

PROYECTO FIN DE MÁSTER

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

MÉTODOS AUTOMÁTICOS DE  
PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN  
CULTIVOS EN SUSTRATO

Curso 2009/2010

**Alumno/a:**

DANIEL RODRIGUEZ MERCADO

**Director/es:**

Juan ~~Rosa~~ Cardeña  
Juan Martínez López



Actualmente en la Industria se ha desarrollado sistemas con algoritmos de control implementados con gran éxito, donde la producción es mediante maquinaria que responde a una serie de sensores y consignas que ayudan a reducir los márgenes de error, aumentar la productividad, elevar los estándares de calidad y convivir con el medio ambiente al reducir los desechos. Llevar este tipo de algoritmos de control al área agronómica, específicamente a tecnología que ayude a incrementar los niveles de rendimiento, la calidad y la sanidad de lo que se produce, es un reto que debemos asumir. Una actividad esencial dentro de la producción hidropónica es el riego y la tecnología que existe en el mercado, basa el éxito de su implementación a la experiencia y pericia de los productores o técnicos encargados de las explotaciones, ya que no involucran todas las variables que intervienen en el consumo de agua por parte del cultivo y en los centros de investigación se han desarrollado métodos y prototipos que incluyen una gran cantidad de variables y sensores que determinan hasta en un 99.9% las necesidades reales de agua de un cultivo, pero por cuestiones de manejo y coste, son inviables llevarlos a un invernadero en condiciones de producción intensiva. El presente trabajo busca demostrar que se puede implementar un algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo (PID), utilizado en el sector industrial, en el método de riego de la bandeja a la demanda con un mínimo de variables (Volumen Aportado y Drenaje), para ello se desarrollo un simulador para establecer como se comportaría el método de riego con el PID en un ciclo completo de cultivo, determinando el momento de proporcionar los nutrientes a un cultivo (Riego). Se parte de que el medio de cultivo se encuentra saturado al 100% y se calcula el volumen de riego a aplicar cada vez que el cultivo consuma un porcentaje del agua fácilmente disponible y el porcentaje de drenaje que se desee, se establece un primer intervalo de tiempo para la primer lectura y el modelo de simulación comienza, calcula el consumo de agua que tuvo el cultivo en ese intervalo de tiempo, en base a las variables climáticas registrada, una vez determinado el consumo se resta del volumen aportado para determinar el drenaje de ese periodo, el controlador en base al drenaje obtenido establece el intervalo de tiempo para que se de la próxima lectura. Al evaluar los resultados se determino que es posible implementar el algoritmo de control PID en el método de riego de la bandeja a la demanda, realizando una serie de ajustes y considerando algunas variables, ya que se obtienen los volúmenes de drenaje que se esperaban, pero durante el ciclo se registraron algunos períodos de inestabilidad con oscilaciones por parte del PID.



# INDICE

	TEMA	PÁG.
1.	ANTECEDENTES.	1
1.1.	Sistema, modelo y simulación	2
1.1.1.	Controladores automáticos	3
1.1.2.	Control todo-nada	4
1.1.3.	Control de varias posiciones	4
1.1.4.	Control proporcional	5
1.1.5.	Control proporcional integral	5
1.1.6.	Controlador proporcional integral	6
1.1.7.	Control proporcional derivado	6
1.1.8.	Control proporcional integral derivativo	7
1.1.9.	Sintonización de controladores PID	8
1.2.	Hidroponía	8
1.2.1.	Medio de Cultivo (Sustrato)	10
1.2.2.	Desventajas del uso de los sustratos.	11
1.2.3.	Características de los sustratos	11
1.2.3.1.	Físicas.	11
1.2.3.1.1.	Agua fácilmente disponible.	12
1.2.3.1.2.	Agua de reserva.	12
1.2.3.1.3.	Capacidad de aireación.	12
1.2.3.1.4.	Distribución del tamaño de partículas.	13
1.2.3.1.5.	Densidad aparente.	13
1.2.3.1.6.	Espacio poroso total.	13
1.2.3.1.7.	Mojabilidad.	14
1.2.3.1.8.	Contracción del volumen.	14
1.2.3.2.	Químicas.	14
1.2.3.2.1.	Capacidad de intercambio catiónico.	15
1.2.3.2.2.	Disponibilidad de Nutrientes.	15
1.2.3.2.3.	Salinidad (CE).	15
1.2.3.2.4.	pH.	16
1.2.3.2.5.	Relación carbono – nitrógeno.	17
1.2.3.3.	Biológicas.	17
1.2.3.4.	Otras propiedades.	18
1.2.4.	Tipos de Sustratos.	18
1.2.4.1.	Turbas	18
1.2.4.2.	Corteza de pino.	18
1.2.4.3.	Arena.	19
1.2.4.4.	Lana de roca	19
1.2.4.5.	Perlita.	19
1.2.4.6.	Vermiculita.	20
1.2.5.	Factores que afectan el gasto de agua.	20
1.2.5.1.	Sustrato	21
1.2.5.1.1.	Radiación solar, temperatura y déficit de oxígeno	21
1.2.5.1.2.	Contenido de sales de la disolución de nutrición	22
1.2.5.2.	Ambientales	23
1.2.5.2.1.	Humedad del aire	23
1.2.5.2.2.	Temperatura	24
1.2.5.2.3.	Contenido en CO <sub>2</sub>	24

1.2.5.2.4. Momento del día. Estación del año. Radiación solar	25
1.2.5.3. Cultivo.	25
1.2.6. Fenómenos directamente relacionados con el gasto de agua	26
1.2.6.1. Absorción de la planta	26
1.2.6.2. Transpiración.	26
1.2.6.3. Agua constitucional	27
1.2.6.4. Evaporación.	27
1.2.6.5. Drenaje.	28
1.2.7. Tipos de Riego en Cultivo Hidropónico.	28
1.2.7.1. Riego por Goteo.	29
1.2.7.2. Riego por Aspersión.	29
1.2.7.3. Nutrinent film technique (nft)	29
1.2.7.4. New wrowing system (ngs)	29
1.2.8. Métodos de fertirriego.	29
1.2.8.1. Asociados a la planta	31
1.2.8.1.1. Medidas de las variaciones del diámetro del tallo.	31
1.2.8.1.2. Ritmo de transpiración	31
1.2.8.2. Asociados al sustrato	32
1.2.8.2.1. Tensiómetros	32
1.2.8.2.2. Método basado en la Conductividad Eléctrica.	32
1.2.8.3. Asociados al clima	33
1.2.8.3.1. Radiación solar	33
1.2.8.4. Riegos a tiempos	34
1.2.8.5. Balanza	34
1.2.8.6. Asociados a la demanda:	34
1.2.8.6.1. Bandeja de riego por demanda	34
1.2.8.7. Asociados al sistema Cantidad de drenaje.	35
1.2.8.8. Métodos integrados (planta-sustrato-clima)	36
2. PLANREAMIENTO DEL PROBLEMA	37
2.1. Objetivos	38
2.1.1. Objetivo General	38
2.1.2. Objetivos Específicos	38
3. MATERIALES Y METODOS	39
4. RESULTADOS	49
5. CONCLUSION	56
6. BIBLIOGRAFIA	58

## 1. ANTECEDENTES.

Actualmente la agricultura ha incorporando la tecnología a las técnicas de producción, tecnología que le llega de diferentes áreas del conocimiento, Químicas, Bioquímicas, Electrónica, Telecomunicaciones, Informática, por mencionar algunas, en las áreas de informática y electrónica específicamente, se han desarrollado diversos sistemas de control que han ayudado a contribuir con la obtención de más y mejores resultados en la producción.

En el sector de invernaderos, se ha desarrollado Software y Hardware, que ha permitido optimizar los factores que intervienen en el desarrollo de los cultivos, en cuanto al suministro de nutrientes a través del Riego, control de Variables Climáticas, Temperatura, Humedad, Radiación Solar, CO<sub>2</sub>, entre otras.

Los desarrollos de las áreas antes mencionadas se pueden clasificar de la siguiente manera.

- Software de Simulación que permite por medio del ordenador realizar lo que su concepto indica “Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevarlo a término de experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento de ellos” (Shannon).
- Automatización de las variables que influyan en los cultivos y creación de bases de datos accesibles para los agricultores.
- Control y automatización en lo posible el suministro de nutrientes al cultivo.

Los Sistemas van encaminados al uso eficiente de los recursos y a la convivencia del sector con el medio ambiente.

“Un sistema es una combinación de elementos que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo. Controlar una variable consiste en mantener su valor dentro de unos límites deseados o preestablecidos. Por tanto, un sistema de control es aquél cuyo objetivo es mantener una o varias variables dentro de unos límites prefijados, con un comportamiento conocido. Cuando se desea controlar un proceso, la planta se encuentra sujeta a perturbaciones que tienden a afectar el valor de salida de un sistema. Estas perturbaciones obligan a estar permanentemente observando el proceso y a actuar constantemente sobre el mismo para corregir las desviaciones que se produzcan. Esta misión es el principal objetivo de un sistema de control” (Rodríguez, F. 2004).

El diseño de un sistema de control para un determinado proceso requiere conocer el comportamiento dinámico del mismo. Para ello hay que planear e implementar un modelo del sistema, que consiste en la descripción matemática de las relaciones dinámicas existentes entre las variables a controlar y las variables de entrada, tanto perturbaciones como variables de control.

Disponiendo de un modelo dinámico se pueden analizar y evaluar tres cuestiones claves en el diseño de un sistema de control; emparejamiento de variables para formar lazos de control, límites de la acción de control y evaluación de la dificultad de control (signo y sensibilidad de la respuesta, velocidad de respuesta, forma de la respuesta y sensibilidad a cambios en el proceso).

### **1.1. Sistema, modelo y simulación**

Con los términos modelización (o modelado) y simulación se designa al conjunto de actividades asociadas con la construcción de modelos de sistemas del mundo real y su simulación en un computador.

Un sistema es un conjunto de elementos o componentes que interactúan para alcanzar una meta común.

Un modelo es una representación simplificada de un sistema que contiene un conjunto de instrucciones para generar datos de su comportamiento.

La simulación relaciona modelos y computadores. Se refiere al proceso de imitación de aspectos importantes del comportamiento del sistema mediante el diseño, construcción y experimentación con el modelo del sistema. Este proceso es similar al de experimentación que llevan a cabo los científicos en un laboratorio, con el que pretenden aumentar la comprensión de alguna teoría para su validación y empleo posterior.

La forma en que funciona un sistema de control es con una entrada denominada consigna o valor de referencia (“deseado”), utilizada para enviar órdenes a fin de que el valor real de la variable a controlar sea tan igual como sea posible a éste en presencia de perturbaciones o cambios en el valor de referencia. Las acciones básicas que debe realizar todo sistema de control son: Medir la variable a controlar, comparar, con un valor de referencia deseado y Actuar para llevar la variable al valor Deseado.

En un sistema de control hay que Considerar las siguientes variables:

Variable a controlar, que es la que se desea mantener en un valor deseado, por ejemplo, la temperatura interior de un invernadero.

Consigna o valor de referencia, que es el valor deseado para la variable a controlar. En numerosas referencias bibliográficas y equipos de control se le denomina por su nombre en inglés setpoint (SP).

Variable manipulada o de control, que es la variable que se emplea para compensar o corregir el efecto de las perturbaciones.

Variables de perturbación, son aquéllas que afectan a la variable a controlar, pero que no pueden ser manipuladas.

Los sistemas de control se pueden clasificar como:

- Sistema de control en bucle abierto. La salida del sistema depende de la señal de entrada, pero el sistema no comprueba si la señal real de salida es igual a la señal deseada, lo que significa que el sistema es incapaz de corregir errores no esperados a la salida.
- Sistema de control en bucle cerrado. Se comprueba la señal de la salida y decide si el nivel de la señal real corresponde al de la señal deseada, o si el nivel real de la señal ha de ser modificado para conseguir el objetivo fijado. También se les conoce con el nombre de sistemas retroalimentados o realimentados.

Un sistema de control por lo regular incorpora para el control los siguientes elementos:

Medidor

Elementos que realizan una estimación del valor de la variable a controlar y las demás variables que necesite el controlador. Costa de: Transductor (sensor), dispositivo que transforma un parámetro físico-químico en una señal eléctrica (tensión, corriente o resistencia), Acondicionadores de señal, la señal procedente del transductor suele ser de "baja calidad", por lo que hay que prepararla para las etapas siguientes e Indicador-Registrador, elemento donde se registra o visualiza la medida de la variable a controlar.

Controlador

Elemento que examina la medida realizada, compara con el valor deseado y determina la acción a realizar de acuerdo con el algoritmo de control que posea. Se puede clasificar en: Operador humano y Automático ó bien en controladores discontinuos y controles continuos.

Actuador

Elemento final del bucle y ejerce una influencia directa sobre el proceso y sobre la variable a controlar. Suministra los cambios necesarios para llevar la variable al punto de consigna, podemos encontrar Actuadores discontinuos. Generalmente poseen sólo dos estados: encendido o apagado, abiertas o cerradas y Actuadores continuos. Permiten cualquier estado de control intermedio.

### **1.1.1. Controladores Automáticos**

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con entrada de referencia (valor deseado), determina el error y produce una señal de control que reducirá el error a cero, o a un valor muy pequeño, sin necesidad de supervisión por parte de un humano. La forma por la que el controlador produce la señal de control, se denomina acción de control. Los

procesos presentan tres características básicas que deben ser consideradas al automatizarlos:

- Cambios en la variable controlada debidos a alteraciones en las condiciones del proceso. Se pueden producir por dos razones:
  - Cambios en la consigna.
  - Perturbaciones.
- Tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga.
- Estabilidad.

Existen cuatro acciones básicas de control que se utilizan por separado o en combinación, para proporcionar los seis tipos más comunes de controladores. Estas acciones son:

- Control todo-nada.
- Control proporcional.
- Control derivativo.
- Control integral.

### **1.1.2. Control todo-nada**

En este tipo de controlador, el elemento de control sólo proporciona dos niveles: Todo (encendido) o nada (apagado).

El principal inconveniente de este controlador es que se trata de un elemento no lineal que puede provocar mediante sus comunicaciones que el sistema oscile con mucha frecuencia.

Para evitar el problema de la oscilación sobre la consigna, se pueden aplicar las siguientes técnicas:

- Retardo. Cuando se produce un cambio de toda a nada o viceversa, el sistema permanece, como mínimo, un cierto periodo de tiempo en ese estado.
- Medidas. El controlador no considera la salida instantánea sino una medida de las últimas muestras de la salida.
- Zona neutra o banda diferencial. Con esta técnica, el elemento final del control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de esa zona.

### **1.1.3. Control de varias posiciones**

El comportamiento es similar al del controlador todo-nada, con la diferencia de que puede tener más de dos estados de salida. Al igual que en el caso de un controlador todo-nada, en este tipo de controladores se pueden producir oscilaciones en cada cambio de estado.

#### 1.1.4. Control proporcional

Genera una señal de control proporcional al error. Actúa como un amplificador de ganancias  $K_p$ :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + u_0$$

Donde  $u_0$  es la salida del controlador cuando el error es cero. La salida de un controlador se expresa a menudo como un porcentaje del rango completo de posibles valores, donde el 0% representa la salida mínima del controlador, y el 100% la máxima.

Como se puede observar las características más importantes de un controlador proporcional son:

- Ganancia ( $K_p$ ), que es la cantidad por la que se multiplica la señal de error para obtener la señal de salida.
- Banda proporcional, que es el porcentaje de variación de la variable controlada necesario para provocar que el elemento final de control recorra sus dos extremos. Bandas proporcionales “anchas” aplican una lenta aproximación al punto de consigna y bandas relativamente estrechas pueden implicar un comportamiento inestable del controlador, consecuencia de la celeridad de su respuesta frente a la inercia de los sistemas o a saturaciones del actuador.

Estos parámetros están relacionados por la siguiente expresión:

$$BP = \frac{100}{K_p}$$

#### 1.1.5. Control proporcional integral

Acción integral

En un controlador que emplea una acción de control integral, la señal de control se modifica a una velocidad proporcional a la señal de error, es decir, si la señal de error es grande, la señal de control se incrementa con gran rapidez; si es pequeña, la señal de control se incrementa con lentitud. Este proceso puede representarse por:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt$$

Denominándose tiempo integral a  $T_i$ . Por la propia definición de integral, son sistemas con “memoria”, ya que la salida en un instante, dependerá del comportamiento anterior desde 0 hasta  $t$ .

- Cuando la salida del controlador es constante, el error será cero.
- Cuando la salida del controlador varía a una velocidad constante, el error debe tener un valor constante.
- Hasta el momento en que se produce el error, el valor de la integral es constante, ya que  $u(t)=u_0$  siempre que exista error, la acción integral hará cambiar la salida del controlador para corregirlo por lo que este controlador intentará. Cancelar los errores en régimen permanente. Esta es la única ventaja de este tipo de controlador, porque su utilización produce una respuesta más oscilatoria. Una acción integral corta implica que el controlador tratará de corregir relativamente pronto la desviación entre la consigna y el valor real y, en un proceso con inercia, podría causar una oscilación inestable del sistema.

### 1.1.6. Controlador proporcional integral

La acción proporcional es un desplazamiento respecto al estado estacionario; por otra parte, aunque la acción integral anula el error, por sí misma, la respuesta transitoria del sistema puede no ser apropiada.

Por esto se combinan las dos acciones en un controlador proporcional integral o PI que presenta las ventajas de cada uno;

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt'$$

Donde  $T_i$  regula la ganancia del integrador y  $K_p$  ajusta el integrador y la ganancia proporcional. A  $1/T_i$  se le conoce como repeticiones por minuto equivalente al número de veces que la acción integral repite el efecto de la acción proporcional ( $K_p=1$ ) en un minuto. Además, la acción integral se utiliza para determinar de forma automática el valor correcto de  $u_0$ .

### 1.1.7. Control proporcional derivado

Acción derivativa

El cambio en la salida del controlador desde el valor de la consigna es proporcional a la relación de cambio con respecto al tiempo, de la señal de error (siendo  $T_D$  el tiempo derivativo); Esta acción determina por anticipado hacia dónde se dirige un proceso y aplica la corrección necesaria para modificar la variación que se está produciendo en el error.

$$u(t) = T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} + u_0$$

Logra anticiparse midiendo la rapidez con que se produce la variación en el error y aplicando una acción de control proporcional a dicha rapidez o velocidad de variación. Con este tipo de control, tan pronto como la señal de error

cambia, puede haber una salida bastante grande del controlador puesto que es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error y no a su valor. Por tanto hay una respuesta inicial rápida a las señales de error.

Por esta razón no se utilizan individualmente, sino que hay que combinarlos con alguna otra acción. El efecto de la acción de control derivativo es anticipar los cambios de error, y proporcionar una respuesta más rápida a esos cambios. La velocidad rápida de respuesta inherente al control derivativo permite al sistema estabilizarse en corto periodo de tiempo, especialmente cuando el error o la carga cambian constantemente. Cuando se tienen valores excesivamente estrechos de la acción derivativa, se pueden producir saturación de actuadores. Un valor adecuado de la acción derivada será aquel que ayuda a alcanzar la consigna con el mínimo número de oscilaciones.

El controlador derivado no genera ninguna salida a menos que el error cambie, no se suele utilizar como acción única. Se puede combinar con una acción proporcional (controlador P<sub>D</sub>), resultando una señal de control del siguiente tipo:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} + u_0$$

T<sub>D</sub> representa el tiempo con que la acción derivativa se anticipa al efecto de la acción proporcional sobre el elemento final de control. La salida del controlador puede variar cuando hay un error cambiando constantemente. Hay un cambio inicial rápido en la salida del controlador a causa de la acción derivativa seguida de un cambio gradual debido a la acción proporcional.

