

BIBLIOTECA — CENTRO DE  
GRADUADOS E INVESTIGACION  
A. T. L.

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior  
Dirección General de Educación Superior Tecnológica  
Instituto Tecnológico de La Laguna

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“SISTEMA AUTÓNOMO DE MEDICIONES AGRÍCOLAS”**

POR

**ING. ARIEL LAZALDE RUELAS**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. FRANCISCO G. FLORES GARCÍA**

ISSN: 0188-9060



**RIITEC: (18)-TMCIE-2013**

Torreón, Coahuila, México  
Diciembre, 2013

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
Instituto Tecnológico de la Laguna



"2013, Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Torreón, Coah., 15/10/Octubre/2013

Dependencia: DEPI

Oficio: DEPI/382/2013

Asunto: Autorización de  
impresión de tesis.

**C. ARIEL LAZALDE RUELAS**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.**  
**PRESENTE**

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"Sistema autónomo de mediciones agrícolas"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIFTEC: (18)-TMCIE-2013**, para que proceda a la impresión del mismo.

**ATENTAMENTE**  
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
de la Laguna  
División de Estudios de Posgrado  
o Investigación

**DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA**  
Jefe de la División de Posgrado e Investigación  
del Instituto Tecnológico de la Laguna



Blvd. Revolución y Cza. Cuauhtémoc s/n Col. Centro C.P. 27000  
Torreón, Coah. Tel. 7051313, e-mail: wmaster@italaguna.edu.mx  
[www.italaguna.edu.mx](http://www.italaguna.edu.mx)





## **Dedicatoria.**

Este trabajo se lo dedico a mi familia, a mis padres: Ariel y Lupita, a mis hermanas Linda, Lili y Diana que a pesar de las circunstancias que hemos pasado como familia o individualmente seguimos unidos. A mis amigos Laura, Alfredo, Carlos y Pedro, los cuales siempre han estado en los momentos que más los he necesitado. Y también este trabajo es parte de los grandes aprendizajes que viví en estos 2 años, cosas buenas y malas, por lo que esto es un ejemplo de que con perseverancia todo se puede.

"Las cosas pasan por una razón, porque así debe ser"

## **Agradecimientos.**

Agradezco a Dios por todo lo que me ha dado y por darme vida para llegar a este momento, a mis padres por su apoyo y guía a mi lado.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar estudios de maestría, al Instituto Tecnológico de La Laguna que hace sentirte en familia, al Dr. Francisco G. Flores García por instruirme durante el desarrollo del proyecto, a mis maestros y a mis compañeras Sara y Jenny por todo su apoyo desde el día que nos conocimos.

## Resumen.

El agua es uno de los elementos más importantes para desarrollo de la agricultura, pero sobre todo para la vida cotidiana, debido a la escasez de esta y a la protección de los recursos naturales actualmente se necesitan herramientas para el cuidado y ahorro del mismo. Es por eso que la utilización de sensores y elementos electrónicos para el monitoreo de variables climáticas se ha expandido, ya que provee información útil para la toma de decisiones en la utilización del agua evitando su desperdicio.

Es por eso que fue necesaria la implementación de un sistema para medir la evaporación del agua por medio de algún método efectivo que proporcionara valores confiables, para así determinar según los valores el aprovechamiento del agua en un sistema de riego. Fue así como se determinó utilizar un sensor ultrasónico (Pepperl+Fuchs) para medir la distancia vertical en milímetros, por medio de un tanque preestablecido y así obtener los datos de evaporación los cuales se transmiten de dos maneras.

La primera utilizando un microcontrolador (Arduino) e incorporando los módulos transmisión y recepción de comunicación inalámbrica (XBee), los cuales utilizan un protocolo de comunicación de alto nivel llamado ZigBee y transmiten los datos hacia un receptor conectado a una computadora, utilizando el software LabVIEW por sus siglas en inglés (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) para la interpretación de los mismos.

La segunda forma de transmisión fue utilizándolo sólo como respaldo y comparación una tarjeta adquirenta de datos (DAQ) conectada directamente de las salidas del sensor y de ahí cableado a la misma computadora ubicada a 80 metros de distancia.

## **Abstract.**

Water is one of the most important factors for the development of agriculture, but more importantly for everyday life. The amount of water is finite and tools for its conservation are needed. This has led to the development of sensors and instrumentation for climatic variable as they provide useful information for decision-making in water use or natural resources and thus avoiding waste.

That's the reason behind the implementation of a system for measuring water evaporation as an effective gauge of global water use in an irrigation system. The instrument features an ultrasonic sensor that measures the vertical distance in millimeters at a preset tank. The resulting data is processed in two different ways.

The first uses an Arduino microcontroller incorporating transmission and reception Xbee modules using a high level communications protocol named ZigBee. The receiver is connected to a computer using the software Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) for further processing of the data.

The second way of data processing was a backup and corroboration system where sensor outputs are connected to a data acquisition board (DAQ) and then wired to the same computer located 80 m away.



## Índice.

Resumen.	1
Abstract.	2
Índice.	3
Índice de figuras.	5
Índice de tablas.	6
Capítulo 1. Introducción.	
1.1 Introducción.	7
1.2 Objetivo general.	7
1.3 Objetivos específicos.	7
1.4 Justificación.	8
1.5 Antecedentes.	9
Capítulo 2. Fundamento teórico.	
2.1 Agua.	11
2.1.1 Problemática global del agua.	11
2.2 Agricultura	12
2.3 Riego.	13
2.4 Agua y Agricultura	14
2.5 Evaporación.	14
2.5.1 Evapotranspiración.	15
2.6 Variables climáticas.	16
2.6.1 Radiación solar.	16
2.6.2 Temperatura del aire.	17
2.6.3 Humedad.	17
2.6.4 Presión atmosférica.	18
2.6.5 Velocidad de Viento.	18
Capítulo 3. Determinación y métodos de la evapotranspiración.	
3.1 Conceptos de evapotranspiración.	19

3.1.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET <sub>o</sub> )	20
3.1.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET <sub>c</sub> ).	21
3.1.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET <sub>c aj</sub> )	23
3.2 Unidades de Evapotranspiración.	23
3.3 Medición de ET	24
3.3.1 Métodos de balance de energía y microclimáticos	24
3.3.2 Balance de agua en el suelo.	25
3.3.3 Lisímetros.	26
3.3.4 ET calculada con datos meteorológicos.	26
3.3.5 ET estimada con el tanque de evaporación.	27
3.4.1 Ecuación de PENMAN-MONTEITH.	27
3.5 Método del Tanque Evaporímetro.	29
3.5.1 Tipos de tanques evaporímetro.	30
3.5.2 Coeficientes del tanque evaporímetro.	31
3.5.3 Ajustes.	31
3.5.4 Recomendaciones.	32
Capítulo 4. Planteamiento del sistema y sus elementos.	
4.1 Planteamiento.	35
4.2 Elementos del sistema.	36
4.3 Sensor ultrasónico.	37
4.4 Microcontrolador Arduino.	41
4.4.1 Arduino Uno.	42
4.5 Modulo de comunicación inalámbrica.	44
4.5.1 XBee.	44
4.6 LabVIEW.	48
Capítulo 5. Sistema autónomo de mediciones agrícolas.	
5.1 Desarrollo.	50
5.2 Montaje del sensor ultrasónico.	50
5.3 Montaje del sensor en el tanque evaporímetro.	54
5.4 Conexión del sensor al microcontrolador Arduino.	55
5.4.1 Arduino.	56

5.4.2 Arduino/XBee.	58
5.4.3 Configuración de XBee.	58
5.5 Elaboración del programa de monitoreo en LabVIEW.	62
5.5.1 Panel Frontal.	63
5.5.2 Diagrama de Bloques.	66
Resultados y Conclusiones.	73
Referencias Bibliográficas.	71

### Índice de Figuras

Figura	Página
Figura 1. Tornillo Micrométrico	9
Figura 2. DAQ y Sensor Ultrasónico	10
Figura 3. Factores que afectan la ET	16
Figura 4. Concepto gráfico de ETo	21
Figura 5. Concepto gráfico de ETc	22
Figura 6. Concepto gráfico de ETc aj	23
Figura 7. Balance de agua	25
Figura 8. Lisímetro	26
Figura 9. Ecuación de Penman-Monteith	28
Figura 10. Localización del Tanque en Caso A y Caso B	30
Figura 11. Tanque evaporímetro tipo A.	33
Figura 12. Tanque evaporímetro de venta y elaborado	34
Figura 13. Sensor Inalámbrico UC500-30GM-IUR2-V15	37
Figura 14. Dimensiones del sensor	38
Figura 15. Cable de Interfaz V15-W-2M-PVC	39
Figura 16. Configuración de conexión	39
Figura 17. Vista superior del sensor	40
Figura 18. Arduino Uno	43
Figura 19. XBee Pro	45
Figura 20. XBee S1	46
Figura 21. XBee Shield/Arduino	47
Figura 22. XBee Explorer	47
Figura 23. Bloques de visualización de LabVIEW	49

Figura 24. Medidas del cilindro de calma	51
Figura 25. Tamaño de Carcasa	52
Figura 26. Montaje del sensor	52
Figura 27. Zona de medición	57
Figura 28. Tanque evaporímetro	54
Figura 29. Configuración de conexión	55
Figura 30. Visualización de Calibración	56
Figura 31. Programa de recepción de datos	57
Figura 32. Pantalla principal X-CTU	58
Figura 33. Arduino UNO	59
Figura 34. Montaje de tarjeta Arduino	60
Figura 35. Configuración Xbee	60
Figura 36. Pantalla de configuración	61
Figura 37. Panel Frontal LabVIEW	63
Figura 38. Puerto comunicación VISA	64
Figura 39. Lectura de comunicación VISA	64
Figura 40. Indicadores gráficos de valores de voltaje y distancia en mm	65
Figura 41. Indicadores de gráficas	65
Figura 42. Diseño del diagrama de bloques de funcionamiento	66
Figura 43. Configuración Puertos Visa	67
Figura 44. Conversión de valores	68
Figura 45. Aparatos Indicadores gráficos del voltaje y de la evaporación	69
Figura 46. Almacenaje de los valores en archivos TMDS	70

## Indice de Tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Especificaciones del sensor ultrasónico.	38
Tabla 2. Especificaciones del microcontrolador Arduino UNO.	42
Tabla 3. Características del módulo de comunicación XBee Pro.	45
Tabla 4. Características del módulo de comunicación XBee S1.	46
Tabla 5. Configuración de Xbee de transmisión y recepción.	62

# Capítulo 1.

## Introducción.

### 1.1 Introducción.

En tiempos actuales se ha venido mencionando la importancia del cuidado de los recursos naturales para evitar en un futuro el deterioro de los mismos y así corregir la problemática con la que se vive. Por ello que en este trabajo se presentará la implementación de un sensor ultrasónico para medir la evaporación del agua como un medio para su mejor uso en la agricultura.

### 1.2 Objetivo general.

Desarrollar un sistema de medición de evaporación de agua para su uso en la agricultura, que permitan determinar la cantidad de agua necesaria para el óptimo riego sin excederse en el uso del agua ni tampoco que falte para un desarrollo agrícola ideal.

### 1.3 Objetivos específicos.

– Medir la evaporación de agua en tanque evaporímetro tipo A por medio de un sensor ultrasónico (Papperl+Fuchs UC500-30GM-IUR2-V15, Mannheim, Alemania) y obtener los datos de manera directa con una tarjeta adquirenta de datos (DAQ) NI-USB 6008 (National Instrument, Austin, Texas) conectada a una computadora para la recepción de los mismos.

– Medir la evaporación de agua en tanque evaporímetro tipo A por medio de un sensor ultrasónico (Papperl+Fuchs UC500-30GM-IUR2-V15, Mannheim, Alemania) y

enviar los datos a un microcontrolador Arduino Uno, transmitiendo por medio de una comunicación inalámbrica con un módulos XBee conectada hacia una computadora.

– Diseño y desarrollo del programa e interfaz gráfica en LabVIEW 2012 (National Instrument, Austin, Texas) para el muestreo de la señal y la conversión de la misma tanto para el método de recepción por medio de la actualización de una tarjeta adquisidora de datos (DAQ) como para el método de transmisión inalámbrica.

