

**Universidad Autónoma de Baja California**

Facultad de Ingeniería - Ensenada



# Medición de Humedad de Suelo utilizando Fibra Óptica de Plástico

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para  
obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**

Daniel Everardo Amador Bartolini

Ensenada, Baja California, Febrero del 2009.

**Universidad Autónoma de Baja California**  
Facultad de Ingeniería - Ensenada

**Medición de Humedad de Suelo utilizando Fibra Óptica de  
Plástico**

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

Presenta

Daniel Everardo Amador Bartolini

Aprobada por:

---

Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de Tesis

---

M.C. Humberto Cervantes De Ávila  
Miembro del Comité

---

M.C. Carlos Gómez Agis  
Miembro del Comité

**Ensenada, Baja California, Febrero del 2009.**

**Resumen** de la tesis de **Daniel Everardo Amador Bartolini**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, Febrero del 2009.

## Medición de Humedad de Suelo utilizando Fibra Óptica de Plástico

Resumen Aprobado por:

---

Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de Tesis

En este trabajo se presentan resultados preliminares de un sistema de medición puntual de humedad en suelo por medio de fibras ópticas, empleando la técnica de medición de retrodispersión de luz. La variación de humedad es inferida por medio de la modificación de la absorción de luz en el suelo debida a su contenido de agua. De esta manera, se mostró que las variaciones de humedad modifican directamente el comportamiento de la señal retrodispersada y ofrecen la oportunidad de aplicar éste método en sensores de humedad. La utilización de sensores para medición de humedad de suelo es necesaria para efectuar un control de riego eficiente, es decir: que se mantenga la producción de frutos con calidad adecuada pero utilizando la menor cantidad posible de agua.

**Palabras Clave:** *Humedad de suelo, Fibra óptica de plástico, Sensor de humedad*

## Dedicatoria

A mi padre Miguel Felipe Amador y a mi madre Blanca Julia Bartolini, este detalle es para ustedes, una pequeña manera de agradecerles todo lo que me han dado en esta vida, su enseñanza invaluable, sus consejos, su confianza, su apoyo incondicional y sobre todo la bonita amistad que existe entre nosotros.

Al pequeño Daniel, quien con su inocencia, cariño e incansable entusiasmo, siempre estuvo para darme un motivo de alegría y respiro para seguir continuando.

A mis hermanos Miguel, Zullybeth y Armando, con mucho cariño para ustedes, quienes son a parte de familia mis mejores amigos.

A Erica Esther, una persona verdaderamente especial, quien estuvo toda esta etapa apoyandome de manera incondicional, dándome alegría y ánimos siempre y en cada momento.

A mis sobrinos Luis Carlos, José Miguel, Diego Ángel, Michelle, Nicole y Ambar, quienes con su cariño y alegría se encargaron de que no cayera en una rutina dándome gratos momentos día con día.

A Verónica Rozalez, Jérica Sánchez y Luis Carlos Rodríguez por su apoyo y palabras de aliento.

## **Especial agradecimiento**

Un especial agradecimiento al Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas por confiar en mi y darme la oportunidad de formar parte de este proyecto, por compartirme sus conocimientos, su experiencia, pero sobre todo por brindarme su amistad, paciencia, dedicación y permitirme alcanzar esta meta.

## Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a:

Al CONACyT por financiar mis estudios de maestría en la Facultad de Ingeniería Campus Ensenada de la Universidad Autónoma de Baja California.

Al Dr. Óscar López Bonilla y al Dr. Juan Iván Nieto Hipólito por apoyar el desarrollo de este proyecto.

Un especial agradecimiento a la M.C. Lina Adriana Meza Amaya por su apoyo en el desarrollo de este proyecto proporcionando los medios y recursos necesarios, por su gran disponibilidad y sus palabras de aliento.

A los M.C. Humberto Cervantes de Ávila y M.C. Carlos Gómez Agis, sinodales de esta tesis, por fortalecer con sus críticas y conocimientos del área la calidad de los resultados de esta investigación.

Al Dr. Horacio Luis Martínez Reyes por compartir sus conocimientos, experiencia y contribuir al desarrollo de este proyecto.

A Maria Luisa Reyes Torres, Anita Rivera González y Eliud Gil Mares por su disponibilidad, amabilidad, calidad de servicio y atenciones.

A mis compañeros de maestría Jazmin Romero, Daniel Ortiz, Eduardo Murillo, Francisco Ocampo, Óscar Tirado, Edgar Morales, Feliciano Preciado, Guillermo Ramírez, José Luis León y Gerardo Hirata por su apoyo e invaluable amistad.

A la Familia Lugo Ibarra, por su apoyo, tiempo, comprensión y dedicación en los buenos y malos momentos de esta etapa de preparación en mi vida.

A Rolando Gautrin y Rodrigo Villalpando por su sincera amistad.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación . . . . .	2
1.2. Objetivo general . . . . .	3
1.3. Objetivos particulares . . . . .	3
1.4. Secuencia de la tesis . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Suelo . . . . .	5
2.1.1. Composición mecánica del suelo . . . . .	8
2.1.2. Naturaleza Física del sistema agua-suelo . . . . .	9
2.1.3. Estructura del suelo . . . . .	10
2.1.4. Características de la estructura del suelo en relación con el aire y el agua del suelo . . . . .	11
2.1.5. El agua del suelo . . . . .	12
2.1.6. Clasificación del agua del suelo . . . . .	12
2.1.7. Almacenamiento de agua en el suelo . . . . .	13
2.1.8. Contenido de agua en el suelo . . . . .	16
2.1.9. Constantes de la humedad del suelo . . . . .	18
2.1.10. Energía de retención y liberación de agua . . . . .	19
2.1.11. Tensión de humedad del agua del suelo y curvas de retención de agua . . . . .	19
2.1.12. Influencia de la temperatura . . . . .	20
2.1.13. Componentes del potencial de agua y terminología de relaciones Suelo-Planta-Agua . . . . .	20
2.1.14. Componentes del potencial de agua en el suelo . . . . .	22
2.1.15. Evaluación del agua del suelo . . . . .	23
2.1.16. Métodos para evaluar el contenido de humedad en suelo . . . . .	24
2.2. Sensores . . . . .	24

2.3.	Clasificación de los sensores . . . . .	26
2.4.	Comunicaciones utilizando luz . . . . .	28
2.5.	Fibras Ópticas . . . . .	31
2.5.1.	Conceptos y definiciones de fibras ópticas . . . . .	31
2.5.2.	Estructura de las Fibras Ópticas . . . . .	36
2.5.3.	Características que se presentan en la fibra óptica . . . . .	38
2.6.	Dispositivos opto-electrónicos . . . . .	41
2.6.1.	Dispositivos emisores de luz . . . . .	41
2.6.2.	Dispositivos detectores de luz . . . . .	43
<b>3.</b>	<b>Medición de humedad de suelo</b>	<b>45</b>
3.1.	Sistema a bloques . . . . .	45
3.2.	Caracterización de dispositivos . . . . .	47
3.3.	Acoplador Óptico . . . . .	48
3.4.	Diseño de Sensor Óptico . . . . .	51
3.5.	Instrumentos de Medición . . . . .	52
3.5.1.	Coeficiente de absorción y espectro de absorción . . . . .	54
3.6.	Troceador óptico y amplificador lock-in (Detección síncrona) . . . . .	54
3.7.	Control de instrumentos por medio de la interfaz USB/GPIB . . . . .	55
3.8.	Amplificación de la señal de temperatura . . . . .	56
3.9.	Requisitos para una corrida experimental . . . . .	56
<b>4.</b>	<b>Pruebas y Resultados</b>	<b>61</b>
4.1.	Caracterización del dispositivo láser . . . . .	61
4.2.	Acoplador Óptico . . . . .	62
4.3.	Medición de de Señal Óptica Retrodispersada . . . . .	63
4.3.1.	Muestra 1 . . . . .	63
4.3.2.	Las condiciones en las que se hacen las pruebas con el portaobjetos son: . . . . .	64
4.3.3.	Muestra 2 . . . . .	66
4.3.4.	Las condiciones en las que se hacen las pruebas con la caja de acrílico son: . . . . .	66
4.4.	Medición utilizando un Sensor Resistivo . . . . .	68
4.5.	Medición de Temperatura . . . . .	69
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>71</b>
5.1.	Contribuciones . . . . .	71
5.2.	Trabajo a Futuro . . . . .	72

*ÍNDICE GENERAL*

III

<b>A. Cálculos de circuitos básicos</b>	<b>76</b>
A.1. Configuración de un LED . . . . .	76
A.2. Configuración de un amplificador . . . . .	76

# Índice de figuras

2.1. Compuestos del suelo . . . . .	14
2.2. Ciclo Hidrológico . . . . .	15
2.3. Agua en el suelo . . . . .	17
2.4. Curvas de Retención de Humedad del Suelo en tres suelos minerales representativos [N. Brady, 1990]. . . . .	20
2.5. Sensores Ópticos . . . . .	27
2.6. Experimento de John Tyndall . . . . .	29
2.7. Índice de refracción . . . . .	32
2.8. Fenómeno de reflexión . . . . .	33
2.9. Viendo desde adentro de la fibra . . . . .	34
2.10. Ensanchamiento de pulso . . . . .	35
2.11. Elementos de la fibra . . . . .	37
2.12. Tipos de fibra óptica . . . . .	39
2.13. Led emisor . . . . .	41
2.14. Detector óptico . . . . .	43
3.1. Montaje del experimento . . . . .	46
3.2. Caracterización del detector IF-D91 . . . . .	49
3.3. Caracterización del Acoplador tipo 2x2 . . . . .	50
3.4. Consola para programar una corrida experimental . . . . .	51
3.5. Directividad de un Acoplador $2 \times 2$ . . . . .	52
3.6. Montaje del acoplador óptico . . . . .	53
3.7. Punta del sensor óptico . . . . .	54
3.8. Diagrama de una corrida experimental . . . . .	58
3.9. Coeficiente de absorción . . . . .	59
3.10. Chopper en sincronía con lock-in . . . . .	59
3.11. Interfáz USB/GPIB . . . . .	60
3.12. Tratamiento de la señal correspondiente a la temperatura . . . . .	60

4.1. Tiempo de estabilización del láser . . . . .	62
4.2. Distribución del acoplador . . . . .	63
4.3. Montaje del Portaobjetos . . . . .	64
4.4. Retrodispersión en un porta-objetos . . . . .	66
4.5. Caja de acrílico . . . . .	67
4.6. Monitoreo utilizando sensor óptico . . . . .	69
4.7. Monitoreo utilizando sensor de humedad resistivo . . . . .	70
4.8. Monitoreo de temperatura . . . . .	70
A.1. Configuración inversora . . . . .	77
A.2. Configuración no-inversora . . . . .	78
A.3. Configuración transimpedancia . . . . .	78

# Índice de tablas

2.1. Clasificación de las partículas de suelo según los sistemas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y de la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo [Sampat A. Gavande, 1991]. . . . .	9
2.2. Ventajas y desventajas de los sensores ópticos . . . . .	28

# Capítulo 1

## Introducción

Un sistema de comunicaciones ópticas es básicamente un sistema que está constituido por un transmisor óptico, un receptor óptico y fibra óptica. El transmisor se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o luminosa, por ello se le considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal a través de la fibra, en el otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original [Jacob Fraden, 2004]. El sistema básico de transmisión se compone en este orden: señal de entrada, amplificador, fuente de luz, conector óptico, línea de fibra óptica (primer tramo), empalme, línea de fibra óptica (segundo tramo) conector óptico, receptor, amplificador y señal de salida.

En resumen, se puede decir que en este proceso de comunicación, la fibra óptica funciona como medio de transporte de la señal luminosa, generado por el transmisor LED (Diodo Emisor de Luz, por sus siglas en inglés) o Láser. Las fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones a largas distancias son siempre de vidrio, mientras que en cortas distancias son utilizadas las de plástico. Finalmente, la señal óptica es recibida por un fotodiodo (tipo PiN o de avalancha) que convierte la señal luminosa en señal eléctrica [Crisp and Elliot, 2005].

Cuando la luz viaja a través de diferentes medios, sufre modificaciones, que a su vez están asociadas con variables físicas: Temperatura, Humedad, Presión, etc. La caracterización de las modificaciones de la luz en función de las variables físicas dió lugar al desarrollo de sensores ópticos.

En términos generales los sensores son una extensión de los sentidos del

hombre, es decir, son dispositivos capaces de interactuar con un medio, obteniendo datos de éste con el fin de realizar algún tipo de proceso [Daniel Ortíz B., 2008].

En los inicios de la tecnología de sensores de fibra óptica, el mayor éxito comercial de estos sensores fue ubicado en los mercados en los que la tecnología de sensores tradicionales era marginal o inexistente. Las ventajas inherentes de los sensores de fibra óptica son: peso y tamaño reducidos, aislamiento, bajo consumo de energía, inmunidad a interferencia electromagnética, mayor ancho de banda y resistencia a la corrosión ocasionada por el medio ambiente [Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin, 2008].

Por otro lado, los sensores ópticos ofrecen amplias posibilidades de aplicación para solucionar problemas en diversas áreas, por ejemplo, en la actualidad una problemática que requiere especial atención, es el manejo y distribución del agua en la agricultura. Esta problemática puede atacarse utilizando nuevas tecnologías que sirvan para indicar la distribución óptima de este recurso obteniendo como principal resultado ahorro de agua y mejores frutos. Esta técnica recibe el nombre de agricultura de precisión, cuyo principio es: “Aportar la buena dosis, en el buen lugar y en el momento adecuado” [Wikipedia, 2008].

El presente trabajo surge del acercamiento de los productores de vino y hortalizas de la zona agrícola de Ensenada, B.C. para mejorar y mantener la calidad de sus productos por medio de la tecnificación del cultivo, lo que incluye las partes de telemetría y control de riego. Para este trabajo en particular, la atención se centró en el desarrollo de un sensor óptico, cuyo funcionamiento está basado en la medición de las variaciones de la señal retrodispersada correspondientes a la absorción de luz, debidas a los cambios en el contenido de humedad en una muestra de suelo.

## 1.1. Justificación

En la actualidad el agua contenida en el suelo es uno de los factores más importantes en la producción de las cosechas. Las plantas requieren una cantidad adecuada de humedad, la cual varía de acuerdo a la especie y al estado de crecimiento o desarrollo. El suelo es capaz de almacenar una cantidad limitada de agua y de ésta, solo una parte es utilizada para las plantas. Por

ello es esencial conocer el contenido de agua por unidad de masa o volumen de suelo y el estado energético o disponibilidad de la misma. De esta forma se obtiene información valiosa para poder entender muchas de las propiedades químicas, mecánicas e hidrológicas del suelo que afectan el crecimiento y el desarrollo de los cultivos. Además, esta información sirve de guía para lograr un riego eficiente que reponga al suelo la humedad requerida por las plantas. A través de los años se han desarrollado distintos métodos para determinar la humedad del suelo. La utilización de uno u otro método dependerá principalmente de los recursos económicos del operador, el conocimiento que tenga y el grado de precisión que persiga.

Puesto que es indispensable contar con un elemento que mida la humedad de suelo y se desea aplicar una técnica basada en sistemas ópticos, se tiene el motivo para el desarrollo de éste tema de tesis.

## 1.2. Objetivo general

*Desarrollar un sistema de medición de humedad en suelo por medio de fibras ópticas, empleando la técnica de medición de retrodispersión.*

## 1.3. Objetivos particulares

- *Diseñar un circuito detector de luz*
- *Diseñar un montaje para pruebas de humedad en el suelo*
- *Medir la señal retrodispersada*
- *Crear un banco de caracterización automatizado*

## 1.4. Secuencia de la tesis

Esta tesis está distribuida de la siguiente manera:

**Capítulo I:** Se hace una breve descripción de la importancia y relación que existe entre las comunicaciones ópticas y los sensores ópticos.

**Capítulo II:** Se presenta un marco teórico referente al suelo agrícola, la fibra óptica y los sensores ópticos, en particular sensores basados en la técnica de medición de la señal retrodispersada.

**Capítulo III:** Se indica la composición y diseño de un sensor óptico básico utilizando fibra óptica de plástico.

**Capítulo IV:** Se presenta la etapa experimental y los resultados obtenidos.

**Capítulo V:** Se dan las conclusiones generales de este trabajo.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Suelo

La palabra edafología proviene de la raíz griega **Edafos** que significa suelo y la palabra **Logos** estudio; por lo tanto, es el estudio de los suelos [INEGI, 1990].

Se puede definir suelo como la capa más superficial de la corteza terrestre, en la cual encuentra soporte la cubierta vegetal. Es necesario conocer sus características, ya que éstas proporcionan información muy valiosa para su manejo en actividades agrícolas, pecuarias forestales y de ingeniería civil, entre otras [Elissa Levine and Jim Washburne, 1997].

El suelo es el resultado de la interacción de varios factores del medio ambiente y fundamentalmente de los siguientes: material parental, constituido por la roca madre de la cual se originan los suelos, relieve, clima, actividad biológica y tiempo. Como resultado de dicha interacción se generan diferentes procesos simples o complejos; los cuales consisten básicamente en pérdidas o ganancias de elementos tales como materia orgánica, líquidos y gases, por citar algunos. Estos procesos se pueden observar en su morfología y en sus características físicas y químicas.

Al variar los factores integrantes de un suelo: clima, vegetación, roca, topografía, etc. se obtienen los suelos de diferentes zonas, con características diversas y muy variadas; por ejemplo, en una zona plana rodeada de montañas que se inunda en una época del año, se formará un suelo que acumulará sales, que tendrá capas claras y con gravas, que no será bueno para fines agrícolas, por las sales que contenga, pero que podrá desarrollar algunos pas-

tos resistentes y permitir el aprovechamiento pecuario [Sampat A. Gavande, 1991].

Lo primero que se debe hacer es identificar las capas del suelo, analizando sus características, pues ellas determinarán su colocación dentro del sistema de clasificación; en función de ésta, cada grupo de suelos tendrá diferentes condiciones y usos.

El grado en cada una de las características resultantes de la acción de los factores formadores del suelo se manifiesten en las capas, es precisamente lo que sirve de base para la clasificación de los suelos. El análisis de las placas, tanto en sus aspectos morfológicos como en los físicos y químicos, permiten conocer sus peculiaridades, como drenaje, manejo agrícola, penetración de raíces, nutrientes y cantidad de arenas o de arcillas. Todas van íntimamente ligadas al uso y potencialidad del suelo [Héctor Magán, 2001].

Las propiedades físicas del suelo, junto con las químicas, biológicas y mineralógicas, determinan, entre otras, la productividad de los suelos. El conocimiento de las propiedades físicas permite conocer mejor las actividades agrícolas vitales, como el laboreo, la fertilización, el drenaje, la irrigación, la conservación de los suelos y aguas y el manejo de los residuos de las cosechas.

Considerando el suelo desde un punto de vista físico, se le puede definir como un sistema de gran complejidad, heterogéneo, disperso y trifásico (sólido, líquido y gaseoso). El sistema del suelo así definido muestra, como característica fundamental, un dinamismo intensivo, determinado por los efectos que provocan agentes tales como la temperatura, la luz, la presión total, el agua, los solutos y los organismos. La importancia de estudiar el comportamiento de los factores que influyen en el suelo sirve para desarrollar técnicas con que se puedan resolver los problemas de producción de cultivos. Es igualmente importante conocer las propiedades físicas que son mejores para las plantas que se cultivan en una área, en determinada condición climática y de manejo [Héctor Magán, 2001].

Muchas prácticas actuales de manejo se han creado basándose en observaciones burdas de campo sobre las respuestas de diferentes clases y frecuencias de aplicación de fertilizantes o riegos, etc. cuando esto implica necesariamente conocer por completo las relaciones suelo-planta-agua-atmósfera y varias prácticas de manejo.

La irrigación técnica, consiste hoy en día, en agregar el agua cuando el potencial de agua llega a un valor predeterminado, que se considera apropiada para un cultivo particular, bajo determinadas condiciones de suelo y clima. Las medidas de evaporación en tanques también están correlacionadas con

datos empíricos de evapotranspiración de una superficie del terreno. Esto se usa para indicar el momento en que el agua del suelo ha llegado a un contenido de agua correspondiente a un nivel crítico, de acuerdo con el potencial de agua en el suelo. Con estas medidas y prácticas cuidadosas de riego, es posible mantener el contenido de agua del suelo en nivel favorable para el crecimiento de la planta [Luis E. Rivera Martinez, 2001].

La contribución de la física de los suelos incluye las consideraciones detalladas de los factores que afectan el potencial del agua del suelo y su movimiento hasta la superficie de las raíces, así como la absorción del agua por las mismas.

Los aspectos físicos del medio ambiente interno y externo del suelo pueden afectar todo el desarrollo de la planta, desde la germinación hasta su maduración fisiológica. Esta es la razón por la que se debe estudiar primero, cómo se lleva a cabo el intercambio de agua, aire y calor entre el suelo y el medio ambiente externo; y, luego, que tan esencial es el papel que desempeñan el agua, aire, calor y nutrientes en el suelo. El abastecimiento satisfactorio de agua y oxígeno a la planta implica una relación compleja entre estado físico del suelo y crecimiento de la planta. Además, el abastecimiento de agua y oxígeno por el suelo, y las necesidades propias de la planta, son muy variables y ambos dependen, primero, del abastecimiento externo del agua y de ciertas características físicas del suelo y, segundo, de la etapa del crecimiento de la planta y de sus condiciones climáticas. El suelo modifica el abastecimiento externo del agua (lluvia, riego, condensación, etc.) mediante su capacidad para amortiguar cambios, determinado por las características de retención y transporte del agua en el suelo.

Durante estos últimos años se han llevado a cabo numerosos experimentos para comparar los efectos de las prácticas de manejo de suelo y de cultivos sobre los rendimientos. En la actualidad han sido colectados los datos de rendimientos. Pero los resultados de estos experimentos no se pueden aplicar en condiciones variadas de suelo y clima. En efecto, este tipo de experimentos se debe llevar a cabo por varios años para determinar las relaciones experimentales de causa y efecto de un determinado suelo y para un lugar en específico.

