

Aplicación de la Radiometría en agricultura

Application of Radiometric in Agriculture

Germán Torrijos Cadena¹

Ingeniero catastral y Geodesta, especialista en Sensores Remotos, especialista en Gerencia de Recursos Naturales, docente Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Grupo de investigación GEOTOPO

Fecha de recepción: Abril 2 de 2008

Fecha de aceptación: Mayo 30 de 2008

Revisor: Ing. Luis Antonio Hernández Rojas.

RESUMEN

Bajo el concepto de *agricultura de precisión*, sustentada en datos de sensores remotos, sistemas de información geográfica y datos de GPS, se han ejecutado estudios dirigidos al incremento de la productividad de los diferentes cultivos. A partir de estos datos se propone el análisis combinado de parámetros agronómicos determinantes en el crecimiento y rendimiento del cultivo como: el suelo, la fertilización y el riego, factores que pueden ser visualizados espacialmente en imágenes multiespectrales aerotransportadas de alta resolución. Pero ¿será que estos métodos son los únicos que podemos utilizar o tenemos a nuestro alcance para obtener esos mayores rendimientos?

A través del análisis **radiométrico in situ**, con medidas tomadas con un espectroradiómetro de campo, se puede establecer el comportamiento espectral de los cultivos (cualquier cultivo en estudio) en cada una de sus etapas de desarrollo. De esta forma estaríamos minimizando los costos de producción y demás factores que inciden en la producción y desarrollo del cultivo.

PALABRAS CLAVES: Radiometría, excitancia, irradiancia, emitancia, reflectancia

ABSTRACT

Under the concept of Precision Agriculture, sustained in remote sensor data, geographical information systems and data of GPS, they have been executed studies directed to the increase of the productivity of the different cultivation. As of these data is proposed the combined parameters analysis agronomic determinant in the growth and yield of the cultivation as are: soil, the fertilization and the irrigation, factors that they can be visualized espacial in images multiespectral airborne of high resolution. But that these methods are the only that we can use or we have to our scope to obtain those greater yields?

Through analysis radiometric in situ, with measures taken with a espectroradiométric of field, it can be established the spectral behavior of the cultivation (any cultivation in study) in each one of their/its development stages. In this way we would be minimizing the production costs and other factors that impact in the production and development of the cultivation.

KEY WORDS: Radiometric, excitancia, irradiance, emittance, reflectance

¹ Enviar correspondencia a Germán Torrijos Cadena, Avenida Circunvalar Venado de Oro, tel. 0571- 3376906, cartografia7@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de países agrícolas y en vía de desarrollo ha tomado la agricultura de precisión, como el seguimiento y/o ubicación con GPS, de los cultivos en estudio o la utilización de imágenes satelitales (en la mayoría de los casos de baja resolución espacial) como la herramienta de seguimiento de los mismos. Observando un caso en concreto y para no extendernos tanto, muestro un ejemplo de lo que me refiero: *Agricultura de Precisión: Una Realidad en el Campo Argentino*.²

El fundamento de la agricultura de precisión en Argentina y en el mundo se basa en poder manejar la variabilidad, la cual, según algunos autores, puede ser natural (topografía, génesis de suelo, etc.), inducida (manejo de la fertilidad, rotaciones, etc.) o la combinación de las dos variabilidades. "En la actualidad, la agricultura de precisión en Argentina posee todas las herramientas que se encuentran disponibles para el resto del mundo, desde la base de esta herramienta que es el GPS, continuando con el monitor de rendimiento, software, monitores de siembra, equipamiento para la aplicación de semilla y fertilizante, dosis variable, banderilleros satelitales, sensores remotos (como fotografía aérea, imágenes satelitales, etc.)."³

Y así sucesivamente, podemos estar citando bibliografía y trabajos publicados por la internet, de Uruguay, Paraguay, Ecuador y Chile, entre otros, pero en un 90% toman la agricultura de precisión con el mismo enfoque.

