

00362



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

UN ESTUDIO BIOFÍSICO DEL CONSUMO DE AGUA
EN VEGETALES

T E S I S PRESENTADO POR:

**FIS. JOSE SAMUEL MERAZ MARTINEZ
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. LUIS FERNANDO MAGAÑA SOLIS**





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

AGRADECIMIENTOS

A la U N A M

Al **Dr. Luis Fernando Magaña Solis** por su apoyo y valiosa dirección en el desarrollo del presente trabajo.

A los doctores:

Achim M. Loske Mehling del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada

Enrique Camarillo García del Instituto de Física

Juan Ortega Blake del Centro de Ciencias Físicas

Victor L. Barradas Miranda del Instituto de Ecología

Marco Antonio José Valenzuela del Instituto de Investigaciones Biomédicas

Martha Rosete Aguilar del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Por el tiempo dedicado a la revisión así como por sus acertadas observaciones que enriquecieron el presente trabajo.

Al compañero y amigo **Francisco Fernández Escobar**, por compartir sus conocimientos, experiencias y su amistad durante la realización de este trabajo.

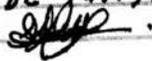
Y a las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización del presente trabajo.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JOSE SAMUEL

MERAZ MARTINEZ

FECHA: 24 DE MAYO DEL 2004

FIRMA: 

UN ESTUDIO BIOFÍSICO DEL CONSUMO DE AGUA EN VEGETALES

ÍNDICE

Resumen

Introducción

Capitulo

I	Conductividad de electrolíticos	2
II	Procesos del ascenso de agua en los vegetales	9
III	Nuevo método para el seguimiento del consumo de agua en vegetales	17
IV	Automatización del riego	33
V	Resultados	43
	Conclusiones	46
	Bibliografía	47
	Glosario	49

RESUMEN

Se presenta un nuevo método de medición y evaluación "in situ" de propiedades biofísicas de vegetales, que permite evaluar los efectos causados por variaciones de parámetros fisicoquímicos ambientales, tales como humedad, temperatura e intensidad luminosa en el consumo de agua por un vegetal. El método permitirá un conocimiento más amplio del proceso biofísico de absorción de agua y sales minerales disueltas en ella, por los vegetales, para cualquier estado de desarrollo de la planta.

Este estudio comprende desde la selección del modelo biológico, la cuantificación de índices de germinación y sobrevivencia en cultivos de laboratorio, el consumo de soluciones nutrientes y el control automatizado de riego en los sustratos de siembra. Se eligió como modelo biológico al frijol variedad N66 (*Phaseolus vulgaris*).

El método propuesto y desarrollado, consiste en medir coeficientes de resistividad y/o resistencia eléctrica en el vegetal, utilizando como medio de estímulo señales de corriente alterna de amplitud constante (40 mV) y corriente baja (1 μ A pico), con frecuencia variable en el intervalo de 1 kHz. a 10 kHz.; "inyectadas" en los tallos mediante electrodos de plata clorurada (AgAgCl) de 0.2 mm de diámetro.

Se reportan los resultados de cada etapa desarrollada, y se analiza la resistividad eléctrica que presentan los tallos en función de los parámetros ambientales mencionados, donde se incluyen las condiciones bajo las cuales existen comportamientos óhmicos.

Los resultados obtenidos permitirán optimizar el riego. Así mismo permitirá el monitoreo del efecto de diferentes parámetros fisicoquímicos, como temperatura, luz, pH, estrés hídrico etc., que lleven a entender mejor la interacción de los vegetales con su medio ambiente.

Introducción

El hombre, desde que descubrió la agricultura y la ganadería, pasando de la vida nómada a la vida sedentaria, se ha preocupado por preservar y mejorar su alimentación descubriendo métodos e inventando técnicas -la mayoría de las veces en forma empírica-, que han permitido aprovechar lo mejor posible los recursos naturales. La humanidad tiene cada vez más la necesidad de aumentar sus recursos alimentarios, y en los últimos años, preservando el equilibrio ecológico.

Se pueden mencionar las técnicas de selección y/o combinación de especímenes para reproducción y propagación posterior, las de abono en terrenos de cultivo y engorda de ganado, para los cultivos de riego, pastoreo y almacenamiento del producto alimenticio, que surgen en respuesta a condiciones desfavorables del medio ambiente durante largos períodos, entre otros.

El eslabón primario de la cadena alimenticia son los vegetales, su explotación adecuada ha permitido y permitirá al hombre su sobrevivencia. Cada sociedad en el mundo, tiene un conjunto de recursos vegetales según el medio donde se ha desarrollado. En los países latinoamericanos y particularmente en México, la base de alimentación ha sido el maíz y el frijol, desde los indígenas de Mesoamérica (5000 años AC), hasta la actualidad.

Investigaciones recientes realizadas en diversas áreas científicas, se han encaminado para entender los procesos fisiológicos involucrados en los vegetales, con la finalidad de incrementar y mejorar la producción.

Es un hecho de que muchas cosechas se pierden en épocas de sequía, y que aún cuando el agricultor puede disponer de agua para riego, muchas veces se da cuenta muy tarde de tal necesidad, -cuando el vegetal está sometido a un estrés hídrico-, y no siempre conoce la dosis mínima necesaria para que el cultivo sobreviva al estrés, inclusive los transgénicos diseñados para soportar períodos prolongados de sequía, llegarán irremediablemente a un estrés hídrico por falta de agua.

México por su geografía, presenta grandes zonas agrícolas de temporal, que impiden el desarrollo de cultivos intensivos que hagan competitiva a la agricultura con respecto a la de países avanzados.

Estudios como el presente trabajo, van encaminados a cuantificar y optimizar el consumo de agua de los vegetales y los factores que influyen en él (23), lo que permitirá detectar la humedad mínima de supervivencia en el sustrato que lleve a la optimización del agua disponible para riego, y permitirán apoyar al agricultor cuando el recurso es escaso en épocas de estiaje.

Como el trabajo aborda cuerpos de conocimiento que son de la competencia de la Química y la Biología; se pretende que también sea un material de utilidad para los estudiosos de estas disciplinas, y para dilucidar confusión en algunos términos se incluye un glosario.

Capítulo I

La conductividad de electrólitos

Los electrólitos conducen la corriente eléctrica por el transporte de iones, en contraste con los conductores electrónicos o semiconductores tipo n en los cuales los electrones son los portadores de carga o semiconductores tipo p en los que los “hoyos” (positivos) predominantemente transportan la corriente; ambos signos de portadores corren simultáneamente en varias sustancias (2). Estos signos corresponden a electrones e iones negativos y también iones positivos.

La conducción electrolítica a menudo es acompañada por la transferencia de masa, así como de carga a través de la interfase electrodo-electrólito con la formación o descarga de iones en los electrodos (usualmente metálicos). Los iones masivos, no los electrones deslocalizados se desplazan a través de todo el volumen del medio, bajo la influencia de un campo eléctrico, generalmente a velocidades *cinco órdenes* de magnitud más pequeñas que las velocidades del electrón en un conductor. Esas distinciones dictan diferencias en los métodos de medida. La baja inercia de los electrones en un metal permite medidas de resistencia con corriente alterna o directa.

La obtención del valor de la resistencia óhmica de un conductor electrolítico es complejo por la variedad de fenómenos químicos y físicos que ocurren en los electrodos, y que deben ser separados de las caídas de voltaje asociadas con el flujo de iones a través del volumen del electrólito (3). Asociar una resistencia óhmica o por consiguiente una conductividad a un electrólito, se puede hacer experimentalmente sobre un intervalo apreciable de frecuencias para una amplia variedad de electrólitos (4).

La corriente ocurre a través de todo el electrólito por el movimiento de los cationes hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Las fuerzas de frenamiento dependientes de la velocidad se oponen a las fuerzas de aceleración del campo eléctrico, y dan como resultado una velocidad de deriva constante bajo la acción de un campo. El flujo de corriente está acompañado por disipación de energía en forma de calor, dado que los iones ejercen fuerzas de fricción en su movimiento a través del medio, mientras que la carga de la doble capa en los electrodos tiende a almacenar la energía eléctrica, mas que a disiparla.

Teoría de la conductividad de electrólitos fuertes

En el fenómeno de la conducción eléctrica, se considera un desplazamiento de carga neta e^- que se desplaza por el efecto de un campo eléctrico E a una velocidad de arrastre promedio v , por un conductor de sección transversal A , por lo cual el portador se desplaza una distancia $x = v dt$ en un diferencial de tiempo dt .

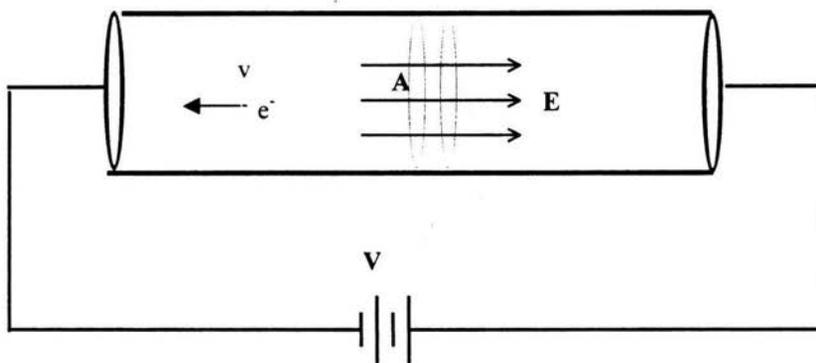


Figura.1.1- Esquema de la corriente establecida a través de un conductor sujeto a un voltaje.

La aplicación de una diferencia de potencial V entre los extremos de un conductor de sección transversal A , genera un campo eléctrico E que produce el movimiento de cargas (e^-) en el sentido opuesto a la dirección del campo, al considerar un diferencial de tiempo dt , la corriente eléctrica (I) generada en el conductor, estará representada por

$$I = dQ / dt$$

Dado una concentración de N portadores de carga eléctrica por m^3 , en el volumen $Avdt$ habrá $NAvdt$ portadores, y para una diferencial de carga dQ se tendrá

$$dQ = N e^- Avdt$$

donde considerando a la carga fundamental $e^- = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb, I quedará dada por

$$I = N e^- v A. \quad (1.1)$$

Si en lugar de I , se toma la densidad de corriente $J = I / A$,

$$J = N e^- v \quad (1.2)$$

Dependiendo del material, los portadores de carga se mueven bajo cierta velocidad v en respuesta a un campo eléctrico de magnitud E , ambas relacionados a través de la movilidad μ

$$v = \mu E \quad (1.3)$$

Considerando (1.2) y (1.3)

$$J = Ne\bar{\mu}E$$

$$J = kE \quad (1.4)$$

donde se define la conductividad $k = Ne\bar{\mu}$ y la resistividad $\rho = k^{-1}$

En disoluciones electrolíticas, la corriente es la suma de las corrientes transportadas por los iones individuales. Cuando la fuerza de fricción debida a la viscosidad equilibra la fuerza del campo eléctrico, los iones ya no se aceleran y se desplazan a una velocidad constante v , denominada *velocidad de conducción*, que se alcanza en tiempos del orden de 10^{-13} segundos, para fines prácticos de forma instantánea.

Suponiendo que hay N^+ iones positivos, es decir cationes, con carga q^+ en la disolución; en el tiempo dt los cationes recorren una distancia $v^+ dt$. Todos los cationes dentro de esta distancia, medida desde el electrodo negativo, alcanzarán este electrodo en el tiempo dt . El número de cationes a esta distancia del electrodo es $(v^+ dt/l)N^+$, donde l es la separación entre los electrodos. La carga positiva dQ^+ que cruza un plano paralelo a los electrodos en el tiempo dt es, por lo tanto, $dQ = (q^+ v^+ N^+ /l)dt$. La densidad de corriente J^+ debida a los cationes es $J^+ \equiv I^+/A = A^{-1} dQ^+/dt$, por lo tanto

$$J^+ = q^+ v^+ N^+ /V \quad (1.5)$$

donde $V = Al$ es el volumen de la disolución. Igualmente, los iones con carga negativa, es decir aniones, contribuyen con una densidad de corriente $J^- = q^- v^- N^- /V$, donde v^+ y v^- se consideran positivas. En donde se tiene $q^+ N^+ /V = q^+ N_A n^+ / V = Fc^+$, n^+ es el número de moles del catión Z^+ en la disolución y $c^+ = n^+ /V$ es la concentración molar de Z^+ . Por lo tanto, $J^+ = q^+ Fv^+ c^+$. Asimismo, $J^- = |q^-|Fv^- c^-$ y la densidad de corriente J observada es

$$J = J^+ + J^- = q^+ Fv^+ c^+ + |q^-|Fv^- c^- \quad (1.6)$$

Si están presentes varios tipos de iones en la disolución, la densidad de corriente J_a debida al ion a y la densidad de corriente J total son

$$J_a = |q_a| Fv_a c_a \quad y \quad J = \sum_a J_a = \sum_a |q_a| Fv_a c_a \quad (1.7)$$

La densidad de corriente de a , J_a es proporcional a la carga molar $q_a F$, a la velocidad de arrastre v_a y a la concentración c_a . La velocidad de arrastre v_a de un ion depende de la

fuerza del campo eléctrico, del ion, del disolvente, de la temperatura, de la presión, y de la concentración de todos los iones en la disolución.

Puesto que $J = kE$, la conductividad de una solución electrolítica es

$$k = \sum_a |q_a| F v_a c_a / E = \sum_a k_a \quad (1.8)$$

donde k_a es la contribución del ion a , a la conductividad.

Dado que la masa de un ion es del orden de 10^4 veces la masa electrónica, los efectos mecánico cuánticos tales como intercambio, deslocalización y efecto túnel son mucho menores para iones que para electrones. La conducción electrolítica a menudo es acompañada por la transferencia de masa, así como de carga a través de la interfase electrodo-electrólito con la formación o descarga de iones en los electrodos (usualmente metálicos). Los iones masivos, se mueven a través de todo el volumen del medio, bajo la influencia de un campo eléctrico, generalmente a velocidades cinco órdenes de magnitud más pequeñas que las velocidades del electrón. Esas distinciones dictan diferencias en los métodos de medida. Así la baja inercia de los electrones en un metal permiten medidas de resistencia con corriente alterna o directa y demostración rápida de la "ley de Ohm" ($V = IR$).

Para muchas sustancias k es independiente de la magnitud del campo eléctrico aplicado E y por lo tanto independiente de la densidad de corriente J ; se dice que tales sustancias obedecen la "ley de Ohm" y una representación de J vs E da una línea recta con pendiente k . Los metales obedecen la "ley de Ohm", las disoluciones de electrólitos también, con la condición de que E no sea extremadamente alto y se mantengan las condiciones de estado estacionario. Como ejemplos comparativos de valores de k , para diferentes sustancias: metal Cobre (Cu) = 6×10^5 S cm⁻¹, solución de un electrólito fuerte [KCl] 1M = 0.1 S cm⁻¹, semiconductor CuO = 10^{-5} S cm⁻¹ y un cristal 10^{-14} S cm⁻¹.

La conductividad (o conductancia específica), κ , de un material se define como la conductancia (reciproco de la resistencia) de un cubo de 1 cm de lado, suponiendo que la corriente es perpendicular a dos caras opuestas del cubo. Ya que ello depende parcialmente del número de portadores de carga, un indicador mas útil de la naturaleza de las interacciones de los constituyentes con el medio, es la conductancia por unidad de concentración de portadores de carga, o conductancia equivalente $\Lambda = \kappa / c$; donde c es la concentración en equivalentes por cm³ (1000 veces la normalidad) (4). Combinados con densidades, pesos moleculares y números de transferencia (fracciones de la corriente transportada por los varios constituyentes), la conductividad proporciona así las velocidades relativas de los constituyentes iónicos bajo la influencia de un campo eléctrico. Las movilidades (velocidad por unidad de campo eléctrico, cm² s⁻¹ volt⁻¹) varían con la naturaleza de los constituyentes, concentración en la mezcla, temperatura, medio y otros factores.