Se han establecido algunos principios para la predicción del rendimiento de los cultivos a partir de los parámetros del suelo. La información es muy escasa acerca de las interacciones entre el abastecimiento de fotosintatos a las raíces, esfuerzo del suelo, temperatura, humedad y otros factores del medio ambiente externo, y todavía mucho menos se conoce acerca de las condiciones

que existe alrededor de la punta de la raíz [Sampat A. Gavande, 1991]. En la actualidad existen técnicas que permiten realizar investigaciones de las condiciones microambientales alrededor de las raíces, tales como el termopar psicómetro, que sirve para medir el potencial de agua en el suelo y planta; los termistores o termopares, para medir la temperatura de suelo y planta, los microelectrodos, para medir la difusión de oxígeno; el penetrómetro de punta, para medir el índice del esfuerzo del suelo y microtécnicas, para medir la concentración de iones en soluciones de suelo. Con estas técnicas e instrumentos se pueden determinar las causas probables que alteran el patrón de crecimiento normal de las raíces.

Con el uso de radiación atómica se han creado mejores técnicas para evaluar su contenido de agua, sin alterar el suelo. En este tipo de medida del contenido de humedad, es posible hacer pruebas definitivas de las teorías del flujo de agua en diferentes situaciones complicadas. Se puede señalar el flujo del agua en condiciones donde puede existir un gradiente de temperatura y en donde los suelos pueden expandirse o contraerse.

Las radiaciones beta se están usando para medir el contenido de agua en las hojas de las plantas, por efecto de cambios en el medio ambiente dentro y fuera del suelo. Estas medidas, cuando son correlacionadas con las medidas de la deficiencia del agua en las plantas, usando un termopar psicómetro, pueden ser muy útiles para observar la deficiencia del agua sin destruir la planta.

### 2.1.1. Composición mecánica del suelo

En general, se puede afirmar que un suelo normal tiene tres fases: sólida, líquida y gaseosa. En condiciones ideales, el 50 % de los componentes deben corresponder a la fase sólida, del 15 % al 35 % a la fase líquida y del 15 % al 35 % a la fase gaseosa [Yanavilca, 2005]. Las variaciones en porcentaje de los dos últimos componentes se deben a la cantidad de agua presente. La fase sólida del suelo está formada por una asociación íntima de constituyentes orgánicos e inorgánicos. El conjunto de éstos forma el esqueleto del suelo, y la disposición o arreglo de las partículas sólidas determinan la porosidad, la estructura y la densidad aparentes del suelo. El tamaño de las partículas sólidas varía desde las coloidales pequeñísimas (menos de 0.5 micras) hasta las grabas gruesas y fragmentos rocosos como se muestra en la tabla 2.1, [Sampat A. Gavande, 1991].

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas mine-

	<b>Estados Unidos</b>	<b>Internacional</b>
<b>Fracción del suelo</b>	<b>Diámetro (<i>mm</i>)</b>	<b>Diámetro (<i>mm</i>)</b>
Arena muy Gruesa	2.00-1.00	Arena gruesa 2.00-0.20
Arena gruesa	1.00-0.50	Arena fina 0.20-0.02
Arena media	0.50-0.25	Limos 0.02-0.002
Arena fina	0.25-0.10	Arcilla menor de 0.002
Arena muy fina	0.10-0.05	
Limos	0.05-0.002	
Arcilla	menor de 0.002	

Tabla 2.1: Clasificación de las partículas de suelo según los sistemas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y de la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo [Sampat A. Gavande, 1991].

rales. Específicamente se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Esta propiedad ayuda a determinar no sólo la facilidad de abastecimiento de nutrientes, sino también agua y aire, tan importantes para la vida de las plantas.

### 2.1.2. Naturaleza Física del sistema agua-suelo

Los sistemas suelo y planta son similares en relación con la fase líquida. En ambos, el líquido está compuesto de agua y sustancias disueltas. Siempre hay algunas partículas iónicas en solución en el suelo. Algunas veces, estas partículas son sales libres y otras, iones intercambiables asociados con las arcillas y los coloides del suelo.

En su estado más común, el agua es un líquido sin color, olor ni sabor. Bajo condiciones naturales puede existir como vapor o como sólido; en realidad, con frecuencia se le encuentra simultáneamente en las tres fases. Las moléculas de agua tienen un diámetro de 3 unidades Angstrom ( $3 * 10^{-10} m$ ). Cada molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Los átomos de hidrógeno están orientados a un ángulo de  $105^\circ$  uno del otro. Debido a la distribución no balanceada de las cargas eléctricas en la molécula de agua, dicha molécula resulta polarizada, es decir, hay un lado de carga positiva y otro de carga negativa. Estas moléculas se llaman dipolares. Esta propiedad hace que el agua sea atraída a superficies eléctricamente activas

(cargadas), y resulta que el agua se absorbe fácilmente en la superficie de arcilla y otros coloides. Esta propiedad hace también que el agua resulte un buen solvente.

El suelo tiene la propiedad de retener agua contra la fuerza de gravedad que se manifiesta a través del drenaje; por lo tanto, se puede considerar como un almacén de agua. Las plantas no pueden sacar toda el agua del almacén. La cantidad de agua que queda después que las plantas se marchitan permanentemente varía mucho de un suelo a otro.

Se ha encontrado que, en su punto de marchitez, los suelos arenosos contienen muy poca agua en la zona radical, mientras que los suelos arcillosos contienen grandes cantidades de agua. Las arenas tienen partículas gruesas y mucha área superficial relativamente baja por unidad de masa de suelo. Por otra parte, las arcillas tienen grandes cantidades de partículas y mucha área superficial por unidad de masa de suelo, esto indica una relación directa entre el contenido de humedad en el punto de marchitez y el área superficial específica del suelo.

Los suelos arenosos, que tienen partículas grandes, también tendrán espacios porosos grandes y menos poros de tamaño pequeño que un suelo arcilloso constituido de partículas finas, esto también indica una relación entre el tamaño de los poros y el contenido de humedad en el punto de marchitez (o cualquier otro potencial dado). Estas dos relaciones están asociadas con dos interfaces importantes del suelo: a) interfase sólido-líquido, que ocurre en donde las partículas del suelo y las del agua se ponen en contacto y b) interfase aire-agua, que ocurre en donde la solución del suelo se pone en contacto con el aire mismo.

### 2.1.3. Estructura del suelo

El término estructura del suelo se ha usado para referirse a una gran diversidad de ideas, desde el punto de vista del crecimiento de las plantas; por lo tanto, la capacidad estructural del suelo se define como su capacidad para formar terrones espontáneamente y de que estos terrones se dividan en pedazos pequeños, granos o agregados, sin la intervención del hombre. Aunque hay muchas clases de agregados diferentes en la morfología del suelo, el granular es el más importante en la producción de cultivos; esta estructura granular es la que se considera como la más importante. Otra propiedad importante de la estructura del suelo, desde el punto de vista agrícola, es la capacidad que tienen los granos de retener su forma cuando se humedecen y

de permitir el paso del agua a través del suelo. A esta propiedad se le llama estabilidad estructural. Los granos de suelo deben tener suficiente estabilidad para que permitan el libre paso del agua y la entrada de aire conforme el agua sale.

#### 2.1.4. Características de la estructura del suelo en relación con el aire y el agua del suelo

La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas, debido a su influencia en el aire y agua del suelo; así mismo, perturba el movimiento mecánico de raíces y brotes, y las relaciones de temperatura en el suelo.

**Aire del suelo:** cuando la concentración de  $CO_2$  se torna muy alta y la de oxígeno muy baja, el crecimiento de las plantas se retarda. La velocidad de difusión de los gases en el suelo está en relación directa con la porosidad llena de aire. En tales condiciones, aun las plantas más tolerantes de las tierras altas siempre sufren por la aeración restringida del suelo.

**Agua del suelo:** la infiltración y la permeabilidad están íntimamente relacionadas con el tamaño de los poros y la estabilidad de las unidades estructurales del suelo. En los suelos que tienen grietas grandes, la infiltración puede ser alta, inicialmente. Sin embargo, la velocidad de la infiltración bajará tan pronto como las grietas grandes se llenen; luego el suelo se hincha y la velocidad se puede reducir hasta un valor cercano a cero.

En un suelo bien estructurado, toda o la mayor parte del agua que sale es reemplazada por aire en los espacios porosos. En suelos de estructura deficiente, la eliminación del agua puede ocasionar el encogimiento en tales suelos. La fuerza de retención y la facilidad relativa de remoción del agua del suelo, en el rango del crecimiento de las plantas, está en relación con el arreglo de los agregados finos del suelo llamado microestructura, que se manifiestan en la forma de las curvas de retención de humedad. La estructura más deseable es aquella en que las cantidades casi iguales de agua se liberan del suelo con disminuciones iguales del potencial [Sampat A. Gavande, 1991].

### 2.1.5. El agua del suelo

La humedad que contiene el suelo es pocas veces adecuada para el mejor desarrollo de las plantas. Algunos suelos son muy húmedos y todos carecen de humedad disponible, por lo cual hay que regarlos para obtener buenos rendimientos de las cosechas.

Dada su importancia, la clasificación, retención y movimiento del agua en el suelo ha llamado la atención de muchos investigadores durante el último siglo. En 1897, Briggs explicó el mecanismo de retención de la humedad del suelo en base a la hipótesis de los tubos capilares. Clasificó el agua como gravitacional, capilar e higroscópica basado en que la misma existía como una película continua y tensa alrededor de las partículas de suelo y su retención dependía del número y tamaño de los espacios capilares. El agua se mueve de las partículas gruesas a las finas y la rapidez del movimiento, esta relacionado con: la curvatura específica de las partículas, la tensión superficial y la viscosidad del líquido.

Diez años más tarde, Buckingham [Luis E. Rivera Martinez, 2001] propuso otra hipótesis relacionada con la retención y movimiento del agua en el suelo. Él imaginó el cuadro general de la relación suelo-agua en base a conceptos de energía. De ahí surgió el termino de Potencial Capilar para indicar la atracción que ejerce el suelo sobre el agua.

El movimiento y retención del agua del suelo se ha visualizado a la luz de este nuevo concepto de energía. Se han propuesto muchos diagramas para clasificar el agua del suelo. Un sistema extensamente utilizado distingue tres tipos principales: agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica. Esta clasificación es meramente física y la misma puede adaptarse luego al concepto moderno de energía libre asignando unos valores más o menos arbitrarios en la escala de tensión.

### 2.1.6. Clasificación del agua del suelo

Cuando el suelo se humedece por efecto de la lluvia o riego abundante, el agua llenará todos los espacios porosos creando una película gruesa alrededor de las partículas. Bajo estas condiciones se establece un estado de saturación por ello el agua no esta fuertemente adherida o retenida a las partículas del suelo. Si existen condiciones apropiadas de desagüe, comenzarán a vaciarse los poros no capilares en respuesta a la fuerza gravitacional. Cuando se vacían

todos los macroporos pero aún continúan llenos los poros capilares, se alcanza el punto denominado capacidad de campo. El agua contenida en el suelo entre su punto de saturación y la capacidad de campo se denomina agua gravitacional.

El agua gravitacional es indeseable desde el punto de vista agrícola. Ocupa la fracción del espacio poroso que bajo las condiciones óptimas de labranza debe ser ocupada por el aire. Como se retienen a tensiones bajas, puede ser rápidamente dispuesta a menos que lo impida alguna característica indeseable del suelo [Luis E. Rivera Martínez, 2001].

Luego que el suelo alcanza su capacidad de campo, el componente gravitacional deja de ser el factor principal del movimiento del agua siendo reemplazado por otros factores tales como la absorción por las raíces de las plantas y la evaporación. A medida que se extrae la humedad del suelo, disminuye el espesor de la película de agua alrededor de las partículas de suelo y aumenta su retención. Cuando la retención es excesiva, las plantas no son capaces de absorber suficiente agua a un ritmo lo suficientemente rápido como para reponer la pérdida por transpiración y comienza a marchitarse. Si las plantas son capaces de recuperar la marchitez al colocarse en una atmósfera saturada de humedad se dice que están en un estado de marchitez incipiente. Sin embargo, se alcanza un punto en que el contenido de agua del suelo es tan bajo que las hojas de las plantas no se recuperan de la marchitez aún cuando se colocan en una atmósfera saturada. El contenido del agua del suelo a este punto se le denomina por ciento de marchitez permanente. Este punto se considera una constante del suelo y varía ligeramente con la habilidad de la planta para absorber agua.

El agua que permanece en el suelo cuando ocurre la marchitez permanente no está disponible a las plantas.

### **2.1.7. Almacenamiento de agua en el suelo**

El suelo está compuesto de partículas sólidas de muchas formas y tamaños, entremezcladas con espacios porosos que puedan llenarse con cantidades recíprocas variables de solución del suelo o de aire, de acuerdo con la situación de humedad, ver Figura 2.1. Algunas veces se ha supuesto que toda el agua que entra en el suelo se almacena y, posteriormente, las plantas la usan. Este concepto ha conducido a la idea de que cuando se cubre la capacidad de almacenamiento no entrará más agua en el suelo. No es raro encontrar que algunos agricultores aplican agua libre en exceso durante la primavera, con la creen-

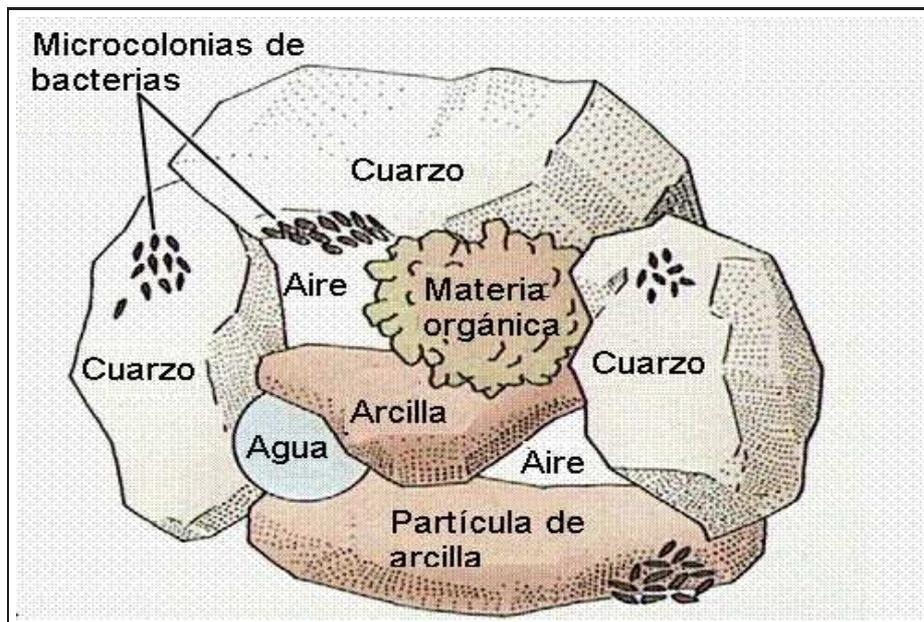


Figura 2.1: Compuestos del suelo

cia errónea de que se almacena para uso futuro de las plantas. De ello resulta un considerable desperdicio de agua, lixiviación de sustancias nutritivas del suelo y formación de áreas anegadas y salinas en regiones irrigadas. Como se ve en la Figura 2.2, teóricamente se conceden todos los componentes del balance de agua, muchos de los cuales son difícil de observar. La cantidad de agua disponible (agua almacenada) depende de las condiciones atmosféricas prevaletientes, que complica el problema de la evapotranspiración fuera de la gran variabilidad de la precipitación pluvial a ciertas distancias en zonas montañosas [Sampat A. Gavande, 1991]. Para determinar el balance hídrico se utiliza la ecuación 2.1.

$$P \pm R - U - E + \nabla\omega = 0 \quad (2.1)$$

donde:

$P$ : Precipitación

$R$ : Esguerrimiento superficial y subterráneo

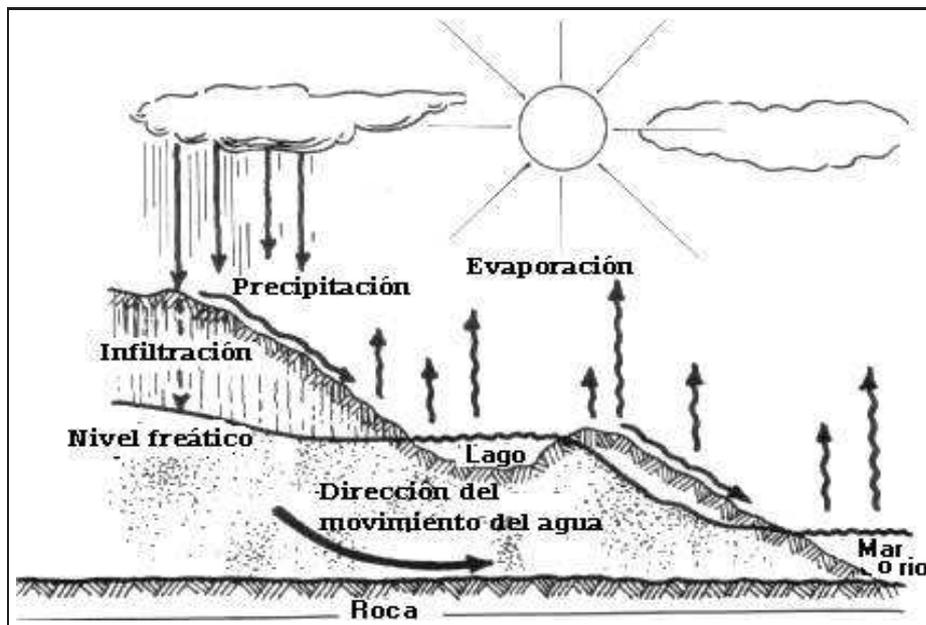


Figura 2.2: Ciclo Hidrológico

$U$ : Drenaje, percolación

$E$ : Evapotranspiración (planta + suelo)

$\nabla\omega$ : Agua almacenada (mm), diferencia entre el principio y el final del periodo en la profundidad principal de las raíces

Durante períodos secos, cuando la evapotranspiración es crítica, se puede tomar la ecuación 2.2.

$$P \pm R - U = 0 \quad (2.2)$$

y por consiguiente,

$$E = \nabla\omega \quad (2.3)$$

Por definición,

$$\nabla\omega = P \pm R - U \quad (2.4)$$

es el agua almacenada en el suelo durante los períodos lluviosos anteriores. En consecuencia, se puede tomar la ecuación 2.5.

$$P \pm R - U = E \quad (2.5)$$

para el agua almacenada durante el período vegetativo y la medición directa es, generalmente, la medida de  $\nabla\omega$ .

### 2.1.8. Contenido de agua en el suelo

En la Figura 2.3 se ilustra el concepto de que el suelo es un reservorio de agua, y muestra una unidad de volumen aparente de suelo en que las partículas sólidas se han agrupado en un lugar y el espacio poroso está lleno con cantidades recíprocas variables de agua y gas. El espacio poroso está constituido por todo el volumen aparente no ocupado por los sólidos. Los distintos parámetros que influyen en la interacción entre agua y suelo se pueden medir de la siguiente manera:

#### Fracción de humedad del suelo

$$= \frac{MA}{MA + MS} \quad (2.6)$$

#### % de humedad del suelo

$$= \frac{MA(100)}{MS} \quad (2.7)$$

#### Proporción de agua

$$= \frac{VA}{VS} \quad (2.8)$$

#### Densidad aparente del suelo

$$= \frac{MS}{VS} \quad (2.9)$$

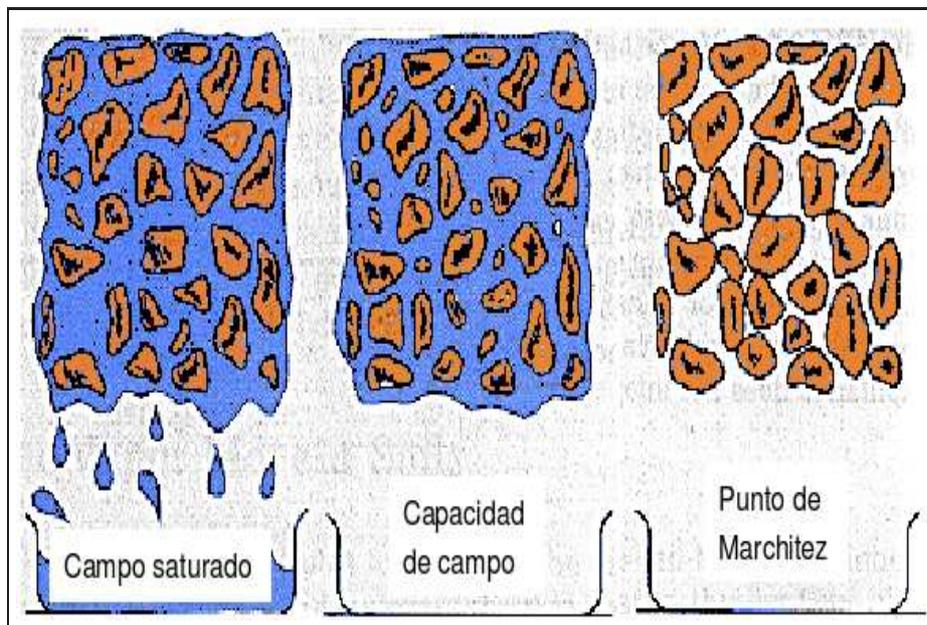


Figura 2.3: Agua en el suelo

**Porosidad del suelo**

$$= \frac{VP_T}{VS} \quad (2.10)$$

**Capacidad de retención de agua**

$$= \frac{MA_{SS}}{P_{SS}} \quad (2.11)$$

**Porosidad de aeración**

$$= \frac{VS_A}{VS} \quad (2.12)$$

**Capacidad de aeración**

$$= \frac{VAC}{VS} \quad (2.13)$$

donde:

$MA$ : Masa de agua

$MS$ : Masa del suelo

$VA$ : Volumen de agua

$VS$ : Volumen aparente de suelo

$VP_T$ : Volumen poroso total

$MA_{SS}$ : Masa de agua con suelo saturado

$P_{SS}$ : Peso seco del suelo

$VS_A$ : Volumen del suelo lleno de aire

$VAC$ : Volumen lleno de aire a la capacidad de campo

Los suelos de textura fina, como las arcillas, tienen un total de poros mayor que los ordinarios. Aunque los poros individuales son, generalmente, más pequeños, hay mucho más poros y el resultado neto es una porosidad total mayor en los suelos finos. Por lo tanto, en el estado de saturación, los suelos de textura fina contienen mayor cantidad de agua que los de textura ordinaria.

### 2.1.9. Constantes de la humedad del suelo

Para la descripción de aspectos particulares de la humedad del suelo se han usado numerosos términos y constantes.

**Capacidad de campo (CP):** Este concepto es útil para realizar cálculos prácticos de cantidades aprovechables de agua. La capacidad de campo se define como la cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad cuando se le deja drenar libremente.