Con este artículo quiero expresar mi enfoque hacia una verdadera agricultura de precisión con el manejo de los radiómetros o espectro radiómetros, pero para esto tenemos que tener claro los fundamentos básicos de la radiometría y sus principios físicos.

² Bragachini, M., Méndez, A. y Scaramuzza, F., *Agricultura de Precisión: Una Realidad en el Campo Argentino*, Proyecto Agricultura de Precisión - INTA Manfredi.

³ *Ibíd.*

2. ¿QUÉ ES LA RADIOMETRÍA?

Para este concepto, y sin complicarlo mucho, tomo las definiciones de nuestros diccionarios y libros de percepción remota: "Parte de la Física que trata de la medición de la Intensidad de las radiaciones". Al ser tan clara y sencilla, simplemente nos preguntaríamos, ¿cuáles o qué tipo de radiaciones? Pues muy sencillo, las radiaciones electromagnéticas que emiten los cuerpos que componen la superficie terrestre. Y así también tenemos la definición de los radiómetros como los instrumentos para medir la energía radiada por las superficies con una longitud de onda de milímetros o centímetros.

Como entramos en el campo de la radiación electromagnética, definimos y aclaramos la naturaleza de la misma, expresando que toda materia a una temperatura absoluta de cero grados Kelvin (0K) emite energía. De esta manera todo cuerpo con una temperatura absoluta por encima de cero puede y debe ser considerado como una fuente de radiación. También debemos considerar para este caso las dos teorías que explican la propagación de la energía a partir de una fuente: La teoría del "Modelo Corpuscular" y la teoría del "Modelo Ondulatorio". La primera nos dice que la energía se propaga por la emisión de unos fotones que viajan a la velocidad de $c = 30 \text{ cm/ns}$ - en el vacío (velocidad de la luz) y la segunda postula que la propagación de la energía se hace a través de un movimiento ondulatorio.

Algunos fenómenos en sensores remotos se pueden explicar mejor a través de la teoría ondulatoria y otros a través de la teoría corpuscular o de fotones.

Para nuestro caso consideramos la energía de naturaleza ondulatoria. Según las fórmulas de Maxwell, la aceleración de una carga eléctrica provoca alteraciones o perturbaciones en un campo eléctrico y magnético que se propagan repetitivamente en el vacío. Estas perturbaciones son llamadas ondas electromagnéticas.

Por lo anterior podemos definir una onda electromagnética como la oscilación del campo eléctrico (E) y magnético (M), siguiendo un Patrón Armónico de Ondas. El Patrón Armónico de Ondas (PAO) puede ser definido como una separación armónica en el tiempo entre las mismas.

La velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío es la velocidad de la luz (30cm/ns). El número de ondas que pasa por un punto del espacio en un determinado tiempo se define como la frecuencia (f) de la radiación electromagnética. La frecuencia es directamente proporcional a la velocidad de propagación de la radiación.

Por tanto, una onda electromagnética está caracterizada por la longitud de onda λ (lambda) según:

$$(1) \quad \lambda = C / f \quad \begin{array}{l} C = \text{velocidad de la luz} \\ f = \text{frecuencia} \end{array}$$

Es importante observar que una onda electromagnética representa la variación en el tiempo del campo eléctrico y del campo magnético. Estos campos siempre suceden simultáneamente. Por tanto, cuando las ondas electromagnéticas son interceptadas por la materia, el resultado de esta interacción dependerá de las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia.

3. LA ENERGÍA

Pero ¿qué ocurre cuando una onda electromagnética llega a un objeto?

Un proceso de transferencia de energía de radiación para el objeto. Y ¿cómo es ese proceso de transferencia de energía? Desde los primeros experimentos de generación de ondas electromagnéticas se observó que la radiación es emitida en forma de pulsos que contenían una cierta cantidad de energía.

