe, a través de su Centro de Investigaciones, como puede observarse en el contrato de investigación relacionado en el Anexo 5 de éste

documento. Otro factor que influye en las limitaciones del proyecto, es que en Colombia no existe suficiente información acerca de la adaptación y la implementación de modelos matemáticos como por ejemplo el de Penman Monteith, además existe poca inversión y por ende poca investigación relacionada con la inteligencia artificial, los sistemas de control aplicados a la producción y desarrollo de tecnología agrícola en el país.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 ANTECEDENTES

En el 2007, en la universidad complutense de Madrid, Los estudiantes María Guijarro Mata-García, Estefanía Tortajada Agudo y Fernando González Rivas, realizaron un proyecto de investigación que consistía en un Sistema de Riego Inteligente Utilizando Lógica Difusa, que permitía simular por software Java® la evolución de un entorno de regadío simple en el tiempo, permitiendo modificar ciertas condiciones ambientales y posibilitando la elección de realizar inferencias para el cálculo del tiempo de riego según lógicas del producto, de Lukasiewicz o de Zadeh.

En el 2009, fue publicada en el World Applied Sciences Journal el paper/artículo sobre Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Greenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems por sus autores P. Javadi Kia, A. Tabatabaee Far, M. Omid, R. Alimardani and L. Naderloo pertenecientes al Departamento de Ingeniería de Maquinaria Agrícola de la Universidad de Teherán, Karaj, Irán. Fue una simulación de un controlador difuso (FLC) comparado con controlador convencional ON/OFF desarrollado en software MATLAB®, utilizando un modelo de riego, las funciones de la evapotranspiración, las condiciones ambientales del invernadero, tipo de suelo, tipo de planta y otros factores que afectan el riego de invernaderos. Los resultados arrojaron que el controlador difuso del

sistema ofrecía mejores índices de estabilidad en comparación con el otro sistema controlado por el control convencional ON/OFF, pero sin dejar de lado que el controlador ON/OFF entre ciertos rangos se comporta de una manera estable. Es importante señalar que el sistema basado en lógica difusa puede ahorrar una gran cantidad de agua y es muy barato para aplicar. Debido al menor consumo de energía, producto de la menor cantidad de encendidos programados automáticamente por el sistema de control. (Javadi, F, Omid, R, & L, 2009)

En el 2010, se realizó el proyecto Automation of Irrigation System Using ANN based Controller, en el Centro de Investigación en Modelado y Simulación de la Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología, de Pakistán a cargo de los ingenieros S. Muhammad Umair, R. Usman. La propuesta fue una simulación de un prototipo de controlador basado en Artificial Neural Network (ANN) contrastados con uno convencional ON/OFF, utilizando como herramienta de modelado MATLAB. Publicado en el International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS Vol: 10 N° 02. (Umair & Usman, 2010)

Los parámetros de entrada fueron la temperatura del aire, del suelo humedad, radiación y humedad. Se tuvo en cuenta las condiciones meteorológicas de la región en donde se aplicó el proyecto, la evapotranspiración y el tipo de cultivo (como parámetro fijo e inmodificable). El objetivo principal era optimizar los recursos como el agua y la energía. Las variables climáticas fueron obtenidas a través de una simulación de ondas senoidales, con parámetros promediados por estaciones meteorológicas). Los resultados mostraron que el Controlador ON / OFF del sistema presentaba algunas fallas y deficiencias, debido a sus

limitaciones propias del diseño. Por otro lado el controlador ANN dio lugar a la posible implementación de un mejor y más eficiente control, porque sus resultados mostraban que la implementación de la IA en Sistemas de Control, mejoraban los resultados esperados. Además estos tipos de controladores no requieren de un previo conocimiento profundo del sistema y tienen la capacidad inherente de adaptarse a las condiciones cambiantes del medio.

El 11 de septiembre de 2011, fue presentado en el African Journal of Agricultural Research el proyecto The Fuzzy Decision-Making Method of Irrigation Amount Based on ET and Soil Water Potential a cargo de los ingenieros Zhang Wei , He Yong , Liu Fei, Miao Congcong y hen Yuewei. El cual consistía en un controlador borroso alimentado por el índice de aridez del suelo en base a ciertas variables climáticas como la humedad relativa, la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento, etc. utilizando la fórmula FA056 Penman-Monteith. Los resultados de las pruebas mostraron que el método y el sistema tienen muchas ventajas, tales como la economía, practicidad, con una fiabilidad de comunicación de alta precisión y control. (Wei, Yong, Congcong, & Yuewei, 2011)

En 2011, fue expuesto en la Segunda Conferencia Nacional sobre Tecnología de la Información y la Comunicación (NCICT), el proyecto On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman-Monteith Equation, por los ingenieros V. S. Rahangadale y D. S. Choudhary. Este paper propone la simulación de un sistema de riego utilizando control difuso en contraste con un controlador convencional ON/OFF y Utilizando la ecuación de Penman-Monteith para calcular el índice de aridez del suelo en base a las



variables climáticas temperatura, humedad, radiación neta y velocidad del viento (variables propias de la región de estudio). Los resultados obtenidos concluyeron que el diseño funcional era muy eficiente y las salidas del mismo, fueron muy suaves, es decir, el seguimiento realizado por el controlador mantuvo niveles de errores bastante bajos. El nuevo controlador de riego con bloque de lógica difusa es muy superior al método convencional. Por otro lado, el controlador convencional proporciona cambios bruscos en la posición de la válvula, es decir, que según los resultados obtenidos por el proyecto, el controlador no tenía la capacidad de mantener los niveles de evapotranspiración en los rangos ideales, sin requerir altos consumos en energía y tiempo. Como conclusión, se define que el sistema basado en lógica Difusa, puede mejorar el rendimiento de los sistemas automáticos de gestión del riego, aumentar el rendimiento de los cultivos, reduce los esfuerzos humanos y también se puede guardar gran cantidad de agua. (Rahangadale & Choudhary, 2011)

En 2010, en el International Journal of Engineering Science and Technology (Vol 2), se publica el trabajo Reference Crop Evaporation Estimation Using Neuronal Network, escrito por los ingenieros Chowdhary Archana y R. Shrivastava, en Indore (India). El trabajo se concentra en utilizar una red neuronal de varias capas para predecir la Evapotranspiración en una región de la india, utilizando datos meteorológicos seleccionados entre los años 2002 y 2005. Se experimentaron varios modelos de redes neuronales, con diferentes algoritmos de entrenamiento (L-M, Q-N). Este estudio plantea herramientas útiles en la deducción de las políticas óptimas de operación y programación de riego para la óptima utilización del agua almacenada. El enfoque empleado con las Redes Neuronales (ANN), es apto para la

estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando limitados datos climáticos (temperatura solamente), lo que a ciencia cierta, puede ser muy útil en regiones limitadas en cuanto a estaciones meteorológicas. Este mismo enfoque, arroja también una mejor técnica de determinación de datos faltantes que los obtenidos a través de la regresión múltiple, para la predicción de la evapotranspiración de referencia. (Chowdhary & Shrivastava, 2010).

En la revista Agricultura Andina (Volumen 16 de enero de 2009), Edgar Romero, Andy Rodríguez, Luis Suniaga y José Montilla; publicaron el artículo Estimación de las Necesidades Hídricas del Cultivo de Pepino (*Cucumis Sativus L.*), Durante las Diferentes Etapas Fenológicas, Mediante la Tina de Evaporación. La investigación se concentró en la estimación de los requerimientos de agua de esta especie de pepino en sus diferentes etapas fenológicas, utilizando como datos de entrada, los suministrados por la estación experimental del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, ubicada en San Juan de los Rios, Venezuela. Los datos meteorológicos utilizados fueron tomados durante dos meses (período comprendido entre junio y agosto del 2005). A manera de conclusión, en el trabajo se especifican algunas de las necesidades hídricas del cultivo durante su ciclo productivo, además arroja como resultado que la etapa fenológica de mayores necesidades hídricas fue la de fructificación (entre 45 y 58 días de vida). (Romero, Rodríguez, Rázuri, Suniaga, & Montilla, 2009)

Los ingenieros István Matijevics (University of Szeged) y el ingeniero Simon János (Subotica Tech), presentan el documento paper Control of the Greenhouse's Microclimatic

Condition Using Wireless Sensor Network. En este trabajo se describe la aplicación y la configuración de sensores inalámbricos mediante la plataforma Sun SPOT. Sun SPOT es un pequeño dispositivo electrónico hecho por Sun Microsystems que pueden tener la capacidad de tener una amplia variedad de sensores conectados a él. Los autores, afirman que los resultados obtenidos con el sistema son muy prometedores, pues se podrían medir y controlar las variables físicas del microclima al interior de un invernadero de manera más eficiente, eso sí, poniendo en consideración que los costos del diseño se eleva considerablemente en la medida en que se requiera mayor precisión y cobertura. (Matijevics & János, 2009)

En el Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC14 2010 Cairo, Egypt; los ingenieros H.E. Gad y S. M. El – Gayar, presentaron el trabajo “Climate Parameters Used To Evaluate The Evapotranspiration In Delta Central Zone Of Egypt”. En éste trabajo se utiliza la ecuación de Penman – Monteith (FAO) para el cálculo de la Evapotranspiración, alimentándole con datos meteorológicos de las condiciones manifiestas en el delta del Río Nilo, y utilizando MatLab como herramienta de desarrollo. Posteriormente se comparan los valores empíricos de la evapotranspiración bajo el modelo P-M FAO56, con los datos ofrecidos por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en su website. Una de las conclusiones planteadas en el documento, es que la ecuación P-M FAO56, es la más útil a la hora de simular o determinar empíricamente los valores reales de la evapotranspiración, utilizando como alimentación datos meteorológicos. (Gad & El-Gayar, 2010).

En el documento “Irrigation Requeirements Of Greenhouse Vegetables In Crete”, presentado por Charzoulakis y Drosos, se trabaja la posibilidad de cultivar hortalizas en invernaderos utilizando como modelo matemático la ecuación de Penman – Monteith pero en temporadas distintas de las naturales, de modo que la producción sea permanente en todo el año. Muestra el comportamiento de la ETo en cultivos tradicionales en la isla de Creta, como Pepino y Tomate. Y luego se evalúa en cultivos poco desarrollados en la misma isla, Berenjenas y Pimientos. Todo esto, debido a la escasez de agua obliga a plantear posibilidades de optimizar los recursos. Utilizan para los distintos cultivos el sistema de riego por goteo, controlados por un sistema de control temporizado. (Chartzoulakis & Drosos, 2002)

Otros trabajos importantes y que han servido como referencia son: Study of Event Based Sampling Tecniques and Their Influence on Greenhouse Climate Control With Wireless Sensors Network (Pawlowski, Guzmán, Rodríguez, Berenguel, & Dormido, 2011), Sistema de Riego para Invernaderos Hidropónicos Basado en la Evapotranspiración del Cultivo (Rojas, Noriega, Herrera, & Chaparro, 2003), Sensitivity of penman – Monteith Reference Crop Evapotranspiration in Tao’er River Basin of Northeastern China (Liquiao, Lijuan, Li, Jiuyi, & Bin, 20008), Automated Irrigation System in Real – Time With Water Balance, Soil Moisture Measurement and Lysimeter (Castro, águila, Quevedo, & Kleisinger, 2009), Smart Prolong Fuzzy Wireless Sensor – Actor Network for Agricultural Application (Sabri, Aljunid, Ahmad, Malek, & Kamaruddin, 20111), A Neurofuzzy Structure Modelling Evapotranspiration in a Greenhouse Crop (Ramos-Fernández, López-Morales, Lafont, & Duplaix, 2009), Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Reference

Evapotranspiration, and Pan Evaporation Methods to Estimate Pasture Evapotranspiration (Summer & Jacobs, 2005), Improved Modeling of Maize Canopy Water loss: A case Study in Brazil (Santos, Bergamaschi, Bergonci, & Rosa, 2000), Water Requirement of Drip Irrigated Tomatoes Grown in Greenhouse in Tropical Environment (Harmanto, Salokhe, Babel, & Tantau, 2005). Todos estos documentos, trabajan los efectos de las condiciones climáticas en los requerimientos de líquido de un cultivo, haciendo énfasis en las condiciones climatológicas que afectan principalmente a la evapotranspiración, es decir, se han dedicado a un solo saber influyente en los cultivos. Pero no tienen en cuenta los requerimientos hídricos del suelo que pueden llegar a ser, igual o más importantes a la hora de modelar las necesidades de agua de un cultivo hortofrutícola. Por lo que podríamos asegurar, según lo investigado, que no existe un estudio de simulación completo que incluya todos los elementos de un sistema de lazo cerrado como el que se propone en el presente documento, que tiene en cuenta la acción de la evapotranspiración, la relación de humedad del suelo, la velocidad de infiltración del agua en el suelo, los diferentes tipos de suelos presentes en el área de cultivo, la edad fenológica de las plantas y el tipo de cultivo a plantar, por lo que la investigación cobra un alto grado de valor investigativo, sobre todo para nuestra región.

## **1.2 MARCO CONTEXTUAL**

Sincelejo es la capital del departamento de Sucre, fundada el 04 de octubre de 1535 por Antonio De la Torre y Miranda. Ubicada al noreste de Colombia, 9° 18'' latitud norte, 75°

23'' longitud oeste del meridiano de Greenwich, con una extensión 28.410.31 Has y una altura de 213 sobre el nivel del mar. Corresponde a una zona de bosque seco tropical y su paisaje característico es la montaña. El predominio de niebla es común en los bosques de ladera durante las primeras horas de la mañana y al atardecer. La acción de los vientos alisios durante la estación seca influye en la regulación de la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones. Sincelejo se caracteriza por presentar una precipitación promedio de 500 a 1200 milímetros, catalogándola bajo un tipo de clima cálido seco. Sus suelos están constituidos morfológicamente por superficies de relieve irregular y complejo, con pendiente variable y altitudes que van desde los 50 a los 260 metros. Posee una temperatura media anual cercana a los  $27.15^{\circ}\text{C} + 0,4$ ; con una mínima promedio anual de  $19,7^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $35,3^{\circ}\text{C}$ . Se aprecia un mayor rango durante el verano donde hay marcados efectos ocasionados por bajas temperaturas en la madrugada y fuertes calores en las horas de la tarde. Con la llegada de las lluvias tiende a estabilizarse, con menos variaciones y una ligera disminución general, con el aumento de la humedad relativa. (POT, 2012)

**1.2.1 Humedad Relativa:** Es muy estable, alrededor de su media anual del 80%, aumentando ligeramente con la nubosidad y la temperatura. Consecuente con el régimen climático de la costa se observa como aumenta desde la Guajira hasta Urabá, en Riohacha es del 73%, en Santa Marta del 75%, en Barranquilla del 79%, en Cartagena del 80%, en Corozal del 80%, en Cereté del 82%, y en Turbo es del 85%. La humedad del aire afecta directamente los procesos de evapotranspiración, sensación climática y punto de rocío,

importantes en los procesos de intercambio hídrico estomatal y epidérmico de organismos vivos.

**1.2.2 Brillo Solar:** Expresado como el promedio de horas con brillo solar mensuales recibidas en cada sitio, se registran 2.093 horas anuales con una media mensual de 174,4 horas, para un 48.4%, muy por encima del promedio nacional de las principales ciudades y lugares de interés, que es el 42,4% (Figura 1). Este nivel de insolación en la sabana es superado sólo por la costa y en especial, el extremo norte con 64% en Ciénaga y Riohacha, máximos en el país. Lo anterior indica la conveniencia de tener regiones o lugares cultivables arborizados con el objeto de compensar la alta evaporación y desecación de los suelos y mantener el equilibrio ecológico que coadyuve a su manejo sostenible de la agricultura en los diferentes agroecosistemas. (Florez, Olivera, & Yáñez, 2003)

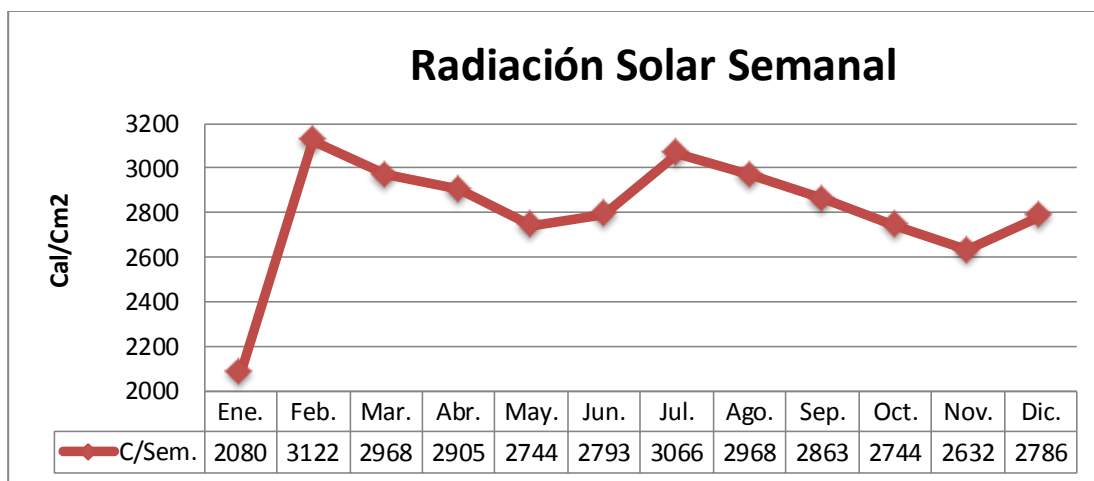


Figura 1. Radiación solar semanal de la Subregión Sabanas (Sincelejo) entre 1984 - 1996

Fuente: IDEAM

**1.2.3 Evapotranspiración Potencial:** Conjuga éste parámetro el resultado en el ecosistema de varias de las variables del clima, dependiendo su comportamiento, en primer lugar, de la disponibilidad de agua en el sistema, la temperatura y los vientos. Se observa en la figura 2, el comportamiento de la evapotranspiración potencial de la ciudad de Sincelejo durante los años 1999 y 2009, donde se percibe que hay un promedio anual aproximado entre 1578 y 1625 mm, con un promedio mensual aproximado de 133 mm.

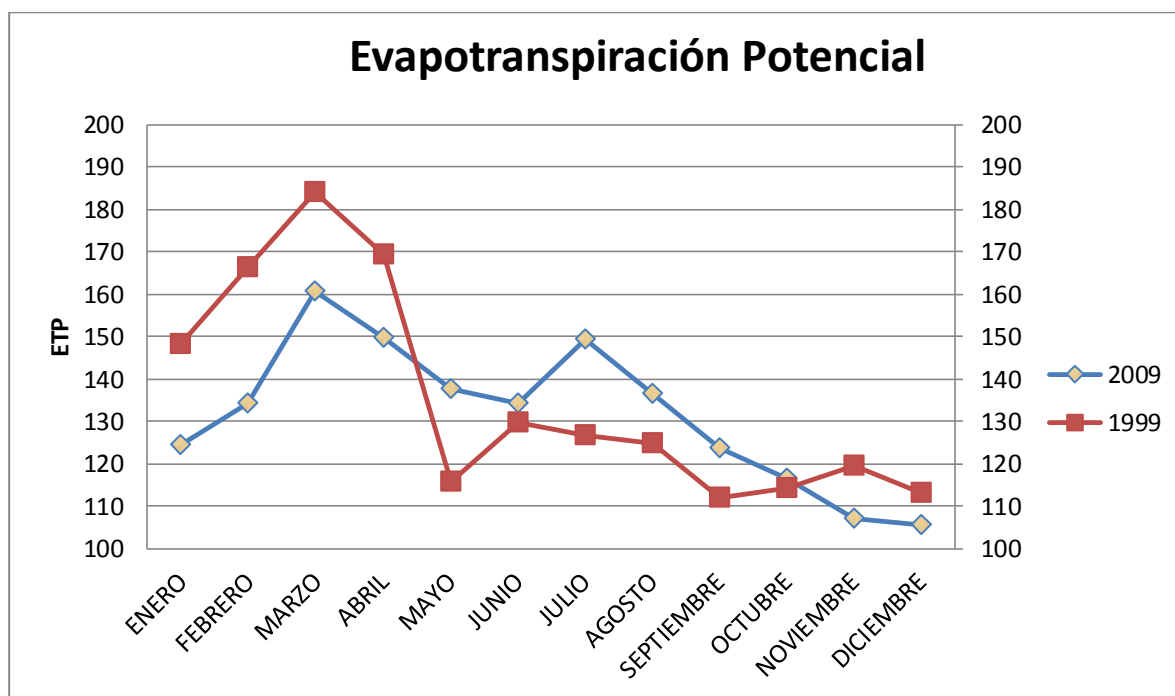


Figura 2. Evapotranspiración de Sincelejo para los años 1999 y 2009.

Fuente: IDEAM

**1.2.4 Vientos:** El movimiento de las grandes masas de aire de la circulación general, aporta la presencia de los vientos alisios que provienen del noreste, alcanzan su mayor intensidad en



las primeras horas de la tarde. Durante los meses de diciembre a marzo el viento tiene una velocidad promedio mensual de 2,95 metros por segundo (PDM, 2008). A partir de los meses de abril y mayo, con la llegada de la zona de convergencia intertropical, se compensa el sistema de baja presión y disminuyen los vientos, se presentan las lluvias, con el incremento de la nubosidad y la humedad relativa. En agosto la zona de convergencia intertropical está en su punto más septentrional y se inicia el período más importante de lluvias que tiene su máximo en octubre.

**1.2.5 Tensión de Vapor:** Se presenta un promedio anual de 28.2 Mb, con una máxima mensual de 32.3 Mb, y una mínima mensual de 21.9 Mb.

**1.2.6 Precipitación:** Según (POT, 2012), el promedio mensual de precipitaciones durante el año estuvo en 107 mm, con meses bastante áridos como enero y otros más lluviosos como septiembre y mayo. Los niveles mínimos diarios fluctuaron desde 0.0 mm hasta 426 mm. A continuación se muestra la gráfica que relaciona cada uno de los meses del año 2008 con respecto a su nivel de precipitación.

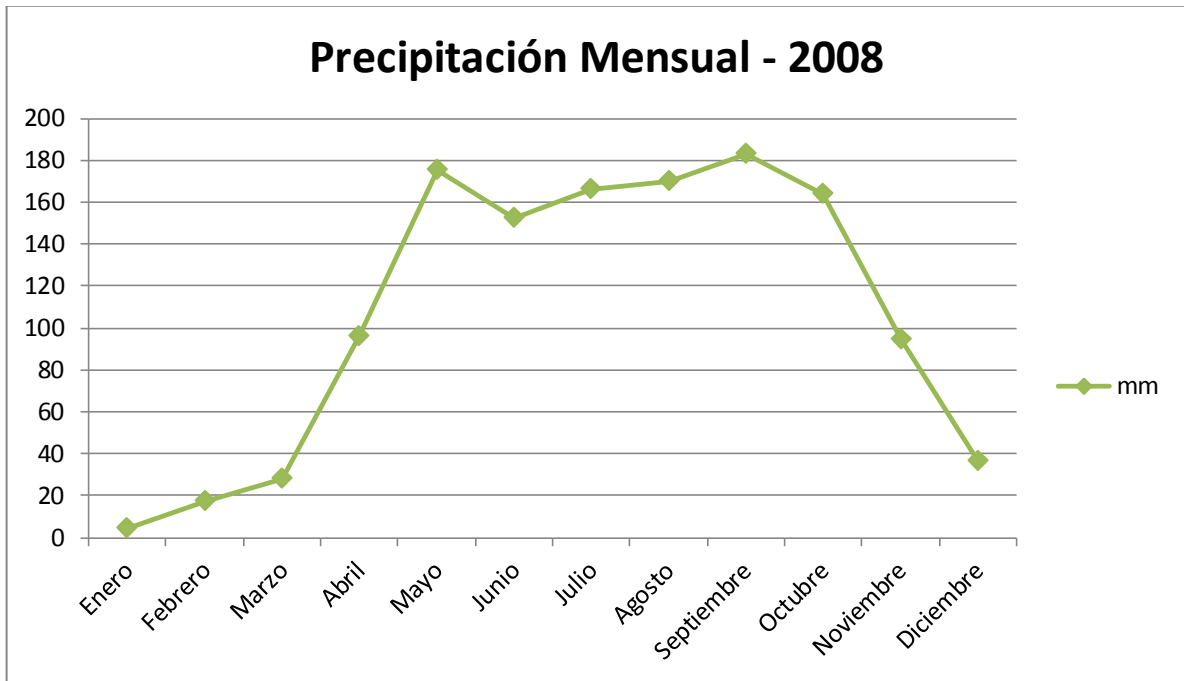


Figura 3. Precipitación mensual de Sincelejo para el año 2008.

Fuente: IDEAM

Con respecto al recurso hídrico, Sincelejo y la región Sabanas posee pocos afluentes de aguas permanentes, que en su gran mayoría son cortos y permanecen secos durante gran parte del año. En detalle, la red hidrográfica del municipio está comprendida por las microcuencas de los arroyos Grande de Corozal, Canoas, La Muerte, Mocha y San Antonio. Los arroyos de Sincelejo son básicamente, canales de escorrentía estacionales que solo conducen aguas después de los aguaceros y aguas residuales domésticas. Algunos arroyos permanentes, con bajo caudal pueden ser los arroyos del Pintao, Culumuto, La Mula, El Paso, Venecia, Caimán, que pertenecen a la microcuenca del arroyo grande de Corozal.

Sincelejo, posee un área en la que la mayor parte de su territorio es plano, tiene un piso térmico cálido como el que corresponde a las extensas sabanas de las llanuras del Caribe. Tiene, a falta de grandes ríos, algunas quebradas importantes entre las que se cuentan la *Bomba, Cacique, Culumuto, el Bajo, Moquen, Salado* y unas cuantas más. Su producción agrícola y ganadera, colocan a Sincelejo entre las zonas de mayor dinamismo y desarrollo en la región. (Aguilera Díaz, 2005)

Sincelejo, según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2012), es un municipio en donde el 33.89% del suelo rural tiene aptitudes para la agricultura intensiva, el 8.57% tiene aptitud para la ganadería intensiva, el 3.85% tiene aptitud agroforestal asociado extensivo, el 19.93% forestal, un 17.52% posee la vocación o aptitud agrosilvopastoril y un 15.59% corresponden a áreas degradadas; los porcentajes anteriores están referenciados con base al área rural la cual es 26.367.21 Ha. Sin embargo el uso que actualmente se le da a la tierra es contrario a su aptitud, es decir que el 58% de las tierras están dedicadas a la ganadería extensiva, un 24% a actividades mixtas agrícolas y ganaderas y solo el 8.93% del territorio rural está dedicado a la agricultura; el resto del área (0.65% aproximadamente), corresponde a los asentamientos humanos. Este conflicto en el uso de la tierra se ha traducido en impactos negativos sobre el recurso suelo; en menos de una década ha desaparecido una clase agrológica (clase II); así mismo, en la mayoría del área correspondiente al paisaje de montaña y parte de lomerío la vegetación ha quedado reducida a manchas relictas de bosques nativos y rastrojo, hecho que preocupa aún más toda vez que estas áreas son lugar de

nacimiento y división de las aguas que conforman la red hidrográfica municipal, y para la cual la vegetación juega un papel importante en su conservación. (POT, 2012)

El sector agrícola abarca aproximadamente un área de 4.220 hectáreas cultivadas, cerca del 14.85% del total del territorio del municipio (Pacheco, 2009), que ofrece una extensión apta para uso agrícola de 45.4% (Mendoza G. , 2004). Pese a esto, existe una baja utilización de la capacidad de producción agrícola, y esto obedece a los bajos niveles de inversión y tecnología (riego, drenaje, transferencia tecnológica e investigación) que se reflejan en los bajos rendimientos por hectáreas. Los pocos sistemas de riego existentes en los diferentes escenarios productivos del municipio de Sincelejo operan de una forma convencional, de control manual, siendo el riego por aspersion semi-fijo y fijo los más utilizados.

### **1.3 BASES TEÓRICAS**

El diseño de un buen sistema de riego implica conocer y entender el dinamismo que se da entre los recursos agua, suelo y cultivo, con el fin de lograr una optimización y equidad en el suministro del recurso hídrico, garantizando su perduración en el tiempo.

**1.3.1 Agua y Suelo:** El suelo es un depósito de agua, cuyo nivel de retención de líquido varia conforme al tipo de características físicas, químicas y biológicas que posea, además, tiene

como objetivo suplir la humedad necesaria para que el cultivo tenga un normal crecimiento, desarrollo y producción. Es por ello que es necesario comprender el desplazamiento del agua en el suelo para buscar estrategias tecnológicas que permitan una óptima disponibilidad continua de agua para la planta, previniéndola de un posible estrés hídrico.

*1.3.1.1 Propiedades Físicas de los Suelos:* Entre las principales propiedades físicas de los suelo se encuentran la textura, la estructura y la capacidad para retener agua.

**La textura.** Los suelos están constituidos en esencia por partículas de diferentes tamaños (Ver tabla 2), que de acuerdo a la clasificación granulométrica sobresalen los componentes minerales de arena, limo y arcilla, todos ellos dispuestos en el suelo con cierto nivel de porcentaje. Se clasifican en micro, meso y macroporos. Además estas partículas poseen características que influyen en la circulación de aire y agua, y en la retención de este último en el suelo.

Tipo de Suelo	Tamaño
Arena	0.05 a 2 mm
Limo	0.002 a 0.05 mm (no son visibles a simple vista)
Arcilloso	por debajo de 0.002 mm (no son visibles a simple vista)

Tabla 2. Dimensiones aproximadas de las partículas comunes del suelo

Fuente: FAO

La combinación de estos niveles de porcentaje da lugar a un esquema de agrupación, que se encuentra plasmado en el siguiente triángulo de textura (Figura 4).

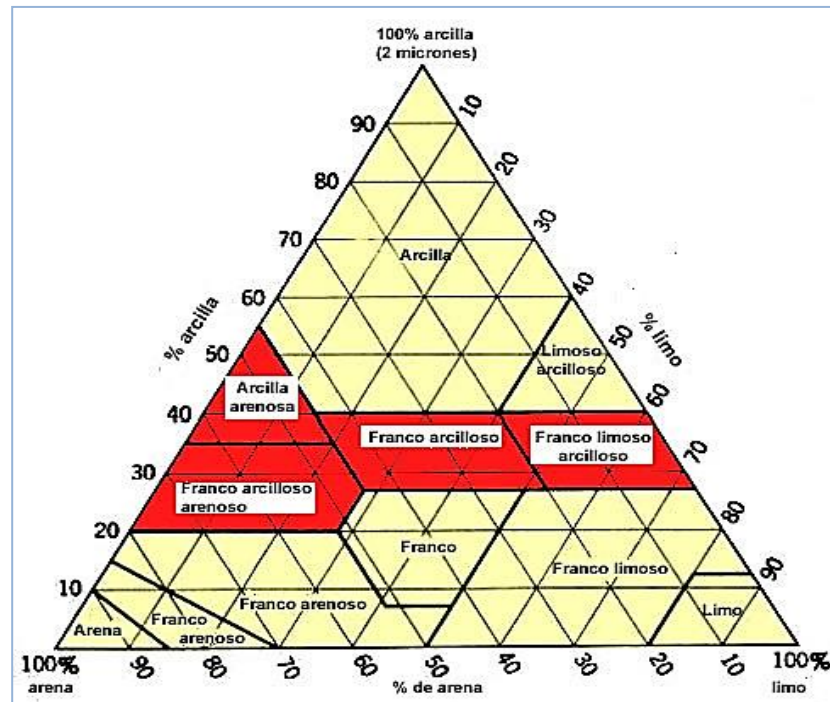


Figura 4. Triángulo de textura de suelos

Fuente: FAO

**La estructura.** Es la forma como se agrupan las partículas para dar lugar a agregados y a la red de canalículos o poros por donde circulará en aire y el agua. De acuerdo a la forma o configuración de los agregados sobresalen las estructuras:

- **Granulares o Migajosas:** son agrupaciones de pequeñas partículas, que ofrecen una alta permeabilidad. (Fuente: FAO)



Figura 5: Estructura Granular

- **Bloques o Bloques Subangulares:** La forma en la que se agrupan las partículas da origen a la configuración de bloques casi cuadrados o angulares con bordes más o menos pronunciados, resistentes a la penetración y al movimiento del agua.



Figura 6: Estructura Subangular

- **Primásticas o Columnares:** son el resultado de la unión de las partículas formando columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, las cuales ofrecen mayor resistencia al paso del agua.



Figura 7: Estructura Columnar

➤ **Laminar:** Son agregados de forma laminar o capas finas horizontales que se encuentran en la mayoría de los casos solapadas, y a menudo se traslapan lo que dificulta notablemente el paso de agua. (FAO, Estructuras del Suelo, 2010)



Figura 8: Estructura Laminar

*1.3.1.2 Coeficientes Hídricos del Suelo:* No toda el agua que puede almacenar el suelo está disponible para la planta, ni la que se encuentra disponible se absorbe con igual facilidad es por ello que se consideran los siguientes conceptos:



- **Capacidad de Campo:** Es el volumen de agua que un suelo puede retener después de saturarlo (encharcarlo) y dejarlo drenar (escurrir) libremente durante 48 horas (WWF, 2005) por la acción de la gravedad.
  
- **Punto de Marchitez Permanente:** Es el contenido de agua de un suelo a partir del cual las plantas no pueden extraer más y, por tanto, se marchitan y mueren (WWF, 2005). La tensión a la que ocurre este suceso es cuando la planta alcanzan 15 atmosferas.
  
- **Agua útil para las plantas:** Es el volumen de agua resultante de la diferencia de la capacidad de campo con el punto de marchitez permanente.
  
- **Aguas aprovechada fácilmente por las plantas:** Es la cantidad de agua que puede absorber la planta sin mucho esfuerzo (0.5 a 1 atm) y representa un 75% aproximadamente del total de agua disponible para la planta (Israelsen, 2003).

**1.3.2 Agua y Cultivos:** La necesidad de obtener los requerimientos de agua para los cultivos, a fin de que se dé una optimización en el suministro, ha llevado a que la FAO y otros centros de investigación se centren en el estudio de esta situación, dando sus primeros pasos en la definición de métodos y conceptos que ayudan a estimar la cantidad de agua perdida por el cultivo (evapotranspiración), consiguiendo con este indicador hacer un balance en la cantidad exacta de agua que se debe proporcionar al cultivo mediante riego.

1.3.2.1 Evapotranspiración (ET): Es un macro concepto que engloba dos procesos por los cuales el agua se pierde tanto de superficie del suelo por evaporación, como por la transpiración de la vegetación, los cuales se pueden apreciar en la figura 9.

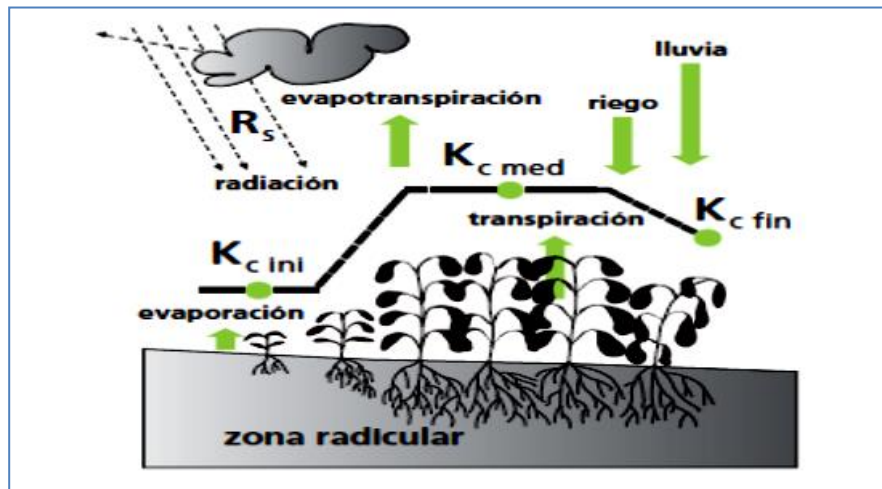


Figura 9. Representación gráfica de la evapotranspiración. (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

La **evaporación** es un proceso físico que consiste en el cambio de estado del agua líquida a vapor de agua y su posterior retiro de la superficie evaporante (suelo, lagos, ríos, etc.), todo esto por efecto de la energía suministrada por la radiación solar directa y, en menor, grado por la temperatura ambiente del aire.

La **transpiración** con la evaporación comparten ciertos aspectos del cambio de estado líquido-gaseoso, pero con la salvedad de que la transpiración es un proceso más físico-

biológico en el cual el cambio de estado del agua se da por acción de los metabolismos de la planta.

Hacer una distinción entre estos dos procesos no es muy sencillo, debido a que ambos ocurren simultáneamente, pero se puede determinar en qué grado o probabilidad afecta cada uno con respecto al área foliar del cultivo. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre por la transpiración (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Para determinar la pérdida de agua del cultivo, no se hace referencia a los dos procesos por separados si no a la combinación de estos formando el concepto evapotranspiración del cual se dependen varios métodos directos e indirectos para su cálculo dentro de los cuales tenemos:

Métodos Directos:

- Métodos de balance de energía y microclimáticos.
- Balance de agua en el suelo.
- Lisímetros.