En soluciones acuosas diluidas de electrolitos disociados las movilidades iónicas varían poco con la concentración, y la conductancia equivalente, al despreciar la concentración electrolítica ésta puede ser expresada como la suma de conductancias equivalentes independientes de los iones constituyentes. En concentraciones finitas las fuerzas inter iónicas generalmente son menores que las movilidades, y la dependencia de la concentración (o conductancia equivalente) ha sido una investigación clásica de la intensidad de las interacciones iónicas (1). En solventes disociados, tales como sales fundidas, el concepto de movilidades iónicas independientes puede ser significativo para iones diluidos en el soluto no comunes al solvente, pero no para iones del solvente por su proximidad mutua. La conductancia equivalente y las movilidades en mezclas y su dependencia con la temperatura, son importantes en teorías de transporte en líquidos (5).

Algunos de los fenómenos más importantes asociados con la aplicación de un voltaje entre electrodos inmersos en un electrolito líquido, se indican en la figura 1.2, para un sistema idealizado en el cual se asume el posible aislamiento de varios fenómenos.

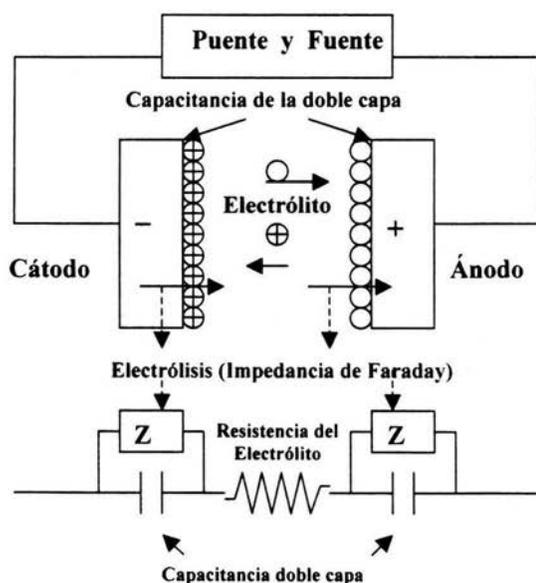


Figura 1.2. Celda de conductancia. Representación esquemática simplificada de la doble capa en los electrodos, procesos de electrólisis, migración de iones a través del volumen del electrolito y esquema del circuito eléctrico equivalente de la celda de conductividad, mostrando la impedancia Z de los procesos faradaicos.

Capacitancia de la doble capa

Un electrodo positivamente cargado adquiere una capa de iones negativos (y un electrodo negativo una capa de iones positivos). Con el incremento de la distancia desde un electrodo cargado su efecto de orientación sobre los iones de la solución viene a ser rápidamente más difuso debido al desorden térmico (movimiento Browniano) (6)

La doble capa se conforma por las cargas eléctricas del electrodo y los iones del electrolito de carga opuesta, adjuntos en la solución (o separados por una capa de moléculas del solvente) que constituyen un capacitor eléctrico, capaz de almacenar energía. Si un voltaje constante suficientemente bajo se aplica a los electrodos, virtualmente ninguna corriente fluirá más allá de la requerida inicialmente para cargar la doble capa. La estructura de la doble capa es apreciablemente más complicada que la versión idealizada de la figura 1.2, y esta influenciada por las interacciones de las moléculas polares del solvente con los iones y con las superficies del electrodo.

Cuando el voltaje aplicado a los electrodos se aumenta suficientemente, la carga acumulada en la doble capa aumenta hasta un voltaje de descomposición análogo al voltaje de ruptura de un condensador sobrecargado; la corriente entonces fluye a través de la interfase electrodo-solución, acompañada por la oxidación del electrodo positivo y la reducción del negativo. Este proceso de Faraday (electrolítico) es parcialmente un corto circuito de la doble capa, el comportamiento eléctrico es semejante a una resistencia (dependiente del voltaje) que conecta las dos placas de un capacitor.

Resistencia óhmica

La corriente pasa a través de todo el electrolito por el movimiento de los cationes hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Existen fuerzas de frenamiento dependientes de la velocidad que se oponen a las fuerzas de aceleración del campo eléctrico, y dan como resultado una velocidad de deriva constante en un campo dado. El flujo de corriente está acompañado por disipación de energía en forma de calor, dado que los iones pueden ejercer fuerzas de fricción en su movimiento a través del medio, mientras que la carga de la doble capa almacena la energía eléctrica.

Al aumentar el voltaje, la remoción faradéica de iones electroactivos cercanos al electrodo (por ejemplo los iones reducibles u oxidables en el intervalo de voltajes aplicados a los electrodos), puede ocurrir más rápido de tal forma que la difusión desde el cuerpo del electrolito es incapaz de sustituirlos. Esto puede establecer un gradiente de concentraciones entre el cuerpo del electrolito y la superficie de los electrodos, tal que la corriente pueda alcanzar un valor límite de difusión. El fenómeno de la polarización de la concentración es útil para propósitos analíticos en polarografía (7,8).

El cálculo de la resistencia óhmica del electrolito requiere no solo de la corriente, sino también del voltaje de aceleración de los iones, (no el voltaje aplicado a los

electrodos). El voltaje aplicado a los electrodos, debe también suministrar la fuerza necesaria para el trabajo eléctrico involucrado en los procesos de transporte, Faraday (oxidación-reducción), carga de la doble capa y polarización de la concentración. El problema de cuantificar la conductancia electrolítica (recíproco de la resistencia), es la eliminación o disminución de los efectos asociados con los electrodos, y esto generalmente se cumple midiendo la conductancia con corriente alterna.

Efectos de la corriente alterna

Una inversión del voltaje aplicado invierte la dirección de movimiento de los iones. Con voltaje alterno (ac) en lugar de un constante fijo (dc) aplicado a los electrodos, tendremos una corriente de iones oscilante. Pero teniendo los iones, diferentes velocidades, sus contribuciones relativas a la disipación de energía varía con la frecuencia. Conforme la frecuencia se incrementa, la polarización de la concentración puede ser reducida o eliminada. Los efectos de Faraday pueden ser eliminados en principio, ya sea reduciendo suficientemente el voltaje aplicado o empleando electrodos reversibles, electrodos donde se mantiene el equilibrio original (no polarizables).

Aunque el incremento de la frecuencia del voltaje aplicado (varios kilohertz) reduce los efectos que dificultan la medición precisa de la conductancia, el incremento desmedido de la frecuencia lleva a otros problemas. Por ejemplo, los efectos de las capacidades parásitas en los circuitos de medición aumentan, también el reacomodo de iones y de las moléculas del solvente en la vecindad de un ion móvil puede no ser suficientemente rápido, para mantenerse con la inversión periódica del campo. Así, un ion móvil, podrá estar rodeado de un medio diferente, con respecto del medio que lo rodea a una frecuencia más baja. A frecuencias comparables con el tiempo requerido para que un ion con carga opuesta a los iones circundantes se reajuste al movimiento inverso, la conductividad se incrementa por la reducción de la asimetría del medio iónico, este es el *efecto Debye-Falkenhagen*. La frecuencia crítica es del orden de 10^7 hertz, en una concentración 0.001 M de la solución, y aumenta con la concentración. Con aumentos adicionales de la frecuencia, el movimiento translacional de los iones gradualmente cesa de responder a la inversión rápida del campo eléctrico (7,8,10).

Los procesos antes mencionados deben considerarse al poner en contacto dos electrodos, en una disolución electrolítica al medir su conductividad.

En este trabajo la inserción de electrodos en el tallo de un vegetal, estará sujeto a los mismos procesos, por lo que la evaluación de la conductividad de la solución electrolítica representada por la savia del xilema, quedara sujeta a los procesos electroquímicos descritos anteriormente.

Capítulo II

Procesos del ascenso de agua en los vegetales

Los procesos biofísicos en los vegetales, que involucran al agua y su entrada por la raíz, su ascenso por el tallo y su evaporación por las hojas, son esenciales para la supervivencia de éstos y de todos los organismos que viven de los vegetales, incluyendo obviamente al ser humano.

Los procesos involucrados comienzan en la raíz, donde el agua y los nutrientes minerales en solución penetran al vegetal por un proceso osmótico a través de vasos capilares de los vellos radiculares. Continúa con el ascenso de esta solución a través del sistema vascular del tallo hasta las hojas, donde se lleva a cabo la elaboración de los nutrientes orgánicos, vía la energía brindada por la luz solar, capturada por las moléculas de clorofila en los tilacoides.

Por otro lado, el intercambio de los gases involucrados en el proceso de la fotosíntesis, se da a través de los estomas por donde entra el bióxido de carbono (CO_2) y sale oxígeno (O_2) y vapor de agua (11,12).

Posteriormente, la pérdida de agua por evaporación le permite al vegetal generar un mecanismo que funciona como “una bomba hidráulica”, que aunada a los procesos de capilaridad y ósmosis elevan el agua desde el subsuelo hasta alturas que alcanzan los 110 m como es el caso de las plantas conocidas comúnmente como secuoyas.

Además, la evaporación le permite al vegetal regular su temperatura, de otro modo se marchitaría rápidamente debido a un sobrecalentamiento al estar siempre expuesto a la radiación solar.

Teorías sobre el ascenso de agua en los vegetales

Mecanismos de cohesión para el ascenso del agua

Hay tres elementos básicos en la teoría para el ascenso de la savia: la fuerza impulsora, la hidratación (adhesión) y la cohesión del agua. La fuerza impulsora es el gradiente en los potenciales hídricos en decremento desde el subsuelo hasta la atmósfera y a través de la planta. El agua se desplaza en una vía de ascenso que va desde el subsuelo, a través de la epidermis, corteza y endodermis a los tejidos vasculares de la raíz, de donde sube por los elementos del xilema hasta las hojas, por último, pasa por los estomas a la atmósfera, por transpiración.

El sistema funciona gracias a la estructura de la vía de ascenso. Las vías de ascenso poseen diámetros relativamente pequeños y paredes gruesas que evitan el colapso de los tubos. Los bajos potenciales osmóticos de las células vivas de tallo y hojas, y las propiedades de adhesión de las paredes celulares en especial de las hojas, son muy importantes en esta estructura. La fuerza de adhesión entre las moléculas de agua y las paredes celulares se atribuye a los puentes de hidrógeno (11).

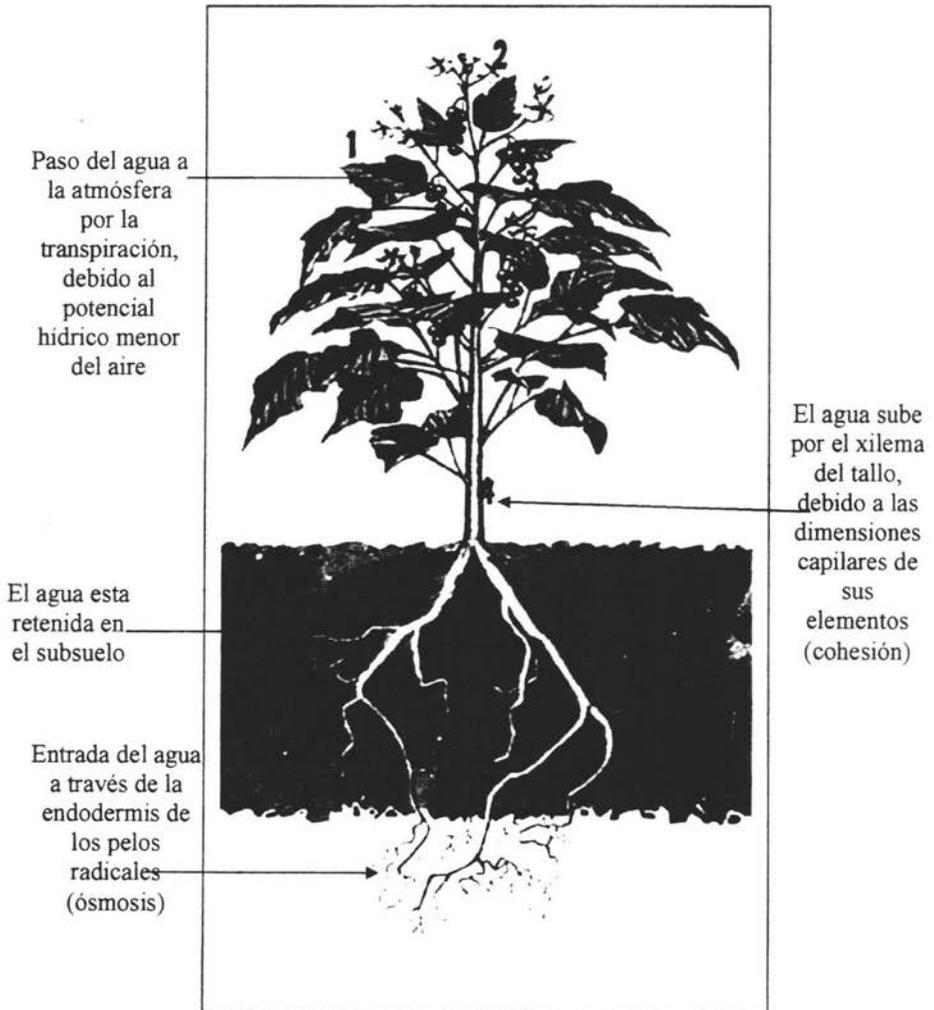


Figura 2.1- Ascenso del agua en la planta desde las raíces, la adsorben del subsuelo, hasta las hojas donde se evapora, por la acción capilar en un efecto de succión conocido como tensión de transpiración.

Las fuerzas de atracción que se dan entre las moléculas de agua (cohesión, causada también por los puentes de hidrógeno), en la ruta de ascenso es tan grande que, cuando la evaporación y ósmosis, tiran del agua en los puntos de retención de las paredes celulares en la parte superior de los árboles, la tracción se transmite por todo el trayecto hacia abajo, a través del tronco y las raíces hasta el subsuelo (11).

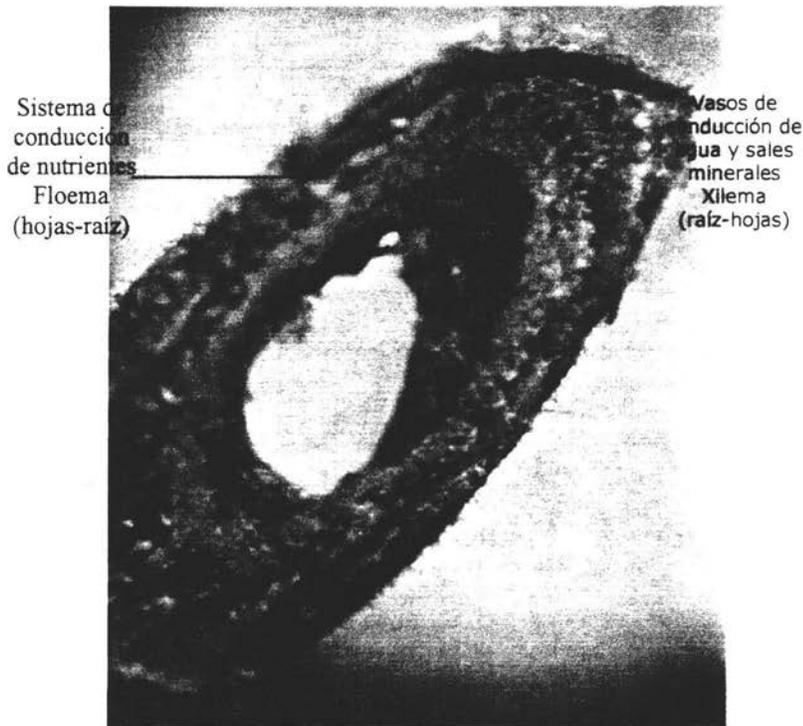


Figura 2.3.- Corte transversal del tallo de frijol mostrando la estructura del sistema hidráulico (diámetro total del tallo 4 mm)

Fuerza impulsora: Un gradiente de potencial hídrico

La fuerza impulsora de ascenso del agua es generada por la tensión superficial al evaporarse el agua en la superficie de las hojas. La tensión es transmitida a través de una columna continua de agua de la hoja al ápice de la raíz, y a través de todas partes del apoplasto a cualquier órgano de la planta. La evaporación ocurre predominantemente en la pared celular de la cámara subestomatal debido al menor potencial de agua del vapor de agua en aire. La evaporación crea una curvatura en el menisco de agua del apoplasto dentro de los poros de las microfibrillas celulósicas de la pared celular.