En teoría, la acción derivativa tiene un efecto positivo estabilizador sobre la dinámica del sistema de control, haciendo que se amortigüen las oscilaciones en las respuestas, o bien que se pueda elevar la ganancia proporcional del controlador y con ello la velocidad, sin que se incrementen las oscilaciones.

### 1.1.8. Control proporcional integral derivativo

Si se combinan las tres acciones de control, surge el controlador PID que no presenta error de desplazamiento y reduce la tendencia a las oscilaciones:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Este control es el más general y el más utilizado, ya que permite una óptima explotación de las características de los tres tipos de control. Se crea una respuesta de salida que sigue la señal de entrada, sin retardos en procesos lentos y rápidos, incluyendo aquéllos en los que la carga varía constantemente. Se puede considerar como un controlador proporcional, que dispone de un control integral para eliminar el error de desplazamiento y un control derivativo para reducir retardos de tiempo. En esta combinación:

- El control proporcional da forma a la curva de respuesta de la variable controlada, produciendo más salida cuanto mayor sea el error.
- El control integral disminuye el tiempo de existencia del error, produciendo más salida cuanto más tiempo perdure el error.
- El control derivativo disminuye el tiempo durante el que cambia el error, prediciendo con antelación el valor del cambio del error, y, frecuentemente, reduce el error ejecutando por adelantado las correcciones oportunas.

### **1.1.9. Sintonización de controladores PID**

El ajuste de parámetros de un control para conseguir una respuesta óptima de un sistema de control en lazo cerrado se puede realizar teóricamente o experimentalmente, registrando la respuesta dinámica ante cambios de consigna o produciendo perturbaciones transitorias. A este proceso se le denomina sintonización del controlador. Si el sistema no está bien diseñado puede llegar a ser inestable. La estabilidad es la característica del sistema de control que permite que la variable a controlar vuelva al punto de trabajo ante un cambio de consigna.

Criterios de comportamiento de los sistemas de control

**Criterio de área mínima.** El control debe conseguir que el área del error de cada oscilación sea mínima (que el error sea mínimo en el tiempo más corto). Esto ocurre cuando la amplitud de cada oscilación es de un 25% de la oscilación que la precede.

**Criterio de amplitud mínima.** El sistema debe conseguir que la amplitud de la desviación sea mínima.

## **1.2. Hidroponía.**

La producción de cultivos sin suelo en los que se incluye cualquier tipo de método o sistema en que se hace crecer las plantas fuera de su ambiente natural, definido así por Urrestarazu 2004, se ha desarrollado en los últimos años de una forma acelerada, gracias al en los diferentes actores que intervienen en ella. (Instituciones de Investigación que han desarrollado nuevas técnicas de producción y el desarrollo de toda la industria auxiliar).

La palabra Hidroponía se deriva del griego Hydro (agua) y Ponos (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. El cultivo hidropónico es anterior al cultivo en tierra pero, como herramienta de cultivo, se cree que empezó en la antigua Babilonia, en los famosos Jardines Colgantes, en lo que probablemente fuera uno de los primeros intentos exitosos de cultivar plantas hidropónicamente.

Otros ejemplos de esta forma de cultivo son:

Los aztecas de Centroamérica, una tribu nómada forzada a ubicarse hacia la orilla pantanosa del Lago Tenochtitlán, localizado en el gran valle central de lo que es ahora México, y tratados bruscamente por sus vecinos más poderosos que les negaron cualquier tierra cultivable, sobrevivieron desarrollando notables cualidades de invención. Como consecuencia de la falta de tierra aprendieron a construir balsas de caña, dragaban la tierra del fondo poco profundo del lago y la amontonaban en las balsas. Debido a que la tierra venía del fondo del lago, era rica en una variedad de restos orgánicos y material descompuesto que aportaba grandes cantidades de nutrientes. Estas balsas, llamadas Chinampas, permitían cosechas abundantes de verduras, flores e incluso árboles. Las raíces de estas plantas presionaban hacia abajo y traspasaban el suelo de la balsa hasta el agua.

El arroz ha sido cultivado de esta manera desde tiempos inmemoriales. Los Jardines Flotantes de China son otro ejemplo de "Cultivo Hidropónico".

Archivos jeroglíficos egipcios antiguos de varios cientos años A.C. describen el crecimiento de plantas en agua a lo largo del Nilo.

Antes del tiempo de Aristóteles, Teofasto (327-287 A.C.) emprendió varios experimentos en nutrición de plantas. Los estudios botánicos de Dioscorides son anteriores al primer siglo D.C.

El intento científico documentado más antiguo para descubrir los nutrientes de las plantas fue en 1600 cuando el belga Jan Van Helmont mostró en su experimento clásico que las plantas obtienen sustancias del agua.

Woodward en 1699, fue el primero que hizo crecer plantas en diversos recipientes en medio líquido en el cual había añadido diferentes cantidades de suelo, pero fue hasta 1860 que el químico Alemán Sachs junto con otro grupo de autores como Knop llamado este último padre de la Cultura del Agua, desarrollaron el cultivo en disolución nutritiva la llamada nutriculture, muy parecida a como se desarrolla en la actualidad en base a la investigación de nutrición vegetal y fisiología vegetal.

En 1929 W. F. Gericke en la Universidad de California, transfirió la tecnología desarrollada en el laboratorio a fines comerciales.

Hoy, la hidroponía es una rama establecida de ciencia agronómica, que ayuda a la alimentación de millones de personas; estas unidades pueden encontrarse floreciendo en los desiertos de Israel, Líbano y Kuwait, en las islas de Ceylon, las Filipinas, en las azoteas de Calcuta y en los pueblos desérticos de Bengala Oriental. Muchos de los métodos hidropónicos actuales emplean algún tipo de sustrato como medio de cultivo como lo son: grava, arena, piedra pómez, aserrines, arcillas expansivas, carbones, cascarilla de arroz, fibra de coco, etc., a los cuales se les añade una solución nutritiva que contiene todos los elementos esenciales necesarios para el normal crecimiento y desarrollo de la planta.

Ventajas de la hidroponía:

- Cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminación.
- Reducción de costos de producción.
- Permite la producción de semilla certificada.
- Independencia de los fenómenos meteorológicos.
- Permite producir cosechas en contraestación
- Menos espacio y capital para una mayor producción.
- Ahorro de agua, que se puede reciclar.
- Ahorro de fertilizantes e insecticidas.
- Se evita la maquinaria agrícola (tractores, rastras, etcétera).
- Limpieza e higiene en el manejo del cultivo.
- Mayor precocidad de los cultivos.
- Alto porcentaje de automatización.

En la agricultura hidropónica bajo condiciones protegidas lo que finalmente se busca es la calidad y la cantidad de lo que se produce, por lo que hay que tener en cuenta los elementos que intervienen en ella, así como la forma en que estos influyen en el logro de los resultados que se planteen.

Uno de los elementos con mayor relevancia en el desarrollo del cultivo si duda es el riego, ya que en éste se aportan los nutrientes que el cultivo demanda durante sus diferentes etapas de crecimiento, para cumplir con lo anterior es necesario conocer los factores que intervienen en el consumo de agua por parte de la planta, los de mayor incidencia se encuentran:

- El Medio de Cultivo (sustrato) empleado, características físicas, químicas y biológicas.
- Técnicas de Fertirriego.

### **1.2.1. Medio de Cultivo (Sustrato)**

El termino sustrato en la horticultura ha mención a todo material sólido distinto al suelo in situ, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permitiendo el anclaje radicular, desempeñando, por tanto un papel de soporte para la planta.

Con el uso de sustrato se viene produciendo un cambio gradual del cultivo tradicional en el suelo por el cultivo hidropónico y en sustrato. Debido a la necesidad de transportar las plantas de un lugar a otro, la existencia de factores limitantes para la continuidad de los cultivos intensivos en el suelo natural, particularmente salinización, enfermedades y agotamiento de los suelos agrícolas y la fuerte intensificación cultural que facilita el cultivo sin suelo.

Algunas de las diferencias con relación al cultivo de plantas en suelo se debe a que en sustrato como medio de cultivo se utilizan contenedores, de volumen medio del cual las plantas obtienen el agua, nutrientes y oxígeno, por lo que es mas limitado y más reducido del volumen que se tiene en suelo. Los estomas

permanecen comúnmente abiertos durante períodos de tiempo más largos, aumentando así la absorción de agua por planta y su pérdida de transpiración.

Los sustratos de cultivo artificiales son usualmente porosos y homogéneos, el control exacto de los contenidos de agua y de aire es fácilmente alcanzable. Por el contrario en el suelo se posee una baja porosidad y un perfil heterogéneo, y en consecuencia el control de agua y del aire es difícil de llevar a cabo. Desde el punto de vista agrícola la finalidad de cualquier sustrato es producir una planta y cosecha de calidad y abundante en más corto periodo de tiempo con bajos costes de producción.

### **1.2.2. Desventajas del uso de los sustratos.**

Las desventajas se pueden resumir en:

- **Manejo.** Debido a que las mezclas las realiza el productor in situ, por lo que la homogeneidad de partículas no se tiene en cuenta, y se deja a la experiencia del propio agricultor.
- **Finalidad.** El sustrato debe de ser elegido de acuerdo al sector donde va ha ser utilizado: semillero, crecimiento y desarrollo o enriquecimiento de estacas, ya que las características de cada una de las finalidades anteriores requieren de ciertas propiedades físicas.
- **Económico.** Precio. Particularmente elevado en aquellos materiales cuyos depósitos naturales o reserva se encuentran a distancia de los centros de consumo, situación ligada al suministro inestable en el caso de sustratos cuyo abastecimiento o suministro es dependiente del exterior y a la homogeneidad.

### **1.2.3. Características de los sustratos**

No existe el sustrato ideal debido a que intervienen diversos factores y estos varían en cada caso de uso (semillero, producción, estacas, etc.), condiciones climáticas, manejo de riego entre otras.

Por lo que conocer las características físicas, químicas y biológicas del sustrato y la forma en que intervienen en la germinación, enraizamiento y crecimiento de las plantas ayudaran a obtener mejores resultados.

#### **1.2.3.1. Físicas.**

En estas se estudia la distribución volumétrica de los materiales sólido, el agua y el aire, así como su variación en función de su potencial matricial, ya que el cultivar las plantas en contenedores no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas debido al volumen limitado del sustrato en que crecen y se desarrollan.

1. Capacidad de retención de agua fácilmente disponible o asimilable para el cultivo.

2. Suministro de aire adecuado.
3. La homogeneidad de las partículas que lo conforman y que faciliten las dos anteriores.
4. La densidad aparente baja
5. Porosidad total elevada.
6. Estructura estable, que no se contraiga o se hinche.

#### **1.2.3.1.1. Agua fácilmente disponible.**

Diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar 10 cm de tensión, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua.

Se requiere una tensión mínima de 10 cm (equivalente a 10 cm de altura del contenedor) para obtener un contenido mínimo de aire. El siguiente punto de importancia se refiere a las condiciones de humedad que no inhibirán el crecimiento vegetal; muchos experimentos han demostrado que una tensión de agua superior a 50 cm puede afectar desfavorablemente al crecimiento y el desarrollo de las plantas, el valor recomendado es de 20 a 30%.

Los poros que se mantienen llenos de agua después del drenaje del sustrato son los de menor tamaño. Por lo que es necesario distinguir entre: el agua retenida por el sustrato y que es accesible para la planta y el agua fuertemente retenida la cual no es accesible por la planta, ya que la succión aplicada por las raíces no supera la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del sustrato. Lo que se busca en el sustrato es la capacidad de retención de agua fácilmente disponible y no la capacidad de retención total de agua.

#### **1.2.3.1.2. Agua de reserva.**

Es la cantidad de agua que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua, el valor óptimo es de 4 a 10%. Por lo que el agua total disponible en un sustrato es el agua fácilmente disponible más el agua de reserva.

#### **1.2.3.1.3. Capacidad de aireación.**

Proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado u dejado drenar, usualmente a 10cm de tensión de columna de agua, el valor óptimo debe estar entre 20 y 30% de volumen.

Las raíces requieren oxígeno para mantener su actividad metabólica y su crecimiento. Una falta de oxígeno puede reducir el crecimiento de las raíces y de la parte aérea; pero condiciones de hipoxia mantenidas durante varios días, pueden llegar a provocar la muerte de algunas raíces. El oxígeno es requerido también por los microorganismos y, por tanto las plantas cultivadas en sustrato orgánicos, con una elevada población microbiana, requieren el doble o más de oxígeno que las plantas cultivadas en sustratos minerales, sin abundante materia orgánica.

El oxígeno es transferido hacia las raíces (mediante difusión) a través de la lámina de agua que las rodea. La velocidad de difusión del oxígeno en el agua es  $10^4$  veces más pequeña que en el aire. Si la textura y la estructura del sustrato son tales que la mayoría de los poros permanecen llenos de agua después del riego, el suministro de oxígeno se verá reducido de modo severo.

La profundidad del contenedor tiene un efecto marcado sobre el contenido en aire del sustrato. Cuanto más profundo es el contenedor, mayor es el contenido en aire, cuando se usan contenedores pequeños o poco profundos, son preferibles los sustratos de textura gruesa que mantienen una aireación adecuada.

#### **1.2.3.1.4. Distribución del tamaño de partículas.**

Los sustratos están constituidos por una mezcla de partículas con tamaños diferentes. Las propiedades físicas de estos sustratos variarán en función de la distribución del tamaño de sus partículas, siendo por tanto de importancia fundamental la característica granulométrica de los materiales utilizados como medios de cultivo.

El tamaño de las partículas afecta el crecimiento de las plantas a través del tamaño de los poros. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido de agua y el contenido de aire en el sustrato. A cualquier humedad.

Los materiales de textura gruesa con partículas superiores a  $9\ \mu\text{m}$ , con poros grandes, superiores a  $100\ \mu\text{m}$ , retienen poca agua y están bien aireados, los materiales finos, con partículas inferiores a  $0.25\ \mu\text{m}$  y tamaños de poros inferiores a  $30\ \mu\text{m}$ , retienen mucha agua pero les falta oxígeno. Por lo anterior el sustrato mejor es aquel que su tamaño de partículas se encuentra en una textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de poros entre  $30$  y  $300\ \mu\text{m}$  equivalente a una distribución de partículas de  $0.25$  a  $2.5\ \mu\text{m}$  y que suelen retener suficiente agua fácilmente disponible y además un adecuado contenido de aire.

#### **1.2.3.1.5. Densidad aparente.**

Es la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir, incluyendo el espacio poroso entre las partículas. Juega un papel importante, ya que los sustratos y los contenedores se transportan durante su manejo y manipulación, su peso por tanto debe ser considerado como un factor de importancia. En adición, el anclaje de las plantas debería ser también considerado.

#### **1.2.3.1.6. Espacio poroso total.**

Un sustrato se divide en: poros capilares de pequeño tamaño que son los que retienen el agua y poros no capilares o macro poros de mayor tamaño que son los que se vacían después de que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación.

Otra parte es la porosidad inter particular, se refiere a los poros situados en el interior de las partículas, y el comportamiento de los flujos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinta según sea la porosidad abierta o cerrada. En caso de porosidad cerrada no existe comunicación entre los poros del interior de la partícula y los que están en el exterior, en consecuencia los poros internos no influyen sobre la distribución del agua y el aire en el sustrato, por el contrario si la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas participando en la nutrición hídrica de la planta.

Por lo anterior una alta porosidad no indica por sí sola una buena textura y/o estructura del sustrato, si no que es necesario conocer la relación entre la fracción de porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación.

#### **1.2.3.1.7. Mojabilidad.**

Algunos materiales orgánicos presentan dificultades para ser humedecidos inicialmente y para ser rehúmedecidos una vez que se han secado en el contenedor, lo que puede provocar una reducción en el crecimiento de la planta. Las dificultades para mojar el sustrato se atribuyen generalmente a dos causas: la hidrofobicidad del material y la contracción que experimenta el secante. La mojabilidad se expresa como el tiempo necesario para que se absorban 10 ml de agua destilada a través de la superficie de una muestra de sustrato seco a 40° C. El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos.

#### **1.2.3.1.8. Contracción del volumen.**

Se refiere al porcentaje de pérdida de volumen cuando el sustrato se seca (generalmente a 105° C), referido al volumen aparente inicial en unas determinadas condiciones de humedad. Informa sobre el grado de variación del volumen del sustrato bajo condiciones de cultivo, en ciclos de humectación y desecación. La contracción del volumen facilita la compactación del sustrato y la compresión de las raíces, disminuyendo la eficiencia del riego y la fertilización, el valor óptimo de la contracción, expresada como pérdida de volumen, se sitúa por debajo del 30%.

#### **1.2.3.2. Químicas.**

Estas caracterizan la transferencia de materia entre el sustrato y la solución del sustrato, reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales, reacciones de intercambio de iones y reacciones de biodegradación de la materia orgánica.

1. Baja capacidad de intercambio catiónico.
2. Nivel suficiente de nutrientes asimilables.
3. Baja salinidad.
4. pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón.
5. Mínima velocidad de descomposición.

#### **1.2.3.2.1. Capacidad de intercambio catiónico.**

Cantidad de cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso del sustrato. Dichos cationes quedan retenidos frente al efecto lixiviante del agua y están disponibles para la planta.

El óptimo de la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación, si se aplica de forma permanente, la capacidad de adsorción de los cationes no representa ninguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de sustratos inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio. Si por el contrario la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será interesante la utilización de sustratos con moderada a elevada capacidad de intercambio catiónico.

Una capacidad de intercambio catiónico elevada constituye un depósito de reserva de nutrientes, mientras que los materiales con baja o nula retienen cantidades reducidas, por lo que es necesaria la aplicación frecuente y regular de fertilizantes.

#### **1.2.3.2.2. Disponibilidad de Nutrientes.**

Los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí en el contenido de nutrientes asimilables.

Los métodos de análisis de los nutrientes asimilables consisten fundamentalmente en equilibrar una muestra de sustrato con una determinada solución estrictamente (agua, acetato amónico, etc.) durante un tiempo normalizado. Una vez alcanzado el equilibrio, se determinan los nutrientes disueltos o extraídos por dicha disolución. Los métodos analíticos más extendidos presentan una correlación elevada con la respuesta vegetal, en unas determinadas condiciones del sustrato.

En el cultivo de hortalizas sobre sustratos minerales inertes es frecuente la determinación de los nutrientes asimilables en la disolución del sustrato, extraída mediante una jeringa. Los niveles de referencia de los nutrientes en la disolución del sustrato.

#### **1.2.3.2.3. Salinidad (CE).**

Es la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato.

La acumulación de sales en el sustrato se puede deber a:

1. La presencia de fertilizantes insolubles, los de liberación lenta.
2. Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o solución nutritiva es superior a las cantidades absorbidas por la planta o la pérdida por lixiviación.
3. Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y al mismo tiempo se descompone con el transcurso del cultivo liberando nutrientes.

Lo anterior puede ser prevenido conociendo las cantidades de nutrientes requeridos por los cultivos y no abonando de forma excesiva.

Pero una vez presentado un incremento en la salinidad en el sustrato también puede ser corregido, mediante la lixiviación con agua de buena calidad hasta conseguir un volumen de lixiviación equivalente al volumen del contenedor del sustrato, manteniendo el cultivo permanentemente húmedo, no aplicar fertilizantes en polvo y reducir el estrés de la planta mediante el sombreado e incrementando la humedad relativa ambiente.

La respuesta de las plantas a la salinidad depende de la edad de éstas, de las condiciones ambientales, de las prácticas de manejo del cultivo y de las características de la especie.