#### **1.4 Justificación.**

Según datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se estima que en el año 2009 el 88% del volumen disponible de agua en la Laguna se destina a la agricultura y la mayoría de la misma no se aprovecha, es importante buscar formas de protección a este recurso natural que cada año se encuentra en escasez. [1]

Es por eso que la realización de este proyecto se hizo en conjunto con el Instituto Tecnológico de Torreón (ITT) en su departamento de posgrado enfocado a irrigación, el cual tiene como función obtener una medición clara de los valores evaporación para así tomar una decisión de cuánta agua sea necesaria para un sistema de riego sin desperdiciar la misma. dándole un mejora al método del tanque de evaporación tipo A, el cual es utilizado por el Instituto para tomar mediciones de la evaporación diaria en Torreón.

El cálculo de la evaporación les ayuda a pronosticar el comportamiento de los ciclos de riego para los diferentes tipos de cultivos durante el año. Teniendo en cuenta factores como la humedad, radiación solar, velocidad del viento, temperatura, por mencionar algunos de ellos.

### 1.5 Antecedentes.

En contexto este proyecto es la actualización de un proyecto anterior realizado por el M.C. Julio Vladimir Castañeda en el cual surgieron algunos detalles para su utilización eficiente por lo que el objetivo fue mejorar los 2 métodos anteriores que tenían hace algunos años, ya que el primero era por medio de mediciones a través de un tornillo micrométrico y después utilizando el sensor ultrasónico obteniendo los datos directos y mandándola por medio de una tarjeta adquisitora de datos a una distancia de 80 metros que por lo mismo largo de los cables no era confiable su medición, faltando así la comunicación inalámbrica.[2]

La medición por medio del tornillo micrométrico tenía muchas desventajas, debido a que dependía de que un operario fuera al área donde se encontraba el tanque y tenía que medir a una hora en específico sin pasarse, además de que esas mediciones podían tener errores al momento de hacer la lectura, como un error de paralaje o simplemente dependía mucho de las condiciones físicas e incluso emocionales en las que se encontraba el operador. [Figura 1]



Figura 1 - Tornillo Micrométrico

Después implementaron el método por medio de un sensor ultrasónico Pepperl+Fuchs, la cual mandaba señales directo a una tarjeta adquisitora de datos en un rango de 0 a 10 V y en el cual se realizaba la conversión en LabVIEW de la distancia en milímetros. [Figura 2]



Figura 2 - DAQ y Sensor Ultrasónico

A su vez las modificaciones a este proyecto fueron realizadas en conjunto con el Ing. Ignacio Jaramillo Aguilar alumno de la Maestría en Riego del Instituto Tecnológico de Torreón y así como también con el Ing. Ángel Cabrera López recién titulado de la carrera de Ingeniería Electrónica realizada en el Instituto Tecnológico de la Laguna, dicho esto es necesario aclarar que la mayoría de estas actualizaciones se generaron gracias a un armonioso consenso entre los involucrados.



## Capítulo 2.

### Fundamento teórico.

#### 2.1 Agua.

El agua es una sustancia formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ). Es esencial para la vida debido a que en nuestro cuerpo poseemos un 75% de la misma, el término agua generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque puede hallarse también en forma sólida o en su forma gaseosa. El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre que se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96,5% del agua total, los glaciares y casquetes polares tienen el 1,74%, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72% y el restante 0,04% se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos. [1]

Al mismo tiempo que forma el líquido más abundante en la Tierra, representa el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida. El agua puede ser considerada como un recurso renovable cuando se controla cuidadosamente su uso, tratamiento, liberación, circulación.

##### 2.1.1 Problemática global del agua.

La gran necesidad de lograr el equilibrio hidrológico que asegure el abasto suficiente de agua a la población se logrará armonizando la disponibilidad natural con las extracciones del recurso mediante el uso eficiente del agua.

México es un país rico en recursos naturales y obtiene el agua que consume la población de fuentes tales como ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos

se recargan de forma natural en época de lluvias. Sin embargo esta época tiene una duración promedio de cuatro meses lo que propicia una escasa captación. Existe una desproporción que entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las extensiones territoriales que comprenden, sumado a esto del total de agua captada por lluvias, aproximadamente el 70% se evapora.

Bajo este panorama México enfrenta actualmente graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua. Parte de esta problemática, se enfrenta con la construcción de la infraestructura hidráulica que permite satisfacer de agua a los diferentes sectores de la población: el agrícola, el industrial, el doméstico y de servicios y para la generación de energía eléctrica, entre otros.

## **2.2 Agricultura.**

La agricultura es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra, en ella se engloban los diferentes trabajos de tratamiento del suelo y los cultivos de vegetales. Comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural. Todas las actividades económicas que abarca dicho sector tienen su fundamento en la explotación de los recursos que la tierra origina, favorecida por la acción del hombre: alimentos vegetales como cereales, frutas, hortalizas, pastos cultivados y forrajes, fibras utilizadas por la industria textil, cultivos energéticos y tubérculos, etc.

Los tipos de agricultura pueden dividirse según muchos criterios distintos de clasificación según su dependencia del agua:

De temporal: es la agricultura producida sin aporte de agua por parte del mismo agricultor, nutriéndose de la lluvia o aguas subterráneas.

De riego: se produce con el aporte de agua por parte del agricultor, mediante el suministro que se capta de cauces superficiales naturales o artificiales, o mediante la extracción de aguas subterráneas de los pozos.

### 2.3 Riego.

El riego consiste en incorporar agua al suelo para que los vegetales tengan el abastecimiento que necesitan favoreciendo así su crecimiento, utilizándose en la agricultura y en jardinería.

Los métodos más comunes de riego son:

- Arroyamiento o surcos.
- Inundación.
- Aspersión. Rocía el agua en gotas por la superficie de la tierra, asemejándose al efecto de la lluvia.
- Infiltración o canales.
- Goteo o riego localizado. El riego de goteo libera gotas o un chorro fino, a través de los agujeros de una tubería plástica que se coloca sobre o debajo de la superficie de la tierra.
- Drenaje.

El método principal de entrega de agua al campo (para cerca del 95 % de los proyectos en todo el mundo) es el riego por inundación o de surco. Otros sistemas emplean aspersores y riego de goteo. Aunque sean técnicas relativamente nuevas, que requieren una inversión inicial más grande y manejo más intensivo que el riego de superficie, el riego por aspersión y el de goteo suponen una mejora importante en la eficiencia del uso del agua, y reducen los problemas relacionados con el riego.

## **2.4 Agua y Agricultura.**

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo se ha elevado sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provoca que las pérdidas se tornen monumentales. Le siguen el sector industrial que requiere del 25% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que requieren el 10%. Para el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34% a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego y al 8% los destinados para otros usos. El consumo total de agua se ha triplicado desde 1950 sobrepasando los 4,300 km<sup>3</sup>/año, cifra que equivale al 30% del servicio renovable del mundo que se puede considerar como estable.

Ante estas circunstancias muchas regiones del mundo han alcanzado el límite de aprovechamiento del agua, lo que ha llevado a sobreexplotar los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, creando un fuerte impacto en el ambiente.

Aunque en las últimas dos décadas se ha logrado progreso sobre los distintos aspectos del desarrollo y la administración de los recursos hidráulicos, los temas de la calidad del agua son más serios de lo que se creía.

## **2.5 Evaporación.**

La evaporación es el proceso por el que las moléculas de un elemento en estado líquido cambian a estado gaseoso por medio de una variable externa, ya sea calor, radiación, presión o algún otro factor. Normalmente la evaporación puede apreciarse por la desaparición paulatina del líquido cuando se expone a un volumen significativo de gas.

La evaporación es una pieza esencial del ciclo del agua, en el que la energía solar provoca la evaporación del agua de los océanos, lagos, humedad del suelo y otros suministros de agua.

En el agua sus pérdidas por medio de la evaporación en una zona será determinado por algunos factores externos como la radiación solar que proporciona a las moléculas de agua la energía necesaria para el cambio de estado ya que todo tipo de agua en la superficie terrestre está expuesta a la evaporación, aunque es necesario que el medio que rodea la superficie donde esta se realiza tenga capacidad para admitir el vapor de agua. Este fenómeno es más débil cuanto menor es el movimiento de las moléculas y más intenso cuanto mayor sea la cantidad de agua.

Las moléculas de agua están en continuo movimiento, cuando llegan a la superficie del líquido aumentan su temperatura por efecto de la radiación y aumenta a la vez su velocidad elevando su energía cinética hasta que algunas consiguen liberarse de la atracción de las moléculas contiguas y atraviesan la interface líquido-gas convirtiéndose en vapor. De esta manera, la capa de aire que se encuentra por encima de la superficie inmediatamente se satura de humedad generando así el vapor de agua. El calor absorbido por unidad de masa de agua para realizar el cambio de estado se denomina calor latente de evaporación.

### **2.5.1 Evapotranspiración.**

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos por los que el agua se disipa a través de la superficie del suelo por evaporación (E) y por la transpiración del cultivo. La transpiración (T) consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Por lo que se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET

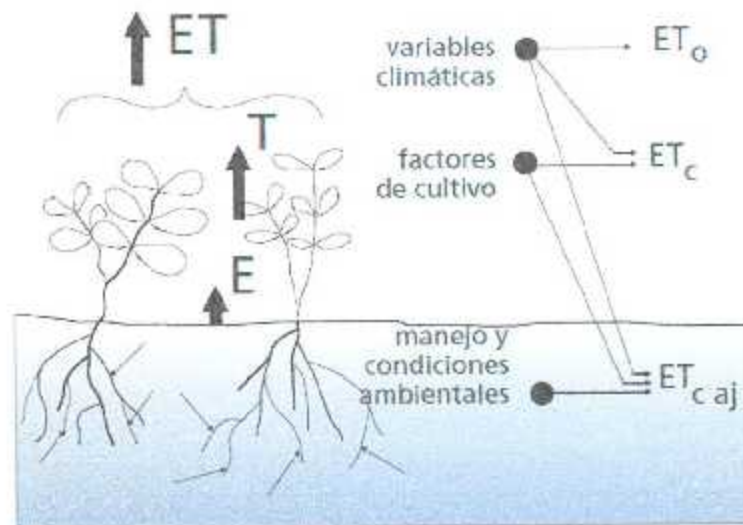


Figura 3 - Factores que afectan la ET

## 2.6 Variables climáticas.

Los principales parámetros climáticos que afectan la evaporación son la radiación, la temperatura del aire, la humedad, presión atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua.

### 2.6.1 Radiación solar.

La radiación solar es una de las más importantes fuentes de energía y puede cambiar grandes cantidades de agua (líquida) en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante se determina por su

localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año.

La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. En el efecto de la radiación solar se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua, parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo. [3]

### **2.6.2 Temperatura del aire.**

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire adyacente transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.

### **2.6.3 Humedad.**

La alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración mientras que el aporte de energía solar y del aire externo es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. En regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evaporación es más baja. [3]

#### **2.6.4 Presión atmosférica.**

Es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en gracias a la baja presión atmosférica. Sin embargo este efecto es pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor promedio para una región o localidad es suficiente.

#### **2.6.5 Velocidad de viento.**

El proceso de eliminación de vapor depende en gran parte del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie se satura gradualmente con vapor. Por lo que un aire más seco en la superficie aumentará la intensidad de eliminación de vapor de agua. [4]



## Capítulo 3.

### Determinación y métodos de la evapotranspiración.

La importancia de un sistema que regule o ahorre sustancialmente el uso del agua en la región agrícola se ha visto reflejada desde hace muchos años, esto debido a la disminución de los recursos naturales lo que a consecuencia tiene un panorama dudoso ya que gracias a estos recursos las actividades de la vida cotidiana son mucho más sencillas, es por eso que en la actualidad se toman con mucha seriedad estos estudios de mejoras al medio ambiente o a la disminución del uso de recursos naturales, teniendo un impacto dentro de foros gubernamentales o alguna organización definida para la preservación de los mismos.

En este capítulo se presentan los métodos requeridos para hacer un análisis al uso y evaporación, y como interpretar sus datos, a la vez analizar la evapotranspiración como elemento esencial ya que recordando que este es un proceso conjunto de evaporación y transpiración simultánea en un cultivo es la manera correcta para definir el uso y ahorro del agua.

#### 3.1 Conceptos de evapotranspiración.

La evapotranspiración incluye tres diferentes tipos:

Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ ) que es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera.

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $E_{Tc}$ ) que se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas en parcelas con un excelente manejo y

aporte de agua que logra una máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas.

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_c$ ) que requiere normalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y restringen la evapotranspiración.

### 3.1.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ )

Se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua y se denomina  $ET_o$ . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

El concepto de  $ET_o$  se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo, ya que hay gran disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, y en este caso los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre  $ET$ .