La conducción del agua en el xilema se hace bajo condiciones meta estables cuando la fuerza de tensión superficial P_x , es cercana a la presión de vapor del agua (P'), porque la continuidad en la columna de agua una vez rota, no puede unirse hasta que P_x ascienda a un valor por arriba de P' . Las condiciones meta estables son mantenidas por la cohesión entre las moléculas del agua y por su adhesión a las paredes conductoras del xilema. La tensión en la superficie de evaporación de las hojas (P_x negativa), es finalmente transferida a las raíces donde los menores potenciales hídricos ψ de las raíces se aproximan al potencial hídrico ψ del agua del subsuelo. Esto causa que el agua pase del subsuelo a las raíces y de las raíces a las hojas donde reemplaza al agua que se evapora.

Van den Honert en 1948, propone un análogo a la ley de Ohm para el flujo de agua en las plantas (24). El análogo a la ley de Ohm lleva a las siguientes predicciones: 1) las fuerzas de conducción de la savia ascendente decrece continuamente en P_x en la dirección del flujo de la savia, 2) la densidad del flujo de evaporación para las hojas (E), es proporcionalmente negativa al gradiente de presión ($-dP/dx$) en cualquier punto (sección transversal) a lo largo del flujo de evaporación. En cualquier punto de la raíz, tallo o vena de la hoja, lo anterior queda expresado por la ecuación

$$-dP_x/dx = AE/K_h + (\rho g dh/dx) \quad (2.1)$$

en donde A es el área de la hoja abastecida de agua por un segmento de tallo, con una conductividad hidráulica K_h , $\rho g dh/dx$ es el gradiente de potencial gravitacional, ρ es la densidad del agua, g la aceleración debida a la gravedad y dh/dx altura ganada, dh , por unidad de distancia, dx , recorrida por el agua en el segmento del tallo. En este contexto, una caída de presión finita al final del segmento del tallo de longitud L , se expresa por la ecuación

$$\Delta P_x = LAE/K_h + rg\Delta h \quad (2.2)$$

La Figura 2.4 ilustra el flujo el agua a través de una planta representada por una cadena lineal de elementos de conductancia en el centro y una cadena ramificada de conductancias en el lado izquierdo. El número y arreglo de elementos de la cadena es dictada por la precisión espacial deseada en la representación del flujo del agua a través de la planta. Una planta puede ser representada por cualquier número de elementos, de uno a cientos de elementos de conductancias. La bomba de presión de Scholander-Hammel es una de las herramientas más frecuentemente usadas para estimar P_x , (24).

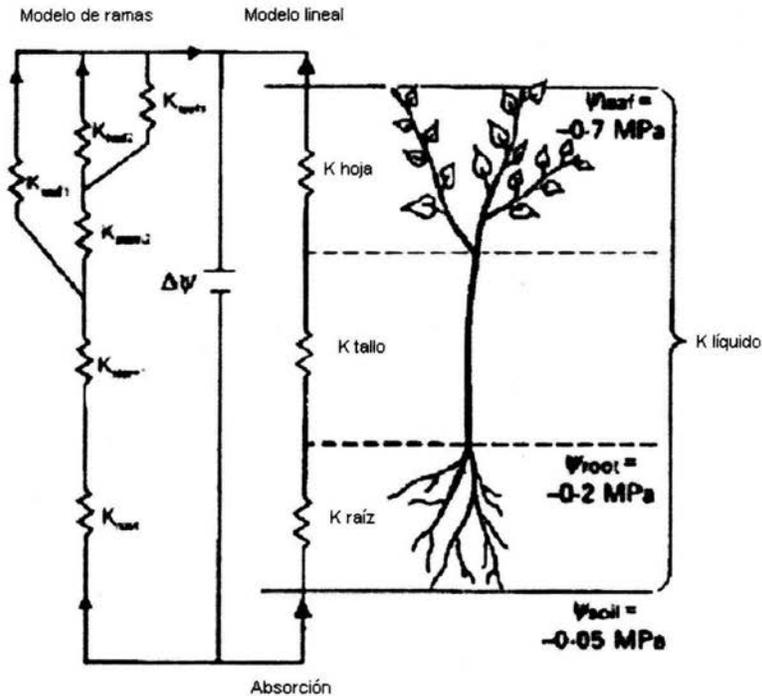


Figura 2.4 Análogo de la Ley de Ohm para el flujo de agua en las plantas de Van den Honert

Potencial hídrico

El aire seco tiene una gran capacidad para absorber vapor de agua. A medida que la humedad relativa (HR) del aire disminuye por debajo del 100 %, la afinidad del aire por el agua se incrementa notablemente. Esto debido a la rapidez en la caída del potencial hídrico (Ψ), ecuaciones 2.3 y 2.4.

Al 100 % de HR, a cualquier temperatura, Ψ del aire es igual a cero. A 20 ° C, con 98 % de HR el Ψ ha disminuido hasta -2.72 MPa, suficiente como para elevar una columna de agua hasta una altura de 277 m.

$$\Psi = -RT/V (\ln p^0/p) \quad (2.3)$$

En donde: R es la constante general del estado gaseoso, T la temperatura absoluta, V el volumen molar del agua, p^0 la presión de vapor del agua pura y p la presión de vapor del ambiente. La humedad relativa se define como el cociente p/p^0 multiplicado por 100. Tomando logaritmos decimales y valores numéricos para R y V se obtiene:

$$\Psi(\text{MPa}) = -1.06 T \log_{10} (100/\text{HR}) \quad (2.4)$$

Como el agua disponible del subsuelo se encuentra rara vez a Ψ menor que -1.5 MPa, no se requiere que el aire esté muy seco para establecer un gradiente de potencial hídrico desde el subsuelo a través de la planta, hasta la atmósfera. El potencial hídrico (Ψ) se define como el potencial químico del agua en un sistema, comparado con el potencial químico del agua pura, ambos medidos en unidades de presión [11].

En años recientes, con el uso de nuevas técnicas de investigación como por ejemplo la resonancia magnética nuclear (RMN), muestra que otras fuerzas entran en funcionamiento cuando la tensión exclusivamente no eleva el agua contra la gravedad debido a las condiciones medioambientales. La teoría de multifuerzas supera el problema de la Teoría de Cohesión de que la vida en la tierra depende del agua en un estado metastable favorable (25).

El papel de la ósmosis

La savia en el xilema, es una solución muy diluida, con potenciales osmóticos del orden de -0.1 MPa. Los potenciales osmóticos de las células vegetales suelen tener de valores comprendidos entre -0.5 a -3.0 MPa, mientras que al interior de las células vivas varían generalmente entre 0.1 a 1 MPa. La savia alcanza los tallos y hojas de las plantas, incluso si la atmósfera estuviese a un 100 % de HR. La savia es llevada hasta la parte alta de las plantas por los potenciales osmóticos muy negativos y las presiones positivas relativamente bajas en las células.

Las células en crecimiento deben competir con la transpiración por el agua que ingresa en ellas. La corriente de transpiración trae consigo grandes cantidades de nutrimentos minerales, si se encuentran disponibles en el subsuelo.

El proceso de cavitación

La cavitación es el fenómeno de ruptura del flujo continuo del agua en el xilema, a pesar de la fuerza de cohesión, lo que puede ocurrir por las fuertes tensiones que se presentan naturalmente. Al romperse la columna de agua, de inmediato se ocupa el espacio por una burbuja de aire que termina por obstruir al canal de transporte. A esto último se le denomina *embolia*. Ambos fenómenos se asocian a la ocurrencia de transpiración elevada, congelación de tejidos y la presencia de factores patógenos, específicamente hongos.

Este efecto es reversible, fundamentalmente cuando el aire vuelve a la solución, producto de un aumento en la presión del xilema hasta alcanzar la presión atmosférica. Lo anterior ocurre preferentemente de noche, cuando los poros se cierran, con la consiguiente disminución de la transpiración.

Tensión en el Xilema: cohesión

H.H. Dixon, botánico irlandés, planteó la hipótesis de que las tensiones creadas por la transpiración, la captación osmótica de agua por las células y la hidratación de las paredes celulares (cada una de las cuales extrae agua de la ruta de ascenso en la planta) son satisfechas por un movimiento ascendente del agua, en el cual las columnas de agua se mantienen unidas por cohesión. A esta teoría se le conoce como *teoría de la cohesión del agua de Dixon*. Se han desarrollado estudios para medir la resistencia tensil del agua, e incluso de savia que contiene gases y sustancias disueltas que han dado valores del orden de -10 a -30 Mpa. (11).

Métodos de medición del ascenso de agua en vegetales

Colorimétrico

Consiste en ver el ascenso de agua coloreada con un colorante aniónico, por ejemplo azul de metileno, a través del tallo de una planta; se prepara agua coloreada y un tallo largo se sumerge dentro del colorante y se corta dejando que la planta evapotranspire durante un tiempo determinado. Después de este tiempo se hacen cortes finos del tallo para ver hasta donde avanzó el agua coloreada dentro del tallo, conociendo esta distancia y el tiempo que le tomó se calcula la velocidad de ascenso del agua. Este método conlleva la destrucción de la planta sujeta a experimentación.

Potométrico

Consiste en colocar un tallo con hojas recién cortado en un dispositivo de vidrio denominado potómetro como se muestra en la figura 2.5, se hace el seguimiento de la burbuja de aire. Al evapotranspirar la planta, succionará al agua y ésta arrastrará a la burbuja de aire, midiendo el desplazamiento de la burbuja y conociendo el diámetro del tubo se sabrá cuanta agua consume la planta por unidad de tiempo. Este método también es destructivo para la planta sujeta a experimentación.

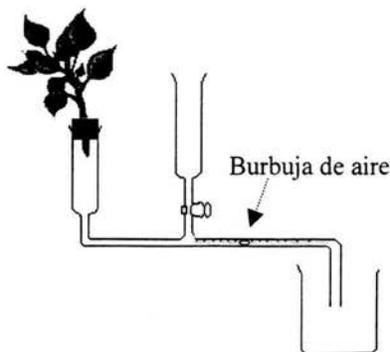


Figura 2.5 Potómetro de Ganong

Termométrico

El método consiste en “inyectar” un pulso de calor al tallo de una planta, y medir el tiempo que tarda en ser transportado por el agua que asciende a través del xilema. Para esto se introduce una punta metálica que se calienta por medio de una resistencia eléctrica, a una distancia determinada de la punta, en el tallo, se introducen un par de termopares que detectan el ascenso del pulso de temperatura, registrando el tiempo que le toma al pulso llegar a los termopares y conociendo la distancia de separación, se evalúa la velocidad de ascenso del agua en el tallo.

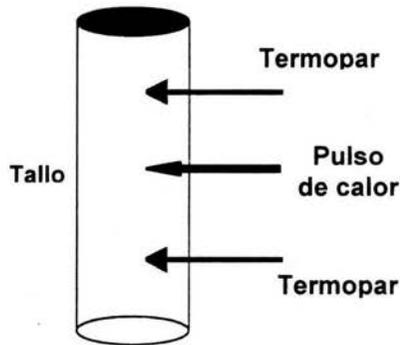


Figura 2.6 Montaje para la medición de la velocidad de ascenso del agua en un tallo por medio de un pulso térmico

Sonométrico

La ruptura de las columnas de agua con la consabida formación de burbujas de vapor y emisión de sonido, cavitación, como se comentó anteriormente está relacionada con el aumento en la transpiración de la planta, colocando micrófonos para detectar ultra sonidos y evitar el ruido ambiental, se puede cuantificar la velocidad de ascenso del agua,

Capítulo III

Nuevo método para el seguimiento del consumo de agua en vegetales

Selección del Modelo Biológico

Se desconoce el total de especies de frijol que pertenecen al género *Phaseolus*, sin embargo, algunos investigadores consideran que son alrededor de 150 especies [15], [16]. En México existen aproximadamente 50 especies, entre las cuales se encuentran: *Phaseolus vulgaris* L., *P. coccineus* L., *P. lunatus* L. y *P. acutifolius* Gray; que se consideran ya domesticadas por el hombre [17]. A su vez, cada especie puede contener múltiples formas o variedades, lo que da origen a una gran riqueza genética del género *Phaseolus* [18].

En los bancos de germoplasma del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias) y del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), se han registrado alrededor de 550 colectas de *P. vulgaris*; variedades que tienden a ser especialmente numerosas a lo largo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal [19]. Cabe mencionar que ambos sistemas montañosos son de formación relativamente reciente: oligoceno-mioceno para la primera y finales del terciario para la segunda. Esto permite suponer que la diversidad actual de *Phaseolus* se originó en el oligoceno o posteriormente [18].

Para determinar la variedad de frijol a utilizar como modelo biológico, -de entre las más de 500 que actualmente existen en el país- se eligió la característica de “negro”, por su aceptación en el Altiplano de México. El INIFAP, organismo que maneja semillas seleccionadas, recomendó y proporcionó las variedades de negro: Jamapa, Puebla, 66 y Mate, a probar en cultivos de laboratorio en el Valle de México, dada la necesidad de controlar parámetros fisicoquímicos tales como humedad, temperatura, nutrientes, luz, etc.

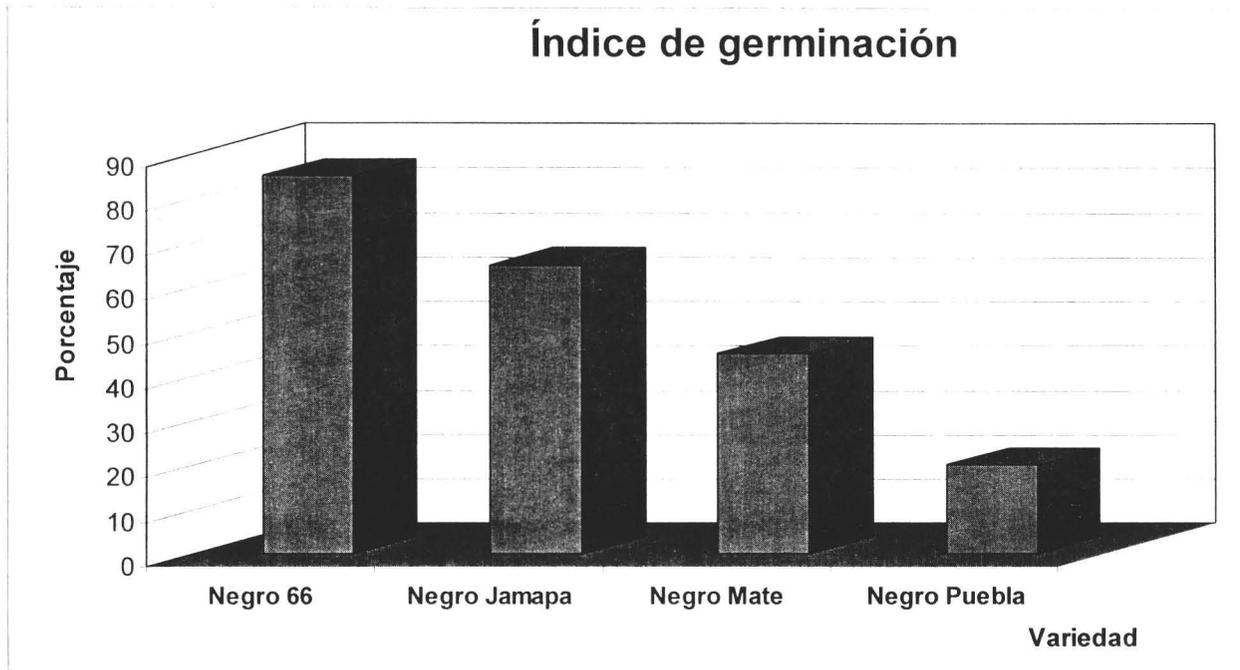
Con base en lo anterior, se sembraron 48 semillas de cada una de las cuatro variedades mencionadas, registrando en cada caso el número de semillas que germinaron. Al concluir cada frijol su germinación, éste era transplantado a cultivo hidropónico [20], para cuantificar el consumo de la solución nutriente y desarrollo diario, entre otros. Los métodos usados se describen a continuación.