Una vez que la cantidad de sales acumuladas en el suelo sobrepasa un valor umbral, que depende del cultivo, la producción desciende linealmente con el aumento de sales en el suelo.

#### **1.2.3.2.4. pH.**

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma asimilable. No obstante el crecimiento y desarrollo de las plantas se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extrema.

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo estrecho.

El nivel de referencia en el cultivo de las plantas ornamentales en contenedor pH (extracto de saturación) de 5.2 a 6.3. nivel óptimo para cultivos hortícolas pH (disolución del sustrato) de 5.5 a 6.8.

La asimilación de los elementos nutritivos es afectada de modo marcado por el pH. Con pHs de 5 a 6.5 la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, etc. Mientras que por encima puede reducir la asimilabilidad de Fe, P, Mn, B, Zn y Cu. Los óxidos metálicos se hacen más solubles por debajo de 5 pudiendo llegar a ser citotóxicos.

Si el pH está por afuera del intervalo recomendado, se deberá llevar a cabo el ajuste de dicho pH. En el caso de sustratos ácidos se requiere la adición de cal o dolomita para provocar un incremento en el pH. El pH alcalino de los sustratos básicos puede reducirse mediante la adición de azufre. Y las cantidades de cal y azufre dependen del pH original del sustrato y su capacidad de intercambio catiónico, siendo las necesidades de enmienda tanto mayor cuanto mayor es la capacidad de intercambio del material.

### **1.2.3.2.5. Relación Carbono – Nitrógeno.**

La relación C/N se usa tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Los daños que aparecen en las plantas cultivadas sobre materiales orgánicos inmaduros son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizosfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la actividad microbiana.

Una relación C/N inferior a 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato y es un índice de un material orgánico maduro y estable.

### **1.2.3.3. Biológicas.**

Se refiere a propiedades dadas por los materiales orgánicos, cuando éstos no son de síntesis son inestables termodinámicamente y, por lo tanto, susceptibles de degradación mediante reacciones químicas de hidrólisis, o bien, por la acción de microorganismos (Burés, 1999). Entre las características biológicas destacan:

- Contenido de materia orgánica
- Estado y velocidad de descomposición

Una vez conocidos los principales parámetros que definen un sustrato, probablemente proceda hacer referencia al “sustrato ideal”. Ante la reiterada pregunta, de si existe un sustrato ideal, la respuesta es “no”; el sustrato adecuado para cada caso concreto dependerá de numerosos factores: tipo de planta que se produce, fase del proceso productivo en el que se interviene (semillado, estaquillado, crecimiento, etc.), condiciones climatológicas, y lo que es fundamental, el manejo de ese sustrato. Por lo tanto, la imposibilidad de referenciar un sustrato ideal, pero sí que puede hacerse referencia a los requerimientos que un sustrato debe tener, como son:

- Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible
- Elevada aireación
- Baja densidad aparente
- Elevada porosidad
- Baja salinidad
- Elevada capacidad tampón
- Baja velocidad de descomposición
- Estabilidad estructural
- Reproductividad y disponibilidad
- Bajo costo
- Fácil manejo (mezclado, desinfección, etc.)

#### **1.2.3.4. Otras Propiedades.**

1. Libre de semillas de mala hierba, nemátodos y otros patógenos.
2. Libre de sustancias tóxicas.
3. Disponibilidad.
4. Bajo costo
5. Fácil de mezclar.
6. Fácil de desinfectar.
7. Resistencia a cambios extremos físicos, químicos y ambientales.

#### **1.2.4. Tipos de Sustratos.**

Entre los materiales que son utilizados en la producción se encuentran: Las Turbas, Corteza de pino, Arena, Lana de Roca, Perlita.

##### **1.2.4.1. Turbas**

Vegetales fosilizados. Penningsfeld y Kurzmann (1983) han definido la turba como la forma disgregada de la vegetación de un pantano, descompuesta de modo incompleto a causa del exceso de agua y la falta de oxígeno, que se va depositando con el transcurso del tiempo, lo que favorece la formación de estratos más o menos densos de materia orgánica, en los que se pueden identificar los restos de diferentes especies vegetales.

Strasburger et al. (1986) han señalado que este material natural está formado por depósitos de restos de musgos y de otras plantas superiores, que se hallan en proceso de carbonización lenta, fuera del contacto con el oxígeno, por lo que conservan largo tiempo su estructura anatómica. Para conocer el grado de descomposición (humificación) de las turbas, se utiliza el método de Von Post o «del estrujado»: una muestra de turba saturada de agua se comprime con los dedos de la mano, y se evalúa su grado de descomposición, que puede variar desde H-I (nada descompuesta) hasta H-IO (completamente humificada), según el color del agua que escurre, la cantidad de papilla de turba que pasa entre los dedos, y la estructura de las plantas que la integran.

La gran diversidad de turbas existentes en el mercado, resultado de su diferente composición botánica, condiciones de formación y grado de descomposición, tamaño de partícula, grado o nivel de fertilización, etc., permite hacer solamente comentarios generales acerca de sus propiedades.

##### **1.2.4.2. Corteza de pino**

Corteza es un término genérico que incluye a la corteza interna (floema vivo) y a la corteza externa (ritidoma) de los árboles, ésta última incluyendo, a su vez, a las células suberosas (felema). La corteza representa usualmente del 6 al 16% del volumen del árbol. Se pueden utilizar cortezas de muy distintas especies de árboles (Melaleuca, Picea, Pinus, etc.). Usada correctamente, la corteza proporciona excelentes resultados, se pueden utilizar en estado fresco (material crudo) o compostadas.

Las cortezas compostadas muestran adicionalmente propiedades supresivas de determinados patógenos vegetales, particularmente hongos (*Phytophthora*, *Pythium*, etc.). Por último, señalar que las cortezas se vienen utilizando últimamente como material sustitutivo (alternativo) de las turbas *Sphagnum*, debido a sus excelentes resultados, su abundante disponibilidad y su bajo coste.

#### **1.2.4.3. Arena**

Es un material de naturaleza silíceo y de composición variable, pueden proceder de canteras (granito, gneis, basalto, etc.) o de ríos y ramblas (depósitos de formación aluvial, más o menos recientes).

Las primeras son generalmente más homogéneas y suelen estar constituidas por partículas angulosas, con aristas vivas. Las segundas son más heterogéneas, ya que resultan de la mezcla de distintos materiales erosionados y transportados por las aguas, y sus partículas suelen ser redondeadas.

En todos los casos, y para un óptimo aprovechamiento como sustrato de cultivo, las arenas deberían estar exentas de limos y arcillas, y también de carbonato cálcico.

#### **1.2.4.4. Lana de roca**

Se trata de un producto mineral transformado industrialmente por temperaturas elevadas. Básicamente es un silicato aluminio, que también contiene algo de calcio y magnesio y, en menor proporción, hierro y manganeso.

La fabricación de la lana de roca o rockwool se inició en Dinamarca. Se prepara a partir de una mezcla de rocas basálticas (diabasa), piedra caliza y carbón de coque en la relación ponderal 3-1-1, que se funde a 1.600° C. La masa fundida se lanza sobre unas ruedas giratorias, de donde sale expelida en forma de fibras de 0,05 mm de grosor. Las fibras se comprimen en bloques (tacos) o planchas (tablas), de diferentes tamaños y características, o se granulan (gránulos). Durante el proceso de fabricación se añaden materiales que proporcionan estabilidad (resina fenólica bakelita) y capacidad para absorber (mojantes) o repeler el agua (polímero de urea-formol). En la forma repelente al agua, el aire es retenido dentro de los gránulos aunque el medio circundante se encuentre saturado de agua, proporcionando, de este modo, aireación suficiente a las raíces que se encuentren en el interior de dichos gránulos.

#### **1.2.4.5. Perlita**

Es básicamente un silicato lumínico de origen volcánico. La perlita procede de rocas volcánicas vítreas (grupo de las riolitas), que se han formado por enfriamiento rápido, constituyendo un material amorfo, que contiene un 2-5% de agua combinada. En su tratamiento industrial, este material se fragmenta en partículas de pequeño tamaño, se precalienta a 300-400° C y se deposita en hornos a 1.000° C. El agua combinada se evapora rápidamente,

expandiéndose el producto, para formar un material particulado (agregados ligeros), con una densidad aproximada de  $125 \text{ kg m}^{-3}$ , cuando la roca original pesaba  $1.500 \text{ kg m}^{-3}$ .

La perlita conforma una estructura celular cerrada. Su superficie es rugosa y contiene numerosas indentaciones, lo que le proporciona una gran área superficial y le permite retener agua en su superficie. Debido a esta estructura celular cerrada, el agua es retenida solamente en la superficie de las partículas o en los poros existentes entre dichas partículas. En consecuencia, las mezclas de sustratos con elevada proporción de perlita están usualmente bien aireadas y no retienen cantidades elevadas de agua. Esta condición determina que la perlita se utilice ampliamente como componente de aireación en los sustratos de cultivo.

#### **1.2.4.6. Vermiculita.**

La vermiculita natural es un silicato hidratado de magnesio, aluminio y hierro, que presenta la siguiente composición:  $\text{SiO}_2$  39,4%;  $\text{MgO}$  23,4%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12,1 %; óxidos de Fe 6,0%;  $\text{K}_2\text{O}$  2,5%;  $\text{MnO}_2$  0,3%. Pertenece al grupo de los filosilicatos expandibles 2:1, siendo en apariencia parecida a las micas.

El material original presenta una estructura trilaminar, con moléculas de agua atrapadas entre las láminas. En su transformación industrial, este material se trata en hornos a temperaturas elevadas ( $1.000^\circ \text{C}$ ), durante un corto período de tiempo (1 minuto). En estas condiciones el agua se evapora rápidamente y el incremento de la presión hace que las láminas se expandan (hasta 15-20 veces su volumen original) en dirección perpendicular a los planos de laminación, adquiriendo una estructura porosa y esponjosa (exfoliación).

El producto final, completamente esterilizado, suele clasificarse en cuatro tipos o categorías, de acuerdo con el tamaño de sus partículas:

1. 5-6 mm
2. 2-3 mm.
3. 1-2 mm.
4. 0,75-1 mm.

#### **1.2.5. Factores que afectan el gasto de agua.**

1. Sustrato.
  - Radiación Solar, Temperatura y Déficit de Oxígeno.
  - Salinidad en la Solución Nutritiva.
  - Contenido de Agua en el sustrato
2. Ambientales
  1. Humedad del aire
  2. Contenido de  $\text{CO}_2$
  3. Momento del día, Estación del año, Radiación solar
3. El Cultivo

### **1.2.5.1. Sustrato.**

#### **1.2.5.1.1. Radiación solar, temperatura y déficit de oxígeno**

El déficit de oxígeno depende de las condiciones térmicas de la disolución nutritiva y que dependerá del nivel de radiación externo del cultivo. Niveles elevados de temperatura están directamente relacionados con valores elevados de déficit de oxígeno (Gislerod y Adams, 1983). Por otro lado, la relación diaria entre el contenido en oxígeno y la radiación solar presenta un claro fenómeno de histéresis (Gislerod y Adams, 1983).

La variación del contenido en oxígeno de la disolución nutritiva está asociada a la actividad respiratoria de las raíces y depende en mayor o menor medida de la especie. Para un mismo nivel de radiación solar, el contenido en oxígeno alcanza niveles más bajos por la tarde que por la mañana como consecuencia de un aumento de la demanda de oxígeno por la respiración radical, que es consecuencia de un aumento de la temperatura de la solución nutritiva.

De forma general, las deficiencias de oxígeno en el medio radical producen un efecto negativo en el crecimiento de las raíces y en el consumo de nutrientes, puntualizando que la falta de oxígeno nocturno puede ser una de las causas de la podredumbre apical (blosson-end rot) en tomate por problemas en la asimilación de calcio (Tachibana, 1991).

Por razones similares, la temperatura del medio radical debe mantenerse dentro de un intervalo razonable, si la temperatura de la disolución nutritiva es muy baja, la absorción de agua y nutrientes (Urrestarazu et al., 2002) se reduce y el crecimiento de las plantas también, que unido a una carencia de oxígeno tiene un efecto negativo en la productividad de los cultivos (Cockshull, 1998).

Del incremento de las necesidades de oxígeno por parte de las raíces durante la tarde podemos concluir que sería recomendable aumentar la frecuencia de los riegos a dichas horas del día, comparativamente a los suministrados en las primeras horas (Urrestarazu et al., 2004).

La temperatura de la disolución nutritiva influye de manera sensible en la absorción mineral, desarrollo y crecimiento de las raíces (Cooper, 1973), atribuyéndosele a la disminución en la asimilación de nitratos (Ganmore Neumann y Kafkafi, 1980), de fósforo (Hurewits, 1984) o absorción de agua (Kramer, 1949). El nivel óptimo de absorción durante el día se sitúa a 25° C.

Aumentos en la temperatura radical contribuyen no sólo a incrementar el consumo de elementos nutritivos sino que indirectamente las emisiones de éstos al medio y la CE de los drenajes disminuyen, con lo que la cantidad de agua utilizada para lavado también puede ser menor (Urrestarazu et al., 2002).

#### **1.2.5.1.2. Contenido de sales de la disolución de nutrición**

Se define como la concentración total de sales solubles presentes en la disolución del medio de cultivo. El método más práctico para ajustar el suministro de nutrientes en relación a la demanda en sistemas hidropónicos es la medida de la concentración total de iones de la disolución expresada como conductividad eléctrica (CE) en la zona de la raíz (rizosfera).

Se puede producir un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar éste colocado en el contenedor, cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego es superior a las cantidades absorbidas por las plantas o las pérdidas por lixiviación.

En el caso de que se produzca un incremento en el contenido de sales del sustrato, las plantas deberán vencer potenciales osmóticos más elevados, si no son capaces de vencerlos éstas se pueden marchitar a pesar de la presencia de agua.

El incremento en la salinidad del sustrato, si se presenta, puede ser prevenido, o corregido, mediante la lixiviación controlada. En la práctica del riego en el cultivo hidropónico, el agua se maneja produciendo un determinado volumen de drenaje con el objeto de evitar, por lavado, la acumulación de sales. Este exceso (drenaje) debe variar en función de la época del año, el estado de desarrollo de la planta y la calidad del agua de riego, debiendo ser modificado en función de los objetivos perseguidos durante el cultivo.

Elevados niveles de salinidad es uno de los problemas inherentes a los cultivos sin suelo. La salinidad tiene un gran efecto en las relaciones de agua de las plantas, un estrés osmótico reduce tanto el consumo de nutrientes como de agua, aunque tiene repercusiones más negativas en la adsorción de elementos minerales, lo que explica que pueda producirse un aumento de la salinidad de la disolución nutritiva (González-Real, 1996).

El uso de altas CEs reduce el rendimiento de los cultivos y altera el equilibrio nutricional de las plantas (Adams, 1991; Stanghellini et al., 1998; Cockshull, 1998). Según Soria y Cuartero (1998) existe una correlación negativa y altamente significativa entre el consumo diario de las plantas de tomate y la CE de la disolución nutritiva.

La elevada salinidad también reduce el área foliar y el crecimiento de las plantas (Alarcón et al., 1994; Al-Harbi, 1995), suponiendo un 15% menos de área foliar por planta lo que provoca un descenso en el consumo de agua por planta de igual magnitud (Stanghellini et al., 1998).

El único aspecto positivo que se le puede asociar a la salinidad es el aumento de la calidad de la producción, entendida por una mayor presencia en los frutos de azúcares, proteínas o la propia proporción de peso seco, este mismo factor debe considerarse cuando se quiere primar el desarrollo de la parte productiva sobre la vegetativa de las plantas que se aprovechan por sus frutos.

## **1.2.5.2. Ambientales**

### **1.2.5.2.1. Humedad del aire**

La humedad relativa se utiliza para medir el contenido hídrico del aire. Está expresada en tanto por ciento de la cantidad de agua presente en un volumen dado con respecto a la cantidad de agua máxima que podría contener a la misma temperatura.

Dentro del invernadero, el agua aparece principalmente en forma de gas. La diferencia de presión de vapor de agua o déficit de presión de vapor (DPV) representa el gradiente o diferencia de presión de vapor entre el interior de las hojas (que asumimos está saturada con vapor de agua) y el ambiente en el interior del invernadero. La diferencia de presión de vapor de agua (DPV) de la atmósfera tiene un efecto directo sobre la transpiración de las plantas e incluso puede afectar a incidencia de enfermedades.

La transpiración está relacionada con el gradiente del potencial hídrico existente entre el aire y la superficie de evaporación. Obviamente la transpiración tiene lugar de modo más rápido cuanto más seco esté el aire que rodea a la planta a iguales condiciones del resto de los parámetros ambientales y con disponibilidad de agua hipotéticamente ilimitada. Para una humedad relativa dada, la diferencia de presión de vapor y, por tanto, el gradiente de potencial hídrico, aumenta con el incremento de la temperatura; de manera que a una determinada temperatura se puede establecer una correlación precisa entre la humedad relativa y la transpiración.

El movimiento del aire sobre la superficie de la hoja elimina el vapor de agua y aumenta el potencial hídrico, favoreciendo la transpiración. Si la velocidad del viento fuese muy alta la transpiración disminuye al producirse un cierre estomático por perturbación mecánica o desecación de la hoja (Sutcliffe, 1984), esta situación no es frecuente en invernaderos.

La variación de la humedad del aire en distintos puntos del invernadero es de gran importancia para justificar las diferencias de consumo de agua según las plantas estén más o menos próximas a las ventanas que permiten la ventilación, factor que es de suma importancia a la hora de hacer el diseño físico del sistema de riego.

Si la demanda evaporativa de la atmósfera es moderada y el sustrato contiene suficiente agua, la transpiración y la absorción del agua del sustrato están en equilibrio. Pero si se produce una gran diferencia de potencial entre la atmósfera y la planta, la demanda evaporativa es superior al abastecimiento de agua por absorción. Para evitar la pérdida del agua de constitución de la planta (deshidratación y pérdida de turgencia) la planta disminuye la transpiración mediante un mecanismo que regula la apertura de los estomas. Este fenómeno es muy importante y justifica la falta de correlación existente entre absorción de agua y parámetros que debieran estar ligados a ésta, o exceso de drenajes en los cultivos sin suelo cuando las consignas de riego están exclusivamente comandadas por parámetros ambientales sin considerar el estado de la planta.

### **1.2.5.2.2. Temperatura**

Los cambios bruscos de temperatura influyen en el ritmo de absorción de agua y en el ritmo de absorción mineral. algunos autores observan que el ritmo de transpiración tiende a alcanzar un nivel máximo y estabilizarse cuando la radiación solar es elevada (Baille et al., 1994a). Como ya ha comentado en estas condiciones de estrés, la planta reacciona regulando el nivel de transpiración para evitar una pérdida excesiva de agua;

En zonas del sudeste español y en general en el litoral mediterráneo como en cualquier zona semiárida, son más frecuentes los problemas derivados de las elevadas temperaturas que los descensos excesivos de los mínimos tolerables (períodos muy cortos). En el caso del consumo de agua, sin embargo, los efectos de la temperatura deben ser relacionados con efectos en el tamaño de las hojas y consecuentemente con la transpiración (Cockshull, 1998). West y Taylor (1980) describieron tres veces mayor el ritmo de transpiración a 28° C que a 20° C.

Dentro del invernadero se producen, en general, las máximas temperaturas con un retraso de dos horas con respecto al momento en el que se produce el máximo de radiación. Esto es importante en zonas y épocas donde los valores de temperatura alcanzados son excesivamente altos, limitando de esta manera la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta, aspecto a considerar en aquellos sistemas de riego controlados por radiación solar.