Buscando las explicaciones para ese fenómeno, Planck dedujo que la energía radiante se transfiere de un cuerpo para otro en cantidades fijas. Un cuerpo no irradia

energía de forma continua, lo hace por medio de "pulsos" o "quantum" y la energía emitida por el cuerpo o el objeto debe satisfacer la siguiente expresión:

$$(2) \quad Q = h \cdot f \quad \begin{array}{l} Q = \text{energía} \\ h = \text{constante de Planck} \\ \quad - 6,626 \times 10^{-34} \text{ watts} \\ f = \text{frecuencia} \end{array}$$

Reemplazando (f) a partir de la ecuación (1)

$$(3) \quad \lambda = hc / Q$$

Donde podemos concluir que un "quantum" de energía es directamente proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la longitud de onda (λ).

De lo anterior podemos concluir que la radiación que llega a un objeto tendrá un espectro de longitud de onda con ciertas "cantidades" de energía diferente. De esta forma la radiación electromagnética en cada longitud de onda tendrá una cierta probabilidad de ser absorbida por la materia **en función de sus propiedades físico-químicas.**

Como se sabe, la materia está compuesta por átomos que se organizan en moléculas siguiendo arreglos bien definidos. Los átomos a su vez están constituidos por un núcleo y por electrones que orbitan en torno de él. Los electrones de un átomo ocupan orbitas bien definidas que poseen diferentes niveles de energía. Cuando a un átomo llega una radiación electromagnética con una cierta cantidad de energía, ésta podrá ser absorbida por la materia y dado el caso provocará un salto energético del electrón. El electrón que estaba o se encontraba en estado fundamental pasa para un estado excitado. Él sufre una transición de un estado para otro, absorbiendo radiación. Ese "quantum" de radiación absorbido es nuevamente emitido cuando el electrón regresa a su estado fundamental. A este "quantum" de energía absorbido o emitido se le denomina *foton*.

Aquí nos damos cuenta de la complejidad para explicar ciertos fenómenos, algunos como la propagación de la energía, la dispersión, la reflexión, la refracción y la interferencia son muy explicados cuando tratamos la energía radiante como una onda, otros fenómenos como la absorción y la emisión de la energía radiante se comprenden mejor cuando reconocemos la naturaleza "quantica" del campo electromagnético.

4. EL SOL

La principal fuente de energía electromagnética disponible para el Sensoriamiento Remoto es el sol.

Cuando observamos el sol como una fuente de energía electromagnética, lo consideramos como una esfera de gas acaecido por las reacciones nucleares de su interior. La superficie aparente del sol es conocida con el nombre de fotosfera y tiene un diámetro de $1,3914 \times 10^6$ km. El sol está a una distancia media de la tierra de $149,6 \times 10^6$ km, que es la medida de una 1 unidad astronómica (U.A). El enero en el Perihelio, esta distancia del sol

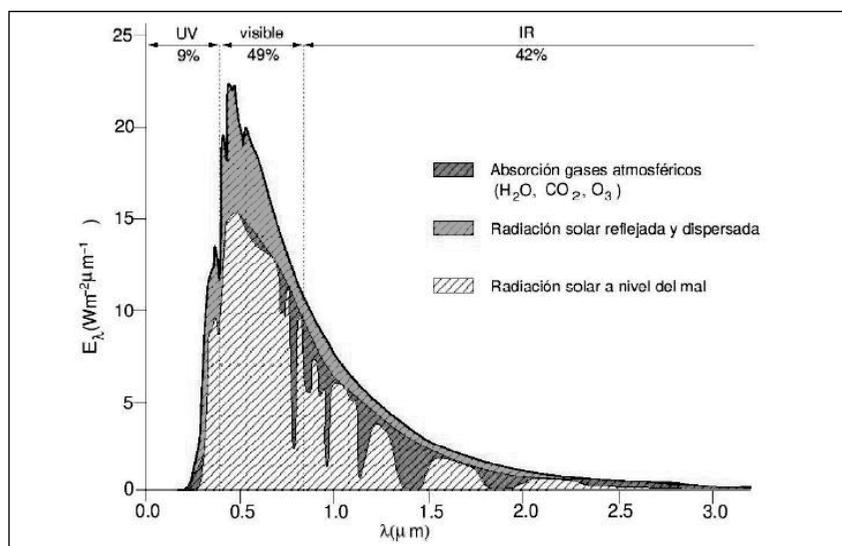
con relación a la tierra es menor y en julio o Afelio, esta distancia es mayor.