Para cuantificar el índice de germinación, se utilizaron charolas de plástico, cada una de ellas con área de siembra de 660 cm² (22 X 30 cm) y conteniendo 200 g de agrolita seca, lo que proporcionó una profundidad de 2.5 cm. Se distribuyeron 6 semillas por charola, manteniendo durante tres semanas un riego constante de 200 mL de agua destilada cada tercer día, debido a las pérdidas de humedad por evaporación (figura 4.1). La luz solar, después de atravesar las ventanas de vidrio del “invernadero”, incidía directamente sobre cada charola entre las 9:00 y las 14:00 horas, con una intensidad promedio de 45 w/m². Se registraron temperaturas ambientales de 23 ± 4 °C en promedio, entre las 8:00 y las 20:00 hrs.

Los índices de germinación promedio, obtenidos para cada una de las cuatro variedades analizadas y el montaje experimental de cultivo se muestran en la gráfica 3.1 y en la figura 3.1, respectivamente.



Figura 3.1 Cultivo de las cuatro variedades de frijol en sustrato de agrolita, para evaluar índices de germinación, mostrando las diferencias entre las cuatro variedades



Gráfica 3.1 Índice de germinación de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris*.)

Para la evaluación del consumo de solución nutritiva de las cuatro variedades de frijol, se procedió a germinar simultáneamente, en condiciones semejantes, las cuatro variedades de frijol en agrolita y cuando dejaron caer sus cotiledones, se les pasó a una probeta para llevar un cultivo hidropónico, figura 3.2.

Para el cultivo hidropónico, se emplearon probetas graduadas de 50 mL de capacidad, precisión de ± 0.5 mL, como recipientes de la solución hidropónica ($[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2] = 2.75$, $[\text{KNO}_3] = 2.87$, $[\text{MgSO}_4] = 1.66$ y $[\text{KH}_2\text{PO}_4] = 0.54$ mM). Se colocó una planta por probeta, dejando además una probeta testigo para considerar las pérdidas de solución debido a la evaporación, se encontró que es despreciable la evaporación en la probeta testigo. Los resultados promedios se muestran en la gráfica 3.2.

Los resultados mostraron que la variedad con mejor respuesta al medio de cultivo usado, en lo referente a sobrevivencia y desarrollo fue la del negro 66 (N66), por lo que se eligió a ésta como modelo biológico.

Así mismo se cuantificó el contenido de agua en el tejido vegetal del modelo biológico empleado; pesando la planta recién extraída del sustrato (peso húmedo), secándola en prensas de papel y posteriormente obteniendo su peso (peso seco), la diferencia entre estos dos pesos (tabla 3.2), arroja la cantidad de agua contenida en el tejido de las plantas. De los resultados anteriores se obtuvo que el agua conforma el 89.16 % del tejido vegetal, en promedio, para el *Phaseolus vulgaris* variedad N66.

Haciendo un seguimiento particular del frijol N66, en cuanto a consumo de solución nutritiva y la altura de la planta, para utilizarlo como referencia al llevar a cabo las subsecuentes siembras, se obtuvo una relación lineal entre consumo y altura, con un coeficiente de correlación de 0.9986, según se muestra en la gráfica 3.3.

Con los índices de germinación de las cuatro variedades, germinado en el sustrato de siembra, crecimiento en el cultivo hidropónico y el consumo de agua por altura de la planta, obtenidos para las cuatro variedades, se elige como modelo biológico para llevar a cabo los estudios biofísicos a la variedad de frijol Negro 66 (N66).

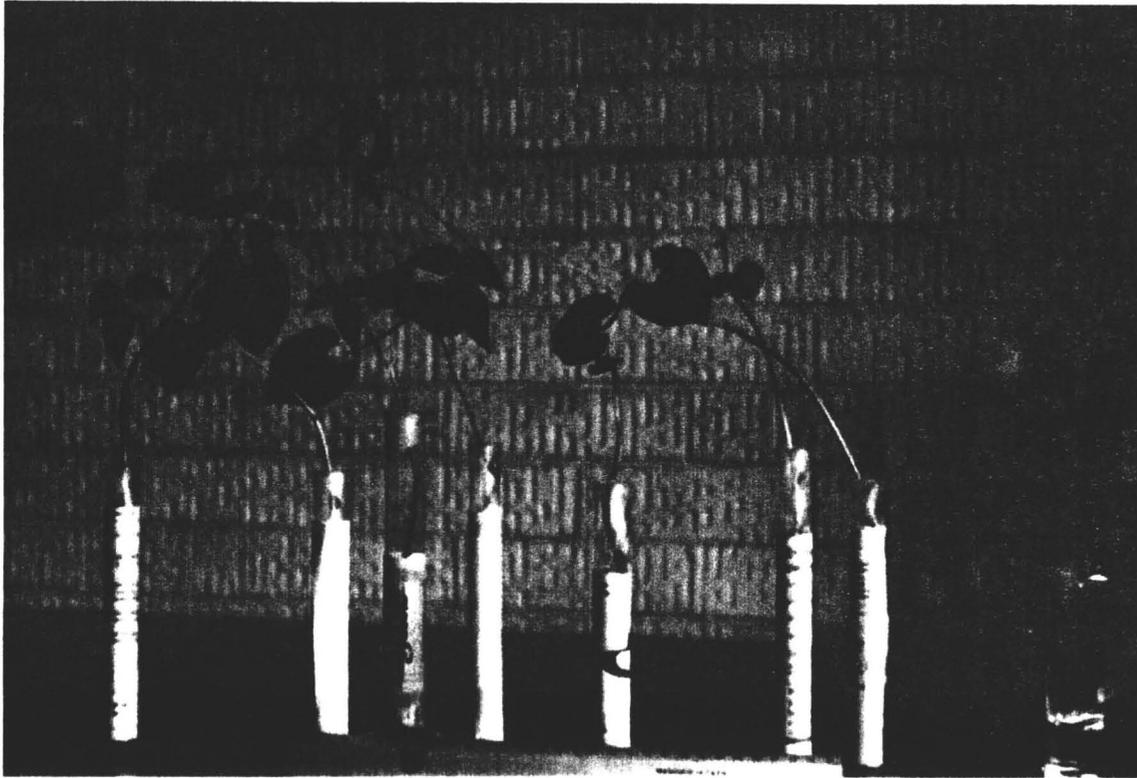
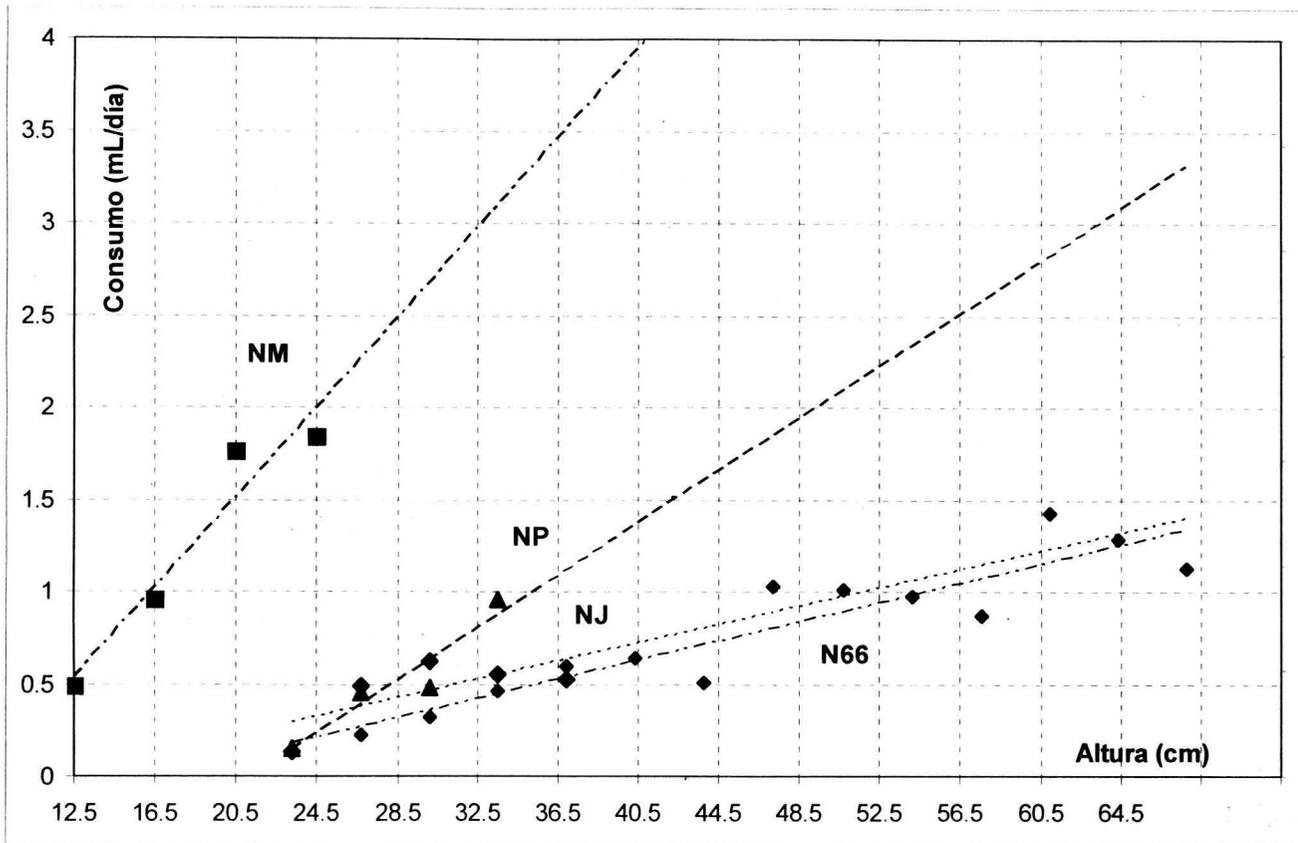


Figura 3.2 Montaje del cultivo hidropónico de las plantas de frijol, para cuantificar el consumo de solución nutritiva.



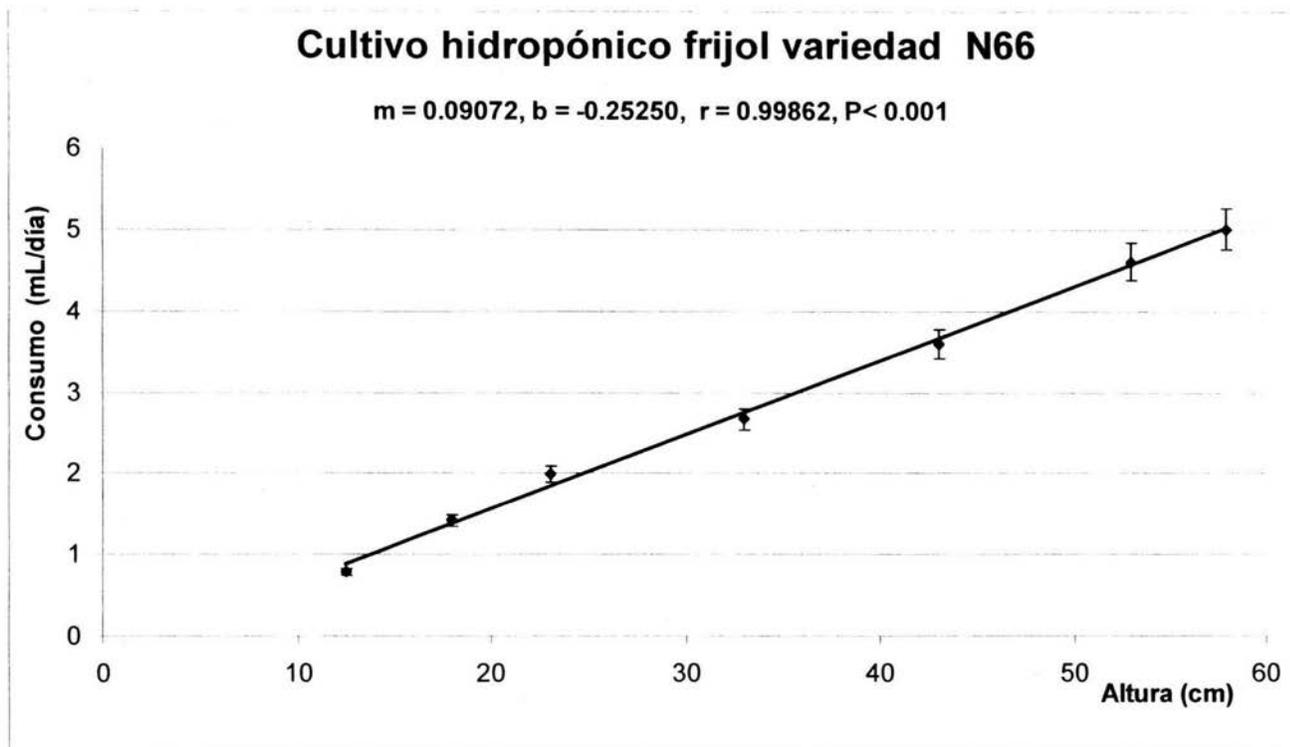
Gráfica 3.2. Consumo de solución nutritiva en cultivo hidropónico de las variedades de frijol: Jamapa (NJ), Mate (NM), Puebla (NP) y negro 66 (N66)

Planta	Altura (cm)	Peso húmedo (g) Ph	Peso seco (g) Ps	Ph – Ps (g)
1	34	2.19	0.27	1.92
2	32.3	2.63	0.26	2.37
3	29	2.26	0.28	1.98
4	30	2.5	0.25	2.25
5	32.3	2.6	0.26	2.34
Promedio	31.52	2.436	0.264	2.172
Desviación Estándar	2.0017	0.2001	0.0114	0.2084
Coefficiente de Variación %	6.3507	8.2133	4.3188	9.5948

Tabla 3.2. Contenido hídrico (Ph – Ps) de plantas de frijol N66, en relación a su Altura, Peso húmedo y Peso seco.

$$\text{Contenido hídrico porcentual (CHP)} = (\text{Ph} - \text{Ps} / \text{Ph}) \times 100$$

$$\text{CHP} = (2.172/2.436) \times 100 = 89.16 \%$$



Gráfica 3.3. Relación consumo de solución nutritiva vs altura de la planta, para la variedad de frijol N66

Planeación y diseño de un sensor de resistencia eléctrica

Estudios con Corriente Directa (DC)

Los primeros intentos por cuantificar la resistividad de la solución acuosa que asciende a través del xilema del frijol haciendo uso de corriente directa (DC), llevaron al diseño y construcción de un prototipo de óhmetro de baja corriente, al que se denominó Phaseolómetro I (figura 3.3b), pero el uso de corriente DC trajo como consecuencia la producción de reacciones electroquímicas entre los electrodos y las soluciones salinas que ascienden por el tallo del frijol, introduciendo efectos indeseables, tales como la variación de la resistencia en lapsos muy cortos (minutos), así como a la descomposición por electrólisis de cloruro de plata de los electrodos, que se deposita en las partes internas del tallo a lo largo del xilema como se puede apreciar en la figura 3.4.