El relacionar la  $ET$  a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se relaciona la  $ET$  de otras superficies. Además, se elimina el tener definir un nivel de  $ET$  para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de  $ET_o$  en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a  $ET$  bajo la misma superficie de referencia.

Los únicos factores que afectan  $ET_o$  son los parámetros climáticos. Por lo tanto,  $ET_o$  es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.  $ET_o$  expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y

época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Existen varios métodos para determinarlos uno de ellos es Penman-Monteith y se recomienda como el único método de determinación de  $ET_o$  con parámetros climáticos.

Este método que se describe más adelante se utiliza debido a que aproxima de una manera cercana la  $ET_o$  de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes.



Figura 4. Concepto gráfico de  $ET_o$

### 3.1.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ).

Se denomina  $ET_c$  a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar y se refiere a cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas presentes.

Se define como necesidades de agua del cultivo a la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. [4]

El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua. La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, este método se utiliza sólo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia ( $ET_0$ ). La relación  $ET_c/ET_0$  que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo ( $K_c$ ), se utiliza para relacionar  $ET_c$  a  $ET_0$  de manera que  $ET_c = K_c \times ET_0$ .



Figura 5. Concepto gráfico de  $ET_c$

### 3.1.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

La ETc aj se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. En condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ETc debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ETc.

La evapotranspiración del cultivo con condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico  $K_s$  o ajustando  $K_c$  a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo



Figura 6. Concepto gráfico de ETc aj

### 3.2 Unidades de Evapotranspiración.

La unidad de medida es el mm por día. Por lo que si decimos que en un día de verano la ET puede ser de 3 ó 4 mm., es fácil de intuirlo al hablar de la evaporación

desde un lago, pero en un terreno con vegetación, hemos de pensar que el agua que se ha evapotranspirado equivaldría a una lámina de agua de 3 ó 4 mm. [4]

Además existe otra unidad de medición y su conversión es igual  $1 \text{ mm.} = 10 \text{ m}^3/\text{Ha}$  (metro cúbico sobre una hectárea)

### **3.3 Medición de ET**

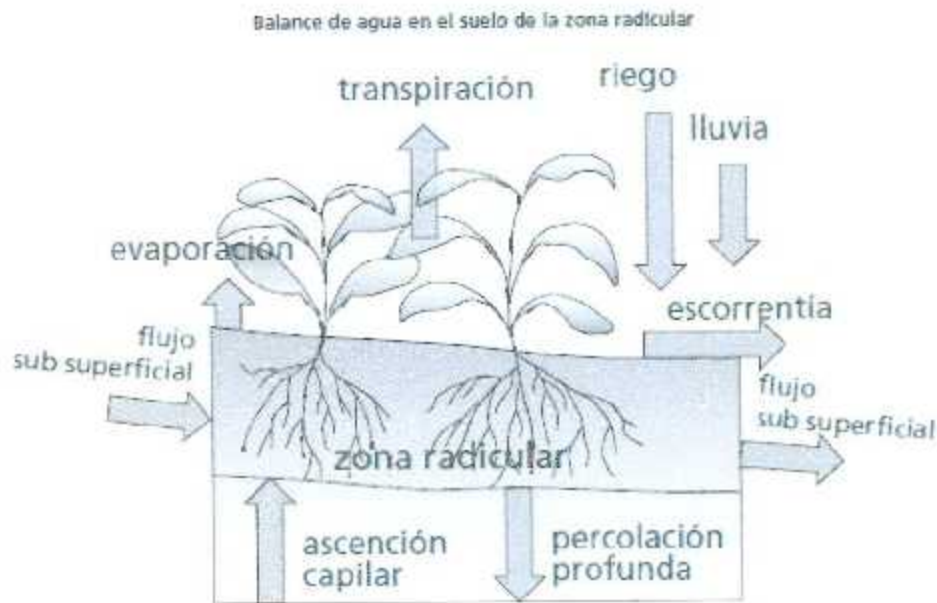
Para determinar la evapotranspiración experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros, el cual es un dispositivo introducido en el suelo, relleno con el mismo terreno del lugar y con vegetación. Es utilizado para medir la evapotranspiración de referencia o del cultivo. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos.

#### **3.3.1 Métodos de balance de energía y microclimáticos**

La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo período de tiempo.

### 3.3.2 Balance de agua en el suelo.

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular ( $\Delta FS$ ).



Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser

evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta SW$ ) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

### 3.3.3 Lisímetros.

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa en periodos tan pequeños como una hora. En



Figura 8. Lisímetro

lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. [4]

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos.

### 3.3.4 ET calculada con datos meteorológicos.

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o



semiempíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente.

### **3.3.5 ET estimada con el tanque de evaporación.**

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo.

### **3.4 Método de PENMAN-MONTEITH.**

Uno de los principales métodos es denominado PENMAN-MONTEITH y se describe a continuación

El método de Penman–Monteith puede considerarse como el método estándar de todos los métodos combinados para estimar la evapotranspiración (ET) del cultivo de referencia. La mayoría de los métodos combinados presentan ligeras variaciones dependiendo del tipo de cultivo y de la localización de los instrumentos meteorológicos. Por esta razón, el método de Penman–Monteith utiliza términos como la resistencia aerodinámica del follaje para relacionar la altura de los instrumentos meteorológicos con la altura del cultivo y la resistencia estomática a la transpiración mínima que dependerá del tipo de cultivo y de su altura. La ecuación Penman-Monteith fue derivada a partir de la ecuación

original de Penman-Monteith y de las ecuaciones de resistencia aerodinámica y del cultivo.

Dónde:

ET<sub>o</sub> = evapotranspiración de referencia (mm/día)

R<sub>n</sub> = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>/día)

R<sub>a</sub> = radiación extraterrestre (mm/día)

G = flujo del calor de suelo (MJ/m<sup>2</sup> /día)

T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u<sub>2</sub> = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e<sub>s</sub> = presión de vapor de saturación (kPa)

e<sub>a</sub> = presión real de vapor (kPa)

e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub> = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa /°C)

γ = constante psicrométrica (kPa /°C)

La Ecuación determina la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia y proporciona un valor estándar con el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos periodos del año o en otras regiones así como también puede relacionarse con la evapotranspiración de otros cultivos.

La ecuación combinada de Penman-Monteith es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Figura 9. Ecuación de Penman-Monteith

### 3.5 Tanque evaporímetro.

La medición de evaporación en los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un periodo (mm/día) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese periodo.

Los tanques proporcionan una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso de evaporación de una superficie abierta de agua. Aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada. La reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede ser diferente del 23% asumido para el cultivo de referencia. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solamente durante el día. También se distinguen diferencias en la turbulencia, temperatura y humedad del aire que se encuentran inmediatamente sobre estas dos superficies. La transferencia de calor a través de las paredes del tanque también afecta el balance energético.

A pesar de la diferencia en los procesos ligados a la evaporación del tanque y la evapotranspiración de superficies cultivadas, el uso de la evaporación del tanque para predecir la  $E_{To}$  para periodos de 10 días puede ser considerado confiable si se usa correctamente. La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$E_{To} = K_p E_{pan}$$

Dónde:

$E_{To}$  = evapotranspiración de referencia [mm/día]

$K_p$  = coeficiente del tanque evaporímetro [-]

$E_{pan}$  = evaporación del tanque evaporímetro [mm/día].

### 3.5.1 Tipos de tanques evaporímetro.

Existen diversos tipos de tanques evaporímetros. Las descripciones del tanque clase A y del tanque enterrado tipo Colorado. Como el color, el tamaño, y la posición del tanque evaporímetro tienen una influencia significativa en los resultados medidos, los coeficientes del tanque evaporímetro son específicos para cada tipo de tanque evaporímetro.

Para seleccionar el coeficiente apropiado para un tanque evaporímetro dado, se debe considerar no solamente el tipo del tanque, sino también la cobertura del suelo donde se ubica el tanque, sus alrededores así como el viento y las condiciones generales de humedad. La localización y el ambiente del tanque evaporímetro también tienen influencia en los resultados. Lo último es particularmente cierto en casos en que el tanque evaporímetro se encuentra situado en suelos bajo barbecho y no en campos cultivados. Bajo esta característica, dos casos se consideran comúnmente: Caso A en que el tanque evaporímetro se localiza en una zona de pasto corto verde y está rodeado por un suelo en barbecho; y Caso B en que el tanque evaporímetro se localiza sobre un suelo en barbecho y está rodeado por un cultivo verde.

Dos casos de localización del tanque de evaporación y sus alrededores.



Figura 10. Localización del Tanque en Caso A y Caso B

### 3.5.2 Coeficientes del tanque evaporímetro.

Dependiendo del tipo de tanque y del tamaño y estado de la zona tampón, los coeficientes del tanque evaporímetro tendrán valores diferentes. Cuanto más grande es la zona tampón, más rápidamente el aire que se mueve sobre el tanque estará en equilibrio con ella. En equilibrio y con un área tampón grande, el aire contiene más vapor de agua y menos calor en el caso A que en el caso B. En caso en que los datos medidos con otros tipos de tanques estén disponibles, estos deben primero relacionarse con los datos del tanque tipo Colorado o con la ecuación Penman-Monteith para desarrollar  $K_p$ .

### 3.5.3 Ajustes

El variar el color del tanque evaporímetro a otro color diferente al estándar o la instalación de las mallas protectoras puede afectar la lectura del tanque evaporímetro y requerirá algún ajuste del coeficiente  $K_p$ .

En áreas sin desarrollo agrícola y extensas zonas con suelos desnudos (grandes áreas tampón, el Caso B), como las encontradas en condiciones desérticas o semidesérticas, los valores de  $K_p$  para áreas áridas y ventosas pueden necesitar ser reducidos hasta en un 20%; en áreas con niveles moderados de viento, temperatura y humedad relativa, los valores pueden necesitar una reducción del 5-10%; en climas húmedos y tibios se necesita poca o ninguna reducción del  $K_p$ .

En casos en que el tanque evaporímetro se encuentre dentro de un cercado y rodeado por cultivos de gran altura como por ejemplo el maíz (2,5 m), los coeficientes mencionados necesitaran ser incrementados hasta en un 30% en climas ventosos y secos, mientras que para condiciones tibias y húmedas solo se requiere un aumento del 5-10% del coeficiente.

La pintura de las paredes del tanque puede afectar la evaporación. Los coeficientes se aplican para tanques galvanizados pintados anualmente con aluminio y a tanques de acero inoxidable. No se requiere corrección para los valores de Epan en caso de que las superficies interiores y exteriores del tanque evaporímetro estén pintadas de blanco. Un aumento en Epan de hasta 10% puede ocurrir cuando las paredes se pintan de negro. El material del que está fabricado el tanque produce pocas variaciones en el valor de Epan.

El nivel en el cual se mantiene el agua en el tanque es importante; errores de hasta 15 % pueden resultar cuando el nivel del agua en el tanque evaporímetro Clase A se encuentra 10 centímetros por debajo del estándar aceptado que es de entre 5 y 7,5 centímetros debajo del borde. Las mallas colocadas sobre el tanque evaporímetro pueden reducir Epan hasta en un 10%. Con el fin de evitar que las aves beban agua del tanque evaporímetro Clase A, se pueden colocar cerca otros tanques llenos con agua hasta el borde; en general los pájaros prefieren beber del tanque completamente lleno.

El tanque de evaporación se debe colocar rodeado de una verja o cerca que evite que los animales entren y beban el agua. La turbidez del agua en el tanque generalmente no afecta Epan en más del 5%. La variación total en Epan no es constante en el tiempo debido al uso, al nivel de deterioro y las repetidas pinturas.

#### **3.5.4 Recomendaciones.**

Las consideraciones y los ajustes antedichos muestran claramente que el uso de los cuadros o ecuaciones correspondientes puede no ser suficiente para incluir todos los factores ambientales locales que influyen sobre el valor de  $K_p$  y que puede requerirse un ajuste local. Para ello se recomienda realizar una adecuada calibración de Epan con relación a la ETo calculada con el método FAO Penman-Monteith.

También es conveniente instalar el tanque dentro de un área cultivada verde con un tamaño de por lo menos 15 m. por 15 m en la cual el tanque no debe estar situado en el centro sino a una distancia de por lo menos 10 m del borde del cultivo en dirección del viento.

En caso de que en el sitio donde se encuentra el tanque no exista disponibilidad de datos de velocidad del viento y humedad relativa, requeridas para el cálculo de  $K_p$ , estos deben ser estimados de datos de una estación próxima. En este caso se recomienda usar promedios del periodo y como consecuencia  $E_{pan}$  también será calculada como promedio del periodo.