**Punto de marchitez permanente (PMP):** Se conoce como tal al porcentaje o punto del agua del suelo cuando las plantas se marchitan permanentemente. El PMP se determina cultivando plantas hasta el tamaño deseable en un recipiente pequeño. Al igual que la capacidad de campo, el término de punto de marchitez es un término dinámico y debe considerarse como una región del contenido de humedad.

Como la capacidad de campo, el término PMP es característica del perfil, que incluye no solamente la cantidad de agua en el suelo a varias profundidades, sino también la velocidad con que el agua se moviliza a las raíces de la planta. Considera no sólo la superficie del suelo, sino todo el suelo en el que crecen las raíces de las plantas.

### 2.1.10. Energía de retención y liberación de agua

El agua retenida en el suelo y en capilares por las fuerzas de atracción en la interfase sólido-líquido, o por los iones absorbidos, se libera en el momento en que las fuerzas de retención de agua excedan a las de retención. Una diferencia de la energía termodinámica libre puede ser la causa de la remoción de agua de un suelo, de acuerdo con una modificación de la ecuación de Gibbs [Sampat A. Gavande, 1991]:

$$\Delta_{\mu\omega} = \frac{\partial\psi}{\partial T_{PN_jN_\omega}} \Delta T + \frac{\partial\psi}{\partial P_{TN_\omega N_j}} \Delta P + \frac{\partial\psi}{\partial N_\omega_{P.T.N_j}} \Delta N_\omega + \sum_j \frac{\partial\psi}{\partial N_j_{PTN_\omega}} \Delta N_j \quad (2.14)$$

donde:

$\Delta_{\mu\omega}$  = Diferencia de potencial del agua del suelo y de agua pura a la misma temperatura

$N_\omega$  = Fracción de masa o concentración de agua en el sistema

$N_j$  = Fracción de masa del componente J

El potencial de agua parece depender de la temperatura  $T$ , la presión  $P$ , el contenido de agua  $N_\omega$  y la composición del sistema  $N_j$ . Cada uno de estos términos influye en el potencial de agua, independientemente de todos los demás.

### 2.1.11. Tensión de humedad del agua del suelo y curvas de retención de agua

La tensión de humedad es una medida utilizada para determinar la fuerza con la cual esta retenida el agua a las partículas del suelo. Cuando aumenta la tensión disminuye el espesor de la película de agua. Es más fácil extraer agua de películas gruesas de humedad mientras es necesaria una tensión elevada para extraer agua de películas delgadas. Como se indicó existe una relación inversa entre la tensión y el porcentaje de humedad del suelo. Cuanto mayor sea la tensión aplicada menor será el porcentaje de humedad retenida en el suelo. En términos prácticos, se debe evitar que el potencial de agua en el suelo alcance el punto de marchitez. La curva de retención de agua nos provee esta información, ya que describe la relación entre la tensión hidrostática y la

cantidad presente en el suelo. Existe una curva de retención para cada tipo de suelo como se observa en la Figura 2.4 y se determina por medio de un aparato denominado membrana de presión.

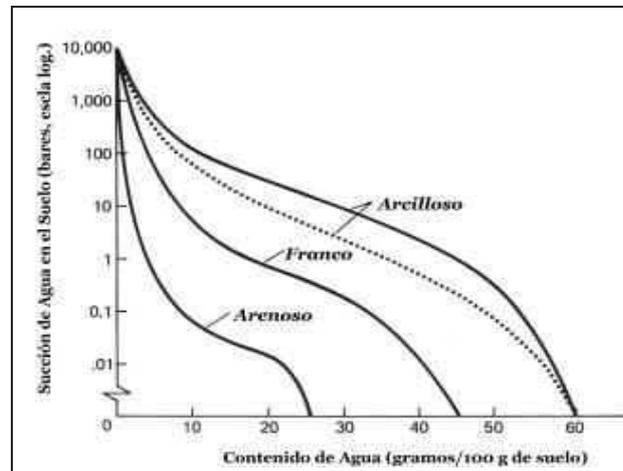


Figura 2.4: Curvas de Retención de Humedad del Suelo en tres suelos minerales representativos [N. Brady, 1990].

### 2.1.12. Influencia de la temperatura

Desde hace mucho tiempo se sabe que el agua se mueve de un suelo caliente a uno frío. Este conocimiento se obtuvo de algunas pruebas de que el potencial de agua es más alto en suelos fríos. La influencia de la temperatura del sistema en la retención de agua puede estudiarse en sistemas en equilibrio, midiendo presión, contenido de humedad y composición constantes. Otros factores que influyen en el sistema de retención de agua son: presión, matriz del suelo, densidad aparente, estratificación, solutos, espesor de la película de agua, estructura del suelo, etc.

### 2.1.13. Componentes del potencial de agua y terminología de relaciones Suelo-Planta-Agua

Dos de los términos constantes fueron aceptados casi universalmente hace muchos años. Así, la capacidad del campo (CC) y el porcentaje de marchitez (PMP) se consideraron, durante muchos años, como límite superior e inferior

del agua del suelo aprovechable por las plantas. Basándose en el trabajo de Briggs y Shantz (1912) [Sampat A. Gavande, 1991] se ha considerado como invariable en contenido aprovechable de humedad de un suelo en su punto de marchitez permanente, cualquiera que sea la especie de planta, sus condiciones y las condiciones meteorológicas del medio ambiente.

Sin embargo, hoy en día se sabe que, de acuerdo con muchas investigaciones, como por ejemplo la de Slatyer (1957) [Sampat A. Gavande, 1991], el PMP está determinado más por la característica osmótica de la planta que por las características del suelo. Existen ahora suficientes pruebas experimentales para poder afirmar que las plantas pueden absorber agua fuera de ambos límites (CC y PMP) [Sampat A. Gavande, 1991].

Como se mencionó anteriormente, el movimiento y la retención del agua en el suelo se han visualizado de un nuevo concepto de energía. De ahí surge que el potencial suelo-agua reemplaza la caracterización y clasificación arbitraria del agua del suelo (gravitacional, capilar e higroscópica). Lo cierto es que toda el agua es afectada por el campo gravitacional de la tierra y las leyes de capilaridad del suelo no comienzan o terminan un valor dado de humedad o en un tamaño específico de poro. El agua difiere de un sitio a otro y a través del tiempo en términos de su estado de energía. El agua está presente en el suelo de varias formas: como agua de hidratación de los coloides; como agua libre y como vapor de agua. En términos físicos la solución del suelo, al igual que otros cuerpos naturales, contiene energía en diferentes cantidades y formas. Se reconocen dos formas principales: la cinética o energía de movimiento y la potencial o energía de reposo.

Dado que el movimiento del agua en el suelo es muy lento, su energía cinética es generalmente considerada como insignificante. En otras palabras, la energía potencial que se debe a la posición o condición interna del agua es de primera importancia. Por esto, la forma más efectiva de expresar el contenido de humedad del suelo, su retención, movimiento y disponibilidad de las plantas es en términos de su estado de energía libre por unidad de masa, lo cual se le denomina como potencial. La energía libre es un término que describe la energía disponible que tiene un cuerpo para el trabajo.

Según se extrae el agua del suelo por efecto de la transpiración, evaporación o infiltración, aumenta el estado de energía potencial. A medida que esto ocurre, la planta tiene que ejercer un esfuerzo mayor para extraer el próximo incremento de humedad disponible. Ello implica que la habilidad de la raíz para absorber la humedad del suelo está directamente relacionada con el potencial total del agua.

El agua al igual que cualquier otro cuerpo natural no se mueve en contra del gradiente de energía, sino que se mueve en respuesta al gradiente de energía. En términos generales es extremadamente difícil conocer el contenido absoluto de energía libre de una sustancia dada como lo es el agua del suelo. Solo se puede saber la diferencia entre la energía libre del agua del suelo en un estado dado y la energía libre del agua en un estado de referencia conocido. En el caso de agua líquida, el estado de referencia será un suelo saturado con agua pura a temperatura y presión ambiental y una altura de referencia conocida. La energía del agua del suelo a cualquier otro estado y elevación se caracteriza como la diferencia entre la energía del agua en el estado dado y la energía del agua en el estado de referencia. Esta diferencia se conoce como potencial del agua.

#### 2.1.14. Componentes del potencial de agua en el suelo

El potencial total de agua en el suelo consiste en una serie de componentes individuales que pueden alterar la energía libre o potencial del agua del suelo. A continuación se mencionan los más importantes:

**Potencial gravitacional:** Se refiere al efecto que ejerce la fuerza de gravedad sobre la energía libre del agua del suelo.

**Potencial de presión:** Incluye el efecto que tiene un aumento o disminución de presión en la energía libre del agua del suelo. La presión del agua líquida del suelo puede cambiar debido a los siguientes factores: succión capilar, presión hidrostática en agua estacionaria bajo un nivel freático, presión de agua inducida por flujo, potencial de presión inducida.

**Potencial osmótica:** Se refiere al efecto que tienen las sales solubles en la energía libre del agua al suelo y el efecto que tienen las diferencias en las disociaciones de iones absorbidos sobre la superficie de las partículas coloidales como la arcilla y la materia orgánica.

**Potencial matriz:** Es una expresión de las diferentes atracciones físico-químicas entre el agua y las partículas del suelo.

### 2.1.15. Evaluación del agua del suelo

#### Disponibilidad de agua a las plantas

El agua disponible es aquella que se encuentra a disposición de la planta entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. No se debe permitir que la planta disminuya el porcentaje de humedad del suelo hasta el punto de marchitez, ya que en tales condiciones la producción disminuirá. El sistema radicular de las plantas no es homogéneo. Generalmente la raíz es ramificada y ancha en la capa superior y va estrechándose hacia abajo.

Por consiguiente, el aprovechamiento de la humedad a diferentes profundidades de la zona de la raíz estará desigualmente distribuido. Cuando la planta haya aprovechado toda el agua de la capa 0.30 cm de suelo (por ejemplo) continuará absorbiendo agua de capas más profundas. Sin embargo, la superficie de absorción de las raíces disminuirá, ya que habrá una menor cantidad de raíces en contacto con el agua disponible.

La absorción de agua por las raíces compensa las pérdidas debido a la transpiración por las hojas. Si el agua disponible en el suelo es poca, o la superficie de absorción de las raíces es reducida, ocurrirá un marchitamiento temporal de la planta durante las horas de calor y sequía. Esta condición desaparece al atender si el ritmo de absorción es suficiente para abastecer la cantidad de agua determinada por el ritmo de transpiración.

#### Razones para medir el agua del suelo

Hay dos objetivos principales para medir la cantidad de agua contenida en el suelo. La primera es determinar el contenido de humedad de un suelo (cantidad contenida en una unidad de masa o volumen de suelo). Esta información es necesaria para calcular el agua que se necesita para restaurar la humedad del suelo a la capacidad de campo; también es necesaria cuando hace falta conocer la cantidad de agua del suelo para propósitos de ingeniería de suelo. El segundo objetivo es determinar la magnitud del potencial del agua del suelo, que es la cantidad de trabajo necesario para remover una cantidad equivalente a una unidad de agua retenida más flojamente. La respuesta de la planta a la humedad parece estar relacionada más estrechamente con el potencial de agua que con cualquier otro factor simple, aún cuando la velocidad del movimiento del agua hacia las raíces absorbentes sea un aspecto importante. A su vez, la velocidad de este movimiento está muy relacionado con el potencial. Por lo tanto muchas propiedades del suelo, desde el punto

de vista de la ingeniería, están más íntimamente relacionadas con el potencial de agua que con la cantidad de ella. Es útil que los agricultores que aplican riego conozcan también el potencial de agua, ya que éste indica directamente cuándo debe regarse.

### **2.1.16. Métodos para evaluar el contenido de humedad en suelo**

A través de los años se han desarrollado métodos e instrumentos de varios tipos para determinar la humedad del suelo. La mayoría de estos consisten en medir algunas de las propiedades del suelo que se alteran con cambios en el contenido de humedad. De esta forma ayudan en la determinación de la disponibilidad del agua en las plantas. Esta información sirve de guía al agricultor o empresario agrícola a determinar la necesidad de riego de cultivos. La misma es de suma utilidad para realizar un manejo de riego eficiente que proporcione las cantidades adecuadas de humedad [Luis E. Rivera Martínez, 2001].

- Apariencia visual y táctil al suelo
- Gravimétrico
- Tensiómetro
- Método de medición de resistencia eléctrica
- Dispersor de neutrones
- Sensores

## **2.2. Sensores**

A la hora de dar una definición universal del término sensor no existe un acuerdo, e incluso hay ciertas discrepancias entre ciertos autores. La definición de sensor se puede interpretar como un dispositivo capaz de registrar de forma directa, continua irreversible un parámetro físico (sensor físico) o la concentración de una especie química (sensor químico) [Conde, 2008].

En esta definición aparecen las palabras claves continua y reversible, que

implican que un sensor ideal, debe proporcionar lecturas en tiempo real. Esta característica intrínseca con el término sensor, generalmente es fácil de cumplir en los sensores físicos, mientras que en los sensores químicos entraña una mayor dificultad.

La mayoría de los sensores químicos utilizan una reacción para reconocer la especie a analizar y esta reacción en muchas ocasiones no es reversible; en este, los dispositivos desarrollados pueden ser de un único uso (desechables), pueden tener una reserva de reactivo dando una señal acumulativa o pueden regenerarse cada cierto número de medidas. Todos ellos se denominan con el término genérico de sensor, si bien muchos investigadores creen que debe marcarse una gran diferencia entre éstos y aquellos, por ello a estos últimos los denominan sondas.

La búsqueda de estos sensores artificiales no es actual, basta fijarse en algunos dispositivos utilizados de forma rutinaria desde hace más de 80 años, como el termómetro de mercurio, el electrodo de vidrio o las tiras de papel para la medida del pH (como ejemplos característicos de sensores físicos, electroquímico y ópticos, respectivamente). Sin embargo, en los últimos 20 años cuando los investigadores y la tecnología han dedicado y dedican un esfuerzo muy considerable al desarrollo de esta línea de investigación.

Los sensores químicos que responden a una especie química concreta constan generalmente de tres partes básicas: una zona de reconocimiento químico capaz de interactuar selectivamente con la especie de interés, un elemento transductor que transforma la información química en información física (generalmente una señal eléctrica u óptica) y un sistema electrónico de amplificación y procesamiento de la señal con objeto de obtener los resultados en las unidades de interés. La respuesta obtenida da lugar a diferentes tipos de sensores. Los electroquímicos se basan en la medida de la corriente eléctrica generada entre dos electrodos sumergidos en el medio a analizar, estos dispositivos constituyen un amplio capítulo en el área de las medidas de monitorización.

Los sensores piezoeléctricos se basan en las variaciones en la frecuencia de oscilación de un cristal piezoeléctrico, en función de la masa de determinados materiales depositados sobre dicho cristal. La medida de calor puesto en juego en ciertas reacciones químicas se utiliza para cuantificar algunos analitos dando lugar a los sensores térmicos. Si el estímulo físico o químico causa alteraciones en las propiedades ópticas de la zona de reconocimiento del sensor, se genera una señal óptica dando lugar a dispositivos optrodos (de óptico y electrodo) u optodo (paso óptico).

Las denominaciones optrodo u optodo se introdujeron por primera vez en 1975 por los investigadores alemanes Optiz y Lubbers para nombrar a un dispositivo óptico diseñado por ellos, para monitorear  $CO_2$ .

Por otra parte, la utilización de fibra óptica posibilita la detección y cuantificación remota de diversos analitos. Este tipo de detección se ha utilizado desde los años 70 para la monitorización por vía óptica de contaminantes ambientales, pero esta técnica supone necesariamente el empleo de una fuente de radiación coherente, de alta intensidad y direccionalidad, como es el láser, y que el analito tenga propiedades ópticas inherentes. El uso de la fibra óptica como guía de la radiación desde la fuente hasta la muestra y desde ésta al detector, evita los inconvenientes de la detección remota por láser antes mencionados.

### 2.3. Clasificación de los sensores

La complejidad de los sensores ópticos varía considerablemente en función de los requisitos que se les impongan [Francisco J. Arregui and Claus, 2002] [Wesley Kunzler and Laylor, 2004] [Argha Banorjee and Verma, 2006], esto hace que haya en el mercado una enorme variedad de dispositivos que responden al término genérico de sensor. Esta pluralidad hace difícil realizar una única clasificación de los mismos. A continuación se exponen las más utilizadas, atendiendo a diversos aspectos [Conde, 2008] [R. Narayanaswamy and Wolfbeis, 2004].

En función de la naturaleza del parámetro a medir, se dividen en:

**Sensores químicos:** Son los que responden a una especie química en particular, como pH, iones, gases, etc. En este conjunto se incluyen, como grupo especial, los biosensores (dispositivos basados en el empleo de biomoléculas).

**Sensores físicos:** Son aquellos que determinan parámetros físicos como temperatura, presión, espesor, tamaño de partícula.

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, los sensores se clasifican de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacidad, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o con otros tipos no incluidos en los grupos anteriores [Luca Cernuzzi, 2002].

**Resistivos:** Entre los cuales se encuentran los potenciómetros, detectores de temperatura resistivos (RTD), termistores, magnetorresistencias, fotoresistencias (LDR), higrómetros resistivos, resistencias semiconductoras para detección de gases.

**Resonancia:** Sensores capacitivos e inductivos.

**Electromagnéticos:** Sensores electromagnéticos.

**Generadores:** Sensores termoelectricos, piezoeléctricos, piroeléctricos, fotovoltaicos y electroquímicos.

**Digitales:** Codificadores de posición, sensores autorresonantes.

**Fotoeléctricos:** Sensores ópticos que manipulan la luz de forma a detectar la presencia del accionador.

En función de la naturaleza de la propiedad óptica medida [Ramaier N. and Otto S. Wolfbeis, 2004] [R. Narayanaswamy and Wolfbeis, 2004], se dividen como se muestra en la Figura 2.5. Según la función que

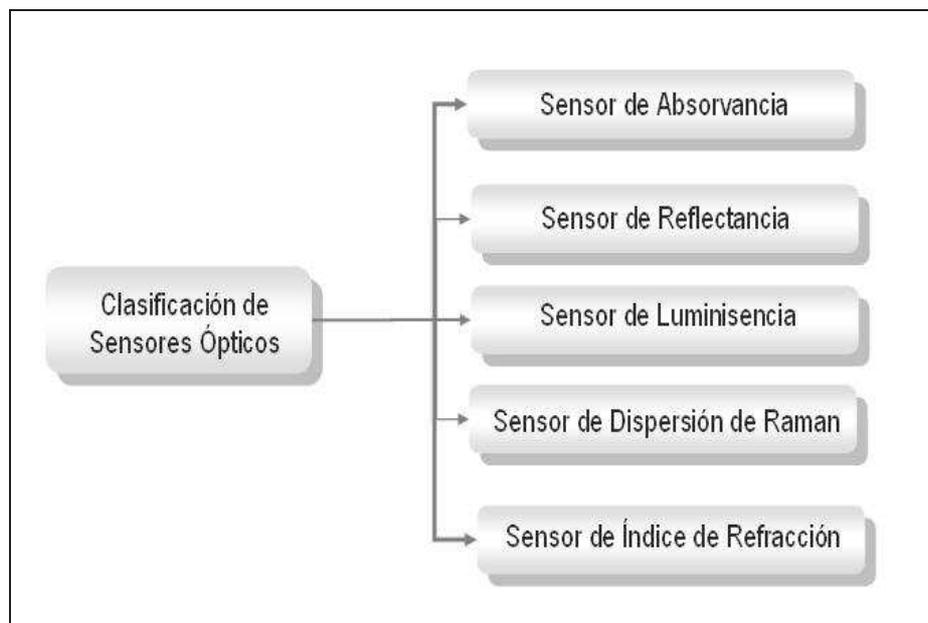


Figura 2.5: Sensores Ópticos

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Peso	Alto costo
Tamaño reducido	
Bajo consumo	
Pasivos	
Inmunidad a interferencia electromagnética	
Alta sensibilidad	
Ancho de banda	

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de los sensores ópticos

ejerce la fibra óptica, los sensores son básicamente clasificados en dos grupos: intrínsecos y extrínsecos.

**Sensores intrínsecos:** En estos sensores la fibra óptica únicamente sirve o es utilizada como guía de luz.

**Sensores extrínsecos o híbridos:** Estos sensores se basan en la modificación de las propiedades que experimenta la luz que se propaga a través de la fibra óptica debido a las propiedades de la fibra, [Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin, 2008] [Ting-Chung Poon and Taegeun Kim, 2006] [Ramaier N. and Otto S. Wolfbeis, 2004].

En la tabla 2.2 se muestran las principales ventajas que presentan los sensores basados en fibra óptica [Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin, 2008].

## 2.4. Comunicaciones utilizando luz

Por miles de años se ha utilizado la luz como medio de comunicación, por ejemplo: las acogedoras fogatas para guiarse al hogar y mantener los animales silvestres apartados. Se encendían las hogueras en las colinas como señales de alerta a los pueblos de posibles amenazas de invasión. Incluso en estos días de alta tecnología de las comunicaciones por satélite, los barcos utilizan desde potentes lámparas de señalización en el mar hasta espejos reflectores de luz para comunicarse y salvaguardar vidas.

Se ha demostrado que la luz viaja en línea recta, sin embargo al ser inducida en un medio ésta modifica su trayectoria según las características del

medio. En 1870 el Físico irlandés John Tyndall demostró públicamente como se muestra en la Figura 2.6 con un experimento que no sólo desmiente esta creencia, si no que también originó una revolución a la tecnología de las comunicaciones [Crisp and Elliot, 2005].