#### Métodos Indirectos:

- Blaney - Criddle
- Radiación.
- FAO Penman-Monteith
- Tanque de Evaporación

Como resultado de una consulta de expertos realizado en mayo de 1990, la FAO ha recomendado como único método estándar para el cálculo de la ET al método combinado Penman-Monteith, por sus resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos, haciendo de su flexibilidad un fácil acoplamiento a un espectro amplio de geografías.

El método de la FAO Penman-Monteith (FAO-26) utiliza datos climáticos estándar los cuales pueden ser fácilmente medidos o derivados de datos comúnmente medidos. Todos los procedimientos de cálculo han sido estandarizados en función de los datos meteorológicos disponibles y la escala de tiempo de los cálculos. Los métodos de cálculo, así como los procedimientos requeridos para la estimación de datos climáticos, se presentan en la presente investigación. El modelo matemático que describe la relación de las variables climáticas con los parámetros geográficos del sitio de estudio, se describe como:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Donde,  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo del calor en el suelo,  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  es el calor específico del aire,  $\Delta$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  es la constante psicométrica, y  $r_s$  y  $r_a$  son las resistencias superficial (total) y aerodinámica. (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

El método combinado Penman-Monteith apreciado en la ecuación (1) en su estructura hace uso de los principales factores climáticos que afectan directamente la evapotranspiración como son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. De los cuales desglosa cuidadosamente los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor, y la forma en que estos intervienen en los procesos de transpiración y evaporación. (En la sección 7.3.1 se muestra la forma en que se ajusta el modelo de Penman Monteith para la región Sabanas en el departamento de Sucre).

Generalmente las unidades en la que se expresa la ET vienen dadas en milímetros (mm) por unidad del tiempo, donde la unidad de tiempo puede ser expresada en hora, día, 10 días, mes, año, etc., y representan el índice de aridez del suelo o en su efecto la pérdida de agua debida a la iteración atmosférica de una superficie cultivada.

El resultado de aplicar el método Penman-Monteith arroja la evapotranspiración de referencia, en base a un cultivo hipotético de pasto con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23 (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Con lo cual se permite obviar el cálculo individual de los parámetros de evapotranspiración para cada cultivo existente. Es así, que para obtener realmente la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) que se haya elegido, se hace necesario tomar la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y multiplicarla por el coeficiente único del cultivo ( $K_c$ ) seleccionado.

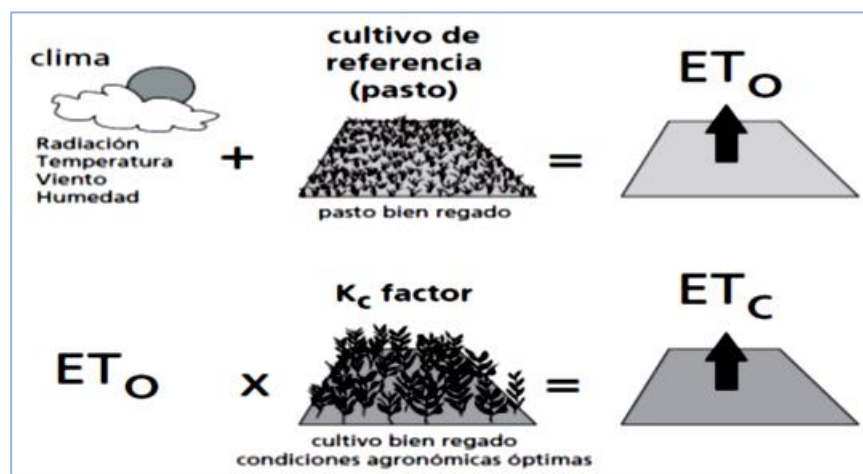


Figura 10. Representación gráfica de la evapotranspiración. (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

**1.3.3 Sistemas de Control:** Un *sistema de control* es una interconexión de componentes que formando una configuración de sistema proveerá una respuesta deseada (Dorf & Bishop, 2011). Están muy extendidos tanto en la naturaleza, y son utilizados por los organismos vivos con el fin de mantener variables esenciales tales como la temperatura corporal y los niveles de azúcar en la sangre en puntos con el ajuste deseado (Sontag, 1998); como en los

modernos procesos industriales y de manufactura donde es imprescindible controlar temperatura, presión de fluidos, velocidad de un motor, niveles de líquidos, etc. En la mayoría de los casos, los circuitos electrónicos proveen la inteligencia, y los componentes electromecánicos tales como sensores y motores proveen la interfaz al mundo físico (Kilian, 2005). Los componentes o procesos de un sistema procesan entradas y las convierten en salidas, usualmente son representados por bloques como el mostrado en la figura 11. Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales.

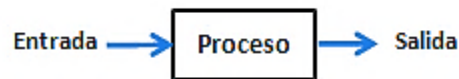


Figura 11. Representación de un proceso

Los sistemas de control pueden ser ampliamente divididos en dos categorías: sistemas de control en lazo abierto y sistemas de control en lazo cerrado; un *sistema de control en lazo abierto* utiliza un controlador y un actuador para obtener la respuesta deseada, como el mostrado en la figura 12. Un sistema de control de lazo abierto es un sistema sin retroalimentación. En la práctica, el control en lazo abierto solo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas o externas (Ogata, 2005). No es difícil ver que estos sistemas no pueden satisfacer requerimientos de desempeño críticos (Kuo, 1996), sin embargo son adecuados en aplicaciones en las que las acciones del actuador sobre el proceso son muy repetibles y fiables (Sedigh, 2009).

En contraste a un sistema de control de lazo abierto, un *sistema de control en lazo cerrado* (sistema de control retroalimentado) utiliza una medida adicional de la salida actual del sistema para compararla con la salida deseada, de manera que la diferencia es continuamente reducida (figura 13). En general, la diferencia entre la salida deseada y la salida actual es igual al error, el cual es luego ajustado por el controlador. La salida del controlador ocasiona que el actuador regule el proceso con el propósito de reducir el error. Un error de magnitud cero, significa que la salida es exactamente lo que el punto de referencia dice que debería ser (Kilian, 2005).

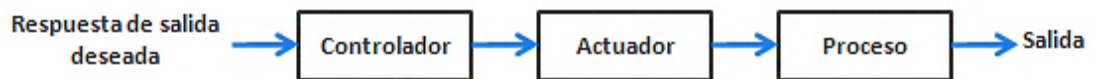


Figura 12. Control en lazo abierto

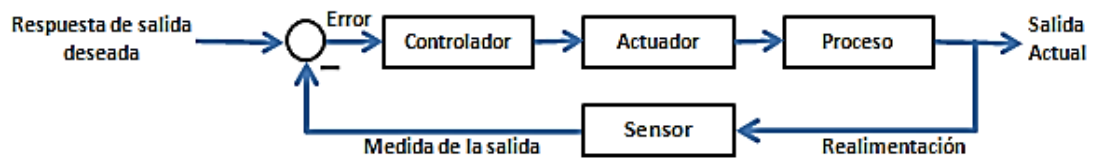


Figura 13. Esquema típico para Control en lazo cerrado

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema (Ogata, 2005). Las perturbaciones



externas y la medición del ruido son inevitables en aplicaciones en el mundo real y deben ser abordadas en diseños prácticos de sistemas de control (Dorf & Bishop, 2011).

1.3.3.1 *Estabilidad*: Normalmente el objetivo fundamental de un sistema de control, ya sea inteligente, automatizado, de lazo abierto o cerrado, es mantener la estabilidad del mismo, es decir, mantener un comportamiento relativamente fijo o poco cambiante. De manera que, un sistema estable es aquel en el que la variable controlada siempre se asentará en o cerca del punto de referencia. Mientras que, un sistema inestable, bajo ciertas condiciones, la variable controlada se aleja del punto de referencia o rompe en oscilaciones que se hacen más grandes hasta que el sistema se satura (Kilian, 2005).

Entre las diversas especificaciones de desempeño descritas en el diseño de un sistema de control, el requerimiento más importante es que el sistema sea estable. Por lo general, un sistema inestable se considera inútil (Kuo, 1996). Un sistema inestable no está claramente bajo control y puede de hecho, ser peligroso si se trata de grandes máquinas (Kilian, 2005). La Figura 17 muestra la respuesta de los sistemas estables e inestables.

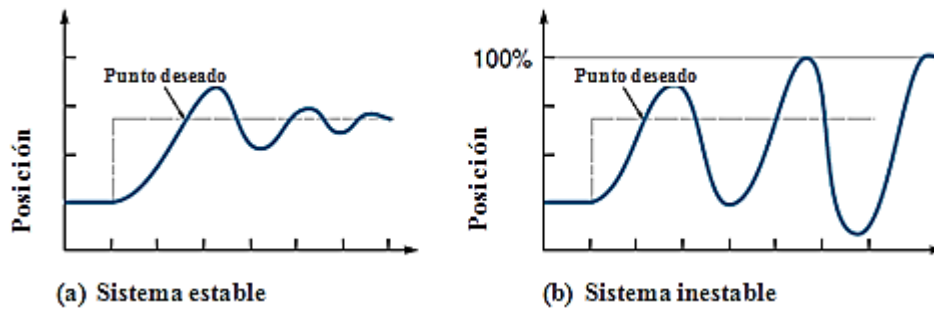


Figura 14. Comparación un sistema estable con un sistema inestable (Killian, 2005)

El controlador provee la *inteligencia* al sistema tomando las decisiones de control para garantizar la estabilidad minimizando el error, para esto utiliza una *estrategia de control*, la cual puede ser simple o compleja. Una estrategia de control simple permitiría al controlador minimizar el error, apagando o encendiendo el actuador. Este tipo de estrategia de control se llama ON/OFF y es la forma más simple de control de retroalimentación. Un controlador ON/OFF simplemente conduce la variable manipulada de completamente cerrada a completamente abierta dependiendo de la posición relativa de la variable controlada al punto de ajuste deseado. Un ejemplo común de control ON/OFF es el control de la temperatura en un sistema de calefacción doméstica; cuando la temperatura está por debajo del punto de consigna del termostato del sistema de calefacción se enciende y cuando la temperatura está por encima del punto de referencia de la calefacción, se desconecta. Sin embargo, existen estrategias de control más avanzadas y complejas y más eficientes como: Control PID, Lógica Difusa, Redes Neuronales, Control Adaptativo, Algoritmos Genéticos, entre otras.

1.3.3.2 Control PID: Una forma de controlador ampliamente utilizado en procesos industriales es el *Controlador PID* (Proporcional, Integral, Derivativo), el cual aplica una señal al proceso que es una combinación proporcional, integral y derivada de la señal de actuación (Kuo, 1996).

Muchos procesos industriales son controlados por controladores PID. Su popularidad puede ser atribuida parcialmente a su buen rendimiento en una amplia gama de condiciones de operación y a su simplicidad funcional que permite a ingenieros operarlos de manera simple y directa.

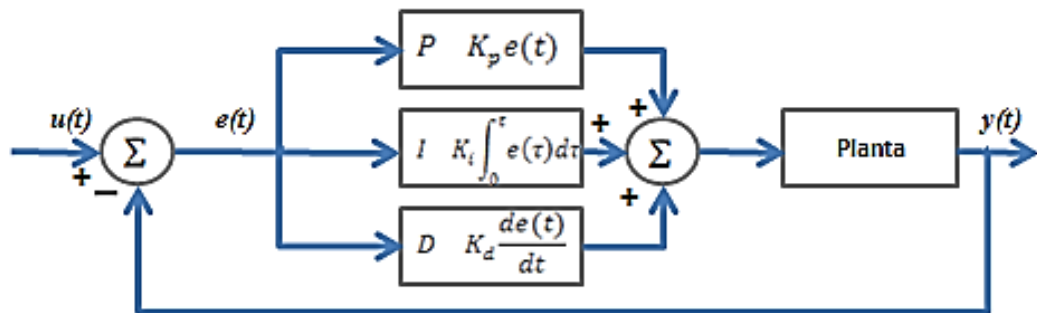


Figura 15. Diagrama de bloques de un control PID

En el *control proporcional (P)*, el actuador aplica una fuerza correctiva que es proporcional a la cantidad de error. En la forma general de control proporcional se toma la entrada al controlador para ser el seguimiento de error  $e(t)$  y la variable de control de salida para ser  $u(t)$ , como es expresada en (7)

$$u(t) = k_p e(t) \quad (7)$$

$u(t)$  : Salida del controlador debido al control proporcional

$k_p$  : Constante proporcional para el sistema, llamada ganancia

$e(t)$  : Señal de Error (diferencia entre la variable deseada y la variable real)

El típico controlador proporcional funciona simplemente como una perilla de control de volumen para ajustar su ganancia arriba o hacia abajo. Por lo general tiene un desplazamiento de estado estacionario (o caída) en respuesta a una entrada de referencia constante o a una de perturbación constante que disminuye a medida que la ganancia se incrementa (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 2010).

El control proporcional es simple, tiene sentido, y es la base de la mayoría de los sistemas de control, pero tiene un problema fundamental el *error de estado estacionario* ( $E_{SS}$ ). El error de estado estacionario del sistema es simplemente el error de posición final, que es la diferencia entre el lugar donde la variable controlada está y donde debería estar. En sistemas prácticos, el control proporcional no puede conducir la variable controlada a error cero, porque cuanto más se acerca la carga a la posición deseada, la fuerza de corrección se reduce a cerca de cero, la cual no alcanza a ser suficiente para superar la fricción, y la carga se detiene justo antes del punto de referencia. Un controlador sofisticado puede reducir el error de estado estacionario prácticamente a cero (Kilian, 2005). En la Figura 19,  $E_{SS}$  se muestra como el error de posición después de las oscilaciones han desaparecido.

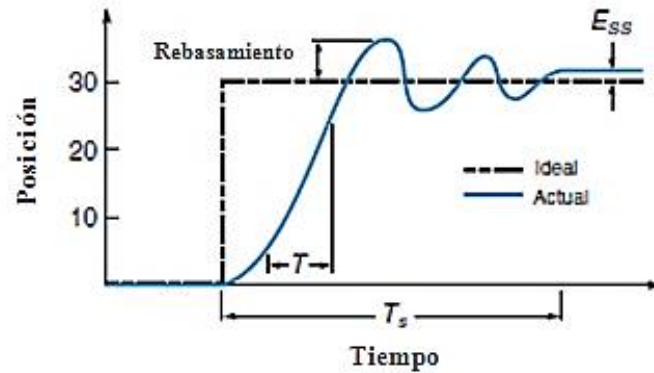


Figura 16. Comportamiento de  $E_{ss}$

La forma habitual de mejorar la precisión en estado estacionario de control sin la adición de ganancias proporcionales extremadamente altas, es combinar control proporcional y *control integral*. La introducción del control integral en un sistema de control puede reducir el error de estado estacionario a cero. El control integral crea una fuerza restauradora que es proporcional a la suma de los errores pasados a lo largo del tiempo, como es expresado en la ecuación 8:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (8)$$

Esta retroalimentación tiene la virtud primaria que en el estado estacionario su salida de control puede ser un valor constante distinto de cero, incluso cuando la señal de error en su entrada es cero (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 2010).

El problema es que el sistema proporcional-integral no tiene forma (aparte de la fricción) para frenar el objeto antes de que llegue al nuevo punto de referencia. El sistema debe excederse antes de que cualquier frenado activo sea aplicado. Así que, por desgracia, la adición de retroalimentación integral resuelve el problema del error de estado estacionario, pero crea otros: *sobrepaso* y *disminución* de la estabilidad. El controlador PI puede mejorar la estabilidad relativa y el error en estado estacionario al mismo tiempo, pero el tiempo de levantamiento se incrementa (Kuo, 1996).

Una solución al problema de rebasamiento es incluir el *control derivativo*. El control derivativo "aplica los frenos," desacelerando la variable controlada justo antes de que alcance su destino. Combinados, estos tres términos forman el controlador PID clásico que se utiliza ampliamente en la industria de procesos y robótica (Franklin *et al.*, 2002).

La ecuación para la salida en el dominio del tiempo es

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{d(t)} \quad (9)$$

Este controlador tiene una función de transferencia

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (10)$$

Sin embargo puede ser reducida a

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (11)$$

Donde  $K_p$ , es la constante proporcional,  $\tau_i$  y  $\tau_d$ , son el tiempo integral y derivativo, respectivamente. La Figura 20 ilustra el sistema de control con la Ecuación 11.

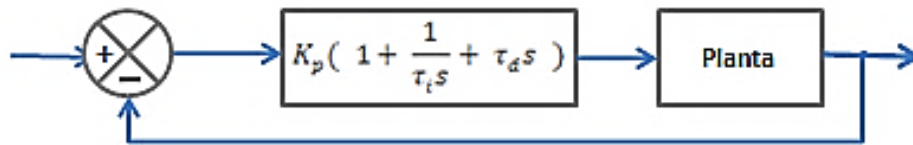


Figura 17. Diagrama de bloques de control PID de una planta

El control derivativo mejora el rendimiento del sistema de dos maneras. En primer lugar, proporciona un impulso adicional de la fuerza en el inicio de un cambio para promover una acción más rápida, en segundo lugar, prevé el freno cuando el objeto se acerca al nuevo punto de referencia. Esta acción de frenado no sólo ayuda a reducir el exceso sino que también tiende a reducir el error de estado estacionario. La simplicidad de estos controladores es también su debilidad, puesto que limita la gama de plantas o procesos que pueden controlar satisfactoriamente (Goodwin, Graebe, & Salgado, 2000). En efecto, existe un conjunto de plantas inestables que incluso no pueden ser estabilizadas con cualquier miembro de la familia PID.

Para implementar el controlador PID, los tres parámetros de la ecuación 11 deben ser determinados, la ganancia proporcional, denotada por  $K_p$ , ganancia integral, denotada por  $K_I$ , y ganancia derivativa denotada por  $K_D$ . El proceso de ajustar estos valores recibe el nombre de *sintonización*. Una de las formas tradicionales es mediante reglas empíricas de prueba y error, con un mínimo análisis usando respuestas a escalón producto de simulaciones, o incluso sobre pruebas reales del funcionamiento del sistema para decidir los parámetros basado en observaciones y la experiencia (Dorf & Bishop, 2011). Esto es llamado sintonización manual o empírica. Hoy en día se sugiere y es preferible que se empleen técnicas más avanzadas como la *Sintonización Ziegler – Nichols* para lograr resultados óptimos.

*1.3.3.3 Sintonización Ziegler – Nichols:* Desarrollado por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols en 1942, como un método heurístico para sintonización de controladores PID. Inicialmente las ganancias derivativa e integral,  $K_D$  y  $K_I$ , respectivamente, son puestas a cero. La ganancia proporcional  $K_p$  es incrementada desde cero a un valor crítico ( $K_{cr}$ ) (mediante simulación sobre el sistema real) hasta que el lazo cerrado alcance el límite de estabilidad (Dorf & Bishop, 2011). La ganancia sobre el límite de la estabilidad, denotada por  $K_{cr}$ , es llamado ganancia crítica o definitiva. El periodo de oscilaciones sostenidas, denotadas por  $P_{cr}$ , es llamado el periodo crítico, en el que se pretende obtener un alrededor de 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón (Ogata, 2005). Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , no se aplica este método.



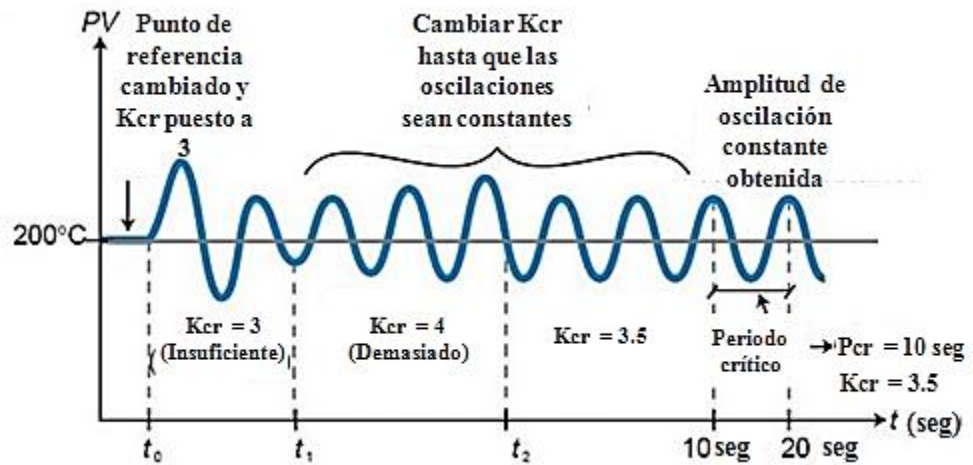


Figura 18. Ejemplo de sintonización para obtener la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo crítico  $P_{cr}$

Una vez  $K_{cr}$  y  $P_{cr}$  son determinados, las ganancias  $K_I$  y  $K_D$  son calculadas usando las relaciones de la Tabla 3.

Tipo de controlador	$K_p$	$K_I$	$K_D$
P	$0.5K_{cr}$	-	-
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{0.54K_{cr}}{T_{cr}}$	-
PID	$0.6K_{cr}$	$\frac{1.2K_{cr}}{T_{cr}}$	$\frac{0.6K_{cr}T_{cr}}{8}$

Tabla 3. Regla de sintonización de Ziegler – Nichols basada en la gan. crítica  $K_{cr}$  y en el periodo crítico  $P_{cr}$

Finalmente, el operador del proceso a menudo deberá hacer la sintonización final del controlador iterativamente sobre el proceso real para producir el control satisfactorio (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 2010).

Este método está diseñado para proporcionar el mejor rendimiento en rechazo de la perturbación en lugar del mejorar rendimiento en respuesta de entrada (Dorf & Bishop, 2011), además se ha utilizado ampliamente para sintonizar controladores PID en los sistemas de control de procesos en los que no se conoce con precisión la dinámica de la planta (Ogata, 2005), debido a que proveen una respuesta aceptable en lazo cerrado (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 2010).

1.3.3.4 *Lógica Difusa*: La lógica difusa se dio a conocer a la comunidad científica con el artículo *fuzzy sets* publicado en 1965 en la revista *Information and Control* por Lotfi A. Zadeh (Zadeh, 1965). Constituye un marco conceptual que provee no sólo de una poderosa y significativa representación de la medida de la incertidumbre, sino también con una representación adecuada de conceptos vagos, siendo mucho más cercana en espíritu al pensamiento humano y el lenguaje natural de los sistemas lógicos tradicionales. Básicamente, proporciona un medio eficaz para capturar la naturaleza aproximada e inexacta del mundo real (Lee, 1990), permitiendo tratar con información que no es exacta, es decir, con un alto grado de imprecisión. Por ejemplo, en lugar de describir el clima de hoy en términos del porcentaje exacto de la cobertura de nubes, se puede simplemente decir que está

soleado. Si bien la última descripción es vaga y menos específica, a menudo es más útil (Klir & Yuan, 1995). En el artículo *fuzzy sets*, Zadeh sienta la base de la lógica difusa introduciendo el concepto de *conjunto difuso*:

*“Un conjunto difuso es una clase de objetos con un continuo grado de pertenencia. Tal conjunto es caracterizado por una función de pertenencia (característica) que asigna a cada objeto un grado de pertenencia de cero a uno”.*

Los conjuntos difusos son la base de la lógica difusa, dando cabida a diversos *grados de pertenencia* en el intervalo real continuo  $[0, 1]$ , donde no solo se consideran estos dos extremos, sino los infinitos valores entre ellos que pueden representar diversos grados o niveles de pertenencia de un elemento en un conjunto.

Para ampliar la conceptualización de la lógica difusa, su comparación con la lógica tradicional, sus aplicaciones y consideraciones teóricas, se recomiendan los autores (Ross, 2010), (Zadeh, 1965), (Schweizer & Sklar, 1963), (Zadeh, *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - I*, 1975), (Nanda & Das, 2012), (Garrido, 1999), (Baturone, 2000), entre otros.

1.3.3.5 Controlador Difuso: El conocimiento de un operador humano experimentado puede ser usado como una alternativa a un modelo preciso del proceso controlado. Si bien este conocimiento es también difícil de expresar en términos precisos, una descripción imprecisa lingüística de la forma de control por lo general puede ser articulado por el operador con relativa facilidad. Esta descripción lingüística consiste en un conjunto de reglas de control que hacen uso de proposiciones difusas. Esto es crucial en los problemas de control de los que es difícil o incluso imposible para la construcción de modelos matemáticos precisos (Klir & Yuan, 1995). Una forma típica de estas reglas se ejemplifica por la regla,

SI la temperatura es MUY ALTA Y  
La presión es LIGERAMENTE BAJA  
ENTONCES el cambio de calor debería ser LIGERAMENTE NEGATIVO,

Donde la temperatura y la presión son variables de estado del proceso observado, y el cambio de calor es la acción en ser ejecutada por el controlador. Los términos vagos, muy alto, un poco bajo, y ligeramente negativo pueden ser convenientemente representados por conjuntos difusos definidos en los universos de discurso de los valores de temperatura, valores de presión y los valores de cambio de calor, respectivamente.

La primera implementación de un controlador basado en lógica difusa (FLC, Fuzzy Logic Controller) fue reportada por Mandani y Assilian en 1974 en “A Case Study on the

*Application of Fuzzy Set Theory to Automatic Control*” (Control, 1974) para la regulación de un motor de vapor, desde entonces los FLC han sido aplicados en muchos campos desde productos de consumo, sistemas de control de procesos industriales hasta inteligencia artificial (Rahangadale & Choudhary, 2011).

La arquitectura interna de un FLC se muestra en la Figura 30 diseñada por Passino y Yurkovich (1998), donde se muestra un controlador difuso embebido en un sistema de control en lazo cerrado. Las salidas de plantas se denota por  $y(t)$ , sus entradas se denotan por  $u(t)$ , y la entrada de referencia para el controlador difuso se denota por  $r(t)$ .

El controlador difuso tiene cuatro componentes principales: (1) La base de conocimiento que contiene el conocimiento, en forma de un conjunto de reglas, acerca de cómo controlar el sistema de la mejor manera. (2) El mecanismo de inferencia que evalúa cuales de las reglas de control son relevantes en el tiempo actual y decide cual debe ser la entrada a la planta. (3) La interfaz de fuzzificación simplemente modifica las entradas de modo que puedan ser interpretados y comparadas con las reglas en la base de reglas. Y (4) La interfaz de defuzzificación convierte las conclusiones alcanzadas por el mecanismo de inferencia en las entradas a la planta.

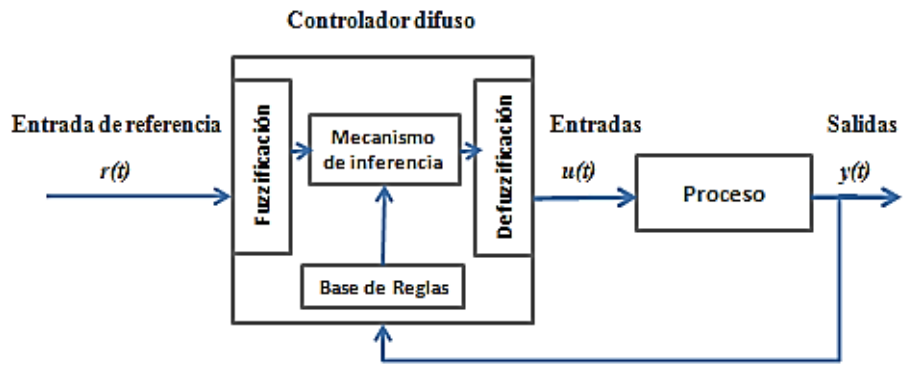


Figura 19. Arquitectura controlador difuso

En la forma más simple, un sistema de control difuso conecta las funciones de membresía de entrada, las funciones que representan la entrada al controlador, a las funciones de pertenencia de salida que representan la acción de control (Ross, 2010).

## 2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

En la presente investigación se hace referencia de manera particular a la simulación de un modelo de irrigación basado en controladores PID y Difuso. Aunque en principio se planteó la posibilidad de incluir en la investigación controladores neuronales (ANN), el proyecto tuvo que enfatizar el trabajo requerido en el modelamiento del sistema llamado *microclima* de la planta, debido a que para modelar el mismo, no solo se requería conocer el comportamiento de la evapotranspiración, sino además, la interacción de la humedad y el tipo de suelo, su permeabilidad y el periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale & Choudhary, 2011), entre otros. Para una sesión de riego algunos de estos parámetros son fijos (por ejemplo, el tipo de planta, tipo de suelo, la etapa de crecimiento); sin embargo, no todos lo son, y este estudio considera un ciclo completo de crecimiento y desarrollo de la planta; dedicando con esto un gran esfuerzo en la modelación de las distintas variables que influyen en el requerimiento hídrico de las plantas, de modo que se obtuviese un modelo general lo suficientemente robusto, no solo para que incluyese la mayor parte de parámetros, variables y constantes que influyen de manera directa en el consumo de agua del vegetal, sino que pudiese demostrarse de que el sistema es controlable desde el punto de vista de la ingeniería de control, de manera que pudiese utilizarse cualquier tipo de controlador, llámese Difuso, Tradicional o Neuronal, de modo que los resultados obtenidos fuesen acordes a los resultados esperados. Por esta razón, y por aplicabilidad económica, se escogió trabajar con los controladores tradicionales PID y Difuso.

## **2.1 GENERALIDADES DEL CULTIVO SELECCIONADO: SANDÍA**

La Sandía es una Cucurbitácea, herbácea rastrera o trepadora, que produce grandes frutos jugosos que están protegidos por una corteza dura (BayerCropScience, 2012). Es originaria de la zona tropical de África, los pobladores europeos fueron quienes la trajeron a América donde se extendió por todo el continente (InfoAgro, 2003) y cuenta con más de 50 variedades. La conformación anatómica y las características fisiológicas propias de la especie, proporcionan los mecanismos necesarios y suficientes para caracterizarla como una planta altamente eficiente, lo que favorece su capacidad de adaptación. Sin embargo, para manifestar su máximo potencial productivo, requiere de un estudio preciso de las condiciones ambientales, meteorológicas y edafológicas. (Moore & Maretzki, 1996)

Hoy en día, la sandía es una de las frutas más extendidas por el mundo, siendo los principales países productores: Turquía, Grecia, Italia, España, China y Japón. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la sandía está incluida en la lista de los diez cultivos de mayor impacto económico y social por su área sembrada (AsohoFrucol, 2011). Más aún, según (Corpoica, 2012) la Sandía o Patilla, ocupa el octavo lugar en cuanto a mayor número de hectáreas cultivadas (5.816 ha), lo que demuestra la importancia del cultivo de este frutal en el renglón agrícola del país.



### **2.1.1 Características Fisiológicas del Cultivo Seleccionado para el Proyecto.**

**Sistema Radicular:** El sistema es muy ramificado. La raíz principal es profunda y las raíces secundarias distribuidas superficialmente. Dichas raíces se desarrollan de acuerdo al suelo y otros factores, posee una raíz pivotante que puede profundizar hasta 0.8 metros. Las raíces laterales pueden alcanzar hasta 2 metros de longitud llegando a formar un diámetro radicular de aproximadamente 4 metros. La mayor distribución de las raíces se encuentra entre los 20 y 40 centímetros de profundidad (PDH, 2012).

**Tallo:** El tallo es herbáceo de color verde, pilosos y rastrero gracias a la presencia de zarcillos, (BayerCropScience, 2012). El tallo inicialmente es erecto y posee alrededor de 5 hojas verdaderas, rastrero (Bolaños, 2009) alcanzando una longitud de hasta 5 metros de largo, posee 5 aristas y está cubierto de vellos blanquecinos. Del tallo principal se forman ramas primarias y sobre éstas las secundarias (InfoAgro, 2003)

**Hojas:** Las hojas son pecioladas, pinnado-partida, dividida en 3-5 lóbulos que a su vez se dividen en segmentos redondeados pudiendo ser ligera o profundamente lobuladas, dentadas, pilosas, de color verde pardo, cubierta de una capa de células incoloras que les dan resistencia a la sequía y las protege de las quemaduras del sol (PDH, 2012).

El haz es suave al tacto y el envés muy áspero y con nerviaciones muy pronunciadas. El nervio principal se ramifica en nervios secundarios que se subdividen para dirigirse a los últimos segmentos de la hoja (InfoAgro, 2003).

**Flores:** Las flores son de color amarillo, solitarias, pedunculadas y axilares, por su color, aroma y néctar atrae a los insectos que colaboran con la polinización que es de tipo cruzada. La corola, de simetría regular o actinomorfa, está formada por 5 pétalos unidos en su base. El cáliz está constituido por sépalos libres de color verde (Corpoica, 2012).

Existen dos tipos de flores en una misma planta: masculinas y femeninas; la mayoría de las flores aparecen en las ramificaciones secundarias, apareciendo primero las masculinas. Las flores hermafroditas y femeninas por lo general aparecen en la parte terminal de las ramificaciones y en las axilas de la novena hoja hasta la 17- 20 hojas separadas cada 2 - 3 hojas (PDH, 2012).

Las flores femeninas poseen estambres rudimentarios y un ovario ínfero vellosa y ovoide que se asemeja en su primer estadio a una sandía del tamaño de un hueso de aceituna (fruto incipiente), por lo que resulta fácil diferenciar entre flores masculinas y femeninas (InfoAgro, 2003).

**Fruto:** La sandía es muy variable en sus características de forma, tamaño y manchas de la cáscara: desde esféricas a oblongas, desde 1 hasta 20 Kg, de peso y con cáscara de color verde oscuro o listada con franjas verdes claro. La pulpa suele ser roja, muy dulce, crujiente y con gran cantidad de agua. Se consume de forma fresca, en rebanadas, en jugos y batidos (BayerCropScience, 2012).

**Semilla:** Casi siempre de forma elipsoidal, siendo más delgadas de la parte del hilo, con superficie lisa, áspera y color variado (café oscuro o claro), negro, blanco. La madurez de las semillas se logra a los 15 días después de la maduración de la pulpa; si se colectan antes o después disminuye el porcentaje de germinación (PDH, 2012).

**2.1.2 Etapas fenológicas y climatológicas del cultivo de la sandía:** El éxito de un buen manejo del cultivo de sandía es la programación de las actividades agrícolas (siembra, riego, deshierbe, control de plagas, podas, etc.) de acuerdo a las etapas fenológicas del cultivo (Tabla 6), ya que es una buena herramienta en el momento de tomar decisiones de aplicar o no un insumo o realizar una actividad de fertilización (PDH, 2012).

<b>ETAPA DE DESARROLLO</b>		<b>Kc</b>
<b>(Días de Siembra)</b>		
Establecimiento	(10 a 20)	0,5
Período Vegetativo	(21 a 40)	0,8
Período de floración	(45 a 60)	1,5
Formación de Cosecha	(61 a 75)	0,9
Maduración	(76 a 110)	0,7

Tabla 4. Etapas fenológicas de la Sandía - días desde la siembra

Fuente: ANIAF – FAO, Allen (2006)

**Condiciones agroclimáticas:** El manejo de los factores climáticos en conjunto es fundamental para lograr un desarrollo óptimo del cultivo de sandía, ya que estos factores inciden unos en otros (PDH, 2012).

**Requerimientos climáticos:** El cultivo de la sandía es muy sensible a las bajas temperaturas, por lo que requiere de climas calientes con temperaturas óptimas que fluctúen entre 18 y 28° C. Los cultivares triploides son los más exigentes en este factor, presentando además mayores problemas de germinabilidad (INIFAP, 2003).

Cuando las diferencias de temperatura entre el día y la noche son de 20 – 30 °C, se originan desequilibrios en la plantación, en algunos casos se abren los tallos y la producción del polen no es viable (Corpoica, 2012).

**Requerimientos de Humedad:** La humedad relativa óptima para la sandía se sitúa entre 60% y el 80%, con un fotoperíodo de 10 horas luz al día, siendo un factor determinante durante la floración (INIFAP, 2003).

**Exigencias en suelo:** La sandía no es muy exigente en suelos, produce buenas cosechas en suelo livianos que faciliten el desarrollo del sistema radicular (Bolaños, 2009). Los suelos de textura franca con alto contenido de materia orgánica son los más apropiados, es necesario que los suelos posean buen drenaje. Los suelos franco arenosos a francos son los mejores para el desarrollo de las plantas, no obstante se pueden utilizar suelos franco arcillosos a arcillosos, éstos últimos se les debe agregar materia orgánica (PDH, 2012).

La temperatura ideal del suelo para la germinación es de 25 - 35 °C. La sandía tiene un óptimo desarrollo en un suelo con pH desde 5.0 a 6.8, tolera suelos ácidos y al mismo tiempo se adapta a suelos débilmente alcalinos (Corpoica, 2012).

Por lo general, para el cultivo de patilla o sandía se emplean los siguientes sistemas de siembra (InfoAgro, 2003):

- Distancia entre surco: 2 a 2.5 metros
- Distancia entre planta : 0.6 a 0.9 metros

**Valor nutricional:** La sandía es un magnífico diurético, su elevado poder alcalinizante favorece la eliminación de ácidos perjudiciales para el organismo. Está formada principalmente por agua (93%), por tanto su valor nutritivo es poco importante (Guerra Jácome, 2009). Los niveles de vitaminas son medios, no destacando en particular ninguna de ellas. El color rosado de su carne se debe a la presencia de carotenoide licopeno, elemento que representa un 30% del total de carotenoides del cuerpo humano.