Este consumo no incrementa de forma indefinida, a temperaturas por encima de ciertos valores específicos a cada especie, tiene lugar un cierre estomático cualesquiera que sean las demás condiciones, estas condiciones podemos encuadrarlas en una situación de estrés en este caso hídrico.

### **1.2.5.2.3. Contenido en CO<sub>2</sub>**

El nivel normal de CO<sub>2</sub> al aire libre es algo más de unas 300 ppm, dentro de un invernadero este valor oscila entre 180 y 250 ppm durante el día y entre 400 y 500 durante la noche, estando el valor óptimo recomendado según la especie entre 500 y 3.000 ppm, siendo en cualquier caso valores inferiores a los registrados dentro de un invernadero.

El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> da lugar a un aumento de la fotosíntesis, que supone una disminución de la conductancia estomática foliar y, por tanto, de la tasa de transpiración; Si bien tales reducciones no son proporcionales debido al efecto del aumento de la diferencia de presión de vapor hoja-aire (Nederhoff, 1994). Como resultado del incremento de la fotosíntesis neta y de la reducción de la transpiración, las plantas que crecen en ambientes con una elevada concentración en CO<sub>2</sub> muestran una mayor eficiencia del uso del agua (Zafri y Burrage, 1998). Sánchez et al. (1998) concluyen que en plantas de pepino cultivadas con enriquecimiento carbónico se produce una disminución en el volumen de agua consumida, que puede deberse a la menor necesidad de lixiviar solución del cultivo, enriquecimiento para mantener el mismo potencial osmótico en su entorno radical, ya que su

mayor tasa de fotosíntesis y, como consecuencia, su mayor producción de materia seca total implica una mayor adsorción iónica.

#### **1.2.5.2.4. Momento del día. Estación del año. Radiación solar**

Existen estudios que reparten el consumo de agua en 25-35% entre las 8 y las 13 horas, 45-60% entre las 13 y las 19 horas y 10- 25% después de las 19 horas (Michelot y Lora, 1993), aunque existe una gran variación entre las especies y las variedades.

Estas variaciones del consumo de agua según el momento del día están provocadas por la evolución que el potencial hídrico de la hoja experimenta en función de la transpiración y de la absorción. En la primera parte del día, la transpiración es superior a la absorción, creando un déficit hídrico en la planta; es la fase de deshidratación, que viene acompañada de una bajada del potencial hídrico en la hoja entre -10 y -15 bar (Fourcard, 1997). Después, en la segunda parte del día, la transpiración disminuye y la absorción, si la disponibilidad de agua en el sustrato no es limitante, aumenta. Es la fase de rehumectación, que viene acompañada de una subida del potencial hídrico foliar (-7 bar).

Durante la noche se produce, en condiciones normales de cultivo, un elevado consumo de agua (fase de turgencia), destacando el importante consumo de N que se produce paralelamente (Le Bot, 1994). La cantidad de agua consumida durante la noche fue estimada en el 15% del total del consumo del día (Maruo et al., 1995).

El consumo de agua según el momento del año se constata que los mayores valores aparecen en los meses de primavera y verano, seguidos por los de otoño y por último, como cabría esperar, en invierno.

#### **1.2.5.3. Cultivo**

Uno de los factores que condicionan el consumo de agua de una planta por su influencia en la transpiración, son las características genéticas de la propia planta, principalmente las peculiaridades de los órganos de consumo y transpiración de agua. El máximo de transpiración es una característica propia de la especie y varía en grandes proporciones, como por ejemplo entre un cultivo de *Impatiens* ( $0,6 \text{ mm h}^{-1}$ ) y un cultivo de *Poinsettia* ( $0,2 \text{ mm h}^{-1}$ ) (González-Real, 1997).

Otro factor importante viene determinado por la edad de la planta y el estado fenológico en el que se encuentre, existe una relación clara entre éste y la absorción de agua. Estas diferencias en el consumo hídrico según estado fenológico también aparecen en el consumo total de elementos minerales. Para asegurarnos que las plantas se encuentran regadas según sus necesidades de agua en cada momento es importante dividir el ciclo completo de cultivo en cuatro etapas según las diferencias en la absorción de agua y nutrientes (Yamasaki et al., 1976; Sheen y Hsu, 1996) que estarán más o menos diferenciadas según la especie en:

Período vegetativo (desde el trasplante).  
Polinización-frutos recién cuajados.  
Desarrollo (engorde) de los frutos.  
Maduración de los frutos.

En general, el consumo de agua diario de una planta ordenado de mayor a menor por etapas es: el engorde de frutos, el período de maduración, la etapa de polinización-frutos recién cuajados y, por último, el periodo vegetativo.

### **1.2.6. Fenómenos directamente relacionados con el gasto de agua**

Para conocer las necesidades de riego primero es necesario conocer qué variables influyen en la absorción de agua de un cultivo. En el caso particular de los cultivos sin suelo, que asumimos ligados a sistemas de producción protegidos, podemos suprimir variables tales como las aportaciones de agua por precipitación y el aporte capilar desde la capa freática del suelo.

De manera que las variables que intervienen directamente en el gasto de agua se pueden resumir en la absorción directa de la planta, el término particular de drenaje propio de los cultivos en sustrato con volumen limitado y la evaporación. Los términos que usaremos se pueden simplificar en:

$$\text{GASTO CULTIVO} = \text{ABSORCIÓN DE LA PLANTA} + \text{DRENAJE} + \text{EVAPORACIÓN}$$

#### **1.2.6.1. Absorción de la planta**

Se puede trabajar en fertirriego con la consigna de que la absorción radical debe compensar la pérdida de agua por transpiración y el incremento de agua utilizada en el crecimiento (agua de constitución). Las plantas utilizan el agua, entre otros motivos, para mantener la turgencia, transportar los nutrientes y realizar la fotosíntesis.

Las plantas transpiran agua almacenada y/o tomada desde la zona radical a la atmósfera en función del microclima en el que se encuentre (temperatura de la hoja y raíz, radiación solar, humedad del aire, velocidad del viento, etc.), la edad de la planta, morfología y estado fitosanitario de la misma, y de la disponibilidad de agua en la zona radical.

De forma general, el consumo de la planta o del cultivo podemos dividirlo en transpiración y agua constitucional.

$$\text{CONSUMO PLANTA} = \text{TRANSPIRACIÓN} + \text{AGUA CONSTITUCIONAL}$$

#### **1.2.6.2. Transpiración**

La pérdida de agua de las plantas en forma de vapor hacia la atmósfera se conoce como transpiración. Es bien conocido desde antiguo que la mayor parte del agua absorbida por las plantas es perdida por transpiración (> 90%, Boyer, 1985). Esta se produce, sobre todo, en las hojas, a través de los estomas situados en la cara inferior, y de la cutícula que las recubre.

La transpiración a través de la cutícula de las hojas representa del 10 al 30% del total. Cuando los estomas están totalmente cerrados, la transpiración cuticular es la única que se produce. Para compensar la pérdida de agua por transpiración, la planta la absorbe de la rizosfera, produciéndose una circulación de agua a través de ella, lo que a su vez contribuye a adquirir y le permite transportar a larga distancia mediante el flujo xilemático sustancias nutritivas y paralelamente, la evaporación del agua como resultado de la transpiración produce un enfriamiento de las plantas.

La transpiración puede variar también de manera brusca en el curso de dos días consecutivos en función de las condiciones climáticas existentes. Bajo condiciones de elevada radiación, el ritmo de transpiración puede alcanzar niveles tres veces superiores a los que alcanza durante un día nublado (González Real, 1996).

La demanda por transpiración viene determinada básicamente por la radiación solar (Baille et al., 1994a; Caballero et al., 1997) y la diferencia de presión de vapor (binomio temperatura-humedad relativa).

La transpiración puede ponerse en forma de la ecuación de Penman-Monteith, donde aparecen términos que están en función de la conductancia estomática junto a otros factores como intensidad con la que el aire se renueva en las inmediaciones de las hojas, y que deben ser identificadas para cada especie. A su vez es necesario medir los parámetros del clima, que junto a la estimación de los datos relacionados con la planta, permitirá evaluar la transpiración de la especie (González-Real, 1996).

El valor conocido como evapotranspiración potencial de un cultivo (ETP), se define como la cantidad de agua perdida en una unidad de tiempo por una área dada de terreno, de cobertura vegetal escasa y uniforme, que lo cubra por completo, y con un suministro adecuado de agua en el suelo.

#### **1.2.6.3. Agua constitucional**

La cantidad de agua retenida por una planta, salvo en acuáticas sumergidas, es solamente una pequeña fracción del total absorbido por las raíces. La componente de transpiración en el balance hídrico de un cultivo como se ha dicho ya es muy alto, así por ejemplo se ha estimado para este fin en plantas hortícolas entre 90 y 98% del agua total que absorben para su desarrollo (Sutcliffe, 1984; Boyer, 1985). A nivel práctico, y con vistas a una aplicación para la gestión del riego, se puede considerar que, a corto plazo (minutos), el consumo de agua equivale a las pérdidas por transpiración y que ésta difiere poco del consumo total (transpiración más agua constitucional).

#### **1.2.6.4. Evaporación**

Esta temática ha quedado cuantificada por autores como Foucard (1997) que, en sus experimentos con cultivos en sustrato colocados en sacos, tablas, contenedores tapados, NFT, etc., obtiene que la evaporación directa con respecto a la transpiración fue de un 30% en el momento del trasplante, valor

máximo que decrece lineal y rápidamente con el desarrollo de las plantas hasta el valor mínimo del 5 al 10%.

#### **1.2.6.5. Drenaje**

El excedente producido en cada uno de los riegos del volumen confinado en contenedores está generalizada la práctica de fertirregar hasta obtener un cierto volumen de disolución nutritiva a través de las aberturas del contenedor, y se suele expresar en porcentaje con respecto al volumen total aplicado en los fertirriegos en un tiempo determinado.

La importancia del drenaje es principalmente la conveniencia de mantener un nivel estable de nutrientes en el medio radical, y una distribución homogénea de los mismos en la rizosfera. La absorción selectiva de minerales y de agua por las plantas empobrece el medio en unos iones, cambia la conductividad eléctrica, elevándola o disminuyéndola, y acumula otros iones en exceso, por ejemplo sulfato y sodio. El riego en exceso en sustratos, al lavar y homogeneizar la rizosfera, permite solucionar con facilidad estos problemas.

También puede utilizarse para mantener un contenido óptimo en oxígeno en la disolución del sustrato, disminuir o aumentar la temperatura, y como principal objetivo que haya disponibilidad de agua en el sustrato a tensiones bajas para facilitar la succión de las plantas.

La proporción de drenaje necesaria depende de factores como el ritmo de transpiración del cultivo o la calidad del agua y se utiliza normalmente como indicador de la evolución del cultivo. Desde un punto de vista práctico, es razonable pensar entre un 10 y un 30%, en función de la época del año, el estado de desarrollo de las plantas y la calidad de agua de riego.

#### **1.2.7. Tipos de Riego en Cultivo Hidropónico.**

Como ya se mencionó antes el riego en cultivo hidropónico es parte fundamental para la obtención de los resultados propuestos por parte de los productores y de él depende el éxito o fracaso de la producción bajo invernadero, existen diversos tipos de riego (formas de suministrar el agua a los cultivos en hidroponía) y por lo tanto de proporcionar los nutrientes a las plantas, el tipo de riego se complementa con el método de adecuado riego (determinar cuando y cuanto regar).

Entre los tipos de riego que se utilizan comúnmente en la Hidroponía se pueden encontrar:

- Goteo.
- Aspersión.
- Nutrient Film Technique (NFT)
- NGS

### **1.2.7.1. Riego por Goteo.**

El riego es localizado y se aplica directamente al medio de cultivo mediante un emisor de bajo caudal.

### **1.2.7.2. Riego por Aspersión.**

El riego es aplicado por encima del cultivo a cierta altura que permita que el agua caiga sobre el follaje y sobre el medio de cultivo (Riego en invernaderos productores de plántula), el agua es llevada a presión por medio de tuberías y emitida mediante aspersores que simulan la lluvia.

### **1.2.7.3. Nutrient Film Technique (NFT)**

Consiste en recircular el agua con una lámina delgada de solución nutritiva, el cultivo se encuentra directamente sobre el agua de la cual absorbe nutrientes y oxígeno.

### **1.2.7.4. New Wrowing System (NGS)**

De igual forma que el sistema anterior, en éste se cuenta con un sistema de Recirculación de Agua en un circuito cerrado, pero el contenedor se encuentra dividido por capas, en las que se proporciona al cultivo agua, nutrientes y oxígeno a lo largo del tramo que recorre la lamina de agua y nutrientes.

### **1.2.8. Métodos de fertirriego.**

Existen diversos métodos y controladores de riego para cultivos en Hidroponía, que determinan el momento y la cantidad adecuada del riego, algunos solo se emplean en la parte experimental y engloban una gran cantidad de variables, pero que son difíciles de implementar en el sector productivo debido a su alto costo.

- Diámetro de Tallo.
- Ritmo de Transpiración.
- Balanza.
- Conductividad Eléctrica en el medio de cultivo.
- Conductividad Eléctrica en el Drenaje.
- Bandeja a la demanda.
- Radiación solar.
- Riego por tiempos
- Cantidad de Drenaje

Los métodos de riego pueden ser utilizados después de que las plantas se hayan estabilizado en el medio de cultivo, transcurridas al menos tres semanas desde el trasplante. Inmediatamente después del trasplante son necesarios más ciclos de riego, que los previsibles por consumo hídrico ya que el objetivo es acelerar que las plantas se estabilicen. Posteriormente el riego varía con el estado de crecimiento de la planta y las condiciones ambientales.

Los métodos de fertirriego tienen como finalidad: 1) el ahorro de agua y 2) de energía, a la vez que intentan 3) automatizar el manejo en lo posible, y en relación a esta última 4) un ahorro económico. Por lo tanto tendremos que responder básicamente a las siguientes cuestiones:

- Cuándo regar: frecuencia de riego (incluyendo su distribución circadiana).
- Cuánta cantidad de agua aplicar en un riego: dotación.

La dotación o dosis de fertirrigación es la cantidad de agua que se aporta en un riego, referenciada como a continuación se explica. Este volumen se debería expresar como volumen por unidad de superficie, aunque es frecuente hacerlo como mm de altura de agua (en un m<sup>2</sup>) o lo que es lo mismo litros por metro cuadrado. Otra forma correcta, en el caso de los cultivos sin suelo, es litros por plantas o litros por unidad de cultivo. También se expresa en tiempo, este valor debe ir acompañado de la presión de trabajo nominal de los goteros o su caudal y del número de goteros por unidad de superficie. La frecuencia del riego es el número de riegos por unidad de tiempo. En los cultivos sin suelo esta frecuencia es de varios riegos por día.

Ambos conceptos están muy relacionados, en cultivos sin suelo se pueden manejar los riegos dentro de un período de tiempo de dos formas diferentes. Mantener fija la dotación de riego y variar la frecuencia dentro del período o mantener fija la frecuencia y variar la dotación de cada uno de los riegos. Esta última es de utilidad cuando con un riego se persiguen determinados objetivos como puede ser el lavado de sales, pero podría darse el problema de disponibilidad de agua para el cultivo en unos riegos y escasez en otros, con las consecuencias negativas para la planta y para el control de los parámetros de la disolución nutritiva en el sustrato: pH y CE. Con el primer tipo de manejo se mantienen condiciones estables y homogéneas de aire y agua para las raíces a lo largo del tiempo.

El flujo de entrada es el volumen de disolución nutritiva añadida por medio de la fertirrigación. Y el flujo de salida es la suma del volumen de drenaje, transpiración, más o menos las variaciones temporales del contenido de agua en la planta y en el sustrato, y el agua constitucional.

$F_{\text{entrada}} = F_{\text{salida}}$

$F_{\text{entrada}} = \text{Dosis de fertirriego}$

$F_{\text{salida}} = \text{Drenaje} + \text{Transpiración} \pm [(\text{contenido en agua planta}) + (\text{contenido agua sustrato})] + \text{Agua constitucional}$

A continuación se describen algunos de los métodos de riego agrupados en función de que sean parámetros relacionados con el estado de las propias plantas, el sustrato donde se desarrollan, u otras características propias del agrosistema en cuestión.

### **1.2.8.1. Asociados a la planta**

Los métodos de riego asociados a la planta, en su mayoría, cuantifican el nivel de transpiración. Los aparatos que miden el potencial hídrico y la resistencia estomática a la transpiración se utilizan solamente en trabajos de investigación.

#### **1.2.8.1.1. Medidas de las variaciones del diámetro del tallo.**

Las microvariaciones del diámetro de los órganos vegetales corresponden a un cierto número de mecanismos y respuestas que dependen del estado hídrico de la planta. El diámetro de los órganos vegetales presenta una evolución típica a lo largo del día con un valor máximo, que se registra al final de la noche (periodo en que la hidratación de los órganos es máxima) y un valor mínimo, que se registra hacia mediodía, y que coincide con la pérdida máxima de agua que experimenta la planta a través del proceso de transpiración. La diferencia entre estos dos valores se conoce como amplitud de la contracción. Este parámetro es, al igual que la transpiración máxima, una característica de la especie y varía en función de los mismos factores que la transpiración.

Ventajas:

1. Son medidas no destructivas de plantas.
2. Da información continua y en tiempo real del estado hídrico de la planta.

Inconvenientes

1. En la información que proporcionan estos sensores, para cada especie y estado de desarrollo, hay que identificar el componente asociado al crecimiento del órgano y el componente asociado a la pérdida de agua.
2. Un déficit de oxígeno, niveles térmicos inadecuados en sustrato y salinidad
3. Muestran contracciones diurnas similares a las asociadas a una falta de agua.
4. Alto coste, además la instalación y mantenimiento de los componentes electrónicos requiere de personal especializado.
5. No proporcionan información sobre la dosis y frecuencia de riego.

#### **1.2.8.1.2. Ritmo de transpiración**

Existen otros tipos de relaciones, disponibles para un cierto número de especies vegetales que integran, además de la radiación solar, la influencia que ejercen la temperatura y la humedad del aire (su déficit de saturación) en el nivel del ritmo de transpiración. Además se tienen que integrar características propias de la especie y su estado de desarrollo (índice foliar del cultivo) y que deben de identificarse, como se ha recogido anteriormente, de forma experimental. Puede observarse que si se tiene una estimación del índice foliar del cultivo, se dispone de la medida de la radiación solar global y del déficit de saturación del aire (medida de temperatura y de humedad relativa) se puede calcular a un instante dado la proporción de transpiración. Estos métodos de riego facilitan los riegos en tiempo real, o sea automatismos de arranque, y el ajuste tanto al clima como a la especie utilizada. Este tipo de método se denomina modelo de transpiración de un cultivo.

### **1.2.8.2. Asociados al sustrato**

Los métodos de riego asociados al sustrato son aquellos que cuantifican la cantidad de agua disponible en el sustrato. Se pueden agrupar en directos e indirectos, los métodos directos son aquellos que miden el potencial hídrico del sustrato por medio del uso de tensiómetros, y los métodos indirectos son aquellos que cuantifican la reserva de agua en el sustrato por otros medios entre los que se encuentran el método de la balanza, la bandeja de riego por demanda y medidas de la CE en el sustrato.

#### **1.2.8.2.1. Tensiómetros**

El potencial hídrico del sustrato aporta información relativa al nivel de reserva hídrica disponible y permite fijar la dosis establecida en función del nivel de reserva al que se desea aplicar el riego. El potencial mátrico como componente del potencial hídrico del sustrato es medido por los tensiómetros, y entra dentro del grupo de medidas directas que pueden ser utilizadas para el manejo del riego.