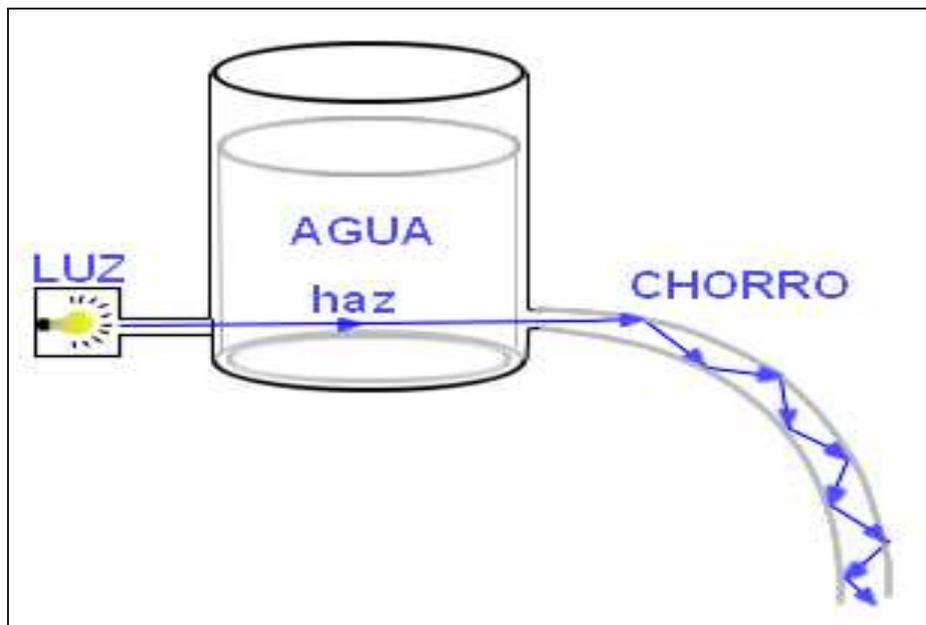


Figura 2.6: Experimento de John Tyndall

En los últimos 20 años el producto de dos grandes revoluciones a tenido lugar debido al crecimiento de la optoelectrónica y la industria de comunicaciones por fibra óptica [Frank L. Pedrotti and Leno S. Pedrotti, 1987].

Últimamente en muchos ámbitos tecnológicos se escucha hablar de la fibra óptica y de las ventajas que ésta tiene sobre tecnologías anteriores [Mool C. Gupta and John Ballato, 2007]. De ahí la necesidad de exponer ideas básicas ¿qué es?, y por tanto, ¿de dónde salen las ventajas que ofrece? y ¿cual es la importancia que tiene?.

Desde su entrada al mercado libre la fibra óptica ha evolucionado y encontrado una gran aceptación en el campo de las telecomunicaciones debido a que se ha logrado satisfacer muchas de las necesidades presentadas; así se busca que la fibra óptica pueda llevar un mayor número de longitudes de onda sobre distancias cada vez más largas.

Desde sus inicios algunas fibras ópticas lograron encontrar uso en algunas

aplicaciones determinadas, pero con el pasar de los años nuevas demandas han sido presentadas, lo cual ha resultado en un gran mejoramiento rumbo al perfeccionamiento y la especialización de las fibras ópticas [Eugene R. Bartlett, 2005].

La historia de la comunicación por fibra óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material.

Antes, en 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura [Rodríguez, 1997].

Sin embargo, esta utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en la fuente denominada láser.

Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica dirigieron sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la fibra óptica. En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación.

Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata en realidad de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros.

El concepto de las comunicaciones por ondas luminosas ha sido conocido por muchos años; sin embargo, no fue hasta mediados de los años setenta que se publicaron los resultados del trabajo teórico. Estos indicaban que era posible confinar un haz luminoso en una fibra transparente flexible y proveer así un análogo óptico de la señalización por alambres electrónicamente.

El problema técnico que se había de resolver para el avance de la fibra óptica residía en las fibras mismas, que absorbían luz que dificultaba el proceso. Para la comunicación práctica, la fibra óptica debe transmitir señales luminosas estables por muchos kilómetros. El vidrio ordinario tiene un haz luminoso de pocos metros. Se han desarrollado nuevos vidrios muy puros con transparencias mucho mayores que la del vidrio ordinario. Estos vidrios empezaron a producirse a principios de los setenta. Este gran avance dio ímpetu a la indus-

tria de fibras ópticas. Se usaron láseres o diodos emisores de luz como fuente luminosa en los cables de fibras ópticas. Ambos han de ser miniaturizados para componentes de sistemas fibro-ópticos, lo que ha exigido considerable labor de investigación y desarrollo. Los láseres generan luz coherente intensa que permanece en un camino sumamente estrecho. Los diodos emiten luz incoherente que ni es fuerte ni concentrada. Lo que se debe usar depende de los requisitos técnicos para diseñar el circuito de fibras ópticas dado [Francisco J. Duarte, 2003][Frank L. Pedrotti and Leno S. Pedrotti, 1987].

Dentro de los sensores intrínsecos existen varias técnicas para el sensado de la variable a medir, algunos ejemplos pueden ser utilizando rejillas de bragg [W. W. Morey, 1989], interferómetros [Dandridge and Kersey, 1988], por análisis espectrales etc., pero, para el desarrollo de este proyecto se utilizará la técnica de medición de la retrodispersión de la señal o la señal reflejada. Esta técnica consiste en medir las variaciones causadas en la señal retrodispersada como consecuencia de las modificaciones en la muestra a estudiar por la presencia del parámetro a medir.

## 2.5. Fibras Ópticas

Como se mencionó en el capítulo anterior, un sistema de comunicaciones es básicamente un sistema que está constituido por un transmisor óptico, un receptor óptico y fibra óptica.

### 2.5.1. Conceptos y definiciones de fibras ópticas

**Índice de refracción:** La luz se mueve a la velocidad de la luz en el vacío, sin embargo, cuando se propaga en cualquier otro medio, la velocidad es menor. Así, cuando la luz pasa de propagarse por un cierto medio a propagarse por otro medio, su velocidad cambia, sufriendo además efectos de reflexión y de refracción.

Dependiendo de la velocidad con que se propague la luz en un medio o material, se le asigna un índice de refracción  $n$ , número deducido de dividir la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en dicho medio. Los efectos de reflexión y refracción que se dan entre dos medios dependen de sus índices de refracción, la ley más importante para la refracción se muestra en la ecuación 2.15, la cual es conocida

como la ley de snell [Hecht, 2000].

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.15)$$

Donde  $n_i$  y  $n_t$  corresponden a los índices de refracción de cada uno de los medios por donde se propaga el rayo de luz,  $\theta_i$  es el ángulo del rayo reflejado y  $\theta_t$  es el ángulo del rayo transmitido ó refractado.

Esta fórmula dice que el índice de refracción del primer medio, por el seno del ángulo con el que incide la luz en el segundo medio, es igual al índice del segundo medio por el seno del ángulo con el que sale propagada la luz en el segundo medio. Ver Figura 2.7.

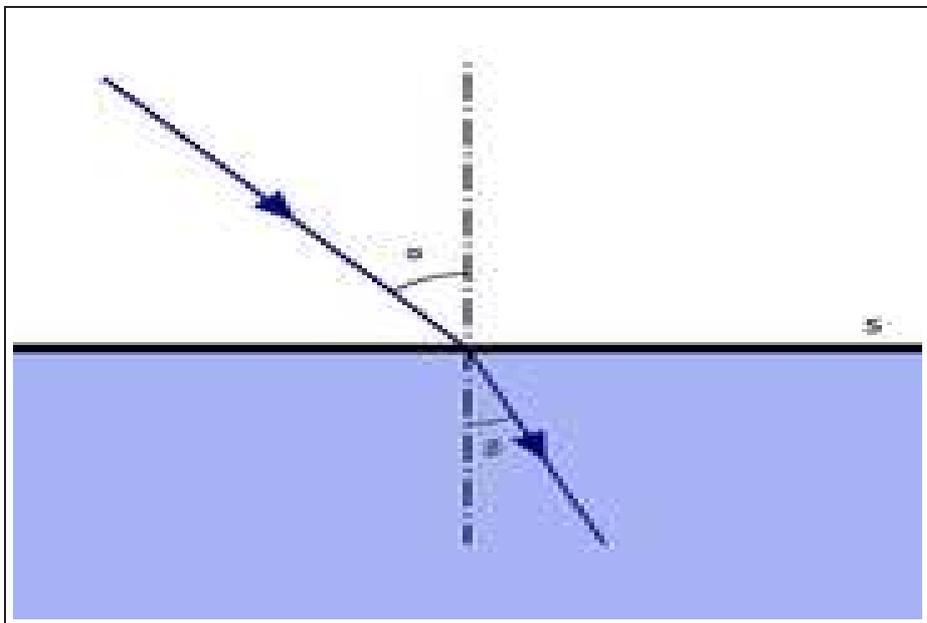


Figura 2.7: Índice de refracción

**Reflexión:** Es el fenómeno por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie es reflejado. El ángulo con la normal a esa superficie que forman los rayos incidente y reflejado son iguales [Hecht, 2000]. Ver Figura 2.8. Viendo el fenómeno desde adentro de la fibra se observaría de la siguiente manera: Ver Figura 2.9.

**Dispersión:** Es el ensanchamiento que experimenta el pulso cuando se desplaza en la fibra, esta limita el ancho de banda en la fibra [Hecht, 2000]

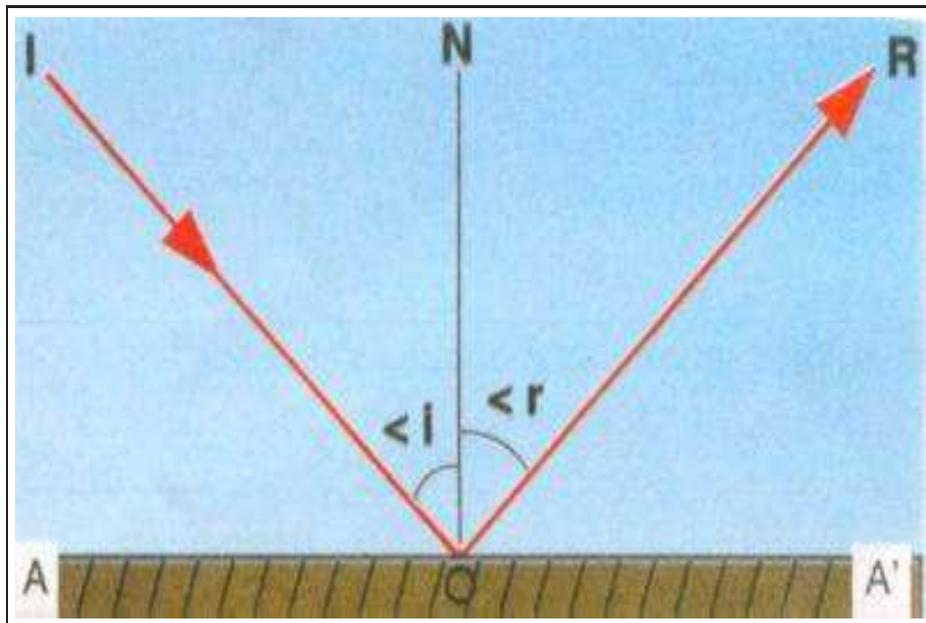


Figura 2.8: Fenómeno de reflexión

Ver Figura 2.10. Los tres tipos principales de dispersión son:

**Dispersión modal:** Se debe a las diferentes trayectorias de la señal en la fibra óptica, esta se presenta solo en la fibra multimodo y se puede reducir de las siguientes tres maneras [Crisp and Elliot, 2005].

- Utilizar fibras cuyo núcleo tenga un diámetro pequeño, el cual permitirá la propagación de pocos modos.
- Utilizar fibras de índice gradual las cuales evitan que la señal sufra un ensanchamiento debido al retardo de propagación de los modos.
- Utilizar fibra monomodo, en la cual no se presenta la dispersión modal.

**Dispersión del material:** Esta se presenta debido a que las diferentes longitudes de onda viajan con diferentes velocidades a través de la fibra. La ecuación 2.16 expresa la relación entre el índice de refracción del

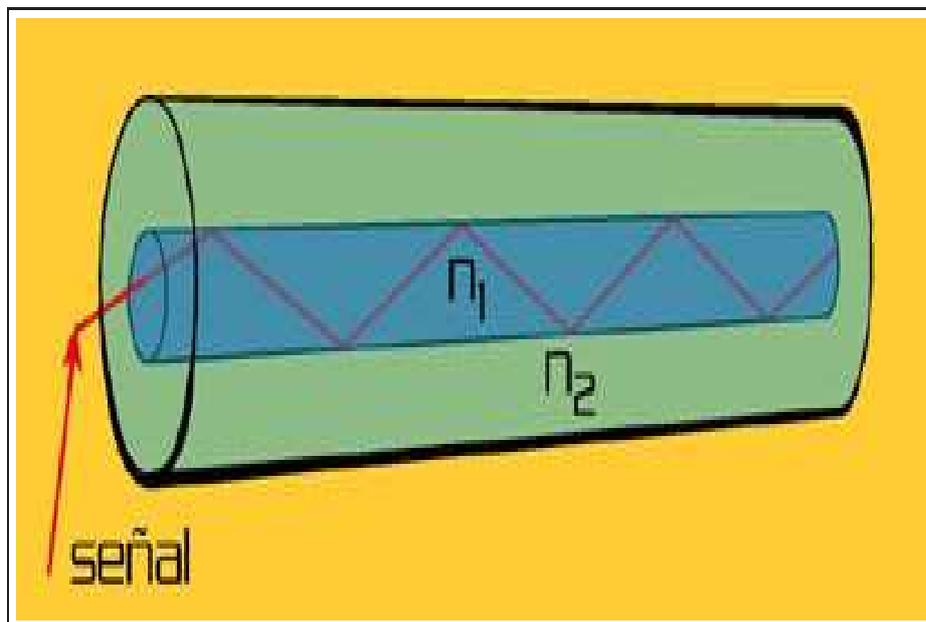


Figura 2.9: Viendo desde adentro de la fibra

material y la velocidad de la luz en el material [Crisp and Elliot, 2005].

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.16)$$

donde :

**n:** índice de refracción del material.

**c:** velocidad de la luz en el vacío.

**v:** velocidad de la luz en el material.

**Dispersión de guía de onda:** Este tipo de dispersión se debe a que la energía óptica que viaja tanto por el núcleo como por el revestimiento de la fibra se desplaza a diferentes velocidades como consecuencia de la leve diferencia de índices de refracción de los materiales [Crisp and Elliot, 2005].

**Cono de aceptación:** Los rayos de luz pueden entrar a la fibra óptica si el rayo se halla contenido dentro de un cierto ángulo denominado cono de

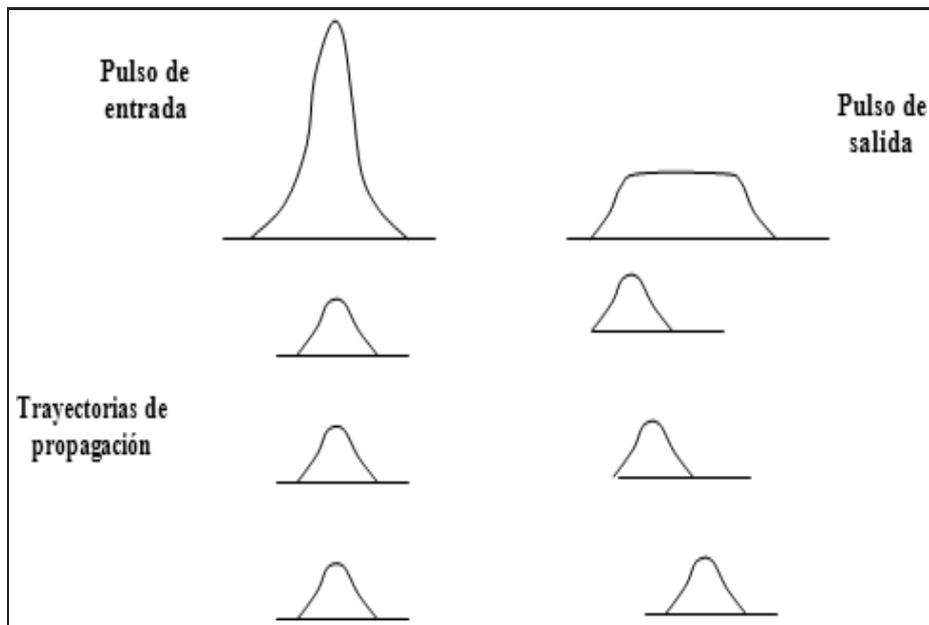


Figura 2.10: Ensanchamiento de pulso

aceptación. Un rayo puede perfectamente no ser transportado por la fibra óptica si no cumple con el requisito del cono de aceptación, este cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida [Crisp and Elliot, 2005].

**Apertura numérica:** Las ondas luminosas deben entrar en la fibra óptica dentro de cierto ángulo, llamado ángulo de aceptación [Crisp and Elliot, 2005]. Este ángulo está definido por la apertura numérica NA. Este concepto es ampliamente utilizado para describir la potencia colectora de luz de la fibra y para calcular la eficiencia de acople fuente-fibra y está definida por:

$$NA = \sin\alpha_{max} = (nc^2 - nr^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Donde  $\alpha_{max}$  representa el máximo ángulo de aceptación.

La apertura numérica puede tener el siguiente comportamiento:

- Una NA alto recoge más luz, pero se reduce el ancho de banda mientras que una NA baja aumenta el ancho de banda.

- Una NA grande hace más fácil la inyección de la luz, mientras una NA pequeña tiende a dar un ancho de banda más grande el la fibra.
- Una NA grande permite una dispersión modal mayor permitiendo más modos en los que la luz puede viajar.
- Una NA más pequeña reduce la dispersión limitando el número de modos.

En los sistemas de comunicación en los que se utiliza la fibra óptica como medio de transporte para la información, son necesarios dispositivos que conviertan una señal eléctrica en una señal óptica y viceversa [Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin, 2008].

### 2.5.2. Estructura de las Fibras Ópticas

La fibra óptica está compuesta por:

**El núcleo:** En sílice, cuarzo fundido o plástico, en el cual se propagan las ondas ópticas. Puede llegar a tener un diámetro de 50 o 62.5 $\mu\text{m}$  para la fibra multimodo y 9 $\mu\text{m}$  para la fibra monomodo.

**Forro óptico:** Generalmente de los mismos materiales que el núcleo pero con aditivos que confinan las ondas ópticas en el núcleo.

**Revestimiento:** Por lo general esta fabricado en plástico y asegura la protección mecánica de la fibra [Casimer DeCusatis and Carolyn J. Sher DeCusatis, 2006]. Ver Figura 2.11.

#### Fibra óptica de vidrio

El núcleo y el revestimiento son de vidrio, el cual está hecho de silicio fundido ultrapuro, son las más usadas en la actualidad debido a las características que presenta.

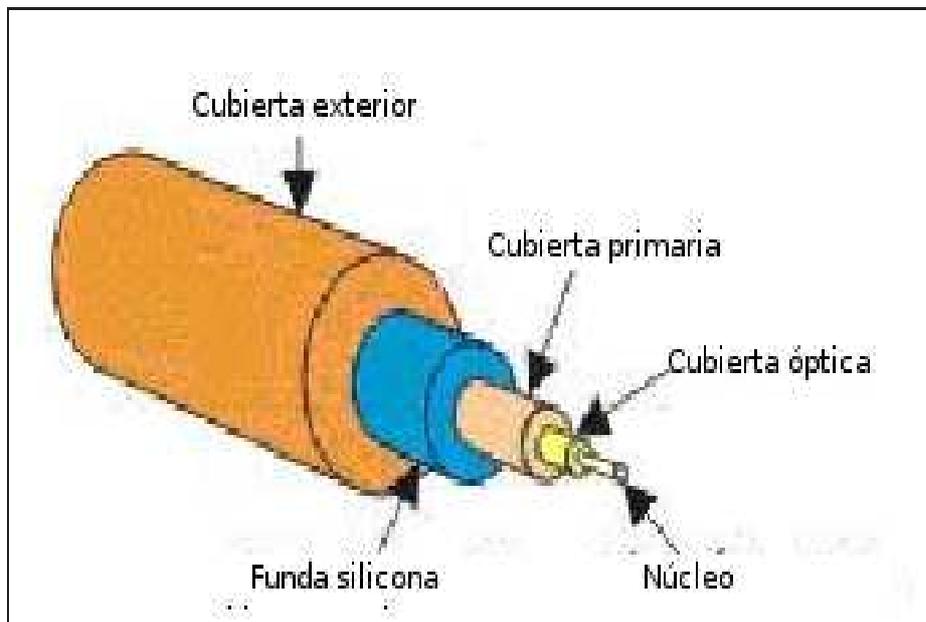


Figura 2.11: Elementos de la fibra

### Fibra óptica de plástico

Tanto el núcleo como el revestimiento son de plástico, presentan mayores pérdidas y su ancho de banda es limitado. Comúnmente estas fibras presentan un diámetro de  $1000\mu\text{m}$ , cuyo núcleo tiene un diámetro de  $980\mu\text{m}$ . Debido a sus características, esta fibra presenta grandes pérdidas si se utiliza para enlaces de largas distancias, por lo que no se utiliza en esos casos; sin embargo, puede ser muy útil y económica en aplicaciones de pequeña escala. Normalmente se utilizan fuente de luz LED's de  $650\text{nm}$ . La fibra óptica por su índice de refracción y los modos en que se propaga la señal se pueden clasificar como: Ver Figura 2.12.

**Fibra óptica de índice escalonado:** En esta la luz se refleja a diferentes trayectorias o modos. La longitud de la trayectoria para diferentes modos es distinta, lo que implica tiempos de desplazamiento mayores o menores dependiendo de la trayectoria seguida por el rayo, así señales que entran al mismo tiempo en la fibra salen en tiempos diferentes. El pulso óptico sufre un ensanchamiento llamado dispersión modal como resultado de los diferentes modos en la fibra, típicamente este tipo de fibras presenta una dispersión modal de 15 a  $30\text{ns/km}$ .

**Fibra multimodo de índice gradual:** Una forma de reducir la dispersión modal es utilizando fibras de índice gradual 'GRIN'. El núcleo de este tipo de fibras está hecho de capas concéntricas de vidrio, cada capa a partir del eje central del núcleo presenta un índice de refracción menor que la anterior, logrando que el rayo se refracte continuamente obteniéndose un patrón casi sinusoidal. Los rayos que viajan en las capas lejanas al eje central del núcleo se desplazan a velocidades mayores que los rayos que viajan en las capas cercanas al eje, como resultado de este fenómeno todos los rayos tienden a llegar al mismo tiempo al final de la fibra, el índice gradual reduce la dispersión modal a 1ns/km o menos. Los diámetros más comunes del núcleo para estas fibras son de 50, 62.5 o 85 $\mu\text{m}$  y para el revestimiento es de 125 $\mu\text{m}$ , comúnmente la más usada es la de 62.5/125 $\mu\text{m}$ .