En la tabla 3.3 se presentan las resistencias medidas en dos puntos de los tallos de nueve plantas, con respecto a tierra (sustrato) para verificar si guardan un “comportamiento óhmico”. Al considerar al tallo como una sucesión de resistencias en serie, la suma de la resistencias de dos segmentos contiguos, $R_1 + R_2 = R_t$, deberá ser igual a considerar solo una resistencia (R_m), así también las variaciones en el tiempo de los potenciales electroquímicos medidos en los tallos.

Estudios con Corriente Alterna (AC)

Lo anterior hizo pensar en el empleo de corriente alterna y se planteó el problema de la frecuencia a la cual debía aplicarse dicha corriente. Se usó como estímulo una señal alterna tipo seno, en modo corriente constante en amplitud ($1 \mu\text{A}$ pico); y frecuencia manualmente variable en el intervalo (0.1, 100) khz. Esto se realizó con el oscilador y el amplificador operacional TL081 mostrados en la figura 3.5 Phaseolómetro II [22, 23, 24]. Así, en la salida del operacional, el valor del voltaje pico [volts] resultó análogo a la resistencia medida [$M\Omega$], colocada como lazo de retroalimentación en el mismo.

Las otras etapas del circuito consisten en un filtro pasa-altos, para bloquear potenciales electroquímicos; un rectificador de precisión, para convertir voltaje pico a voltaje de DC promedio; y un amplificador de diferencias con ganancia unitaria para tener el voltaje de salida final con referencia al común. Evaluaciones previas en el circuito con equipos y resistencias de precisión (0.1%) simulando tallos, proporcionaron errores de no más del 2% contra valores esperados, en el intervalo $10 \text{ K}\Omega$ a $10 \text{ M}\Omega$.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.4 y en el gráfica 3.4, donde se sometieron a análisis, el comportamiento del tallo de dos plantas de frijol a los cuales se les introdujeron dos electrodos de plata clorurada de 0.1 mm de diámetro y 2 cm de longitud, a una distancia de separación promedio de $5.58 \pm 0.51 \text{ cm}$, como se muestra en la figura 3.3a.

y se midió la resistencia de éstos con respecto a la charola (Gnd) y entre sí ($e_2 - e_1$), mostrándose los cambios sufridos en la resistencia ante el riego.

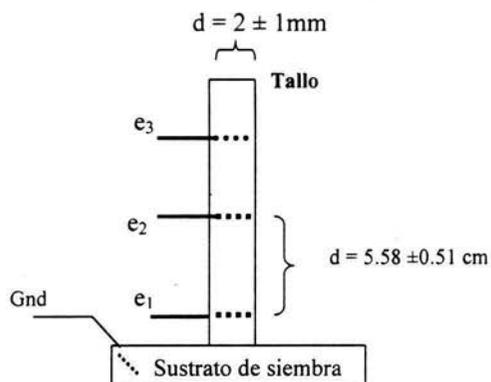
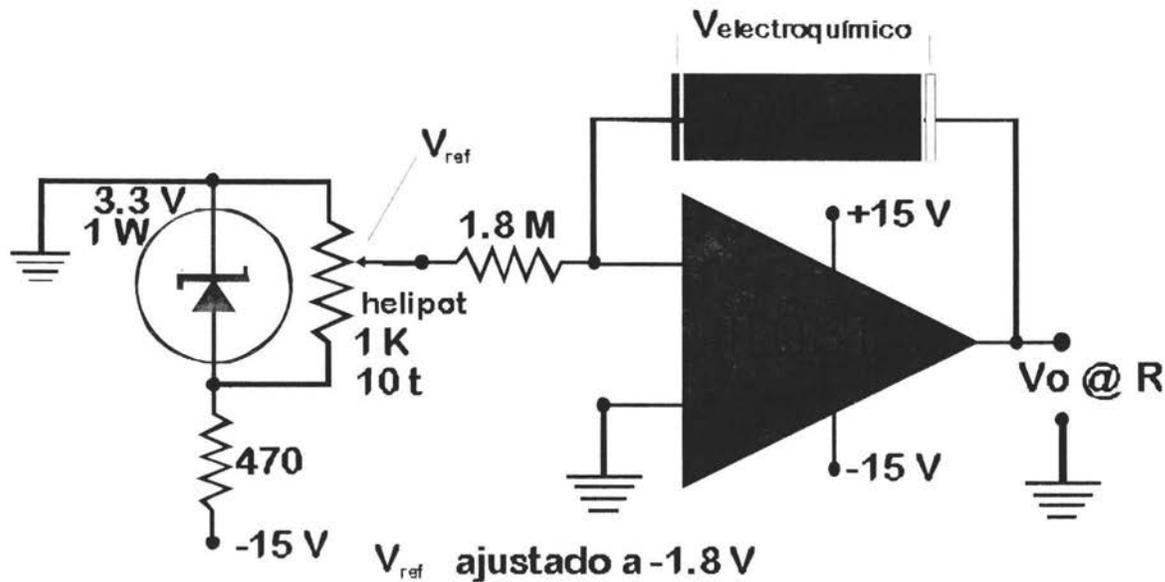


Figura 3.3a Esquema de la inserción de los electrodos en el tallo del frijol, mostrando la distancia entre electrodos de plata clorurada y el diámetro del tallo. La longitud total del electrodo es de 2 cm., su diámetro 0.1 mm y penetra todo el tallo sin atravesarlo.

Phaseolómetro I .- Óhmetro de corriente baja ($1 \mu A_{cd}$)



Fuentes de alimentación convencionales, reguladas con C. I.'s 7815

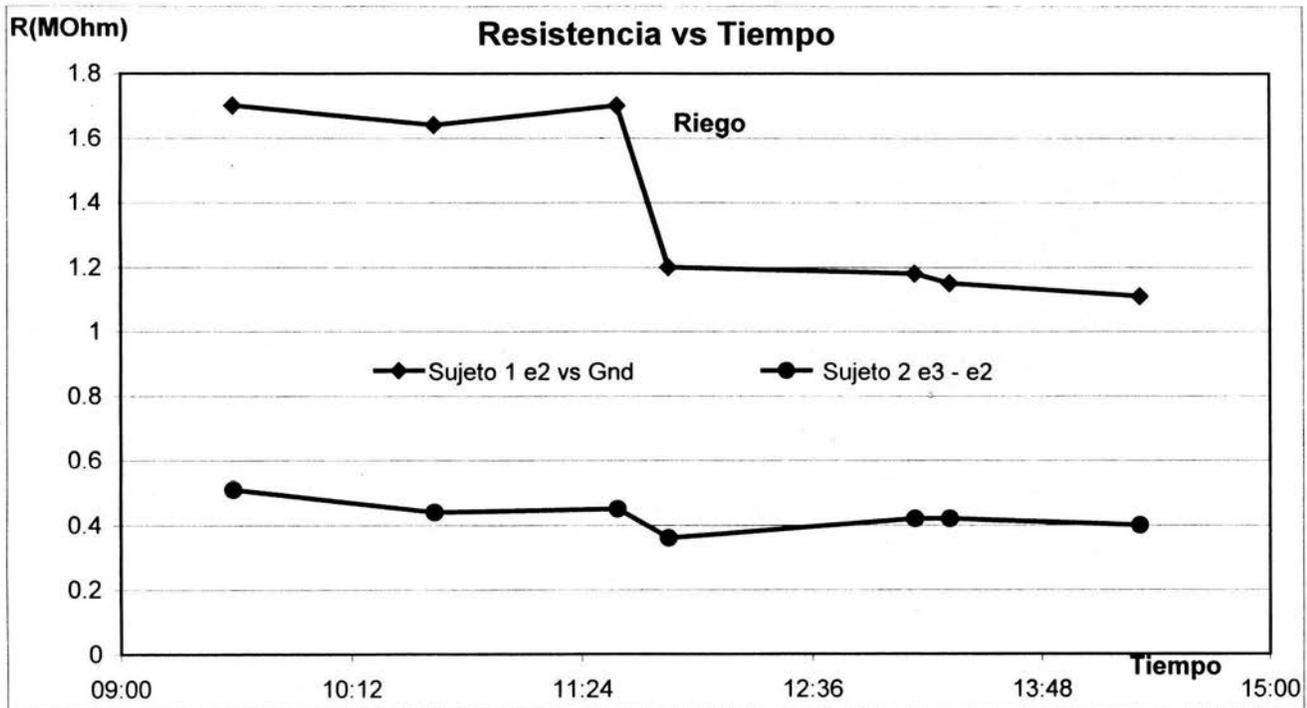
Figura 3.3b Ohmetro de baja corriente (Phaseolómetro I), se muestra el diodo rectificador y la etapa de amplificación por medio del operacional TL081

Tallo	Pruebas preliminares en 9 tallos					Observación	Potenciales electroquímicos (mV)		
	R1 (K Ω)	R2 (K Ω)	Rt (K Ω)	Rm (K Ω)	Var. (%)		Día 0	Día 2	Día 7
1	100	91	191	182	4.71		65	1	570
2	120	135	255	277	8.63	Diámetro grande	-20	17	-55
3	130	155	285	278	2.46		87	50	-52
4	160	163	323	305	5.57		70	17	-43
5	193	146	339	329	2.95		63	67	-23
6	583	362	955	816	14.55	nudo	25	63	-40
7	649	924	1573	1301	17.29	nudo	66	77	-66
8	1263	400	1663	1557	6.37	Diámetro pequeño	29	102	-42
9	1266	410	1676	1570	6.32		-30	89	-54

Tabla 3.3 Resultados preliminares, Phaseolómetro 1 (DC), medición de resistencias en dos electrodos e_1 y e_2 , separados 5 ± 0.5 cm., de 9 tallos de frijol (N66), con respecto a tierra (sustrato de siembra) R1 (e_1) y Rm (e_2), entre los electrodos R2, la suma de R1 + R2 = Rt, la variación porcentual entre Rt y Rm. También se muestra la variación en los potenciales electroquímicos medidos entre los electrodos como resultado del uso de DC que promovía reacciones electroquímicas. La diferencia entre las mediciones de los primeros tallos y los últimos se debe al diámetro que va de 3 mm en los primeros a 1.5 mm en los últimos.

Medición de la variación de la resistencia ($M\Omega$)								
Riego								
Hora		09:35	10:38	11:35	11:51	13:08	13:19	14:19
Planta 1	e_1 vs Gnd	1.7	1.64	1.7	1.2	1.18	1.15	1.11
	e_2 vs Gnd	1.97	1.85	1.88	0.92	1.32	1.31	1.26
	$e_2 - e_1$	0.27	0.21	0.18	0	0.14	0.16	0.15
Planta 2	e_1 vs Gnd	1.75	1.65	1.63	1.24	1.26	1.26	1.24
	e_2 vs Gnd	2.26	2.09	2.08	1.6	1.68	1.68	1.64
	$e_2 - e_1$	0.51	0.44	0.45	0.36	0.42	0.42	0.4

Tabla 3.4. Medición de la resistencia ($M\Omega$) en dos puntos (electrodo e_1 y electrodo e_2) de los tallos de dos plantas, utilizando AC (1KHz) (Phaseolómetro II), mostrando la caída de la resistencia, en los tallos, como resultado del riego en un lapso de tiempo no mayor a 20 minutos.



Gráfica 3.4 Medición de la resistencia presente en el tallo de dos plantas de frijol en el transcurso del tiempo real, mostrando la caída de la resistencia medida en el tallo como consecuencia del riego.

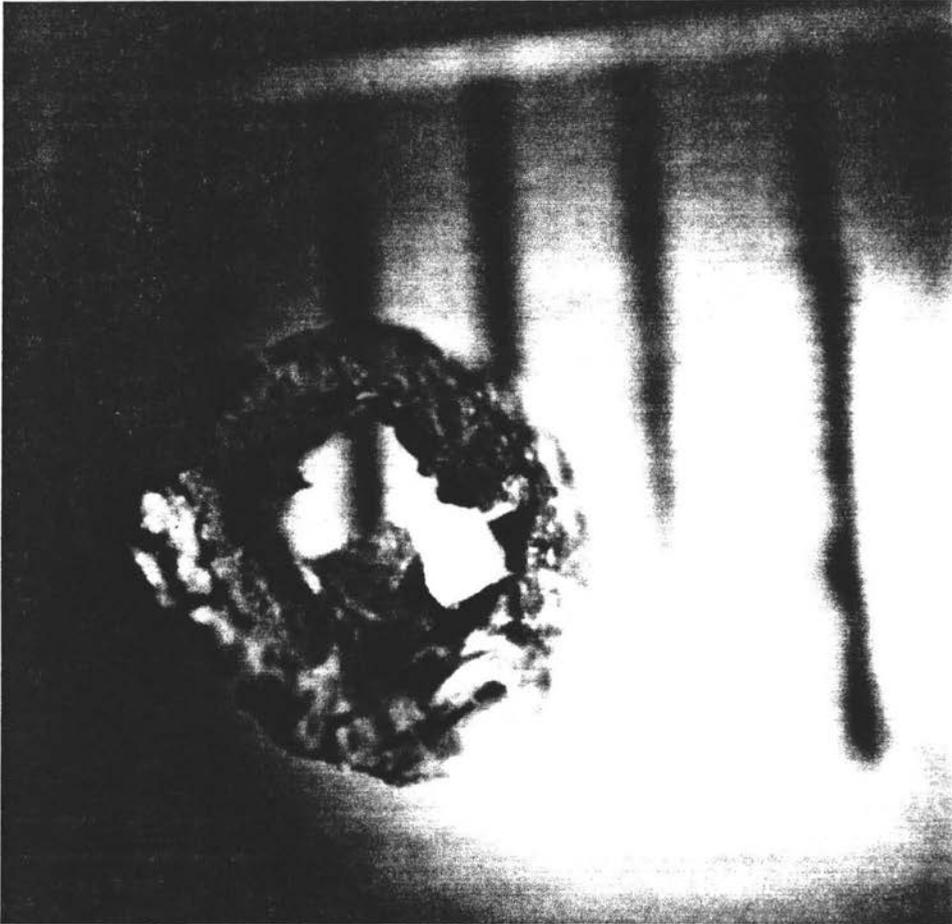


Figura 3.4 Corte transversal de tallo mostrando los depósitos de cloruro de plata (AgCl) en el xilema (zona café), por el empleo de corriente directa (DC).

