

CARACTERIZACION RADIOMETRICA DE SITUACIONES DE STRESSES EN CULTIVOS DE TRIGO Y ALFALFA

V. SALVANS¹; S. FERNANDEZ¹; D. VIDAL¹; E. SIMON¹ y L. SOLE²

¹Opto. de Biología Vegetal, Fac. Biología. Univ. de Barcelona.

²Instituto de Geología Jaime Almera, CSIC. Martí Franqués s/n. 08028 Barcelona.

RESUMEN

Se ha procedido a la caracterización radiométrica de cultivos de *Triticum aestivum* cv. Astral, y *Medicago sativa*, sometidos a condiciones de déficit hídrico y/o nutricional. Las mediciones se hicieron mediante un radiómetro portátil, con nueve bandas de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 2.500 nm, coincidiendo con los canales espectrales de Thematic Mapper (LANDSAT) y de HRV (SPOT).

Los cambios de reflectancia en la zona visible del espectro se relacionan principalmente con diferencias de abonado, mientras que las diferencias hídricas provocan cambios en la reflectancia de la zona infrarroja próxima del espectro.

El incremento de reflectancia en la zona visible del espectro se ha atribuido a un descenso de la absorción por parte de los pigmentos foliares en caso de deficiencia nutricional.

Los resultados obtenidos se discuten en función de la utilización del método en la evaluación del estado fisiológico de los cultivos.

Palabras clave: Reflectancia, Stress hídrico, *Triticum aestivum*, *Medicago sativa*, Signatura espectral

ABSTRACT

The evolution of the spectral reflectance of two different crops, *Triticum aestivum* cv. Astral and *Medicago sativa* grown under hydric and/or nutritional stress has been assessed. A field hand radiometer, with nine filters between 400 and 2.200 nm was used for reflectance measurements. Filter wavelengths coincide with those of TM and SPOT sensors.

Reflectance changes in the visible zone of the electromagnetic spectrum were related to pigment content differences induced by fertilizer treatments, while hydric differences cause reflectance changes in the near infrared zone of the spectrum due to partial collapse of the leaf structure.

Infrared red vegetation index is closely related to green matter mass, leaf surface and Nitrogen content, thus LAI estimation from this index is complex.

The results are discussed in relation to the use of the method to evaluate the physiological condition of crops.

Key words: Reflectance, Water stress, *Triticum aestivum*, *Medicago sativa*, Spectral signature.

1. INTRODUCCION

La posibilidad de evaluar, por sistemas de percepción remota, el nivel de stress hídrico en cultivos y vegetación natural, es uno de los retos más importantes, tanto en los procesos de valoración de cosechas, como en estudios medioambientales relacionados con los problemas de los climas áridos y semiáridos. Por ello se ha procedido a la caracterización radiométrica de distintos tipos de cosechas en distintas situaciones de stress hídrico y de fertilización para facilitar la interpretación de los datos obtenidos con los satélites de observación de la Tierra para valoración de recursos naturales (LANDSAT y SPOT principalmente).

En líneas generales la reflectancia de un cultivo es función de:

- La estructura geométrica de la cobertura vegetal (orientación foliar, densidad foliar, tamaño del tallo, espaciado de las plantas...)
- Propiedades físico-químicas de los distintos componentes (pigmentos, contenido hídrico, anatomía foliar, estructura de la superficie de la hoja.).
- Geometría de la iluminación solar.

La disponibilidad de agua y nutrientes induce cambios en el desarrollo vegetal que se traducen especialmente en la evolución del área foliar (Waring, et al. 1986). Asimismo, estos cambios pueden inducir variaciones importantes en la cantidad de energía electromagnética absorbida o reflejada en las distintas longitudes de onda, provocando modificaciones en la curva de reflectancia de la planta, que pueden ser relacionadas con su estado de desarrollo o con las condiciones fisiológicas en un momento dado del mismo.

Estudios de laboratorio demostraron que la falta de contenido hídrico en las hojas se traduce en un aumento de la reflectancia en la región del infrarrojo próximo y medio (Gausman, 1974; Knipling, 1970; Bauer, 1975). Sin embargo, las mediciones realizadas directamente en el campo sobre cultivos, pusieron en evidencia que el déficit hídrico se traduce en una disminución de la reflectancia en toda la región del infrarrojo, y muy particularmente en la del infrarrojo próximo, debido a que los cambios anatómicos y fisiológicos de la hoja compensan sobradamente la disminución de absorción electromagnética debida a la falta de agua (Gausman, 1977; Collier, 1989).