**Fibra monomodo:** Otra forma de reducir la dispersión es utilizar fibras con un núcleo más pequeño para lograr una propagación del rayo en un solo modo. Los diámetros del núcleo van desde 5 a 10 $\mu\text{m}$  y el diámetro del revestimiento es de 125 $\mu\text{m}$ . Las fibras monomodo tienen un ancho de banda de 50 a 100 GHz-km, y esta capacidad está limitada por los dispositivos electrónicos y no por la fibra. El punto en el cual la fibra transmite en un solo modo depende de la longitud de onda de la señal y es llamada longitud de onda de corte [Crisp and Elliot, 2005][Grant R. Fowles, 1975].

### 2.5.3. Características que se presentan en la fibra óptica

#### Perdidas en una fibra óptica

La luz que viaja en una fibra óptica pierde potencia con la distancia. Las pérdidas de potencia dependen de la longitud de onda de la luz y del material por el que se propaga. Para el sílice, las longitudes de onda más cortas son las que más se atenúan. Las pérdidas de potencia de luz en una fibra óptica se miden en *decibelios* ( $dB$ ). Las especificaciones de un cable de fibra óptica expresan las pérdidas del cable como la atenuación en  $dB$  para un km de longitud ( $dB/km$ ). Este valor se debe multiplicar por la longitud total de

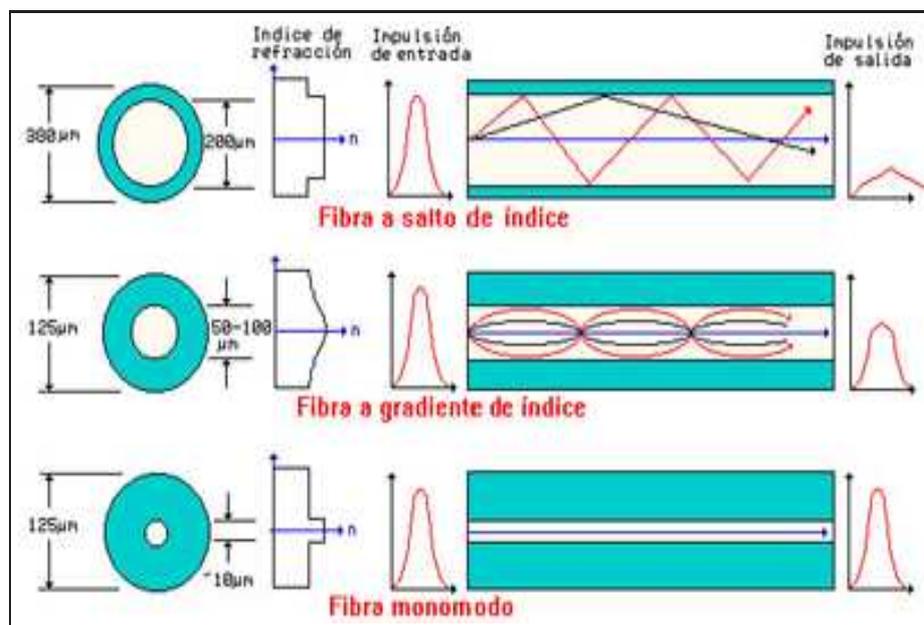


Figura 2.12: Tipos de fibra óptica

la fibra óptica en kilómetros para determinar las pérdidas del cable en **dB** [Crisp and Elliot, 2005] [Bob Chomycs, 1998].

**Atenuación:** Es la pérdida de potencia óptica de la señal cuando se desplaza en la fibra, es medida en decibeles por kilómetro y los rangos van desde los 300 dB/km para la fibra de vidrio hasta alrededor de los 0.21 dB/km en la fibra monomodo. La atenuación varía con la longitud de onda de la señal.

**Esparcimiento:** Es la pérdida de la energía óptica debido a imperfecciones en la estructura básica de la fibra.

**Absorción:** Es el proceso en el cual las impurezas en la fibra absorben parte de la energía óptica la cual se disipa en pequeñas cantidades de calor.

**Pérdidas por micro-curvaturas:** Pérdidas debidas a pequeñas imperfecciones o variaciones en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento que provocan que la luz se desvíe y no se produzca la reflexión interna.

**Atenuación por empalme:** Cuando se empalma una fibra con otra, en la unión se produce una variación del índice de refracción, lo cual genera refracciones y reflexiones, y sumándose la presencia de impurezas, todo esto resulta en una atenuación.

**Dispersión cromática:** Describe la tendencia para diferentes longitudes de onda que viajan a diferentes velocidades en una fibra. En longitudes de onda donde la dispersión cromática es alta, los pulsos ópticos tienden a expandirse en el tiempo y provocar interferencia, lo cual puede producir una inaceptable velocidad de bit.

**Dispersión por modo de polarización:** Polarización es la propiedad de la luz la cual está relacionada con la dirección de sus vibraciones, el viaje de la luz en una fibra típica puede vibrar en uno o dos modos de polarización.

**No linealidad en la fibra óptica:** Niveles de alta potencia de la fibra óptica disponibles y amplificadores ópticos provocan señales que interactúan con la fibra en las cuales se produce una variedad de efectos no lineales, si no son controlados propiamente, estas no linealidades pueden afectar de forma adversa al desarrollo del sistema, las no linealidades de la fibra caen dentro de dos categorías:

**Dispersión estimulada:** Esta no-linealidad ocurre en sistemas de modulación intensos cuando las señales ópticas interactúan con las ondas acústicas o con vibraciones moleculares en la fibra. Esta interacción dispersa la luz y la cambia a una longitud de onda mayor. Hay dos formas de dispersión estimulada: Stimulated Brillouin Scattering y Stimulated Raman Scattering. Esto causa un mecanismo de dispersión que se forma y refleja mucha luz de nuevo a la fuente.

**Índices de fluctuación refractivos:** Aunque el índice de refracción de una fibra óptica de Si presenta una constante a bajos niveles de potencia óptica, las altas potencias relacionadas con los amplificadores ópticos pueden modular el índice variando la intensidad óptica de la señal de transmisión. Los efectos de la no-linealidad de los índices refractivos caen dentro de tres categorías: Self-Phase Modulation, Cross-Phase Modulation y Four-Wave Mixing.

Los niveles de potencia en los cuales los diferentes fenómenos no lineales se manifiestan, son conocidos como umbrales [Crisp and Elliot, 2005][Grant R. Fowles, 1975][Ian R. Kenyon, 2008][Mool C. Gupta and John Ballato, 2007].

## 2.6. Dispositivos opto-electrónicos

### 2.6.1. Dispositivos emisores de luz

Los diodos láser y los diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés) son los dos tipos de fuentes más utilizadas en los sistemas de comunicación por fibra óptica Ver Figura 2.13.



Figura 2.13: Led emisor

**LED's:** Un diodo emisor de luz es una unión semiconductor **pn** que emite luz cuando se polariza directamente. Cuando se une un semiconductor tipo **n** con un semiconductor tipo **p**, se tiene que tanto los electrones libres de la región **n**, como los huecos libres en la región **p** no tienen la suficiente energía para sobre pasar la barrera de unión y desplazarse hacia la región opuesta. En este punto, la energía potencial de los huecos, siendo opuesta a la de los electrones provoca un incremento en la barrera de unión.

Al aplicar voltaje directo en la unión y agregar impurezas dopantes para

proveer una mayor cantidad de electrones y huecos durante la emisión, la barrera de separación se reduce. Si la energía proporcionada es al menos igual que la energía de la región prohibida los electrones libres y los huecos libres tendrán la suficiente energía para moverse en la región de la unión.

Cuando un electron libre se une a un hueco libre en la barrera de unión, el electron puede pasar a la banda de valencia. La energía perdida en la transición es convertida en energía óptica en forma de fotón. En resumen, la emisión de un LED es causada por la recombinación de electrones y huecos que son introducidos en la unión de un semiconductor **pn** al aplicársele un voltaje directo.

Por ejemplo el diodo IF-E96 es un LED rojo de bajo costo, el espectro de salida es producido debido a una aleación , con una longitud de onda máxima de 660nm y un ancho de banda de 20nm, en fibra de plástico PMMA se presenta menor atenuación, también puede utilizarse con un IF-E96 para una comunicación mas rápida, es bueno utilizarlo para distancias hasta de 75m [Mool C. Gupta and John Ballato, 2007].

**Diodo láser:** Es otro dispositivo formado por semiconductores, pero a diferencia de los LED's, el diodo láser está confinado en una cavidad que le proporciona características muy especiales.

Cuando el diodo es directamente polarizado, las cargas son introducidas dentro de la capa activa donde la recombinación tiene lugar causando la emisión espontánea de fotones, caso semejante explicado para la emisión del LED, sólo que algunas de las cargas introducidas dentro del semiconductor son estimuladas para emitir otros fotones. Si la densidad de corriente es lo suficientemente alta, entonces un gran número de cargas introducidas están disponibles para estimular la recombinación. Entonces de este modo la ganancia óptica se hace mayor.

La corriente de umbral es alcanzada cuando es lo suficientemente grande como para vencer las perdidas del diodo. En este, punto la oscilación láser ocurre. La corriente de umbral debe ser pequeña para prevenir el sobrecalentamiento del semiconductor, particularmente cuando opera de forma continua o con altos picos de potencia [Francisco J. Duarte, 2003].

### 2.6.2. Dispositivos detectores de luz

Estos dispositivos convierten la radiación óptica en señales eléctricas, sean estas de voltaje o corriente [Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin, 2008].

Estos dispositivos funcionan bajo el principio de portadores de cargas libres, sean estos electrones o huecos, son generados por absorción de fotones que entran a una sección del dispositivo. Este proceso se conoce como efecto fotoeléctrico interno.

Los fotodetectores tienen propiedades, entre las más importantes se pueden mencionar:

**Responsividad:** Es la razón de la corriente de salida a su potencia de entrada, sus unidades son A/W.

**Respuesta espectral:** Se refiere a la curva de la responsividad del detector como una función de su longitud de onda.

**Tiempo de levantamiento:** Es el tiempo para que la corriente de salida del detector cambie de un 10 % a un 90 % de su valor final cuando la entrada es un escalón. El fotodetector IF-D91, tiene diversas aplicaciones, entre ellas están: redes de área local, conexión digital de alta velocidad, equipos de uso médico Ver Figura 2.14.

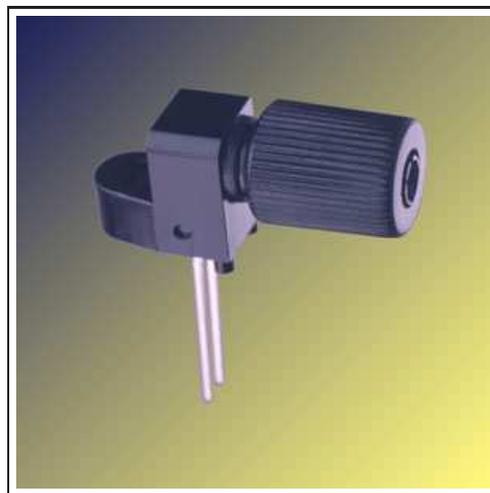


Figura 2.14: Detector óptico

Algunas de las aplicaciones típicas son:

**Industria:** Se utilizan como sensores de posición, lector de código de barras, impresoras láser.

**Medicina:** Detección de rayos X, analizador de partículas en la sangre.

**Óptica:** Medición de presión, temperatura, humedad, etc.

# Capítulo 3

## Medición de humedad de suelo

El método propuesto en esta tesis para medir la humedad de suelo, utiliza la modificación de propiedades de la luz incidente en la muestra bajo prueba, es decir, para medir las variaciones de humedad de suelo por medio de luz, fue necesario implementar un arreglo experimental. Debido a las múltiples etapas que conforman el sistema, su descripción se dividió para una mayor comprensión, en las siguientes etapas:

- Caracterización de dispositivos
- Acoplador óptico
- Diseño de sensor óptico
- Instrumentos de medición
- Troceador óptico y amplificador lock-in
- Comunicación USB/GPIB
- Amplificación de la señal de temperatura
- Requisitos de una corrida experimental

### 3.1. Sistema a bloques

El funcionamiento de este sistema se describe en el diagrama de la Figura 3.1, básicamente está constituido por tres etapas: el acoplador óptico, la

etapa de sincronización chopper-lockin y la comunicación entre equipo de medición y PC a través del estándar de comunicaciones GPIB, las cuales se explican a continuación. El montaje esta constituido por varios dispositivos

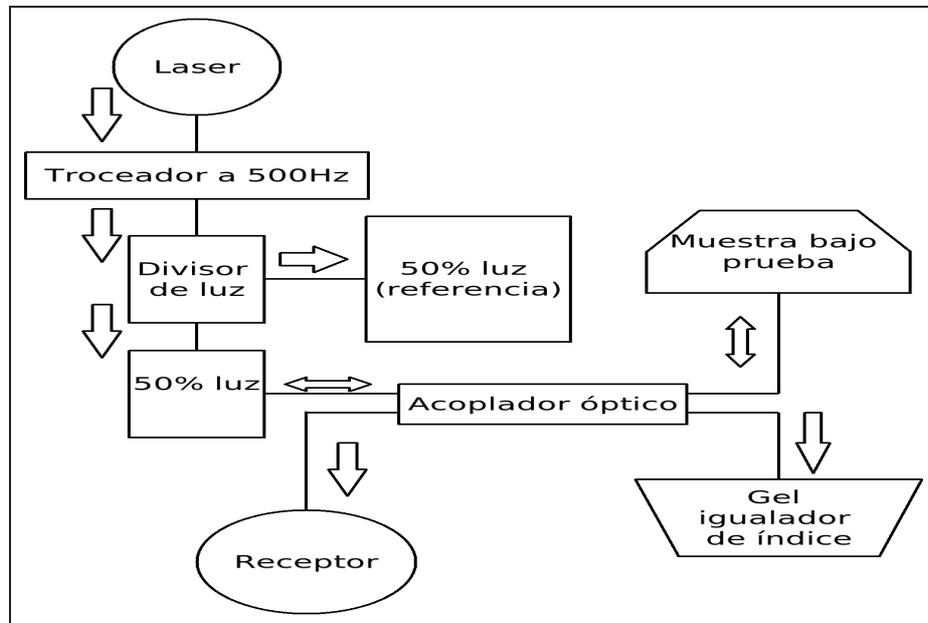


Figura 3.1: Montaje del experimento

opto-electrónicos. En primer lugar se emplea una fuente de excitación luminosa; láser HeNe de 632.82 nm de longitud de onda [Francisco J. Duarte, 2003] que debe ser encendido una hora y quince minutos antes del inicio de la medición, esto es debido a que el láser presenta fluctuaciones hasta este tiempo. Es decir, se le da el tiempo necesario para que se estabilice y se puedan efectuar mediciones aceptables.

Posteriormente, el haz de luz emitido por el láser de HeNe se hace pasar por un troceador óptico que muestrea la señal a una frecuencia de aproximadamente 500 Hz. Este haz muestreado es dividido por un divisor de haz que separa el haz emitido por el láser en una proporción 50/50. Una mitad es guiada a un fotodetector que servirá como referencia. La otra parte del haz emitido por el láser será guiado por medio de un espejo a un acoplador óptico de tipo  $2 \times 2$ . El haz emitido por el láser, ya muestreado por el troceador óptico (chopper), se encuentra en sincronía con un amplificador de precisión llamado lock-in. Dicho haz es guiado hacia un acoplador óptico de cuatro

canales por medio de un espejo y direccionado hacia el canal 1 del acoplador. La señal introducida emerge por los canales (3) y (4) del acoplador. Cabe mencionar que el acoplador óptico tiene una distribución 90/10, 90 % para el canal (3) y 10 % para el canal (4). La salida del canal (3) del acoplador óptico es introducida en un tubo de cristal que tiene como función proteger a la fibra. La fibra encapsulada dentro del tubo de cristal es enterrada en una caja de acrílico de  $15 \text{ cm}^3$  que se encuentra llena de tierra seca. En éste canal (3) se estarán sensando las variaciones que se presenten en el comportamiento de la intensidad de luz que se absorbe y se refleja debido a los cambios provocados en la muestra a estudiar por la presencia de agua. La fibra del canal (4) es sumergida a un recipiente con gel igualador de índices de refracción para evitar que refleje luz, que en éste caso sería considerada como ruido. Finalmente, en el acoplador óptico, el canal (2) es conectado a un detector para medir la señal retrodispersada, es decir, se midiran las variaciones que sufra la muestra en la que se encuentra sumergida la fibra del canal (3) debidas a la variable que se desea medir, que en este caso es la humedad en el suelo. De manera simultánea, es introducido junto al tubo de cristal que contiene la fibra, un termopar para medir las variaciones de temperatura a medida que se modifica el estado de la muestra (suelo). Las respuestas obtenidas por la fibra, el termopar y la referencia son monitoreadas en un osciloscopio con puerto GPIB que se encuentra conectado a un ordenador (banco de caracterización controlado por rutinas escritas en lenguaje Matlab). Este banco de caracterización tiene como función capturar los datos obtenidos por ambos sensores, almacenarlos y graficarlos para posteriormente interpretar el comportamiento de la humedad del suelo.

### 3.2. Caracterización de dispositivos

Antes de hacer alguna corrida experimental es necesario caracterizar el láser y posteriormente el acoplador y el fotodetector utilizando el montaje que se observa en las Figuras 3.2 y 3.3. La caracterización del fotodetector, el láser, el acoplador se realizaron con ayuda de un banco automatizado. La función de este banco automatizado es capturar los datos monitoreados por cada uno de los instrumentos de medición para posteriormente analizarlos, graficarlos e interpretarlos. Este banco captura un dato cada determinado tiempo durante un periodo de tiempo que depende de la prueba que se desea realizar y almacenar, en la Figura 3.4 se muestra la consola de este software.

Las pruebas que se llevaron a cabo para probar este software tuvieron un tiempo de duración de aproximadamente 2 a 4 horas. Las pruebas realizadas tienen tres fases, que son las requeridas para cumplir con un ciclo y se pueden describir de la manera siguiente:

**Monitoreo de la muestra natural:** Después de realizar el montaje del recipiente con la muestra seca, ésta es monitoreada durante un cierto periodo de tiempo para ver el comportamiento de la señal retrodispersada cuando no ha sido alterada la muestra.

**Tiempo de drenado:** Se agrega agua durante un periodo de tiempo y se monitorea el tiempo que tarda el agua en llegar a la punta del sensor óptico.

**Tiempo de secado:** Se deja de suministrar agua y se monitorea el tiempo que tarda en volver la muestra a su estado inicial.

Con la ayuda de este banco de datos se realizaron diferentes tipos de pruebas con dos muestras diferentes en cuanto a tamaño y material que sirvieron para analizar el comportamiento de cada uno de los instrumentos de medición y cada uno de los dispositivos a utilizar en las pruebas finales. Es decir, realizar pruebas para capturar datos verdaderos de las variaciones presentes en la muestra debido a las alteraciones que sufre por la presencia del parámetro de interés (humedad).

### 3.3. Acoplador Óptico

Uno de los elementos fundamentales del sistema de medición es el acoplador óptico. Este elemento sirve tanto para inyectar la señal luminosa de referencia, como para extraer la señal modificada por las variaciones de humedad de la muestra. Un acoplador óptico tendría su equivalente eléctrico en un divisor de señal, sin embargo, efectuar conexiones entre cables eléctricos es una tarea sencilla, si en lugar de cables se emplean fibras ópticas, la tarea de conexión se complica y no solo se requiere de equipo sofisticado para realizar dichas conexiones, sino que además el personal debe recibir entrenamiento especial para llevar a cabo de manera satisfactoria la conexión de fibras ópticas. En particular, se pueden mencionar en este grupo todas las operaciones relacionadas con continuidad de las líneas (empalmes, uniones provisionales, etc.) y con el encaminamiento de la señal (bifurcaciones, divisiones de señal,

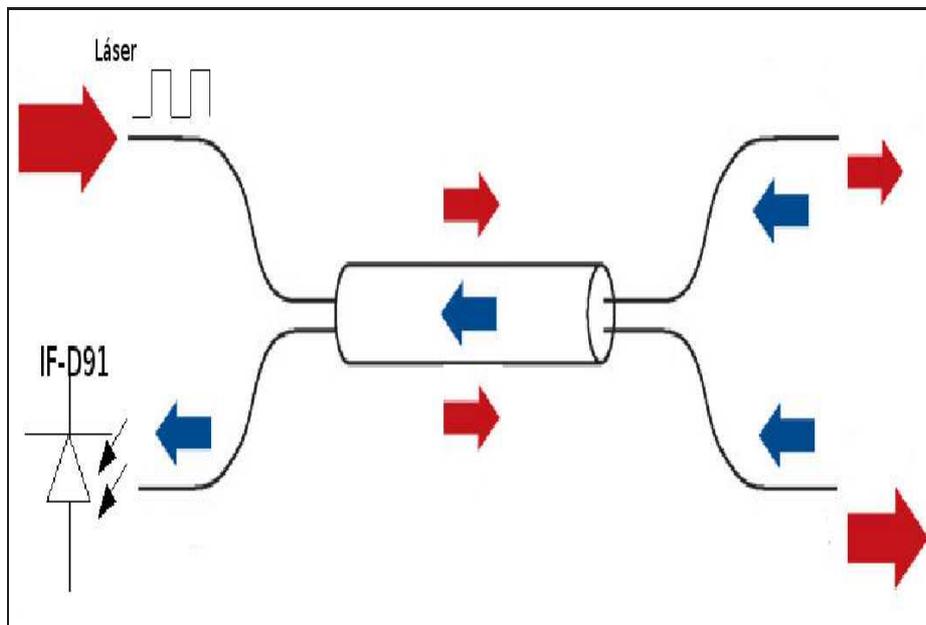


Figura 3.2: Caracterización del detector IF-D91

inyección de señales a una misma línea, transmisión punto-multipunto, etc.). En otras palabras es mucho más sencillo garantizar la continuidad eléctrica que la óptica. Para poder realizar estas operaciones de un modo sistemático, se han desarrollado familias de elementos pasivos conocidos con el nombre de acopladores. Los acopladores son dispositivos que combinan y/o separan las señales procedentes de fibras ópticas [Crisp and Elliot, 2005]. Suelen distinguirse por su número de entradas y de salidas. Así, se habla de acopladores  $1 \times 2$ ,  $2 \times 2$  o en general  $M \times N$ , donde  $M$  es el número de entradas del acoplador y  $N$  el número de salidas. Si las entradas son intercambiables por las salidas se dice que los acopladores son bidireccionales. En general se desea que un acoplador cumpla con los siguientes requisitos:

**Porcentaje de Distribución:** Cualquier señal introducida en una de las entradas debe distribuirse entre las salidas. La distribución no es necesariamente equitativa. Entre los más utilizados se encuentran los que distribuyen la intensidad de su entrada entre sus dos salidas de la manera 50/50 (que quiere decir que el 50% de la intensidad total de entrada salga por un canal de salida y el otro 50% por el segundo canal de salida) y 90/10, Figura 3.3.