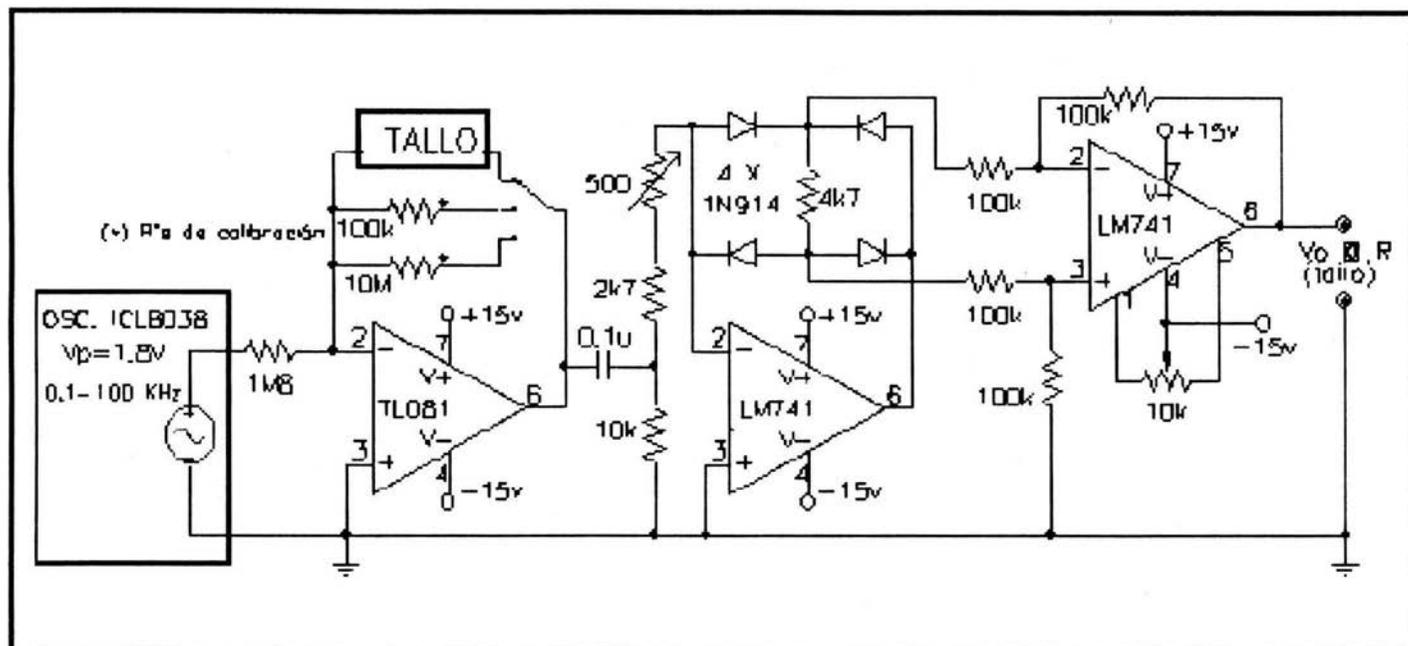


Figura 3.5 Medidor de resistencia eléctrica para tallos de vegetales *in situ* (phaseolómetro II), mostrando la fuente de oscilación, etapa de amplificación (TL081), etapa de rectificación (LM741), amplificador de diferencias (LM741) y salida de voltaje análogo a la resistencia (MΩ).

Capítulo IV

Sistemas de riego

El riego es una forma artificial de proveer a las plantas del agua necesaria para su desarrollo de forma que pueda ser utilizada eficientemente.

Riego tradicional

El método tradicional consiste en dejar correr el agua, por los surcos del cultivo, que proviene de un canal de riego que la transporta desde una presa. En este método hay pérdidas por la evaporación en todo el canal y a lo largo del surco; si el caudal es muy intenso puede originar erosión en suelos con un grado de inclinación.

Riego moderno

La programación de riego moderno, está generalmente basadas en lograr que el agua esté disponible para las plantas, de tal modo que los aportes de agua se realizan cuando el potencial de agua del suelo alcanza la zona de máxima actividad radicular, un valor previamente fijado en función de la especie cultivada, su estado vegetativo, el tipo de suelo y la demanda de evapotranspiración.

En el riego tecnificado se distinguen tres tipos de riego:

a) Aspersión

Es una técnica de riego, en donde el agua se aplica en forma de lluvia por medio de aparatos implementados para agua a alta presión.



Figura 4.1 Riego por aspersión, requiere de alta presión en el suministro y gran parte del agua utilizada se pierde por evaporación.

b) Riego localizado

El riego localizado, denominado internacionalmente micro irrigación, es la aplicación del agua al suelo, en una zona más o menos restringida del volumen radicular.

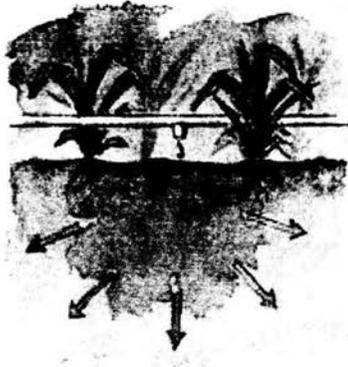


Figura 4.2 Riego por goteo, se eficientiza el recurso del agua al disminuir el área de riego y por lo tanto la pérdida por evaporación, y puede fertilizarse el cultivo al mismo tiempo.

c) Riego localizado subterráneo

El método consiste en irrigar por medio de tuberías porosas subterráneas, es un método costoso para los cultivos de un agricultor común, y se aplica sólo para cultivos intensivos en donde el agua es muy escasa y valiosa. Al estar la tubería enterrada se localiza mejor las zonas de las raíces, disminuyendo la pérdida de agua por evaporación en la superficie del suelo del cultivo.

Propuesta de Automatización del riego

Ante la necesidad de controlar parámetros de germinación y desarrollo del frijol (*Phaseolus vulgaris* N-66), que permitieran lograr especímenes adecuados a estudios electrofisiológicos posteriores; se innovaron dos técnicas para regular la cantidad de humedad en el sustrato de siembra (agrolita), contra la continua evaporación en el mismo y evapotranspiración de las plantas.

Las técnicas se desarrollaron, dentro del contexto de la teoría de control como sistemas llamados a lazo cerrado. Se registran y comparan la resistividad eléctrica y/o el peso como variables de muestreo utilizadas para la retroalimentación de los circuitos de disparo de apertura de la electroválvula.

Teoría de Control Clásica

Para ubicar las técnicas de riego en la teoría de control clásica *se identifican los elementos básicos* de ésta teoría [26], en relación con los sistemas de riego.

Variable a controlar: humedad del sustrato de siembra.

Variable de control: el peso de la charola o la resistividad eléctrica del sustrato

Control: valor medido del peso de la charola o la resistividad eléctrica del sustrato.

Proceso: El cambio que se da en la humedad del sustrato por la evaporación del agua en su superficie y la evapotranspiración de las plantas sembradas

Sistema: Componentes que actúan conjuntamente y cumplen el objetivo de mantener la humedad del sustrato dentro de valores predeterminados: tanque elevado, tubería que conduce el agua, electroválvula, charola, agrolita, balanza y circuitos electrónicos.

Entrada: Intensidad de la radicación solar, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humedad ambiental.

Salida: Disminución en la humedad del sustrato.

Perturbación: Por ejemplo el clima, fallas en los dispositivos mecánicos o eléctricos, fallas en el suministro de energía, parásitos sobre las plantas o enfermedades de éstas.

Control de lazo abierto: Control en el que la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En un control de lazo abierto la salida ni se mide ni se retroalimenta para compararla con la entrada. Así, la precisión del control depende de la calibración. En presencia de perturbaciones, un control de lazo abierto no cumple su función. En la práctica, este control solamente se puede aplicar cuando el efecto de una entrada sobre el sistema es conocido y no se presentan perturbaciones. *No aplica en nuestro caso.*

Control de lazo cerrado. Control que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, realizando, dicha operación, sobre la base de esta diferencia, figura 4.3.

Sólo se especifican las perturbaciones no previsible, ya que *las predecibles o conocidas, siempre pueden compensarse dentro del sistema.* Esto se logra en base a la utilización de amplificadores operacionales como se muestran en las figuras 4.6, 5.1 y 5.2.

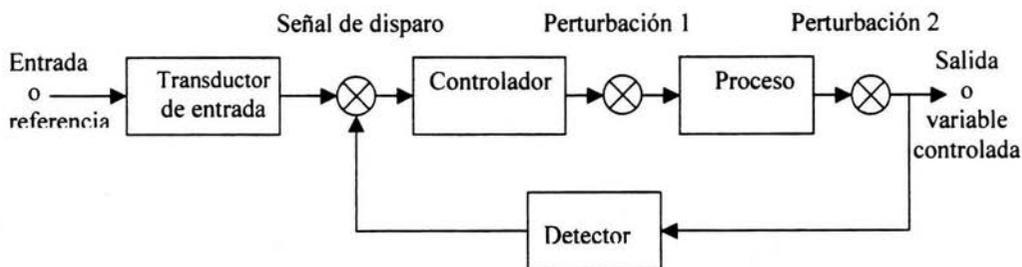


Figura 4.3 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado

Control por resistividad eléctrica

Dos electrodos colocados en extremos opuestos de la charola permitieron el registro continuo de la resistencia eléctrica del sustrato.

La pérdida de humedad en el sustrato de siembra, causó un aumento en la resistividad, lo que, transformado a variaciones de voltaje, se compararon continuamente contra un nivel de referencia para proporcionar la señal de apertura de la electroválvula en caso necesario. El tiempo de riego también se controló, figura 4.4.

Control por peso del sustrato de siembra

Al evapotranspirarse el agua del sustrato de siembra, el peso de la charola disminuye. Al aproximarse a un peso de referencia, el movimiento del brazo de la balanza activa un sensor optoelectrónico, cuya señal de salida es procesada para abrir una electroválvula que permite el flujo de líquido al sustrato, desde un tanque elevado. El tiempo de riego se controla de acuerdo con la estabilidad deseada, figura 4.5.

En la figura 4.6 se muestra el montaje experimental para ambos tipos de riego, cuyas plantas experimentales ya presentan frutos.

Valoraciones de las técnicas de riego

Se evaluaron desde su germinación, las dos técnicas de control durante cuatro meses ininterrumpidos, para tres charolas con los especímenes mencionados. En dos de ellas el control fue por peso y en la tercera por resistividad eléctrica.

En la gráfica 4.1, se reportan las correspondientes humedades relativas tomada esta como el peso de la agrolita seca ($\text{peso del agua más agrolita} / \text{peso de la agrolita} \times 100$), así como la resistencia eléctrica del tercer caso, contra el tiempo. En la gráfica 4.2 se muestra la variación de resistencia a corto plazo.

La comparación de ambas técnicas se hace en razón de su posible utilización, tanto en cultivos de laboratorio similares al del presente trabajo, como su potencial aplicación en cultivos agrícolas o de campo.

Control por peso: Mayor estabilidad que el control por resistividad, independencia a variaciones térmicas ambientales y tiempo de uso efectivo; ideal para cultivos *in vitro*, pero y de aplicación para cultivos *in situ* (lisímetro).

Control por resistividad: Aplicación directa para control de humedad en grandes cultivos, sensible a variaciones en la concentración de electrólitos (tiempo de uso), dependiente de variaciones térmicas ambientales.

Control por resistividad

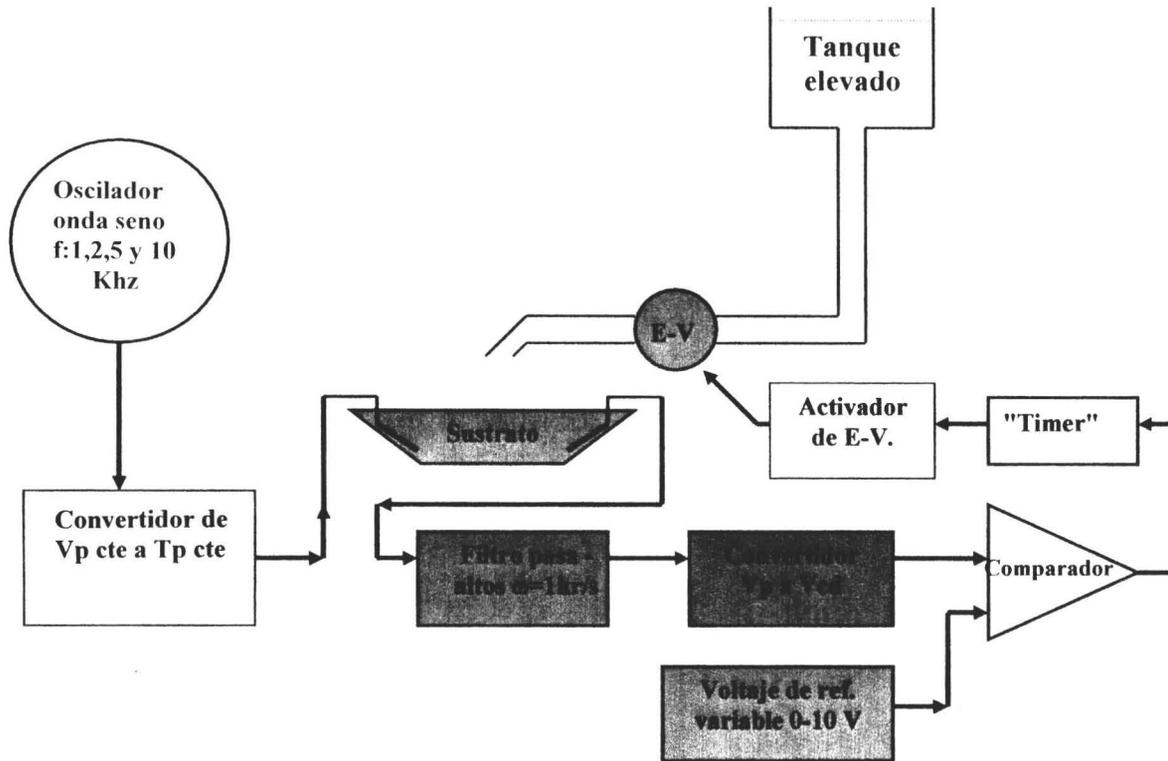


Figura 4.4 Diagrama en bloques del sistema de riego controlado por la variación de la resistividad del sustrato donde: Vp voltaje pico, Ip corriente pico, E-V electroválvula, Vcd voltaje corriente directa.