Es necesario conocer el nivel de potencial que corresponde a la capacidad de reserva hídrica disponible del sustrato a la que se desea aportar la dosis de riego y utilizar este nivel, determinado experimentalmente, para definir la frecuencia del aporte de agua (Baille, 1992). Con los tensiómetros podemos seguir las variaciones del potencial hídrico.

Método útil para determinar la frecuencia del riego (inicio) y la dotación del mismo (parada) vendría determinada por las características del sistema.

Ventajas:

1. Rápido para medida de potenciales mátricos del suelo in situ.
2. Bajo coste.
3. Fáciles de instalar y de mantener.
4. Miden directamente la succión de agua.
5. No están influidos por el contenido de sales del agua del suelo.

Inconvenientes:

1. No miden directamente el contenido de agua del suelo.
2. La relación entre el contenido de agua y el potencial matricial difiere para cada tipo de suelo.
3. El tiempo de reacción es bajo.
4. Requieren un mantenimiento periódico.
5. En su instalación se disturba el suelo y puede permitir la infiltración de agua.

#### **1.2.8.2.2. Método basado en la Conductividad Eléctrica.**

La disolución nutritiva en la rizosfera está constituida en su mayor parte por sales disueltas en agua, por tanto las CEs nos da una buena idea de la componente presión osmótica del potencial hídrico del medio, por lo que este método de riego es muy interesante al estar directamente relacionado con uno

de los principales objetivos del fertirriego. Sin embargo, hay algunos autores como Fourcard (1997) que opinan que aunque se han experimentado diversos instrumentos para estos fines comerciales ninguno presenta la fiabilidad deseada. Con este método nos encontramos con problemas similares a los tensiómetros, debiendo determinar el punto de medida dentro del contenedor, y obtener los valores de CE según el tipo de sustrato, características del mismo (altura, geometría, volumen, etc.).

### **1.2.8.3. Asociados al clima**

Las medidas de los parámetros del clima son las más utilizadas como métodos prácticos para el manejo del fertirriego a través de sus implicaciones con las necesidades hídricas de las plantas. Estos métodos utilizan un conjunto de medidas de parámetros que pueden registrarse de manera continua y fiable bajo invernadero, medidas de clima como son temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor, etc.

#### **1.2.8.3.1. Radiación solar**

En la práctica, la relación que más se ha utilizado hasta ahora se basa en una estimación de la transpiración a partir de la radiación global solar y del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) que traduce el desarrollo del mismo. El coeficiente depende de la especie y debe identificarse experimentalmente. El inconveniente que presenta este tipo de fórmulas es que no son muy fiables cuando se utilizan para la gestión del riego a corto plazo en cultivo sin suelo ya que no integran la influencia que ejercen las condiciones de humedad en el ritmo de transpiración.

La utilización de la radiación solar para el seguimiento del riego es bastante precisa en invernaderos donde el resto de los parámetros climáticos no sufren grandes variaciones a lo largo del día, o sea, no se producen situaciones de estrés provocadas por otras variables climáticas (temperatura, humedad, viento, variaciones de presión osmótica, etc.).

La dotación de cada riego variará según el estado de desarrollo del cultivo, tipo y volumen de sustrato utilizado y los objetivos perseguidos en el cultivo. Existen múltiples estudios que determinan diferentes valores de radiación solar para tomar las decisiones sobre el fertirriego (consignas de manejo) en función de la especie cultivada y los diferentes objetivos perseguidos. Pueden actuar sobre el salto del riego como orden para determinar la frecuencia del riego, sin embargo la dotación del mismo será la suficiente para suplir el consumo y conseguir el drenaje deseado.

Se deduce que en el caso de utilizar solarímetros para determinar la frecuencia de riego nos permitiría regar en tiempo real y es necesario combinar su acción al menos con los riegos a tiempos para suplir las necesidades hídricas de las plantas en los períodos de baja o nula radiación solar.

#### **1.2.8.4. Riegos a tiempos**

Consiste en utilizar un programador de reloj controlado manualmente donde se contabiliza el momento de inicio del riego y el tiempo de parada, por lo tanto el número veces que activemos el programador fijará la frecuencia de riego y el tiempo que transcurra entre la activación del sistema y el instante de parada determinará la dotación de cada riego. Consiste pues en automatizar el riego para asegurar el suministro de agua en intervalos, usa un controlador de riego que se basa en aplicar un paquete de intervalos de riego durante las 24 horas.

Será necesario estimar los intervalos de acuerdo a la experiencia y considerando los objetivos del riego y las medidas de control. La única limitación es el máximo número de ciclos que pueden ser programados.

#### **1.2.8.5. Balanza**

Detecta el peso completo de una unidad de cultivo, se coloca debajo de la bandeja de cultivo y es regada para mantener un peso constante. Se colocan dos puntos de contacto en la balanza, el riego es iniciado o parado cuando el contacto de la balanza toca el correspondiente punto de contacto; si la aguja conecta el punto de contacto más bajo, comienza el riego, si toca el punto más alto el riego para.

Este sistema se basa en el mismo principio que los riegos con tensiómetros, consumido un porcentaje del agua total disponible en el sustrato (5-10%) se hace saltar un riego, el valor estándar de 500 gramos es igual que hablar de 500 mL de agua, de manera que este valor variará según la capacidad de retención de agua del sustrato utilizado y las unidades de cultivo colocadas sobre la balanza. Este método controla en tiempo real la frecuencia de riego y sería posible controlar la dotación, sólo influenciada por el porcentaje deseado de drenaje.

#### **1.2.8.6. Asociados a la Demanda:**

##### **1.2.8.6.1. Bandeja de riego por demanda**

Como sistema de fertirrigación relacionado con la cantidad de drenaje, pero que controla la frecuencia de los riegos óptimos por día, se utiliza la llamada bandeja de riego por demanda (o bandeja de riego a la demanda) (Urrestarazu 2004). Consiste en una bandeja o canalón, sobre el cual se depositan normalmente dos sacos de cultivo, y en cuyo extremo hay un pequeño depósito que acumula el agua de drenaje de los sacos. Las raíces de las plantas están en contacto con este depósito por medio de una manta porosa e hidróscopica situada en el fondo de la bandeja (Moreno J. 2003) (Alarcón) y (Urrestarazu 2004).

Cuando el cultivo demanda agua, la planta absorbe la solución del depósito a través de la manta hidróscopica y, de este modo, desciende el nivel de agua del depósito. Este descenso es detectado por un electrodo que, por medio de un controlador de nivel, emite una señal eléctrica hacia el controlador de riego.

Esta señal eléctrica es transformada en el equipo en una "orden" de activación de un riego. Se trata, por tanto, de un sistema de control directo. La bandeja de demanda es un automatismo muy útil y práctico, aunque el ajuste del riego que realiza no es totalmente perfecto. Así, en los momentos del día de mayor demanda hídrica (mediodía) se consigue un drenaje menor que en aquéllos con demanda más baja (por la tarde). Esta situación no es la ideal y por ello se han tratado de usar otros sistemas de control del riego. La bandeja determina la frecuencia de riego para todo el sector que control, la duración del ciclo de riego debe ser preestablecida o determinada por el ordenador de acuerdo a las condiciones de disponibilidad de agua en el sustrato con tiempos fijos. La duración total del ciclo (dotación) deberá ser lo suficientemente larga para permitir que se produzca el porcentaje de volumen deseado de drenaje desde las unidades de cultivo.

El funcionamiento de este sistema es capaz de integrar todas las variaciones del consumo hídrico que se puedan producir en el cultivo en tiempo real y nos permite seleccionar el porcentaje de drenaje deseado en cada uno de los riegos. Normalmente después de un riego en la bandeja de demanda, el agua pasa al depósito localizado al final de la misma, por medio de un paño colocado debajo de las unidades de cultivo y sumergido en el depósito, el agua va pasando según la demanda hídrica del cultivo del depósito final al paño y de éste al sustrato, en el momento que las sondas localizadas en el depósito detectan la disminución de nivel enviarán la orden de comenzar un nuevo fertirriego. Éste, previamente calculado, será lo suficientemente amplio para llenar el volumen del depósito vaciado por la transpiración de la planta y provocar el porcentaje de drenaje prefijado por el rebosadero que a tal fin presenta esta infraestructura.

#### **1.2.8.7. Asociados al sistema Cantidad de drenaje.**

La cantidad de drenaje, entendida como un porcentaje respecto a la entrada en el contenedor (%), tanto en volumen como en peso, será considerado como método de riego siempre que su medida suponga el accionamiento o parada del sistema de fertirrigación (consigna de riego), de manera que la señal que activa el fertirriego esté relacionada con su valor. Estos métodos por sí solos actúan sobre la dotación de riego y no sobre la frecuencia, para ello deberían integrarse con algún otro sistema y no considerarse un método de riego en sí mismos.

Cuantificar la fracción de drenaje es uno de los métodos más utilizados para continuar y corregir el funcionamiento de los métodos de riego. Cuando, por cualquier método de riego se pone en funcionamiento el sistema, el drenaje es recogido en un recipiente. En el momento que alcanza el nivel previamente establecido (calculado como un porcentaje respecto al de entrada), el ordenador apaga el sistema de riego y éste opera sobre una válvula solenoide en la base del bote para permitir su evacuación antes de que ordene el siguiente riego, por lo que un control del riego puede claramente pasar a ser un método de riego.

#### **1.2.8.8. Métodos integrados (planta-sustrato-clima)**

Como en el caso de los métodos basados en factores climáticos, el agricultor debe introducir o disponer de los datos relativos al desarrollo del cultivo, la consigna deseada de drenaje y la dosis a aportar (en general, es la cantidad de agua que corresponde a una fracción de la reserva hídrica del sustrato y que se define entre  $pF=1$  y  $pF = 2$ ). Las necesidades hídricas del cultivo son conocidas en todo instante a partir de un algoritmo Implantado en el ordenador que calcula la tasa de transpiración. En este caso, la consigna fijada a nivel del drenaje va ha ser utilizada para compararla con el valor real del drenaje medido en el invernadero. La diferencia entre estos dos valores permite ajustar la dosis de aporte y calcular una dosis real que debe de satisfacer a la vez las pérdidas por transpiración y la consigna de drenaje. La aplicación a una escala práctica de estas herramientas exige que se determine experimentalmente la influencia que ejercen los parámetros climáticos en la tasa de transpiración, las condiciones climáticas responsables de condiciones de restricción hídrica al igual que las características físicas del sus trato.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el transcurso de los años se han desarrollado diferentes metodologías de riego que permiten el aprovechamiento del agua, optimizando el aporte de nutrientes a los cultivos logrando con ello el aumento en la cantidad y calidad de los productos.

Hoy en día existen diversos métodos de riego que permiten al productor suministrar los nutrientes a los cultivos, entre los que encontramos: Por tiempos fijos, radiación, tensiómetro, de Balanza, Bandeja a la demanda, entre otros, también es posible encontrar combinaciones de estos, todos con sus ventajas e inconvenientes uno con relación al otro.

En la producción Hidropónica (cultivos sin suelo) existen muchos estudios sobre el momento y la cantidad adecuada de nutrientes, pero la determinación del suministro es complicado debido a que intervienen diversos factores y fenómenos (ambientales, relacionados con el medio de cultivo), a lo largo del desarrollo de la planta que dificultan dicha determinación, las características propias de la especie hacen de igual manera difícil determinar con precisión el cuanto y el cuando, por lo que es necesario desarrollar tecnologías que permitan involucrar las variables más significativas o de mayor incidencia tengan sobre el consumo de agua por parte del cultivo y con ello proponer la cantidad de nutrientes y el momento óptimo del riego.

Uno de los métodos de riego más precisos que determinan cuando regar es a través de la bandeja a la demanda, este tipo de método permite detectar el consumo de agua de la planta en tiempo real y de acuerdo a las condiciones específicas del invernadero donde se coloque, ya que indica el momento de inicio del riego para el total de las plantas del invernadero, por medio de dos electrodos de nivel uno que indica el inicio y otro que indica el final del riego, las desventajas que presenta este sistema son: no es lo suficientemente robusto para las labores de operación dentro del invernadero, los electrodos deben calibrarse manualmente y de acuerdo a la experiencia del técnico o del propio productor, los riegos se dan sin contemplar el estado agronómico de la planta, la respuesta a las necesidades reales del cultivo no es la más adecuada por lo que los intervalos de riego no son precisos entre un riego a otro, aunque los resultados de drenaje al final del día se logre.

El presente trabajo propone el desarrollo de un modelo de simulación sencillo, involucrando las variables mínimas que aseguran un adecuado funcionamiento, con la implementación de un sistema de control Proporcional Integral Derivado (PID), mediante el procesamiento de datos históricos de variables de clima (Temperaturas, Evaporación) registradas dentro de un invernadero, simulando las condiciones reales que se presentarían en un ciclo completo de un cultivo y permitiendo establecer el comportamiento que tendría el método de riego de la bandeja. Con la implementación de un sistema de control PID permitirá estabilizar el sistema de riego con los intervalos de riego aproximando el valor de drenaje del riego anterior al de la consigna establecida, asegurando los nutrientes necesarios para el cultivo y manteniendo el medio de cultivo con los parámetros de CE y pH en los niveles recomendados.

Los datos resultantes del modelo de simulación, darán la pauta para desarrollar un prototipo físico de una bandeja que funcione medianera un sistema de control PID y que cubra las necesidades de los productores en cuanto a un dispositivo lo suficientemente robusto para las labores dentro de los invernaderos, que permita cuantificar el volumen de drenaje mediante una célula de pesado y con ello establecer el momento preciso del riego, involucrando la lectura de las variables de pH y Conductividad Eléctrica en el propio drenaje para establecer el comportamiento agronómico del cultivo y con ello determinar las necesidades hídricas reales del cultivo.

## **2.1. OBJETIVOS**

### **2.1.1. Objetivo general.**

Desarrollar un prototipo que permita automatizar el riego en cultivos hidropónicos por medio de la bandeja a la demanda mediante el algoritmo de control PID.

En esta primera etapa y para el desarrollo de este trabajo es:

Desarrollar un modelo de simulación implementando el sistema de control PID, mediante el procesamiento de datos históricos de Clima que determinaran el consumo de nutrientes por parte de un cultivo y con ello determinar la respuesta de la bandeja a la demanda ante tales necesidades de los cultivos durante su ciclo de producción.

### **2.1.2. Objetivos específicos.**

- Diseñar la interfaz del software para que el usuario pueda manipularlo desde una PC.
- Determinar los modelos para el cálculo de las variables que intervienen en el modelo.
- Definir las aplicaciones para programar el modelo de simulación.
- Codificar cada una de las Variables que intervienen en el modelo e integrarlas para que interacciones de forma correcta.
- Realizar el ajuste de parámetros, para asegurar que los parámetros utilizados en la simulación son los que mejores resultados proporcionan.
- Realizar las pruebas correspondientes para asegurar el funcionamiento de la misma.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrollo en la Universidad de Almería, España, en el Departamento de Ingeniería Rural dentro del Laboratorio de Doctorado de Hidráulica, Cañada de San Urbano (Almería, España); 2° 23' de longitud y 36° 50' de latitud.

El equipo de cómputo en que se desarrollo el modelo de simulación y en que se procesaron los datos tiene las siguientes características:

- HP Pavilion dv2225la Notebook PC
- Procesador Intel® Core™ 2 Duo
- Disco duro Enhanced IDE 5400 RPM SATA
- 1024MB Memoria 667 MHz DDR2
- DVD RW con lightscribe

Las aplicaciones utilizadas fueron:

- Sistema Operativo Windows XP
- Microsoft Office 2003
- Visual Basic para aplicaciones.

Los datos de climas utilizados en el modelo fueron recabados en la Estación Experimental "Las Palmerillas" con una Estación Climática, colocada sobre un cultivo de hierba, situada en un invernadero con cubierta a dos aguas, orientación de la cumbrera este-oeste, de 20,5 m de largo, 24 m de ancho y 3,5 m de altura en cumbrera. El material de cubierta es polietileno termoaislante de 200 µm de espesor. En seguida se describe el aparato utilizado para cada variable:

- **Temperatura del aire y humedad relativa:** aspirósicrómetro ventilado a una velocidad de 4,5 m. s<sup>-1</sup> instalado a una altura de 1,5 m y sensores Pt-100. En su defecto se utiliza un termohigrógrafo con mecanismo de reloj de tambor mecánico con cuerda manual, con un alcance de medida de -20 a +40°C en temperatura y de 0 a 100% en humedad relativa.
- **Radiación solar:** piranómetro con un rango espectral de 0,3 - 3 µm y un rango de medida máximo de 1300 W.m<sup>-2</sup>, situado a una altura de 1,5 m.
- **Radiación P.A.R.:** sensor quantum con célula de silicio, siendo el rango espectral de 0,4-0,7 µm, situado a una altura de 1,5 m.
- **Evaporación:** tanque clase-A y tornillo de precisión.
- **Precipitación:** pluviómetro y probeta graduada de 10 mm y divisiones de 0,1 mm de precisión.
- **Viento:** Transmisor de viento combinado. El sensor de velocidad tiene un rango de medida de 0,3-40 m.s<sup>-1</sup> y una velocidad de arranque de 0,3 m.s<sup>-1</sup>. El sensor de dirección tiene un rango de medida de 0-360° y una resolución de 2,5°. Ambos sensores están instalados a 2 m de altura.

La programación del algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo para simular los riegos necesarios para un cultivo determinado en un ciclo determinado, se realizó mediante el Software Visual Basic para aplicaciones el cual se encuentra incorporado en una de las herramientas más flexibles para el procesamiento de datos Microsoft Excel en su versión 11.0.

En Microsoft Excel se desarrollo la interfaz con el usuario en ella se ingresan los datos de entrada, necesarios para realizar la simulación, se programaron las Funciones y Procedimientos que se requieren para el cálculo de las necesidades hídricas por parte de las plantas, tomando en cuenta los factores que intervienen en el consumo de las mismas, Clima, Sustrato y el Cultivo.

Para almacenar los datos de clima, del Cultivo y del Sustrato, se genero una base de datos con la herramienta de Microsoft Access, manejador de bases de datos útil para pequeños sistemas que no requieren procesos robustos, consta de tres tablas consideradas catálogos de los cuales se extrae la información las cuales son: VariablesInv (almacena las variables climáticas), Cultivos (Almacena las características del cultivo) y Sustratos (almacena las características de los sustratos) y dos que sirven para almacenar los resultados de los cálculos del controlador PID, la tabla de Ciclo (Almacena los datos de cada día del ciclo de cultivo desde la fecha de siembra hasta la fecha de recolección que definidas por usuario) y la tabla de RiegosDiarios (Almacena los datos de los riegos que se debieron dar diariamente durante el ciclo del cultivo).

Las tablas de la Base de Datos se relacionan entre si utilizando el modelo de Entidad-Relación que se muestra en la siguiente figura (Figura 1).

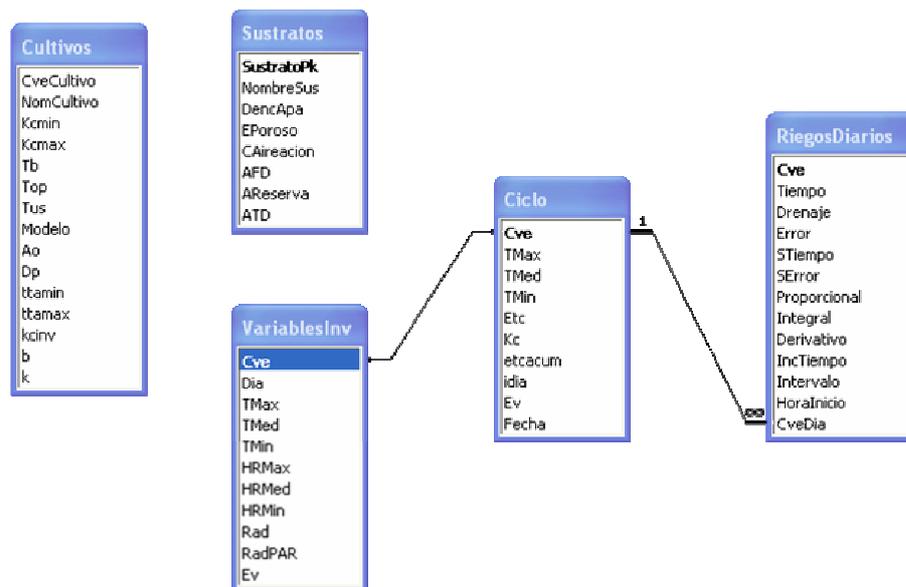


Figura 1. Modelo Entidad-Relación de la Base de Datos.

