

PARTE II. UNIDAD 2. LAS VARIABLES DE RADIACIÓN

Las variables características de la radiación, ya sea de corta o de de larga longitud de onda, representan unos

componentes fundamentales del balance de energía del invernadero y, por consiguiente, inciden de forma decisiva en el determinismo del clima interior. Esta Unidad se dedica a la presentación de los principales sensores de medida de las componentes de la radiación solar (incluyendo la fracción fotosintéticamente activa, o PAR) y de la radiación neta.

Los sensores para medir la radiación solar pueden clasificarse en dos categorías: sensores térmicos (Apartado 1) y sensores cuánticos (Apartado 2).

1- MEDIDA DE LA RADIACIÓN CON SENSORES TÉRMICOS

Fundamentos

Los sensores térmicos absorben la radiación y la transforman en energía térmica. Esta última es convertida en una señal eléctrica que puede medirse. Se utilizan para medir la radiación neta y la radiación global solar.

Medida de la radiación solar: el piranómetro

Los sensores térmicos (o termopilas) consisten en una serie de soldaduras alternadas entre dos conductores metálicos de naturaleza diferente (termopares, por ejemplo, de cobre-constantan). Los termopares están dispuestos en serie en dos superficies que poseen un poder de absorción diferente (Figura 13). Una de ellas es la superficie receptora que absorbe la radiación (*cuerpo negro*) y la otra es una superficie blanca que la refleja (*o bien una masa térmica*). Las soldaduras impares se disponen en la superficie negra y las pares en la masa térmica. Cuando existe una diferencia de temperatura entre las soldaduras, se genera una tensión que es proporcional al número de soldaduras y a la diferencia de temperatura (T_1-T_2). La tensión de medida es proporcional a la radiación solar incidente.

Este tipo de sensores miden la radiación global solar. *La respuesta espectral es independiente de la longitud de onda de la radiación incidente*, es decir, son sensores neutros. La superficie sensible está protegida con una doble cúpula de cuarzo y el cuerpo del aparato con una pantalla circular pintada de blanco (ver Figura 14).

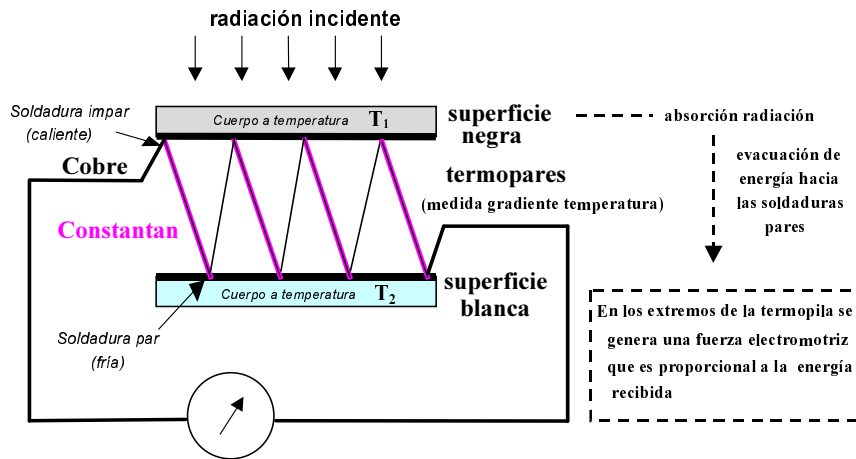
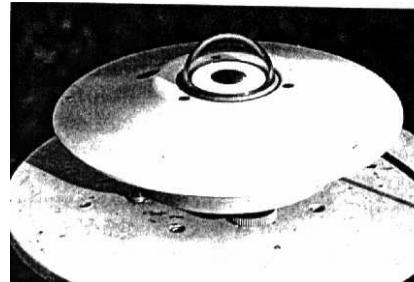
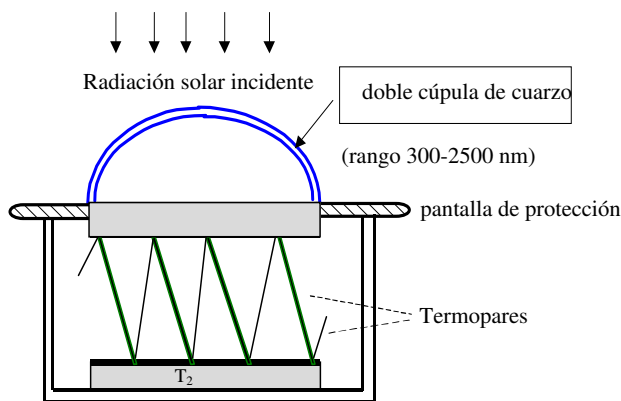


Figura 13. Principio de medida de los sensores térmicos.



tensión de salida 0-10 mV

Figura 14. Representación esquemática de una termopila (izquierda) y vista de la termopila.