**2.1.3 Sistemas de Riego Convencional para Cultivos de Sandía:** La sandía es una planta bastante resistente a la sequía, no obstante los mejores rendimientos, con frutos de buena calidad, se obtienen en regadío. El objetivo del riego es suministrar la humedad necesaria para el crecimiento y el desarrollo de las plantas, incluyendo, en su caso, el agua necesaria para lavar el exceso de sales existentes en el suelo. (Maroto, Borrego, & Pomares, 2002)

La sandía presenta un período crítico con respecto al potencial hídrico del suelo, que va desde la floración hasta la recolección (Doorenbos & Pruitt, 1975); durante éste período es importante mantener una adecuada humedad en el suelo, siendo especialmente crítica la fase transcurrida desde el inicio del desarrollo de los frutos hasta el comienzo de su maduración (Maroto, Borrego, & Pomares, 2002).

A la hora de diseñar un riego es necesario conocer las características del sistema radical de la planta a regar, para determinar la profundidad del suelo a humedecer. La sandía posee un sistema radical profundo (Maynard & Hochmuth, 1997) la clasifican en el grupo de los cultivos con una profundidad del sistema radical superior a los 120 centímetros (Walker & Skogerboe, 1987); pero en realidad la profundidad efectiva de sus raíces está entre 60 y 90 centímetros (Keller & Bliesner, 1990), no obstante, la mayor parte de las raíces se encuentran en los 40 centímetros superficiales del suelo.

El riego es muy importante, pues la sandía necesita de por lo menos entre 500 -750 milímetros de agua durante su ciclo. Los métodos de riego más utilizados en el cultivo de la sandía son el riego por surcos y el riego localizado de alta frecuencia (Matamoros, 1993).

- Riego por surcos: las camas contiguas están separadas por surcos de 50 cm de anchura aproximadamente, por lo que avanza el agua y al mismo tiempo se va infiltrando vertical y horizontalmente, este riego puede ser por flujo o por estanco. El flujo por estanco tiene predilección ya que el agua se retiene al final del surco y ésta se infiltra poco a poco y el tiempo de aplicación es menor, con un diseño y un manejo adecuado, la eficiencia de la aplicación puede ser superior al 80%. La frecuencia de riegos dependerá del ciclo y de la fase del cultivo. Siendo habitual que en el período de máximas necesidades la frecuencia sea semanal (Matamoros, 1993).

- **Riego localizado:** Su objetivo es realizar pequeños aportes de agua, de manera continua y frecuente, en un lugar próximo a la planta, humedeciendo sólo parte del volumen del suelo. Aunque existen diversos sistemas de riego localizado (microaspersión, cintas de exudación, riego subterráneo, etc.), el ejemplo más típico es el conocido como *riego por goteo*.

En el riego por goteo, el agua se distribuye por tuberías de polietileno a baja presión, en las que a intervalos regulares están colocados los emisores, denominados goteros, responsables de la producción de las gotas del líquido. Los diversos tipos de goteros se diferencian en el sistema que usan para disipar la energía proveniente de la presión del agua y producir un flujo constante de gotas. Así, goteros tipo vortex, helicoidales, de laberinto, autocompensantes, etc. (WWF, 2005)

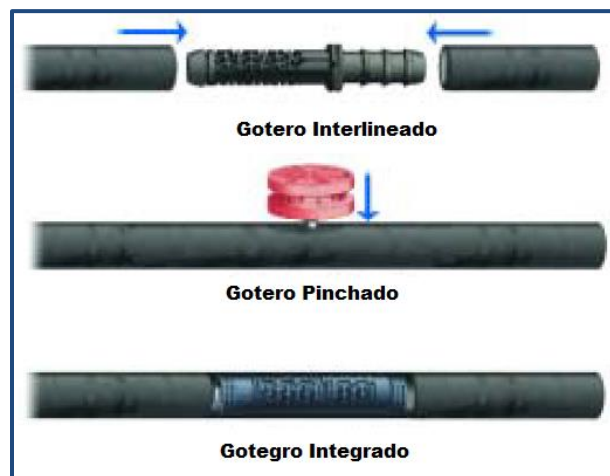


Figura 20. Tipos de Goteros

Fuente: (AZUD, 2013)



Cada gotero está caracterizado por su caudal nominal (expresado en litros por hora) y su rango de presiones de trabajo. Excepto para los goteros autocompensantes, que permiten cierta variabilidad, a cada presión de trabajo le corresponde un caudal. Por eso, para poder planificar los riegos y manejar de forma adecuada una instalación es imprescindible conocer estos valores. Cuando se tienen que montar líneas de riego de más de 100 metros de siembra, los goteros autocompensantes tienen la virtud de aportar la misma cantidad de agua entre presiones establecidas, es decir, sin importar la distancia a la que estén ubicados estos goteros, la presión del agua no se ve afectada por lo que el número de gotas será la misma en el primer y último terminal. (Arbat Pujolrás, 2006)

Teniendo en cuenta el tipo de cultivo y la tecnología implementada, la mejor opción en cuanto a sistemas de riego para micro irrigación, es la técnica del Sistema de Riego Localizado de Alta Frecuencia – RLAF (Loba & Ramírez, 2012). Este tipo de riego se caracteriza por la aplicación de agua, precisa y lenta en forma de gotas o pequeños chorros a través de unos mecanismos llamados emisores situados en determinadas posiciones de una línea distribuidora de agua. Sus principales ventajas son el aumento de la producción del cultivo, la reducción del efecto de salinidad en la planta, la mejora en la distribución de fertilizantes y otros agroquímicos, el crecimiento limitado de malas hierbas, el ahorro en el uso del agua y el menor costo energético (Ramírez de Cartagena, 2011).

## **2.2 DISEÑO Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE RIEGO**

Según (Alvarado, Díaz, & Morales, 2006), el diseño del sistema de riego por goteo deberá ser realizado con asesoría de un especialista, ya que las decisiones erróneas pueden ocasionar daños irreversibles al cultivo. A continuación se mencionan los componentes principales con los que deben contar estos sistemas:

- Fuente de Agua
- Bomba de Alimentación
- Sistema de Filtrado
- Inyector de Fertilizante (Tipo Venturi o Bomba de Inyección)
- Tubería de Conducción
- Tubería de Distribución
- Conectores a Cintilla
- Cintillas
- Terminales
- Válvulas
- Manómetros

El sistema de riego por goteo debe cumplir con las siguientes características de operación para su óptimo funcionamiento y así evitar distribuciones irregulares tanto de agua como de nutrimentos:

**a) Características de la cintilla de riego:** Se sugiere instalar cintilla calibre 8000 que tiene un espesor de pared de 200 micras, lo que asegura dos ciclos de cultivo de vida útil. El gasto por gotero generalmente utilizado es de un litro por hora (L/h) cuando el sistema tiene un 100% de eficiencia y la separación aproximada entre goteros de 30 cm, con lo que así se tiene un gasto aproximado de 300 L/h en 100 m de longitud (distancia frontal de una hectárea).

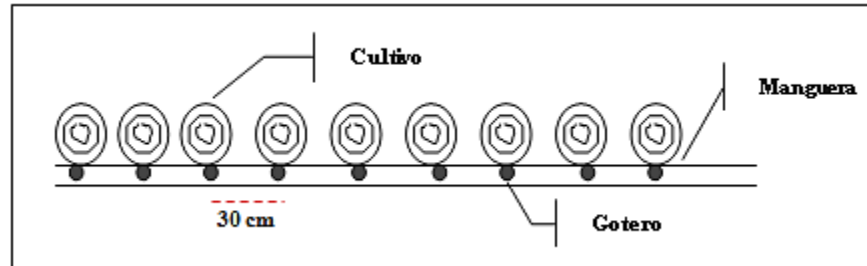


Figura 21. Distancia en la que se ubicarán los emisores (goteros)

**b) Necesidades y ubicación de la cintilla:** En el sistema de siembra propuesto, la cintilla debe ser colocada al centro de la cama, quedando aproximadamente 2 m entre líneas por 100 m de longitud para un total aproximado de 5000 metros lineales de cintilla por hectárea. Cada rollo de cintilla calibre 8000 contiene 2300 m, por tal razón serán necesarios alrededor de 2.2 rollos de cintilla para cubrir cada hectárea. Algunas veces es importante el uso de

plásticos para acolchar ya que mejora la calidad y precocidad del producto (Ramírez V. , 1996).

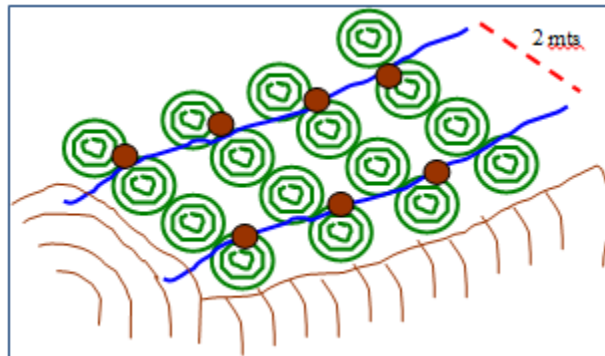


Figura 22. Ubicación de la cintilla para el riego por goteo en el cultivo de la sandía

**c) Instalación de la cintilla:** La cintilla debe ubicarse en el centro de la cama, de 10 a 20 cm de profundidad para protegerla de los implementos de cultivo y movimiento por efecto de los vientos fuertes; la posible obturación de los goteros por raicillas se resolverá con la aplicación de ácidos.

**d) Presión de operación:** La presión de operación de la cintilla debe ser aproximadamente de 8 a 10 libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en ingles). El gasto de agua del sistema fluctúa según la presión y el sistema de control, a mayor presión mayor gasto.

**e) Manejo del sistema de filtrado:** La presión en el sistema de filtrado debe trabajar con una máxima de 5 libras de diferencia entre la entrada y la salida del mismo. En la medida que

este diferencial es menor, el coeficiente de uniformidad del sistema será mayor del 90%; lo cual quiere decir que el sistema funciona adecuadamente. Para un mejor control se sugiere instalar medidores de presión (manómetros), antes y después de los filtros.

**f) Sistema de inyección del fertilizante:** Se presentan dos tipos de inyección, que corresponden al tipo de energía utilizada: eléctrica y/o hidráulica. Las bombas de inyección corresponden a la energía eléctrica e hidráulica y la primera es la recomendada para no influir en las presiones de operación del sistema. Cuando no se cuenta con energía eléctrica, se usan los dispositivos Venturi, los cuales trabajan con la energía hidráulica para inyectar los fertilizantes al sistema. Este dispositivo influye en la presión de operación del sistema, durante el tiempo de inyección del fertilizante, el cual tarda de 20 a 30 minutos en función a la superficie de la sección a irrigar. Una imagen aproximada del Cabezal de Riego (conjunto de elementos destinados a filtrar, tratar, medir y suministrar el agua a través de la red de distribución de tuberías), podría ser:

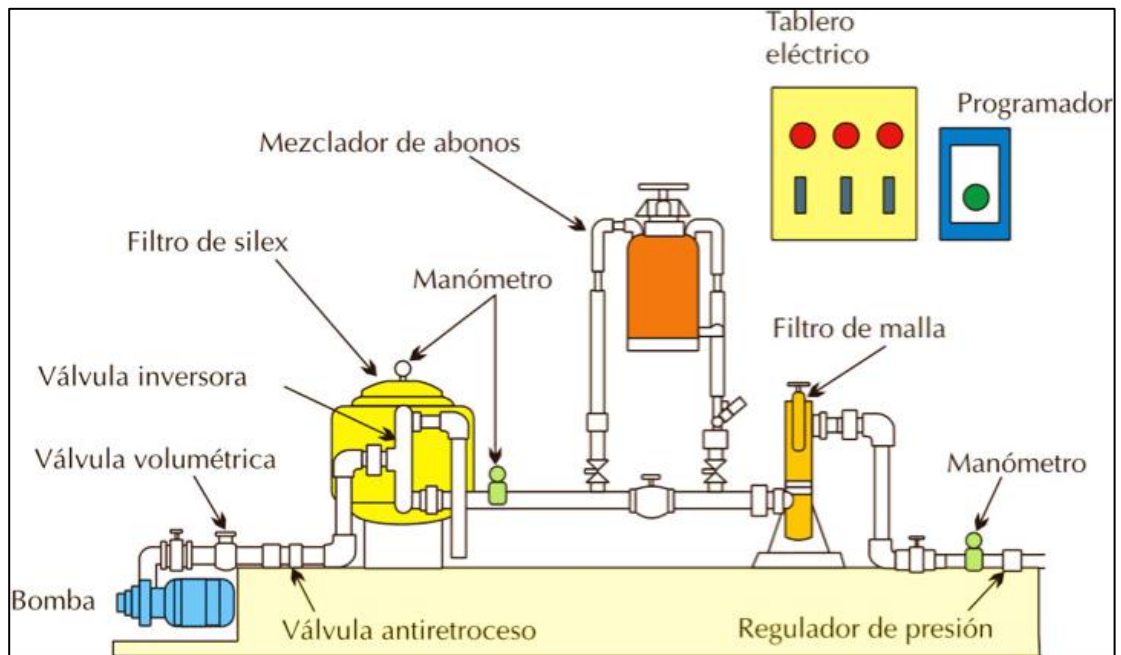


Figura 23. Cabezal de Riego por Goteo

Fuente: (Oltra Cámara, 2012)

**g) Prevención de la obturación en goteros:** Para prevenir que los goteros se obturen, se sugiere aplicar semanalmente una solución de ácido nítrico al 2%. Dependiendo de las dimensiones de la sección del sistema de riego (1 a 5 ha), se prepara de 20 a 50 litros de solución, agregando por cada litro de agua 20 mL de ácido nítrico. Esto se realiza a través del sistema de inyección al finalizar el riego. De tal manera que la solución se distribuya y permanezca en la cintilla. Esto se hace en cada una de las secciones regadas.

**h) Drenado de la cintilla:** Es necesario drenar la cintilla al término de cada riego, con el fin de mantener el sistema libre de impurezas y prolongar el buen funcionamiento de los goteros.

Para su drenado se destapan las puntas finales de cada línea y se deja salir el agua libremente.

**i) Fuentes de fertilización (Fertiriego):** De manera opcional, pero recomendada, se utilizan los fertilizantes que se utilizan en la preparación de la solución nutritiva agregada al cultivo para obtener mejores resultados productivos. Normalmente, los fertilizantes más utilizados para las condiciones climatológicas y de suelo que se tienen para el presente proyecto son:

Fertilizante	Dosis	Momento de Aplicación
Triple 15	100Kg/ha	30 gr/planta
Urea	50 Kg/ha	30 gr/planta
Nitrato de Potasio	50 Kg/ha	30 gr/planta

Tabla 5. Tabla de Fertilizantes y sus Dosis

## 2.3 ASPECTOS TÉCNICOS Y AGRÍCOLAS DEL CULTIVO SELECCIONADO

### 2.3.1 Cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo Elegido (Sandía: *Citrullus Lanatus*)

**en Condiciones Estándar:** Según la FAO, la evapotranspiración de referencia ETo es un

valor general útil para definir el valor de la pérdida de agua por evaporación y transpiración real del cultivo seleccionado ( $ET_c$ ), según el modelo matemático:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (27)$$

Dónde:

$ET_c$ : Evapotranspiración del cultivo.

$ET_o$ : Evapotranspiración de Referencia (Ecuación 1)

$K_c$ : Coeficiente de desarrollo del cultivo (éste valor cambia según la etapa fenológica del cultivo).

Los efectos de las distintas condiciones del tiempo atmosférico fueron incluidos en la  $ET_o$ . Los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el coeficiente del cultivo. Por lo tanto, mientras  $ET_o$  representa un indicador de la demanda climática, el valor de  $K_c$  varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de  $K_c$  desarrollados en estudios anteriores. (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).



Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en un coeficiente único del cultivo. El coeficiente único Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son apropiados para determinar el grado de evapotranspiración de un cultivo específico. Solo se deben tener en cuenta las distintas edades fenológicas de la variedad a cultivar, en éste caso, la Sandía. Los valores típicos ajustados a las condiciones climáticas y geográficas del área de estudio, se muestran en la siguiente tabla:

<b>ETAPA DE DESARROLLO</b>		<b>Kc</b>
<b>(Días de Siembra)</b>		
Establecimiento	(10 a 20)	0,5
Período Vegetativo	(21 a 40)	0,8
Período de floración	(45 a 60)	1,5
Formación de Cosecha	(61 a 75)	0,9
Maduración	(76 a 110)	0,7

Tabla 6. Etapas fenológicas de la sandía - días desde la siembra

Fuente: ANIAF – FAO, Allen (2006)

Estos datos, son aproximaciones basadas en los conceptos y definiciones estipuladas en el libro de Allen (FAO – 56), además en las sugerencias y experiencias de agricultores y profesionales del área agrícola de la región en estudio.

Durante el periodo de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente  $K_c$ , expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente  $K_c$  a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo.

Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de  $K_c$ : correspondientes a la etapa inicial ( $K_{c_{ini}}$ ), la etapa de mediados de temporada ( $K_{c_{med}}$ ) y la etapa final del cultivo ( $K_{c_{fin}}$ ).

Estos valores se pueden definir de manera analítica mediante los cálculos sugeridos en (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) para cultivos altos como algunos frutales o sembradíos de algunas hortalizas que requieran altas cantidades de líquido, o que requieran riego permanente o con ciclos casi consecutivos de riego. Utilizando los valores de  $K_c$  estipulados en la tabla 9, se construye la gráfica del coeficiente único de cultivo ( $K_c$ ) para la sandía:

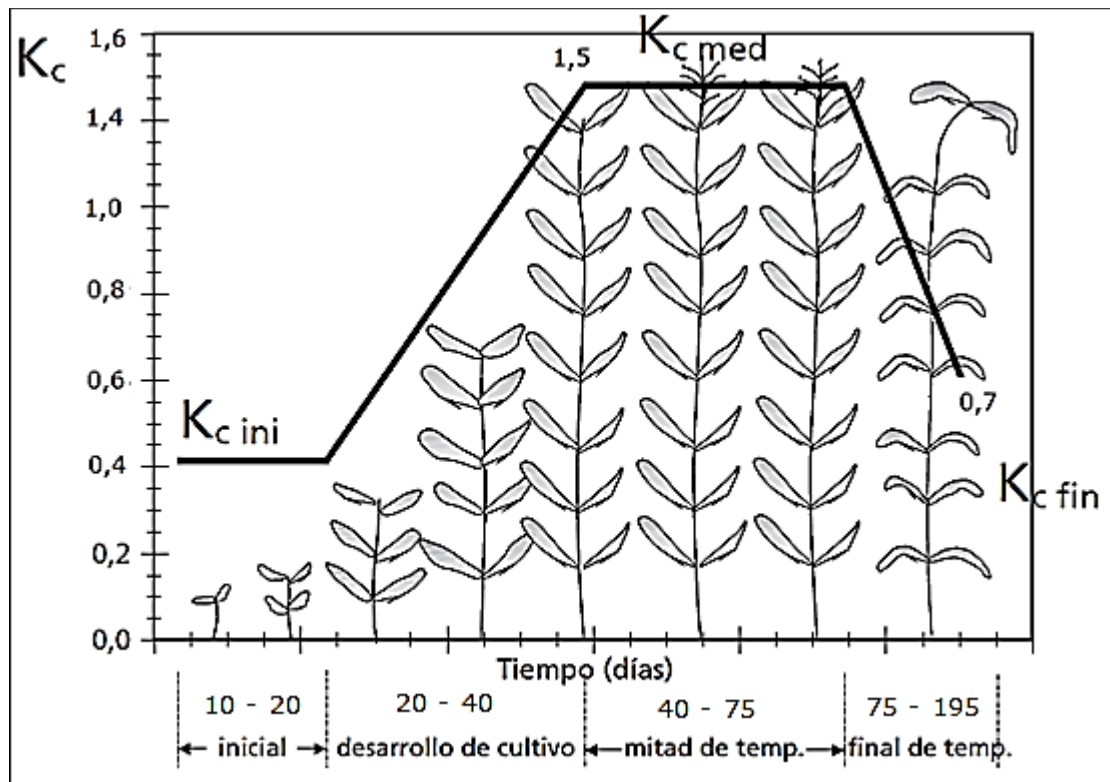


Figura 24. Curva generalizada del coeficiente del cultivo de la Sandía

Fuente: FAO modificada por los Autores

Como puede observarse, el valor de  $K_c$  no es estándar a lo largo del tiempo de siembra, la edad fenológica del cultivo hace que éste valor varíe, por lo menos en cuatro etapas (para el caso particular de la sandía, ver tabla 9) o edades diferentes. Esto se debe, al cambio en el tamaño de las hojas, que repercute en el valor del albedo, la capacidad de transpiración de la planta, la profundidad de las raíces, requerimientos de agua, etc.

En general, tanto la tasa de crecimiento a la cual se desarrolla la cobertura vegetal como el tiempo para alcanzar la cobertura completa están afectados por las condiciones climáticas y

particularmente por la temperatura diaria del aire. Por lo tanto, el periodo de tiempo entre la siembra y la cobertura completa variará con el clima, latitud, altitud y fecha de siembra. Este periodo también cambiara con la variedad del cultivo. Generalmente, una vez alcanzada la completa cobertura vegetal, la tasa adicional de desarrollo fenológico (floración, desarrollo de la semilla, madurez y senescencia) es más dependiente del genotipo de la planta que de las condiciones climáticas (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

### **2.3.2 Cálculo Normalizado de la Lámina de Riego para la Sandía en base a Kc:**

Conociendo que para el tipo de cultivo seleccionado, el diseño del sistema de riego sugerido a nivel mundial es el de riego por goteo RLAF (Riego Localizado de Alta Frecuencia). Con el resultado de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), se calcula la lámina y volumen de agua, mediante la fórmula (28). Este es el cálculo de Volúmenes de Agua para Riego por Goteo en el Cultivo de Sandía. Según (Liotta, 2007), la eficiencia del sistema de riego por goteo (RLAF), es la más alta del mercado, fluctúa entre un 90 y 95%, por lo que, tomando la menor eficiencia, podríamos encontrar el valor aproximado de la lámina de riego requerida por planta:

$$\text{Lamina de Riego} = \frac{ET_c}{\text{EficienciaRiego}} \quad (28)$$

- *Cálculo del Tiempo de Riego (T.R)*: El tiempo de riego se calcula con la fórmula.

$$T.R = \frac{\text{VolúmenRiegoCalculado}}{\text{GastoAguaHectarea}} \quad (29)$$

El gasto de agua por hectárea, teniendo en cuenta las normas técnicas internacionales (OMS, 2012), se calcula de la siguiente manera:

Si por hectárea se incluyen 25 camas (ancho de 4 m x 100 m de largo), y los goteros se colocan a 30 centímetros de separación (distancia en que se ubicará cada planta), y el gasto por gotero sería de 1 Lt/hora. Con estos datos, podremos calcular el número de goteros requeridos por hectárea. Si en cada cama se tienen 100 metros de longitud para cubrir una hectárea, entonces:

$$\#Goterros = \frac{100m}{0,3m} = 333,3 \quad (30)$$

Y como en cada hectárea, se tendrían 25 camas, el número de goteros por hectárea será de  $(333,3 \times 25) = 8335$  goteros / Ha, aproximadamente. Ahora, si cada gotero tiene capacidad de 1 litro de agua por hora, el gasto requerido sería de 8,335 litros de agua / hora / hectárea.

Y el Tiempo Aproximado de Riego en horas (TAR):

$$TAR = \frac{31,000}{8,333} = 3,72 \quad (31)$$

Es decir, tres horas y cuarenta y tres minutos, aproximadamente. Este sería el tiempo aproximado de riego diario para el cultivo de sandía. Estos cálculos se pueden realizar diariamente o bien acumulándose la evaporación de un período de tres, cinco o más días, de acuerdo a la capacidades los equipos de riego. Por otro lado, los resultados mostrados son estimativos y no podrían sustituir la revisión en campo del sistema de riego y la humedad del suelo para realizar control automático y ajustar estos valores obtenidos. (Schugurensky & Caparro, 2009)

## **2.4 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.**

Conociendo los aspectos técnicos propios del cultivo y su relación con el sistema de riego que sustentaría sus requerimientos hídricos, se muestran a partir de esta sección, los elementos teóricos y prácticos requeridos inicialmente para alimentar los sistemas de control trabajados en el proyecto y que han sido simulados teniendo en cuenta muchos de los parámetros requeridos mundialmente para establecer los requerimientos mínimos de agua en cada una de las plantas de un cultivo de sandía. Se trabajan dos sistemas de irrigación, cada uno con un tipo de controlador diferente (Difuso y PID) que tendrán como entrada la salida

del modelo de Penman - Monteith, el cual será alimentado por los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración de un cultivo, como son la radiación, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento (Allen *et al.*, 1998), como también la etapa de crecimiento de la planta, las propiedades hídricas del suelo y el tipo de suelo en que se desea cultivar, ya sea arcilloso, franco arcilloso o franco.

**2.4.1 Características de las Variables a Controlar:** Las variables de entrada del sistema (la radiación, la temperatura, porcentaje de humedad relativa y la velocidad del viento) serán datos reales tomados de los archivos históricos de la estación meteorológica satelital de Puerta Blanca perteneciente a la Universidad de Sucre, ubicada en municipio de Sincelejo en latitud  $09^{\circ} 12' N$  y Longitud  $75^{\circ}23' W$ .

Para la correspondiente simulación se escogieron los datos correspondientes a los meses de marzo, abril, mayo y junio, relacionados en archivos físicos ubicados en la biblioteca Pompeyo Molina de la Universidad de Sucre. (Ortiz Navas, 2008)

Los datos seleccionados, en total 17.280, corresponden a datos reales tomados por sensores de precisión, con la siguiente periodicidad:

Variable	Periodicidad
Temperatura de Aire a 2 metros de altura	Registro de Lectura Horario
Temperatura Máxima	Registro de Lectura Horario
Temperatura Mínima	Registro de Lectura Horario
Precipitación	Registro de Lectura Cada 10 minutos
Radiación Global	Registro de Lectura Horario
Humedad Relativa	Registro de Lectura Horario
Presión Atmosférica	Registro de Lectura Horario
Velocidad del Viento	Registro de Lectura Cada 10 minutos
Dirección del Viento	Registro de Lectura Cada 10 minutos
Velocidad Máxima del Viento	Registro de Lectura Horario

Tabla 7. Periodicidad de cada una de las variables censadas en la Estación

Como puede observarse en la tabla 10, las periodicidades de las lecturas de los datos requeridos por el modelo de Penman Monteith (Ecuación 1), concuerdan perfectamente para el sistema de control que se requiere modelar. Es decir, la periodicidad requerida de la evapotranspiración utilizada en el proyecto es horaria, y tanto los datos de radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento se tienen este mismo formato. Por lo que los datos esperados estarían agrupados en una matriz de [24 x 30] datos. Es decir, 24 muestras horarias para 30 días de cada mes, durante los meses de marzo, abril, mayo y junio, fechas calendario que concuerdan con las fechas de cultivo de la sandía en la sabana sucreña y sus alrededores (Corpoica, 2012).

Para la etapa de crecimiento de la planta, se utiliza un bloque selector digitado por el usuario, donde se expresa la edad fenológica de la planta, utilizando como referencia los datos mostrados en la tabla 9. En cuanto a las propiedades hídricas del suelo, éstas serán trabajadas a partir de algunos modelos matemáticos sujetos al principio de conservación de la masa. El modelo elegido, propuesto por (James, 2012) hace referencia a tres regiones bien



diferenciadas, la Zona Superficial, la Zona del Suelo y la Zona de Almacenamiento. La primera, está comprendida por la sección aérea de la planta, es decir tallo, ramas, hojas, etc; y que interactúa permanentemente con las condiciones climatológicas que rodean a la planta. La Zona del Suelo, está compuesta por una enorme variedad de componentes, tanto inorgánicos, entre los que destacan los silicatos arcillosos, como orgánicos, restos de plantas y animales y los compuestos húmicos. Algunos de estos componentes presentan propiedades coloidales y, por ello, controlan el intercambio de nutrientes, los procesos de dispersión-floculación, la retención de moléculas orgánicas y numerosas propiedades mecánicas. (Artieda, 2008). Y el en tercer sector, es la Zona de Almacenamiento, zona de compuesto duro o pedregosa que impide de manera sensible el libre paso de líquido a través de ella, producto de la compactación de sus sustancias. De igual modo, algunas cantidades de agua, son infiltradas a través de ésta zona, produciéndose la percolación profunda y que en el presente proyecto no se incluye, por la dificultad de medición y el escaso aporte porcentual a la totalidad de líquido drenado por precipitación o riego (Ponce, 2008).

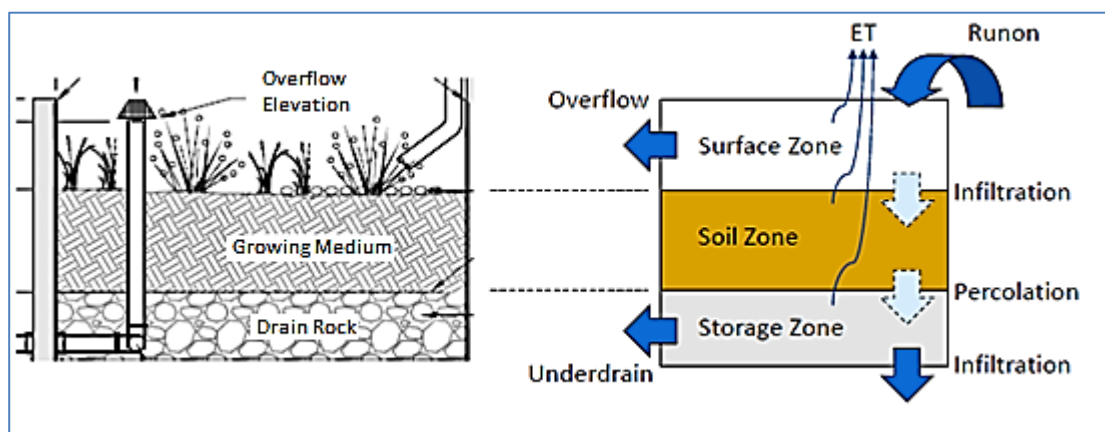


Figura 25. Modelo Conceptual de un proceso de infiltración del agua (James, 2012)

En la figura 25 se muestra de manera gráfica la relación del modelo con el espacio real en un cultivo. La entrada de agua en el suelo se produce a través del proceso de infiltración, el cual depende de la existencia de suficientes poros en la superficie del suelo y de la existencia de material suelo o materiales parentales (si son poco profundos) permeables que garantizan el movimiento vertical de ésta una vez en el interior del suelo. Los poros de la superficie del suelo pueden obliterarse con partículas desprendidas de los agregados de suelo bajo el impacto de las gotas de lluvia o por el depósito de esas partículas sobre la superficie del suelo, formando un encostramiento o un sellado impermeable, que se traduce en corrientes muy superficiales de agua, sobre todo cuando llueve o se riegan las plantas. (Artieda, 2008)

El modelo matemático se derivó de la siguiente relación:

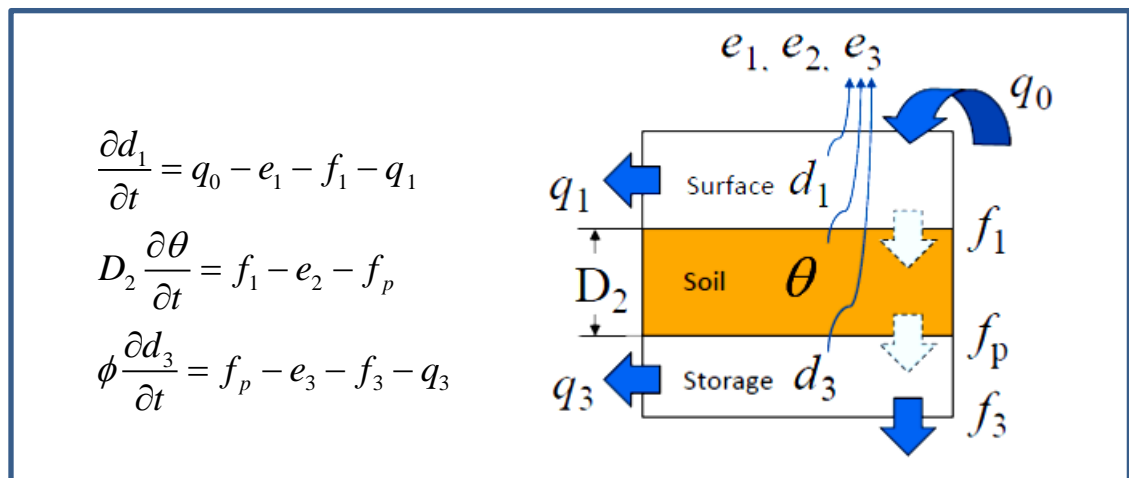


Figura 26. Ecuaciones de Balance de Flujo (James, 2012)

En el modelo grafico mostrado en la figura 26, propuesto por (James, 2012) de balance de flujo, se explica la relación y el modelamiento que se deriva de cada una de las capas

estudiables del suelo en relación con los flujos de agua, infiltración y percolación. Se puede decir que en la primera capa, *Superficial* recibe directamente el agua suministrada por riego y por precipitación ( $q_0$ ), pero a su vez al interactuar con el medio es quien genera las pérdidas de líquido por medio de la evapotranspiración del cultivo, definida en el grafico por  $e_1$ . Las transpiraciones  $e_2$  y  $e_3$ , están relacionadas con la evaporación del suelo producto de la radiación solar y del calor específico de las partículas del suelo, pero por ser de baja influencia en el resultado del modelo planteado en la presente investigación, tampoco se incluye. La escorrentía ( $q_1$ ) está definida como influyente en la investigación, siempre y cuando se presenten precipitaciones. Y para establecer si se presentan o no aguas lluvias, se incluye la utilización de un sensor pluviométrico. La cantidad de agua que logra infiltrarse al suelo ( $f_1$ ) se incluye en el modelo como un valor de pérdida o de signo negativo, al igual que la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración. Del resto de variables incluidas en el modelo,  $D_2$  hace referencia a las dimensiones lineales del suelo que serán utilizadas por las raíces de la planta. En nuestro caso, el valor de  $D_2$  estaría entre 1.0 y 1.2 metros, por el tamaño de las raíces del cultivo de Sandía (Ver 7.1.1 Sistema Radicular del Cultivo). Y por último,  $f_3$  y  $q_3$  hacen referencia a la pérdida de líquido por percolación profunda y por escorrentía o almacenamiento, pero en cantidades muy bajas, de modo que, como se explicó anteriormente, no son incluidas en el modelo.

Por último, se debe agregar que para el correspondiente estudio de simulación se incluyó el modelado de la profundidad radical del cultivo en el tiempo, pues cada vez que dicha raíz va crecimiento, los requerimientos de agua serán mucho mayores. Para su estimación se utilizó

la función indicada por (Norero, 1976) que especifica la profundidad típica de enraizamiento sin impedimento físico para cualquier tipo de suelo en centímetros (Ecuación 63).

La relación e interacción de todos los modelos matemáticos que soportan el microclima de cada una de las vegetaciones definen el módulo de la Planta del Sistema de Control, de modo que se conforma un sistema dinámico de difícil modelamiento en el plano  $s$ . Y como alimentación de ese modelo o valor referencia, se tienen como variable de entrada la Humedad Deseada del sistema y como variable de control para la salida la Humedad Real del cultivo. La comparación entre ambas, arrojará el error transitorio del sistema y el trabajo del controlador, independiente de cual sea (Difuso, Neuronal, etc), será velar porque la diferencia entre esos dos parámetros se lo más cercana a cero, muy a pesar de que el sistema es alimentado por variables climatológicas incontrolables por el sistema en sí, y que de las cuales podría decirse que se podrían asumir como perturbaciones al sistema.

Los modelos que describen el cálculo para la capacidad de campo y la densidad aparente serán tomados de un trabajo de grado realizado en la Universidad de Sucre. (Mendoza & Peñaloza, 2002)

**2.4.2 Diseño del Sistema de Control:** Esta etapa contempla el desarrollo de los controladores que va desde la asignación de la base del conocimiento hasta las estrategias de control, como también el diseño del bloque para el cálculo de la ET y demás mecanismos que integrarán el sistema.

*2.4.2.1 Identificación de las Partes del Sistema:* El sistema estará compuesto por varios módulos o bloques diseñados en MatLab ® encargados de procesar las variables físicas de entrada suministradas por la estación meteorológica, y aplicar cada uno de los modelos estimados para precisar la humedad del suelo, como variable de salida. Para esto se diseñaron: el módulo estimador de evapotranspiración, otro bloque estimador de radiación neta, un estimador del *agua fácilmente utilizada* por la planta dependiendo del tipo de suelo, un diferenciador de evapotranspiración (ET estimada y ET deseada), un multiplexor que seleccionará entre las entradas (el error de salida del diferenciador con el tiempo de crecimiento de la planta y el tipo de suelo) la señal que se transmitirá al controlador, además se contará con un sistema de control diferente en cada uno de los experimentos.