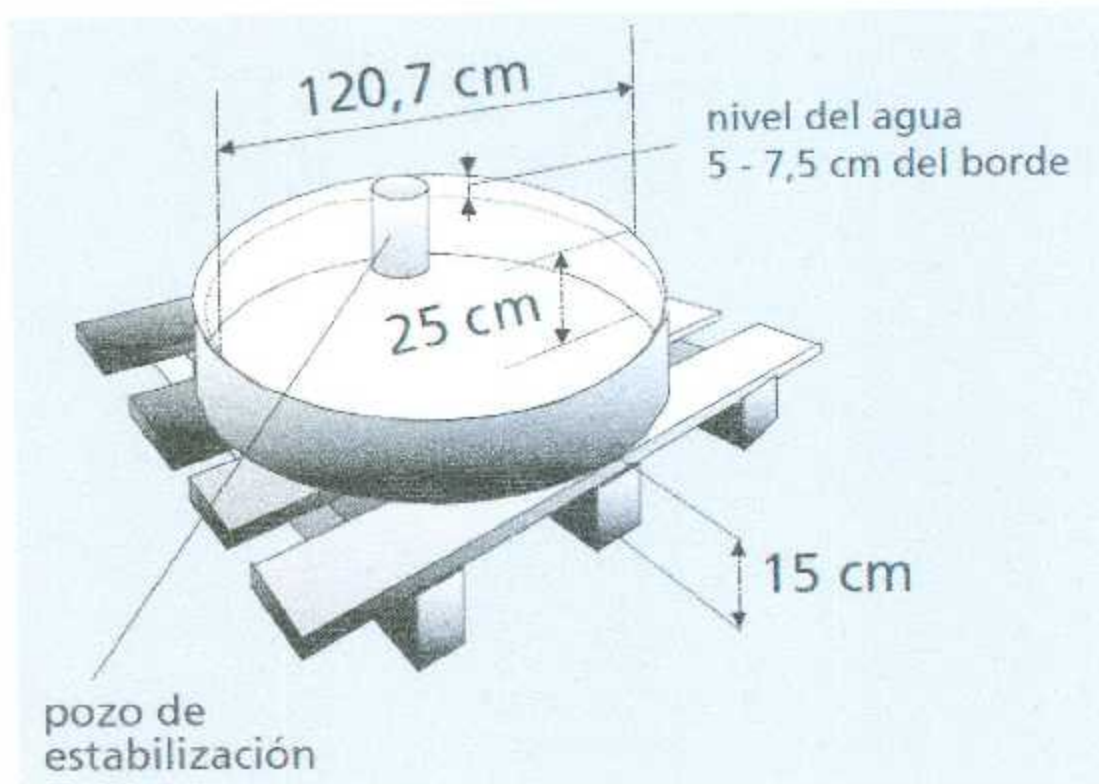


Figura 11. Tanque evaporimetro tipo A

El tanque Clase A es circular, 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Esta construido de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8 mm). El tanque se sitúa sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo. El tanque debe estar a nivel. Una vez instalado, el tanque se llena

con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7,5 cm por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado, debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. Las mallas sobre los tanques deben evitarse. Los tanques deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso de los animales.

El lugar de instalación debe estar cubierto preferentemente con pasto, en un área de 20 por 20 m, abierto a todos lados para permitir la circulación del aire. Es preferible que la estación se encuentre situada en el centro o dentro de grandes campos cultivados.

Las lecturas del tanque se realizan diariamente temprano en la mañana a la misma hora que se mide la precipitación. Las mediciones se realizan dentro de un área estable situada cerca del borde del tanque.

El área estable la produce comúnmente un cilindro de metal de cerca de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad con una pequeña abertura en la base para permitir el flujo de agua.



Figura 12. Lado izquierdo: tanque evaporímetro para venta, lado: derecho tanque evaporímetro hecho en las instalaciones del ITT



## **Capítulo 4.**

### **Planteamiento del sistema y sus elementos.**

#### **4.1 Planteamiento.**

La intención del proyecto es renovar el sistema de medición de evaporación de agua para un análisis efectivo y es por eso que se emplean algunos elementos del proyecto anterior y se incorporan nuevos para mejorar su funcionamiento. El fin de este sistema es que pueda obtener los valores de evaporación diaria o en cualquier momento según se necesite, a cualquier hora del día por lo que es necesario que almacene los valores durante la noche y sea capaz de mostrarlos en un documento, es por eso que se evaluó cada elemento según su necesidad y características.

El sistema cuenta con 4 áreas de funcionamiento en el que se necesitan obtener las mediciones enviarse a un elemento capaz de controlar sistemas digitales inalámbricos y de ahí realizar la comunicación misma para la recepción de los datos desde donde se encuentra el sensor, hacia el área de recepción donde se encuentra una computadora a una distancia de 80 m en la cual se visualizaran y se almacenaran los datos para su análisis futuro según correspondan.

Lo primero es la captura o muestreo de datos de evaporación por medio del sensor ultrasónico ya utilizado en la elaboración de este proyecto en su etapa anterior, por lo que en ese sentido se deja ese elemento como medidor de la distancia en milímetros teniendo como cuestionamiento a favor la exactitud con la cual puede recibir valores de alrededor de 0.1 mm aunque como contra tiene el costo del mismo, ya que debido a que sufrió un pequeño accidente en el cual se necesitó adquirir un nuevo sensor fue determinante para seguir con el proceso de mejora.

Como segundo elemento de funcionamiento se trata en la recopilación de los datos en el microcontrolador Arduino UNO, ya que al tener un lenguaje de programación sencillo se determinó la elección del mismo, a la vez se hicieron análisis con alguna otra opción como el microcontrolador Rabbit, aunque su costo y su utilización fueron determinantes para declinarnos por la Arduino.

El tercer elemento que se necesitaba era acerca de la comunicación inalámbrica, por ese motivo se decidió utilizar los módulos inalámbricos de radiofrecuencia digital XBee que utilizan un protocolo de alto nivel de comunicación llamado ZigBee su elección fue simple en el sentido de que tiene un módulo de acoplamiento con la tarjeta Arduino llamado XBee Shield lo cual hace más fácil la transmisión inalámbrica, aunado a esto se necesita un módulo de recepción XBee para capturar los datos y así conectado a la computadora por un puerto (USB) serial manejar los datos recibidos.

Como 4 elemento era una computadora donde se necesitaban los datos utilizamos un software llamado LabVIEW que es uno de los más populares sistemas de diseño y desarrollo para un lenguaje de programación visual ideal para cualquier medición o control del sistema y ya que puede recibir información por medio de un puerto serial configurado y que ya se había trabajado en este sistema para este mismo proyecto en su etapa anterior fue mucho más fácil decidirnos por este software.

#### **4.2 Elementos del sistema.**

Dentro de la industria de la instrumentación existen diferentes elementos de medición como lo son algunos sensores y en su caso cada uno de ellos, tienen una función específica y dependiendo del objetivo de funcionamiento es como se debe elegir, a continuación describiremos las características importantes de los elementos que conforman el sistema como lo es el sensor de medición ultrasónico, el microcontrolador Arduino que hará la recepción de los datos, los módulos de

transmisión/recepción inalámbrica y el software LabVIEW que servirá como interpretación y muestreo de los datos de evaporación.

### 4.3 Sensor ultrasónico.

Marca Pepperl+Fuchs

Modelo: UC500-30GM-IUR2-V15



Figura 13. Sensor Inalámbrico UC500-30GM-IUR2-V15

Información General	Características
Rango de detección	30 – 500 mm
Rango Ajustable de Sensado	50 – 500 mm
Zona ciega	0 – 50 mm
Frecuencia del Transductor	Aprox. 380 kHz
<b>Indicadores</b>	
LED verde	Permanente: Power-ON Parpadeo: operación Standby Parpadeo: función Teach-in objeto detectado.
LED amarillo 1	Objeto en el limite de evaluación A1
LED amarillo 2	Objeto en el limite de evaluación A2
LED rojo	Objeto no detectado

Información Eléctrica	
Tensión de Trabajo	10 - 30 V CC
<b>Salida</b>	
Tipo de Salida	0 - 10V/4 - 20 mA
Condiciones ambientales de trabajo	
Temperatura ambiente	-25 ... 70 °C

Tabla 1. Especificaciones del sensor ultrasónico.

- Dimensiones.

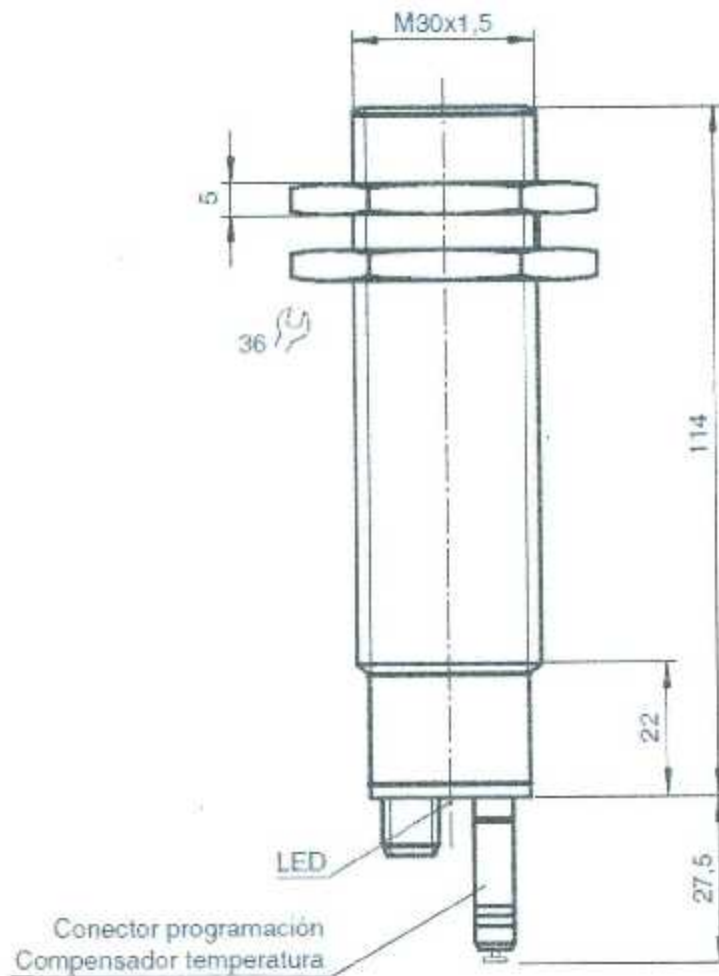


Figura 14. Dimensiones del sensor

- Cable de Interfaz

A través del cable de interfaz obtenemos las salidas especificadas, ya sea de corriente o voltaje según la configuración. En este caso utilizamos la salida de tensión 0 - 10 V., de un lado es una conexión hembra y del otro se encuentran los cables al descubierto para un ajuste según las condiciones de su ensamble.



Figura 15. Cable de Interfaz V15-W-2M-PVC

- Configuración del cable

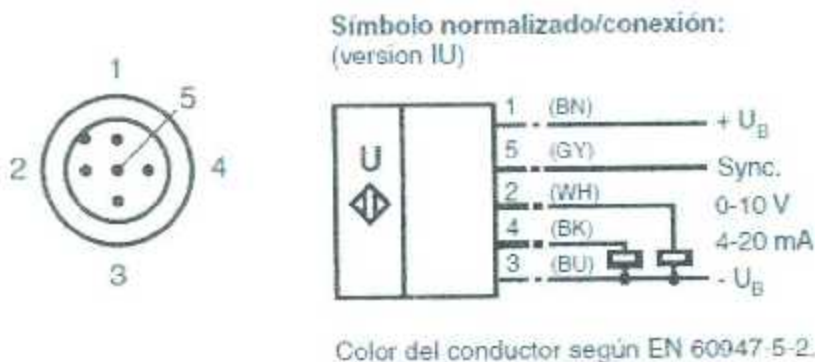


Figura 16. Configuración de conexión

- Programación del sensor.

El sensor incorpora 2 salidas analógicas programables con áreas de evaluación programables. La programación del área de evaluación y del modo operativo puede efectuarse mediante la interface RS 232 del sensor a través del uso del programa de servicio ULTRA 3000. [4]

- Programación y/o calibración de área de evaluación.

1. Desconecte el sensor de la alimentación

2. Extrae el conector de programación para activar el modo de programación.

3. Conecte el sensor a la alimentación (Reset)

4. Coloque el objeto que se va a detectar en el límite de área de evaluación A1 deseado.

5. Conecte el conector de programación brevemente en la posición A1 y vuelva a extraerlo. El límite de área de evaluación A1 está ahora programado.