En seguida se presenta el diccionario de datos de cada Entidad (tabla) y los atributos (campos) que la conforman, se muestra el nombre del campo, el tipo de dato que almacena y la descripción del valor que almacena cada atributo.

Tabla: Cultivo (Figura 2).

Nombre del campo	Tipo de datos	
CveCultivo	Número	Clave principal del Cultivo
NomCultivo	Texto	Nombre del Cultivo
Kcmin	Número	Coficiente de Cultivo Mínimo
Kcmax	Número	Coficiente de Cultivo Máximo
Tb	Número	Temperatura Base
Top	Número	Temperatura Optima
Tus	Número	Temperatura Umbral Superior
Modelo	Número	Tipo de Modelo Utilizado para el Calculo
Ao	Número	Area Foliar Maxima
Dp	Número	Dencidad de Plantación
ttamin	Número	Tiempo Termico Acumulado Mínimo
ttamax	Número	Tiempo Termico Acumulado Máximo
kcinv	Número	Coficiente de Cultivo Independiente
b	Número	Parametro b del Modelo de Ritchie y Johnson (1990)
k	Número	Parametro k del Modelo de Ritchie y Johnson (1990)

Figura 2. Tabla Cultivo con Atributo, Tipo de Dato y Descripción.

Tabla: VariablesInv (Figura 3).

Nombre del campo	Tipo de datos	
Cve	Número	Clave Principal
Dia	Fecha/Hora	Fecha de Registro
TMax	Número	Temperatura Máxima
TMed	Número	Temperatura Media
TMin	Número	Temperatura Mínima
HRMax	Número	Humedad Relativa Máxima
HRMed	Número	Humedad Relativa Media
HRMin	Número	Humedad Relativa Mínima
Rad	Número	Radiación Solar
RadPAR	Número	Radiación Solar PAR
Ev	Número	Evaporación en Tanque

Figura 3. Tabla VariablesIn con Nombre, Tipo de Dato y Descripción.

Tabla: Sustratos (Figura 4).

Nombre del campo	Tipo de datos	
SustratoPk	Número	Clave Principal
NombreSus	Texto	Nombre del Sustrato
DencApa	Número	Dencidad Aparente (%)
EPoroso	Número	Espacio Poroso Total (%)
CAireacion	Número	Capacidad de Aireación (%)
AFD	Número	Agua Facilmente Disponible (%)
AReserva	Número	Agua de Reserva (%)
ATD	Número	Agua Total Disponible (%)

Figura 4. Tabla Sustratos con Nombre, Tipo de Dato y Descripción.

Tabla: Ciclo (Figura 5).

Nombre del campo	Tipo de datos	
Cve	Número	Clave Principal
TMax	Número	Temperatura Máxima
TMed	Número	Temperatura Media
TMin	Número	Temperatura Mínima
Etc	Número	Evapotranspiración del Cultivo Diaria
Kc	Número	Coficiente de Cultivo
etcacum	Número	Evapotranspiración Acumulada
idia	Número	Día Juliano
Ev	Número	Evaporación en Tanque
Fecha	Fecha/Hora	Fecha de Registro

Figura 5. Tabla Ciclo con Nombre, Tipo de Dato y Descripción.

Tabla: RiegosDiarios (Figura 6).

Nombre del campo	Tipo de datos	
Cve	Número	Clave Principal
Tiempo	Número	Intervalo de tiempo que transcurrió del riego anterior al Actual
Drenaje	Número	Drenaje Medido del Riego Anterior
Error	Número	Error del Drenaje con relacion al Drenaje Objetivo
STiempo	Número	Suma de Tiempos de los Ultimos 3 Riegos
SError	Número	Suma de Errores de los Ultimos 3 Riegos
Proporcional	Número	Tiempo a incrementar de la parte Proporcional del sistema de control PID
Integral	Número	Tiempo a incrementar de la parte Integral del sistema de control PID
Derivativo	Número	Tiempo a incrementar de la parte Derivativo del sistema de control PID
IncTiempo	Número	Suma de los Tiempos Proporcional, Integral y Derivativo
Intervalo	Número	Intervalo de Tiempo para el Proximo Riego
HoraInicio	Número	Hora de Inicio de acuerdo al horario de Radiacion que va de las -12 a las 12 Horas
CveDia	Número	Clave Foranea de la tabla ciclo

Figura 6. Tabla RiegosDiarios con Nombre, Tipo de Dato y Descripción.

El Sistema de control que se implemento es de bucle cerrado ya que el sistema de control comprueba la señal de la salida en nuestro caso el Drenaje y decide si el nivel de la señal real corresponde al de la señal deseada el Drenaje Objetivo, o si el nivel real de la señal ha de ser modificado para nuestro caso el intervalo de tiempo entre riegos para conseguir el objetivo fijado.

El algoritmo de control utilizado fue el Proporcional Integral Derivativo (PID) en el que se combinan las tres acciones de control y no presenta error de desplazamiento y reduce la tendencia a las oscilaciones, se puede considerar como un controlador proporcional, que dispone de un control integral para eliminar el error de desplazamiento y un control derivativo para reducir retardos de tiempo, he intervienen de la siguiente manera:

- El control proporcional da forma a la curva de respuesta de la variable controlada, produciendo más salida cuanto mayor sea el error.
- El control integral disminuye el tiempo de existencia del error, produciendo más salida cuanto más tiempo perdure el error.

- El control derivativo disminuye el tiempo durante el que cambia el error, prediciendo con antelación el valor del cambio del error, y, frecuentemente, reduce el error ejecutando por adelantado las correcciones oportunas.

La parte Proporcional fue determinada por la siguiente Ecuación:

$$i_{(t)} = K_p (F_L - F_{Lc})$$

Donde:

i(t) Es el intervalo de tiempo entre riegos  
 K<sub>p</sub> Factor Proporcional  
 F<sub>L</sub> Fracción de Lavado  
 F<sub>Lc</sub> Drenaje Objetivo

La parte Integral por la siguiente Ecuación:

$$i_{(t)} = \frac{K_I}{\sum_{i=1}^n i_{(t)}} \left( \sum_{i=1}^n (F_L - F_{Lc}) \right)$$

Donde:

i(t) Es el intervalo de tiempo entre riegos  
 K<sub>I</sub> Factor Proporcional  
 F<sub>L</sub> Fracción de Lavado  
 F<sub>Lc</sub> Drenaje Objetivo

y la parte Derivativa por la siguiente Ecuación:

$$i_{(t)} = K_D \left( \frac{\sum_{i=1}^n (F_L - F_{Lc}) - \sum_{i=1}^n (t)}{i(t^{-1})} \right)$$

Donde:

i(t) Es el intervalo de tiempo entre riegos  
 i(t-1) Es Intervalo de tiempo del riego anterior  
 K<sub>p</sub> Factor Proporcional  
 F<sub>L</sub> Fracción de Lavado  
 F<sub>Lc</sub> Drenaje Objetivo

Por lo que el cálculo del intervalo entre riegos se determino con la siguiente Ecuación:

$$i_{(t)} = i(t^{-1}) + K_p (F_L - F_{Lc}) + \frac{K_I}{\sum_{i=1}^n i_{(t)}} \left( \sum_{i=1}^n (F_L - F_{Lc}) \right) + K_D \left( \frac{Ea - Eant}{i(t^{-1})} \right)$$

Donde:

i(t) Es el intervalo de tiempo entre riegos  
 i(t-1) Es Intervalo de tiempo del riego anterior

$K_I$  Factor Integral  
 $K_D$  Factor Derivativo  
 $K_P$  Factor Proporcional  
 $F_L$  Fracción de Lavado  
 $F_{Lc}$  Drenaje Objetivo  
 $E_a$  Error Actual  
 $E_{ant}$  Error del Riego Anterior

Para determinar el Volumen de Riego y consumo de Agua por parte de la planta, se calcularon en base a una serie de variables necesarias para poder determinar el Volumen de Drenaje obtenido del riego anterior.

Las variables calculadas fueron:

- Volumen de Riego a Aplicar.
- Radiación Global Media, Extraterrestre.
- Evapotranspiración del cultivo diaria (ETo)
- Coeficiente de cultivo diario (Kc)
- Tiempo térmico acumulado(tta)
- El Área Foliar del Cultivo.

El volumen de Riego a aplicar, se determino en base a, el agua total disponible del sustrato y al volumen total de este en la bandeja por lo que fue calculado con la siguiente ecuación:

Volumen del Sustrato:

$$V_s = n * Vol$$

Donde:

n Es el numero de recipientes de Sustrato en la Bandeja.  
Vol Volumen de cada Recipiente

Agua Disponible:

$$Ad = ATDs * V_s$$

Donde:

ATDs Es el Agua Total disponible del Sustrato.

Volumen de Agua Consumida:

$$Vac = Ad * Pr$$

Donde:

Pr Es el porcentaje de Agua que se permitirá consumir del total de agua disponible.

Volumen de Agua a Aplicar:

$$V = Vac + F_L * V$$

$$V = \frac{Vac}{1 - F_L}$$

Donde:

$F_L$  Es el porcentaje de drenaje que se desea.

La Evaporación de referencia,  $ET_o$  fue calculada con la expresión de Evaporación de la FAO-Tanque.

$$ET_o = kp * E_o$$

Donde:

$kp$  El factor de proporcionalidad o coeficiente de tanque en función de la colocación del tanque y de las condiciones ambientales.

$E_o$  Evaporación desde una superficie libre de agua.

Expresiones para el cálculo del tiempo Térmico acumulado de emergencia (TTA) se obtiene a partir de las temperaturas máxima ( $T_{max}$ ) y mínima ( $T_{min}$ ) diarias y de tres valores de temperatura,  $T_b$  (temperatura base),  $T_{op}$  (temperatura óptima) y  $T_{us}$  (temperatura umbral superior), característica de cultivo.

Si  $T_{max} < T_{op}$  y  $T_{min} < T_b$

$$TT = \frac{(T_{max} - T_b)^2}{[2(T_{max} - T_{min})]}$$

Si  $T_{max} < T_{op}$  y  $T_{min} > T_b$

$$TT = 0.5 * (T_{max} - T_b) - T_b$$

Si  $T_{max} > T_{op}$

$$TT = \frac{1}{(T_{max} - T_{min})} \cdot \left[ \frac{(T_{op} - T_{min})^2}{2} + (T_{min} - T_b) \cdot (T_{op} - T_{min}) + \left( (T_{max} - T_{op}) \cdot (T_{op} - T_b) \left( 0.5 + \frac{0.5 \cdot (T_{us} - T_{max})}{(T_{us} - T_{op})} \right) \right) \right]$$

$$TTA = \sum_0^t TT$$

Para obtener el Índice de área foliar se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Área Foliar

$$\text{areafol} = \text{Areafolmax} * \text{Exp}(-b * \text{Exp}(-k * \text{tta}))$$

Índice de área foliar

$$\text{iaf} = \text{areafol} * \text{dp} / 10000$$

Para el calculo del Kc del cultivo se utilizaron los valores de los parámetros b y k obtenidos con el modelo Kc-IAF y del modelo de Ritchie y Johnson (1990) mediante ajuste lineal de los datos de área foliar por planta ( $\ln(\ln(A_o/A))$ ), el tiempo térmico acumulado (TTA) y la densidad de plantas.

Modelo 1.

Si el índice de Área Foliar >3

$$Kc = Kc_{\min} + (Kc_{\max} - Kc_{\min}) / 3 \cdot \text{iaf}$$

Si el índice de Área Foliar >3

$$Kc = Kc_{\max}$$

Donde:

Kc<sub>max</sub> es el Kc máximo

Kc<sub>min</sub> es el Kc Mínimo

iaf Índice de Área Foliar

Modelo 2.

Si tiempo térmico acumulado (tta) < el tiempo térmico mínimo.

$$Kc = Kc_{\min}$$

Si tiempo térmico acumulado (tta) < el tiempo térmico máximo.

$$Kc = Kc_{\min} + (Kc_{\max} - Kc_{\min}) / (tt_{\max} - tt_{\min}) \cdot (tta - tt_{\min})$$

Si tiempo térmico acumulado (tta) > el tiempo térmico máximo.

$$Kc = Kc_{\max}$$

Donde:

Kc<sub>max</sub> es el Kc máximo

Kc<sub>min</sub> es el Kc Mínimo

tt<sub>max</sub> es el tiempo térmico máximo.

tt<sub>min</sub> es el tiempo térmico mínimo.

El Cálculo de Radiación Media Extraterrestre y la fracción de ocurrencia.

$$Lat = \frac{\pi}{180 \cdot La} Kc_{\max}$$

Donde:

$\pi$  valor de Pi

La Latitud de la ubicación del invernadero

$$GAMMA_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(Dj + 284)}{365.24}$$

$$GAMMA = GAMMA_0 + 0.007133 \cdot Seno(GAMMA_0) + 0.03268 \cdot Coseno(GAMMA_0) - 0.000318 \cdot Seno(2 \cdot GAMMA_0) + 0.000145 \cdot Coseno(2 \cdot GAMMA_0)$$

$$DEC = ArcoSeno(0.3979 \cdot Seno(GAMMA))$$

$$ws = ArcoSeno(-Tangente(DEC) \cdot Tangente(Lat))$$

$$Dd = 24 \cdot \frac{ws}{\pi}$$

$$RadGlobal = \frac{24}{\pi} \cdot ION \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot Coseno\left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{Dj}{365.24} \right) \right) \cdot (Seno(ws) - ws \cdot Coseno(ws)) \cdot Coseno(Lat) \cdot Coseno(DEC) \cdot 3600$$

Radiación Global Instantánea:

$$ws = \frac{\pi}{24} \cdot DurDia$$

$$WH = \frac{VHora}{24} \cdot 2 \cdot \pi$$

$$Aa = 0.409 + 0.5016 \cdot Seno(ws - 1.047)$$

$$Bb = 0.6609 - 0.4767 \cdot Seno(ws - 1.047)$$

$$GlobalInst = \left( Aa + Bb \cdot Coseno\left( VHora \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{24} \right) \right) \cdot \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\left( Coseno\left( \frac{VHora}{24} \cdot 2 \cdot \pi \right) - Coseno(ws) \right)}{(Seno(ws) - ws \cdot Coseno(ws))} \cdot \frac{RadGlobal}{3600}$$

Radiación en un intervalo de Tiempo

$$Rad = \sum_{t_0}^{t_1} GlobalIns.dt$$

$$F_{ocurrencia} = Rad / RadGlobal$$

La Evapotranspiración del cultivo (ETc) para cada día esta dado por la siguiente ecuación:

$$ET_{C\text{día}} = E_o * K_c * k_p$$

Para determinar el consumo de Agua por parte de la planta en un intervalo de tiempo, fue obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$ET_{Int} = ET_{C\text{día}} * F_{ocurrencia}$$

Finalmente para obtener el drenaje generado del riego inmediato anterior, se determino por diferencia, entre el volumen de agua aplicado y el consumo de agua que tubo la planta en el periodo anterior.

$$F_L = V - ET_{Int}$$

La optimización de parámetros (KP, KI y KD) del controlador PID se efectuó buscando minimizar el error cuadrático de la diferencia de del drenaje obtenida con el drenaje objetivo, por medio de una función según el algoritmo de Nelder Mead.

El método Nelder-Mead es un algoritmo de optimización ampliamente utilizado, es debido a Nelder y Mead (1965) y es un método numérico para minimizar una función objetiva en un espacio multidimensional. El método utiliza el concepto de un simplex, que es un politopo de N+1 vértices en N dimensiones: un segmento de línea en una línea, un triángulo en un plano, un tetraedro en un espacio tridimensional y así sucesivamente. El método busca de modo aproximado una solución óptima local a un problema con N variables cuando la función a minimizar varía suavemente.



- $V_r$  es el volumen de Riego que se dará de forma constante a lo largo del ciclo del cultivo, esta variable es calculada automáticamente por lo que no es necesario que el usuario la ingrese.

La información que se requiere del cultivo es lo siguiente:

- El cultivo el cual debe de elegirlo de una lista de cultivos que son cargados desde la base de datos en la cual se tiene la información referente al cultivo ( $K_c$  Mínima,  $K_c$  Máxima, Temperatura Base, Temperatura Óptima, Temperatura del umbral superior, Modelo de Calculo del  $K_c$ , Índice de área Foliar máxima, Densidad de Plantación, tiempo térmico mínimo, tiempo térmico máxima,  $K_c$  invernal, coeficientes  $b$  y  $k$ ) que elija.
- El numero de plantas por metro cuadrado en el invernadero donde se va ha simular.
- El Numero de Tallos por planta y.
- La superficie total del sector en que se vaya a implementar la Bandeja.

En la parte de características de la Instalación de Riego la información que se le solicita al usuario es:

- El caudal del Gotero en litros por hora.
- Distancia que existe entre goteros en metros.
- El coeficiente de uniformidad expresado en porcentaje.
- El numero de portagoteros existentes en el sector de riego.
- Longitud media de los portagoteros en metros.
- Distancia entre portagoteros también expresado en metros.

En la parte de sustrato la información necesaria, que debe proporcionar el usuario será:

- El tipo de sustrato que se tiene como medio de cultivo desde la lista que se le proporciona que al igual que los cultivos cuenta con información relacionada como lo es: Densidad aparente, Espacio poroso, Capacidad de Aireación, Agua Fácilmente Disponible, Agua de Reserva y Agua Total Disponible.
- Los litros de Sustrato por recipiente (Bolis, Saco, bolsa o tabla).
- El numero de Recipientes con sustrato en la Bandeja.
- El numero de plantas en la Bandeja y,
- El porcentaje de agotamiento del total de agua disponible

En la pantalla también se encuentran 3 botones que le permiten al usuario realizar las siguientes acciones:

Botón “**Calcular**”.

El botón calcular, ejecuta el algoritmo de control PID, retomando los valores que el usuario previamente ingreso, y los utiliza en la serie de ecuaciones que se describieron en la metodología, generando las siguientes salidas:

Se registran los datos en la tabla Ciclo (Figura 8), del total de días que conforman el ciclo del cultivo, desde la fecha de siembra a la fecha de recolección, como lo es: Temperatura máxima, mínima y media, la Evapotranspiración Diaria, el Kc diario, la Evapotranspiración acumulada, el día juliano, la evapotranspiración del día.