La energía radiada por la fotosfera es la principal fuente de radiación electromagnética del sistema solar. La energía radiante proveniente del sol en dirección a la tierra se denomina *flujo radiante*. La configuración de este flujo radiante en términos espectrales es bastante compleja debido a las grandes variaciones de temperatura que ocurren en la superficie del sol y por la opacidad de ciertas regiones de la atmósfera terrestre. Para los objetivos o fines del sensoriamiento remoto en la superficie de la Tierra, se admite en términos generales que la emisión de la energía del sol se asemeja a la de un cuerpo negro con temperatura equivalente a 5900K.

En la figura 1, observamos la representación gráfica de la energía radiante del sol que incide sobre la tierra, para cada longitud de onda.

El gráfico presenta tres curvas distintas: a) la irradiancia solar en el punto máximo de la atmósfera, b) la irradiancia solar al nivel del mar y c) la curva de irradiancia de un cuerpo negro a la temperatura de 5900K.

Figura 1. Curva de irradiancia solar.



Fuente: Novo (1990)

Un análisis de esta figura nos permite algunas consideraciones sobre la energía solar disponible en la superficie de la tierra para fines de sensoriamiento remoto. En primer lugar, podemos observar que el máximo de energía disponible se encuentra en la faja del $0,4 \mu\text{m}$ a $0,7 \mu\text{m}$, que es conocida como la región del visible en el espectro electromagnético.

Otro hecho importante que podemos observar es que existen regiones del espectro electromagnético para las cuales la atmósfera es opaca, no permite el paso de la radiación electromagnética. Estas regiones definen las "bandas de absorción de la atmósfera", las regiones del espectro electromagnético donde la atmósfera es transparente son conocidas como "ventanas atmosféricas".

También podemos observar otra comparación muy interesante para el sensoriamiento remoto, como es nuestra propia tierra: el espectro de radiación de la tierra se aproxima al espectro de radiación de un cuerpo negro a la temperatura de 300K

En la figura 2 observamos la diferencia entre el espectro de emisión solar y el espectro de emisión terrestre.

Comparando el espectro de emisión de la tierra con el espectro de emisión del sol, podemos concluir que 1) a mayor temperatura de un cuerpo, mayor es la cantidad de energía por él emitida y 2) cuanto mayor es la temperatura del cuerpo, menor es la longitud de onda de máxima emisión.

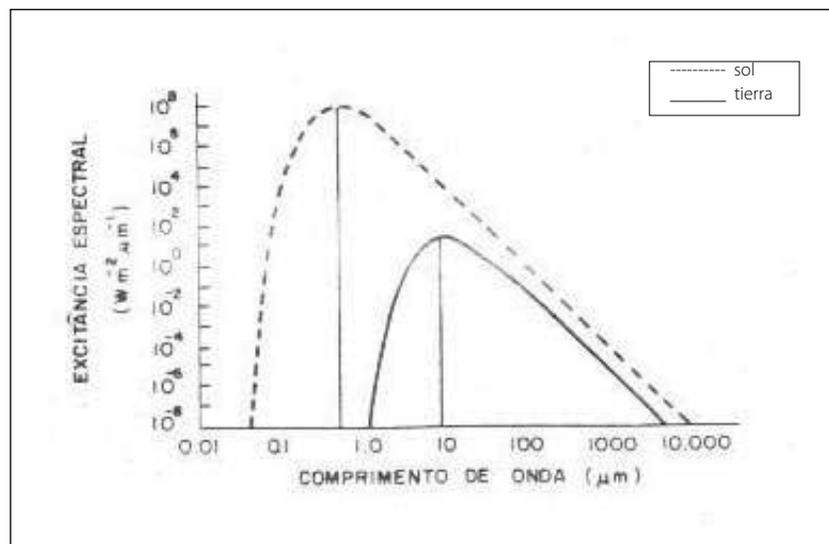
En otro artículo podemos seguir analizando la radiación del cuerpo negro, por ahora entraré un poco más en detalle con el tema que nos interesa: la aplicación de la Radiometría en la agricultura.

5. CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIOMETRÍA

Anteriormente hemos mencionado que la base de la tecnología del sensoriamiento remoto es la detección de las alteraciones sufridas por la radiación electromagnética cuando ésta entra en contacto con los objetos de la superficie terrestre.

Ahora supongamos que tenemos una fuente de radiación incidiendo sobre un objeto. Para evaluar el tipo de interacción de la radiación con el objeto, tenemos que realizar

Figura 2. Espectros de emisión de la tierra y el sol.



Fuente: Novo (1990)

algunas medidas que nos informen sobre la cantidad de energía producida por la fuente, la cantidad de energía atenuada por el medio que se interpone entre el objeto y la fuente, la cantidad de energía absorbida por el objeto, además de los aspectos cuantitativos; también tenemos que observar cuáles regiones del espectro de radiación de la fuente sufrirán mayor atenuación por el medio antes de incidir sobre el objeto y en qué regiones del espectro existe una mayor o menor absorción.

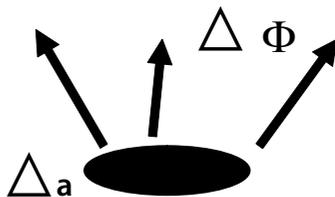
Esas informaciones son derivadas de las **medidas radiométricas**. Uno de los principales objetivos de la Radiometría es medir la energía radiante.

En sensoriamiento remoto lo que se registra es **el flujo radiante que deja el objeto** y se dirige en dirección al sistema sensor. Lo importante es conocer cómo ese flujo radiante se modifica espectralmente y espacialmente en una determinada área. Algo importante es que los tiempos de integración o exposición son constantes, el flujo radiante registrado es lo que hace la diferencia de la escena (imagen).

La irradiancia y la excitancia son grandezas radiométricas que expresan la densidad del flujo radiante en una superficie.

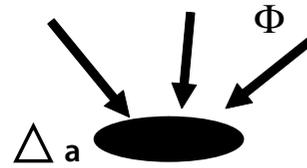
Cuando ese flujo es emitido por la superficie, es llamado **excitancia (M)**.

Figura 3. Excitancia.



Cuando ese flujo incide sobre la superficie, es llamado **irradiancia (I)**

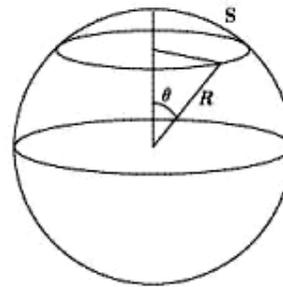
Figura 4. Irradiancia



La **intensidad radiante** de una fuente es el flujo radiante que emite la fuente en una dirección. Esa dirección está definida por un ángulo sólido infinitesimal.

El concepto de ángulo sólido es muy importante en sensoriamiento remoto porque describe la convergencia o divergencia angular, en tres dimensiones, del flujo radiante dirigido a una superficie o proveniente de la superficie. La figura 5 ilustra el concepto del ángulo sólido.

Figura 5. Medida del ángulo sólido.



El ángulo sólido representa el ángulo cónico subtendido por una porción de la esfera y es definido como la razón entre el área (A) y el cuadrado del radio de la esfera (r).

$$(4) \Omega = A / r^2$$

Ω = Angulo sólido, estereorradianes

A = área de la esfera subtendida por el cono

r = radio de la esfera

D = diámetro del cono

El concepto de ángulo sólido es fundamental para el concepto de radiancia. La radiancia (L) es el flujo radiante por unidad de ángulo que deja una fuente en una determinada dirección, por unidad de área perpendicular a la dirección.