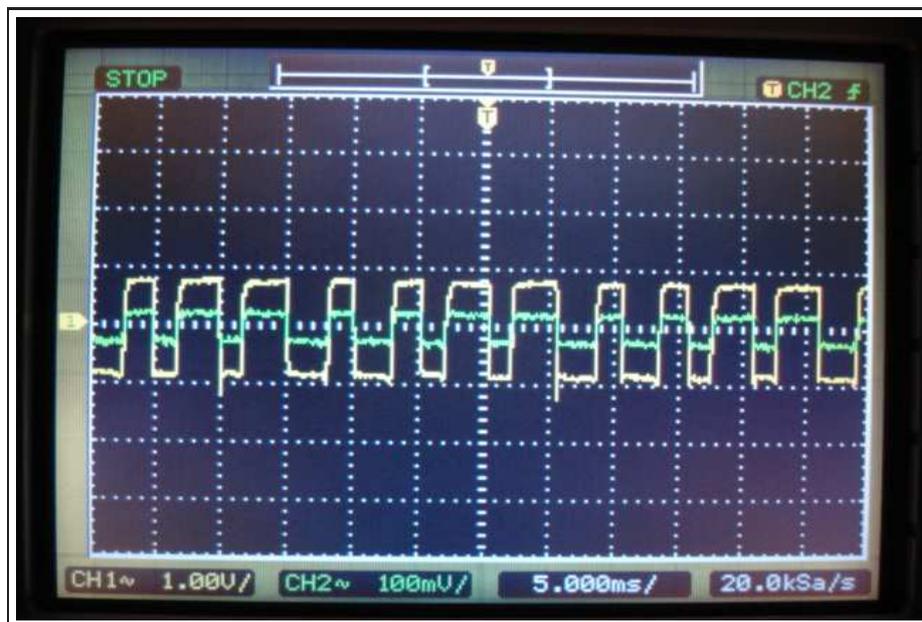


Figura 3.3: Caracterización del Acoplador tipo 2x2

**Directividad:** La entrada no utilizada no debe recibir una señal. La señal recibida en la otra entrada se considera diafonía. Precisamente, uno de los parámetros de los acopladores es su directividad 3.5, que viene a ser como la capacidad de aislamiento entre sus diferentes entradas. Un valor típico es  $\geq 55$  dB.

**Ancho de Banda:** A menos de que se indique expresamente, un acoplador solo funciona correctamente en un estrecho margen de longitudes de onda del espectro, que suele coincidir con una de las ventanas de transmisión. Cuando un acoplador es insensible a variaciones espectrales, se dice que tiene respuesta espectral plana o simplemente que es un acoplador plano.

En la etapa de acoplador óptico se utilizaron 10 metros de fibra óptica de plástico. Las fibras de plástico son fibras multimodo hechas de plástico transparente, que se utilizan en la región visible del espectro. Tienen una atenuación muy elevada y una dispersión muy alta. Por ello no sirven para comunicaciones ópticas a larga distancia. Sin embargo, este tipo de fibras son útiles para enlaces de pocos metros de longitud.

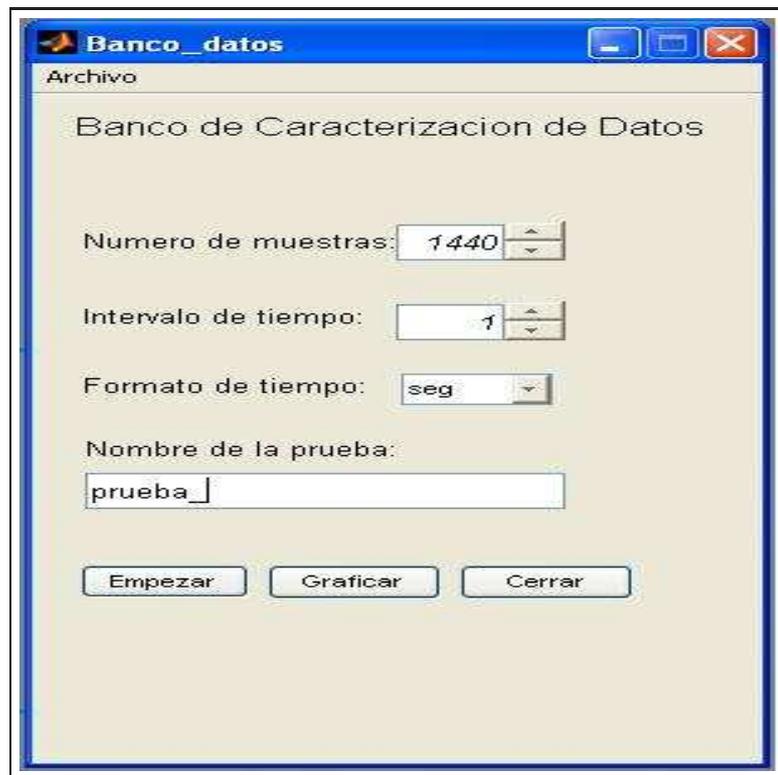
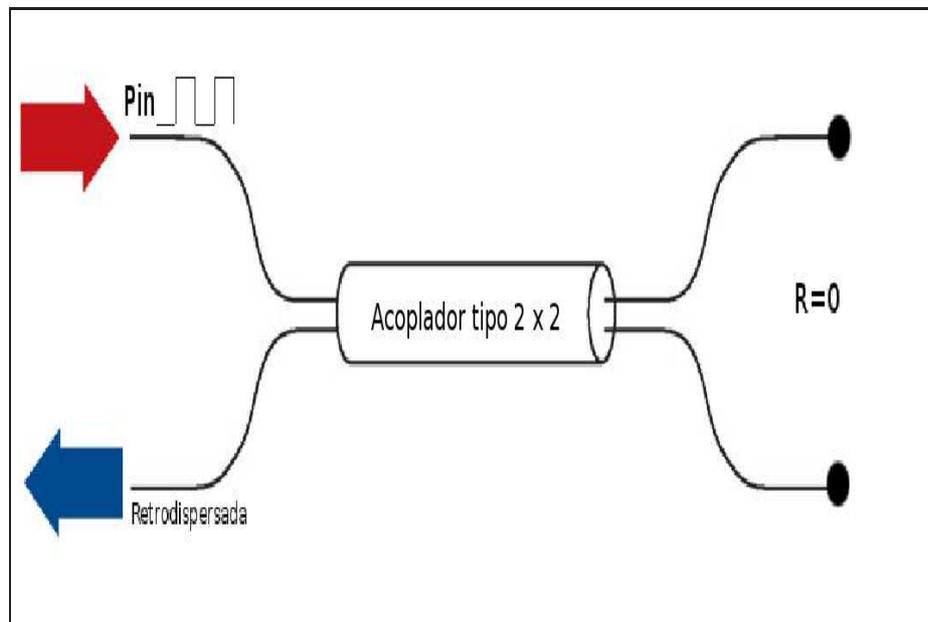


Figura 3.4: Consola para programar una corrida experimental

### 3.4. Diseño de Sensor Óptico

Debido a que el sistema de medición de humedad de suelo basado en la medición de la señal óptica reflejada por la muestra de suelo, se decidió emplear un acoplador  $2 \times 2$  de distribución 90/10 para inyectar la señal por una de las entradas y recuperar la señal retrodispersada por la otra entrada como se muestra en la Figura 3.6. Por lo tanto se introdujo la señal de excitación por el canal (3) del acoplador 90/10 dentro de la muestra, sin dañar la punta de la fibra para hacer las mediciones más precisas justo en el fondo de la muestra y obtener así mediciones de manera puntual. En la versión final del montaje de medición este canal se introdujo dentro de un tubo de ensaye de vidrio transparente, manteniendo fija la punta de la fibra en su interior, de tal forma que posteriormente se pudiera introducir el sensor dentro de la muestra sin temor a que se rayara o se dañara al estar en contacto con la

Figura 3.5: Directividad de un Acoplador  $2 \times 2$ 

tierra contenida dentro de la caja de acrílico. El canal (4) del acoplador se introdujo dentro de un gel igualador de índices de refracción con la finalidad de que por este canal no se reflejara luz y por tanto evitar un factor de ruido que se pueda adherir a la señal que interesa estudiar. En la entrada (2) del acoplador se monitorearon las variaciones de la señal retrodispersada que sufre cambios por la presencia de humedad. El extremo de la fibra en el encapsulado con el que se sensan las variaciones de humedad se muestra en la Figura 3.7. El procedimiento de las pruebas se puede representar con el esquema 3.8.

### 3.5. Instrumentos de Medición

Los diferentes tipos de pruebas realizadas, requirieron un montaje básico que se puede resumir como: hacer incidir el haz proveniente de un láser de HeNe de 632.82 nm de longitud de onda [Francisco J. Duarte, 2003] en diferentes muestras de distinto material para medir la señal retrodispersada. Estas pruebas se realizaron con la finalidad de probar los instrumentos de medición y conocer su desempeño. Con estas mediciones se pudo apreciar el

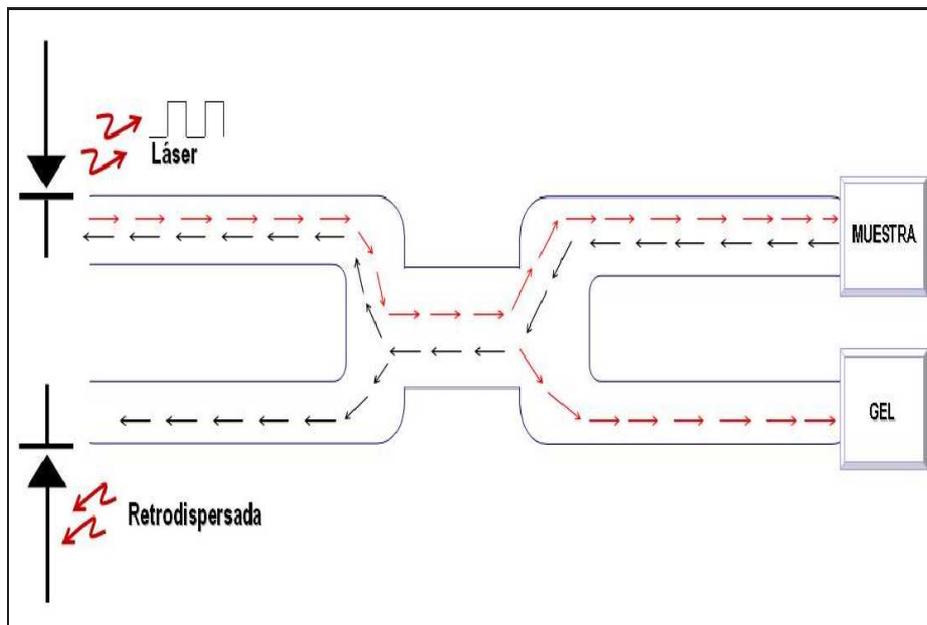


Figura 3.6: Montaje del acoplador óptico

buen funcionamiento y la precisión del equipo para medir variaciones muy pequeñas de señal retrodispersada provocada por variaciones de humedad en la muestra.

El material requerido para un montaje mínimo es:

1. Fotodiodo + Preamplificación
2. Fibra Óptica
3. Láser
4. Acoplador óptico
5. Troceador Óptico
6. Amplificador de precisión
7. Fuente de alimentación
8. Osciloscopio

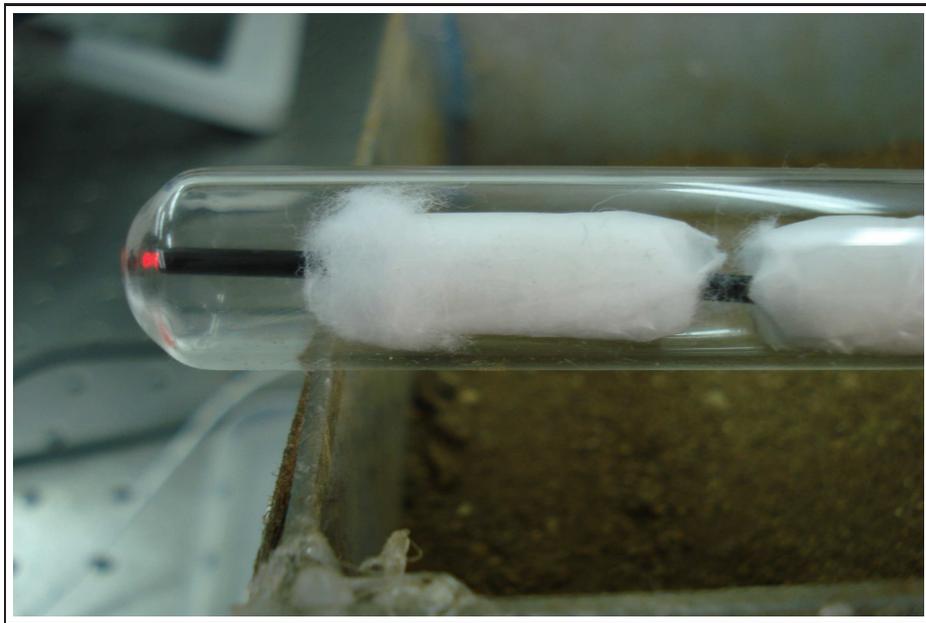


Figura 3.7: Punta del sensor óptico

### 3.5.1. Coeficiente de absorción y espectro de absorción

El factor de atenuación espectral o espectro de absorción de una muestra está definido por el cociente entre las intensidades espectrales de la luz antes y después de atravesar un medio. Considerando un medio homogéneo y de longitud  $L$ , la atenuación producida por este medio es de tipo exponencial, esto es, para cada longitud de onda:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{(-\alpha)(\lambda)(L)} \quad (3.1)$$

donde  $(\alpha)(\lambda)$  es el coeficiente de absorción del medio [Daniel López García de la Barrera, 2006] como se muestra en la Figura 3.9.

### 3.6. Troceador óptico y amplificador lock-in (Detección síncrona)

La medición de señales ópticas utilizando amplificadores de precisión tipo lock-in es especialmente útil cuando se manejan señales muy pequeñas. Un

amplificador de precisión lock-in permite hacer mediciones limpias de señales muy pequeñas opacadas por ruido cuya magnitud puede ser mucho mayor que la de la misma señal. Esencialmente un amplificador lock-in consiste en un filtro pasa-banda de ancho angosto, sincronizado con la frecuencia de la señal que se desea medir. Esta sincronía hace que las frecuencias de ruido fuera del ancho de banda sean automáticamente filtradas. Para este equipo se tienen valores típicos de ancho de banda del orden de 0.01 Hz centrados a 10 KHz. Sumado a este efecto de filtrado, el amplificador lock-in es un amplificador que proporciona ganancia, por lo que la señal filtrada, es acondicionada para su procesamiento posterior.

La técnica de medición con un amplificador lock-in requiere que el experimento sea excitado a una frecuencia fija para producir una señal a esa frecuencia. El amplificador lock-in detecta la señal a la frecuencia de referencia con un ancho de banda angosto. El amplificador lock-in tiene dos entradas, Figura 3.10, por una entra la señal detectada que previamente fue modulada por un troceador óptico (chopper) y por la otra el amplificador lock-in recibe la señal de referencia. El amplificador usa esta referencia para determinar que frecuencia debe dejar pasar y amplificar [Claro A. Noda Díaz, 1996].

### 3.7. Control de instrumentos por medio de la interfaz USB/GPIB

El acrónimo GPIB es un estándar de conexión que permite la comunicación de un ordenador con instrumentos electrónicos de medición. GPIB significa General Purpose Interface Bus, pero a pesar de este nombre, fue diseñado específicamente para la conexión de instrumentos de medición tales como: osciloscopios, multímetros, generadores de señales, por mencionar algunos. Un sistema GPIB consiste en una serie de instrumentos de medición conectados a un bus, y controlados, normalmente por una PC con una tarjeta GPIB. El dispositivo controlador gestiona el flujo de datos y mandos a los diferentes elementos del sistema [Fernando Seco Granja, 2005]. En la Figura 3.11 se muestra de manera gráfica la topología del banco automatizado en donde la comunicación entre la computadora y los instrumentos se realiza por medio del ducto GPIB.

### 3.8. Amplificación de la señal de temperatura

La caracterización de humedad en suelo siempre va acompañada de la medición de temperatura de la muestra, por lo tanto al momento de estudiar el comportamiento de la señal retrodispersada conforme variaban los cambios de humedad en ella, se estuvo monitoreando simultáneamente el comportamiento de la temperatura utilizando un termopar tipo k. Debido a que la señal que se quiere medir correspondiente a la temperatura es muy pequeña, se utilizó un amplificador de instrumentación para acondicionar dicha señal como se muestra en el diagrama 3.12. Las gráficas de salida obtenidas por medio del banco automatizado proporcionan la evolución tanto de humedad como de temperatura en el suelo por lo que es posible observar el grado de dependencia entre ambas variables.

### 3.9. Requisitos para una corrida experimental

En esta sección se explican las fases necesarias para llevar a cabo una corrida experimental, así como cada una de las pruebas necesarias para llegar a los resultados obtenidos.

Una corrida experimental incluye los siguientes subsistemas:

1. Preparación de la muestra: La muestra de suelo que va estudiar debe estar contenida dentro de un recipiente que debe permitir el drenado de agua.
2. Montaje del sistema de riego: El sistema de riego implementado es el equivalente a uno de control de riego por goteo. Para este montaje se utilizó:
  - Agua
  - Una bolsa de plástico de uso médico (para suministro de suero)
  - Cateter
  - Venoclisis
3. Montaje para inyectar la luz por medio de una fibra óptica de plástico
  - Calibración, ajuste del intervalo de operación del equipo

- Medición en vacío (referencia aire)
- Medición en seco (referencia suelo seco)
- Medición en saturado (referencia suelo humedo)
- Medición en gel (sin reflexión)

4. Tiempo de estabilización de equipo:

- Chopper
- Láser

Control de instrumentos:

- Manual (verificación)
- Automático (hasta 72 hrs.)

5. Condiciones ambientales:

- Factores de incertidumbre: Luz externa, control de temperatura, vibraciones, entre otros.