Control por gravedad

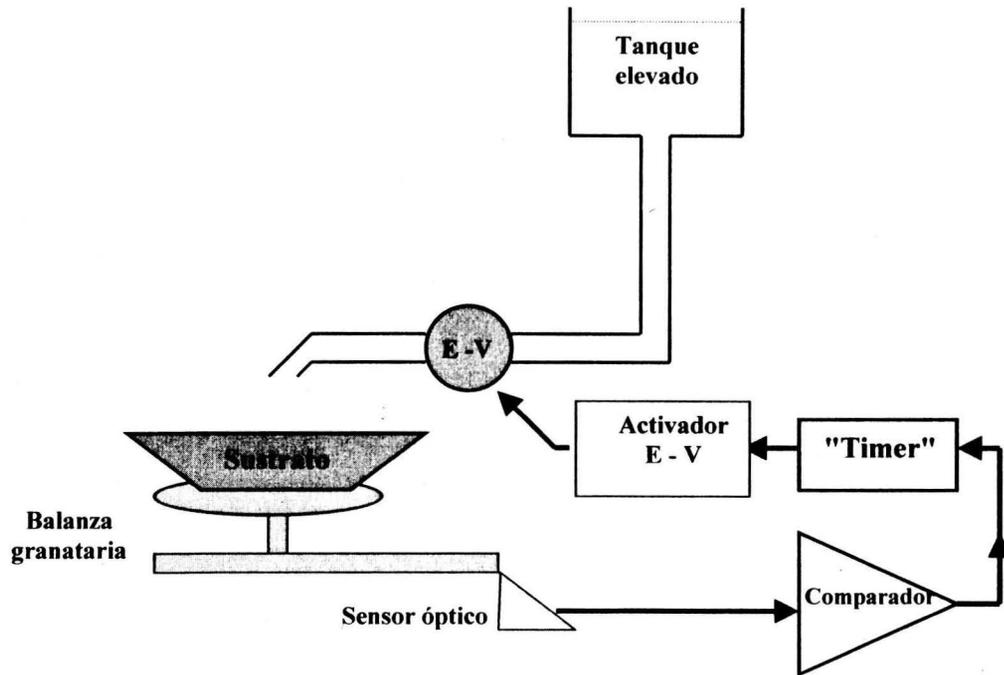
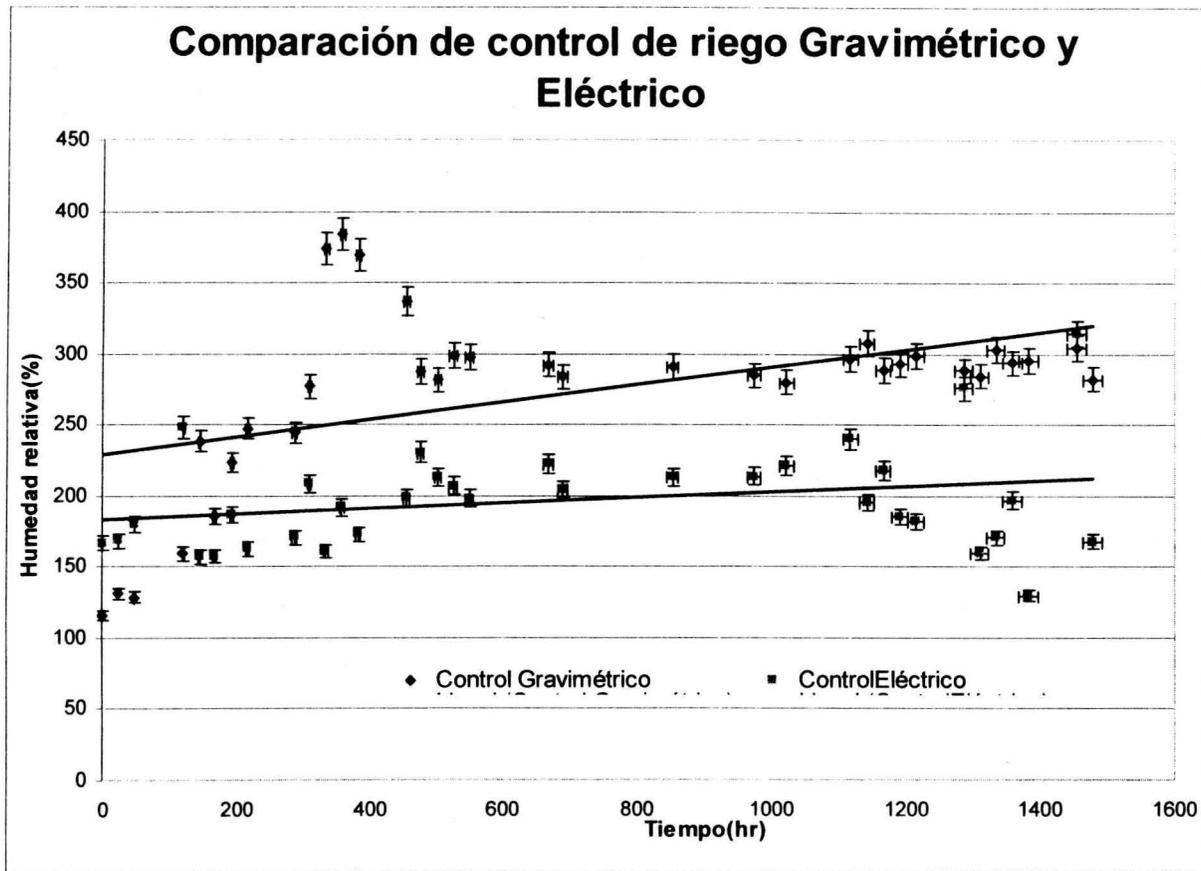
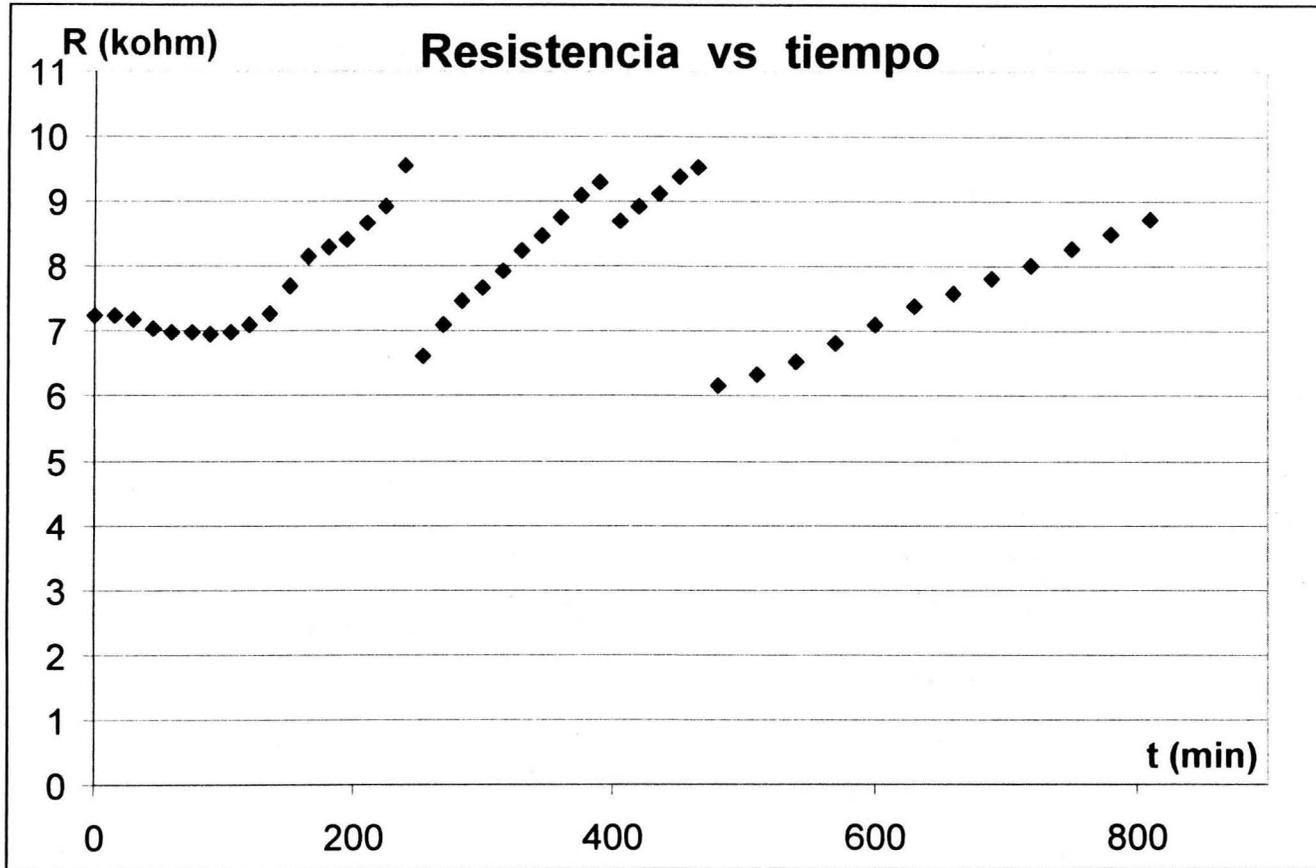


Figura 4.5 Diagrama en bloques del sistema de riego controlado gravimétricamente (lisímetro), E-V electroválvula.



Gráfica 4.1 Comparación de la evolución del control de riego de los dos sistemas en tiempo, con promedios de sistema: gravimétrico 272 ± 60 HR, eléctrico 196 ± 19 HR, debido a errores humanos no imputables a los sistemas.



Gráfica 4.2 Seguimiento de la resistencia entre los electrodos de la charola, para el control de riego eléctrico, las discontinuidades reflejan el momento en que se regó.

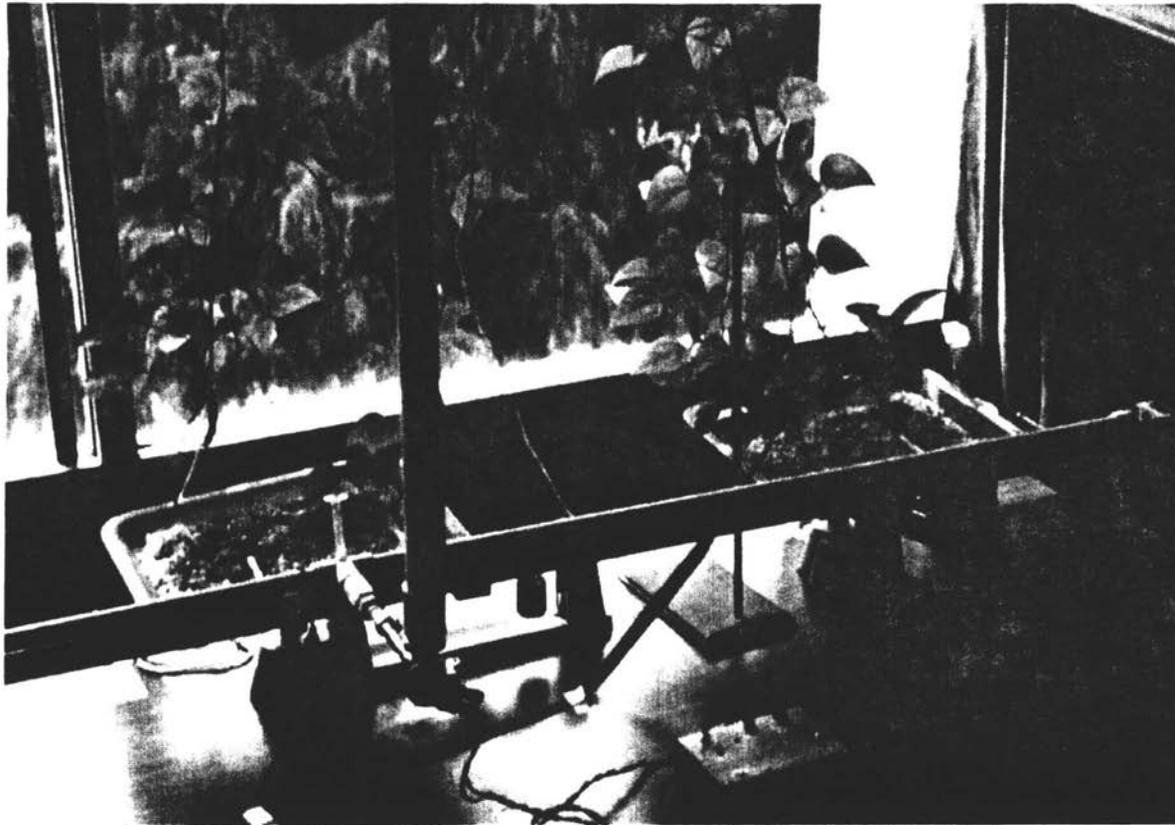


Figura 4.6. Montaje experimental de cultivo, con riego automatizado

Capítulo V

Resultados

De los resultados obtenidos de los índices de germinación, adaptación y respuesta al crecimiento en el sustrato empleado (agrolita), la variedad de frijol que se eligió de cuatro variedades ensayadas, para los estudios biofísicos en condiciones de laboratorio, fue la variedad Negro 66.

Al definir el consumo diario de agua, como la cantidad de agua que consume una planta en cultivo hidropónico, y analizando el consumo diario de agua (C) y la altura media (h) de 42 plantas a una temperatura de $22 \pm 2^\circ \text{C}$, se encontró una relación lineal entre estas dos variables expresada por la siguiente ecuación:

$$C\left(\frac{\text{mL}}{\text{día}}\right) = .0907\left(\frac{\text{mL}}{\text{día} \times \text{cm}}\right)h(\text{cm}) - .2525\left(\frac{\text{mL}}{\text{día}}\right)$$

Donde C se mide en mililitros (mL), y h en centímetros (cm.). El coeficiente de correlación encontrado entre las variables fue del 99.72 %, y al aplicar un análisis de varianza, la dependencia lineal fue aceptada con un nivel de confianza $P < 0.001$.

En relación al peso de la planta: el peso seco se define como “el peso de la planta deshidratada en prensas de papel por un mes”, y el peso húmedo se define como “el peso de la planta recién sacada del sustrato de siembra”. Se analizó la relación entre peso húmedo y peso seco de 10 plantas de diferente tamaño obteniendo, en promedio, que el 89 % del peso de una planta de frijol es agua, tomando la temperatura promedio de 22°C .

Con respecto a las mediciones realizadas con electrodos de plata clorurada (AgAgCl) y haciendo uso de corriente alterna (1000 Hz), se encontró en este trabajo que permite eliminar el efecto producido por la formación de callos, resultado de la inserción de los electrodos en el tallo de la planta, se obtuvo una relación lineal entre la resistencia (R) del tallo con respecto a la razón longitud del tallo, y el área de la sección transversal de este (L/A):

$$R(\text{Ohm}) = 7.4741 \frac{L}{A} (\text{m}^{-1}) + 9.88 \times 10^5 (\text{Ohm})$$

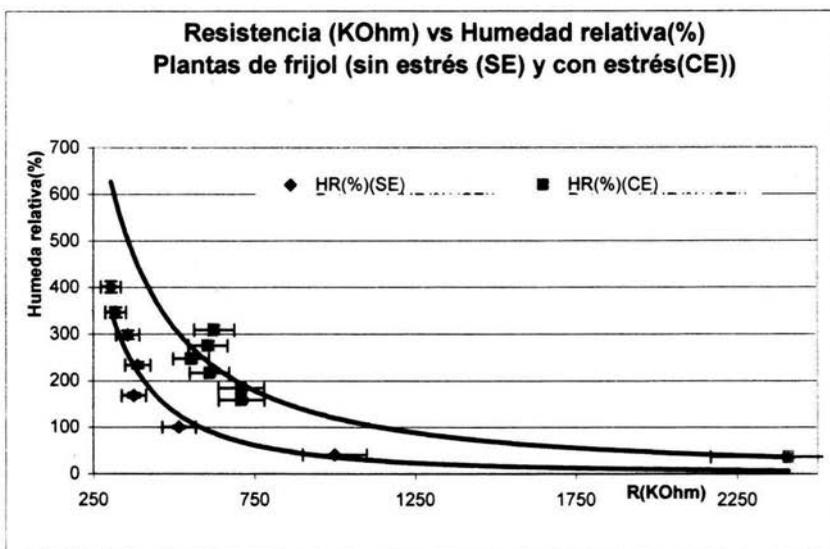
El coeficiente de correlación entre las variables es del 93.72 %, a una temperatura media $T = 22 \pm 2^\circ \text{C}$. Claramente, el comportamiento del tallo es óhmico.

Se analizó el comportamiento de la resistencia del tallo (R), con respecto a la humedad relativa (HR) del sustrato de siembra. Se obtuvo una relación matemática de la siguiente forma:

$$HR = aR^{-b}$$

En donde los parámetros a y b dependen de las condiciones físicas **iniciales** de la planta.

Así, para una planta en buenas condiciones de desarrollo, los parámetros obtenidos para la ecuación, $a = 2 \times 10^7$ y $b = -1.9315$, y comparando los parámetros de una planta sometida a estrés antes del experimento (esto es, que llegó al punto de marchitez) y luego con riego se rehidrató, son $a = 2 \times 10^6$ y $b = -1.3898$, los datos promedio para el seguimiento durante dos meses se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica Seguimiento de la resistencia del tallo de una planta *versus* la humedad relativa del sustrato de siembra, para dos plantas, una bajo condiciones normales y otra sometida a un estrés hídrico previo, mostrando los errores porcentuales (3% para la HR y 10 % para la R).

La variación en el valor de los parámetros puede ser un reflejo de los cambios bioquímicos que realiza el vegetal, como consecuencia a la falta de agua (estrés hídrico). El estrés hídrico se reflejó en un aumento de la resistencia medida hasta en un 200 %, cuando la planta es sometida a este estrés durante 24 horas.

Los resultados que se muestran en la gráfica, se observa que *el límite que soporta una planta sin alterar su comportamiento resistivo*, y por ende metabólico, es del 40% de HR, si se prolonga por más de 24 horas este estrés, la planta se recupera pero con cambios (bioquímicos) reflejados en la resistencia medida.

El seguimiento del comportamiento resistivo de los tallos se hizo de julio a septiembre y no interfirió con el desarrollo de las plantas, ya que florecieron y dieron fruto, algunas de ellas hasta en dos ocasiones.