El tiempo de respuesta de las termopilas es corto (segundos). Tienen un nivel de precisión aceptable ($\pm 5 \text{ W m}^{-2}$). Deben de calibrarse con frecuencia y son aparatos demasiado sofisticados, lo que limita su utilización por los agricultores. Existen, sin embargo, versiones portátiles, más asequibles y robustas pero su precisión es inferior ($\pm 20 \text{ W m}^{-2}$).

Medida de la radiación neta: el pirradiómetro

La radiación neta corresponde al balance del conjunto de intercambios de longitud de onda corta y de longitud de onda larga que se producen en una superficie. El principio de medida de este tipo de aparatos (pirradiómetros) es el mismo que el que se ha descrito para las termopilas. En este caso, el sensor está equipado con dos superficies sensibles (Figura 15), una ubicada en la cara superior y otra en la inferior, protegidas cada una por una cúpula de plástico (PE) que deja pasar la radiación de longitud de onda corta y de longitud de onda larga.



Figura 15. Vista de un pirradiómetro para la medida de la radiación neta.

En el ejemplo que se da en la Figura 16, el sensor mide la radiación neta de una superficie vegetal al aire libre. Es decir, la radiación incidente total sobre las dos caras de la superficie menos las pérdidas totales por radiación (ver Parte IV Unidad 1, concepto de radiación neta).

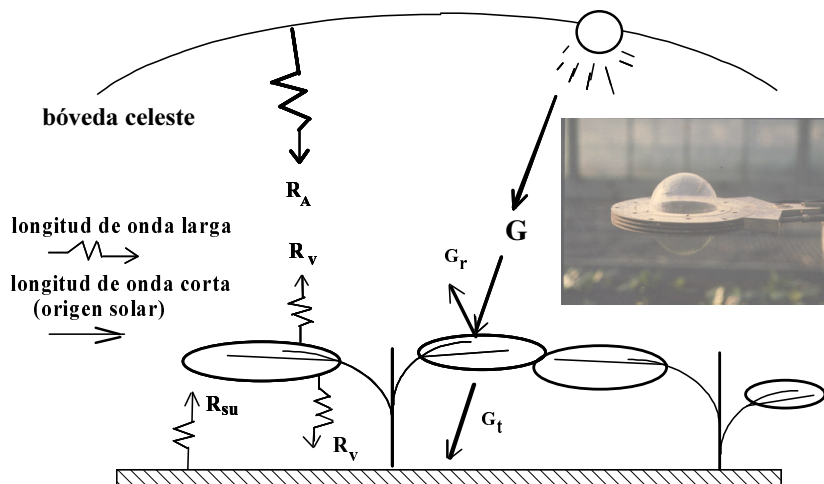


Figura 16. Medida de la radiación neta, R_N , de un vegetal al aire libre. La radiación incidente integra: la radiación global solar, G , la radiación atmosférica, R_A , y la radiación emitida por el suelo, R_{su} . Las pérdidas por radiación corresponden a: la radiación solar reflejada, G_r y transmitida por la vegetación G_t y la radiación emitida por la vegetación = $2 R_v$. La radiación neta que mide el aparato correspondería, en este caso, al balance siguiente: $R_N = G - G_r - G_t + R_A + R_{su} - 2 R_v$.

2- Medida de la radiación solar con sensores cuánticos (o fotopilas)

Fundamentos

Los sensores cuánticos utilizan semiconductores estables (silicio, selenio, sulfuro de cadmio, sulfuro de plomo, etc.). Su respuesta espectral (Figura 17) se limita a una gama estrecha de longitud de onda que depende del semiconductor empleado. Como puede observarse en la figura, la sensibilidad de cada semiconductor pasa por un máximo a una longitud de onda que depende del tipo de material.