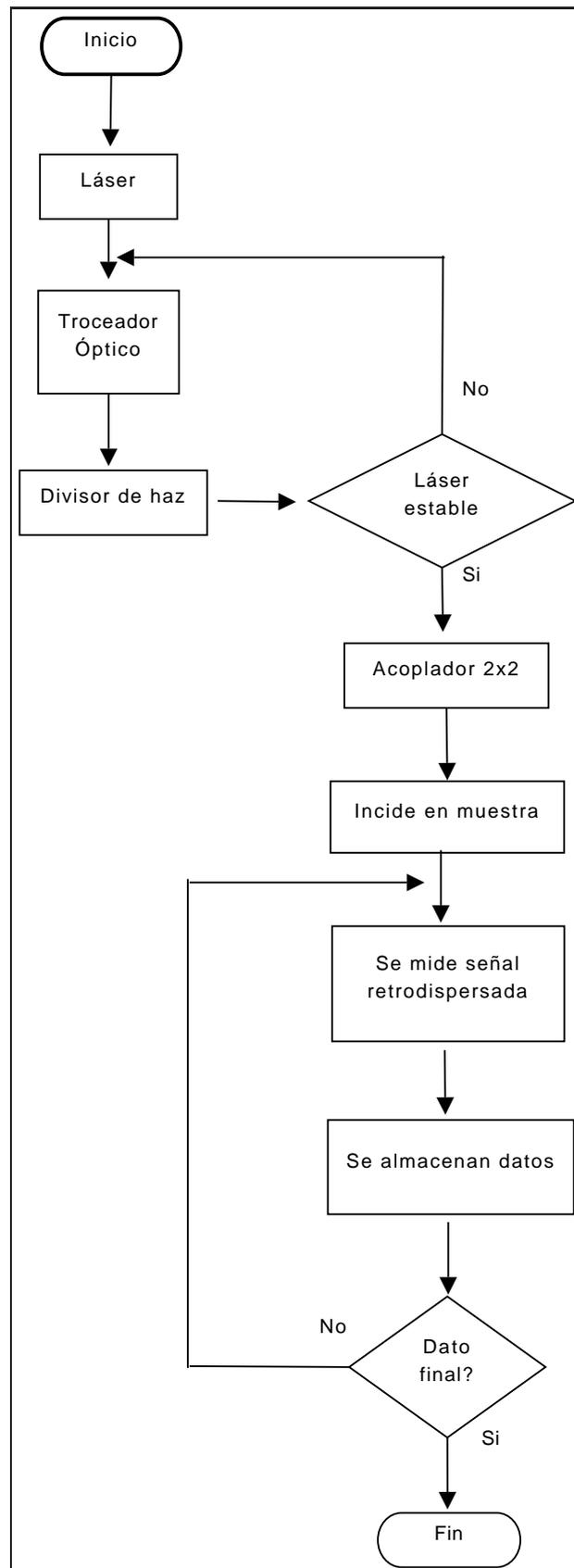


Figura 3.8: Diagrama de una corrida experimental

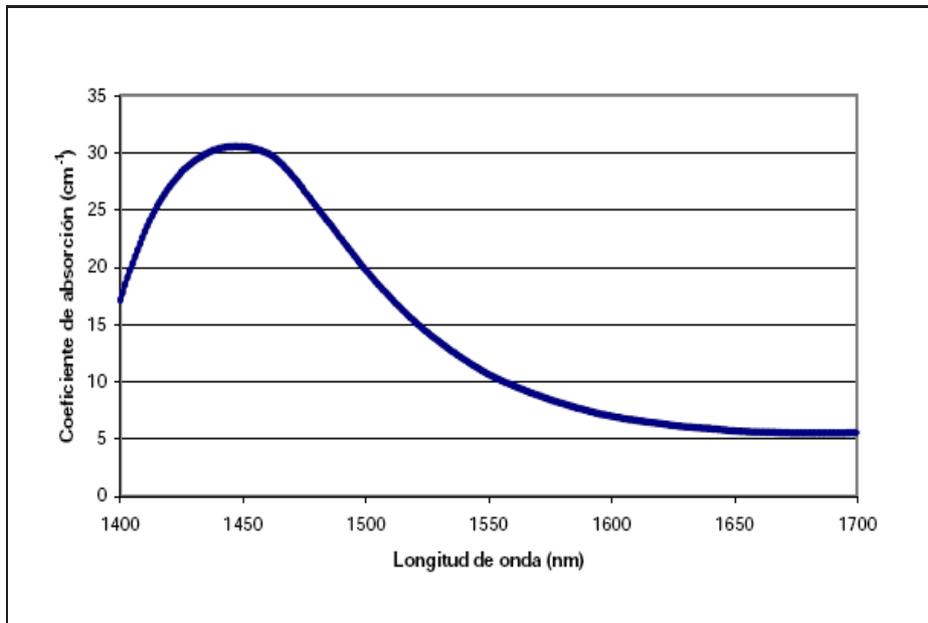


Figura 3.9: Coeficiente de absorción

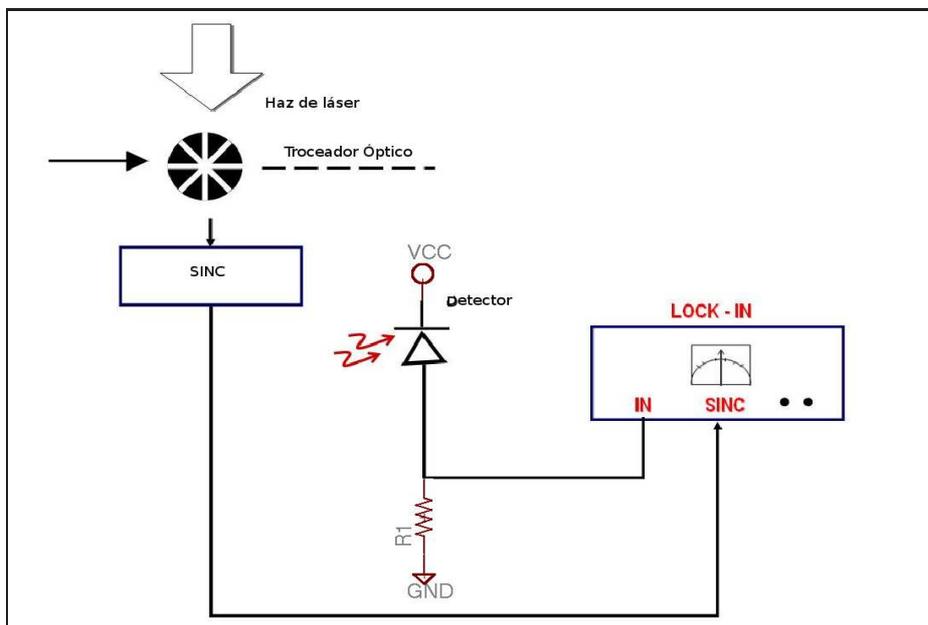


Figura 3.10: Chopper en sincronía con lock-in

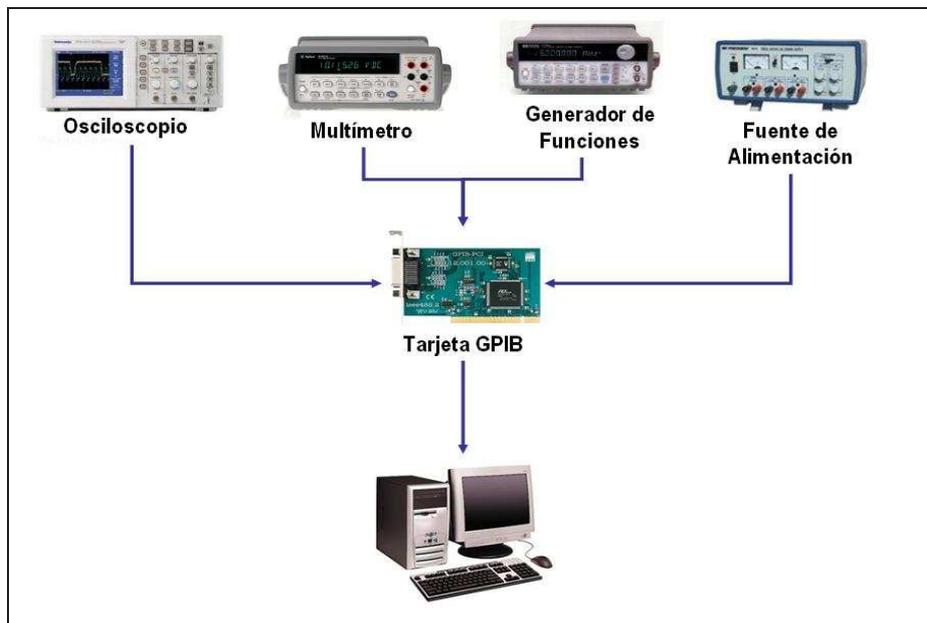


Figura 3.11: Interfaz USB/GPIB

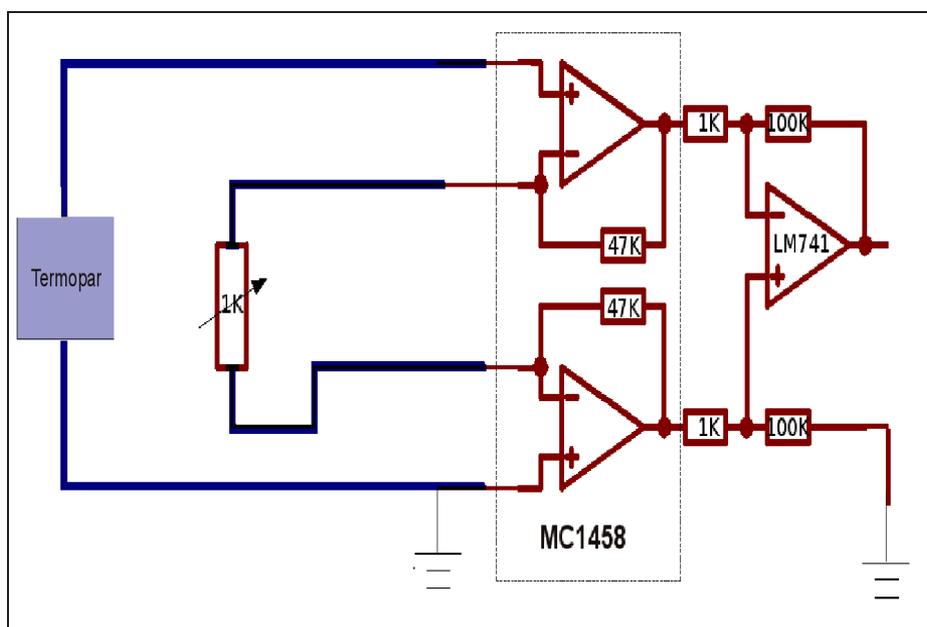


Figura 3.12: Tratamiento de la señal correspondiente a la temperatura

# Capítulo 4

## Pruebas y Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del dispositivo láser y acoplador óptico. También se presentan los resultados de las pruebas realizadas al sensor óptico y a un sensor resistivo que sirvió de referencia para comparar el funcionamiento del sensor óptico. A modo de comparación se presentan resultados del comportamiento de la temperatura dentro de la muestra cuando hay presencia de humedad. Es decir, durante cada prueba se estuvo sensando de manera simultanea dentro de la misma muestra la señal óptica retrodispersada con el sensor óptico, la resistividad del suelo con el sensor de humedad resistivo y la temperatura con un termopar tipo k.

### 4.1. Caracterización del dispositivo láser

Una vez encendido el láser de HeNe, es necesario esperar un tiempo para permitir que se estabilice térmicamente, de manera que no presente fluctuaciones drásticas en la intensidad del haz emitido. Para conocer dicho tiempo, se monitoreó el comportamiento del láser desde que es encendido hasta que se estabiliza. Esta prueba se monitoreo con ayuda de un Osciloscopio Tektronix TDS 2012 de dos canales conectado a una PC a través de una Tarjeta Agilent Technologies 82357A (interfáz USB/GPIB) para posteriormente almacenar los datos obtenidos con el banco automatizado y obtener las gráficas de comportamiento. Como resultado, se observó que para realizar una prueba o corrida utilizando el láser de HeNe, se tiene que encender y esperar aproximadamente una hora con 15 minutos, que es el tiempo en que llega a

estabilizarse. La respuesta se muestra en la Figura 4.1.

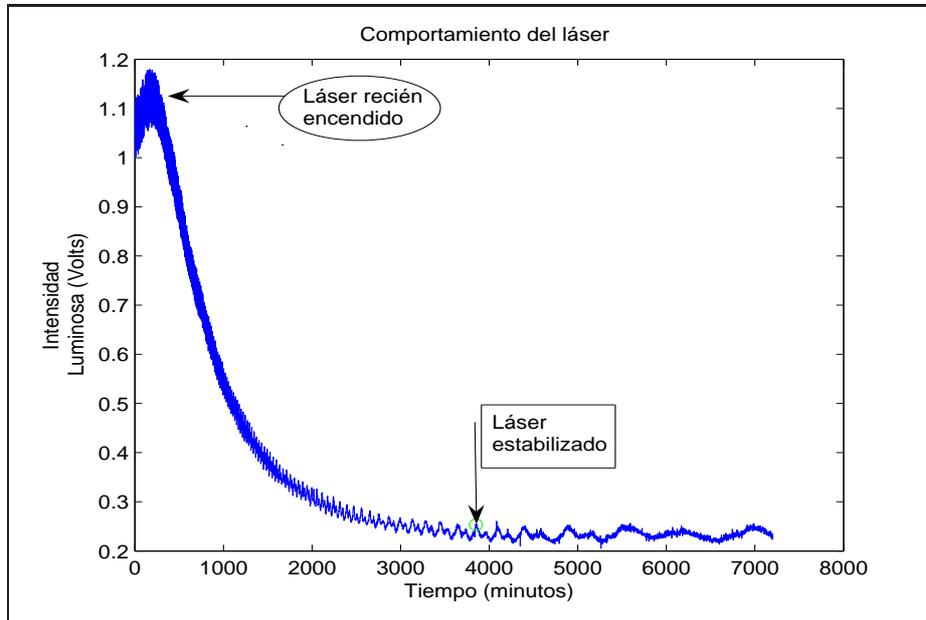


Figura 4.1: Tiempo de estabilización del láser

## 4.2. Acoplador Óptico

En las primeras pruebas se utilizó un acoplador óptico de dos canales de entrada y dos de salida  $2 \times 2$  que según las especificaciones del fabricante tenía una distribución de potencia de 50/50. De acuerdo a medidas realizadas como se muestra en la Figura 4.2, en las dos salidas de este acoplador se observó que en realidad era de aproximadamente 70/30. Para las pruebas finales que se presentan en este capítulo se utilizó un acoplador óptico  $2 \times 2$  con una distribución 90/10 que si cumple con la especificación del fabricante.

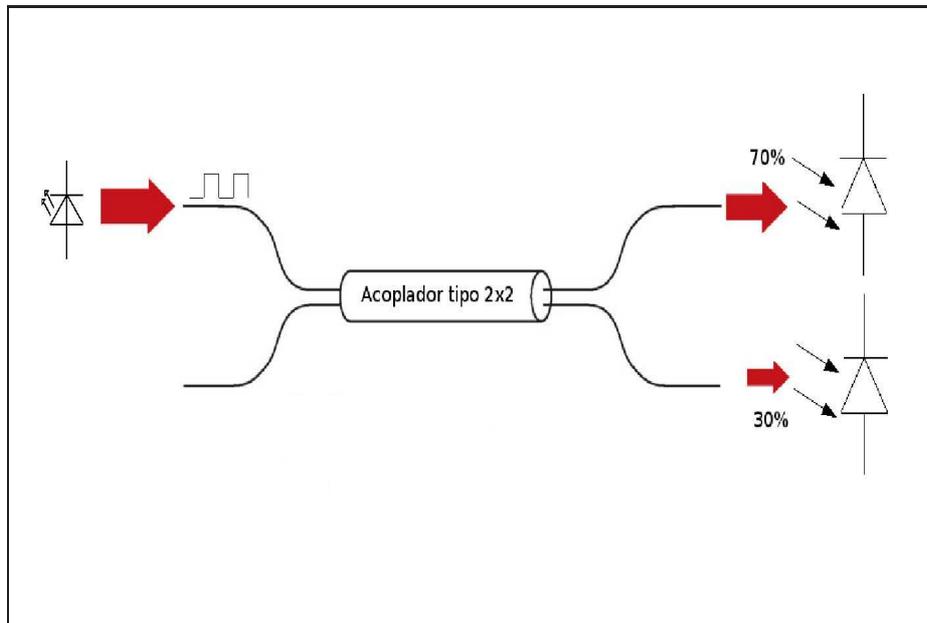


Figura 4.2: Distribución del acoplador

### 4.3. Medición de de Señal Óptica Retrodispersada

La medición de la señal óptica retrodispersada, que nos indica por medio de las variaciones de intensidad en una muestra, la presencia de humedad, se realizó bajo diferentes condiciones. A continuación se describen algunas de las condiciones mencionadas. Se prepararon dos muestras de diferente volumen, es decir, las muestras estaban contenidas en un portaobjetos y en un recipiente de acrílico de  $15 \text{ cm}^3$ , en donde el volumen de tierra correspondía a  $10 \text{ cm}^3$ . Se implementó un sistema de goteo para que suministrara a las muestras una gota de agua por segundo. La cantidad de agua que se utilizó en la muestra pequeña fue de 8 gotas mientras que en el recipiente de acrílico fue un litro de agua.

#### 4.3.1. Muestra 1

El montaje para las pruebas de medición de la señal óptica retrodispersada en un portaobjetos se muestra en la Figura 4.3, dichas pruebas se hicieron

bajo las condiciones y con el equipo que a continuación se menciona.

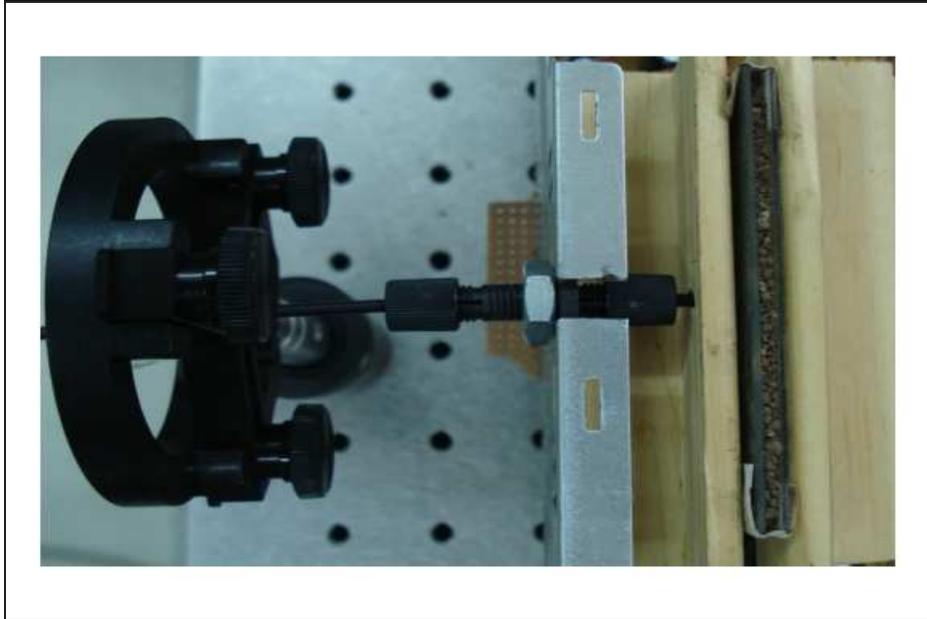


Figura 4.3: Montaje del Portaobjetos

#### 4.3.2. Las condiciones en las que se hacen las pruebas con el portaobjetos son:

- Tiempo total de una corrida = 24 horas
- Monitoreo por 30 minutos a la muestra seca
- Se agregan 8 gotas de agua en el minuto 30
- Frecuencia de captura por el banco de datos de 1 minuto entre muestra y muestra
- Acoplador de distribución 70/30
- Se utilizó un lente divisor de haz
- Frecuencia del troceador óptico chopper de 500 Hz

- Sensitividad del amplificador de precisión lock-in de 100mV
- Constante de tiempo del amplificador de precisión lock-in de 3 segundos

**El equipo que se utilizó para estas pruebas es:**

- Fotodetector IF-D91
- Láser de HeNe de 632.82 nm de longitud de onda. Modelo 31005, Research Electronics
- Acoplador óptico de plástico de distribución 50/50
- Lente divisor de haz 50/50
- Troceador Óptico Chopper de Scitec Instruments
- Amplificador de precisión Dual Phase Lock-in amplifier, modelo 420 de Scitec Instruments
- Fuente de alimentación BK Precision 1651A Triple output DC power supply
- Osciloscopio Tektronix TDS 2012 de dos canales
- Tarjeta Agilent Technologies 82357A para interfaz USB/GPIB
- PC con las siguientes características: Procesador sempron (+m)3100 + 1.81GHz, 448 Megas en RAM, Monitor samsung sync master 793V, Matlab 7.1
- Protoboard

Los resultados de la prueba que se hizo en un portaobjetos se pueden apreciar en la gráfica 4.4. En la gráfica 4.4 por ser una muestra pequeña, se puede apreciar un ciclo riego-secado completo de como sería el resultado en un caso extremo, es decir, cuando la muestra se encuentra totalmente seca, después de agregar agua y en un lapso de pocos minutos pasa a su estado de saturación y posteriormente al cabo de pocos minutos, la humedad se pierde por completo.

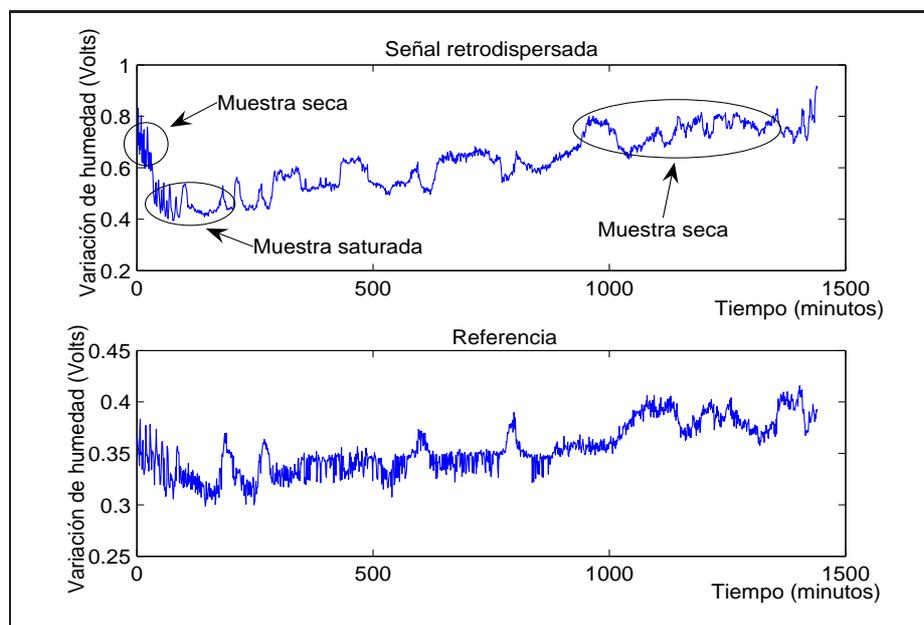


Figura 4.4: Retrodispersión en un porta-objetos

### 4.3.3. Muestra 2

El montaje para las pruebas de medición de la señal óptica retrodispersada en un recipiente de acrílico, como se muestra en la Figura 4.5, se hicieron bajo las siguientes condiciones y con el equipo que a continuación se menciona.

### 4.3.4. Las condiciones en las que se hacen las pruebas con la caja de acrílico son:

- $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$  de la caja cubiertos de tierra
- Simulación de un sistema de riego por goteo
- Frecuencia de goteo de 1 segundo entre gota y gota aproximadamente
- Se utiliza 1 litro de agua
- Termistor tipo k
- Frecuencia del troceador óptico chopper de 500 Hz

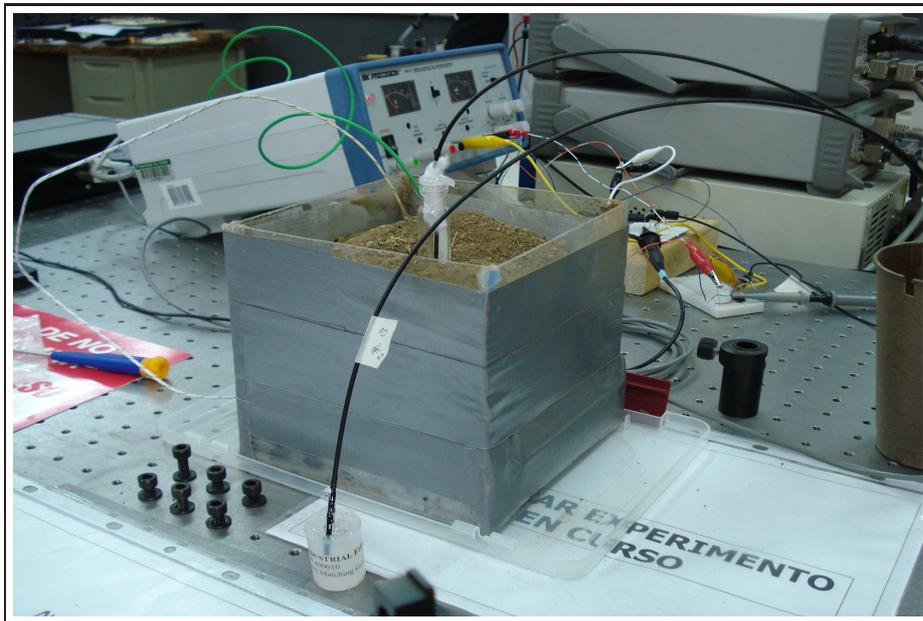


Figura 4.5: Caja de acrílico

- Sensitividad del amplificador de precisión lock-in de 100mV
- Constante de tiempo del amplificador de precisión lock-in de 3 segundos
- Frecuencia de captura por el banco de datos de 1 minuto entre muestra y muestra
- Tiempo de captura por el banco de datos de 8 a 72 horas

**Equipo que se utilizó para realizar estas pruebas:**

- Fotodetector IF-D91
- Láser de HeNe de 632.82 nm de longitud de onda. Modelo 31005, Research Electronics
- Acoplador óptico de plástico de distribución 90/10
- Troceador Óptico Chopper de Scitec Instruments
- Amplificador de precisión Dual Phase Lock-in amplifier, modelo 420 de Scitec Instruments

- Fuente de alimentación BK Precision 1651A Triple output DC power supply
- Osciloscopio Tektronix TDS 2012 de dos canales
- Tarjeta Agilent Technologies 82357A para interfáz USB/GPIB
- PC con las siguientes características: Procesador sempron (+m)3100 + 1.81GHz, 448 Megas en RAM, Monitor samsung sync master 793V, Matlab 7.1
- Circuito impreso

Los resultados de la prueba realizada en el recipiente de acrílico se muestran en la gráfica de la Figura 4.6. Los resultados de la gráfica 4.6 corresponden a la segunda muestra, en donde se puede mostrar el comportamiento de las variaciones en la señal retrodispersada medidas por la punta del sensor óptico. La parte donde está ubicada la punta del sensor se mantuvo seca hasta el minuto 220 (2hrs.40min.). A partir de ese momento el sensor comenzó a detectar la presencia de humedad manifestandolo en las variaciones medidas de la señal retrodispersada hasta llegar a un punto de saturación de la muestra, lo cual ocurrio en el minuto 300 aproximadamente. Con estos datos se puede determinar el tiempo que tarda en drenar el agua, para ésta muestra, el tiempo que transcurre desde que se deja caer en la superficie la primera gota hasta que llega a la punta del sensor óptico es de aproximadamente 300 minutos. También se mostró en esta prueba que el litro de agua se termino de agregar en el minuto 395 de esta prueba.