6. Coloque el objeto que se va a detectar en el segundo límite de área de evaluación deseado A2.

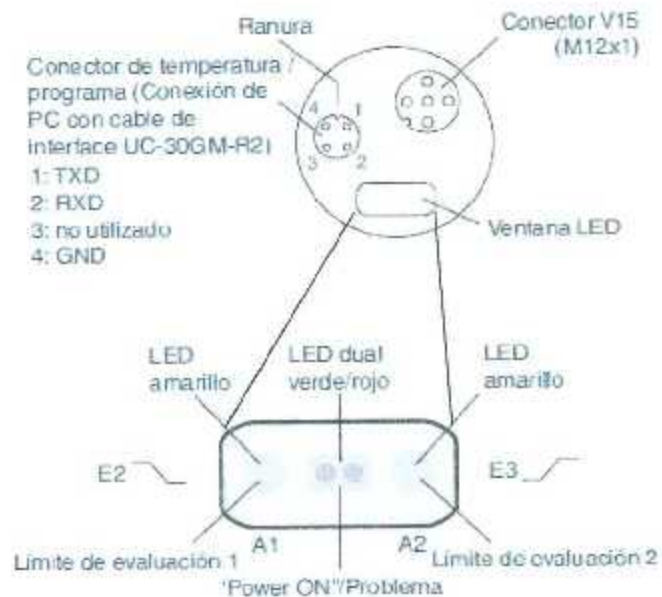


Figura 17. Vista superior del sensor

7. Conecte el conector de programación brevemente en la posición y vuelva a extraerlo. El límite área de evaluación A2 está ahora programado.

#### 4.4 Microcontrolador Arduino.

Arduino es una plataforma de electrónica hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso en proyectos, se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Debido a ello es muy fácil su utilización y su programación.

El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring que es un software de programación de código abierto para los microcontroladores). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, esto gracias a que permite cargar o guardar un programa según sus necesidades y estar ejecutándose por sí mismo, en este caso conectaremos la Arduino a la computadora para la recepción de los datos y la utilización de los mismos.

Existen varios tipos de tarjetas Arduino las cuales a continuación se muestran algunas de las más conocidas.

- Arduino Leonardo.
- Arduino Mega.
- Arduino Mini.
- Arduino Nano.
- Arduino Uno.

Así mismo existen extensiones avanzadas específicas para su aplicación como las siguientes:

- Arduino GSM Shield.
- Arduino Wireless SD Shield
- Ethernet shield.
- XBee shield

#### 4.4.1 Arduino Uno.

Se eligió el modelo Arduino UNO porque al ser un sistema que no requiere mucha elaboración esta herramienta es muy básica en cuanto a su funcionamiento y es muy económica. cuenta con las siguientes características

Nombre	Características
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de salida	0 - 5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7 - 12V
Voltaje de entrada (limite)	6 - 20V
Digital I/O Pins	14 (6 PWM)
Entradas analógicas	6
Corriente DC por I/O Pin	40 mA
Corriente DC por 3.3V Pin	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad del reloj	16 MHz

Tabla 2. Especificaciones del microcontrolador Arduino UNO. [5]





Figura 18. Arduino Uno [5]

- Entradas y Salidas.

Cuenta con 6 entradas analógicas, desde A0 hasta A5 que proporcionan 10 bits de resolución (1024 valores distintos). Siendo su alimentación en hasta 5 volts y contando con un pin de tierra (GND). Tienen 14 entradas o salidas digitales y se configuran según su necesidad. [5]

- Comunicación.

Gracias a su microcontrolador ATmega328 ofrece comunicación serial por medio de un puerto USB o también por un puerto virtual COM. El programa de programación

Arduino incluye un monitor de puerto serial que permite que se envíen hacia la placa Arduino simples datos de texto. [5]

- Programación.

La plataforma Arduino se programa a través del uso de un lenguaje basado en el lenguaje de programación de alto nivel llamado Processing. Aunque, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en arduino como son las siguientes:

- Adobe Director
- C
- C++
- C#
- Flash
- Java

#### **4.5 Modulo de comunicación inalámbrica.**

Debido a la larga distancia en el cual se encuentra el sensor y la computadora de recepción, se decidió utilizar módulos de comunicación XBee Pro para la emisión, esto debido a que necesita una buena transmisión para evitar el tope con las paredes o algún elemento que pudiera interferir en él y de recepción una XBee estándar que tiene una recepción de 100 m.

##### **4.5.1 XBee.**

Son dispositivos que integran un transmisor/receptor de comunicación inalámbrica por medio de un protocolo llamado ZigBee y un procesador en un mismo módulo, lo que le permite se puedan desarrollar aplicaciones para la transmisión/recepción de datos de manera rápida y sencilla.



- XBee S1. (Recepción)

XBee	Máxima velocidad de datos	Banda de frecuencia	La potencia de transmisión	Antena	IO pines digitales	Entradas ADC	Alcance
XBee S1	115.2 KBP	2.4 GHz	1 mW	Incorporado	8	(7) 10 bits	300 pies (100 m)

Tabla 4. Características del módulo de comunicación XBee S1.



Figura 20. XBee S1

- XBee Shield. (Para Arduino)

Simplifica la tarea de conectar un módulo XBee con la Arduino. Esta tarjeta se utiliza directamente con el Arduino UNO y la provee de comunicación inalámbrica.

Los pines seriales (DIN y DOUT) del XBee están conectados a un switch SPDT, con lo que puedes seleccionar conectarlo a la UART (D0, D1) o a los pines digitales 2 y

3 del arduino. La alimentación de 5V la toma directamente del arduino, la tarjeta posee un regulador de voltaje de 3.3 VDC para poder alimentar el XBee.

La tarjeta incluye Leds que indicadores de la alimentación y la actividad de los pines DIN, DOUT que indican si se encuentra activa o haciendo alguna transmisión la XBee.



Figura 21. XBee Shield/Arduino

#### XBee Explorer USB.

Es una unidad USB a serial cualquier producto XBee que conecta la unidad XBee Explorer, insertando en cable mini USB y teniendo acceso directo a los pines seriales y de programación de la unidad XBee.



Figura 22. XBee Explorer

#### 4.6 LabVIEW.

Por sus siglas en inglés (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Permite diseñar interfaces gráficas de usuario basado en programación, a la vez compatible con herramientas de desarrollo de área de aplicación y permite una fácil integración con equipo técnico, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos

LabVIEW tiene mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y/o aplicaciones de control y procesamiento en tiempo real de aplicaciones

Consta de 2 bloques de visualización:

- Panel Frontal: es la interfaz con el usuario, se usa para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Se pueden observar los datos del programa actualizados en tiempo real, aquí se definen los controles e indicadores.
- Diagrama de Bloques: es el programa desarrollado, donde se define su funcionalidad, aquí se insertan iconos que realizan una función específica y se interconectan.

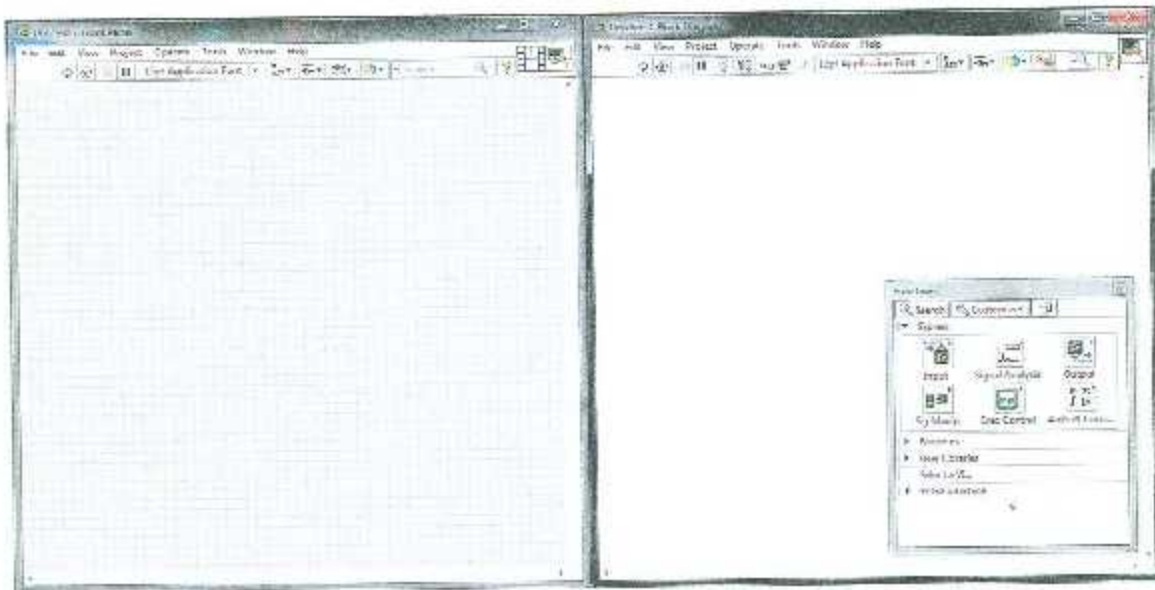


Figura 23. Bloques de visualización de LabVIEW

## **Capítulo 5.**

### **Sistema autónomo de mediciones agrícolas.**

#### **5.1 Desarrollo.**

A continuación se presentaran cada uno de los pasos y procesos necesarios para la medición, recepción, transmisión y almacenaje de los datos de evaporación que incluyen en el objetivo del proyecto. Se especificarán los detalles relacionados a su configuración para esta aplicación así como la programación de los elementos para obtener la medición requerida.

#### **5.2 Montaje del sensor ultrasónico.**

Para realizar el montaje del sensor dentro del tanque evaporímetro se necesitaba un elemento en el cual protegiera al sensor del agua, así como del clima en general, debido a que con anterioridad según su montaje había sufrido un hundimiento del sensor por lo que se requirió adquirir otro, a su vez se ideó un armazón acoplado al cilindro de calma, que es un elemento de metal galvanizado que reduce el área en el cual se tomará la medición para así poder contrarrestar el efecto del oleaje debido al viento o a alguna fuerza externa.

##### **- Cilindro de Calma y protección**

Es un cilindro de metal de cerca de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad con una pequeña abertura en la base para permitir el flujo de agua, en la parte superior se coloca un armazón el cual sirve de soporte para el sensor mismo y a su vez obtiene estabilidad.



El cilindro de calma tiene una altura total de 25 cm en la cual se toma la distancia que el sensor no puede hacer una medición correcta que es después de 5 cm llamada zona ciega, por lo que el sensor se colocó al borde de la parte superior del cilindro de calma agregándole el armazón protector.

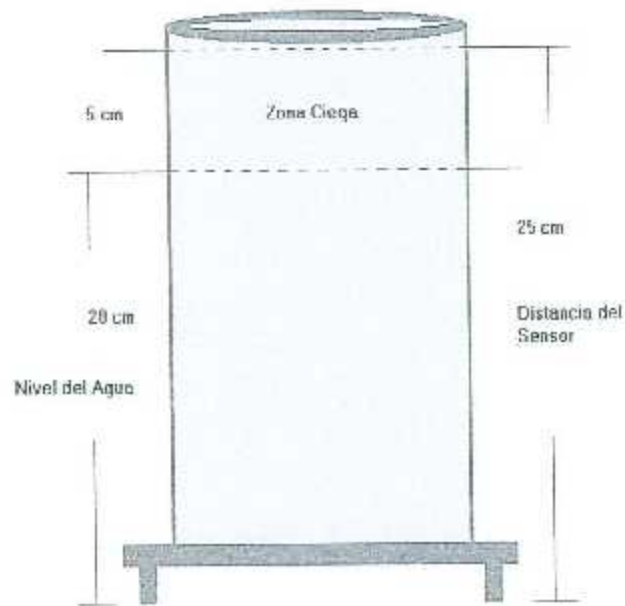


Figura 24. Medidas del cilindro de calma

Las medidas de la armadura o protección son las siguientes y se observa en la siguiente figura

- Altura: 9.1 cm
- Diámetro: 10.2 cm
- Distancia entre la rosca y el borde de la circunferencia del cilindro: 3.7 cm

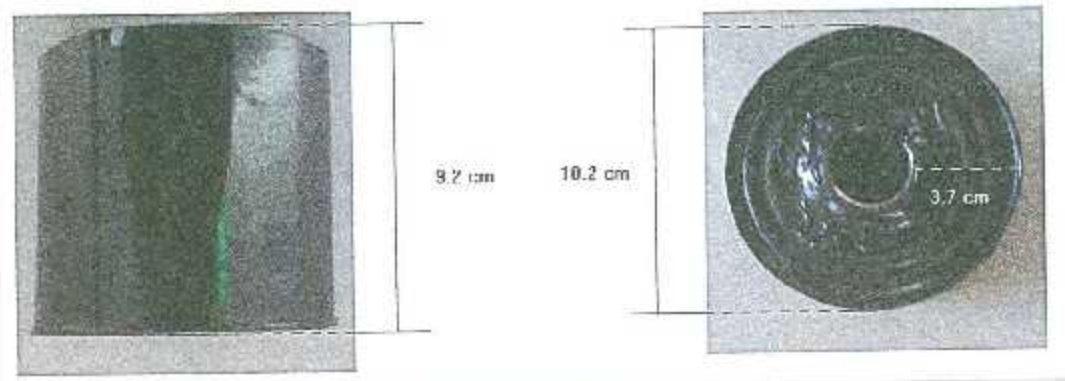


Figura 25. Tamaño de Carcasa

En el montaje de la figura de abajo a la izquierda tenía como estructura un segmento de mica por lo que desgraciadamente no tenía estabilidad y en la figura de la derecha vemos el cambio con una carcasa de metal que le da mayor estabilidad y lo protege del agua misma.