*2.4.2.2 Especificación de las Partes del Sistema:* A continuación se detallan cada uno de los módulos o bloques que componen los sistemas de control, teniendo en cuenta que el diseño del sistema de control se realizó de manera que, para probar los distintos controladores PID o FL, solo se necesite modificar el módulo/bloque del controlador, y no realizar mayores variaciones al sistema diseñado.

**a. Estimador de Evapotranspiración:** Su función será calcular la evapotranspiración en base a los parámetros de entrada (Temperatura, Humedad, Radiación y Velocidad del viento), utilizando el modelo de Penman-Monteith para estimaciones horarias de

evapotranspiración presentado anteriormente en la ecuación (1). Además se requerirá calcular algunas variables del modelo usando las siguientes formulas propuestas por la FAO.

- *Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ):* Es la relación entre presión de saturación de vapor y la temperatura, Esta dada por:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0.6108 * e^{\left(\frac{17.27 * T}{T + 273}\right)} \right]}{(T + 273)^2} \quad (32)$$

- *Constante Psicrométrica ( $\gamma$ )*

$$\gamma = \frac{C_p * P}{\varepsilon * \lambda} \quad (33)$$

Dónde:

$\gamma$  Constante Psicrométrica [ kPa °C-1],

P presión atmosférica [ kPa],

$\lambda$  Calor latente de vaporización, 2,45 [ MJ kg-1],

$C_p$  Calor especifico a presión constante, 1,013 x 10-3 [ MJ kg-1 °C-1],

$\varepsilon$  Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

- *Presión atmosférica (P):* La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmosfera terrestre. Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales:

$$P = 101,3 * \left( \frac{(273.16 + T) - 0,0065 z}{(273.16 + T)} \right)^{5,26} \quad (34)$$

Dónde:

P Presión atmosférica [kPa]

z Elevación sobre el nivel del mar [m]

- *Calor latente de vaporización ( $\lambda$ ):* El calor latente de vaporización,  $\lambda$ , expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. El valor del calor latente de vaporización varía en función de la temperatura. Cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida.

$$\lambda = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) * T \quad (35)$$

Dónde:

$\lambda$  calor latente de vaporización [MJ kg<sup>-1</sup>]

T temperatura del aire [°C]

- *Presión de saturación de vapor ( $e_s$ ):* La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e_s = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad (36)$$

Dónde:

$e_s$  Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]

T Temperatura del aire [°C]

- *Presión real de vapor ( $e_a$ ):*

$$e_a = e_s * \frac{HR}{100} \quad (37)$$

Dónde:

$e_a$  Presión real de vapor [kPa]

$e_s$  Presión de saturación de vapor [kPa]

HR humedad relativa [%]

- *Bloque Multiplexor:* su función será combinar las entradas en un solo vector organizado internamente por bloques.

- *Estimador de Radiación Neta:* Tiene como finalidad obtener el computo de la radiación neta a partir de las entradas de las variables temperaturas máxima y mínima, como también radiación solar y humedad relativa, aplicando los siguientes métodos matemáticos propuestos por la FAO:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (38)$$

Dónde:

$R_{ns}$  Radiación solar de onda corta

$R_{nl}$  Radiación solar de onda larga

Para determinar la Radiación solar de onda corta:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (39)$$



Así mismo, para radiación solar de onda larga:

$$R_{nl} = \sigma * \left( \frac{(T_{max,K})^4 + (T_{min,K})^4}{2} \right) * (0.34 - 0.14 * \sqrt{e_a}) * \left( 1.35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$T_{max,K} = T_{max} + 273.16$$

$$T_{min,K} = T_{min} + 273.16$$

La FAO define como la Radiación en un día despejado

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (40)$$

Para la Radiación extraterrestre:

$$R_a = \frac{R_s}{K_{RS} * \sqrt{T_{max} - T_{min}}} \quad (41)$$

**b. Estimador del agua fácilmente utilizada por la planta dependiendo del tipo de suelo:**

Su función es calcular el agua útil de fácil absorción para la planta de acuerdo a la capacidad de campo, el punto de marchitez y agua útil disponible dependiendo del tipo de suelo que se escoja (Arcilloso, franco arcilloso y franco). Para el cálculo de la capacidad de campo y densidad aparente se han definido los siguientes aspectos:

*Capacidad de Campo (CC) para los tipos de suelo existentes en la ciudad de Sincelejo:* Para determinar la CC (Amezquita, 1995) sostiene que el agua en el suelo es retenida por fuerzas de adhesión, cohesión y capilaridad. El fenómeno de adhesión ocurre cuando láminas moleculares de agua se ponen en contacto con partículas del suelo; el de cohesión usando más láminas cohesionadas se unen a las láminas adheridas, y el de capilaridad cuando las láminas cohesionadas encuentran los poros del suelo.

Desde el punto de vista agrícola, es interesante considerar los tres tipos de tamaños de poros: macro, meso y micro poros. En los primeros el agua se mueve libremente obedeciendo a la ley de gravedad; siendo estos los poros de drenaje y de aireación del suelo. En los segundos, los meso poros, se almacena el agua aprovechable, la cual es definida como la cantidad de agua en base a volumen o lámina de agua que se ubica entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). La capacidad de campo, es la máxima expresión en cuanto a cantidad de agua (%) que puede retener un suelo contra la gravedad después de que se ha mojado abundantemente y ha drenado por 48 o 72 horas. (Mendoza & Peñaloza, 2002)

(Moreno & Osorno, 1999) Proponen las siguientes ecuaciones para la determinar la Capacidad de Campo in situ, para tres tipos de suelos presentes en la Ciudadela Universitaria Puerta Roja de la Universidad de Sucre.

Para Suelo Arcilloso:

$$CC = 120,674 - 0,067 \%Arena - 0.048 \%Limo - 6,5327\%Materia Organica - 53,574Da$$

Dónde, el valor porcentual de Arena, varía entre 43 a 51%, el valor porcentual de Limo varía entre 30 y 37% y el de Materia Orgánica varía entre 2,03 y 2,5%. Como se mencionó anteriormente, todos estos datos fueron tomados experimentalmente por (Mendoza & Peñaloza, 2002).

En el mismo estudio se provee el modelo matemático específico para determinar experimentalmente la Densidad Aparente para éste tipo de suelo en gramos por centímetro cúbico (gr/cc), definido por:

$$Da = 1,5177 - 0,0103 \%H \quad (42)$$

Donde %H, denota el porcentaje de humedad del suelo.

Para Suelo Franco:

$$CC = 120,120 + 0,149 \%Arena + 0.075 \%Limo + 0,561\%Materia Organica - 80,114Da$$

Dónde, el valor porcentual de Arena, varía entre 19 a 22%, el valor porcentual de Limo varía entre 34 y 40% y el de Materia Orgánica varía entre 1,29 y 2,33%. En cuanto a la Densidad Aparente para éste tipo de suelo en gramos por centímetro cúbico (gr/cc), definido por:

$$Da = 1,4696 - 0,0083 \%H \quad (43)$$

Donde %H, denota el porcentaje de humedad del suelo.

Ahora, para Suelo tipo Franco Arcilloso:

$$CC = 162,434 - 0,022 \%Arena + 0,014 \%Limo + 1,696\%Materia\ Organica - 103,172Da$$

Dónde, el valor porcentual de Arena, varía entre 29 a 39%, el valor porcentual de Limo varía entre 31 y 46% y el de Materia Orgánica varía entre 1,14 y 2,07%.

$$Da = 1,4724 - 0,0086 \%H \quad (44)$$

Donde %H, denota el porcentaje de humedad del suelo.

*Definición del Punto de Marchitez Permanente (PMP):* El punto de marchitez permanente se ha definido como la cantidad de agua presente en el suelo cuando un cultivo se marchita permanentemente. Usualmente la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se

determinan, como es el caso de la presente investigación, en el laboratorio sometiendo muestras disturbadas o indisturbadas a equilibrio con presiones correspondientes a 0.3 (CC) y 15 (PMP) bares, sin embargo esta metodología no puede ser precisa como hacerlo bajo las condiciones de campo y de manejo en que se está trabajando, pero si válido para fines de investigación, simulación y modelamiento de suelos. (Gurovich, 1999)

Para calcular el valor específico del Punto de Marchitez Permanente, se utiliza:

$$PMP = 0,56 * CC \quad (45)$$

*Definir el Agua Útil para las plantas (AUP):* Se define como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. (Lop & Peiteado, 2005)

$$AUP = CC - PMP \quad (46)$$

*Agua fácilmente utilizada por las plantas (AFUP):* Se refiere a la parte o porción del agua útil que las plantas pueden absorber con poco esfuerzo (0,5-1 atmósferas) y, por tanto, sin merma de su capacidad productiva. El agua fácilmente utilizable depende de cada especie de planta. En agricultura se considera, de forma orientativa, que para los cultivos menos sensibles a la sequía el agua fácilmente utilizable es el 80% del agua útil y para los más sensibles entre 25-50%. (Lop & Peiteado, 2005)

$$AFUP = 08 * AUP \quad (47)$$

## **2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

Para obtener un resultado de calidad en esta investigación se hace necesario tener una plena y completa comprensión del sistema a controlar. Es por esto que en esta fase se contempla un análisis detallado de los aspectos fundamentales que determinan los requerimientos hídricos de la sandía y que deben ser incluidos en el diseño para un integral y preciso sistema de irrigación controlada.

Los factores que determinan los requerimientos totales de agua de un cultivo son la evapotranspiración, tipo de suelo, permeabilidad del suelo y periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale & Choudhary, 2011). Para una sesión de riego algunos de estos parámetros son fijos (por ejemplo, el tipo de planta, tipo de suelo y la etapa de crecimiento). Sin embargo, existen otros que varían con las características propias de la región de estudio, tales como la evapotranspiración, el perfil hídrico del cultivo y los niveles de absorción de agua por el suelo. En este estudio se considera, por razones obvias, un ciclo completo de riego para el crecimiento y desarrollo de la plantación de sandía. A continuación se describen los aspectos a tener en cuenta para el diseño de los sistemas de control.

### **2.5.1 Características del Cultivo:** Están definidas en 7.1

**2.5.2 Características Climáticas y Microclimáticas:** Características del microclima (ambiente que rodea a la planta en un área no mayor de 1 metro a su alrededor), o de las variables climatológicas o las propiedades del suelo, son necesarias para el diseño del sistema a controlar. Para determinar las características del microclima se deben definir las siguientes variables:

**2.5.2.1 Evapotranspiración:** Una de las variables más importantes utilizadas mundialmente para definir de manera aproximada, el consumo de líquido de una planta. Para determinar esta cantidad de agua perdida por el cultivo mediante evapotranspiración (evaporación y transpiración) se utilizará la Ecuación Penman - Monteith (Ecuación 1). La cual es alimentada por los parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración como la radiación, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Estos datos históricos reales tomados con periodicidad horaria, durante los meses de marzo y junio del 2008, por la estación meteorológica satelital de Puerta Roja (Universidad de Sucre) ubicada en Sincelejo departamento de Sucre (Ver Tabla 7). Las gráficas correspondientes a los 120 días simulados y el comportamiento general del sistema, pueden observarse en la sección de Anexos.

**2.5.2.2 Balance Hídrico:** El balance hídrico se logra comprendiendo las interacciones que se dan entre los subsistemas clima-cultivo-suelo que son los directamente responsables de la disponibilidad de agua en el suelo y por ende del rendimiento de los cultivos y en su

crecimiento. A partir del modelo básico de modelo hídrico presentado en la figura 38, (Laio, 2001) ha propuesto un modelo derivado del modelo físico de balance de masas y que simula el dinamismo de este sistema en términos de parámetros y constantes físicas medibles del suelo. Éste modelo se basa en la ecuación de continuidad para los fluidos, considerando el medio poroso como una estructura de pequeños conductos interconectados, de diámetro  $n$ . Y teniendo en cuenta el flujo laminar expresado por la Ley de Darcy (Sánchez San Román, 2011) de modo que:

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = \varphi[s(t); t] - \chi[s(t)] \quad (48)$$

Dónde:

$n$  es la porosidad del suelo

$Z_r$  es la profundidad activa de la zona radicular de la planta.

$s(t)$  es el contenido relativo de humedad del suelo ( $0 \leq s(t) \leq 1$ ).

$\varphi[s(t); t]$  es la tasa de infiltración.

$\chi[s(t)]$  es la tasa de pérdida de humedad desde la zona radicular.

## 2.6 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

El proyecto se planteó dividirlo en dos etapas, debido a los altos costos de implementación en sensores y dispositivos de control. Se propuso un estudio de modelamiento y simulación donde se incluyen la mayoría de los parámetros necesarios para un correcto sistema de riego,



esto producto de la asesoría de expertos en ingeniería agrícola y de la consulta permanente a la bibliografía relacionada con la temática, es decir: balance hídrico, evapotranspiración, edades fenológicas de los cultivos, profundidad de la raíz, etc; para establecer los requerimientos de líquido de una plantación o cultivo. Y una segunda etapa, apoyada financieramente por la Corporación Universitaria del Caribe, a través de su Centro de Investigación, donde se pretende implementar el diseño alcanzado en la simulación de los controladores en un cultivo real, para verificar su rendimiento y estabilidad. Esto a través de la financiación del proyecto de investigación presentado por el autor desde agosto de 2012 y aprobado en octubre del mismo año (Anexo 5), titulado “Ajuste y Calibración del Modelo de Penman – Monteith en Sincelejo – Sucre”. Presentado en la convocatoria interna No. 009-2013, y así poder adquirir los equipos de medida, las estaciones meteorológicas, los dispositivos de control, etc.

En relación a la investigación desarrollada como proyecto de maestría, se presenta el diseño completo del diagrama de bloques para el sistema de control de irrigación (figura 28). El cual incluye diferentes tipos de elementos de entrada y de salida, procesos, controladores y sus respectivas estrategias de control (Control PID y Control Difuso), como también los demás mecanismos que integrarán el sistema.

Finalmente, como herramienta para el diseño del sistema de control se ha empleado el entorno de modelado y simulación de sistemas dinámicos MATLAB® R2008a, su

herramienta gráfica Simulink™ para la construcción de diagramas de bloques y Fuzzy Logic Toolbox™ para la implementación de sistemas de inferencia difusa.

**2.6.1 Diseño Lógico del Sistema:** En la Figura 28 se esquematiza el diagrama de bloques con los elementos definidos en el análisis previo, en relación al esquema típico de un sistema de control realimentado (ver figura 13)

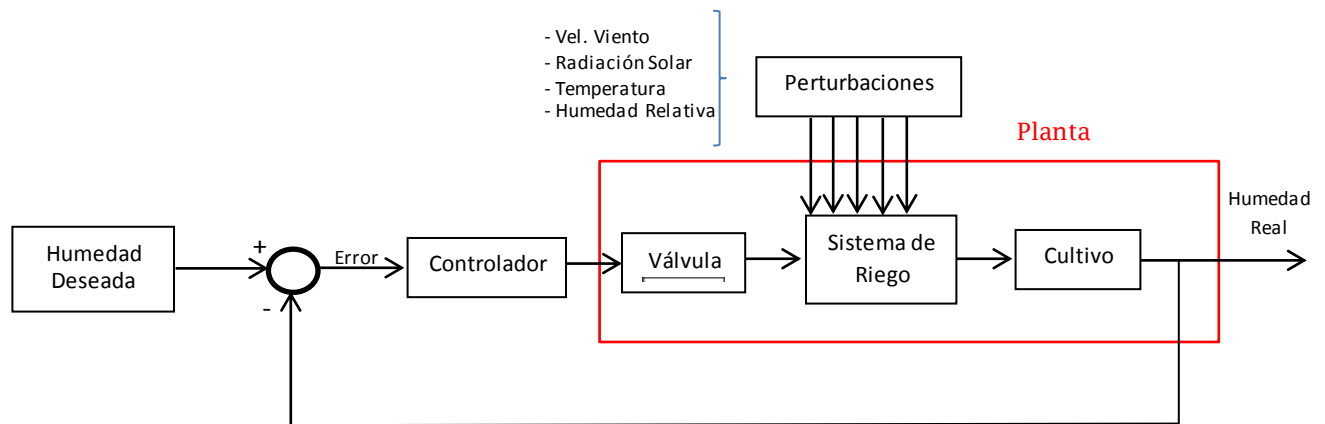


Figura 28. Esquema general del sistema de control

**2.6.1.1 Pruebas de Funcionamiento en Lazo Abierto de la Planta:** Para conocer el comportamiento en lazo abierto del modelo de irrigación mostrado en la figura 28, de manera que se demuestre la necesidad o no de establecer un lazo de retroalimentación que asegure el buen funcionamiento del sistema, se muestra a continuación la gráfica de respuesta del modelo en lazo abierto.

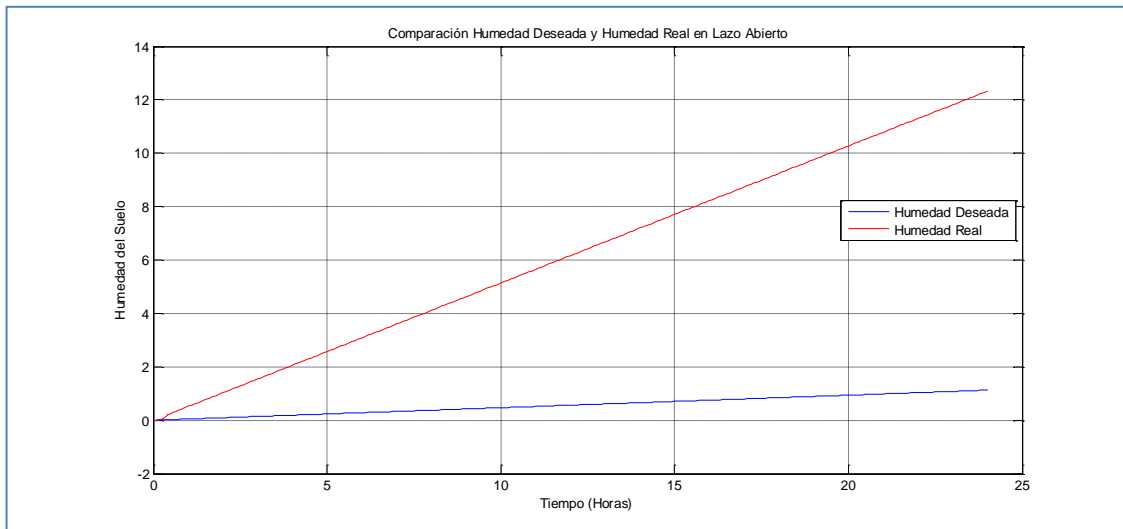


Figura 29. Respuesta del Sistema en Lazo Abierto

Puede observarse en la figura que, ante una entrada de Humedad Deseada correspondiente a datos reales generados por los distintos modelos matemáticos utilizados en el proyecto y que más adelante se explicaran en detalle, la respuesta en lazo abierto no es satisfactoria, pues para un solo día de simulación, la Humedad Medida (Humedad Real – *señal roja*) se aleja cada vez más del valor deseado, por lo que no hay control óptimo, ni se podrían garantizar buenos resultados en cuanto a consumo de energía, ahorro de líquido y mucho menos en producción del cultivo. Como es de esperarse, y como se muestra en la figura 30, el error es creciente conforme pasa el tiempo, por lo que la necesidad de adicionar el lazo de retroalimentación es inminente, de modo que se alimente al controlador con la señal del error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado.

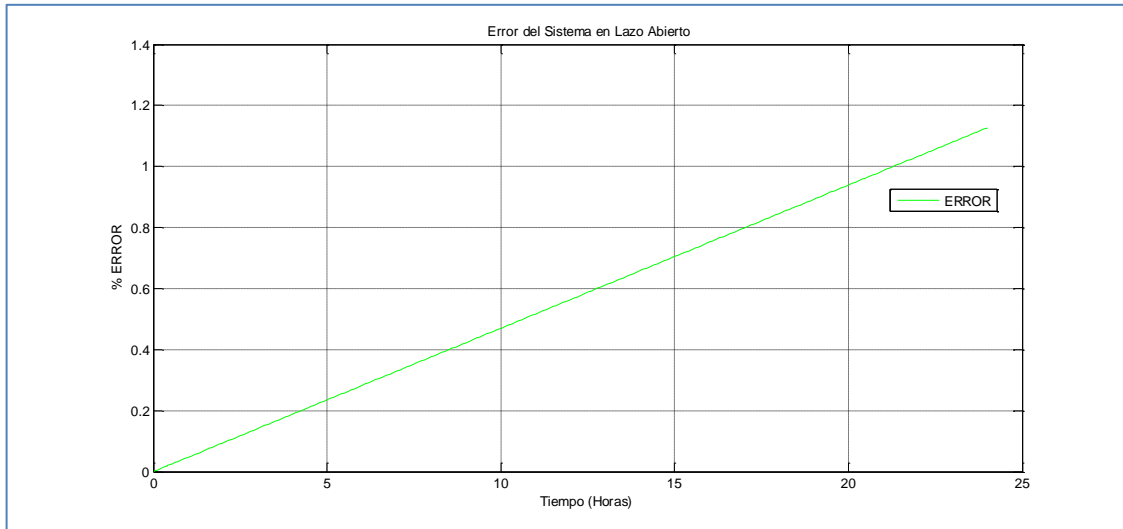


Figura 30. Error presentado por el sistema de control en lazo abierto

**2.6.2 Especificación de las Partes del Sistema en Matlab:** A continuación, se presentan todos y cada uno de los módulos planteados en la planta para el modelamiento y simulación de los controladores de los sistemas de riego.

**2.6.2.1 *Estimador de Radiación Neta:*** Tiene como finalidad obtener el cómputo de la radiación neta a partir de las entradas de las variables temperaturas máxima y mínima, como también radiación solar y humedad relativa. Para ello, se utiliza la ecuación 49.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [49]$$

Dónde:

$R_{ns}$  Radiación solar de onda corta y  $R_{nl}$  Radiación solar de onda larga, que se definen más adelante.

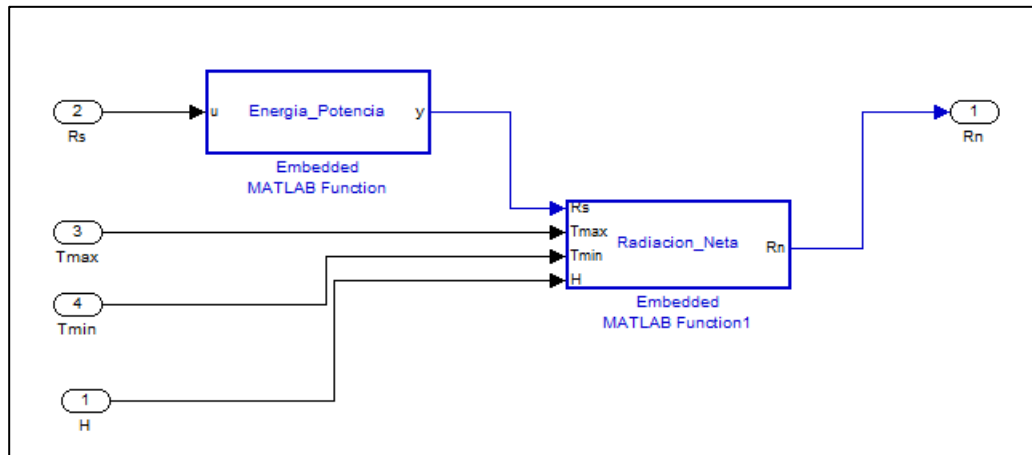


Figura 31. Esquema externo del estimador de radiación neta

Internamente el estimador está compuesto por dos bloques, un bloque encargado de transformar las unidades en que está dada la radiación solar a unidades indicadas para el cálculo de la radiación neta y un bloque que recibe las variables en las unidades necesarias para el cálculo de la radiación neta. Como lo muestra la figura 31. En ella se observan las entradas  $R_s$  (Radiación Solar),  $T_{max}$  (Temperatura Máxima alcanzada),  $T_{min}$  (Temperatura Mínima alcanzada) y  $H$  (la Humedad Relativa). Todas medidas con periodicidad horaria. Por otro lado, en el bloque denominado “Energía\_Potencia”, se calcula la radiación solar para la región o el área de medición, utilizando la ecuación  $y=u*0.864$  (FAO, 2006); como se observa en la figura 32.

```

1 function y = Energia_Potencia(u)
2 % This block supports the Embedded MATLAB subset.
3 % See the help menu for details.
4
5 - y = u*0.0864;

```

Figura 32. Esquema interno del convertidor de energía a potencia

Así mismo, el bloque llamado “Radiación\_Neta”, se muestra en la figura 33 y calcula la radiación neta diaria en base a los métodos empleados por (Allen, 2006) y validados por la FAO.

```

1 function Rn = Radiacion_Neta(Rs,Tmax,Tmin, H)
2 % This block supports the Embedded MATLAB subset.
3 % See the help menu for details.
4 Rns = 0.77*Rs;
5 %Radiacion neta de onda corta
6 Presion_vapor_tmax = 0.6108*exp((17.27*Tmax)/(Tmax+237.3));
7 %Presion de saturacion de vapor a la temperatura maxima
8 Presion_vapor_tmin = 0.6108*exp((17.27*Tmin)/(Tmin+237.3));
9 %Presion de saturacion de vapor a la temperatura minima
10 presion_vapor = (Presion_vapor_tmax + Presion_vapor_tmin)/2;
11 %Presion de saturacion de vapor media
12 presion_vapor_real = presion_vapor * (H/100);
13 %Presion de vapor real
14 Ra = Rs/(0.19*(sqrt(Tmax-Tmin)));
15 %Radiacion extraterrestre
16 Rso=(0.75+(2e-5)*213)* Ra;
17 %Radiacion en un dia despejado
18 Rnl = 4.903*(10^(-9))*(((Tmax+273.16)^4)+((Tmin+273.16)^4))/2*(0.34-0.14*sqrt(presion_vapor_real))*((1.35*Rs)/Rso)-0.35);
19 %Radiacion neta de onda larga
20 Rn = Rns-Rnl;
21 %Radiacion neta

```

Figura 33. Esquema interno del calculador de radiación neta

Según (Allen, 2006), un modelo estandarizado para calcular la Radiación Neta ( $R_n$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (50)$$

Dónde:

$R_{ns}$  Radiación solar de onda corta

$R_{nl}$  Radiación solar de onda larga

Así mismo, para determinar la Radiación solar de onda corta se utiliza

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (51)$$

En cuanto a la Radiación solar de onda larga,

$$R_{nl} = \sigma * \left( \frac{(T_{max,K})^4 + (T_{min,K})^4}{2} \right) * (0.34 - 0.14 * \sqrt{e_a}) * \left( 1.35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$T_{max,K} = T_{max} + 273.16$$

$$T_{min,K} = T_{min} + 273.16$$

Para éste caso, el valor de la temperatura máxima y mínima vienen establecidos por los datos medidos mediante la estación climatológica satelital. Ahora, para la Radiación en un día despejado (dato requerido para determinar  $R_{nl}$ ), se utiliza:

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (52)$$

Donde  $R_a$  es la Radiación Extraterrestre, definida por:

$$R_a = \frac{R_s}{K_{RS} * \sqrt{T_{max} - T_{min}}} \quad (53)$$

Todos estos cálculos requeridos para determinar la radicación neta, se ejecutan en el módulo descrito en la figura 41, arrojando dicho valor con periodicidad horaria.

**2.6.2.2 Estimador de la Evapotranspiración:** Su función será calcular la evapotranspiración en base a los parámetros de entrada (Temperatura, Humedad, Radiación y Velocidad del

viento), utilizando la ecuación Penman - Monteith (Ecuación 1). Además se requerirá calcular algunas variables del modelo usando las siguientes formulas propuestas por la FAO.

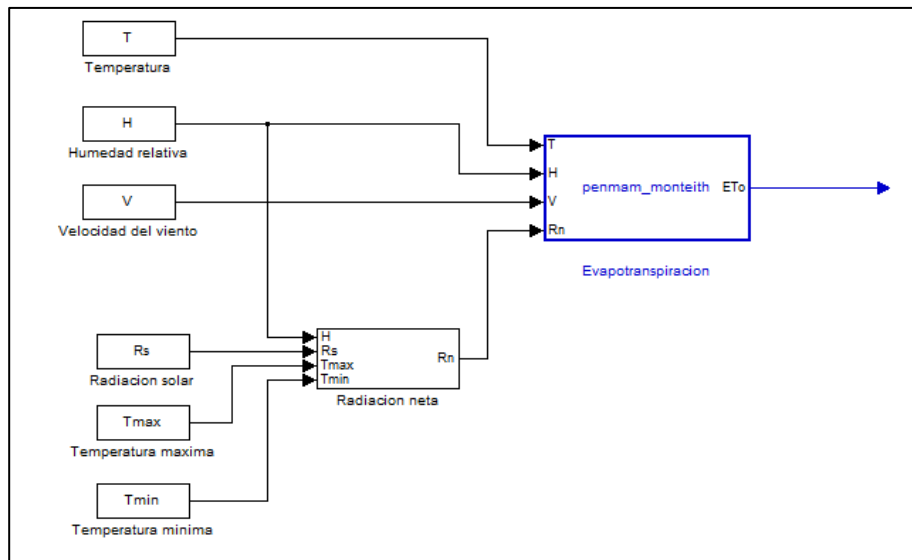


Figura 34. Esquema interno del estimador de evapotranspiración

En éste módulo se utilizan los modelos matemáticos validados (FAO, 2006) y presentados en 2.4.2.2.

En la figura 35 se observa todo el procedimiento anterior, al interior del bloque *Evapotranspiration* en MatLab ®, utilizando como insumo las variables capturadas por la estación meteorológica satelital de la ciudadela Puerta Roja – Universidad de Sucre.



```

function ETo = penmam_monteith(T, H, V, Rn)
##### Parametros #####
% z ---- Elevacion sobre el nivel del mar
z = 213;
##### Variables de Entrada #####
% T --- Temperatura en grados Celsius
% Rn --- Radiacion neta
% h --- Humedad
% v --- Velocidad del viento
##### Variables intermedias #####
% presion_vap --- Pendiente de la curva de presion de vapor
% psi --- Constante psicrometrica
% presion_atm --- Presion atmosferica
% presion_atm ---- Presion atmosferica
% calor_lat_vap --- Calor latente de vaporizacion

pend_curv_presion = (4098 * (0.6108 * exp((17.27 * T)/(T + 237.3)))) / ((T + 237.3) ^ 2);
presion_vapor = 0.6108 * exp((17.27 * T)/(T + 237.3));
presion_vapor_real = presion_vapor * (H / 100);
presion_atm = (101.3 * (((213.16 + T) - 0.0065 * z)/(273.16 + T))^5.26) ;
calor_lat_vap = (2.501 - (2.361 * (10^(-3)) * T));
cons_psicrometrica = (1.013 * (10^(-3) ) * presion_atm) / (0.622 * calor_lat_vap) ;

##### Evapotranspiracion #####

ETo = ((0.408 * pend_curv_presion * (0.9*Rn)) + (cons_psicrometrica * (37 / (T + 273)) * V * (presion_vapor -
presion_vapor_real))) / (pend_curv_presion + (cons_psicrometrica * (1 + 0.34 * V)));

```

Figura 35. Esquema interno con la programación del estimador de evapotranspiración

2.6.2.3 *Bloque Estimador del Balance Hídrico*: Es el encargado de obtener el error entre la humedad requerida y el valor de humedad actual basándose en la ecuación de flujo de agua en el suelo (ecuación 48), sin tener en cuenta las contribuciones por flujo lateral y por capilaridad desde el nivel freático. La grafica que lo representa es:

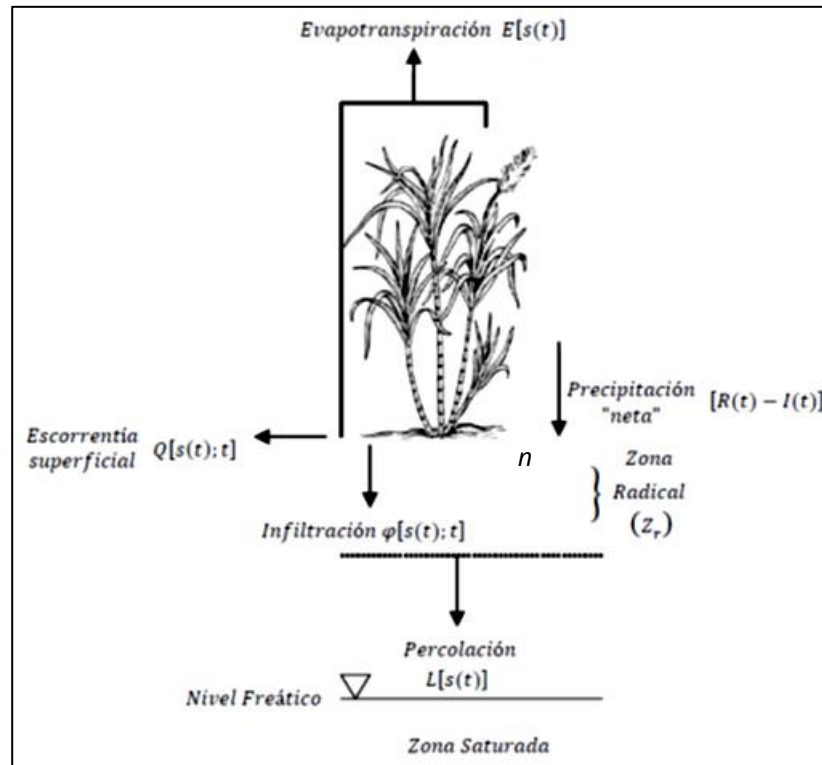


Figura 36. Representación gráfica ecuación de balance de humedad

Donde  $n$  es la porosidad del suelo,  $Z_r$  es la profundidad activa del suelo o zona radicular,  $S(t)$  es el contenido relativo de humedad del suelo ( $0 \leq S(t) \leq 1$ ),  $\phi[S(t); t]$  es la tasa de infiltración y  $X[(S,t)]$  es la tasa de pérdida de humedad desde la zona radicular.

Para considerar el efecto sobre la vegetación, la profundidad del suelo considerada en el volumen de control consiste en la profundidad de raíces para un cultivo determinado ( $Z_r$ ), debido a que es la capa en la cual el agua está disponible para ser absorbida por éste y justifica los procesos de transpiración, fijación de agua en los tejidos y disponibilidad hídrica en relación con el estrés.

La tasa de infiltración  $\varphi[S(t); t]$  es el componente estocástico del balance y representa la parte de la precipitación que cae directamente sobre la columna de suelo (Hernández Tórres, 2010). En el modelo de balance puntual se expresa como:

$$\varphi[s(t); t] = R(t) - I(t) - Q[s(t); t] \quad (60)$$

Donde  $R(t)$  es la tasa de precipitación,  $I(t)$  es la cantidad de precipitación interceptada por la cobertura vegetal y  $Q[S(t); t]$  es la tasa de escorrentía superficial, (Nótese la dependencia tanto del contenido de humedad del suelo  $S(t)$  como de la ocurrencia del evento de lluvia en el tiempo  $t$  para el caso de la escorrentía. Los otros componentes solo dependen del instante de tiempo  $t$  considerado). La tasa de pérdida de humedad desde la columna del suelo se representa, según (Hernández Tórres, 2010) como:

$$\chi[s(t)] = E[s(t)] + L[s(t)] \quad (61)$$

Dónde,  $E(s(t))$  es la tasa de evapotranspiración y  $L[s(t)]$  es la tasa de percolación profunda. A pesar de estas simplificaciones, este tipo de modelos han brindado orientaciones fundamentales en cuanto a la relación entre la dinámica y las propiedades interdependientes del sistema clima–suelo–vegetación, (Nuttle, 2002).

Llevando lo anterior al software Matlab, se tiene:

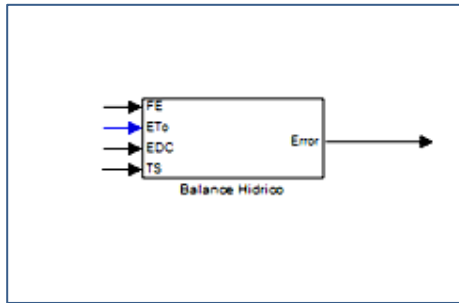


Figura 37a. Bloque de balance hídrico

En las figuras 37 (a y b), se observa el bloque que define el Balance Hídrico, donde  $FE$  es el Flujo de Entrada de Agua,  $ET_0$  la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia,  $EDC$  hace referencia a la Etapa de Desarrollo del Cultivo, tomando como base las edades cronológicas reales de las plantas. Y  $T_S$  es el tipo de suelo, que puede ser seleccionado como [1] Tipo Arcilloso, [2] Franco Arcilloso y [3] Suelo Franco.