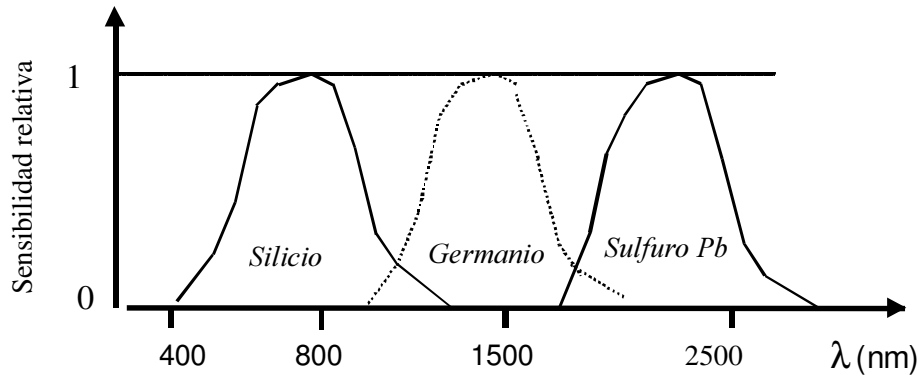


Figura 17. Respuesta espectral de diferentes semiconductores

Las fopilas utilizan la energía radiante que absorben para liberar electrones que generan una corriente eléctrica. Cuando un fotón incide en la superficie se libera un electrón en el material semiconductor. La corriente que se genera en el circuito es proporcional al número de fotones recibidos (Figura 18).

Contrariamente a lo que ocurre con las termopilas, la respuesta espectral de los sensores cuánticos depende de la longitud de onda de la radiación incidente. Es decir, su respuesta depende del número de electrones que son excitados por los fotones absorbidos.

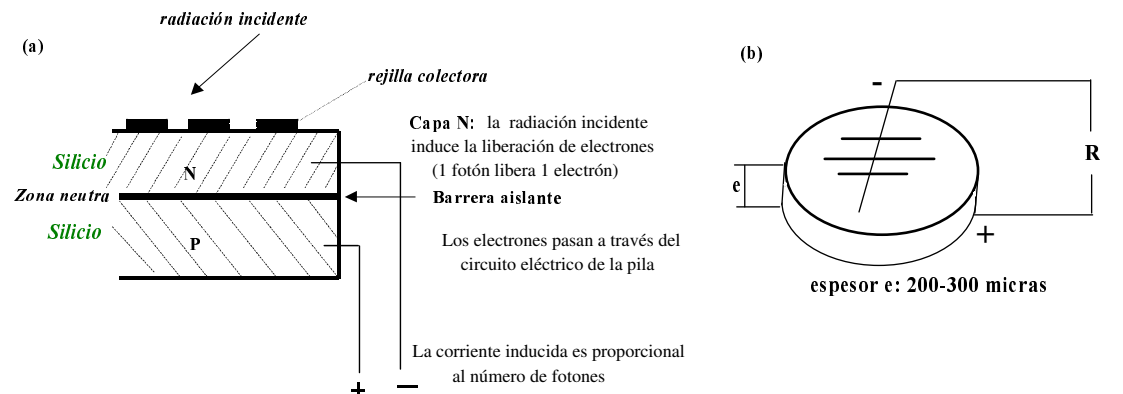


Figura 18. (a) Principio de medida de los sensores cuánticos. (b) En general, el circuito eléctrico comporta una resistencia, en cuyos extremos se mide una tensión.

La fopila de silicio: medida de la radiación global solar

En los invernaderos comerciales, y en otras aplicaciones prácticas, se utiliza sobre todo la célula de silicio para medir la radiación global solar. El nombre correcto de este sensor es un *fotómetro*, aunque a veces se denomina, por error, un "*piranómetro*". El principio de funcionamiento es el mismo que el de las fopilas, siendo su respuesta función de la longitud de onda de la radiación.

Las Figuras 17 y 19 muestran que la respuesta espectral de estas pilas corresponde a una gama estrecha de longitud de onda entre 400 nm y 1100 nm, siendo la gama del espectro global solar: 300-2500 nm. Por lo tanto, la radiación medida por la pila representa solamente un 72 % del espectro solar total. Esto explica que tenga que corregirse la sensibilidad del aparato para tener en cuenta la totalidad del espectro solar. Los aparatos que se encuentran en el comercio *ya integran este factor de corrección*.