Figura 26. Montaje del sensor

Se necesita aclarar que fue necesario calibrar primero la distancia que se necesita medir, debido a que se necesitó definir un punto de inicio A1 y un punto final de A2 que es el rango específico.

El tanque evaporímetro nunca debe estar vacío es por eso que a pesar de los 20 cm de rango que podía medir el sensor según su colocación en el cilindro de calma se fijó como rango de calibrado y de medición una distancia de 5 cm lo cual indicaba que se tenía que rellenar el tanque para que no se perdiera ninguna medición, según se muestra en la figura N.

Las conexiones eléctricas del sensor está con una fuente de 24 V, la arduino se alimenta con un eliminador de 12 V.

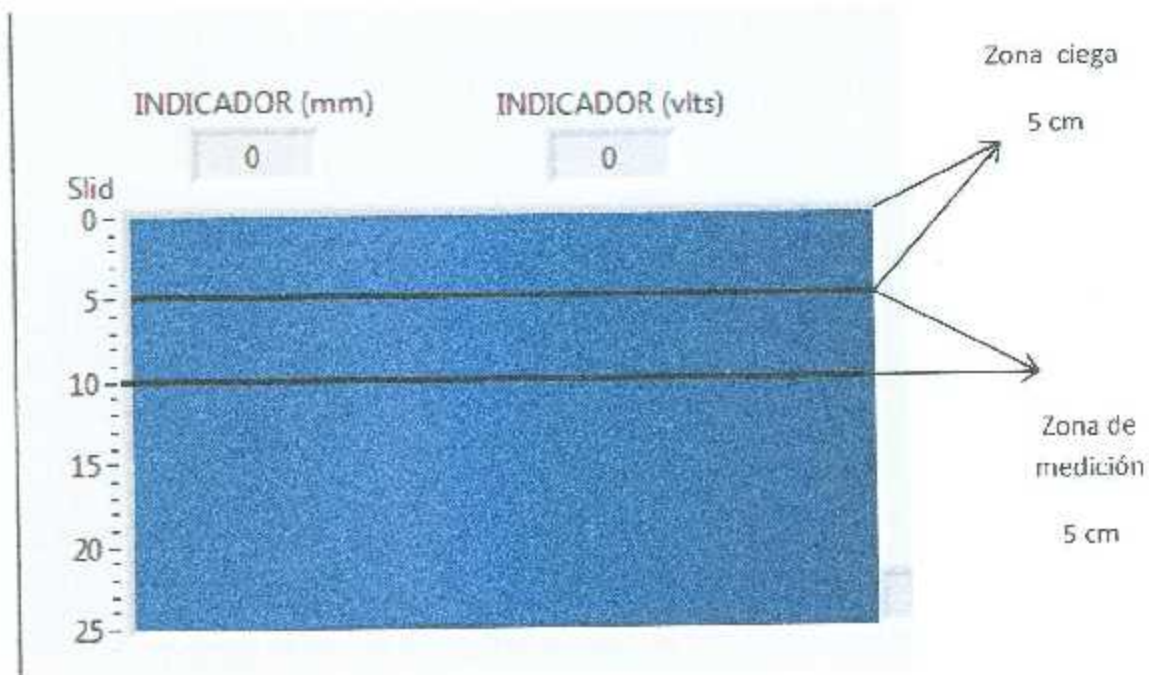


Figura 27. Zona de medición

### 5.3 Montaje del sensor en el tanque evaporímetro.

Debido a posibles deformaciones del material del tanque evaporímetro causado por algún efecto climático, se decidió montar el sensor junto a su armazón en el centro del tanque, además de protegerse con una malla para así evitar que algún elemento externo ingresara al tanque, ya sea un ave o algo de basura.



Figura 28. Tanque evaporímetro

#### 5.4 Conexión del sensor al microcontrolador Arduino.

La conexión del cable de interfaz del sensor a la arduino es por medio de un divisor de tensión debido a que la tarjeta arduino recibe señales de entrada de un máximo de 5 V y el sensor da un voltaje máximo de 10 V. Por medio del cable de interfaz se alimenta el sensor y a su vez obtiene el voltaje de salida.

El cable de interfaz tiene un conector tipo RS 232 en un extremo que se conectó al sensor, el otro extremo cuenta con 5 cables al aire, los cuales se conectan según la configuración de colores del cable. En este caso solo tres de ellos se conectarán los cuales serán lo de alimentación y el voltaje de salida el cual enviará los datos a la arduino café (V+), azul (V-) y blanco (Vo)

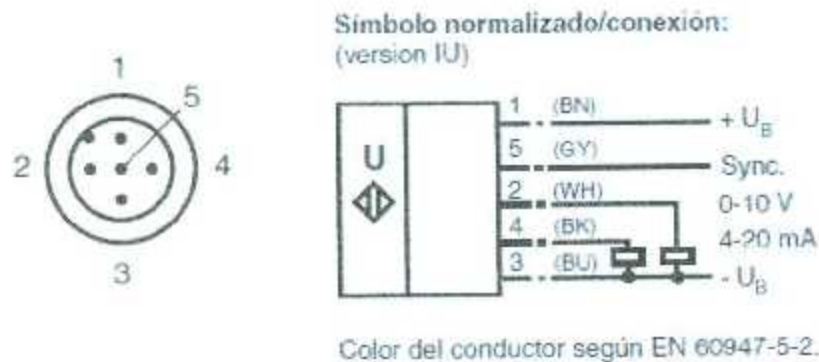


Figura 29. Configuración de conexión

#### - Calibración/Modo Programación

El sensor se necesitó calibrar por lo que al alimentar el sensor encendieron los tres indicadores LED, según las reglas de configuración del sensor se estableció la zona A1 que es el primer límite de evaluación, al programarlo el indicador dual en verde y el límite de evaluación 2 en amarillo parpadearan mientras esté el conector de programación enchufado.

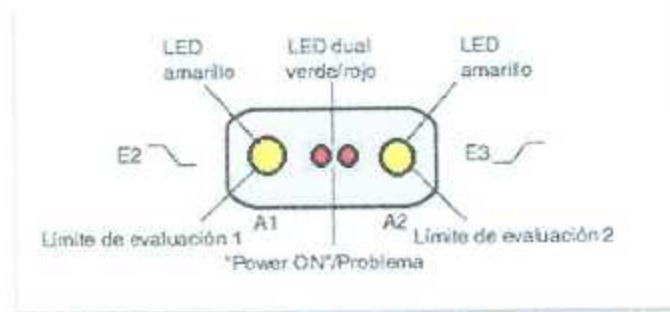


Figura 30. Visualización de Calibración

### 5.4.1 Arduino.

La tarjeta Arduino admite las lecturas del sensor gracias a un convertidor de señales analógicas a digitales integrado (ADC) de 10 bits, lo cual tiene un rango de 0 a 1023 números enteros, en proporción a al rango de 0 a 5 volts recibidos en las entradas analógicas de la tarjeta. Según el funcionamiento de las entradas analógicas de la tarjeta, se diseñó un programa sencillo solamente en la adquisición y transmisión del voltaje mandado por el sensor, esta se envía al puerto serial de la misma tarjeta para que a su vez pueda ser interpretada por la tarjeta XBee, sin importar en la conversión a medidas en mm por lo que eso se realizó más adelante en el sistema LabVIEW.

El microcontrolador arduino cuenta con su propio sistema de programación vía PC que guardara el archivo con terminación .ino, el cual es muy sencillo debido a que tiene muchas librerías así como su parecida sintaxis a la programación en C, además al terminar de programar se carga archivo por medio de un puerto USB que tiene la tarjeta, esto genera que no sea necesario estar conectado siempre a la computadora y así ser un dispositivo remoto.

```
sensor2
int variablex;
char datoSerie;

void setup () {
  Serial.begin (9600);
  analogReference(DEFAULT);
}

void loop () {
  if(Serial.available() > 0)
  {
    datoSerie = Serial.read();
    if(datoSerie == 'A')
    {
      variablex=analogRead(A2);

      if (variablex < 10)
      {
        Serial.print("000");
        Serial.print (variablex);
      }
      else if (variablex >= 10 && variablex < 100)
      {
        Serial.print("00");
        Serial.print (variablex);
      }
      else if(variablex >= 100 && variablex < 1000)
      {
        Serial.print("0");
        Serial.print (variablex);
      }
      else
        Serial.print(variablex);
    }
  }
}
```

Figura 31. Programa de recepción de datos.

### 5.4.2 Arduino/XBee.

La comunicación del tanque evaporímetro y la estación de monitoreo se encuentra a más de 80 m de distancia entre sí por lo que la conexión inalámbrica es uno de los elementos esenciales.

### 5.4.3 Configuración de XBee.

Los módulos XBee transmiten inalámbricamente estos datos al programa de monitoreo en LabVIEW, para esto se configuró los 2 módulos, tanto el emisor como el receptor por medio del software X-CTU recomendado para la comunicación de Xbee del fabricante, que sirve como configurador de los módulos.

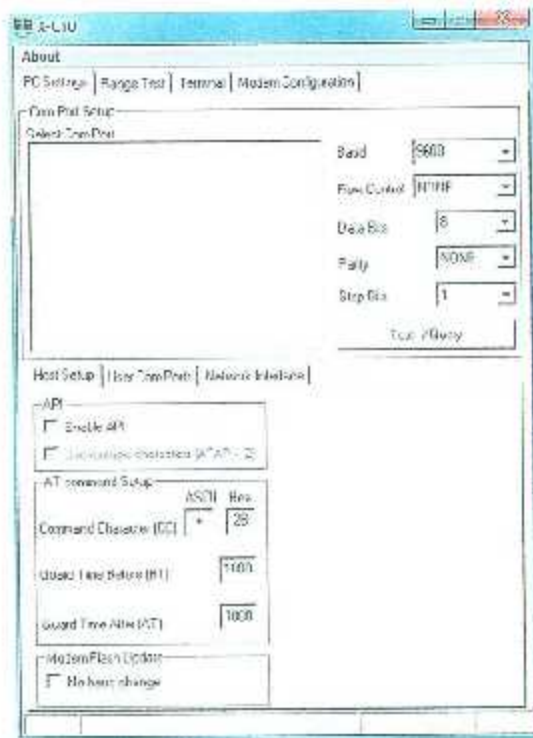


Figura 32. Pantalla principal X-CTU



Al configurar los módulos XBee con el programa X-CTU se debe seleccionar entre la XBee Shield o el XBee Explorer USB para montar los módulos y realizar la configuración, en este caso se utilizó la Xbee Shield para la conexión con el microprocesador debido a la transmisión de los datos conectados a la arduino y se usó el módulo XBee Explorer USB al conectarlo a la PC debido a que solo necesita la recepción de los datos y el programa de monitoreo realiza la conversión de datos.

Al utilizar la XBee Shield la configuración fue necesario tomar retirar el microcontrolador ATmega328 de la tarjeta arduino.