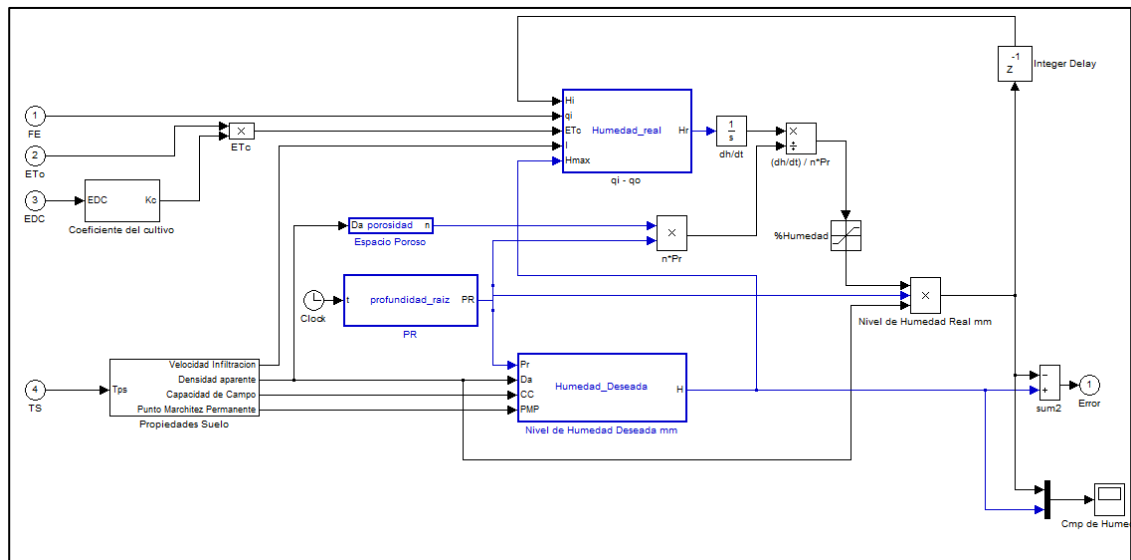


Figura 37b. Bloque de balance hídrico interno

El bloque balance hídrico internamente está compuesto por un bloque selector del coeficiente del cultivo, un bloque que obtiene las propiedades del suelo definida en 7.5, Infiltración del agua en el suelo (I), Densidad Aparente del suelo ( $D_a$ ), Capacidad de Campo del suelo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP), y que además dependen del tipo de suelo donde se establezca el cultivo, llámese Arcilloso, Franco Arcilloso y Franco. Además se adiciona un bloque estimador de la porosidad del suelo, un bloque que modela el crecimiento radicular, un bloque que obtiene la humedad deseada y por ultimo un bloque que calcula el nivel de humedad para un tiempo  $t$ .

2.6.2.4 Bloque Estimador del Coeficiente de Cultivo: Teniendo en cuenta la tabla 6, cada cultivo posee un Coeficiente de Cultivo  $K_C$  que varía en las diferentes etapas de su crecimiento (Allen, 2006). Con éste bloque se selecciona el  $K_C$  correspondiente al periodo de desarrollo en que se encuentre el cultivo y su ejecución es automática debido a que está sujeta al reloj de la simulación.

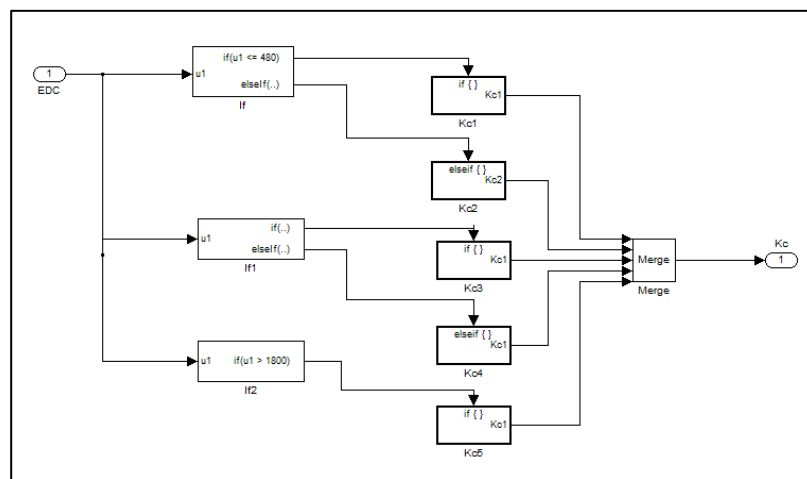


Figura 38. Bloque de coeficiente de suelo

2.6.2.5 Bloque Estimador de las Propiedades del Suelo: Este bloque es el encargado de obtener la velocidad de infiltración, la capacidad de campo, punto de marchitez y la densidad aparente para el tipo de suelo que se definida para el cultivo (Arcilloso, Franco Arcilloso y Franco)

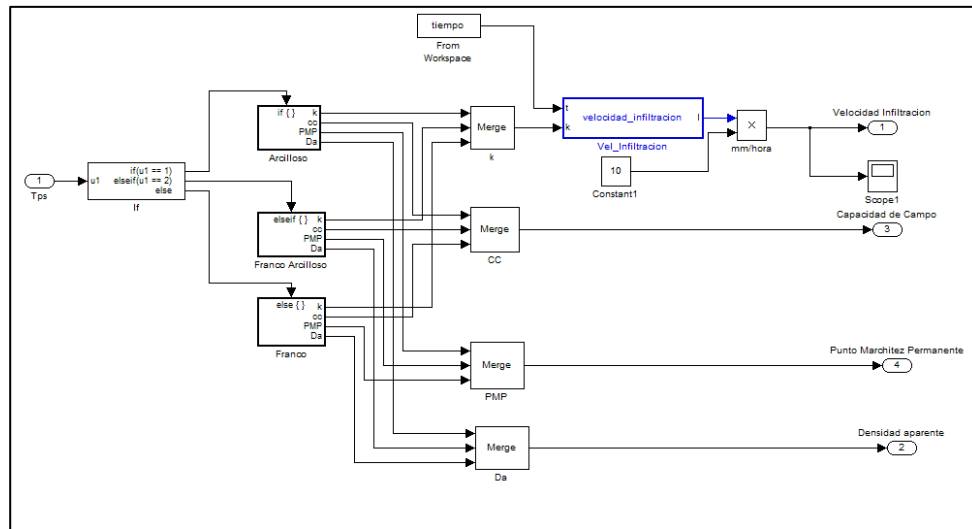


Figura 39. Propiedades del suelo

Para el cálculo de la capacidad de campo se ha tomado el modelo obtenido de la realización del trabajo de campo adelantado por (Mendoza & Peñaloza, 2002). También de este estudio se han extraído las constantes propias de los suelos más comunes en la región de la Sabana sucreña, como la % Arcilla, % Limo, % Material Orgánico, % Densidad Aparente y PMP a 15 atm.

Para la obtención de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se ha optado por el modelo de Kostiakov - Lewis ( $I = k * t^{-n}$ ), para  $n = - 0.48$  y ajustada en el parámetros k

dependiendo del tipo de suelo escogido (figura 38 y 39). Este valor de  $K$  lo define el software dependiendo del tipo de suelo (Arcilloso, Franco o Franco Arcilloso).

Para el suelo Arcilloso, el correspondiente valor de las constantes requeridas se muestran en la figura 40:

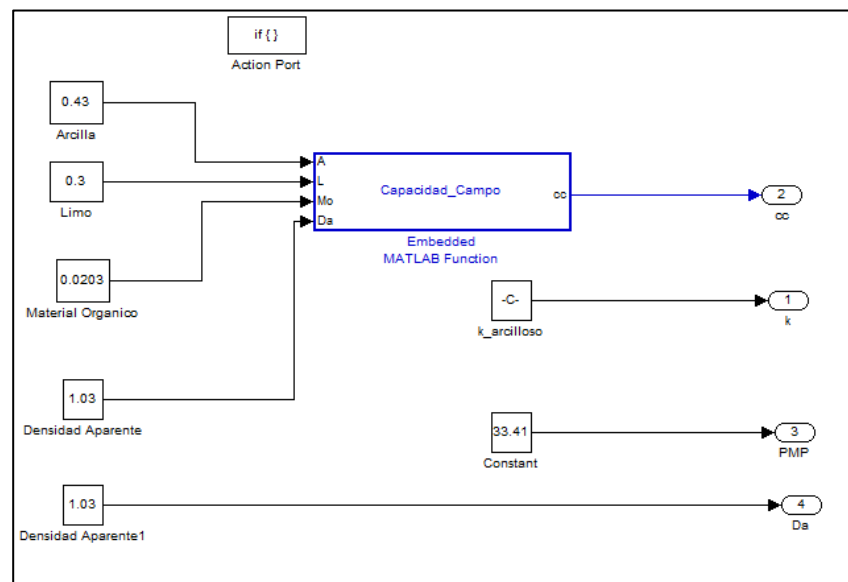


Figura 40. Bloque capacidad del campo para suelo arcilloso

Para éste mismo tipo de suelo (Arcilloso), se define el valor de la capacidad de campo (Figura 40) como:

$$CC = 120,674 - 0,067 \%Arena - 0,048 \%Limo - 6,5327\%Materia\ Orgánica - 53,574Da$$

Dónde:

% Arena 43 a 51

% Limo 30 a 37

% Materia Orgánica 2,03 a 2,5

DA hace referencia a la densidad aparente medida en gr/cc de 1,03 a 1,10

k igual 5 (valores obtenidos experimentalmente (Mendoza & Peñaloza, 2002)).

Para el suelo Franco Arcilloso, el correspondiente valor de las constantes requeridas se muestra en la figura 41:

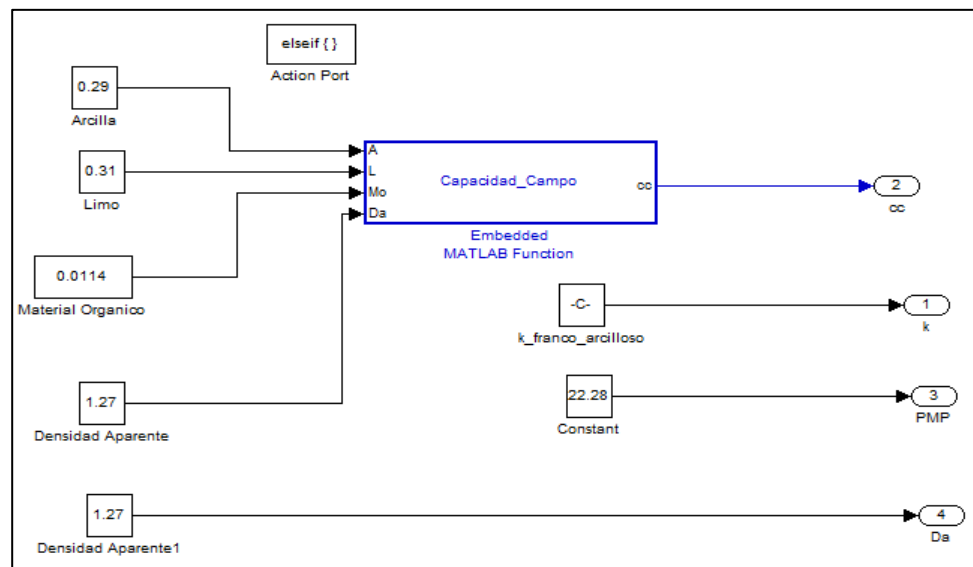


Figura 41. Bloque capacidad del campo para suelo franco arcilloso

Para éste mismo tipo de suelo (Franco Arcilloso), se define el valor de la capacidad de campo (Figura 41) como:

$$CC = 162,434 - 0,022 \%Arena + 0,014 \%Limo + 1,696\%Materia\ Orgánica - 103,172Da$$



Dónde:

% Arena 29 a 39

% Limo 31 a 46

% Materia Orgánica 1,14 a 2,07

DA densidad aparente medida en gr/cc de 1,27 a 1,32 y k igual 10

En la figura 41, se observa el bloque K\_Franco\_Arcilloso, que lo diferencia del bloque definido en la figura 40 por sus valores específicos de parámetros como PMP, CC, etc.

Ahora, para el suelo Franco, el correspondiente valor de las constantes requeridas se muestra en la figura 42:

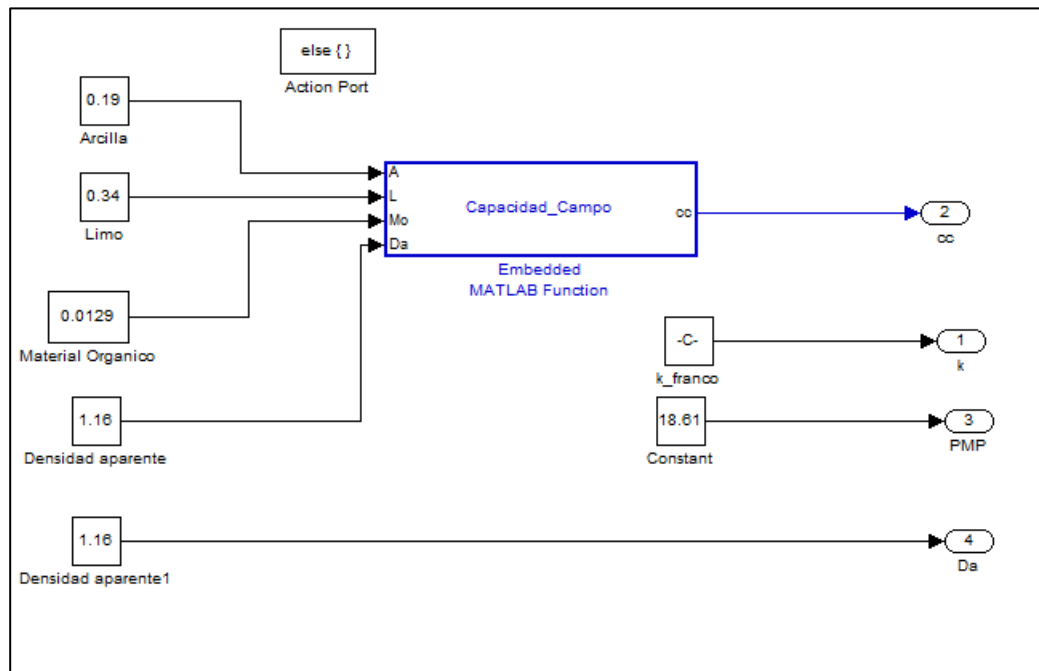


Figura 42. Bloque capacidad del campo para suelo franco

Para éste mismo tipo de suelo (Franco), se define el valor de la capacidad de campo (Figura 42) como:

$$CC = 120,120 + 0,149 \%Arena + 0,075 \%Limo + 0,561\%Materia\ Organica - 80,114Da$$

Dónde:

% Arena 19 a 22

% Limo 34 a 40

% Materia Orgánica 1,29 a 2,33

DA densidad aparente medida en gr/cc de 1,16 a 1,22 y k igual 20

Luego de definir K, se obtiene el valor correspondiente a la Velocidad de Infiltración, a través del bloque Velocidad\_Infiltracion (Figura 43) utilizando la ecuación de Kostiakov-Lewis.

```
function I = velocidad_infiltracion(t,k)
I = k*(t^(-0.48));
```

Figura 43. Bloque de cálculo de la velocidad de infiltración

**2.6.2.6 *Bloque Estimador de la Porosidad del Suelo:*** Este bloque calcula el porcentaje de espacios vacíos por donde circulara el aire y el agua, y depende de la textura y la estructura del suelo.

```

1 function n= porosidad(Da)
2
3 - n = (1- (Da/2.65) ) *100;
4

```

Figura 44. Bloque para el cálculo de la porosidad del suelo

Se determina por la fórmula:

$$n = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 \quad (62)$$

Dónde:

*Da es la densidad aparente*

*Dr es la densidad real 2.65 gr/cc*

2.6.2.7 Bloque Estimador del Modelo de Crecimiento Radicular de la Planta: Obtiene la profundidad radical del cultivo a lo largo del periodo de desarrollo.

```

1 function PR= profundidad_raiz(t)
2
3 - PR = (1.8*(t/10000) *(1.5- (t/10000) )) *1500;
4

```

Figura 45. Bloque crecimiento radicular de la planta

La división entre 10.000 en la figura 45, se debe a la conversión de metros a milímetros, requerida para que todo el sistema trabaje con la misma base de unidades.

Para la estimación del Crecimiento Radicular, se utilizó la función indicada por (Norero, 1976).

$$Pr_i = 1.8 * \left( \frac{t_i}{t_{final}} \right) * \left( 1.5 - \frac{t_i}{t_{final}} \right) * z \quad (63)$$

Dónde:

*Pr<sub>i</sub> es la profundidad medida en mts de la raíces durante un tiempo t<sub>i</sub>*

*t<sub>i</sub> es el tiempo que transcurre en el desarrollo del cultivo*

*t<sub>final</sub> es el tiempo que demora el desarrollo del cultivo*

*z es la profundidad maxima que alcanzan las raíces del cultivo*

2.6.2.8 Bloque Estimador de la Humedad Deseada: Estima el porcentaje de humedad dependiendo del tipo de suelo que se elija (Arcilloso, Franco Arcilloso y Franco).

```

1 function H= Humedad_Deseada(Pr, Da, CC, PMP)
2
3 - H = ((CC-PMP)/100)*Pr*Da;
4

```

Figura 46. Bloque para el cálculo de la humedad deseada

El modelo utilizado sugerido por (Flóres & Ruíz, 1999):

$$H = \frac{CC - PMP}{100} * Pr * Da \quad (64)$$

Dónde:

$H$  humedad medida en %

$CC$  capacidad de campo

$PMP$  punto de marchitez permanente

$Pr_i$  Profundidad de la raíz para un periodo  $t$  del desarrollo del cultivo

2.6.2.9 Bloque Estimador de la Humedad Real: Para efectos del simulador, se utiliza el modelo de balance de humedad (Flóres & Ruíz, 1999), y que utiliza la ecuación (63) y mostrada en la figura 47.

```
1 function Hr= Humedad_real (Hi, qi, ETc, I, Hmax)
2
3
4 - D = (I + Hi)- Hmax ;
5
6 - Hr = (qi + Hi) - (I + ETc + D);
7
```

Figura 47. Bloque para determinar la humedad actual

Dónde:

$H_i$  es la humedad en una hora anterior

$q_i$  es el flujo de salida de agua de la valvula

$ETc$  es la evapotranspiracion del cultivo

$I$  es la velocidad de infiltracion

$Hmax$  es la humeda maxima en bases a la zona radicular

2.6.2.10 Bloque del Sistema de Control: En primera instancia el sistema de control recibe como señal de entrada o como datos de entrada, la diferencia entre la humedad actual y la humedad deseada, es decir, el valor del error.

- Sistema de Control Difuso: Para el controlador difuso utilizo el toolbox de matlab (Fuzzy Toolbox), como se muestra en la figura 48. (Klee & Randal, 2011)

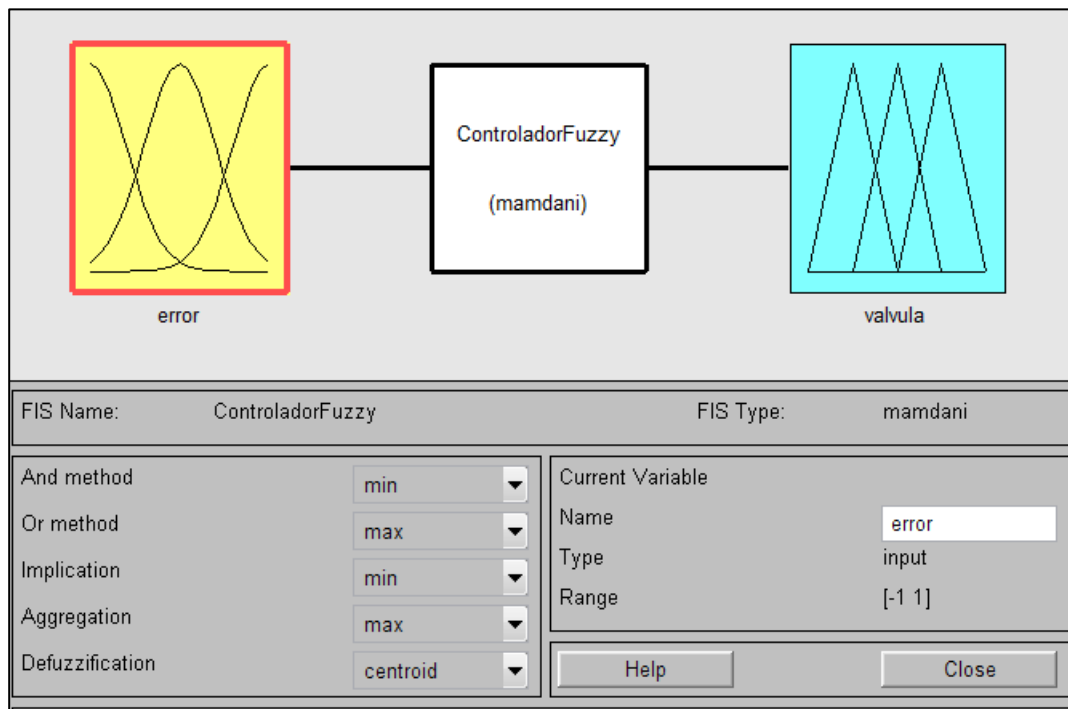


Figura 48. Controlador difuso con variables de entrada y salida

La señal de entrada del controlador es el error (Humedad Deseada – Humedad Real), tal como lo propone (Rahangadale & Choudhary, 2011). La figura 48 muestra las variables difusas de entrada y salida, como también el mecanismo de inferencia utilizado (Mamdani E. , 1975). Éste mecanismo de inferencia de Mamdani, tiene la ventaja de que no se utilizan las

áreas de las funciones de pertenencia, sino que se opera separadamente cada contribución y se calcula un promedio ponderado de los centros de las contribuciones, lo que simplifica el análisis matemático de su comportamiento. Además el Sistema Difuso tipo Mamdani es el más usado en la metodología Fuzzy (Nicolás, 2008). Fue uno de los primeros sistemas de control construidos usando los conjuntos difusos, por lo que existe amplia bibliografía que lo apoya y soporta. (Berengi, 1996)

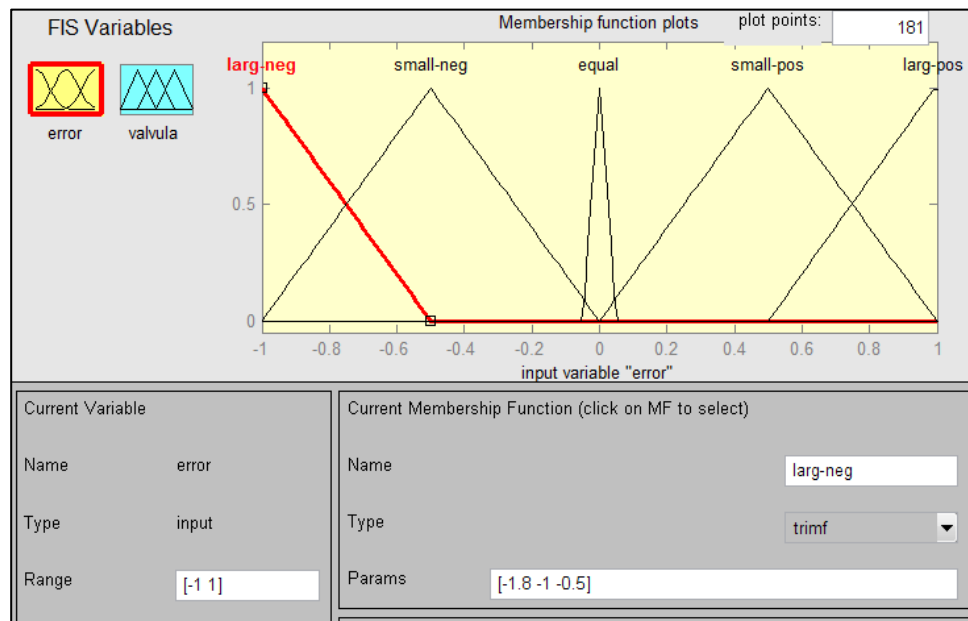


Figura 49. Función de pertenencia para la señal del error

La figura 49 muestra las funciones de membresía utilizadas como reglas del controlador difuso en el software de Matlab, y que se pueden apreciar en la tabla 8. Se asumen cinco etiquetas lingüísticas: Muy Negativo (LN), poco Negativo (SN), Cero (E), Poco Positivo (SP) y Muy Positivo (LP).

---

### REGLAS DEL CONTROLADOR FUZZY

---

1. *if Error es Muy Negativo (LN), entonces, Válvula Cierra Rápidamente*
  2. *if Error es Poco Negativo (SN), entonces, Válvula Cierra Lentamente*
  3. *if Error es Cero (E), entonces, Válvula No Cambia*
  4. *if Error es Poco Positivo (SP), entonces, Válvula Abre Lentamente*
  5. *if Error es Muy Positivo (LP), entonces, Válvula Abre Rápidamente*
- 

Tabla 8. Conjunto de reglas del controlador difuso

La tabla 8 representa el conjunto de reglas difusas que decidirán con base en el error del nivel de humedad, la posición en que será ajustada la válvula. Dichas reglas se obtuvieron haciendo un análisis heurístico de las posibles decisiones que se hubiesen tomado si el operador fuera un humano. (Juárez, Cañadas, & Roque, 2011)

De manera que, en la figura 50 se ilustra la división difusa de los espacios de salida del controlador difuso con sus respectivas etiquetas lingüísticas y con función de pertenencia triangular. Se observan las funciones de membresía que se ejecutan en la válvula, es decir, al ejecutarse estas reglas en el controlador difuso la válvula se abrirá o cerrará de manera gradual, según el caso. Lo que limita a la cantidad de agua disponible para cada terminal (gotero) de riego, según la necesidad hídrica de la planta.



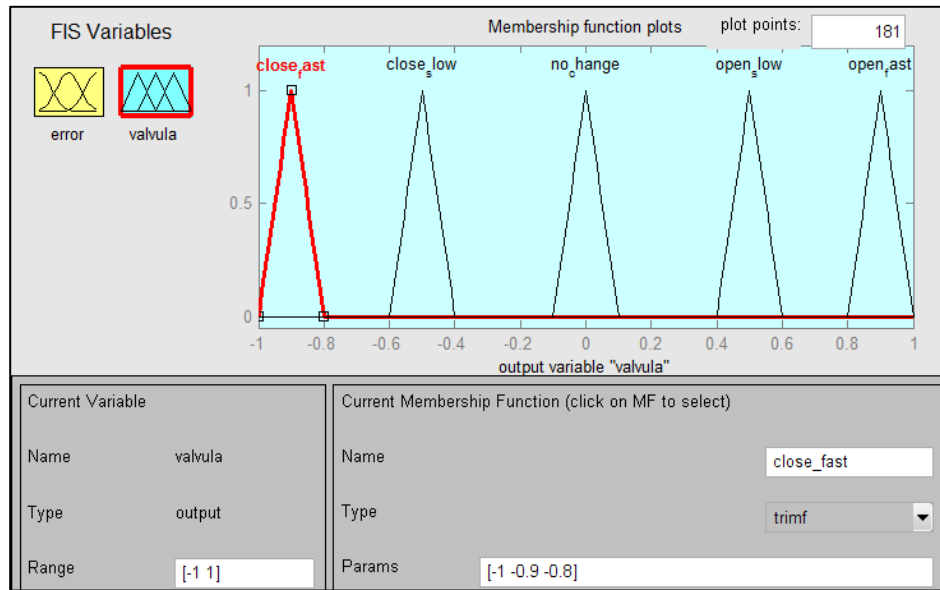


Figura 50. Función de pertenecía para el control de la válvula

Los productos de estas normas o reglas son entonces alineados para determinar la posición temporal de la válvula del actuador. El método de Mamdani esgrima que las entradas sean *fuzzificadas* para obtener la posición de la válvula. El siguiente proceso que ejecuta el método en el algoritmo FL es el de la *defuzzificación* de las reglas y ejecuciones provenientes del controlador y que servirán como salida del mismo. MATLAB utiliza como procedimiento predeterminado el método del centroide para ejecutar estos procesos, y que utiliza como ecuación básica la del centro de gravedad (COG). (Rahangadale & Choudhary, 2011)

En la figura 51 se muestra el controlador Fuzzy, donde se observa la retroalimentación de la salida en la válvula, es decir, la cantidad de agua en el riego; con lo que el bloque de Balance Hídrico define el valor actual de la humedad diferenciado con el valor deseado.

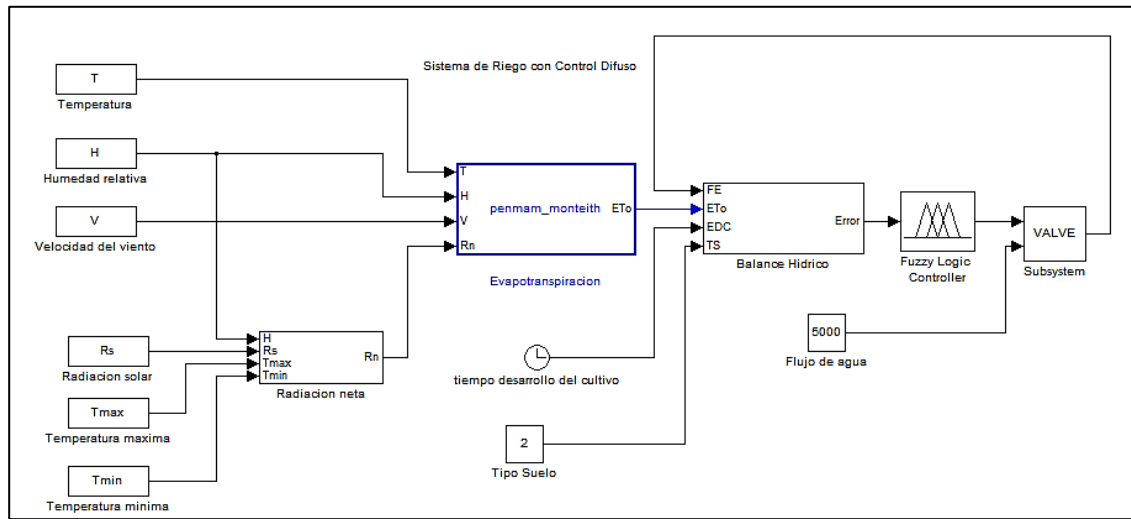


Figura 51. Sistema completo con controlador difuso

- Sistema de Control PID Sintonizado: La configuración del PID se basa en su forma clásica, utilizando la ganancia respectiva ( $K_p$ ) y sintonizando las variables propias del diseño, relacionadas con el controlador proporcional, integral y derivativo  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . El método heurístico utilizado para optimizar el controlador fue la *Sintonización de Ziegler – Nichols* descrita en el capítulo 6 (6.3.3.3). Pero por la dificultad debida al modelamiento matemático y la dinámica de la planta, el comportamiento de ambos métodos propuestos por Ziegler – Nichols no ofrecieron resultados esperados, pues la respuesta mostraba que la señal del error crecía conforme pasaba el tiempo de manera desproporcionada, mostrando un sistema totalmente inestable. Razón por la cual se optó por utilizar métodos de prueba y error para obtener una sintonización ideal, o por lo menos con un error menor al 2%, de manera que sea comparable o parecido al error entregado por el controlador difuso. Para realizar dicha sintonización se tuvieron en cuenta algunas recomendaciones planteadas en el Handbook de Sintonización de Controladores PI y PID (O'Dwyer, 2006) para obtener los valores de las

constantes de manera rápida y garantizada para alcanzar el comportamiento deseado, y que se citan a continuación:

- a. Obtener una respuesta a lazo abierto y determinar lo que hay que mejorar
- b. Añadir un control proporcional para mejorar el tiempo de subida
- c. Agregue un control derivado de mejorar el sobrepico
- d. Agregue un control integral para eliminar el error de estado estacionario
- e. Ajuste cada uno de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  hasta que obtenga una respuesta global deseada.

Luego de aplicar de manera general estas simples sugerencias, se obtuvieron experimentalmente los valores de  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0.1$ ,  $K_d = 0.3$ ; de modo que la respuesta entregada fue la esperada, es decir, un valor del error muy aproximado al 0% y un comportamiento deseado al someter el controlador a varias pruebas de sintonía y estabilidad, para establecer si es sistema de control *seguida* a la señal deseada. Fue así como se procedió a cambiar la Humedad Deseada (señal de entrada del sistema) por una fuente con señal escalón, luego por una fuente con señal constante o por último, una fuente con señal tipo rampa, y para todas ellas el sistema mostró total estabilidad y una respuesta en cuanto a la señal de error muy cercana a la cero. Por lo cual se podría asegurar que el sistema está sintonizado.

En la figura 52, se observa el diseño completo controlador PID, que recibe como señal de entrada la diferencia entre la humedad deseada y la humedad real, es decir, el error existente en cada momento en el sistema.

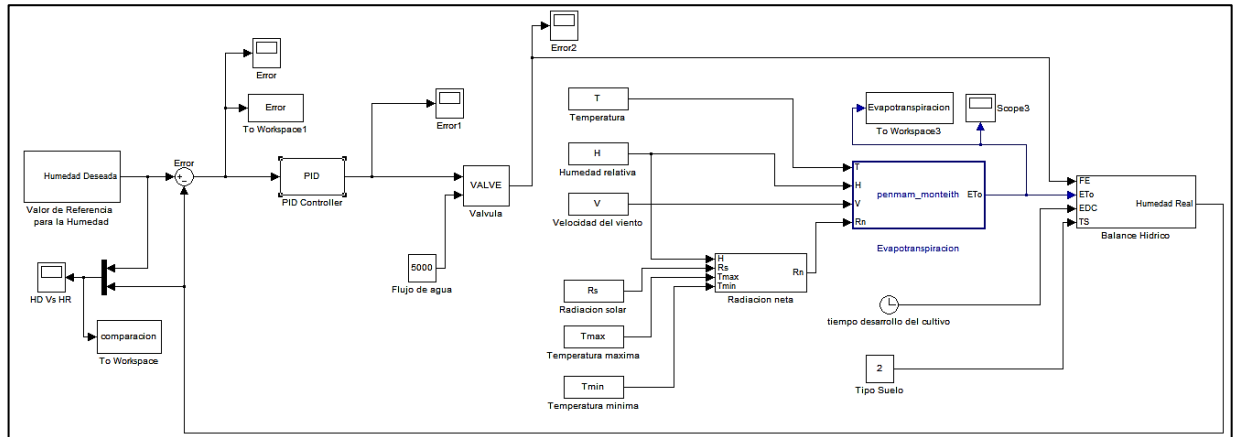


Figura 52. Sistema completo con controlador PID

Cabe anotar que, la cantidad de agua perdida por evapotranspiración, por percolación y escorrentía, debe ser compensada por la disponibilidad de agua del suelo, que a su vez puede ser dependiente del estado de desarrollo del cultivo, factor que puede aumentar en cierto porcentaje la cantidad de agua disponible (criterio clave para configurar la entrada).

### **3. ESTUDIO DE ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE CONTROL.**

Aunque los sistemas de riego por goteo, que cuestan entre 2,000 y 2,500 dólares por hectárea, son todavía demasiado caros para la mayor parte de los pequeños agricultores y para el riego de cultivos de bajo precio, se continúa investigando para hacerlos económicamente más accesibles. Se han desarrollado sistemas de riego por goteo que cuesta menos de 250 dólares por hectárea. Los factores clave para mantener los costos bajos son utilizar materiales sencillos y de fácil transporte. (FAO, 2013)

A pesar de todo esto, optimizar un sistema de riego seguirá siendo la mejor opción, pues si bien los costos de inversión en principio son un poco elevados, los beneficios económicos a mediano y largo plazo siempre serán una motivación más que suficiente. Más sin embargo, para muchos de nuestros agricultores las dificultades económicas que atraviesan, les obligan a pensar siempre en sistemas de buena calidad, pero con costos manejables. Por esto mismo, y a continuación se muestra un estudio económico de las diferentes alternativas que se sugieren para la implementación del sistema en pequeña y gran escala, de modo que se pueda orientar al agricultor en términos de inversión y beneficio en cuanto a la optimización del recurso hídrico y a la reducción en consumo energético.

En primera instancia se define la aplicación en micro agricultura o agricultura artesanal utilizando micro reservorios familiares, es decir en aplicaciones agrícolas para pequeñas parcelas. Para éste caso, los costos de implementación deben reducirse a su mínima expresión de manera que sea viable para cualquier tipo de agricultor bajo las condiciones típicas de nuestro medio.

Para aplicaciones, típicamente pequeñas (hasta una hectárea o 100m de Superficie) y rudimentarias sin arriates ni obstáculos, con arbustos o plantas en un flanco, con una sección de jardín rectangular sin desniveles y que normalmente están compuestas aproximadamente por un 70% de pasto y hasta 30% de plantas, con algunos árboles o arriates y además utilizando la información y los elementos sugeridos en 7.1.3, se podría afirmar que los elementos básicos para una implementación típica de riego serían:

a. Bomba eléctrica de  $\frac{3}{4}$  o 1 HP: Esta potencia es válida dependiendo de la topología del terreno, para laderas o terrenos de baja inclinación y con pocas deformidades superficiales. Para terrenos más irregulares, seguramente la bomba tendrá que ser de mayor potencia dependiendo de las condiciones y la extensión del terreno.

b. Controlador de Irrigación basado en FL/PID Computarizado: para aplicaciones experimentales o académicas, podrían utilizarse tarjetas de adquisición de datos basadas en FPGAs o DSPs, tipo PCI6024E de National Instruments utilizada en estudios parecidos por (Vargas, 2006), (Berk, Stajnko, Vindis, Mursec, & Lakota, 2011), (Tunyasrirut &

Wangnipparnto, 2007) (Antolines, 2010), entre otros. O también podría trabajarse con una tarjeta de adquisición de datos más genérica como la Spartan Serie 3A basada en FPGA, siendo muy utilizadas en el mundo académico para aplicaciones de control. Aplicaciones como las utilizadas por (Hamed & Al-Mobaied, 2011), (Karthik & Binsi, 2013), (El-Mobaied, 2008), (Abdeselem, Sakly, Mtibaa, & Benrejeb, 2013), (Caruso & Tropea, 2010), entre muchas otras. Estas mismas tarjetas podrán ser utilizadas para aplicaciones mayores bajo las mismas condiciones climatológicas, pero para su posterior implementación comercial, se recomendaría utilizar sus versiones light o comerciales hechas a la medida, en lo relacionado al número de entrada/salidas analógicas y/o digitales, velocidad de procesamiento, entre otras; ajustándose a las condiciones del diseño del controlador, a las condiciones inherentes de la topografía, los requerimientos del usuario, etc.