Sin embargo, dado que no miden el espectro solar global, una variación de la composición espectral de la radiación va a inducir una variación de la respuesta del aparato (error: un 3 %). No son aparatos muy precisos ($\pm 30 \text{ W m}^{-2}$).

Es también el aparato más utilizado en la regulación del clima de invernaderos (400 - 1100 nm. gama: 0-10 mV). Su tiempo de respuesta es muy corto (unos milisegundos).

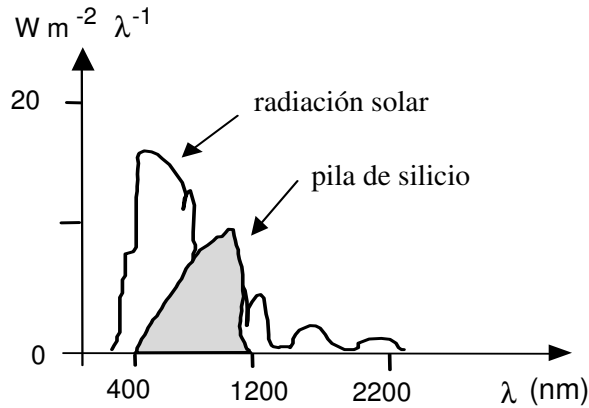


Figura 19. Comparación entre el espectro solar global y la respuesta espectral de una pila de silicio.

- Fotopilas con filtros especiales: medida de la radiación PAR

La pila de PAR (Figura 20) es una fotopila de silicio dotada de filtros de color y de un filtro especial que deja pasar solamente la radiación visible (400-700 nm). Reproduce más o menos la respuesta ideal en la gama de radiación útil a la fotosíntesis (PAR o “photosynthetic active radiation”), siendo éste un proceso que depende del número de fotones de luz absorbidos por las hojas. Dado que la energía que contiene un fotón disminuye linealmente con la longitud de onda, es preciso que la sensibilidad del sensor que se utiliza para medir el PAR aumente con la longitud de onda. Este tipo de sensores pueden utilizarse independientemente de la composición espectral de la radiación en la gama del visible.

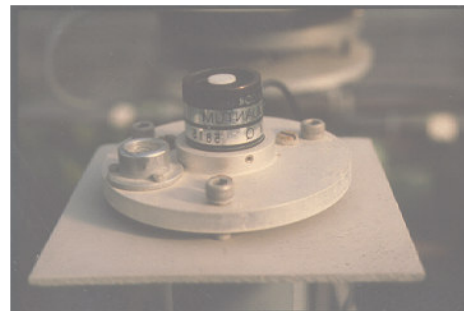
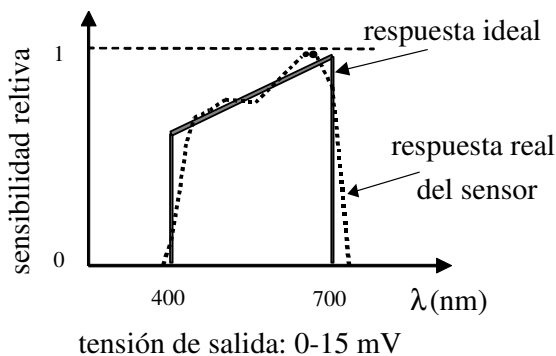


Figura 20. Respuesta espectral del sensor PAR (izquierda) y vista del sensor (medida de la parte fotosintéticamente activa del espectro solar).

El luxómetro

El luxómetro es una fotopila de silicio que mide la iluminación en unidades fotométricas (lux, lumen o candela). Estas unidades son relativas a la sensibilidad del ojo humano (Figura 21). *Esto explica que no sea aconsejable su utilización en las aplicaciones agronómicas.* Su tiempo de respuesta es muy corto (milisegundos).