Cve	TMax	TMed	TMin	Etc	Kc	etcacum	idia	Ev	Fecha
86	24.3	14.38	8.9	0.3002	0.2	0.3002	46	1.9	15/02/2000
87	24.2	15.01	8.1	0.316	0.2	0.6162	47	2	16/02/2000
88	24.7	15.76	10.4	0.3476	0.2	0.9638	48	2.2	17/02/2000
89	24.6	14.7	9.1	0.24648	0.2	1.21028	49	1.56	18/02/2000
90	25.6	14.47	7.7	0.2528	0.2	1.46308	50	1.6	19/02/2000
91	24.2	14	7.3	0.2528	0.2	1.71588	51	1.6	20/02/2000
92	21.2	13.97	8.3	0.1422	0.2	1.85808	52	0.9	21/02/2000
93	21.2	15.61	12.4	0.2844	0.2	2.14248	53	1.8	22/02/2000
94	20.7	14.55	10.6	0.2054	0.2	2.34788	54	1.3	23/02/2000
95	19.6	14.13	10.3	0.316	0.2	2.66388	55	2	24/02/2000
96	22.3	15.4	9.9	0.237	0.2	2.90088	56	1.5	25/02/2000
97	22.1	14.42	9.5	0.237	0.2	3.13788	57	1.5	26/02/2000
98	23	14.3	8.4	0.237	0.2	3.37488	58	1.5	27/02/2000
99	22.4	14.61	9.5	0.237	0.2	3.61188	59	1.5	28/02/2000
100	20	13.83	9.9	0.1264	0.2	3.73828	60	0.8	29/02/2000
101	23.2	15.4	10	0.3318	0.2	4.07008	61	2.1	01/03/2000
102	21.9	15.42	9.6	0.3476	0.2	4.41768	62	2.2	02/03/2000
103	22.7	14.28	8.6	0.4108	0.2	4.82848	63	2.6	03/03/2000
104	23.4	15.08	9.7	0.4108	0.2	5.23928	64	2.6	04/03/2000
105	23.6	15.81	9.8	0.4108	0.2	5.65008	65	2.6	05/03/2000
106	23.3	15.91	11	0.3792	0.2	6.02928	66	2.4	06/03/2000
107	22	14.8	9.7	0.2528	0.2	6.28208	67	1.6	07/03/2000
108	21.8	14.6	10.1	0.2688	0.2	6.55088	68	1.7	08/03/2000
109	23	14.96	8.8	0.2844	0.2	6.83508	69	1.8	09/03/2000
110	25.9	16.14	9.3	0.3476	0.2	7.18288	70	2.2	10/03/2000
111	25	17.2	11.4	0.3476	0.2	7.53028	71	2.2	11/03/2000
112	24.7	16.64	11.8	0.3476	0.2	7.87768	72	2.2	12/03/2000
113	22	15.34	10.4	0.2688	0.2	8.14548	73	1.7	13/03/2000
114	23.3	15.52	10.4	0.3476	0.2	8.49408	74	2.2	14/03/2000
115	23.7	15.85	9.6	0.3634	0.2	8.85748	75	2.3	15/03/2000
116	22.6	15.91	10.5	0.3318	0.2	9.18928	76	2.1	16/03/2000
117	21.9	14.68	10.2	0.237	0.2	9.42628	77	1.5	17/03/2000
118	22.3	14.78	9.6	0.262376028	0.2075760068	9.6886560728	78	1.6	18/03/2000
119	20.4	14.38	9.5	0.2791956390	0.2208826258	9.9678517118	79	1.6	19/03/2000

Figura 8. Registros diarios de un Ciclo.

De igual forma en la tabla "RiegosDiarios" (Figura 9), se almacenan los resultados de las ecuaciones aplicadas en los cálculos de: Intervalo de Tiempo entre Riego, Calculo de Drenaje, el error obtenido del drenaje obtenido con relación al drenaje objetivo, la suma de tiempos y la suma de errores utilizados en el control derivativo e integral, el incremento del tiempo para el siguiente riego y el intervalo final para el comienzo del próximo riego, la hora de inicio en decimal para el momento del día y tomar la radiación correspondiente, Clave del día al que corresponden los riegos y el error cuadrático.

Cve	Tiempo	Drenaje	Error	STiempo	SErro	Proporcional	Integral	Derivativo	IncTiempo	Intervalo	HoraInicio	ClaveDia	ErrorCuad
316	25.5594657	0.238622011	0.0398622011	65.82694496	0.259034887	1.1958876200	1.9035180548	-0.067194961	3.0322107363	28.58868384	0.203572454	156	0.0015959035
317	28.58868384	0.1587635725	-0.041216428	71.756484311	0.2751900126	-1.284932626	1.9175271423	-0.01586283	0.6651714860	29.25377687	0.6801444971	156	0.0016987939
318	29.25377687	0.1527768717	-0.047223128	83.398776911	-0.048576635	-1.416883695	-0.291231038	-0.001050541	-1.70875489	27.544801381	1.1678049575	156	0.0022302338
319	27.544801381	0.2437840873	0.0437840873	85.387183634	0.044865469	1.3135226176	-0.261488122	0.0155547805	1.067588276	28.612386657	1.6288767966	156	0.0019170463
320	28.612386657	0.2600315652	0.0600315652	96.410969800	0.0619592541	1.9509489555	0.3605666562	0.0039698844	2.3153699056	30.927760162	2.1038453486	156	0.0042291045

Figura 9. Registros de los Riegos dados por el controlador a lo largo del Ciclo.

Al mismo tiempo se generan los siguientes reportes:

En el libro de Excel se crea una hoja llamada Ciclo1 (Figura 10), son la información de la tabla ciclo, y pueda ser manipulada con las herramientas que proporciona Microsoft Office Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Fecha	Día Juliano	Temperatura a Máxima	Temperatura a Mínima	Temperatura a Media	Evapotranspiración	Kc	ETc	ET Acumulada
1	36609	84	23	10.1	16.13	2.2	0.31622745	0.54960331	12.5284211
2	36610	85	23.7	10.5	16.58	2.2	0.3352696	0.58269856	13.1111197
3	36611	86	23.8	10.5	16.34	2.4	0.35444584	0.67202932	13.783149
4	36612	87	24.2	10.1	15.99	2.1	0.37362209	0.61983905	14.4029881
5	36613	88	23.9	10.2	16.09	2.6	0.39253014	0.8062569	15.209245
6	36614	89	20.1	10.4	14.39	1.4	0.4066106	0.44971132	15.6589563
7	36615	90	23.7	9.5	15.64	1.9	0.42433535	0.63692737	16.2958836
8	36616	91	22.2	10.4	15.79	2.2	0.44123191	0.76686105	17.0627447
9	36617	92	24.6	10.5	17.14	2.2	0.46148095	0.80205389	17.8647986
10	36618	93	20.7	12.8	15.37	2.2	0.4795844	0.83351768	18.6983163
11	36619	94	15.5	11.2	12.71	1.5	0.48856907	0.57696435	19.2772706
12	36620	95	19.5	10.6	14.24	3.1	0.50211313	1.22967506	20.5069457
13	36621	96	20.9	8.3	14.1	2.8	0.51475787	1.13664442	21.6455901
14	36622	97	22.5	10.3	15.81	3.2	0.53192262	1.34447004	22.9902905
15	36623	98	23.3	10.6	17.56	2.37	0.55056247	1.03081812	24.0211086
16	36624	99	23.8	12.8	17.26	2.37	0.57282301	1.07249652	25.0936051
17	36625	100	23.2	12.8	16.88	2.37	0.59427895	1.11266847	26.2062376
18	36626	101	23.6	13.5	17.26	3.6	0.61720998	1.75534519	27.9616188
19	36627	102	22.5	10.2	16.07	3.1	0.63424063	1.55325531	29.5148741
20	36628	103	23.2	8.8	15.41	2.9	0.65048669	1.49021918	31.0050933
21	36629	104	22.8	8.8	15.59	2.8	0.66616017	1.4735463	32.4786396
22	36630	105	21.4	11.9	16.66	2.65	0.68399542	1.43194442	33.910584
23	36631	106	24.8	11.8	18.94	2.65	0.70625596	1.47854685	35.3891308
24	36632	107	20.9	12.5	15.55	2.6	0.72422531	1.48755878	36.8766896
25	36633	108	24.2	9.4	16.23	3.1	0.74249547	1.81837141	38.695601
26	36634	109	22.9	10.2	16.17	3.1	0.76006252	1.86139312	40.5564541
27	36635	110	28.7	11.2	19.14	3.1	0.78674835	1.9267467	42.4832008
28	36636	111	28.1	13.8	19.9	3.7	0.81611616	2.38550755	44.8687084
29	36637	112	28.8	11.7	19.44	3.7	0.84360658	2.46586205	47.3345704
30	36638	113	25.9	12.3	18.86	3.7	0.86801271	2.53720117	49.8717716

Figura 10. Hola Ciclo1 del libro de Excel.

También la hoja llamada "Datos Día" (Figura 11), que contiene la información resultante del proceso de simulación de los riegos a través del algoritmo de control PID.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Tiempo	Drenaje	Error	Suma de Tiempos	Suma de Errores	Proporción	Integral	Derivativo	Incremento de Tiempo	Intervalo	Hora Inicio	Día
1	120	0.43877456	0.23877456	120	0.2387746	7.1632368	0.994994	0	8.158130795	128.1581308	-1.9996	124
2	128.15813	0.129793249	-0.07020675	248.1581308	0.1685678	-2.1062025	0.3396379	-0.0128742	-1.77943886	126.3786919	0.136796	124
3	126.37869	0.164079582	-0.03592042	374.5368227	0.1326474	-1.0776125	0.1770819	0.0013377	-0.89919296	125.479499	2.2435288	124
4	124.4795	0.165441972	-0.03455803	380.0163217	-0.1406852	-1.0367408	-0.1851041	5.39E-05	-1.22179108	124.2577079	-3.9448772	125
5	130.04668	0.387485907	0.187485907	376.1158988	0.1170075	5.6245772	0.1555471	0.0088478	5.788972107	130.04668	-1.8735012	125
6	130.04668	0.055191235	-0.14480876	379.7838869	0.0081191	-4.3442629	0.0106891	-0.0133712	-4.346945	125.699735	0.2943769	125
7	125.69973	0.137822	-0.062178	380.0041229	-0.0195009	-1.86534	-0.0256587	0.003177	-1.88782177	123.8119132	2.3897915	125
8	123.81191	0.119653551	-0.08034645	379.5583282	-0.2873332	-2.4103935	-0.37851	-0.0007227	-2.78962612	121.0222871	-3.8430628	126
9	121.02229	0.294181292	0.094181292	370.5339353	-0.0483432	2.8254388	-0.0652345	0.0070481	2.767252402	123.7895395	-1.8256213	126
10	123.78954	0	-0.21076344	368.6237399	-0.1969286	-6.3229031	-0.2671133	-0.0125987	-6.60261511	117.1869244	0.2379503	126
11	117.18692	0.025281114	-0.17471889	361.998751	-0.291301	-5.2415666	-0.4023509	0.0014559	-5.64246157	111.5444628	2.1914563	126
12	111.54446	0.406993222	0.206993222	352.5209268	-0.1784891	6.2097967	-0.253161	0.0162865	5.972922124	117.517385	0.0509025	126
13	117.51738	0.093351671	-0.10664633	346.2487722	-0.074374	-3.1994499	-0.1073996	-0.014059	-3.32090856	114.1964764	-2.3032404	127
14	114.19648	0.16621848	-0.03378152	343.2583242	0.0665634	-1.0134456	0.0969581	0.0031003	-0.9133872	113.2830892	-0.9995851	127
15	113.28309	0.112636582	-0.08736342	344.9869506	-0.2277933	-2.6209025	-0.3301381	-0.002346	-2.95338666	110.3297025	1.4868944	127
16	110.3297	0.334620927	0.134620927	337.8092681	0.013476	-4.0386278	0.0199462	0.0097978	4.06837117	114.3960743	3.3280401	127
17	114.39607	0.072058506	-0.12794149	338.010866	-0.080684	-3.8932447	-0.1193512	-0.011899	-3.9684949	110.4235794	-3.1116	128
18	110.42358	0.093159747	-0.10684025	335.1563561	-0.1001608	-3.2052076	-0.149424	0.0009223	-3.35370932	107.07487	-1.2707555	128
19	107.07487	0	-0.23574508	331.9015236	-0.4705268	-7.0723504	-0.708835	-0.0058366	-7.787004	99.28784603	0.5141825	128
20	99.287846	0	-0.21625864	316.7912954	-0.5588844	-6.4877593	-0.8820381	0.0009099	-7.36888745	91.9185857	2.1693109	128
21	91.91859	0.331982805	0.131982805	298.2816746	-0.3200209	3.9594841	-0.5364408	0.017537	3.440580297	95.35953887	3.7016	128
22	95.359539	0.325394315	0.125394315	286.5663435	0.0411185	3.7618295	0.0717434	-0.0003584	3.833214456	99.19275333	-3.0887446	129
23	99.192753	0.550894429	0.350894429	286.4712508	0.6082715	10.526833	1.0616625	0.0118237	11.60031901	110.7930723	-1.4352014	129
24	110.79307	0.375130564	0.175130564	305.3453645	0.6514193	5.2539169	1.0666926	-0.0088597	6.311749858	117.1048222	0.4117191	129
25	117.10482	0.384983054	0.184983054	327.0906479	0.711008	5.5494916	1.088867	0.0004446	6.636803218	123.7416254	2.3638565	129

Figura 11. Hola Datos Día del libro de Excel.

En la hoja de cálculo del simulador, se despliega la información que se muestra en la siguiente figura 12, que es la descripción de los riegos que se darían cada día.

Fecha	Día Juliano	Temperatura a Máxima	Temperatura a Mínima	Temperatura a Media	Evapotranspiración	Kc	ETc	ET Acumulad		
36609	84	23	10.1	16.13		2.2	0.316227453	0.549603314	12.52842112	
Tiempo	Drenaje	Error	Suma de Tiempos	Suma de Errores	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento de Tiempos	Intervalo	Hora Inicio
120	0.43977456	0.23877456	120	0.23877456	7.163236795	0.994933999	0	0.159100795	123.1591008	-1.9396
123.1591308	0.129793249	-0.070206751	248.1591308	0.168567609	-2.106202531	0.339637892	-0.012874221	-1.77943886	126.3786919	0.1368
126.3786919	0.164079582	-0.035920418	374.5368227	0.132647391	-1.077612526	0.177081909	0.001337657	-0.89919236	125.479499	2.24353
Fecha	Día Juliano	Temperatura a Máxima	Temperatura a Mínima	Temperatura a Media	Evapotranspiración	Kc	ETc	ET Acumulad		
36610	85	23.7	10.5	16.58		2.2	0.335269599	0.582696563	13.1111969	
Tiempo	Drenaje	Error	Suma de Tiempos	Suma de Errores	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento de Tiempos	Intervalo	Hora Inicio
125.479499	0.165441972	-0.034559028	390.0163217	-0.140685196	-1.036740931	-0.18510415	5.3901E-05	-1.22179108	124.2577079	-3.9449
124.2577079	0.387485907	0.187485907	376.1158988	0.117007462	5.624577207	0.155547083	0.008947817	5.789972107	130.04668	-1.8735
130.04668	0.055191235	-0.144808765	379.7838969	0.00811915	-4.344262937	0.010689125	-0.013371189	-4.346945	125.639735	0.29438
125.639735	0.137822	-0.062178	380.0041229	-0.019500957	-1.865339967	-0.025658744	0.003176366	-1.88782177	123.811912	2.38979
Fecha	Día Juliano	Temperatura a Máxima	Temperatura a Mínima	Temperatura a Media	Evapotranspiración	Kc	ETc	ET Acumulad		
36611	86	23.8	10.5	16.34		2.4	0.354445844	0.672029321	13.78314901	
Tiempo	Drenaje	Error	Suma de Tiempos	Suma de Errores	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento de Tiempos	Intervalo	Hora Inicio
123.811912	0.119653551	-0.080346449	379.5563282	-0.287333213	-2.410393472	-0.378509957	-0.000722632	-2.78962612	121.0222871	-3.8431
121.0222871	0.294181292	0.094181292	370.8333053	-0.048343167	2.825438754	-0.085244453	0.0070481	2.767252402	123.7895395	-1.8256
123.7895395	0	-0.210783437	368.6237399	-0.196928595	-6.322903125	-0.267113283	-0.012598701	-6.60261511	117.1869244	0.23795
117.1869244	0.025281114	-0.174718886	361.998751	-0.291301032	-5.241566575	-0.402350879	0.00445558	-5.64246157	115.5444628	2.1946
115.5444628	0.406993222	0.206993222	352.5209268	-0.178489101	6.209796662	-0.253161001	0.016286463	5.972922124	117.517385	4.0509
Fecha	Día Juliano	Temperatura a Máxima	Temperatura a Mínima	Temperatura a Media	Evapotranspiración	Kc	ETc	ET Acumulad		
36612	87	24.2	10.1	15.99		2.1	0.373622089	0.619839046	14.40298805	

Figura 12. Riegos de cada Día.

Con los datos obtenidos se genero la siguiente interpretación de los datos:

La grafica que se muestra en la figura 13 muestra los drenajes registrados, donde el promedio del total de los riegos fue de 21%, pero el comportamiento a lo largo del ciclo se dio en torno a los 15 y 30% excepto en los comienzos del día ya que por la tarde y al inicio del día la acumulación de radiación es muy poca y por lo tanto el calculo de consumo o de evapotranspiración es bajo por parte del cultivo y se observa el incremento de drenaje por encima del 80%.

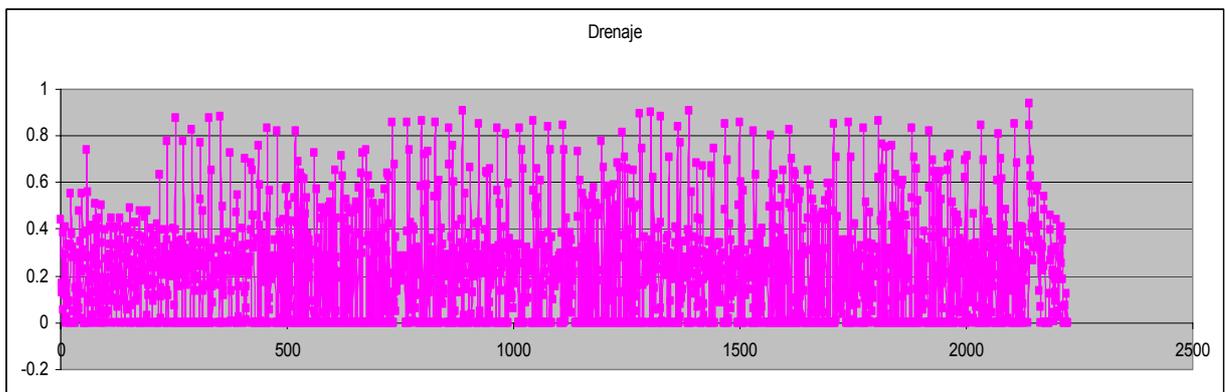


Figura 13. Drenajes Registrados en el Ciclo.

Los errores registrados con relación al drenaje que se planteo como objetivo alcanzar se muestran en la figura 14 en la que se ve mas claro las oscilaciones del controlador, debido a los drenajes registrados en las ultimas y primeras horas del día, a pesar de esa situación el promedio de error a la largo del ciclo es fue de -0.06% y la mayoría de los valores registrados se mantuvieron en los rangos de -2 a 2%.