Pero si se requiere una tarjeta con mayores prestaciones y capacidades, se podría recomendar trabajar con la DAQ NI9219, o con NI 9207 con ocho canales cuyo costo supera los US\$900, aproximadamente \$1'800.000 que quizás lo convierte en una alternativa casi exclusiva para proyectos de mediana y gran envergadura. Cabe anotar, que todas estas tarjetas de control, reciben de manera embebida el software desarrollado en Matlab y lo ejecuta conforme se ha desarrollado en sistema de control. Además, para implementar estos dispositivos se requieren elementos adicionales como cables de conexión especializados, tarjetas de conexión (borneras) suministradas por el mismo distribuidor de la tarjeta de adquisición de datos y que por obvias razones incrementa el presupuesto requerido (ver tabla 9)

- c. Una válvula Electromecánica: Según (Schmetz, 2009) el consumo promedio en una hectárea con riego por goteo, típicamente estaría en el orden de los 180 litros/día. Lo que supondría un caudal de 7,5 Lt/hora. Para éste tipo de caudales (Gonzáles, 2012) se proponen válvulas de bola de tres pulgadas, accionadas eléctricamente (24 voltios), cuyo actuar sea gradual y proporcional al voltaje de entrada. Se podrían utilizar marcas reconocidas en sistemas de riego a nivel mundial, tales como Tecnolplastic, EMMSA, Hunter, etc.
- d. Sensor de Lluvia: El sensor de lluvia o pluviómetro se utiliza en el proyecto solo para desactivar el sistema de control en caso de que el nivel de las aguas lluvias supera el valor establecido como mínimo nivel de escorrentías, es decir 25,4 mm ( (Flóres & Ruíz, 1999)).
- e. Gotosos (RLAF) y Cintillas: Según lo definido en 7.1.3, los goteros sugeridos son los autocompensantes y en 7.2 se definen las características esenciales de la cintilla y demás elementos relacionados con el transporte de líquido en el sistema de riego. En la figura 34 se muestra la manera en que están definidos los goteros para la aplicación de control y la cantidad de cintilla requerida para una hectárea (2,2 rollos). A pesar de que la cantidad de goteros necesitados para el sistema de riego siempre va a depender de variables que solo podrían ser definidas de manera correcta en la práctica, la ecuación 30 muestra la relación aproximada del número de terminales (goteros) por hectárea que son requeridos de manera general. Aunque Estos valores son aproximaciones, son de gran ayuda a la hora de presupuestar el diseño de un sistema de riego automatizado convencional.



f. Tubería y materiales: La tubería utilizada siempre estará en sintonía con el calibre de la válvula seleccionada. Si la válvula está definida con un diámetro de tres pulgadas, estas mismas dimensiones deben mantenerse en la tubería, salvo cuando se requiera disminuir el área de acción, de manera que la presión y la velocidad del líquido aumenten conforme lo explica en principio de Venturi (Baylar & Ozkan, 2006).

g. Estudio de suelos con pocas muestras: Dependiendo de la extensión del terreno se sugiere que se apliquen muchas o pocas muestras del terreno para determinar el grado porcentual de material orgánico presente, limo, arcilla, etc; para determinar las propiedades de absorción de líquido del suelo, el grado de concentración de sales y la capacidad de campo, que ayuden a determinar el posible comportamiento de las plantas en ese tipo específico de terreno. En la tabla 9 se muestran los costos por muestra establecidos por el laboratorio de suelos de la Universidad de Sucre, consultados por los autores durante la fase de recolección de información en el proyecto.

h. Mano de Obra: El sistema requiere mano de obra calificada para el diseño del sistema de riego en sí. Todos los aspectos relacionados con los filtros (se deben determinar el número de partes por millón (ppm) de los sólidos en suspensión en el agua para evitar futuras obstrucciones y daños en las tuberías, válvulas, etc.), además se deben resolver y/o evitar posibles problemas de obturación de canales, ataques de plagas, aplicación de fertiriego (ver 7.2i), entre otras que exigen la participación de ingenieros agrónomos y agrícolas en la implementación del sistema de control desarrollado en la presente investigación.

Cabe anotar que para ésta alternativa no se utilizaría la estación meteorológica para determinar los datos referidos al comportamiento de la evapotranspiración. En su lugar podrían utilizarse datos históricos del lugar o de alguna estación meteorológica cercana, tal como se manejó en el presente proyecto de investigación. Adicional a esto, los modelos matemáticos utilizados a lo largo del proyecto podrían suplir los sensores relacionados con las variables que representan la humedad del suelo, la interacción del microclima de la planta, el crecimiento del cultivo, su crecimiento radicular, etc. Con lo que los costos se reducirían de manera sentida, coadyuvando con la viabilidad económica del proyecto.

Teniendo en cuenta todo lo anterior y a manera de conclusión, como se explica en 7.3.2 el sistema de riego más apropiado para los cultivos hortofrutícolas, y de manera especial frutales rastreros como la patilla (ver 7.1) son los sistemas de riego por goteo de alta frecuencia (RLAF), por su eficiencia superior al 90% (Liotta, 2007), bajos costos de implementación y mantenimiento; y porque se adapta de manera eficiente a los sistemas automatizados o controlados electrónicamente, que por supuesto requieren de precisión en cuanto a la cantidad de líquido suministrado y facilidad a la hora de aplicar técnicas complementarias que mejoran el rendimiento y la producción del cultivo, como es el caso del fertiriego (ver 7.2i). La tabla 9 muestra un resumen de los posibles gastos incurridos durante la implementación del sistema de riego propuesto para una hectárea de terreno.

Detalles	Unidades	Precio Unidad	Total
Cinta de Goteo 8mm 1.1 L(7,5 lt/h)AZUD	2,2 rollos	35,000	77,000
Tubo PVC SDR 3"	10 m	10,000	100,000
Tubo PVC SDR 2"	6 m	8,500	51,000
Tubo PVC SDR 1"	8 m	8,000	64,000
Válvula Principal Elec. 3"	1	125,000	125,000
Válvula Secundaria Bola	2	75,000	150,000
Adaptadores (macho/hembra)	15	5,000	75,000
Reductores Lisos	15	3,500	52,500
Materiales de tuberías, gomas, Ts, Codos, etc.	5 c/u	8,500 aprox.	42,500
Filtros de arena vertical 37,6 m <sup>3</sup> (estándar) VITAU	4	14,000	56,000
Electrobomba	1	350,000	350,000
Tarjeta de Ad. Datos Control.	1	350,000	350,000
Adaptadores, Cables, Borneras	1	100,000	100,000
Estudios de Suelos (U. Sucre)	6	30,000	180,000
Varios Adicionales	10% Pres.		159,600
Subtotal	--	--	<b>1,929,600<sup>oo</sup></b>
<b>Elementos Adicionales</b>			
Estación Meteorológica	4,500,000	1	5,560,000
Módulo de Conexión Inalámbrica (GPRS/cdma)	170,000	1	170,000
Computador e Impresora	1,700,000	1	1,700,000
Total	--	--	<b>9,359,600<sup>oo</sup></b>

Tabla 9. Cotización General Materiales para Sistema de Riego Diseñado

A pesar de que la presente investigación se enfoca de manera muy puntual en el modelamiento y el sistema de control, los datos relacionados con costos incluyen en primera instancia los elementos básicos utilizados en la adopción de un sistema de riego convencional y manual para extensiones aproximadas a una hectárea de siembra, y cuyo costo se presenta en \$1'929.600 (aproximadamente 1000 dólares). Si se tiene en cuenta que el sistema de riego propuesto para ese costo puede funcionar para una o varias hectáreas sin aumentar mucho su costos, y que es un sistema controlado electrónicamente, se podría asegurar que es un precio módico o por lo menos manejable para la mayoría de agricultores de la región, que aspiran aumentar sus ingresos apoyándose en la tecnología de los sistemas de riego.

Por otro lado, si lo que se necesita es un sistema de riego de mayor extensión superficial, de mayor cobertura y de mayor precisión con la posibilidad de ser controlado remotamente por los usuarios, recibir información del cultivo en tiempo real a través de la red y de tener la posibilidad de mantener datos estadísticos e históricos del cultivo, se recomienda adicionar los ítems marcados como *elementos adicionales* en la tabla 9. Aunque el costo de implementación se hace casi 5 veces mayor, inversión aproximada de \$9'359.600 (4.850 dólares), el sistema se hace sensible a los cambios climáticos y utiliza los sistemas de información y comunicación TIC para lograr satisfacer los requerimientos del usuario. Para lograrlo, se incluye una estación meteorológica seleccionada por costos y precisión, la WatchDog 2900ET Wheater Station distribuida por Coltein Colombia bajo el número de referencia 3350WD2.

Esta estación incorpora sensores para las principales variables de la evapotranspiración, como anemómetros (sensor de velocidad y dirección del viento), sensores de radiación solar, de temperatura, de humedad relativa y precipitación, bajo los parámetros mostrados en la tabla 10. (Ver Anexo 4: Cotización y hoja de características de la estación meteorológica)

Sensor	Rango de Operación	Exactitud
Temperatura ambiente	-20°C a 70°C	±0,6°C
Humedad Relativa	20% a 100%	±3%
Radiación Solar	1 a 1250 W/m <sup>2</sup>	±5%
Precipitación	Registra cada 0,25 mm	±2%
Dirección del Viento	0 – 360° incrementos de 2°	±5%
Velocidad del Viento	0 – 80 m/s (280 Km/hr)	±5%

Tabla 10. Especificaciones de los sensores incorporados en la 2900ET

Estos costos no incluyen asesorías, mano de obra calificada y no calificada, implementación de fertiriego, etc.

Es bueno recordar, que la fase de implementación del presente proyecto ya está asegurada, por lo menos en su fase experimental, debido a que el autor se encuentra adelantando el

proyecto complementario titulado “Ajuste y Calibración del Modelo de Penman – Monteith en Sincelejo – Sucre”. Presentado en la convocatoria interna No. 009-2013 de la Corporación Universitaria del Caribe, para así poder adquirir los equipos de medida, la estación meteorológica, los dispositivos de control, entre otros. (Ver anexo 5: Contrato pactado y firmado por las partes en cuestión).

En cuanto al beneficio económico de los agricultores en relación con la propuesta del modelo de irrigación planteado en la investigación, se presenta a continuación una aproximación económica relacionada con el beneficio adquirido por utilizar sistemas automáticos de control en pequeña y gran escala en el cultivo de la sandía.

En primera instancia, y partiendo del hecho de que el área de mayor cultivo en el departamento de Sucre es el de la patilla (sandía), que a pesar de ser un cultivo transitorio mantiene en el tiempo un área cultivable relativamente estable (PFN, 2006), se podría afirmar que la inclusión de tecnología aplicada al riego podría generar mayores dividendos para los agricultores dedicados este sector.

A tenor de los resultados obtenidos en algunos estudios como (Aguilar, Nájera, & Pomares, 2011), aseguran que el rendimiento de la sandía resulta significativamente más alto, del orden del 75,9%, con dosis de riego media (1937 m<sup>3</sup>/ha) y con dosis altas de riego por goteo

(2578 m<sup>3</sup>/ha), a pesar de que estas dos últimas dosis no resultaran con diferencias significativas. En países como la India, se ha reportado documentación investigativa que presenta aumentos en el rendimiento del orden del 88% para cultivos de sandía utilizando riego por goteo automatizado, y con ahorros de agua del 36 al 53%. (Asmon & Rothe, 2006)

Así mismo, en un ensayo realizado por (Goyas & Rivera, 1985), en cultivo de sandía con riego por goteo, se comparó el efecto del mismo constatándose que el rendimiento aumentó en el orden del 75% con la dosis de agua más alta (2.280 m<sup>3</sup>/ha). (Maroto, Gómez, & Pomares, 2012).

(Galiano & Chafuelan, 2007) Realizaron un estudio comparativo y económico de la eficiencia del riego en varias especies de sandías. Concluyen aspectos importantes, por ejemplo, el Índice de Eficiencia Productiva (IEP) es bastante alto en el sistema de riego por goteo para cultivos de sandías y con mayor producción de biomasa en el fruto, del orden de 27,15 kg/ m<sup>3</sup>. Así mismo, en cuanto a costos del sistema de riego, su análisis económico determinó que el precio por kilogramo de fruta en el sistema de riego fue de US\$0,38 (\$700 aproximadamente), lo que hace potencialmente muy rentable si se considera además el rendimiento y ahorro en el consumo de agua. El resumen del estudio económico se muestra en la tabla 11.

Producción Agrícola de la Sandía por Hectárea sin Riego (Kg)	Precio Kg de la Sandía	Ganancias Aproximada por Ha sin Riego	Incremento Porcentual Por Riego	Producción Agrícola de la Sandía por Hectárea con Riego (Kg)	Ganancias Aproximada por Ha con Riego
21,336	600	12'801.600	75%	37,338	22'402.800

Fuentes: (ProExport, 2010), (Mayorista, 2013), (Aguilar, Nájera, & Pomares, 2011)

Número de Siembras Por año sin Riego	1	Número de Siembras Por año con Riego	3	Producción Agrícola de la Sandía por Hectárea con Riego (Kg) por año	67'208.400
--------------------------------------	---	--------------------------------------	---	--	------------

Fuente: (Gil, Montaña, Khan, & Gamboa, 2000), (Asmon & Rothe, 2006)

TIR de la Sandía para el Dpto de Sucre	46,4%	Área Frutícola Mínima Rentable (AFMR)	0,6	Producción Agrícola de la Sandía por Hectárea sin Riego (Ton) por año en Sucre	25	Prod. Sandía Ha con Riego (Ton) por año en Sucre	40
--	-------	---------------------------------------	-----	--	----	--	----

Fuente: (PFN, Plan Frutícola Nacional: Desarrollo Frutícola en Sucre, 2006)

Tabla 11. Análisis Económico del Beneficio del Sistema de Riego en Cultivos de Sandía

En la tabla se observa que, la capacidad de producción de la sandía por hectárea aumenta en un 75% si se utiliza un correcto sistema de riego (RLAF), éste aumento significativo en términos económicos se debe principalmente a que las plantas pueden cultivarse a distancias más cortas entre sí (AF&F, 2011), además a través del riego se pueden incluir estrategias de fertilización del cultivo y adición de sustancias químicas que aumentan la calidad del fruto (por ejemplo el sodio, genera en el cultivo de sandía un color rojo más intenso y un mayor grado de dulzura en su pulpa). (Agro-Culture, 2012)



Si en nuestra región se logran mantener estos resultados, el valor de ganancias brutas podría crecer en más de diez millones por hectárea (ver tabla 11), además de que sin utilizar riego de manera automática y optimizada, solo se presenta un período de cosecha durante el año (normalmente, entre los meses de marzo a junio), pero con la implementación de sistemas de riego, se podrían aumentar a tres el número de cosechas promedio por cada año, lo que indudablemente tiene un impacto positivo en la productividad y bienestar económico del agricultor.

Por último, el Área Frutícola Mínima Rentable (AFMR), se estima como el área requerida para generar dos salarios mínimos legales vigentes (SMLV) para una familia de cinco personas, en un cultivo que tenga buenas niveles de adopción tecnológica, es decir que este tecnificado. Para el departamento de Sucre para cultivo de patilla, se ha determinado que el AFMR es de 0.6, es decir, que poco más de media hectárea tecnificada sería suficiente para cubrir las necesidades básicas de una familia agrícola. Y si a eso le sumamos que, en el departamento la TIR de la sandía está estimada en un 46.4%, se concluye que el producto es rentable y con altas posibilidades de éxito en la inversión realizada, haciéndole muy atractivo en términos de ésta variable de tipo financiero. (PFN, Plan Frutícola Nacional: Desarrollo Frutícola en Sucre, 2006)

#### 4. RESULTADOS

Para determinar el lapso de tiempo de la ejecución del sistema se ha considerado el tiempo de vida de la sandía estimado entre el intervalo de 90 – 110 días correspondientes a 3 meses y 20 días, es decir 720 horas de simulación mensual (2.640 horas en total), siendo estas últimas las unidades de tiempo en que se ejecuta el sistema. Para ejecutar correctamente este espacio de tiempo se requirieron un total de 17.280 datos relacionados con las variables climáticas propias del modelo, digitalizados de documentos escritos pertenecientes al IDEAM y a la Universidad de Sucre. Por practicidad, las simulaciones fueron corridas en un formato de veinticuatro horas de trabajo (un día), es decir, que se realizaron corridas diarias del modelo para conocer su comportamiento ante señales de entrada variantes en el tiempo tales como las del modelo de Penman – Monteith, el modelo del tamaño de la raíz, el modelo que establece los requerimientos hídricos, entre otros. Todo esto para conocer de primera mano el rendimiento de los controladores, el consumo de líquido, el trabajo de la válvula, etcétera. Los resultados gráficos de las mismas se muestran en las siguientes figuras:

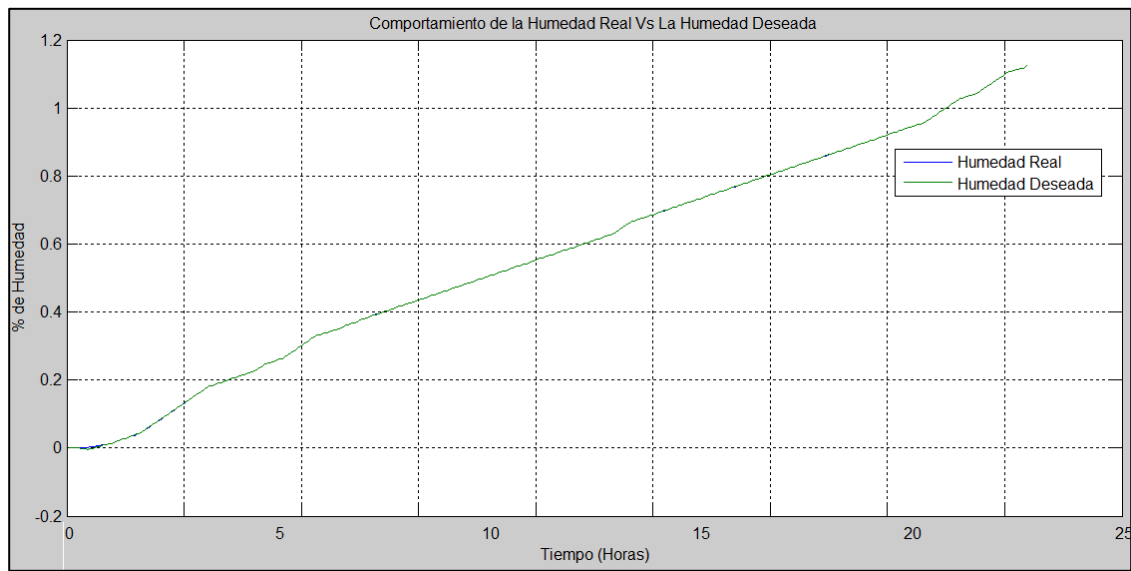


Figura 53. Comparación entre la Humedad Real y la Humedad Deseada en el Suelo para el Controlador PID

En primera instancia, la figura 53 muestra la comparación de la variable de entrada (Humedad Deseada – *señal verde*) y la variable de salida (Humedad Real – *señal azul*). Se puede comprobar mediante esta misma gráfica que el comportamiento del controlador es óptimo, pues a pesar de que la señal de entrada es variante en el tiempo y dinámica, de que el modelo es complejo de definir en espacio continuo, reacciona de muy buena manera y su respuesta ante los cambios de dicha señal de entrada, es generar valores muy próximos de la señal controlable o salida. Luego de realizar una ampliación de más del 100% de la gráfica y de la señal, se pudo observar que la diferencia entre ambas variables, o sea el error del nivel de humedad en el controlador PID, no supera el 0.01%, pues las unidades del eje de las ordenadas están dadas en porcentaje (porcentaje de humedad), por lo que la diferencia entre ambas podría considerarse como ínfima. Así mismo, en la figura 54 se corrobora la anterior afirmación, ya que se observa que la diferencia entre Humedad Deseada y la Humedad Real,

es decir, el error transitorio obtiene un valor máximo observable aproximadamente de  $6 \times 10^{-3}$ , en otras palabras, en el orden del 0,6%. Esto indica que la acción de control pretende llevar rápidamente el nivel de humedad al valor deseado. Una vez más, se demuestra que el sistema tiene un comportamiento óptimo ante los requerimientos de la planta (Javadi, F, Omid, R, & L, 2009).

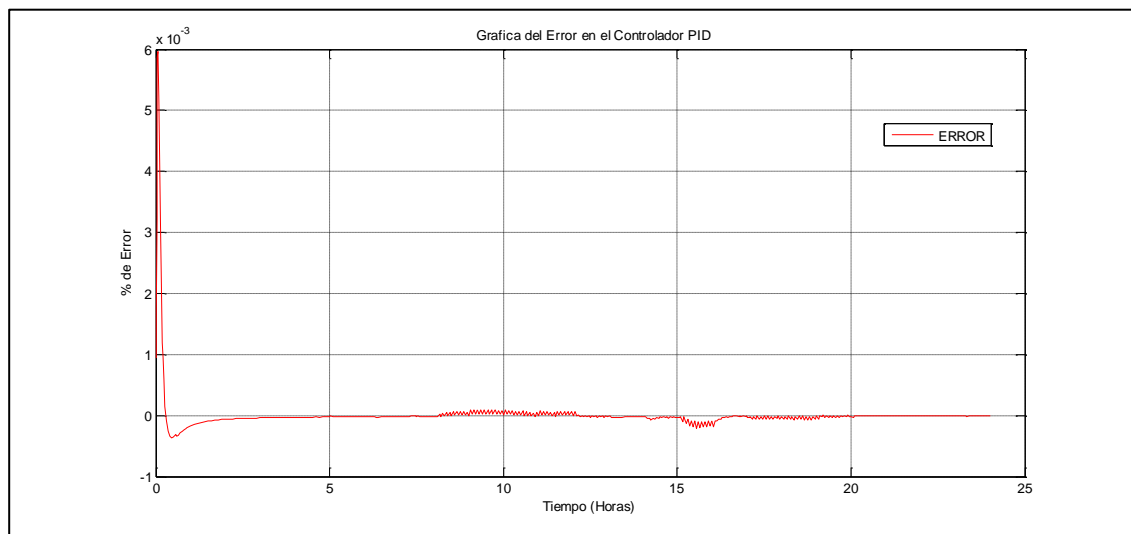


Figura 54. Señal error para el Controlador PID

De ésta misma manera y como prueba para determinar si el controlador estaba bien sintonizado, la señal de entrada fue modificada colocando en su reemplazo una fuente de valor constante, determinando de ésta manera si el controlador mostraba un error mayor al considerado en la gráfica 54. Pero la respuesta fue bastante interesante, pues el controlador reaccionó consecuentemente con la señal de humedad deseada, de modo que el error también se mostró con valores mínimos tendientes a cero (ver figura 55).

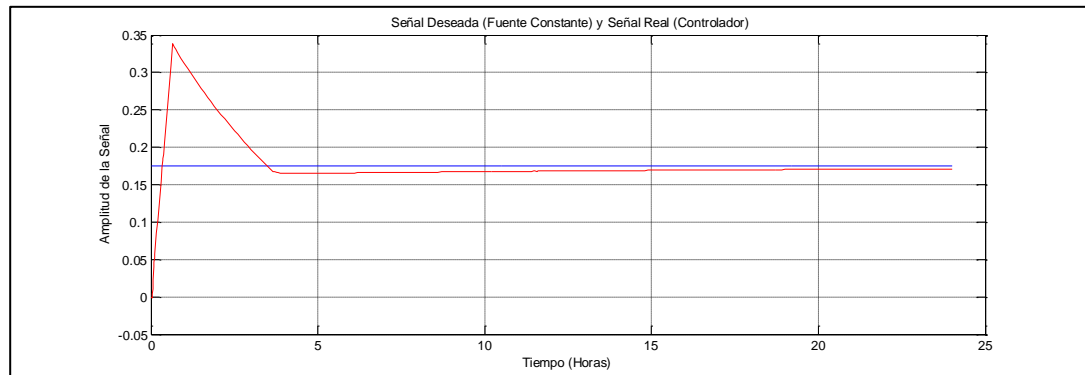


Figura 55. Reacción del Controlador PID Sintonizado ante una alimentación constante

El Controlador en su diseño, muestra que se comporta de manera óptima hasta una señal constante con amplitud de valor aproximado a 0.175, como el mostrado en la figura 55. Para valores menores en magnitud, el comportamiento en términos de estabilidad es cada vez mejor. En otras palabras, siendo  $f(x)$  la fuente de señal constante, se podría concluir que el controlador funciona de manera óptima para el rango de valores constantes  $0 \leq f(x) \leq 0,175$ . Es decir, el sistema es estable para valores de entrada constantes, que sean pequeños en amplitud, lo que indica que el sistema está sintonizado para un comportamiento de baja amplitud y lento en respuesta, es decir, para aplicaciones relacionadas con eventos físicos naturales, como el implementado en el presente proyecto. (Ogata, 2005)

Ahora, para el controlador Fuzzy, la figura 56 muestra la relación entre la Humedad Deseada y la Humedad Real luego de la labor del controlador.

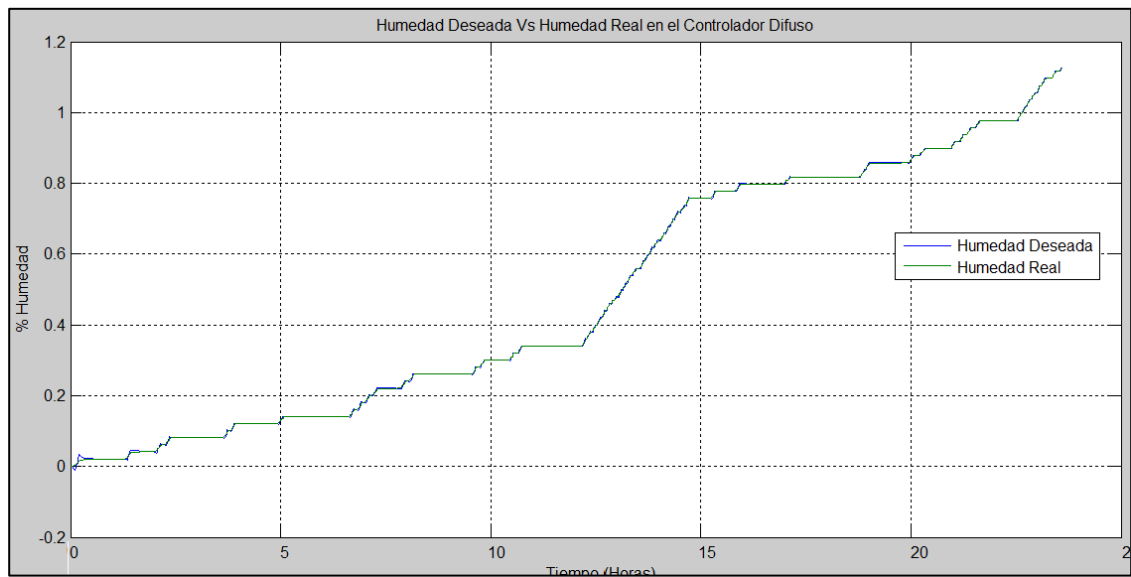


Figura 56. Comparación entre la Humedad Real y la Humedad Deseada en el Suelo para el Controlador Fuzzy

Como puede observarse, el comportamiento del controlador Difuso, reviste cierto parecido con el controlador PID en lo relacionado a la estabilidad, solo que los márgenes de diferencia entre ambas variables (H. Real y H. Deseada) son más pronunciados, pero no mayores al 1,5% (Figura 57). Cabe anotar que esto solo es observable luego de un zoom pronunciado sobre la figura comparativa. Si se revisa el comportamiento de las humedades luego de la acción de ambos controladores, se podría afirmar que la acción del controlador PID Sintonizado es más suave que la acción del controlador Difuso. Podría esto deberse a que la base de reglas del controlador está hecha en base al error (ver tabla 8), por lo que podría ampliarse, de modo que exista un número mayor de reglas en el controlador Difuso reduciendo de este mismo modo el diferencial de Error ( $\Delta E$ ) para cada regla. Partiendo del hecho que, el número de reglas definidas en base al error reducen el mismo, en la medida en que cada regla aplica para un diferencial menor.

En la figura 57 se muestra la señal del error (diferencia entre la humedad deseada y la real) a la salida del sumador en el controlador difuso, y se puede inferir que los valores del mismo en términos porcentuales superan ligeramente el 1.5%, lo cual según lo planteado por (Rahangadale & Choudhary, 2011) es un valor válido para un sistema de control, y aún más para una aplicación agrícola donde los márgenes de tolerabilidad del error pueden ser bastante altos.

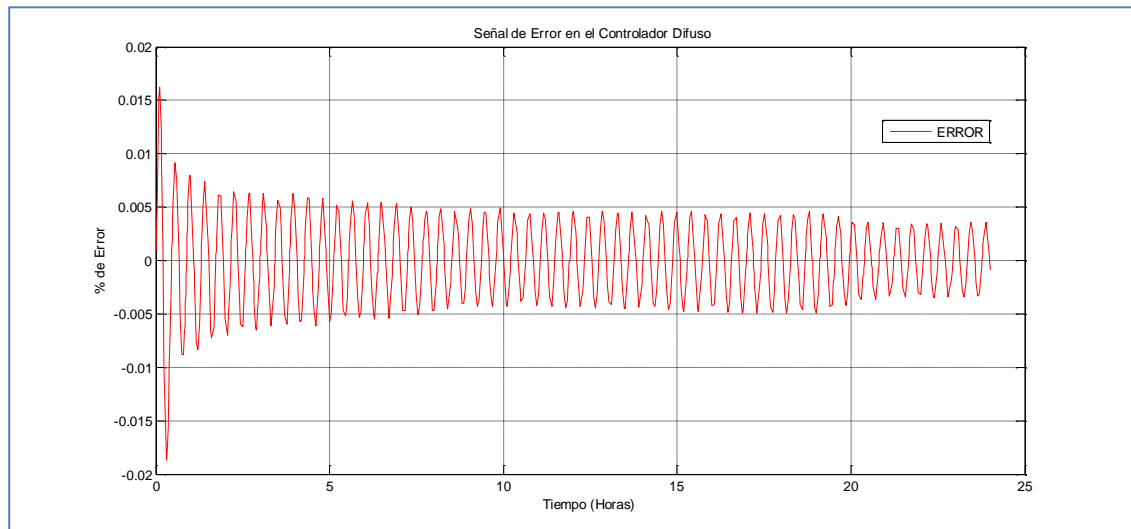


Figura 57. Señal error para el Controlador Fuzzy

Adicional a esto, puede decirse que en ciertas horas del día y durante lapsos de tiempo relativamente cortos el error se hace cero, lo que demuestra la estabilidad del sistema y la optimización del recurso hídrico; desafortunadamente es oscilante y con un período de oscilación aproximado de 2,4 cliclos/hora, pero con valores de amplitud casi constantes de  $\pm 1,5\%$  aproximadamente.

En cuanto a la posición de la válvula, para ambos controladores se obtiene su máxima expresión al promediar el medio día, es decir entre las 9.30 y las 15 horas. Horario que coincide con los horarios de máximos requerimientos hídricos (ver grafica 61) en cada planta. A continuación se muestran las gráficas comparativas en cuanto al trabajo realizado por las válvulas para cada uno de los controladores.

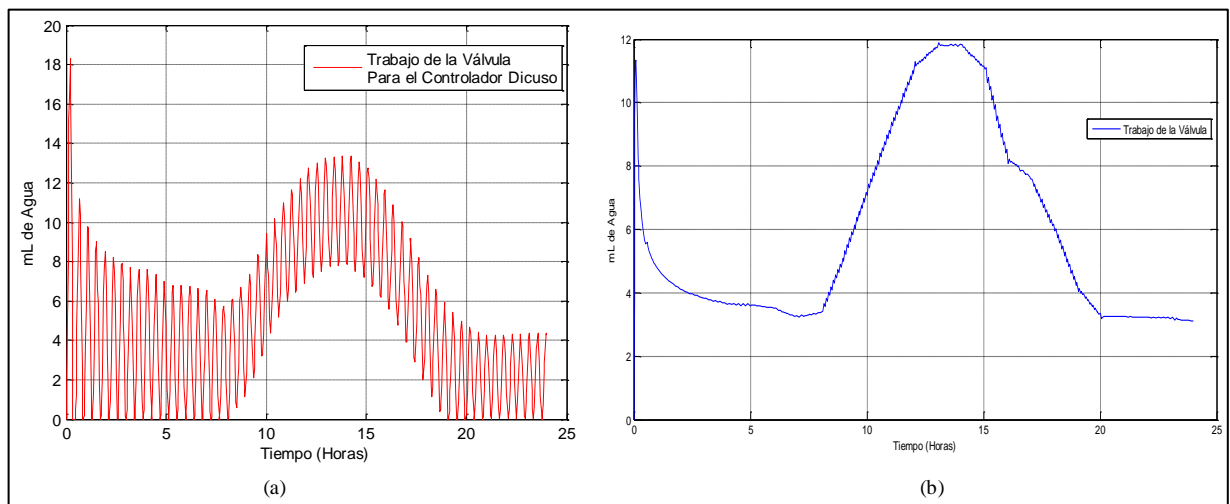


Figura 58. Señal de trabajo de la válvula para los Controladores Fuzzy (Izq.) y PID (Der.)

Como puede observarse, el máximo trabajo realizado por la válvula cuando el controlador es el difuso (Fig. 58a), se produce aproximadamente entre las trece y catorce horas del día, con un valor cercano a los trece mililitros (12,6755 mL). Esto sin tener en cuenta el gasto de inicio (primera hora de riego). A diferencia con el controlador PID (Fig. 58b), el controlador difuso muestra un riego alternado, es decir, el riego no es continuo, sino que en largos períodos de tiempo la cantidad de agua es oscilatoria, lo que incrementa ostensiblemente el



trabajo en la válvula, pero así mismo el máximo consumo supera los 18,29 mililitros, durante la primera hora de trabajo, y en promedio el consumo alcanza los 1,7533 mililitros de agua.

De manera análoga, en la figura 58b se muestra el consumo de agua o la cantidad de agua suministrada al riego por parte del controlador PID. Se observa que el controlador PID provee permanentemente del riego al cultivo, su accionar es continuo. Al igual que en el controlador difuso se puede afirmar que en las horas del mediodía se produce el máximo requerimiento de agua y por tanto la máxima entrega de líquido, alcanzando su máximo valor de entrega de 11,89 mililitros de agua aproximadamente a la 13,07 horas del día (01:04 pm). Adicionalmente, se puede afirmar que el trabajo efectivo realizado por la válvula cuando se utiliza el controlador PID es mayor, esto se observa por la mayor área bajo la curva del controlador PID que en el controlador Difuso, y porque el valor promedio (media aritmética) del consumo en la válvula del controlador PID es del orden de 6,333 mL/hora, mientras que en el difuso 1,7533 mililitros, lo cual representa solo el 27,68% del líquido suministrado por el controlador PID. Pero con el atenuante de que en el control difuso la válvula trabaja de manera discontinua y punzante, generando picos altos y cortos en el tiempo no recomendados en términos de estabilidad y en ahorro energético del sistema.

En las figuras 69 y 70 se muestra el comportamiento o trabajo realizado por el controlador para mantener el error lo más cercano a cero de manera rápida y estable. Si se mira el controlador PID, se observa que la mayor labor debe realizarla durante las primeras dos

horas del día. Luego, el trabajo del controlador se reduce ampliamente de modo que es cercano a cero. Esto se puede explicar porque, en primera instancia el controlador debe romper la inercia del sistema que se está controlando, cumpliendo con el comportamiento de un sistema de control convencional que realiza un trabajo importante siempre al inicio de la acción, en éste caso, la apertura de la válvula llega a su máxima expresión en el orden del doce por ciento (12%), producto de las necesidades de la planta que en un principio cobran gran importancia.