Adelantándose un poco a la matemática del concepto de la radiancia podemos definirla de la siguiente forma :

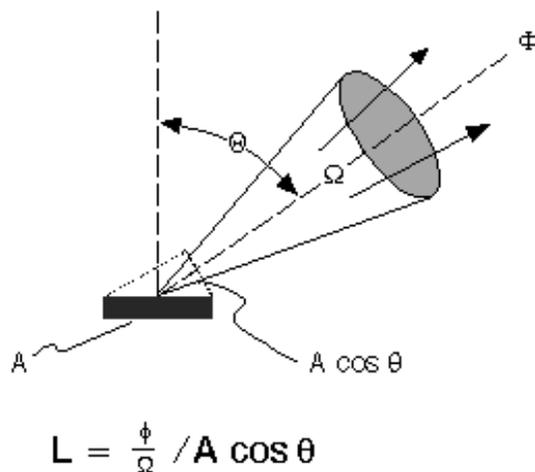
$$(5) \quad L = \delta^2 \Phi / (\delta A_1 \delta A_2 (\text{Cos}\theta_1 \text{Cos}\theta_2)) / D^2$$

La cantidad $(\delta A_1 \delta A_2 (\text{Cos}\theta_1 \text{Cos}\theta_2)) / D^2$ es el ángulo sólido que hemos llamado Ω , subtendido entre la segunda y primera abertura de la fuente. Reescribiendo la ecuación (5) tenemos:

$$(6) \quad L = \delta^2 \Phi / \delta A \text{Cos}\theta \delta \Omega$$

En sensoriamiento remoto generalmente se mide el flujo radiante que deja una superficie en dirección al sensor, consecuentemente lo que se mide frecuentemente es la radiancia del objeto.

Figura 6. Esquema de la radiancia.



Hasta aquí he presentado algunos conceptos fundamentales de la radiación y terminare esta sección con la interacción del flujo radiante y el objeto.

La radiación o flujo que el objeto puede recibir se puede descomponer en tres términos (Chuvienco-1990):

$$(7) \quad \Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

Esto es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido.⁴

De esta forma este flujo depende de las características físico-químicas del objeto y varía en distintas bandas del espectro electromagnético.

Lo anterior significa que cada objeto o elemento de la naturaleza presenta un comportamiento diferente para cada banda o sección del espectro electromagnético, y así podemos seleccionar las mejores respuestas espectrales para la clasificación de los mismos.

En esta parte es donde entra la Radiometría propiamente dicha para la agricultura mediante la aplicación de los radiómetros o espectroradiómetros en el seguimiento del cultivo, obteniendo el espectro del mismo desde el momento de su siembra hasta su etapa final de producción.

6. LOS RADIÓMETROS O ESPECTRORADIÓMETROS

Los radiómetros o espectroradiómetros son equipos que se consiguen en el mercado de diferentes prototipos, los hay para el estudio de la capa de ozono o para el estudio de los elementos o partículas en suspensión en la atmósfera. También se utilizan para el estudio específico del agua, ya sea de diferentes tipos como: aguas marinas, aguas estancadas, aguas de acueductos, aguas de ríos, etc. Los radiómetros son equipos portátiles de fácil

⁴ Chuvienco, E., *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid, Ediciones Rialp, S.A., 1990.