#### 4.4. Medición utilizando un Sensor Resistivo

En el monitoreo del comportamiento de la muestra con el sensor de humedad resistivo se puede apreciar graficamente que el tiempo de respuesta de este sensor con respecto al sensor óptico es más lento. Al inicio de la gráfica 4.7 se muestra que el sensor resistivo muestra su nivel mas alto a partir del minuto 50, lo que significa que hasta después de haber transcurrido 50 minutos, el sensor resistivo proporciona una lectura estable mientras que el sensor óptico responde desde el momento en que existe una variación de humedad en la región de la muestra con la que esta haciendo contacto.

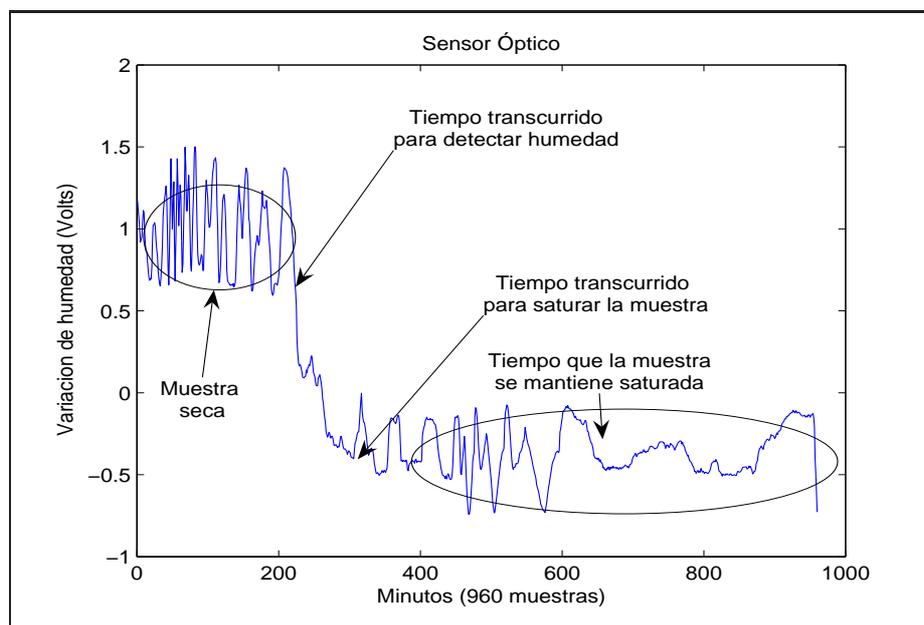


Figura 4.6: Monitoreo utilizando sensor óptico

## 4.5. Medición de Temperatura

Con respecto a la medición de la temperatura, la cual se realizó por medio de un termistor de tipo k, se puede observar que su respuesta a los cambios de temperatura por la presencia de humedad es lenta con respecto al sensor óptico. En la gráfica 4.8 se muestra que 200 minutos después de que la muestra se encuentra saturada por la variable a medir, la temperatura comienza a descender hasta permanecer constante, esto sucede porque llega un momento en el que la temperatura de la muestra y la de la variable a medir se neutralizan, esto ocasionado por la presencia de humedad.

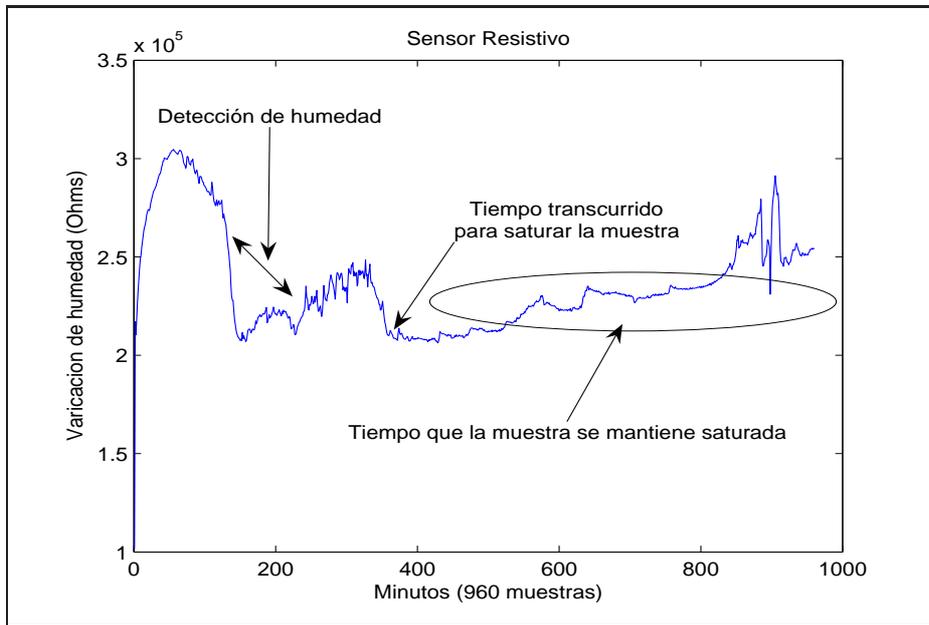


Figura 4.7: Monitoreo utilizando sensor de humedad resistivo

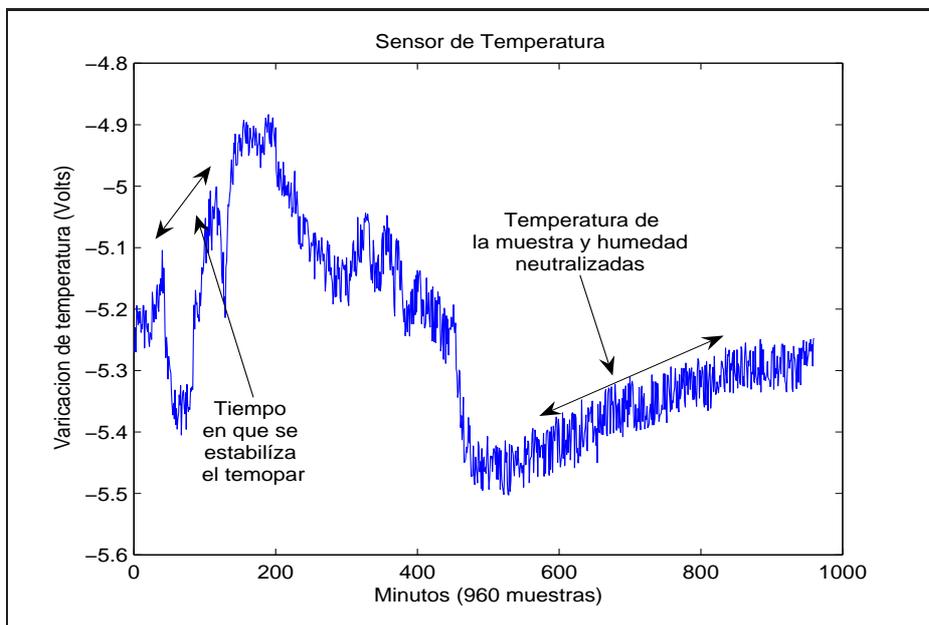


Figura 4.8: Monitoreo de temperatura

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se desarrolló y diseñó un dispositivo de medición de humedad en suelo utilizando fibra óptica de plástico. Los resultados muestran que es posible medir la humedad en suelo utilizando este dispositivo en términos de variación de la intensidad de la señal retrodispersada. Entre las principales ventajas que presenta este dispositivo con respecto a dispositivos electrónicos son: inmunidad a interferencia electromagnética, peso, tamaño reducido y versatilidad. Por medio de las pendientes mostradas en las curvas de resultados, se pueden interpretar las etapas de flujo de agua en el suelo. Los resultados obtenidos demuestran la relación existente entre la cantidad de agua contenida en las muestras de suelo y la absorción de luz incidente sobre la muestra, así como la relación entre la cantidad de humedad y la temperatura de la muestra de suelo bajo prueba. Dado el comportamiento de los resultados obtenidos con el experimento se puede concluir que el método de medición de retrodispersión puede emplearse para el desarrollo de sensores de humedad en suelo (accesibles, duraderos y económicos). Finalmente, se muestra la importancia de contar con un sistema de medición automático (complementado por una etapa de detección síncrona) como el implementado en este trabajo, el cual permitió lograr la caracterización continua de la muestra bajo prueba por tiempos prolongados.

### 5.1. Contribuciones

Las principales contribuciones de éste trabajo se enlistan a continuación:

- Se desarrolló un banco automatizado para medición continua de vari-

ables de suelo

- Implementación de un sistema de medición síncrona con ayuda de un amplificador lock-in para detectar señales retrodispersadas provenientes de una fibra óptica de plástico
- Obtención de curvas de humedad en muestras de suelo
- Presentación de los resultados obtenidos en el Congreso Internacional Electro 2008, ITCH (Chihuahua)

## 5.2. Trabajo a Futuro

En base a los resultados obtenidos y la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta tesis se pueden sugerir los siguientes trabajos a futuro:

Implementar el montaje de medición síncrona en un sistema portátil, que permita efectuar mediciones en campo.

Obtener curvas de calibración del sensor para mejorar la interpretación de datos.

Diseñar un encapsulado (por ejemplo acrílico) para el sensor, de manera que resista la abración del suelo.

Hacer un análisis estadístico de los datos de humedad de suelo para determinar la confiabilidad del sistema.

# Bibliografía

Argha Banorjee, S. M. and Verma, R. K. (2006). *Fiber optic sensing of a liquid refractive index*. Elsevier.

Bob Chomycs (1998). *Instalaciones de Fibra Óptica*. Mc Graw Hill.

Casimer DeCusatis and Carolyn J. Sher DeCusatis (2006). *Fiber Optic Essentials*. Academic Press, Elsevier.

Claro A. Noda Díaz (1996). Siatema de Control para la Medición Dinámica de Dependencias de la Corriente Crítica en Superconductores. Master's thesis, Universidad de la Habana, Facultad de Física.

Conde, C. P. (2008). *Sensores Ópticos*.

Crisp, J. and Elliot, B. (2005). *Introduction to fiber optics*. Elsevier, Newner, tercera edition.

Dandridge, A. and Kersey, A. D. (1988). Overview of mach-zehnder sensor technology and applications. *Fiber Optic and Laser Sensors VI, SPIE*, Vol.985.

Daniel López García de la Barrera (2006). Medición de coeficientes de absorción mediante la técnica de espectroscopia intracavidad láser. Technical report, Departamento de Física Aplicada.

Daniel Ortíz B. (2008). Sistema de telemetría de bajo costo para aplicaciones agrícolas. Master's thesis, Universidad Autónoma de Baja California.

Elissa Levine and Jim Washburne (1997). *Investigación de suelos*.

Eugene R. Bartlett (2005). *Cable Communications Technology*. MacGraw-Hill.

Fernando Seco Granja (2005). Conexión de Instrumentos de Medida con GPIB. *CSIC*.

Francisco J. Arregui, Ignacio R. Matías, K. L. C. and Claus, R. O. (2002). Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber bragg grating. *IEEE Sensors Journal*, 2(5):482–487.

Francisco J. Duarte (2003). *Tunable Laser Optics*. Elsevier Academic Press.

Frank L. Pedrotti and Leno S. Pedrotti (1987). *Introduction to Optics*. Prentice Hall.

Grant R. Fowles (1975). *Introduction to Modern Optics*. Dover Publications.

Hecht (2000). *Óptica*. Pearson, tercera edición.

Héctor Magán (2001). Ecosistemas. Revista de ecología y medio ambiente. No. 3.

Ian R. Kenyon (2008). *Light Fantastic a Modern Introduction to Classical And Quantum Optics*. Oxford University Press, 2008.

INEGI (1990). *Guías para la interpretación de cartografía*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Jacob Fraden (2004). *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer.

Luca Cernuzzi (2002). Sensores. <http://www.dei.uc.edu.py/tai2002/SENSORES/index.htm>.

Luis E. Rivera Martinez, M. R. G. y. M. C. R. (2001). *Manejo de Riego por Goteo*. Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayaguez.

Mool C. Gupta and John Ballato (2007). *The Handbook of Photonics*. CRC Press.

N. Brady (1990). *The Nature and Properties of Soils*. MacMillan Publishing Co. INC.

R. Narayanaswamy and Wolfbeis, O. (2004). *Optical sensors, industrial, environment and diagnostic applications*. Springer.

- Ramaier N. and Otto S. Wolfbeis (2004). *Optical Sensors*. Springer.
- Rodriguez, G. (1997). La fibra óptica. Technical report, <http://www.monografias.com/trabajos12/fibra/fibra.shtml>.
- Sampat A. Gavande (1991). *Física de suelos, principios y aplicaciones*. LIMUSA, octava edition.
- Shizhuo Yin and Paul B. Ruffin (2008). *Fiber optic sensors*. CRC Press, Taylos and Francis group, second edition.
- Ting-Chung Poon and Taegeun Kim (2006). *Engineering Optics whit Matlab*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- W. W. Morey, G. Meltz, W. H. G. (1989). Fiber optic bragg grating sensors. *Fiber Optic and Laser Sensors VII, SPIE*, Vol.1169.
- Wesley Kunzler, S. C. and Laylor, M. (2004). Implementig fiber sensors to monitor humidity and moisture. Technical report, Blue Road Research, 376 NE 219th avenue, Gresham, Oregon 97030.
- Wikipedia (2008). Agricultura de precisión. [http://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura\\_de\\_precisión/](http://es.wikipedia.org/wiki/Agricultura_de_precisión/).
- Yanavilca, I. T. L. (2005). Relación agua suelo planta clima. Instituto Nacional de Recursos Naturales Intendencia de Recursos Hídricos, Unidad Transitoria de Riego. Guía técnica No.1.

# Apéndice A

## Cálculos de circuitos básicos

### A.1. Configuración de un LED

El Led tiene un voltaje de operación que va de 1.5 a 2.2 Voltios aproximadamente y la corriente que debe circular por el va de 10 mA a 20 mA en los diodos de color rojo. La caída de tensión del diodo en polarización directa de un Led rojo es de 1.8 Voltios aproximadamente y 1.5 Voltios para un Led infrarrojo. Si:

$$V_d \approx 1.5V \quad (\text{A.1})$$

$$V_{cc} = V_d + I_d R \quad (\text{A.2})$$

Si  $V_{cc} = 5$  Voltios y la corriente que debe circular por el diodo es  $I_d = 20$  mA.

$$R = \frac{(5V - 1.5V)}{20mA} \quad (\text{A.3})$$

$$R = 175 \text{ ohms}$$

### A.2. Configuración de un amplificador

**Inversor:** Se denomina inversor ya que la señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) pero con la fase invertida 180 grados, ver Figura A.1. El análisis matemático para obtener la ganancia es:

$$\frac{V_o}{V_i} = G_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (\text{A.4})$$

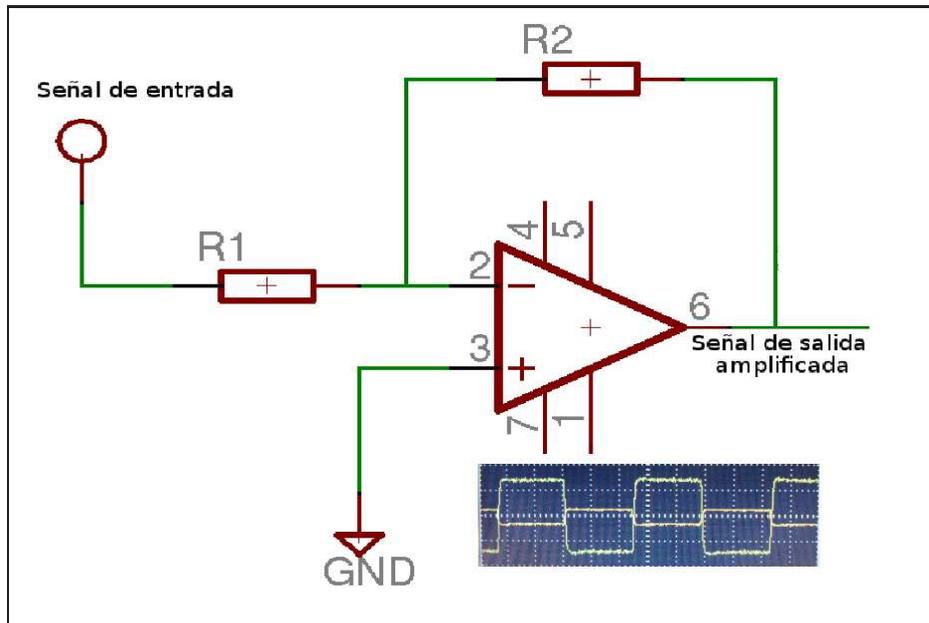


Figura A.1: Configuración inversora

**No Inversor:** Este circuito es muy parecido al inversor, la diferencia es que la señal se introduce por la terminal no inversora, lo cual va a significar que la señal de salida estará en fase con la señal de entrada y amplificada. Ver Figura A.2. El análisis matemático para obtener la ganancia es:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{A.5})$$

**Transimpedancia:** La señal de entrada a un amplificador de transimpedancia es una fuente de corriente, y su salida es una fuente de voltaje. El parámetro de ganancia es la relación del voltaje de salida del circuito abierto respecto de la corriente de entrada, y se denomina transimpedancia a circuito abierto (o simplemente transimpedancia), ver Figura A.3. El análisis matemático para obtener la ganancia es:

$$V_{out} \approx I_D R_1 \quad (\text{A.6})$$

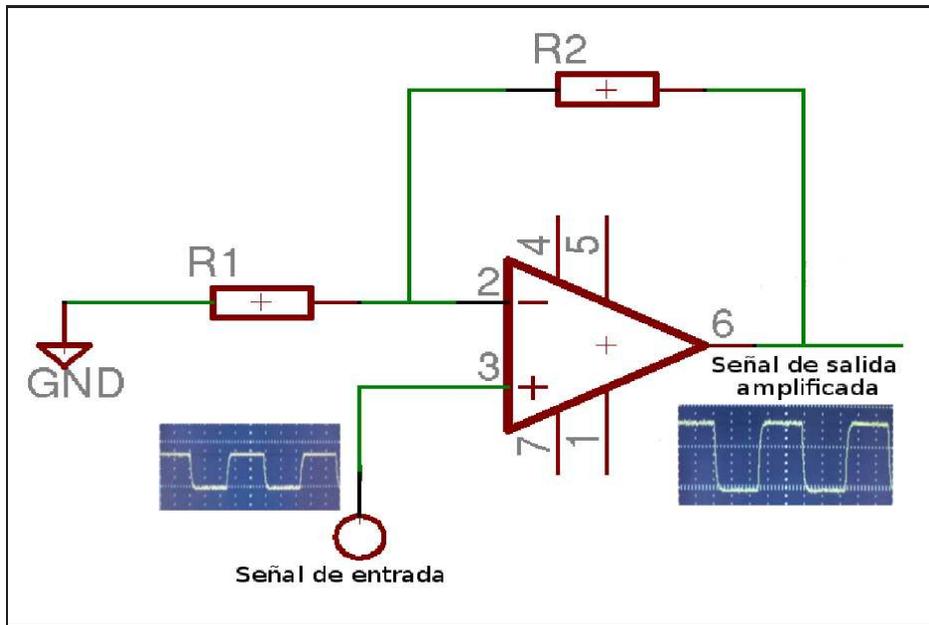


Figura A.2: Configuración no-inversora

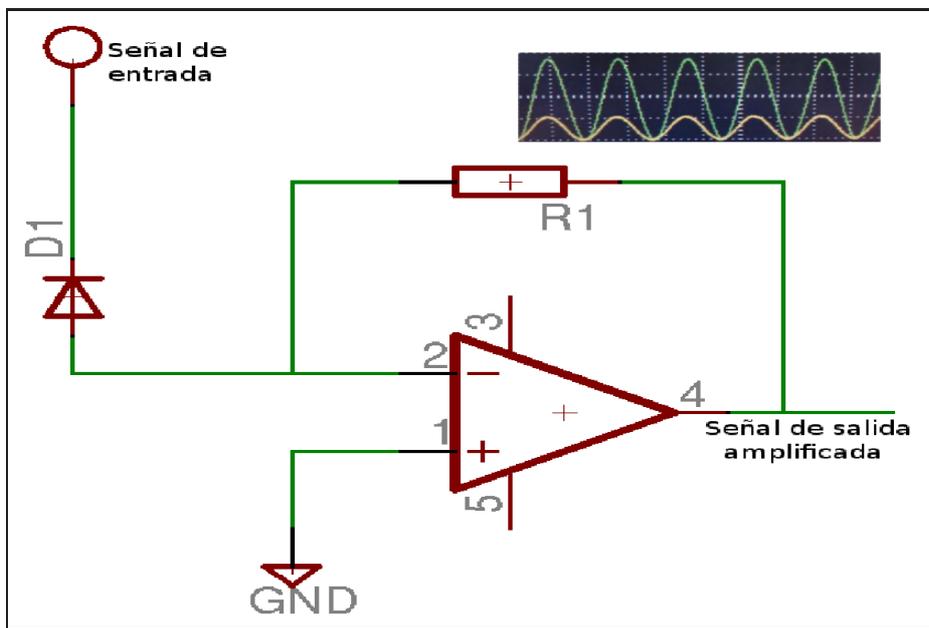


Figura A.3: Configuración transimpedancia