Así mismo, para el controlador difuso, tal como se muestra en la figura 60, se observa que el trabajo positivo, es decir, cuando la señal deseada es mayor que la señal real, se presenta en la mayoría de tiempo de riego, trabajando de manera oscilante y sostenida durante las primeras 20 horas de trabajo, con excepción de las dos primeras horas, donde se alcanzan los mayores valores para riego cercanos al tres por ciento de la apertura de la válvula, y terminar luego de las veinte horas, con oscilaciones menores en amplitud pero sostenidas igualmente y controlando la diferencia en base a un trabajo negativo, es decir, cuando la señal real es mayor que la señal deseada, con un crecimiento parecido en torno al trabajo realizado por el controlador durante las primeras veinte horas de trabajo.

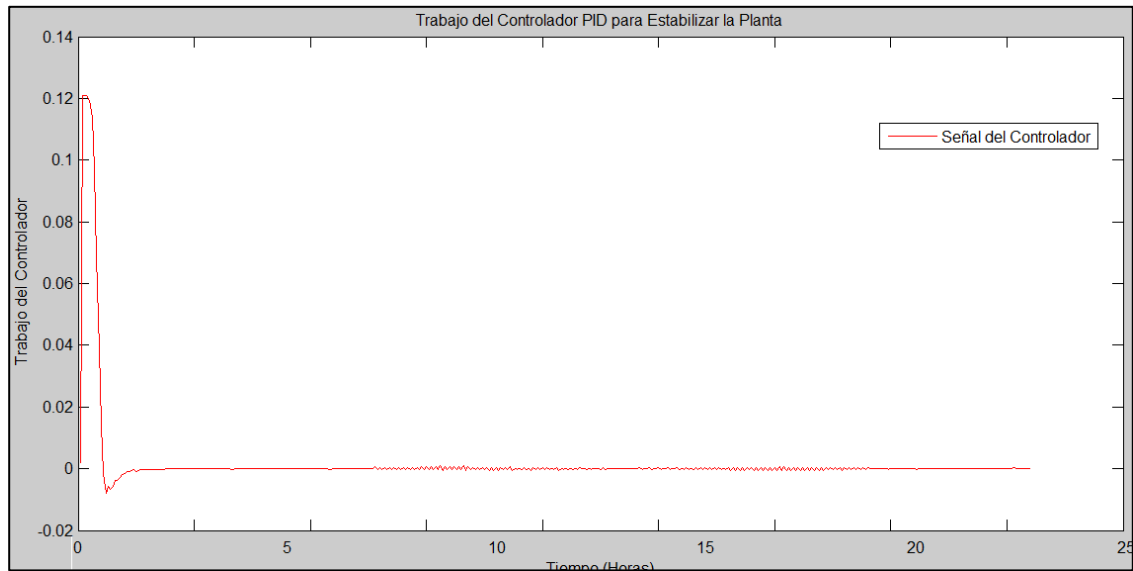


Figura 59. Señal de trabajo del Controlador PID

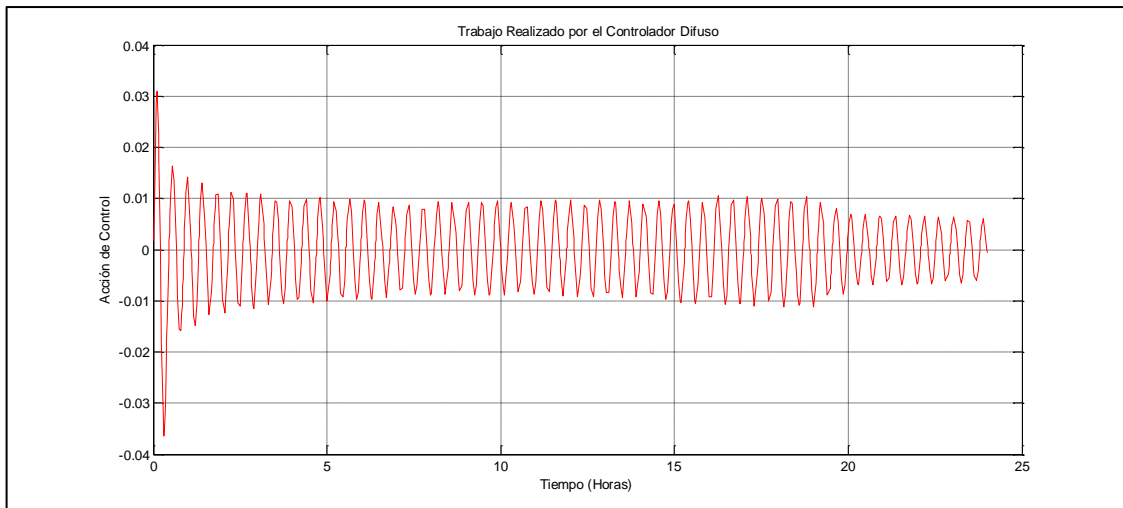


Figura 60. Señal de trabajo del Controlador Fuzzy

Es importante recordar que, todas las figuras entre la 53 y la 60 muestran lo ocurrido durante un día promedio de simulación, en otras palabras, se muestra el comportamiento típico de los controladores a lo largo del período de vida plántula o fase inicial de la planta, o si se quiere,

cualquier otra fase de desarrollo de la planta. Para ello se incluyeron los valores horarios de cada una de las variables climatológicas que alimentan el modelo de Penman – Monteith, y que en base a estas variables, responde gráficamente como se muestra en la figura 61. En ésta figura se puede observar que el máximo requerimiento hídrico de cada planta, en relación con las variables del microclima, se presenta entre las nueve (9 am) y las veinte horas del día (8 pm). Alcanzando un valor máximo de 17,5458 mililitros de agua (aproximadamente a las 13,5 horas), y un valor mínimo de requerimiento líquido de 0,8558 mililitros de agua, durante las primeras y las últimas horas del día.

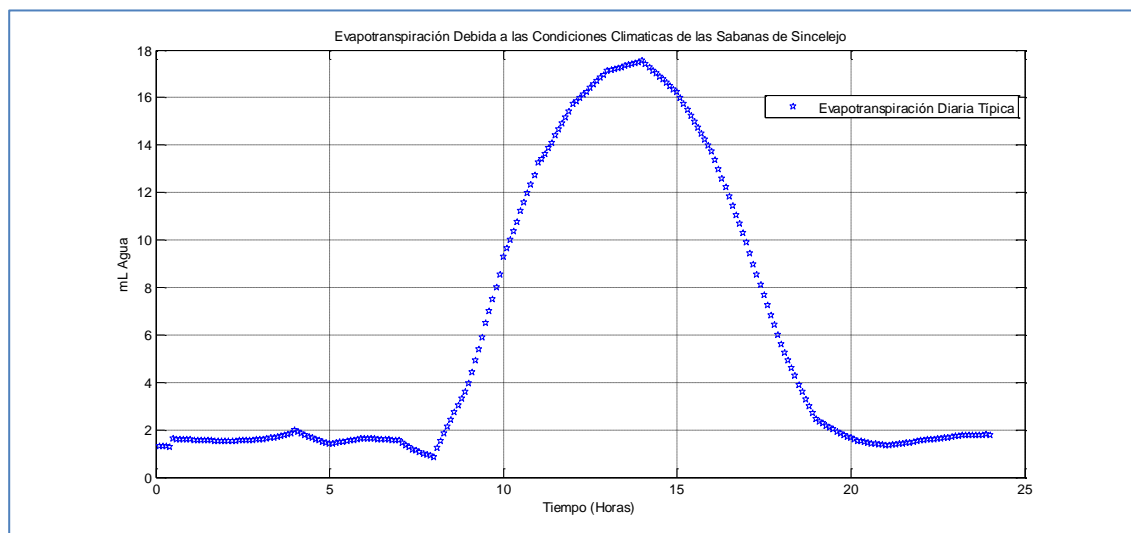


Figura 61. Comportamiento de la Evapotranspiración

El comportamiento gráfico del modelo de Penman – Monteith (ecuación 1), mostrado en la figura anterior, responde al comportamiento típico de éste modelo en distintas partes del

mundo (Nghi, 2008), (Howell, 2010), (Gong & Xu, 2005), (Adeboye & Osunbitan, 2010), (Mundo-Molina, 2008), (Parameters, 2005), (Allen R. , 2005), entre otros. Lo cual demuestra la correcta aplicación del modelo de Penman – Monteith basado en los parámetros climatológicos circunscritos a la región Sabanas del departamento de Sucre.

Por otro lado, si se variara el valor de  $K_c$  (Edad fenológica de la planta), o se cambiara el tipo de cultivo, de modo que dicho valor de  $K_c$  represente otra etapa del crecimiento de la planta, con otros requerimientos hídricos, el comportamiento del controlador sería el mismo, salvo que los valores de requerimientos de agua se aumenten o reduzcan máximo en un 10%, dependiendo del tipo de planta y de la fase de crecimiento.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La salida del controlador, como se ha escrito anteriormente, está definida por la diferencia entre la humedad real del sistema y la humedad deseada, en las figuras 53 y 56 se muestra la relación entre la humedad deseada y real del sistema para ambos controladores, presentándose un margen del error tendiente a cero en el controlador PID (0,6% como máxima amplitud), mientras que para el controlador difuso el error aunque bajo, se muestra en el orden del 1,5%, que según (Rahangadale & Choudhary, 2011) o (Pivoňka, 2006) es un valor válido para el desempeño del regulador, sobre todo para aplicaciones agrícolas donde los tiempos de respuesta de las variables que interactúan con el sistema en sí, no requieren altas velocidades y/o extremada precisión. Para un análisis más detallado, en la figura 62 se muestra un comparativo muy diciente entre el error entregado por el sistema basado en el controlador difuso (*señal azul*) y el pid (*señal roja*).

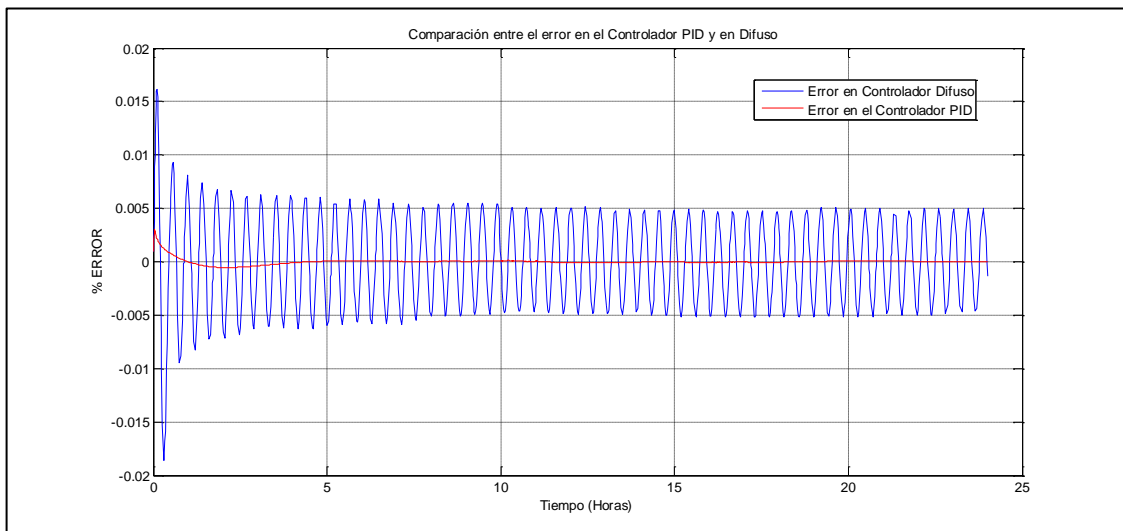


Figura 62. Comparación del Error en el Controlador PID y Fuzzy

Puede verse claramente que el error del modelo de irrigación basado en el controlador pid es mucho menor que el difuso. El valor promedio de la señal de error en el pid durante las veinticuatro horas del día es de  $1,047 \times 10^{-5}$ , es decir del orden del 0,001% aproximadamente. Mientras que para el difuso, el valor promedio del error durante este mismo período de tiempo es del orden del  $3,4379 \times 10^{-5}$ , es decir 0,0034% aproximadamente. Es evidente que ambas magnitudes del error, son bastante bajas, pero aun así, el error en el controlador difuso es aproximadamente 3,3 veces mayor que el error transitorio en el controlador pid durante un día de trabajo (24 horas).

También sería interesante comparar los comportamientos de los controladores en base al trabajo realizado por cada uno de ellos para mantener estable es sistema.

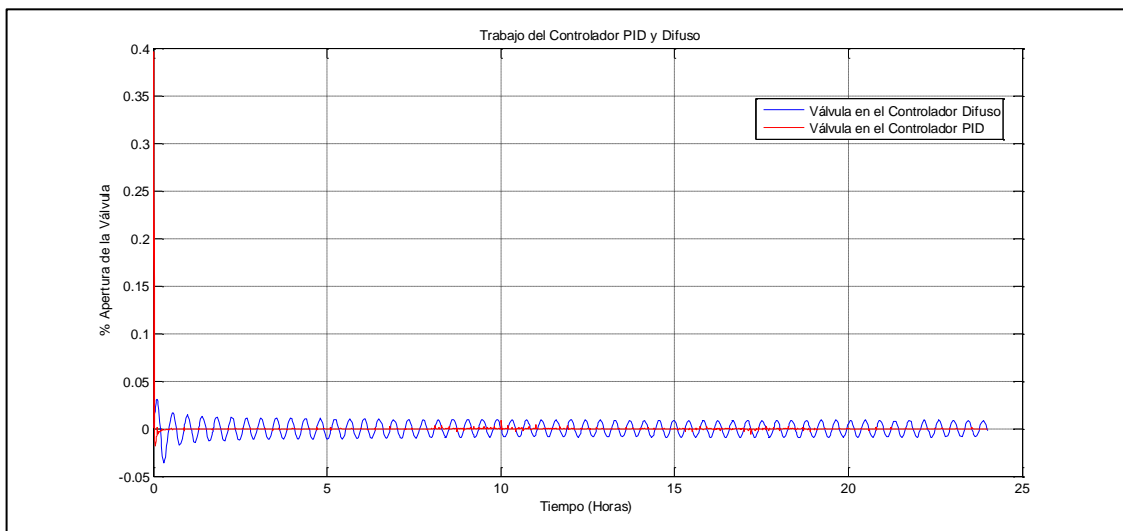


Figura 63. Comparación Trabajo del Controlador PID y Fuzzy

Puede observarse en la figura 63 que en términos de apertura de la válvula para determinar el riego (acción del controlador), ambos en un inicio entregan el mayor esfuerzo, 3,07% de apertura para el difuso y 39,65% de apertura para el pid. Aunque el sistema de irrigación basado en el controlador difuso muestra un valor de apertura inicial diez veces más pequeño que el requerido por el controlador pid, durante el resto del día mantiene un comportamiento oscilante alrededor de cero con una amplitud de  $\pm 1,08\%$  y período de oscilación aproximada de 2,4 ciclos/hora, y con una media cercana al 0,11% de trabajo. Mientras que el controlador pid, luego del pico inicial cercano al 40%, estabiliza la planta de tal manera que durante el resto del riego, su accionar es bastante bajo, casi de cero. De modo que su promedio de trabajo en cuanto a la señal de control para la apertura de la válvula es del orden de 0,0062% lo que muestra largos períodos de inactividad. Es decir, que el trabajo del controlador difuso es 17,7 veces mayor. Esto se podría explicar, en que la estabilidad del controlador fuzzy no está asegurada en las mismas proporciones del controlador difuso, por lo que sería recomendable ampliar la base de reglas en dicho controlador.

Por último, se relaciona la gráfica comparativa del accionar de la válvula, en cuanto a la cantidad de líquido suministrado (figura 64). El accionar de la válvula para ambos describe de manera general un comportamiento promedio muy parecido, la diferencia radica claramente en las oscilaciones del controlador difuso. El máximo valor de líquido suministrado en mililitros por la acción del controlador difuso es de 18,2038 ml, y en el sistema basado en pid, 12,6755 ml. Pero el consumo promedio diario de líquido es mayor para el pid 5,1458 ml mientras que para el fuzzy el valor promedio de entrega de líquido



durante el día fue de 3,4105 ml. De modo que se podría afirmar que la válvula en el controlador pid trabaja en promedio de 1,5 veces más que la válvula en el controlador difuso en un día.

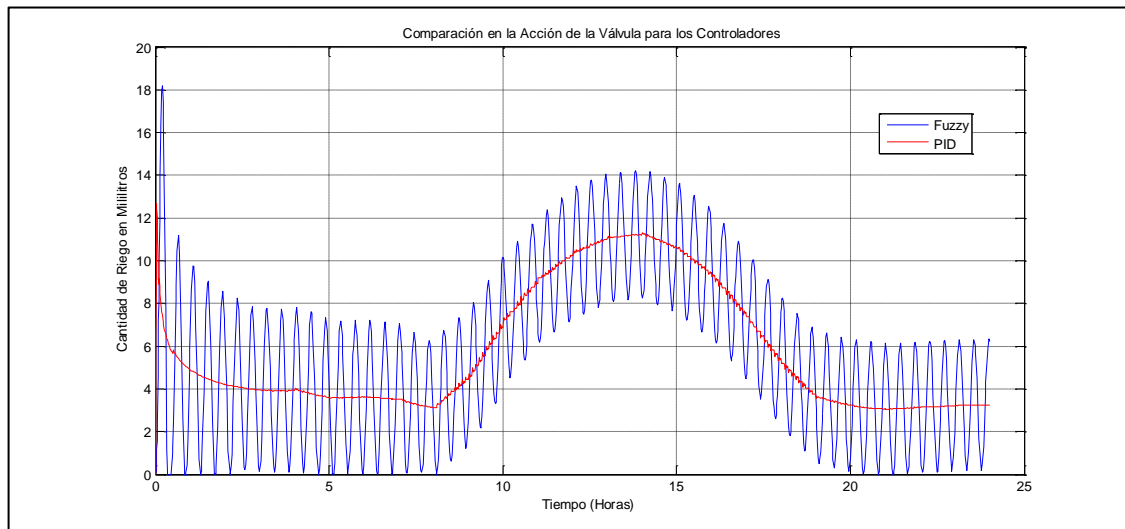


Figura 64. Comparación Acción de la válvula en el Controlador PID y Fuzzy

De manera complementaria y aclaratoria, para los expertos en suelos y agricultura, la humedad deseada se considera como la humedad fácilmente aprovechada por la planta, y está definida teóricamente por (Flóres & Ruíz, 1999) y ampliamente explicada y argumentada por (Shaxson & Barber, 2005).

En sentido estricto el regulador en ambos casos trabaja en mayor grado durante los primeros minutos del riego *para superar la inercia* del sistema en cuanto a requerimientos hídricos, para luego reducir su trabajo de manera pronunciada.

Por otro lado, el sistema de control luego de varias pruebas mostró su funcionamiento óptimo ante diferentes tipos de entrada, y ante perturbaciones relacionadas con los datos climáticos. Esto puede observarse en el anexo 1,2 y 3; donde se muestran las gráficas que explican el comportamiento de los controladores ante dichas perturbaciones (temperaturas extremas, velocidades del viento muy altas, radiación alta, etc.). Fácilmente puede inferirse que el sistema mantiene su buen comportamiento en términos de estabilidad, optimización del recurso hídrico, aún bajo estas condiciones extremas que supondrían que el controlador trabajará bajo condiciones extremas y/o difíciles.

Para ambos modelos de irrigación basados en controladores (difuso y pid) se puede asegurar teniendo en cuenta que el sistema es retroalimentado, que el consumo de agua dependerá de la cantidad anterior de líquido que se haya proveído al suelo, por lo que el controlador rápidamente alcanza la estabilidad en el sistema.

A pesar de su simplicidad (Duarte, 2012), el controlador FL demostró ser mucho más versátil y fácil de utilizar (sintonizar, programar, etc.) pero el PID aseguró mejores resultados en

cuanto a estabilidad, muy a pesar de que el controlador difuso utilice menor cantidad de agua (Figura 63 y 64).

El controlador difuso logró mantener la estabilidad en valores aceptables de forma rápida y suave, sin interacciones perjudiciales ni valores de sobrepico peligrosos para el buen funcionamiento de la planta. Pero manteniendo oscilaciones controladas entorno al error, aunque el cambio en la salida del controlador no es abrupto, y su amplitud es baja. En cuanto al tiempo en que ocurren es muy pequeño, sugiriendo con esto, que el controlador describe una respuesta suave, que en términos de error corresponde a menos del 2% en el momento de mayor magnitud, lo cual demuestra que el sistema sugerido responde a las exigencias establecidas desde un inicio en cuanto a los requerimientos mínimos para los sistemas de control. (Rahangadale & Choudhary, 2011)

## 6. CONCLUSIONES

En este estudio de simulación se ha utilizado un modelo de irrigación para comparar dos tipos de controladores, primero un controlador Difuso y luego un método tradicional (PID), utilizando modelos matemáticos y físicos validados que revisten un amplio valor científico en estudios de suelos, climatológicos y de requerimientos de líquido. Por esto mismo, se podría concluir que la principal fortaleza del presente proyecto de investigación radica en el modelamiento de las muchas variables y aspectos físicos utilizados en un estudio de requerimientos hídricos en cultivos a campo abierto. Por lo que a pesar de que desde los objetivos se planteó el análisis comparativo de los controladores, el proyecto dio un giro importante, que en principio no era sospechado para detenerse en el correcto modelamiento de todas las variables significantes en el microclima de las plantas en un sistema de riego.

A raíz de esto, en el proyecto se emplean modelos matemáticos y físicos como el de Penman Monteith para evaluar la evapotranspiración de las plantas, el de Norero para modelar el crecimiento diario la raíz de la planta y su impacto en el consumo hídrico, el de Liotta para evaluar los volúmenes de agua para riego RLAF en cultivos de sandía, el modelo de James para el proceso de balance de flujo; Mendoza y Peñaloza con su modelo para el estudio de suelos en la Sabana Sincelejana, el modelo de Kostiakov – Lewis para calcular la velocidad de infiltración del agua en el suelo, entre otros. Y los resultados entregados por el modelamiento dinámico de todos estos modelos resultó excelente, pues una de las

conclusiones más importantes de la investigación es que se entrega como producto a la comunidad científica una adaptación de todos estos modelos para recrear los requerimientos hídricos globales de las plantas, de la manera más aproximada posible a la realidad y demostrando que éste es un proceso totalmente controlable en el tiempo, y utilizable para estudios orientados a la producción agrícola en pequeña y gran escala. Además, totalmente ajustable a los diferentes tipos de suelos existentes en la región de cobertura del proyecto y en cualquier otra, y un modelo totalmente flexible y/o adaptativo para ser utilizado en cualquier tipo de cultivo hortofrutícola.

En cuanto al comportamiento de los controladores, las gráficas que representan las salidas de ambos sistemas mostraron que estos operan en un rango adecuado y muestran un alto grado de estabilidad. Y aunque, el rendimiento del controlador PID muestra un mejor desempeño, se podría asegurar que no está tan alejado de la respuesta del difuso, e incluso, se podría decir que podría aportar mejores resultados si se realiza una mejor sintonización ampliando la base de reglas difusas, de modo que en el controlador *trabaje* con un mayor número de reglas que aseguren de forma más efectiva la minimización del error.

Durante la investigación se presentaron inconvenientes relacionados con el encapsulamiento de todo el sistema del microclima de la planta, en una función de transferencia modelada en el tiempo, de modo que pueda ser controlada a través de un modelo matemático (función de transferencia) que facilite el ajuste de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  utilizadas en el controlador

PID, con el fin de que pueda implementarse de manera eficiente y sencilla, estudiando su estabilidad en términos de ganancia, polos y ceros utilizando algunos métodos tradicionales, tales como el Lugar Geométrico de las Raíces, Siegler Nichols, etc. Por lo que se recurrió a la sintonización en base a prueba y el error utilizando técnicas sugeridas por autores como (O'Dwyer, 2006) para encontrar la sintonía precisa. En cambio, el controlador fuzzy se muestra como una alternativa importante debido a su facilidad de aplicación relacionada con su interfaz intuitiva y de fácil aplicabilidad, de modo que la sintonización se realiza en base a reglas orientadas a la corrección del error que se produce al comparar las funciones de entrada y salida de la planta.

En definitiva, para la presente investigación y bajo los parámetros utilizados en la misma, el modelo de irrigación basado en el controlador PID alcanzó un mejor rendimiento en términos de estabilidad, consumo energético y en confiabilidad, pero el controlador difuso utiliza menos cantidad de líquido para mantener los requerimientos hídricos, no obstante la permanente intermitencia en su funcionamiento (Figura 59 y 60) que se presume hace al controlador susceptible al aumento en el consumo de energía. Pero en términos generales, se ha logrado definir un modelo hídrico que independiente al tipo de controlador, demuestra ser controlable y manipulable dinámicamente. Y sobre todo, esto cobra importancia a la hora de la implementación en campo, pues el modelamiento ahorra mucho dinero y tiempo por el hecho de que algunos modelos sustituirían la compra de sensores de precisión como los sensores de humedad por ejemplo y que de hecho, son bastante costosos. Además facilita la

implementación del mismo en su posterior implementación en otros tipos cultivos, terrenos, tipos de riego, etc.

El objetivo principal de esta investigación era determinar mediante simulación una alternativa para control automático inteligente para sistemas de irrigación basado en lógica difusa o en un controlador PID, que garantizara la eficiencia y efectividad del uso del agua en la agricultura teniendo en cuenta los requerimientos hídricos del cultivo. Pero resultó que el modelamiento realizado, fue tan eficiente que terminó siendo de proporciones válidas para cualquier tipo de controlador, a pesar de que el PID demostró mejores prestaciones y rendimiento presentándose como buena alternativa para sistemas de irrigación en el sector agrícola del departamento de Sucre y ser incluido por los agricultores en proyectos de inversión.

En definitiva, éste proyecto de aplicación agrícola que incluye la injerencia de los sistemas de control y la inteligencia artificial, amplía la idea de que la agricultura colombiana debe evolucionar hacia la investigación y tecnificación de la técnicas agrícolas que puedan potenciar la producción agrícola, la calidad de sus productos y hacerlos competitivos en los mercados internacionales, y una estrategia fundamental consiste en la tecnificación sostenible de los sistemas de riego empleando técnicas de automatización y control inteligente, que permitan alcanzar una mayor productividad y un mayor grado en la optimización del uso del agua para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, y que pueda responder a las altas demandas de la población, ayudando a la generalización de la

seguridad alimentaria y contrarrestar de alguna manera a las inclemencias y variabilidades propias del clima.



## 7. RECOMENDACIONES

Para refinar este diseño del controlador se hace necesario que dentro de las propiedades del suelo, se tenga para cada variable su ecuación respectiva que lo modele. En el caso específico de la consideración del punto de marchitez permanente se asumió como una constante debido a que no se ha realizado en el municipio de Sincelejo una investigación que vaya dirigida a la obtención de modelo matemático que modele dicho punto de marchitez permanente en los tipos de suelo que predominan en este municipio. Esto se podría resolver implementando un estudio de suelos en distintas partes del departamento o en la Sabana sincelejana, de modo que se obtengan muestras y datos suficientes como para realizar un procedimiento estadístico aplicado, como por ejemplo el de regresión de mínimos cuadrados y de ese modo establecer el modelo matemático requerido.

Si se desea cambiar el tipo de cultivo, simplemente se deben identificar sus correspondientes coeficientes del cultivo para cada etapa de su desarrollo, como también la máxima longitud que puede adoptar su sistema radicular, e ingresarlos en el controlador, y éste funcionará de manera óptima basado en el modelamiento básico planteado en la presente investigación, pero asumiendo los cambios ingresados por el tipo de cultivo.

El diseño de la base de reglas del controlador se hizo de manera heurística, y solo utilizando cuatro reglas, lo que demuestra que el modelo responde a las estrategias de control, para una futura

investigación se recomienda utilizar un mayor número de reglas y llegar a ellas de forma determinista utilizando diferentes tipos de estrategia diseñadas para ello. (Gao, Zhang, & Chen, 2013)

Es recomendable para la implementación de éste diseño en amplias áreas de cultivo, que dentro del protocolo de modelación de los distintos elementos que componen el modelo de la planta se puedan calibrar mediante estudios de suelos en cada uno de los terrenos donde se desee implementar el diseño planteado. Lo que seguramente, ayudará a afinar los resultados alcanzados en el modelo logrado en la presente investigación, y que logre responder mejor a las complejas interacciones clima–suelo–planta.

Con miras a ampliar la investigación, se podría incluir la simulación de un sensor de pluviosidad que deberá medir el volumen de líquido que cae por hora en la región o área cultivada. Si la precipitación pluvial es menor de 25.4 mm, se considera que toda la precipitación se infiltra, pero si es mayor, la infiltración se podría calcular con la función que presentan (Baier & Robertson, 1966). Además, para mejoras futuras se podría incluir un modelo matemático determinístico que registre el comportamiento simulado de la escorrentía y de la pluviosidad en la zona a cultivar, de modo que no se tengan que asumir rangos y valores aproximados para definirla dentro del controlador.

También podría pensarse en relacionar la dinámica de la humedad del suelo con modelos de productividad en el cual se contrasten los rendimientos del cultivo en función del comportamiento de la humedad del suelo.

Este tipo de investigaciones podrían ser el inicio para trabajar en la aplicación de los modelos de irrigación a cielo abierto o en invernaderos para siembras de plántulas o cultivos débiles y sensibles a las variaciones climáticas, al estrés hídrico o simplemente porque son especies originarias de otras partes del mundo y que requieren condiciones de crecimiento muy específicas y/o especiales.

Finalmente, se puede recomendar para optimizar los resultados generados por la *planta* en el modelo de irrigación sugerido, teniendo en cuenta que no se utiliza una función de transferencia para dicho modelo, utilizar métodos de optimización tales como el algoritmo simple de Nelder – Mead, el cual es muy utilizado en investigación como algoritmo de optimización numérica para minimizar una función objetivo en un espacio multidimensional. Lo que seguramente, en una investigación orientada hacia la optimización del modelo, se podrían mejorar los resultados arrojados por el mismo.

# **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Graficas de la simulación del modelo de irrigación durante un mes de trabajo (720 horas)

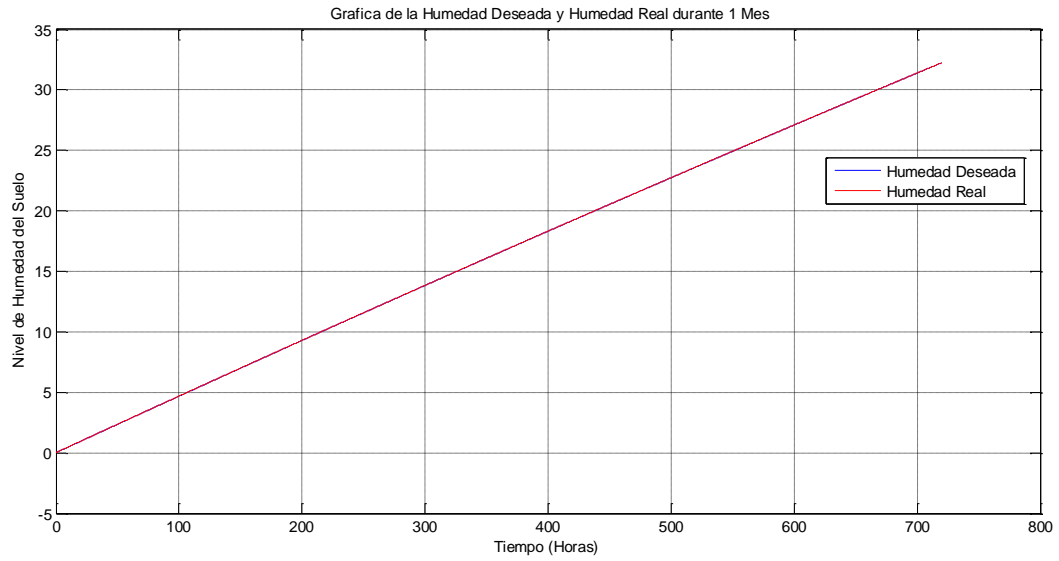


Figura 65. Respuesta del Controlador para la humedad deseada durante un mes de crecimiento

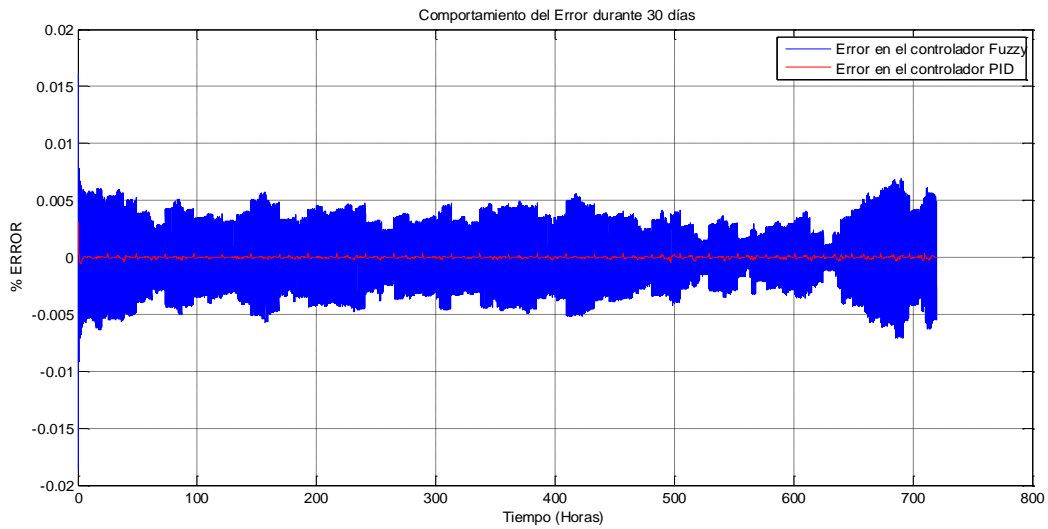


Figura 66. Comportamiento del Error del sistema de control (PID/FL) durante el mes de simulación (720 Horas)

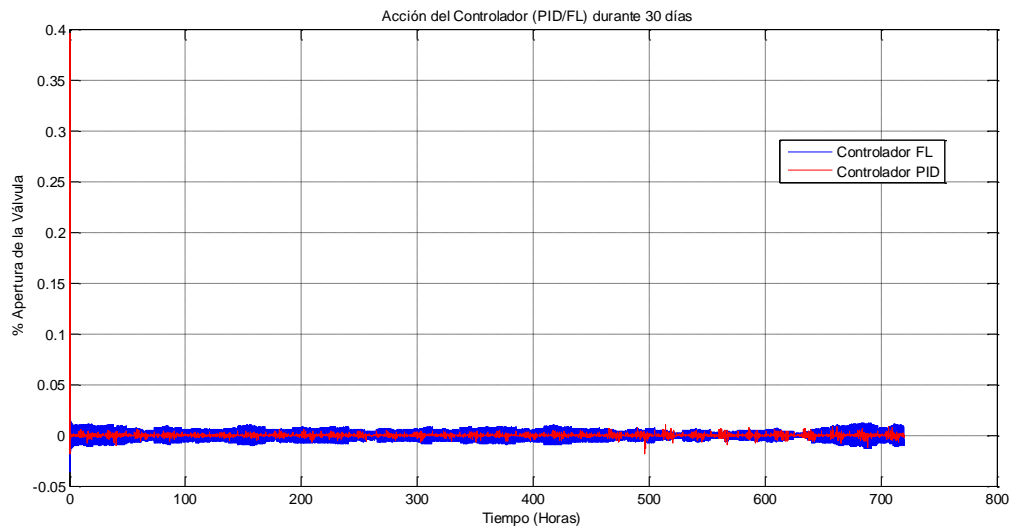


Figura 67. Comportamiento del Controlador (PID/FL) durante el mes de simulación (720 Horas)

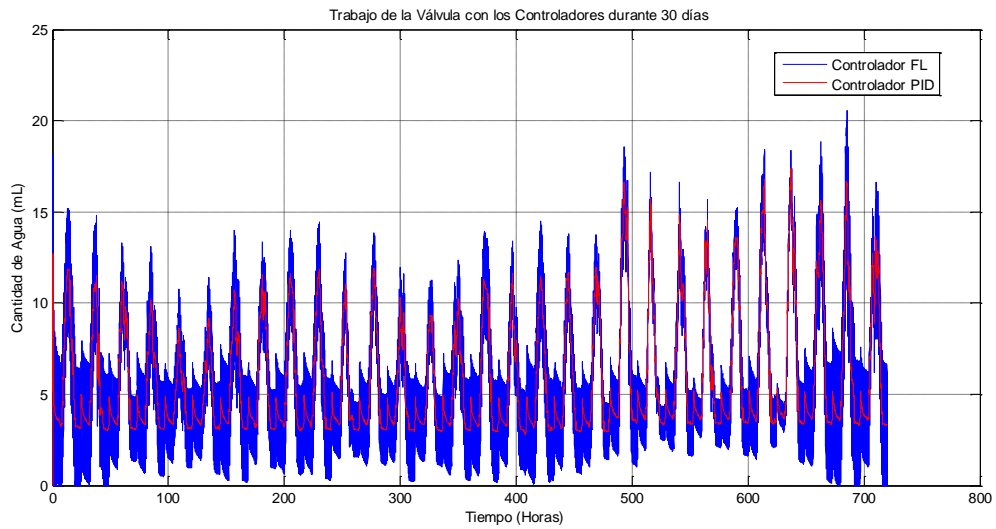


Figura 68. Comparación del trabajo realizado por la válvula del Controlador (PID/FL) durante el mes de simulación (720 Horas)