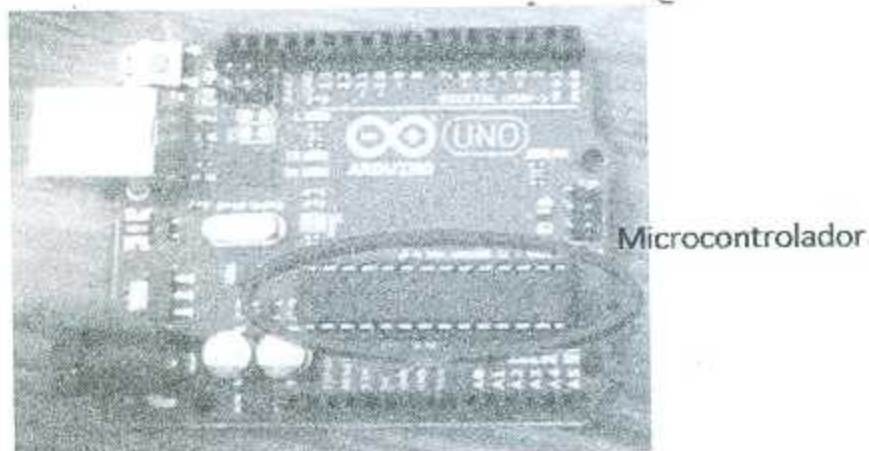


Figura 33. Arduino UNO

Una vez acoplados los 3 módulos (tarjeta Arduino, XBee Shield y XBee), se colocó el puente XBEE/USB de la XBee Shield en posición de USB y conectar a la PC como se muestra en la siguiente figura.

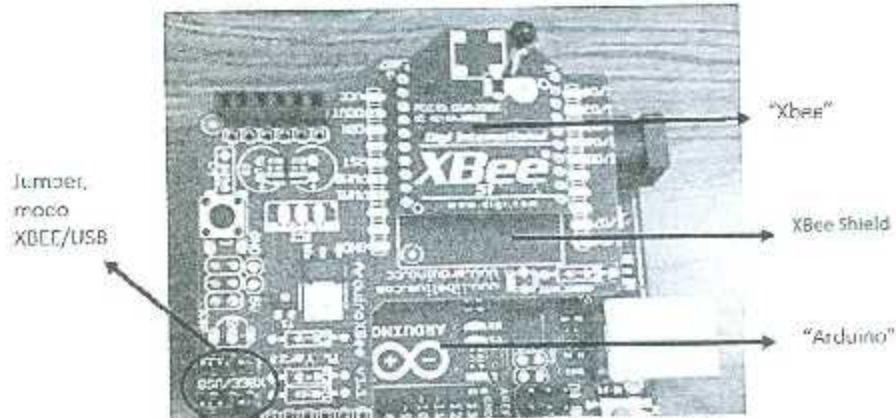


Figura 34. Montaje de tarjeta Arduino

Al seleccionar la tarjeta para montar los módulos y realizar la configuración de la XBee, en este caso utilizaremos el Explorer USB, se debe de tener instalado el programa "X-CTU" para empezar con la configuración.

Con el XBee conectado a la PC abrimos el programa X-CTU, una vez que haya detectado el puerto, en este caso el puerto USB, se añade en el programa a través de la sección "User COM Ports", en la parte "COM Port Number" se escribe el nombre dado al USB en este caso "COM4".

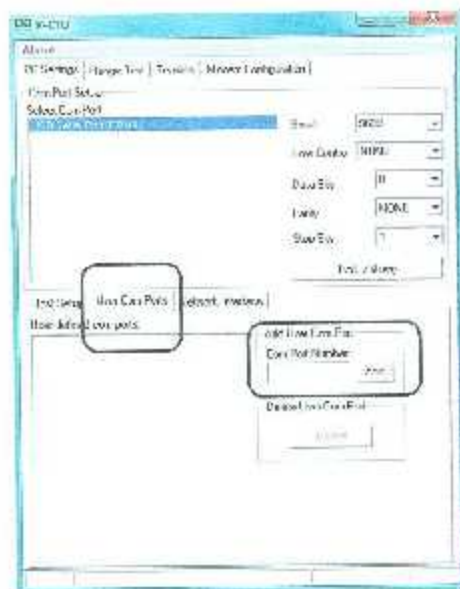


Figura 35. Configuración Xbee

Después de añadir el dispositivo, se seleccionó "Test/Query", esta prueba es para establecer comunicación con el modem de la XBee, antes de ello se debe establecer también los Baud a los que se quiere configurar la transmisión, por default aparece 9600

Se configuraron los módulos por el modo de Terminal, el cual es más rápido y directo de configurar.



Figura 36. Pantalla de configuración

En configuración "Terminal" como primera instrucción se debe escribir +++ antes de escribir cualquier comando. Los comandos que se utilizaron para la configuración del nodo son los siguientes:

Para el Transmisor:	Para el Receptor:
+++,	+++,
ATID3332,	ATID3332,
ATCH0C,	ATCH0C,
ATDH0,	ATDH0,
ATDL1,	ATDL0,
ATMY0,	ATMY1,
ATBD3,	ATBD3,
ATWR,	ATWR,
ATCN,	ATCN,

Tabla 5. Configuración de Xbee de transmisión y recepción.

El módulo XBee PRO se tomó como el punto transmisor y el módulo XBee S1 como el receptor. Al configurarse cada uno de los Xbee correctamente significa que solo faltaba un último paso que fue la creación del programa de monitoreo en LabVIEW.

### 5.5 Elaboración del programa de monitoreo en LabVIEW.

Recordando que el LabVIEW es un software que consta con 2 bloques de visualización; front panel (panel frontal) y block diagram (diagrama a bloques).

Las lecturas del sensor son recibidas por el módulo Xbee S1 montado en la Xbee Explorer el cual se conectó a la computadora por medio de un puerto serial (USB).

### 5.5.1 Panel Frontal.

En el panel frontal del programa se agregaron los elementos visuales que nos servirán como controles o indicadores, estos se utilizan para visualizar gráficamente las mediciones del sensor ultrasónico, así como un elemento de selección del puerto serial visa que se expondrá su descripción más adelante.



Figura 37. Panel Frontal LabVIEW

Controles e indicadores del panel frontal.

- Selector de Puerto Visa: Se accede al puerto serial iniciando una sesión visa indica al programa el número de puerto de comunicación al que se ligará para recibir las lecturas de la tarjeta Xbee conectada a la computadora.



Figura 38. Puerto comunicación VISA

- Indicador de texto Read Buffer: Muestra los datos recibidos en Visa en forma de carácter.

- Indicador de texto Buffer: Muestra los mismos datos pero en forma numérica.



Figura 39. Lectura de comunicación VISA

- Indicador del cronometro: Cronometro para la adquisición de datos cada tiempo indicado, este ayuda que al pasar cierto tiempo determinado guarde los datos en una base de datos de excel.

- Indicador de milímetros: muestra el valor numérico el nivel según se encuentre el tanque.

- Indicador de voltaje: muestra el valor numérico la lectura de voltaje tomada por el sensor.
- Indicador grafico de nivel: representa gráficamente el nivel del tanque según sus variaciones simulando un tanque de agua.

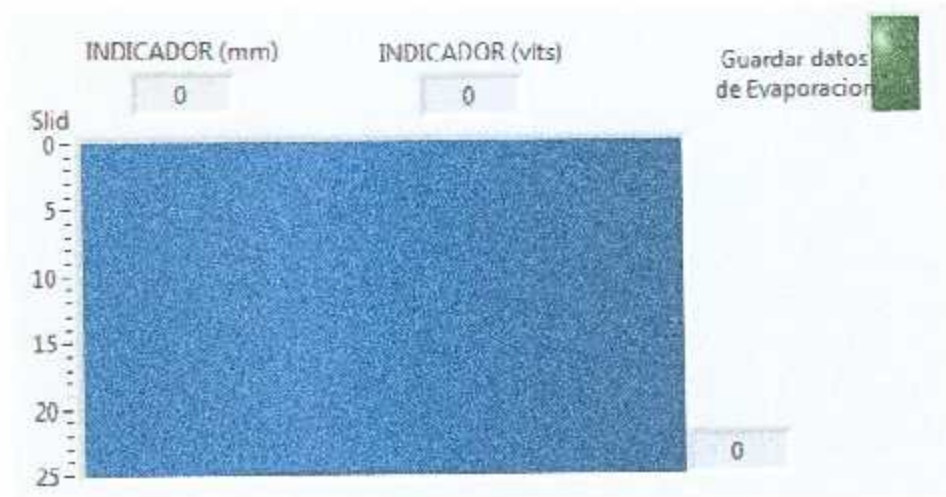
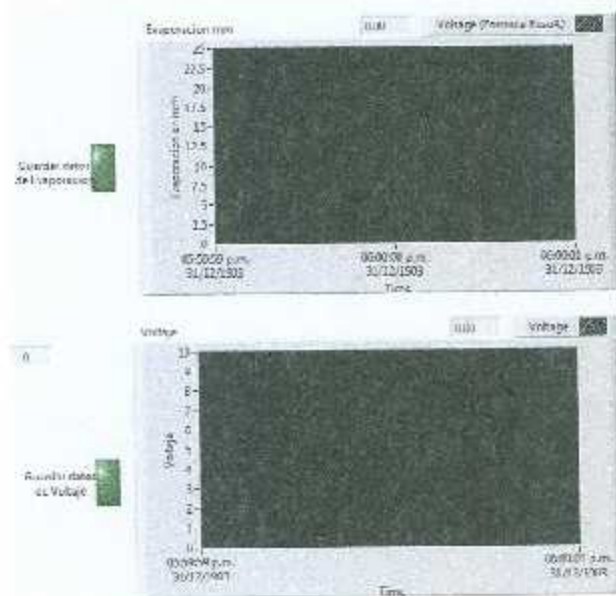


Figura 40. Indicadores gráficos de valores de voltaje y distancia en mm

- Indicador grafico de evaporación: grafica el nivel del tanque respecto al tiempo (Y = milímetros, X = Tiempo).



- Indicador grafico de voltaje: grafica las lecturas de voltaje del sensor respecto al tiempo (Y = voltaje, X = Tiempo).

Figura 41. Indicadores de gráficas

### 5.5.2 Diagrama de Bloques.

Como anteriormente se mencionó el diagrama a bloques es el área de trabajo donde propiamente se diseña el programa con la ayuda de las diferentes herramientas proporcionadas por este mismo. Ahora describirá el programa diseñado para el proyecto, aunque se tomó parte del anterior programa, la mayor parte se modificó de acuerdo a las necesidades, siendo específicos en las herramientas de entrada para los datos adquiridos e indicadores en tiempo real del nivel de agua del tanque.

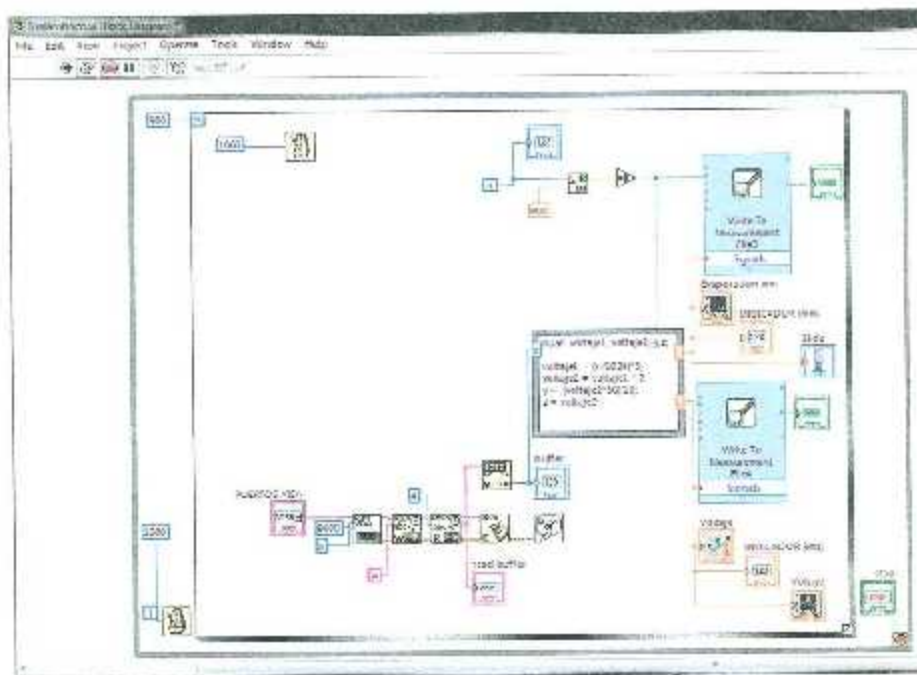


Figura 42. Diseño del diagrama de bloques de funcionamiento

En la se divide el programa en 4 secciones, desde la entrada de las lecturas hasta el despliegue de estas en los indicadores del panel frontal, esto ayudara a describir las herramientas del programa utilizadas para su diseño, de una forma general.