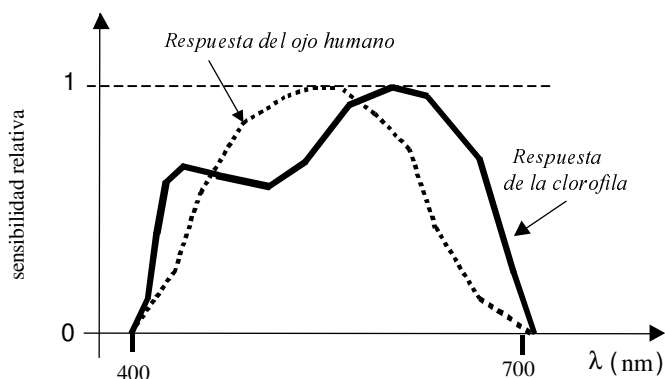


Figura 21. Comparación entre el espectro de sensibilidad del ojo humano y de la clorofila.

Por lo tanto, cuando se hacen estudios con diferentes fuentes de luz (natural, lámparas), es crucial conocer la respuesta espectral de cada fuente y el tipo de sensor que se utiliza. Esto es debido a que la densidad de flujo energético, o de flujo de fotones, que proporcionan las lámparas depende de la distribución espectral de cada tipo de lámpara.

En la Figura 22, se muestra un ejemplo de la distribución espectral de la radiación solar, de lámparas incandescentes y fluorescentes junto con la sensibilidad del ojo humano a la luz.

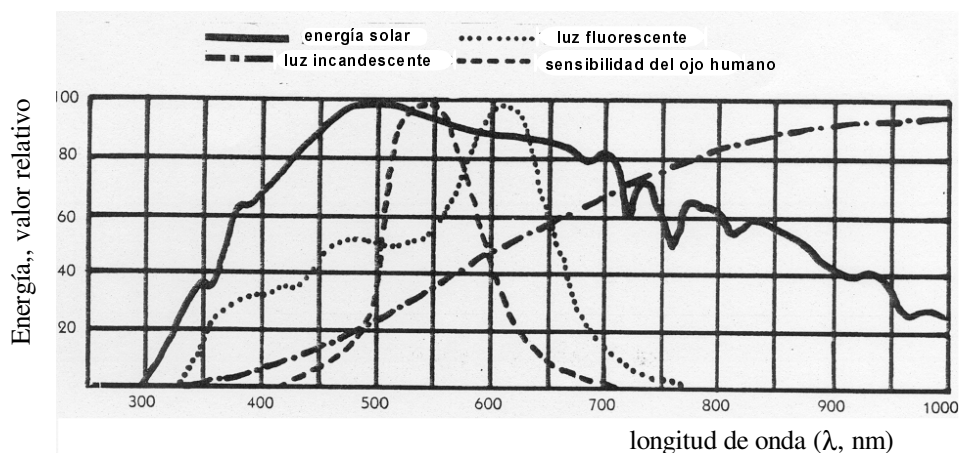


Figura 22. Distribución espectral de la energía (valor relativo) de la radiación solar, la luz incandescente y fluorescente y la sensibilidad del ojo humano a la luz.

La importancia que tiene la elección de la fuente de luz, al igual que el sensor que se utiliza para medirla, puede observarse en el Cuadro 1 donde se han utilizado sensores

diferentes para medir la radiación de tres tipos de lámparas, cada una de las cuales aporta 100 W m^{-2} de radiación PAR.

Por ejemplo, puede observarse que la lámpara de cuarzo-yodo, que posee un espectro rico en radiación infrarroja, da valores de radiación global solar que son superiores de 170 % a los de la luz natural y las lámparas de vapor de mercurio.

Las diferencias más pequeñas entre las diferentes fuentes de luz se observan cuando se mide la densidad de flujo de fotones, puesto que alcanza un valor máximo de un 10 % cuando se compara la lámpara de cuarzo-yodo con la luz natural.

Cuadro 1. Valores de radiación medidos con diferentes sensores y tres tipos de lámparas que proporciona, cada una, 100 W m^{-2} de radiación PAR, comparados con la luz natural (Jones, 1992).

	Sensor radiación solar (0,3-3 μm) W m^{-2}	Sensor de PAR (0,4-0,7 μm) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Luxómetro (0,4-0,7 μm) klux
Luz natural	200	457	25,2
Lámpara de vapor de mercurio	208	471	27,7
Lámpara de cuarzo-yodo	550	503	25,2
Lámpara de arco metálico	210	498	36,0