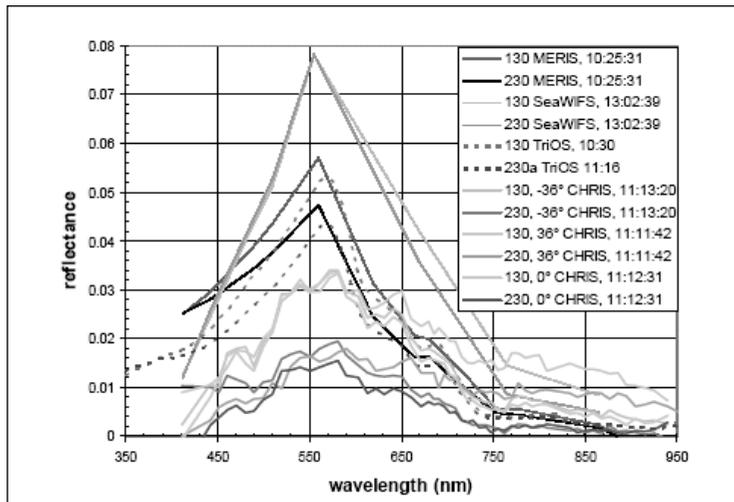
manejo y difícil adquisición, generalmente un poco costosos y muy variados en cuanto a su configuración espectral. Prácticamente dependiendo del estudio del cultivo que vayamos a efectuar se debe adquirir el radiómetro, porque debemos tener en cuenta su rango espectral.

Como la parte fundamental del radiómetro es el espectro que nos brinda, podemos obtener las firmas espectrales de un determinado cultivo a nivel regional o las firmas espectrales del agua, suelo o minerales que

más nos interesen y de esta forma crear un directorio de firmas espectrales para un mejor aprovechamiento de lo referido al principio de este artículo.

Hoy existen satélites con sensores hiperespectrales que nos están brindando estos espectros, como es el estudio efectuado por los investigadores Barbara Van Mol y Kevin Ruddick, del Instituto de Royal Belgian de ciencias Naturales, con su trabajo "The compact High resolution Imaging Spectrometer". El siguiente gráfico ha sido tomado de ese trabajo.

Figura 7. Reflectancia del satélite y su comparación in situ con un radiómetro



Radiómetros en campo trabajando in situ.

Figura 8. Utilización de radiómetros en caña de azúcar, in situ.



Finalmente agradezco al Instituto de Investigación Espacial-INPE – Brasil por haberme brindado la oportunidad de trabajar directamente con un radiómetro en nuestras prácticas de campo.

CONCLUSIONES

- La utilización y el desarrollo de la tecnología como los radiómetros es hoy por hoy un recurso necesario para el mejoramiento de nuestra calidad de vida.
- Con el desarrollo de los sensores hiperespectrales, tenemos un detalle bastante alto y complejo de nuestros recursos naturales, como lo demuestran los trabajos que se están desarrollando, pero concluyo que el manejo de un radiómetro o espectroradiómetro para las pruebas in situ superan en un buen margen a estas imágenes si queremos efectuar estudios específicos de cultivos.
- La reducción de los costos en la utilización de estos equipos son verdaderamente valiosos por su proyección en el seguimiento y mejoramiento espectral de un cultivo.
- En Colombia, es muy poco lo que se ha trabajado este tema y no contamos con un apoyo de ninguna institución (ICA, CIAT) ni ministerio para un trabajo investigativo en la utilización de esta tecnología.
- El trabajo realizado con los radiómetros en campo es un trabajo que debe

contener una serie de parámetros muy específicos y detalles y observaciones de alto nivel por las variaciones de las condiciones de cada cultivo y de los factores climáticos que se tengan en el momento de recolección de las muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- Burrough, P., *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources*, London, Oxford, Oxford University Press, 1990.
- Chuvieco, E., *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Madrid, Ediciones Rialp, S.A., 1990.
- Dias, L., *Corrección Radiométrica de Imágenes Satelitales*, San Jose dos Campos, IPE, 1982.
- Instituto de Pesquisas Espaciales- INPE, Laboratorio de Tratamiento de Imágenes Digitales, *Informes generales*, San José dos Campos, INPE – Brasil, 1990.
- Novo, E., *Aplicaciones de los Sensores Remotos a Problemas Hidrológicos*, San José dos Campos, INPE.-Brasil, 1990.
- Pérez, C., *Teledetección Nociones y Aplicaciones*, España, s.e., 2007.
- www.cicyt.es/ugbo/Hesperides/equipamiento/oceanografico/radiacion/radiometro.htm
- <http://www.geog.umd.edu/Courses-Spring/GEOG480/lecture4/sld012.htm>