### - Recursos Visa

Los recursos visa son instrumentos de entrada y salida los cuales permiten llevar a cabo la configuración de los puertos (COM #) para establecer comunicación con la computadora, en este caso para adquirir las lecturas de la Xbee receptora y poder manipular los datos en las diferentes secciones del programa.

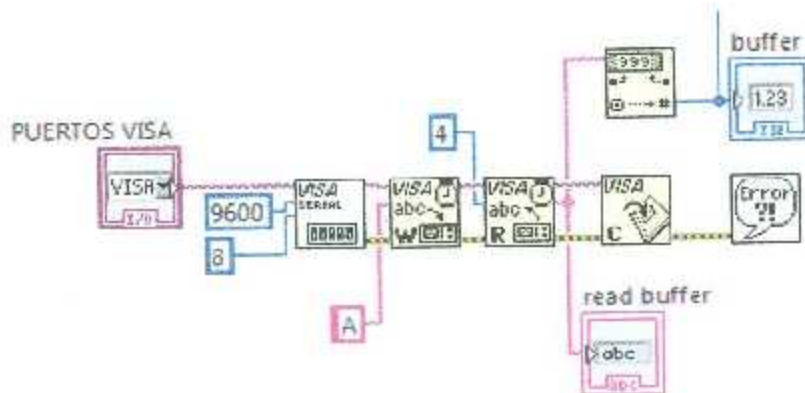


Figura 43. Configuración Puertos Visa

Recursos Visa utilizados:

- Visa Serial
- Visa Write
- Visa Read
- Visa Close
- Señal de Error
- Decimal string to number

A continuación se llevó a cabo la conversión de las lecturas manejadas por Arduino en un rango de 0 a 1023, primero se hace la conversión a voltaje, una vez teniendo el voltaje se obtienen los milímetros asociados al nivel del tanque, obteniendo así dos variables. Estas operaciones se llevan a cabo dentro de la herramienta de LabView llamada Formula Node, la cual permite realizar operación imitando el lenguaje C de programación.

En esta sección también ayuda a ajustar las lecturas del sensor en relación a la distancia a la que se encuentra colocado del tanque, ya que como se vio anteriormente cuenta con una zona ciega, la cual debe ser tomada dentro de nuestros cálculos en la conversión a milímetros.

Se toma en cuenta que la Xbee recibe señales de 0-1023 bits que equivalen de 0 a 5 Volts por lo que el valor se divide entre 1023 y se multiplica por 5, ahora ese valor se convierte al valor original ya que el sensor proporciona un voltaje de 0 a 10 V, eso para obtener el voltaje real, para obtener la distancia en milímetros se multiplica por la distancia que se evalúa que son 5 cm.

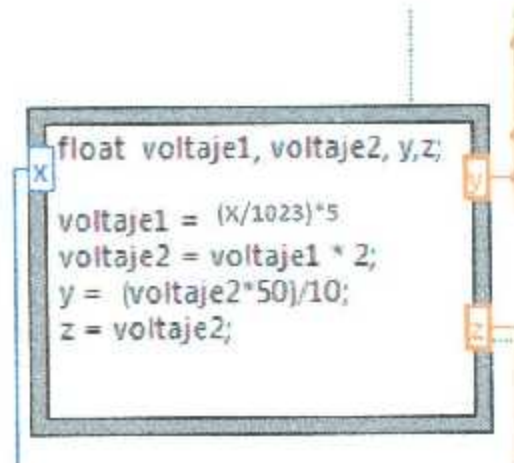


Figura 44. Conversión de valores

A continuación del programa se encarga de mostrar en tiempo real las variables calculadas en la sección anterior, en este caso el voltaje del sensor y el nivel del tanque en milímetros. Para ello consta de 4 indicadores, 2 indicadores numéricos y 2 indicadores de texto, dos indicadores por variable desplegados también en el panel frontal.

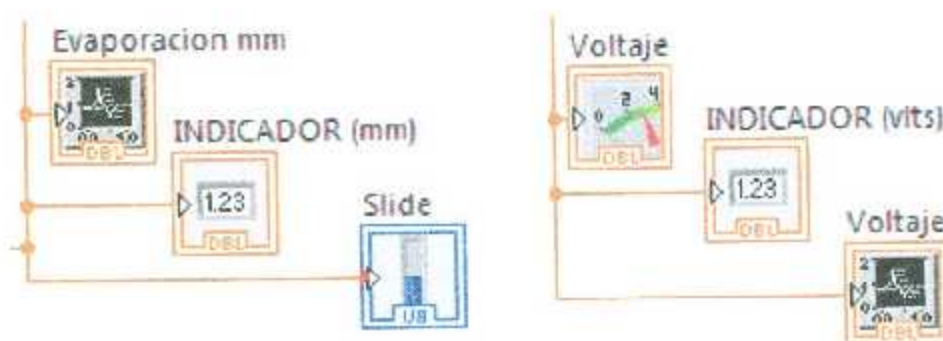


Figura 45. Indicadores gráficos del voltaje y de la evaporación

A continuación necesita mostrar en el panel frontal las lecturas de voltaje y milímetros. El tipo de indicadores utilizados en esta sección para mostrar las lecturas en el panel frontal es la herramienta Waveform Charts, esta permite generar una gráfica con forma de onda, dando valores a X y Y, en este caso  $x = \text{voltaje} - \text{milímetros}$ , y = tiempo, tomando en cuenta que es una gráfica para voltaje y una para milímetros.,

Se crea una base de datos para el registro de las lecturas tomadas cada 30 minutos. La herramienta de salida Write to Measurement permite tomar las mediciones y guardarlas en un archivo Excel, generando así nuestra base de datos.

Las herramientas Waveform Charts y Write to Measurement están dentro de la parte TRUE de un ciclo TRUE/FALSE, controlado por una función  $X = 0$ , utilizado como Timer de 30 minutos.

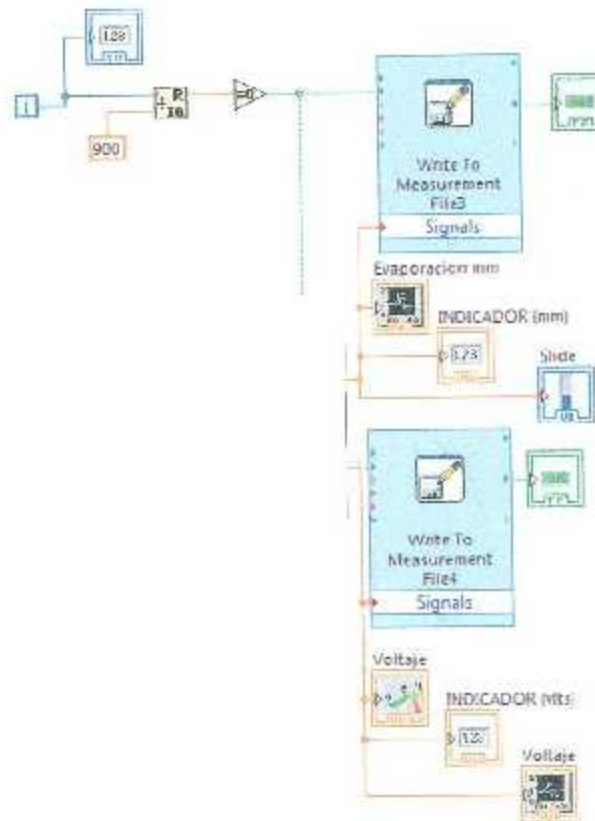


Figura 46. Almacenaje de los valores en archivos TMDS

## Resultados y Conclusiones.

Después de la instalación del sistema, se llevó a cabo una serie de pruebas de 2 semanas en el ITT y debido a que no se encontraron errores se comparó con los datos de la CONAGUA en Torreón para medir su efectivas, de ahí se procedió a hacer un análisis de los datos para que ellos pudieran calcular la evapotranspiración, aquí se muestran los datos de 30 días tanto de la evaporación y la evapotranspiración.

Incluso debido al éxito obtenido se está montando el sistema en las instalaciones de CONAGUA Torreón gracias a como se comentó es una innovación en la forma de medición con un sensor ultrasónico.

Año 2013	Evaporación (mm) (Rng)	Final Referencia Evapotranspiración (ETo) mm/día
01/05/2013	3.1466	6.0409
02/05/2013	3.1660	7.5570
03/05/2013	3.1704	6.5176
04/05/2013	3.1911	6.7322
05/05/2013	3.1852	13.0144
06/05/2013	3.1512	9.3305
07/05/2013	3.1561	7.8907
08/05/2013	3.2107	8.7404
09/05/2013	3.1677	8.5657
10/05/2013	3.1510	10.0406

11/05/2013	3.1598	5.9335
12/05/2013	3.1700	5.7716
13/05/2013	3.1964	9.3075
14/05/2013	3.2137	8.4341
15/05/2013	3.1963	9.5779
16/05/2013	3.1854	5.4875
17/05/2013	3.1938	5.4204
18/05/2013	3.1899	6.7256
19/05/2013	3.2111	7.8576
20/05/2013	3.2135	12.7598
21/05/2013	3.2389	8.9929
22/05/2013	3.2265	8.4548
23/05/2013	3.2408	8.0162
24/05/2013	3.3019	5.7692
25/05/2013	3.3003	11.0583
26/05/2013	3.2515	6.2496
27/05/2013	3.2920	7.5591
28/05/2013	3.2976	9.4590
29/05/2013	3.2990	9.6912
30/05/2013	3.2989	10.0041



Figura 28. Tanque evaporímetro



Figura 37. Panel Frontal LabVIEW

## Conclusiones.

Después de varios estudios sobre el uso excesivo de los recursos naturales se necesitaba potencialmente formas para su administración. Es por ello que el análisis de la evaporación de agua, es sólo uno de los pequeños estudios que se realizan en cada año y se muestran en foros, academias o congresos en el que se realizan aportaciones y recomendaciones que ayudan al aprovechamiento de los mismos.

A lo largo de la realización de esta investigación, se llevaron a cabo muestreos y pruebas de aplicación de los conceptos de evaporación, de sensores ultrasónicos, de las tarjetas Arduino y de los módulos XBee, y aprendí a como realizar una conjunción de los mismos según sus características y la aplicación fundamental de la instrumentación.

Además de que gracias a la utilidad de este proyecto fue solicitado ampliarse y replicarse en las instalaciones de la Comisión Nacional del Agua en Torreón, lo que ayudará a tener mejores datos de la evaporación aunado a otros elementos de sensado que cuentan en dichas instalaciones.

También se dejan objetivos a futuro para una mejora, la cual puede consistir en la utilización de paneles solares para generar la energía de funcionamiento del sensor. Así como también, se ha pensado implementar algún otro sensor que pueda realizar una medición más exacta sobre la evaporación del agua.

Gracias a este proyecto, he entendido de gran manera que a nuestra sociedad hace falta concientizarla acerca de el desperdicio del agua y soy fiel creyente de que se necesitan cambios de raíz para generar una armonía con nuestro medio ambiente, sin duda tengo otra visión y trato de ahorrar en mayor medida el agua dentro de mis posibilidades.



## Referencias bibliográficas.

- [1] Comisión Nacional del Agua (2011, Marzo). *Estadísticas del agua en México*, (edición 2011) [Online]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.pdf>
- [2] Castañeda García Julio Vladimir. *Sistema inalámbrico de medición de la evaporación on tiempo real*. Tesis titulación grado de maestro. Torreón, Coahuila, México. Diciembre 2011.
- [3] PNUMA. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial* Ed. Mundi-Prensa. 2002.
- [4] Allen G.R., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. *Estudio FAO riego y drenaje Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, Roma, 2006, ISBN 92-5-304219-2
- [5] Pepperl-Fuchs *Manual de funcionamiento sensor ultrasónico UC500-30GM-IUR2-V15*. Mannheim, Alemania. (Edición 2013) [Online]. Available: [www.pepperl-fuchs.com](http://www.pepperl-fuchs.com)
- [6] Arduino. *Manual de referencia y especificaciones Arduino UNO*. (Edición 2013) [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.
- [7] Braunworth W.S. and Mack H.J. "Evapotranspiration and Field Comparisons Among Soil-Water-Balance and Climate-Based Equations for Irrigation Scheduling of Sweet Corn". *Agron. J.*, 79:837-841, 1987.
- [8] Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. & Drain. Engrg.* 112(4):348-368.
- [9] Chiew, F.H.S., N.N. Kamadalasa, H.M. Malano y McMahon, T.A. 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agric. Water Management* 28: 9-21.