**ANEXO 2.** Simulación del comportamiento del modelo de irrigación durante los cuatro meses de siembra de la sandía (2.928 horas simuladas)



Figura 69. Respuesta del Controlador para la humedad deseada en toda la etapa de cultivo (4 meses/2928 horas)

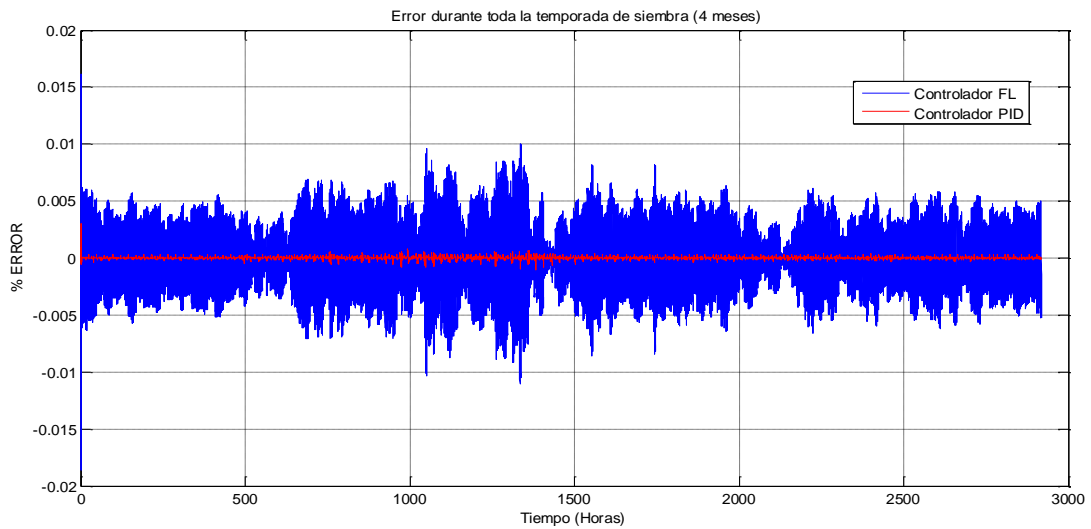


Figura 70. Error del sistema de control (PID/FL) durante el tiempo de siembra de cuatro mes (2928 Horas)

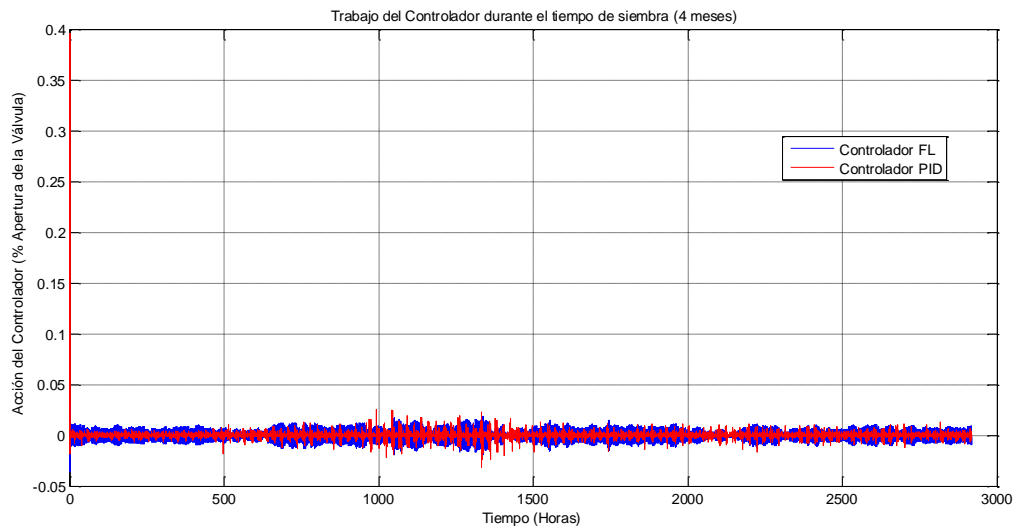


Figura 71. Comparación del trabajo de los Controladores durante el tiempo de siembra de cuatro mes (2928 Horas)

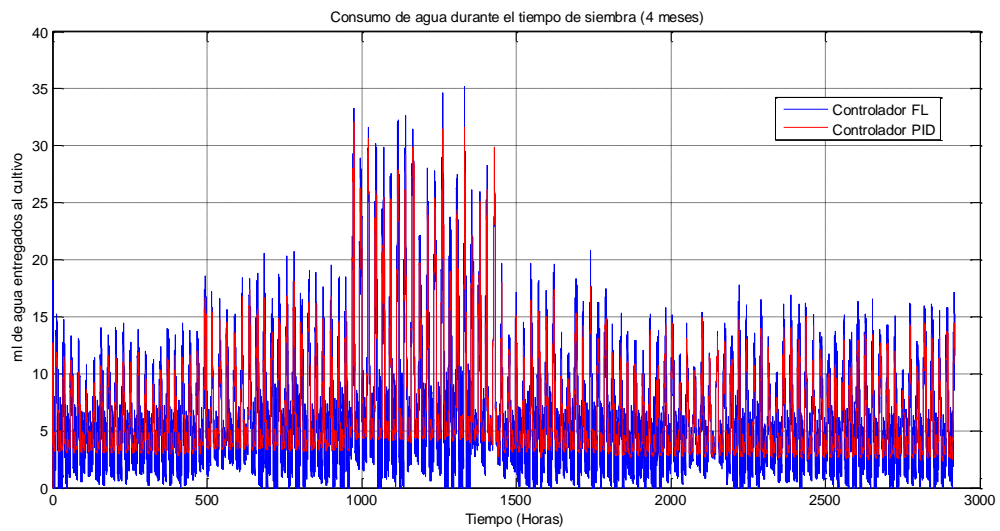


Figura 72. Comparación del trabajo realizado por la válvula del Controlador (PID/FL) durante el tiempo de siembra



**ANEXO 3.** Grafica del comportamiento de la evapotranspiración durante un mes de simulación (720 horas) y luego para los cuatro meses de siembra (2.918 horas simuladas)

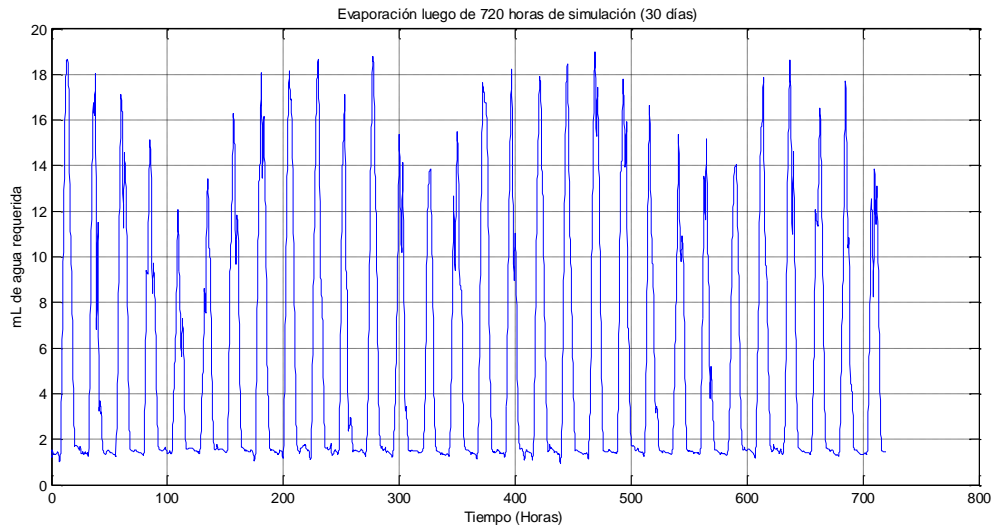


Figura 73. Comparación de la Evapotranspiración durante un mes de simulación

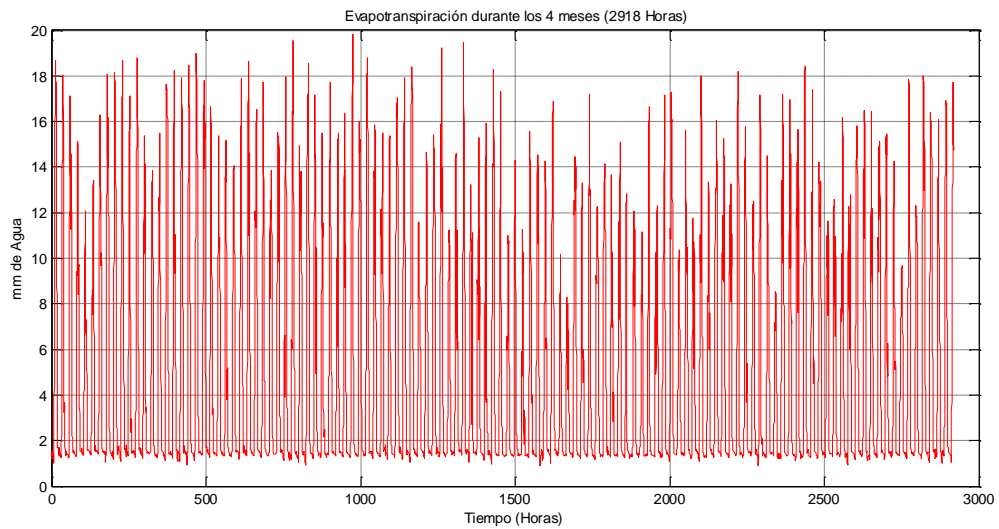


Figura 74. Comparación de la Evapotranspiración durante cuatro meses de simulación

**ANEXO 4.** Grafica de superficie y del visor de reglas del Toolbox de Matlab para el controlador Fuzzy propuesto en la investigación.

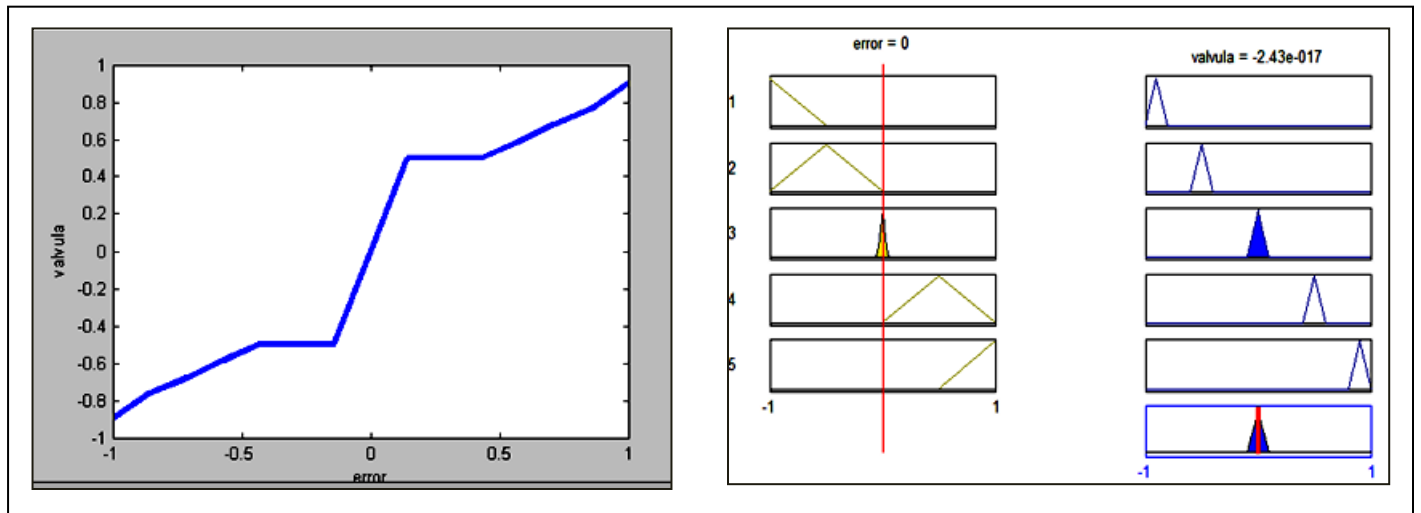


Figura 75. Grafica de la superficie de control y el visor de reglas (Error Vs acción de la Válvula)

Se observa que los máximos cambios realizados por la válvula en el controlador se producen cuando los valores del error se aproximan a cero, esto es de esperar debido a que el controlador actúa de manera permanente tratando de mantener dicho error en valores muy pequeños.

Los valores negativos del error, no obedecen a un trabajo negativo realizado por la válvula (extracción de agua), sino más bien, es un parámetro establecido desde el mismo diseño del controlador para determinar cuando la humedad real es mayor que la humedad deseada y viceversa.

## BIBLIOGRAFIA

- Abdesselem, Sakly, Mtibaa, & Benrejeb. (2013). *PID Controller Using FPGA Technology*. Monastir,Túnez : Advances In PID Control.
- Adeboye, O., & Osunbitan, J. (2010). *Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration Using Complete and Limited Data, Application to Nigeria*. Ile-Ife, Nigeria: Department of Agricultural Engineering.
- AF&F. (2011). *Production Guidelines: Watermelon (Citrullus Lanatus)*. Pretoria, South Africa: Department of Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Agro-Culture. (2012). *Melons: Agro - Culture Liquid Fertilizers*. New York, USA: ENR.
- Aguila, F. (2003). *Entwicklung eines vollautomatischen Bewässerungsregelungssystems für den Freilandgemüsebau*. Stuttgart, Alemania: Verlag Grauer.
- Aguila, M., Sinn, H., & Kleisinger, S. (2008). *Automatización del Riego Basada en Balance Hídrico Climático y Medición de Humedad del Suelo Usando Tecnologías de la Información*. México: Colegio de Posgraduados de Montecillo.
- Aguilar, J., Nájera, I., & Pomares, F. (2011). *Respuesta de la Sandía a la Dosis de Riego*. Valencia, España: Fundación Ruralcaja - CRM.
- Aguilar, P., Angarita, L., A, L., & Rodellar, J. (2009). *Automatic Control of Flows and Levels in an Irrigation Canal*. New York: IEEE. Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 6.
- Aguilera Díaz, M. (2005). *La Economía del Departamento de Sucre: Ganadería y Sector Público*. Cartagena: Banco de la República.
- Allen, R. (2005). Penman - Monteith Equation. *Elsevier Ltd*, 180 - 188.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos*. Roma, Italia: FAO.
- Alvarado, M., Díaz, A., & Morales, J. (2006). *Tecnología para producir Sandía con Fertiriego en el Norte de Tamaulipas*. Tampico, México: CERIB.
- Amezquita, E. (1995). *El Agua y la Erodabilidad de los Suelos*. Bogotá, DC: SCCS.
- Antolines, R. . (2010). Diseño de Controladores de Tipo PID y Difuso para la Posición de un Motor de Corriente Continua . *Redalyc*, 1 - 25.

- AquaStat. (10 de Enero de 2013). *Agricultura, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado el 26 de Febrero de 2013, de [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/lac/indexesp5.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/lac/indexesp5.stm)
- Aquastat, F. (03 de 01 de 2013). *Global Map of Irrigation Areas - Distribution of Irrigated Area in Colombia by Province*. Recuperado el 10 de 03 de 2013, de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/col/index.stm>
- Arbat Pujolrás, G. (2006). *Tesis Doctoral: Desarrollo y Validación de un Modelo de Simulación Dinámica del Agua en el Suelo: Aplicación al Diseño Agronómico y el RLAF*. Lleida, España: Universitat de Lleida.
- Artieda, O. (2008). *Papel del Suelo en el Ciclo Hidrológico*. Extremadura, España: Centro Universitario de Plasencia.
- Asmon, I., & Rothe, R. (2006). *The Economic Feasibility of Drip Irrigation In Afganistan: A Study Conducted for the U.S Agency for International Development*. Kabul, Afganistan: U.S Agency for International Development.
- AsohoFrucol. (2011). *Guía Ambiental Hortofrutícola de Colombia – ASOHOFrucol*. Bogotá, Colombia: Cartilla Ambiental Hortofruticola.
- AZUD. (10 de 05 de 2013). *Sistemas de Riego, Filtración y Tratamiento de Aguas*. Recuperado el 12 de 05 de 2013, de <http://www.azud.com/Inicio/Index.aspx>
- Baier, W., & Robertson, G. (1966). *A New Versatile Soil Moisture Budget*. New York, USA: Plant Sci. 46: p299-315.
- Bardon, A. (17 de Octubre de 2012). *Informe Mundial del Agua*. Recuperado el Febrero de 20 de 2013, de <http://www.pnud.org.co/sitio.shtml?x=66634#.US6eijA021V>
- Baturone, I. (2000). *Microelectronic Design of Fuzzy Logic - Based Systems*. Sevilla, España: CRC Press.
- BayerCropScience. (15 de 10 de 2012). Recuperado el 25 de 01 de 2013, de [www.bayercropscience.com.mx](http://www.bayercropscience.com.mx)
- Baylar, & Ozkan. (2006). Applications of Venturi principle to Water Aeration Systems. *Environmental Fluid Mechanics*, 341 - 357.
- Berengi, H. (1996). *Fuzzy and Neural Control*. New York, USA: Intelligent and Autonomuos Control.
- Berk, Stajniko, Vindis, Mursec, & Lakota. (2011). *Synthesis Water Level Control by Fuzzy Logic*. Hoce, Slovenia: AMME.

- Bolaños, A. (2009). *Introducción a la Olericultura de las Hortalizas más Importantes de la Familia de las Cucurbitáceas*. México, México: EUNED.
- Caruso, D., & Tropea, S. (2010). *Controlador tipo PID, sobre Microcontrolador Embebido en FPGA2010*. Buenos Aires, Argentina: Congreso Nacional de Microelectrónica Aplicada.
- Castro, M., águila, F., Quevedo, A., & Kleisinger, S. (2009). *Automated Irrigation System in Real – Time With Water Balance, Soil Moisture Measurement and Lysimeter*. Montecillo; méxico: Agricultura Técnica en México.
- CEPAL. (2012). *Atlas Sociodemográfico de los Pueblos Indígenas y Afrodescendientes en Colombia*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Chartzoulakis, K., & Drosos, N. (2002). *Irrigation Requeirements Of Greenhouse Vegetables In Crete*. Crete, Grecia: Horticultural Research Station - 72200.
- Chowdhary, A., & Shrivastava, R. (2010). *Reference Crop Evapotranspiration Estimation Using Artificial Neuronal Networks*. Indore, India: AM&CED.
- Control, A. C. (1974). *Mamdani, E; Assilian*. New York, USA: IFAC.
- Corpoica. (2012). *El Cultivo de la Sandía o Patilla Citrullus Lanatus en Colombia*. Villavicencio, Meta: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- DIAZ AGUILERA, M. M. (2005). *La Economía del Departamento de Sucre: Ganadería y Sector Público*. Manizalez: Banco de la República.
- Doorenbos, J., & Pruitt, O. (1975). *Calculation of Crop Evapotranspiration: Selection of Crop Coeficient, Calculation of Field Requirements*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dorf, R., & Bishop, R. (2011). *Modern Control Systems*. 2010: John Wiley & Sons.
- Duarte, O. (2012). *Aplicaciones de la Lógica Difusa*. Bogota: Universidad Nacional.
- El-Mobaied, M. (2008). *Fuzzy Logic Speed Controllers Using FPGA Technique for Three-Phase Induction Motor Drives*. Gaza, Palestina: The Islamic University.
- ENA. (2009). *Encuesta Nacional Agropecuaria, Forestal, Pesquera y Acuícola*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- ENA, R. E. (2011). *ENA*. Bogotá, Colombia: DIMPE, DANE.
- FAO. (23 de 05 de 2010). *Estructuras del Suelo*. Recuperado el 14 de 11 de 2012, de [ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s07.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm)

- FAO. (2011). *Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura*. Roma: FAO, Fiat Panis.
- FAO. (26 de Diciembre de 2012). *Corporate Document Repository*. Recuperado el 11 de Marzo de 2013, de <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm>
- FAO. (01 de 01 de 2013). *Depósito de Documentos: Agua y Cultivos*. Recuperado el 15 de 05 de 2013, de <http://www.fao.org/docrep/005/y3918s/y3918s10.htm>
- FAO, & IWMI. (2010). *Informe: Agua para la Alimentación y para la Vida*. Washington, USA: Comprehensive Assessment.
- Flóres, H., & Ruíz, J. (1999). *Estimación de la Humedad del Suelo para Maíz de Temporal Mediante un Balance Hídrico*. Jalisco, México: ANIFAP - CIPAC.
- Florez, E., Olivera, W., & Yáñez, C. (2003). *Situación Actual de la Comercialización de Ganado Bovino del Sistema Doble Propósito, a partir de la Subasta Ganadera*. Sincelejo: Cogasucre - Universidad de Sucre.
- Franklin, G., Powell, J., & Emami-Naeini, A. (2010). *Feedback Control of Dynamic Systems*. New York, USA: Prentice Hall.
- Gad, H., & El-Gayar, S. (2010). *Climatd Parameters Used To Evaluate The Evapotranspiration In Delta Central Zone Of Egypt*. El Cairo, Egipto: IWTC14 2010.
- Galiano, D., & Chafuelan, E. (2007). *Eficiencia Productiva de Cuatro Variedades de Sandía (Citrullus Lanatus) Bajo Sistema de Riego y Exudación en la Zona en la Zona de Cuambo*. Ibarra, Ecuador: Escuela de Ingeniería Agropecuaria.
- Gao, L., Zhang, M., & Chen, G. (2013). An Intelligent Irrigation System Based on Wireless Sensor Network and Fuzzy Control. *Journal of Networks*, Vol. 8, 1080-1087.
- Garrido, J. (1999). *Lógica y Lingüística*. Madrid, España: Editores Síntesis.
- GDS. (2012). *Gaceta Departamental de Sucre - Gobernación de Sucre*. Sincelejo: Publicaciones Secretaría de Hacienda - GdS.
- Gil, J., Montañó, N., Khan, L., & Gamboa, A. (2000). *Efecto de Diferentes Estrategias de Riego en el REndimiento y la Calidad de dos Cultivares de Melón*. Monagas, Venezuela: Bioagro.
- Gómez Meléndez, D. J. (2008). *Sistemas de Control Borroso para Riegp Localizado Basado en Arreglos de Compuertas Programables en Campo*. Santiago de Queretaro: Universidad Autónoma de Queretaro.

- Gong, L., & Xu, C.-y. (2005). *Sensitivity of the Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin*. Basin, China: Uppsala University.
- González, A. E. (2012). *Diseño de un sistema de riego por goteo para maíz y soya en Zamorano, Honduras*. Zamorano, Honduras: DCyPA.
- Goodwin, G., Graebe, S., & Salgado, M. (2000). *Control System Design*. Newcastle, Australia: OMV Aktiengesellschaft.
- Guerra Jácome, J. A. (2009). *Estudio Investigativo Sobre la Sandía: Producción, Comercialización y Aplicación en la Repostería y Coctelería Elaborando Nuevas Recetas*. Quito, Ecuador: UTE.
- Gurovich, L. (1999). *Riego Superficial Tecnificado*. Ciudad de México, México: Alfaomega.
- Hamed, B., & Al-Mobaied, M. (2011). Fuzzy PID Controllers Using FPGA Technique for Real Time DC Motor Speed Control. *Intelligent Control and Automation - Scientific Research*, 233 - 240.
- Harmanto, Salokhe, Babel, & Tantau. (2005). *Water Requirement of Drip Irrigated Tomatoes Grown in Greenhouse in Tropical Environment*. Bangkok, Thailand: Agricultural Water Management.
- Hernández Tórres, G. (2010). *Modelamiento Ecohidrológico de la Humedad del Suelo en el Valle del Río Cauca*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Howell, T. (2010). *The Penman - Monteith Method*. Bushland, USA: USDA - Agricultural Research Service.
- ICER. (2006). *Informe de Cuyuntura Económica Regional*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- InfoAgro. (2003). *La Plaga y Enfermedades de la Sandía*. México, México: Inforjardín.
- INIFAP. (2003). *Guía para La Asistencia Técnica Agropecuaria para el Área de Influencia del Campo Experimental Valle de Culiacán, Serapio Rendón 83, Colonia San Rafael*. México, México: ANIFAP.
- Israelsen, O. (2003). *Principios y Aplicaciones del Riego*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- James, R. (2012). Modelling LIDs using PCSWMM and EPA SWMM5. *Modelling LIDs using PCSWMM and EPA SWMM5* (págs. 69 - 131). New York: CHI.
- Javadi, P., F, T., Omid, M., R, A., & L, N. (2009). Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Greenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems. *World Applied Sciences Journal*, 16 - 23.

- Juárez, J., Cañadas, J., & Roque, M. M. (2011). Control. En J. Juárez, J. Cañadas, & R. Marín, *Sistemas de Control Moderno* (págs. 589-646). Murcia, España: Universidad de Murcia, Universidad de Almería.
- Karthik, S., & Binsi. (2013). VEHICLE AUTOMATION USING FUZZY BASED PID TYPE CRUISING CONTROLLER. *International Academy of Science, Engineering and Technology - IASET*, 19 - 24.
- Keller, J., & Bliesner, R. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York, USA: Chapman & Hall Editorial.
- Kilian, C. (2005). *Modern Control Technology Components and Systems*. New York, USA: Technology & Engineering.
- Klee, H., & Randal, A. (2011). *Simulation of Dynamic Systems with Matlab and Simulink*. Boca Ratón, Florida: CRC Press.
- Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Los Ángeles, USA: Prentice Hall.
- Kuo, B. (1996). *Automatic Control Systems*. New York, USA: Prentice Hall.
- Laio, F. (2001). *Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress*. New York, USA: Adv. Water Resour.
- Larios Martón, J. (2008). *Calentamiento Global - Al Borde del Límite*. Madrid, España : INET.
- Lee, C. (1990). Fuzzy Logic in control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part 1. *IEEE Transforms Systems Man Cyber*, Vol. 20 No. 2.
- Liotta, M. (2007). *Los Sistemas de Riego por Goteo o por Microaspersión*. San Juan, Puerto Rico: INTA - EEA.
- Liquiao, L., Lijuan, L., Li, Z., Jiuyi, L., & Bin, L. (2008). *Sensitivity of Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration in Tao'er River Basin of Northeastern China*. Beijing, China: Chinese Academy of Sciences.
- Loba, J., & Ramírez, S. (2012). *Evaluación del Coeficiente de Uniformidad en Cuatro Emisores de Riego Usando Filtración Gruesa de Flujo Ascendente en Capas*. Medellín, Colombia: Escuela de Ingeniería Universidad de Antioquia.
- Lop, A., & Peiteado, C. (2005). *Curso Riego para Agricultores: Proyecto de Autogestión del Agua en la Agricultura*. Madrid, España: WWF.



- Mamdani, E. (1974). *A Case Study on the Application of Fuzzy Set Theory to Automatic Control*. New York, USA: IFAC.
- Mamdani, E. (1975). *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller*. New York, USA: International Journal of Man-Machine Studies.
- Maroto, J., Borrego, A., & Pomares, F. (2002). *El Cultivo de la Sandía*. Madrid, España: Mundi-Prensa Libros.
- Maroto, J., Gómez, A., & Pomares, F. (2012). *El Cultivo de la Sandía*. Valencia, España: Fundación Caja Rural Valencia.
- Matamoros, A. (1993). *Fundamentos de Extensión Agropecuaria*. San José, Costa Rica: UNED.
- Matijevics, I., & János, S. (2009). *Control of the Greenhouse's Microclimatic Condition Using Wireless Sensor Network*. Budapest, Hungría: Hungarian National Development Agency.
- Maynard, D., & Hochmuth, G. (1997). *Knott's Handbook for Vegetable Growers*. New York, USA: Wiley Interscience.
- Mayorista, C. (13 de 07 de 2013). *Central Mayorista*. Recuperado el 13 de 07 de 2013, de [www.lamayorista.com.co/site/esp/](http://www.lamayorista.com.co/site/esp/)
- Mendoza, G. (2004). *Sincelejo: Un Análisis de su Competitividad*. Barranquilla, Atlántico: Universidad del Norte.
- Mendoza, J., & Peñaloza, R. (2002). *Determinación de Ecuaciones Lineales de Capacidad de Campo para Tres Tipos de Suelos: Arcilloso, Franco Arcilloso y Franco, presentes en la Ciudadela Universitaria Puerta Roja (Sincelejo - Sucre)*. Sincelejo, Sucre: Universidad de Sucre.
- Moore, P., & Maretzki, A. (1996). *Photoassimilate Distribution in Plant and Crops*. New York - Basel - Hong Kong: Marcel Dekker Inc.
- Moreno, F., & Osorno, J. (1999). *Estudio Comparativo de los Métodos de Laboratorio para la determinación de Capacidad de Campo y Obtención de Ecuaciones*. Sincelejo, Sucre: Universidad de Sucre.
- Mundo-Molina, M. (2008). Estandarización de las Ecuaciones para Estimar la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia. *RIIT FI - UNAM*, 125 - 135.
- Nanda, S., & Das, R. (2012). *Fuzzy Mathematical Concepts*. London, Eng: Alpha Science.
- Nghi, V. V. (2008). Potencial Evapotranspiration Estimation and its effect on Hydrological Model Response at the Nong Son Basin. *VNU Journal of Science*, 213 - 223.

- Nicolás, I. (2008). *Técnicas de compresión de tablas de datos mediante regresiones lineales, redes neuronales y sistemas fuzzy*. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Norero, A. (1976). *Evaporación y Transpiración: Serie Suelos y Climas*. Mérida, Venezuela: CIDIAT.
- Nuttle, W. (2002). Is Ecohydrology one idea or many?., *Journal-des Sciences Hydrologiques*, p. 805 - 807.
- O'Dwyer, A. (2006). *Hand Book of PI and PID Controller Tuning Rules - 2 ed.* London, England: Imperial College Press.
- Obando, F. R. (2006). *Guía Técnica: Manejo y Aprovechamiento del Agua con Fines Agropecuarios*. México: Programa para la Agricultura Sostenible de América en Laderas de A. Latina .
- Ogata, K. (2005). *Modern Control Engineering*. New York, USA: Prentice Hall.
- OMS. (2012). *Guías para la Calidad del Agua Potable*. Geneve, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- ONU. (2003). *Informe: Año Internacional del Agua*. París, Francia: División de Desarrollo Sostenible.
- ONU. (16 de Septiembre de 2010). Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2006/09/pdf/Picture.pdf>
- Ortiz Navas, R. (2008). *Estación Meteorologica Satelital Universidad de Sucre (Convenio IDEAM - UniSucre)*. Sincelejo: Universidad de Sucre.
- Pacheco, R. (2009). *Análisis del Mercado Laboral de los Municipios de Sincelejo, Coveñas, San Onofre, Santiago de Tolú y Tolviejo: Estudio sobre la oferta, demanda, perfiles ocupacionales, necesidades de formación laboral y emprendimiento*. Sincelejo, Sucre: OTS - Observatorio del Trabajo en Sucre.
- Parameters, S. o.-M. (2005). Nandagiri, Lakshman; Kovoov, Gicy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE*, 123 - 141.
- Pawlowski, A., Guzmán, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., & Dormido, S. (2011). *Study of Event Based Samplig Techniques and Their Influence on Greenhouse Climate Control With Wireless Sensors Network*. Madrid, España: Intechopen.
- PDH. (2012). *Guía para el Cultivo de Sandía (Citrullus Lanatus)*. Managua - New York: Chemonics International, Inc.
- PDM. (2008). *Plan de Desarrollo Municipal de Sincelejo 2008 - 2011*. Sincelejo, Sucre: Alcaldía de Sincelejo.

- PFN. (2006). *Plan Frutícola Nacional - Capítulo Sucre*. Sincelejo, Sucre: Ministerio de Agricultura.
- PFN. (2006). *Plan Frutícola Nacional: Desarrollo Frutícola en Sucre*. Sincelejo, Sucre: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, FNFH, ASOHOFRUCOL, SAG.
- Pivoňka, P. (2006). *Comparative Analysis of Fuzzy PI/PD/PID Controller Based on Classical PID Controller Approach*. Brno, Czech Republic: Brno university of Tech.
- Ponce, V. (2008). *Rendimiento Sostenible del Agua Subterránea*. Los Ángeles, USA: Departamento de Recursos Hídricos de California.
- POT. (2012). *Plan de ordenamiento Territorial - Sucre*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- ProExport. (2010). *Generación de Capacidad Comercial hacia EFTA: Inteligencia de Mercado para Colombia - Sector Frutícola*. Bogotá, Colombia: Osec.
- Rahangadale, V., & Choudhary, D. (2011). *On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman - Monteith Equation*. Gondia, India: MIET.
- Ramírez de Cartagena, F. (2011). *Simulación Numérica de la Dinámica del Agua en el Suelo. Aplicación al Diseño de Sistemas de Riego LAF*. Madrid, España: Universidad de Lleyda.
- Ramírez, V. (1996). *Manejo Integrado de la Mosquita Blanca de la Hoja Plateada*. Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Ramírez, V., Mejía, A., Marín, E., & Arango, R. (2010). *Evaluation of Models for Estimating the Reference Evapotranspiration in Colombia Coffe Zone*. Manizalez: Revista Agronomía Colombiana.
- Ramos-Fernández, López-Morales, Lafont, E., & Duplaix. (2009). *A Neurofuzzy Structure Modelling Evapotranspiration in a Greenhouse Crop*. México: Ingeniería Investigación y Tecnología.
- Rojas, A., Noriega, A., Herrera, G., & Chaparro, R. (2003). *Sistema de Riego para Invernaderos Hidropónicos Basado en la Evapotranspiración del Cultivo*. Querétaro, México: Gabino Barrera.
- Romero, E., Rodríguez, A., Rázuri, L., Suniaga, J., & Montilla, E. (2009). *Estimación de las Necesidades Hídricas del Cultivo de Pepino (Cucumis sativus L.), Durante las Diferentes Etapas Fenológicas, Mediante la Tina de Evaporación*. Mérida, Venezuela: Agricultura Andina.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. New York, USA: Third Edition. Wiley.
- Sabri, N., Aljunid, S., Ahmad, R., Malek, M., & Kamaruddin, Y. (2011). *Smart Prolong Fuzzy Wireless Sensor – Actor Network for Agricultural Application*. Perlis, Malaysia: Journal of Information Science and Engineering.

- Sánchez San Román, J. (2011). *Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Santos, A., Bergamaschi, H., Bergonci, J., & Rosa, L. (2000). *Improved Modeling of Maize Canopy Water loss: A case Study in Brazil*. Brasilia: Agriscientia.
- Schmetz, E. (2009). *Consumo Estimado por Hectarea en Riego por Goteo - Cinta Plástica*. Santa Fé, Argentina: Ergonomix.
- Schugurensky, C., & Caparro, F. (2009). *Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo*. San Juan, Argentina: INAUT.
- Schweizer, B., & Sklar, A. (1963). *Associative Functions and Statistical Triangle Inequalities*. Debrecen, Hungría: Publicationes Mathematicae Debrecen.
- Sedigh, K. (2009). *Advanced Control Systems: Analysis and Design*. Teherán: K.N. Toosi.
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la Humedad del Suelo para la Producción Vegetal: El Significado de la Porosidad del Suelo*. Rome, Italy: Boletín de Suelos de la FAO N° 79.
- Silva, D., Meza, F., & Varas, E. (2010). *Estimating reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) using numerical weather forecast data in central Chile*. Santiago, Chile: Journal of Hydrology.
- Sontag, E. (1998). *Mathematical Control Theory. Deterministic Finite - Dimensional Systems*. New York: Springer - Verlag.
- Summer, D., & Jacobs, J. (2005). *Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Reference Evapotranspiration, and Pan Evaporation Methods to Estimate Pasture Evapotranspiration*. Durham, USA: Journal of Hydrology.
- Tunyasrirut, & Wangnipparnto. (2007). Level Control in Horizontal Tank by Fuzzy-PID Cascade Controller. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 78 - 82.
- Umair, M., & Usman, U. (2010). *Automation of Irrigation System Using ANN Based Controller*. Research Center for Modeling And Modelation : National University of Science and Tech.
- UNESCO, T. U. (2012). *Managing Water Under Uncertainty and Risk*. Luxembourg: UNESCO Publishing.
- Vargas, B. (2006). *Adquisición de Datos Usando Matlab*. Lima, Perú: ELECTRÓNICA -UNMSM.
- Walker, W., & Skogerboe, G. (1987). *Surface Irrigation. Theory and Practice*. New Jersey, USA: Prentice - Hall.

Wei, Z., Yong, H. F., Congcong, M., & Yuewei, H. (2011). *The Fuzzy Decision-Making Method of Irrigation Amount Based on ET and Soil Water Potential*. Hangzhou, China: Conference Publications .

WWF. (17 de 09 de 2005). *Curso de Riego para Agricultores: Proyecto de Autogestión del Agua en la Agricultura*. Recuperado el 16 de 03 de 2013, de [http://assets.wwf.es/downloads/curso\\_de\\_riego\\_definitivo.pdf](http://assets.wwf.es/downloads/curso_de_riego_definitivo.pdf)

Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 338 - 353.

Zadeh, L. (1975). The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - I. *American Elsevier Pub. Co*, 199-249.