En cuanto a los dos sistemas de riego, el *gravimétrico* (lisímetro) y el *eléctrico*, la duración de los disparos de agua para el riego en ambos sistemas utilizados fue de 10 segundos, tiempo controlado por los circuitos electrónicos en la abertura de la electroválvula.

La altura a las cuales se encuentran los depósitos de agua para riego es de 1.25 m y la capacidad de cada depósito es de 3.8 litros con agua (a máxima capacidad) a una altura en el depósito de 0.25 m, lo que daba un intervalo en la presión de regado de 1.470×10^4 a 1.225×10^4 Pa. Con esto, la dosis de riego fue de 60 ± 5 mL.

Comparando las dos técnicas de riego, la controlada por el peso del sustrato ó sistema *gravimétrico* y la controlada por la resistencia óhmica del sustrato ó sistema *eléctrico*, se tiene que la humedad relativa promedio fue, para el sistema *gravimétrico* de 272 ± 63 HR y para el sistema *eléctrico* de 196 ± 19 HR, en 90 días de funcionamiento continuo. Las variaciones máximas y mínimas mostradas en los gráficos del Capítulo IV, fuera de este intervalo se debieron a errores humanos, y no son imputables a los sistemas en sí.

Finalmente, la viabilidad del empleo de control de riego eléctrico, vía la resistencia eléctrica del sustrato de siembra entre dos electrodos, que retro alimente las válvulas de riego, es total.

Un refinamiento de este método, es utilizar la resistencia eléctrica medida en los tallos de plantas que funjan como monitores en una parcela y que previamente calibrados, disparen los sistemas de riego en lugar de la resistencia eléctrica del sustrato de siembra, lo anterior supondría una mayor eficiencia en el manejo del recurso hídrico.

En una evaluación de costos para una instalación en laboratorio, los sistemas de riego, con tanques elevados, electroválvulas, tubería, charolas, tres balanzas granatarias, controladores y detectores de humedad, tienen un costo de \$8000.00 MN (mayo del 2004).

Para una parcela el costo se incrementaría por las fuentes de energía, que podrían ser celdas fotovoltaicas, y un dispositivo que promediara las necesidades de agua de las plantas, por medio de las que fungieran como monitores.

Conclusiones

Como resultado del análisis de los índices de germinación, adaptación y respuesta al crecimiento en el sustrato empleado (agrolita), de las cuatro variedades probadas de frijol se eligió, la variedad Negro 66.

Se desarrollaron dos sistemas automatizados de riego, *gravimétrico* y *eléctrico*, que mostraron eficiencia en el mantenimiento de la humedad en el sustrato de siembra, dentro de parámetros preestablecidos, por periodos de hasta 4 meses de uso continuo las 24 horas del día en condiciones de laboratorio.

La potencial aplicación del sistema *eléctrico* de control de riego en el campo, que ayude a regular el riego en forma automática y con un sistema de riego adecuado, por ejemplo el de riego subterráneo, que evitaría las pérdidas por evaporación que representan hasta el 80 % del agua utilizada superficialmente, optimizando el recurso del líquido vital.

Se encontró un comportamiento óhmico en el tallo, del análisis de la resistencia eléctrica a lo largo del tallo de frijol.

Del análisis de la variación de la resistencia eléctrica del tallo, como respuesta a la humedad relativa del sustrato de siembra, surge un nuevo método que hace factible:

- El empleo de la propia planta como un detector de la humedad del subsuelo.
- El empleo de la medición de la resistencia eléctrica de los tallos de las plantas, como una herramienta auxiliar en el estudio de los cambios metabólicos de las plantas cuando son sometidas a estrés (hídrico, salino, térmico)
- La aplicación del método a cultivos de plantas herbáceas como:
 - i) Legumbres: lenteja, frijol, haba etc.
 - ii) Verduras: jitomate, lechuga, col, etc.
 - iii) Cereales: trigo, maíz, arroz, etc.
 - iv) Frutales: durazno, ciruela, pera, etc.
 - v) Ornamentales: clavel, margaritas, gladeolas etc.
- El implemento de un riego altamente eficiente, automatizado, controlado por plantas piloto en una parcela de cultivo que accionen mecanismos de activación de sistemas riego.
- Que en el agua utilizada para riego se diluyan los minerales requeridos por el vegetal para su desarrollo, optimizando el empleo de los fertilizantes.

Bibliografía

1. Hamill W. H., Williams R. R. Jr. and Mackay C. (1966). *Principles of Physical Chemistry*. Prentice-Hall, U.S.A. Capítulo 10.
2. Maron S. H. y Prutton C. F. (1974). *Fundamentos de Físicoquímica*. 6th ed.; Limusa, México. Capítulo 11.
3. Levine I.N. (1994). *Físicoquímica*, 3^a. ed. McGraw-Hill. México. Capítulo 16.
4. Shoemaker D. P., Garland C. W., and Steinfeld J. I. (1974). *Experiments in Physical Chemistry*. McGraw-Hill, U.S.A. Capítulo 8.
5. Sawyer D. T. and Roberts J. L. (1974). *Experimental Electrochemistry for Chemists*. John Wiley and Sons, U.S.A. Capítulo 5.
6. Bard A. J. and Faulkner L. R. (1980). *Electrochemical Methods, Fundamentals and Applications*. John Wiley and Sons, U.S.A. Capítulo 9.
7. Koryta J. and Dvorák J. (1987). *Principles of Electrochemistry*. John Wiley and Sons, Great Britain. Capítulo 2.
8. Harned H. S. and Owen B. B. (1943). *The Physical Chemistry of Electrolytic Solutions*. Reinhold Publishing, U.S.A. Capítulo 6.
9. Lide D. R. (1991). *Handbook of Chemistry and Physics*, CRS Press, 72nd ed., U.S.A. Sec. 5.9.
10. Braunstein J. and Robbins G. D. (1971). *J. Chem. Educ.* 48, 52.
11. Salisbury F.B. y Ross C.W. (1994). *Fisiología Vegetal*. Ed. Iberoamericana. México. Capítulos 5, 6 y 7.
12. Fotosíntesis (1984). Monografía 30. Serie Biología, O.E.A.
13. Hutchinson, J. (1964). *The Genera of Flowering Plants*. I. Oxford. Reino Unido.
14. Miranda C. S. (1979). Evolución de *Phaseolus vulgaris* y *P. coccineus*. Contribuciones al conocimiento del frijol (*Phaseolus*) en México. Ed. M. Engleman, Colegio de Posgraduados, Chapingo. Estado de Méx.
15. Pérez M. J., Ferrera C. R. y García E. R. (1995). Diversidad Genética y Patología del frijol. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillos Estado de México.

16. Martínez A. J. V. (1995). Fitogeografía de los taxones silvestres de *Phaseolus* en México y Guatemala. Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Estado de México.
17. Miranda C., S. (1967). Infiltración genética entre *Phaseolus coccineus* L. y *Phaseolus vulgaris* L., C. P., E. N. A., Serie de Inv. No. 9. pp 48. México.
18. Howard M. Resh. (1992). *Cultivos Hidropónicos*. Mundi-prensa. Madrid, España.
19. Brophy J.J. (1966). *Basic Electronics for Scientists*. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo. Capítulos 1, 5.
20. Millman J. and Halkias C.C. (1972). *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*. McGraw-Hill Kogakusha., Tokyo. Capítulos 15 y 16.
21. Fernández F., Meráz J.S. y Magaña F. (1998). *Laboratorio Básico para Algunos Estudios Físicos en Vegetales*. Memorias in extenso SOMI XIII, Ensenada Baja California, México.
22. Fernández F., Magaña F. Y Meras J.S. (2001). *Prototipo de Conductímetro para Soluciones Electrolíticas*. Memorias in extenso SOMI XV, Querétaro, Querétaro México.
23. Fernández F., Meráz, J.S y Magaña F. (2003). The electric resistance in electrolytic solutions. *Rev.Mex.Fis.* 49(5) 397-400
24. Tyree M. J. (1997). The Cohesion-Tension theory of sap ascent: current controversies. *Journal of Experimental Botany.* 48 (315) 1753-1765.
25. Zimmermann U. et al. (2002). What are the driving forces water lifting in the xylem conduit? *Physiol. Plant.* 114, 327-335
26. Nise N.S. (2002). *Sistemas de Control para Ingeniería*. CECSA. México; Capítulo I.

GLOSARIO

Adhesión: Fuerza de atracción entre moléculas de distintas sustancias, ejemplo agua pared de vidrio.

Agrolita : Medio de cultivo hidropónico que es inerte y sólo sirve como sostén a las raíces del vegetal.

Angiosperma: Plantas que poseen flores y semillas envueltas en frutos

Biofísica Rama de la Biología y/o la Física, que aborda los procesos fisicoquímicos en los seres vivos.

Campo Eléctrico (\vec{E}): Región del espacio alrededor de una carga eléctrica, en donde ésta deja sentir con intensidad su presencia sobre otras cargas eléctricas.

Capacitor: También conocido como condensador, dispositivo eléctrico formado por lo general de dos placas metálicas paralelas separadas por un aislante, capaz de almacenar cargas eléctricas al someterse a un a diferencia de potencial.

Cavitación: Fenómeno de ruptura del flujo continuo del agua en el xilema, a pesar de la fuerza de cohesión, por las fuertes tensiones que se presentan. Al romperse la columna de agua, de inmediato se ocupa el espacio por una burbuja de aire que termina por obstruir al canal de transporte.

Clorofila: Pigmento verde de las plantas, primordial en la transformación de energía radiante en energía química, durante la fotosíntesis.

Conductividad (k): Inverso de la resistividad, que permite visualizar mejor la facilidad de conducir la corriente eléctrica del material conductor. Entre mejor conductor mayor conductividad.

Conductor eléctrico: Material que permite el paso de partículas cargadas a través de él, pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.

Corriente alterna. Flujo de cargas eléctricas que cambian de sentido en forma cíclica o alterna.

Corriente eléctrica: Proceso en el cual se da un flujo de cargas eléctricas por la aplicación de un campo eléctrico.

Corriente directa: Flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continúa.

Corteza: Tejido situado debajo de la epidermis.

Cultivo hidropónico: Cultivo de plantas sin suelo; las raíces se encuentran sumergidas en un medio acuoso rico en elementos nutrientes.

Densidad de corriente (J): Cantidad de carga eléctrica que pasa a través de una sección transversal del conductor perpendicular al flujo de la carga.

Electrodos. Terminales de dispositivos eléctricos o electrónicos donde se lleva a cabo intercambio de cargas eléctricas.

Electrolito: Sustancia que al disolverse en agua, produce una disolución que permite el paso de la corriente eléctrica.

Endodermo: Capa germinal interna de la gástrula.

Epidermis: Capa más externa de células de un organismo.

Especie: Unidad de clasificación taxonómica para vegetales y animales; población de individuos similares, con estructura y función idénticas, que sólo se reproducen entre sí y tienen un antecesor común.

Estomas: Abertura diminuta en la superficie de una hoja, rodeada por un par de células de protección que regulan el tamaño de la abertura.

Evapotranspiración: Cantidad de agua evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal.

Fotosíntesis: Proceso de síntesis de carbohidratos a partir de bióxido de carbono y agua utilizando la energía radiante de la luz capturada por la clorofila en las células vegetales.

Género: Categoría de clasificación de los seres vivos, grupo de especies estrechamente emparentada en estructura y origen evolutivo.

Germinación: Comienzo del crecimiento embrionario de las semillas.

Germoplasma: Acopio de semillas de una región o país, en condiciones óptimas de preservación de ésta riqueza genética.

Gimnosperma: Plantas cuyas semillas no tienen la envoltura de un ovario; es frecuente que la semilla forme parte de un cono.

Humedad relativa: Relación del peso del agua al peso de la agrolita expresado porcentualmente.

Índice de germinación. Relación entre semillas germinadas y semillas sembradas expresado porcentualmente.

In situ. Vocablo latino que significa en el momento y lugar en que sucede una cosa, y que en las áreas biomédicas implica llevar a cabo un experimento en las condiciones más naturales posibles.

Interfase: Espacio que separa dos fases físicas, por ejemplo entre un conductor sólido y uno líquido.

Mega Pascal MPa: Múltiplo de la unidad de presión Pascal (Newton /m²) equivalente a un millón de pascales.

Nutrientes: Sustancias químicas que el vegetal utiliza como componente para la síntesis de materiales necesarios para su supervivencia.

Osmótico: Proceso que involucra el fenómeno de la ósmosis.

Oxidación-Reducción: Reacción química en la cual se transfieren uno o más electrones, el elemento que los *recibe se reduce* y el elemento que los *dona se oxida*.

Peso húmedo: Peso de un vegetal recién cortado o extraído de su lugar de cultivo.

Peso seco: Peso de un vegetal después de haberse deshidratado completamente.

Phaseolus: Nombre en latín con el cual se denomina al género de los frijoles.

Plata clorada: Película de cloruro de plata sobre plata metálica.

Polarización: Proceso que ocurre en electrodos, que adquieren una carga neta.

Potencial hídrico (Ψ): Potencial químico del agua en un sistema o parte de un sistema, expresado en unidades de presión, comparado con el potencial químico del agua pura a la misma presión atmosférica y temperatura. El potencial químico del agua pura se fija en cero.

Proteína: Macromolécula formadas de carbono, hidrógeno, oxígeno nitrógeno y generalmente azufre y fósforo; compuesta de cadenas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos; uno de los principales compuestos existentes en todas las células.

Puente de Hidrógeno: Tipo de enlace químico que se establece a través de un átomo de hidrógeno como medio enlazante, este enlace le da las características fisicoquímicas al agua.

Reacción electrolítica: Reacción química que tiene lugar en los metales expuestos a una solución electrolítica.

Resistencia óhmica: Oposición que presenta un material al paso de la corriente eléctrica y que se puede describir por la "ley de ohm".

Resistividad (ρ): Propiedad de los materiales conductores que junto con su característica geométrica, definen su resistencia eléctrica. Entre mejor conductor, menor resistividad.

Savia: Líquido que circula por el interior de la planta y suele clasificarse en *bruta*: la que sube de las raíces a las hojas portando los nutrientes básicos, y *elaborada*: que desciende distribuyendo los compuestos orgánicos esenciales para las células.

Secuoya: Árbol gigante perteneciente a la familia de las Taxodiáceas; la gigante es la especie *Sequoiadendron giganteum*, con alturas superiores a los 80 m y hasta 2300 años de edad.

Sensor optoelectrónico: Dispositivo electrónico que esta formado por una fotocelda y es capaz de disparar una señal que activa un proceso mecánico.

Sistema vascular: Conjunto de “vasos” que intervienen en el ascenso y descenso del agua en el tallo de una planta.

Solvente: Componente de una solución, que se encuentra en mayor proporción y en la cual se disuelve el soluto.

Soluto: Componente de una solución, que se encuentra en menor proporción.

Solución nutritiva: Solución hecha con sales minerales esenciales para el crecimiento de un vegetal en concentraciones adecuadas.

Sustrato: Material que sirve de soporte físico a una planta.

Tilacoide: Estructura membranosa en forma de saco del cloroplasto, donde la energía luminosa se convierte en adenosin trifosfato (ATP) y NAPH, que se utilizan en la síntesis de carbohidratos.

Tracción: Fuerza que se transmite desde las raíces hasta las hojas de un vegetal a través de la cohesión de las moléculas del agua y que permite se forme un flujo hídrico.

Transpiración: Evaporación de agua de las hojas de una planta que ayuda a desplazar hacia arriba el agua por el tallo.

Variedad. Subdivisión de una especie biológica donde los individuos se distinguen por rasgos secundarios

Vaso Capilar: Estructura formada por una serie de células superpuestas que han perdido su pared celular.

Xilema: Tejido de las traqueófitas que conducen agua, consta de traqueidas y vasos; puede servir como soporte mecánico.