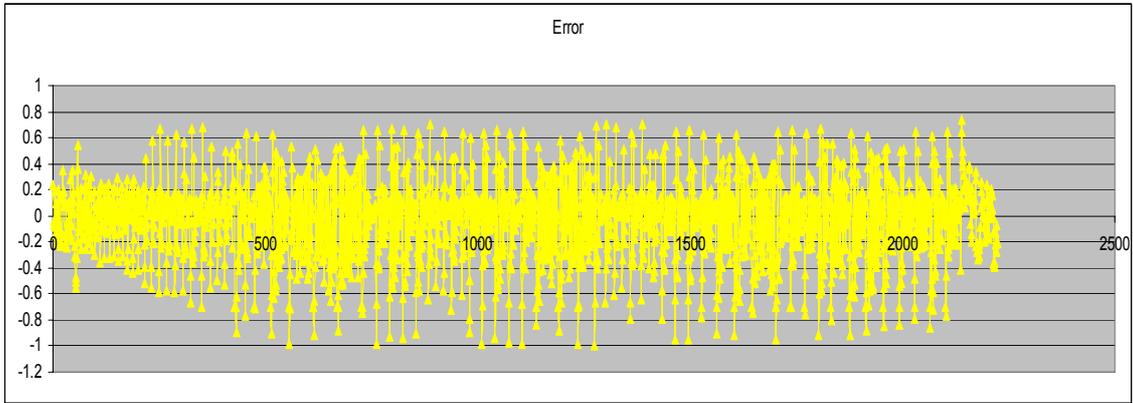


Figura 14. Errores de drenaje en relación con el drenaje objetivo registrados en el Ciclo.

Los intervalos de tiempo (Figura 15) en cada etapa del desarrollo del cultivo, fueron congruentes de acuerdo a la experiencia de autores con relación al manejo de riego para el cultivo del tomate, comenzando con intervalos largos al inicio del cultivo, al consumir poca agua y al final del cultivo de igual forma en los últimos días del cultivo, el promedio del intervalo obtenido fue de 31 minutos.

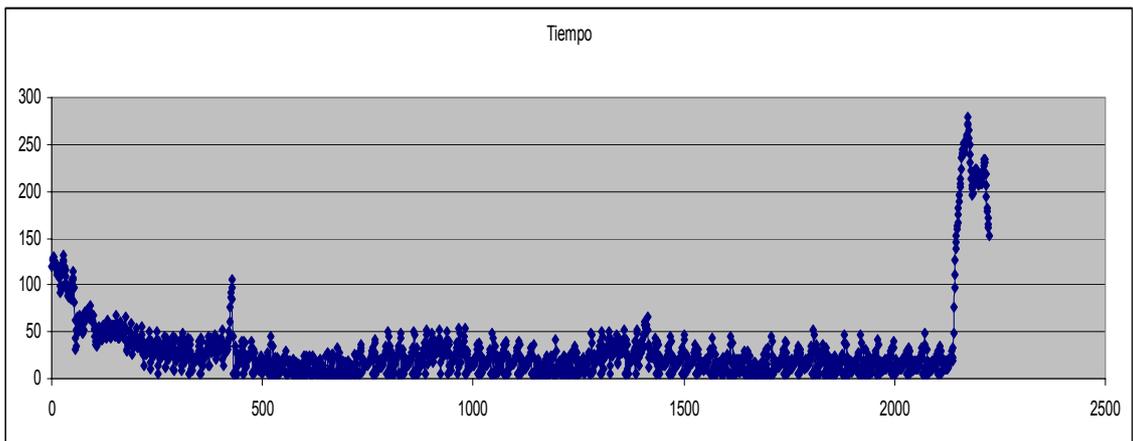


Figura 15. Intervalos de tiempo registrados en el Ciclo.

El comportamiento de la parte proporcional del algoritmo de control PID fue el que se muestra en la figura 16 donde el promedio de afectación al los intervalos fue de -2 minutos, teniendo un valor máximo positivo de 21 minutos y negativo de 52 minutos, estas respuestas se dieron en proporción a los errores que se obtuvieron en cada uno de los riegos.

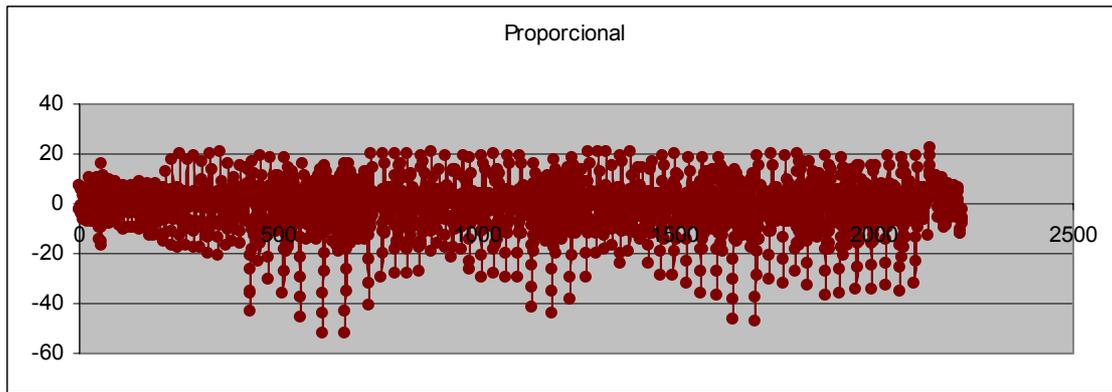


Figura 16. Parte Proporcional del PID.

La parte integral se comporto tal y como lo muestra la figura 17 de una forma mas agresiva, ya que fue el factor que se le dio mayor peso, con la finalidad de estabilizar el controlador con mayor rapidez y disminuir el tiempo de permanencia del error, el valor maximo en incremento al intervalo fue de 25 minutos y la disminucion a los intervalos máxima fue de 119 minutos, obteniendo un promedio de afectación en disminucion del intervalo de 2 minutos.

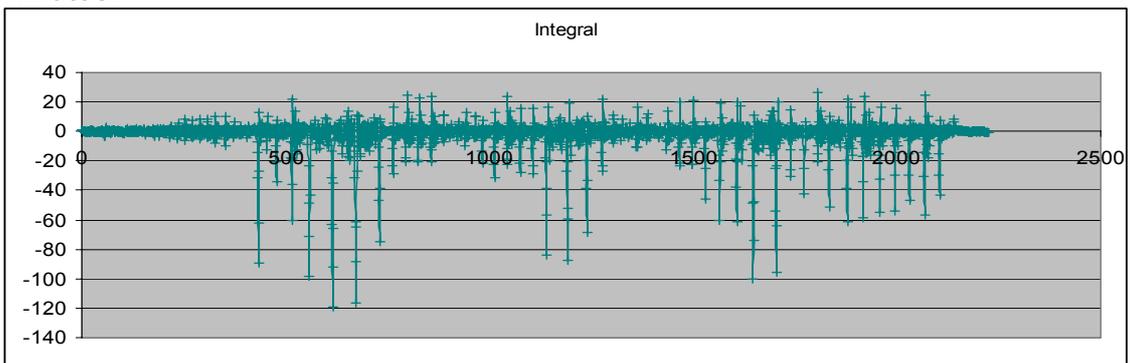


Figura 17. Parte Integral del PID.

El Derivativo del algoritmo fue el factor que menos peso se le dio, de acuerdo a la optimización que se implemento, y su comportamiento a lo largo del ciclo fue como lo muestra la figura 18 donde los valores máximos negativos como positivos oscilaron en un minuto con un promedio de afectación al intervalo a lo largo del ciclo de 0.005 minutos.

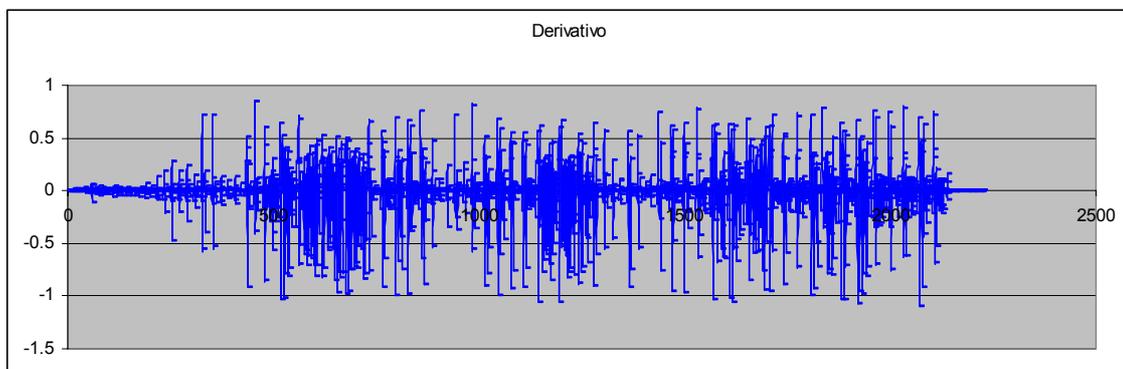


Figura 18. Parte Derivativa del PID.

## 5. CONCLUSION.

En base a los resultados obtenidos se pudo observar que el algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo (PID) utilizado en procesos industriales, puede implementarse en el control de procesos de producción en el área agronómica, mediante su incorporación al control del riego parte fundamental de la producción hidropónica.

El algoritmo de control PID implementado en el método de riego de la bandeja a la demanda midiendo el drenaje generado en cada riego, puede determinar el intervalo de tiempo entre riegos, con la finalidad de que este sea el adecuado para saturar el medio de cultivo y generar el porcentaje de drenaje que se establece como consigna.

Se pudo observar que el algoritmo muestra una serie de inconsistencias (oscilaciones al término del día de riego y al comienzo del siguiente), debido por diversos factores (poca, casi nula radiación al término del día y a las primeras horas de la mañana, por lo que se generaba mucho drenaje en el último y primer riego) que para el desarrollo de este trabajo no fueron contemplados para no alterar el comportamiento del algoritmo, pero que deben de tomarse en cuenta para que permitan una reacción más rápida a una situación donde los drenajes sean abundantes o viceversa momentos donde no se estén registrando drenajes, para lo cual se pueden realizar las siguientes acciones:

Integrar una variable de control donde se le asigne la mitad del tiempo total del intervalo, y en ese momento se monitoree el comportamiento del drenaje, y esto permita realizar una de las siguientes tres acciones: dejar que se cumpla el total del intervalo cuando los valores resultantes tengan consistencia con lo esperado finalmente; recortar el intervalo de tiempo e incluso dar un riego de emergencia, cuando los valores de drenaje no existan o estén muy por debajo de lo esperado, ó alargar el intervalo tiempo cuando los valores de drenaje en ese tiempo ya estén cerca del valor esperado o bien ya haya sobrepasado la consigna.

Aplicar un tratamiento especial a los dos momentos en los que la planta no consume nutrientes, al atardecer y a las primeras horas del día, para evitar drenajes muy elevados, ya que en los resultados se pudo observar que el controlador provoca fuertes oscilaciones al registrarse valores elevados de drenaje por lo que el controlador actúa drásticamente, y con ello se da un desequilibrio, teniendo que estabilizarse en los primeros riegos de cada día.

Asegurar que en cada riego que se aplique, se sature el 100% el medio de cultivo independientemente de que se provoque drenaje ó no, con ello evitar situaciones de estrés a la planta, y causar baja en los rendimientos y calidad en la producción.

Si bien los resultados no son completamente satisfactorios se acercan bastante a los niveles de drenaje que se estableció como objetivo, por lo que aplicar las

acciones antes mencionadas y contemplar otras variables en el control, asegurarían el buen funcionamiento del algoritmo de control PID.

La conductividad eléctrica es una de las variables que permitiría tomar mejores decisiones de riego con el método de la bandeja ya que hasta el momento con las bandejas tradicionales no se tiene un parámetro que permita conocer el estado agronómico de la planta, mediante la manipulación de esta variable se lograrán obtener mejores resultados en cuanto a calidad de frutos se refiere.

Al igual que la medición del pH, ayudaría a que las decisiones del riego fueran más acordes a la situación real del cultivo, ya que niveles de acidez o de alcalinidad afectan el crecimiento y desarrollo de la planta.

La implementación del algoritmo de control PID en el método de riego de la bandeja a la demanda puede contribuir con el aumento de la Calidad, Rendimientos y Sanidad del cultivo a lo largo del ciclo, al proporcionar la disponibilidad de nutrientes en el medio de cultivo necesarios para el buen crecimiento de este y con ello propiciar las condiciones ideales para su desarrollo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

Adams, P. (1991). Effects of diurnal fluctuations in humidity on the accumulation of nutrients in the leaves of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *J. Hort. Sci.*, 66:545-550.

Al-Harbi, A. R. (1995). Growth and nutrient composition of tomato and cucumber seedlings as effected by sodium chloride salinity and supplemental calcium. *Journal of plant Nutrition*. 18:1403-1416.

Alarcon, J.J.; Sánchez-Blanco, M.J.; Bolarin, M.C.; Torrecillas, A. (1994). «Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars during and after saline stress». *Plant and Soil*, 166:75-82.

Alarcón, A.L.; Moreno, J. F. El riego a la demanda, Dpto. Producción Agraria. ETSIA. UPCT y CIFACITA S. L. ETIFA S. L.

Alarcón, J. J.; Sánchez –Blanco, M. J.; Bolarin, M. C. Torrecillas, A. (1994). Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars Turing and after saline stress. *Plant and soil*. 166:75-82.

Ayers, R.S.; Westcot, D. W. (1988). La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje. 29 I. Roma. Baille, M.; Baille, A.; Delmon, D. (1994a). Microclimate and transpiration of greenhouse rasecrops. *Agric. Forest. Meteorol.*, 71 :83-97.

Baille, M. Baille, A.; Delmon, D. (1994a). Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agric. Forest. Meteorol.*, 71:83-97

Baille, M.; Laury, J.C.; Baille, A. (1992). Some comparative results on evapotranspiration of greenhouse ornamental crops, using lysimeter, greenhouse H<sub>2</sub>O balance and LVDT sensors. *Acta Horticulturae*, 304:199-208.

Boyer, J. S. (1985). Water transport. *Annual review of plant physiology*. 36:473-516.

Burés, S. (1999). Introducción a los sustratos: aspectos generales. pp. 19-46. In: Tecnología de sustratos: aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal. J.N. Pastor S. (ed.). Universidad de Lleida. España.

Caballero, M.; Cid, M. C.; Díaz, M. A.; Mansito, P. (1997). Cultivo sin suelo de rosas de invernadero para flor cortada. Fundamentos de aplicación al cultivo hidropónico. En: A. Delfin (Ed) Hidroponia, Universidad Agraria La Molina, Lima Perú pp 219-231.

Castilla, N. (2005), Invernaderos de Plástico Tecnología y Manejo, Ediciones Mundi-Prensa, pp 270-344

Cockshull, K. E. (1998). Plant responses and adaptation to water issues in the greenhouse environment. *Acta horticulturae* 458:201-206.

DR CALDERON LABS, (2005), Manual de Operación y Garantía de la Bandeja a la Demanda, Producto Ref DRC 00500.

M<sup>a</sup> D. Fernández, M. D.; Orgaz, F.; Fereres, E. López, J. C.; Céspedes, A.; Pérez, J.; Bonachela, S.; Gallardo, M. (2001). Programación del Riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Caja Mar, Almería, España. pp 1-71

Fourcard, J.C. (1997). Viveros de ka producción a la plantación. Ed. Mundi-Prensa. 439 págs.

Ganmore Neumann, R. Kafkafi, U. (1980). Root temperature and percentage  $\text{NO}_3/\text{NO}_4^+$  effect on tomato development II. Nutrients composition of tomato plant. Agronomy Journal, 72:762-766.

Gislerord, H.R.,y Adams, P. (1983). Diurnal variations in the oxygen content and acid requeriment of recirculating nutrient solution and in the uptake of water and potassium by cucumber andtomato plants Sciencia Hortic., 21 :311-321.

González-Real, M. (1997). Necesidades hídricas y gestión del riego por inmersión y goteo En: A. Delfin (Ed.), Hidroponía, Universidad Agraria La Molina, Lima Perú pp 155-169

Hurewits, J.; Maleta, M.; Janes, H. W. (1984). The effect of root zone heating at normal and cool air tempetatures on growth and photosynthetic rates of tomatoes. Acta horticulturae 148:871-876.

Nelder, J.A.; Mead, R. (19965) Método Nelder-Mead, Computer Journal, vol 7, pp 308-313

Narciso, J. (1999). Use of Growing Mediums in the Nursery Production TERRA VOLUMEN 17 NUMERO 3, pp 232

Moreno J. (2003). El riego a la demanda en cultivos hidropónicos, Novedades Agrícolas, Dpto. de Formación, HORTICULTURA 168.

Moreno, J.; Pérez, M. D.; Moral, R. (1996). Análisis y calidad del agua de riego. Servicios de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Kramer, P.J. (1949). Root resistance asa cause to decreased water absorption by plants at low temperatures. Plant Physiology. 15:63-79.

Salas, M. C.; Urrestarazu, M.(2001). Técnicas de fertirrigación en cultivo sin suelo. Universidad de Almería, Almería (España), 276p.

Maruo, T.; Ito, T.; Shinohara, Y. (1995). Feasible method for measuring water uptake rates of vegetables in rockwool and NFT culture. Acta horticulturae 396:83-90.

Michelot, P.; Lora, B. (1993). Informe de Actividades de 1992. Ed. CEPEM.

Nederhoff, E. M. (1994). Effects of CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production on greenhouse fruit vegetables crops. Tesis doctoral. Aula van de Landbouwniversiteit te Wageningen.

Penningsfeld, F.; Kurzmann, P. (1983). cultivos Hidropónicos y en Turba. 2.<sup>a</sup> ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 343 Págs.

Rodríguez, F.; Berenguel, M. (2004); Control y robótica en agricultura; Monografías de Ciencia y Tecnología; Servicio de publicaciones de la Universidad de Almería; Almería (España); 433 pp.

Sánchez, M.C.; Portero, F.; Medrano, E.; Lorenzo, P. (1998). Efecto del enriquecimiento carbónico sobre la producción y eficiencia hídrica en cultivo de pepino. Acta horticultura 21:83-90.

Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). Systems simulation: the art and science. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 6(10). pp. 723-724.

Sheen, T. F.; Hsu, M. M. (1996). Studies on nutrient uptake by greenhouse muskmelon in hydroponics. En ISOSC Proceedings. pp 491-503.

Soria, T.; Cuartero, J. (1998) Tomato fruit yield and water consumption with salty water irrigation. Acta horticulturae 458:215-220.

Stanghellini C. Van Meurs, W.T.M.; Cover, F.J.M.; Van Dullemen, E.; Simose, L. (1998). Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. II Yield quantity and quality. Acta horticulturae 458:231-238.

Stanghellini C. Van Meurs, W.T.M.; Simose, L. y Van Galen, J. (1998). Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. I Vegetative growth Acta horticulturae 458:231-238.

Strasburger, E.; Noll, F.; Schenck, H.; Schimper, A.F.W.; Von Denffer, D.; Ehrendorfer, F.; Bresinsky, A.; Ziegler, H. (1986). Tratado de Botánica. 7<sup>a</sup>. ed. Editorial Marín S.A., Barcelona. 1.098 Págs.

Sutcliffe, J. (1984). Las plantas y el agua. Ediciones omega, Barcelona, España. 91 pp.

Tachibana, S. (1991). Import of calcium by tomato fruit in relation to the day-night periodicity. Scientia Hort., 45:235-243

Urrestarazu, M.; Salas M.C. (2002). El papel de los cultivos sin suelo en la moderna agronomía. Vida Rural, 145:54-58.

Urrestarazu, M. (2004), Tratado de Cultivos Sin Suelo, Ediciones Mundi-Prensa, pp. 159-523

West, D. W. ; Taylor, J. A. (1980). The effect of temperature on salt uptake by tomato plants with diurnal and nocturnal water logging of salinized root zones. *Plant and Soil*, 56:113-121.

Yamasaki, K.; Sasaki, Y.; Shinohara, Y. (1976). Studies on water culture of several vegetables with special reference to control of nutrient solution and ratio of nutrient absorption per water consumption. *Memoris*

Zabri, A. W.; Burrage, S. W. (1998). The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO<sub>2</sub> on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) of sweet pepper (*Capsicum annuum* L) grown by NFT. *Acta horticulturae* 458:351-356.