El contenido de pigmentos, así como la composición nitrogenada, influyen en la cantidad total de energía absorbida en las longitudes de onda visibles, siendo posible establecer relaciones entre la reflectancia a 550 nm y la proporción de clorofilas y carotenos (Thomas y Orther, 1972; Thomas y Gausman, 1975) e incluso diferenciar distintos niveles de abonado nitrogenado para un mismo tipo de cultivo de trigo de invierno (Hizmann, et al. 1986).

Índices espectrales de vegetación basados en la relación entre la reflectancia en el infrarrojo próximo y en el rojo se han relacionado con la cantidad de biomasa verde y con el estado de desarrollo vegetal. (Harlan y Liu, 1975) utilizan esta relación para evaluar la cantidad de biomasa en cultivos de trigo, cantidad que es utilizada para estimar la producción (Boisar, et al., 1988; Gueriff, et al. 1988). Sin embargo, los índices espectrales de vegetación no dependen únicamente de la biomasa sino también del estado fisiológico y de la composición pigmentaria, haciendo difícil su utilización directa en la estimación de la biomasa, siendo necesario un mayor conocimiento de la evolución radiométrica en relación con el desarrollo fisiológico para mejorar las estimaciones de producción o las evaluaciones de stress debidas a déficit hídrico o de abonado.

2. MATERIAL Y METODOS

En los Campos Experimentales de la Universidad de Barcelona, sitios en el extremo noroccidental de la ciudad de Barcelona, con una pluviometría media del orden de 650 mm anuales, se han estudiado cultivos en régimen de secano y de regadío. En el presente trabajo se presentan los resultados correspondientes a un plantación de trigo de invierno (*Triticum aestivum* cv. Astral) y a otra de alfalfa (*Medicago sativa*), en las que se han diferenciado parcelas regadas y no regadas, así como abonadas o no en el caso del trigo, controlándose la producción vegetal y la composición de la planta.

Triticum aestivum: Se utilizó una plantación de trigo de invierno (*T. aestivum* cv. Astral) sembrada en diciembre de 1988, con un total de 27 parcelas de 2 x 3 m, con una densidad de siembra de 362 plantas/m². La mitad de las parcelas se abonaron con 200 kg de N/Ha en forma de nitrato amónico, manteniéndose para cada tratamiento una mitad de las parcelas sin regar y la otra mitad sometidas a un régimen de regadío que supuso una adición del orden de 400 l/m².

A partir de la anthesis (aproximadamente a finales de abril), se muestreó quincenalmente la hoja bandera de un lote de 6 plantas de cada parcela, determinándose la superficie foliar, peso fresco y seco y contenido en pigmentos (clorofilas y carotenos).

Las mediciones radiométricas se iniciaron en los primeros estadios de crecimiento, cuando el recubrimiento del suelo fue suficiente para eliminar su influencia en la reflectancia, y se prosiguieron con una cadencia aproximadamente bisemanal hasta la siega (26 de junio).

Medicago sativa: Se sembraron en diciembre de 1988 un total de 16 parcelas de 8 x 3 m, sometidas a un régimen de siegas mensual y bimensual. La mitad de ellas se regaron periódicamente, mientras que el resto se mantuvo sin riego provocando con ello un nivel de déficit hídrico moderado.

Determinaciones radiométricas: Las mediciones radiométricas se han realizado con un espectrómetro portátil Barringer, utilizando 9 canales, entre 400 y 2.500 nm, situados en las mismas longitudes de onda que los sensores Thematic Mapper (LANDSAT) y HRV (SPOT). La altura a la que se realizaron las mediciones fue 1,2 m y el campo visual muestreaba una superficie aproximada de 0,25 m². La calibración del radiómetro se realizaba para cada medición y para cada filtro mediante una superficie de SO₄Ba, que proporciona una reflectancia próxima al 100 por 100. El valor radiométrico de cada parcela es el promedio de un mínimo de 5 lecturas y para cada tratamiento se midieron 3 parcelas.

Estas mediciones se realizaron en condiciones de día claro, con un mínimo de perturbaciones atmosféricas como viento, polución o nubosidad, para evitar la influencia de éstas en la respuesta radiométrica de los cultivos. Las lecturas se realizaron siempre alrededor del mediodía solar para que el ángulo de incidencia de la radiación solar fuera máximo.

Determinaciones analíticas: Clorofilas y carotenos se determinaron espectrofotométricamente según el método de Lichtenthaler (1987).

3. RESULTADOS

Las firmas espectrales medias del trigo y alfalfa guardan una estrecha semejanza entre sí y se ajustan plenamente a la forma general de la curva de reflectancia de una hoja verde de tipo medio (figura 1).

Sin embargo, la evolución de la firma espectral durante el ciclo vegetativo, tanto en el trigo (figuras 2 y 3) como en el resto de los cultivos muestra importantes modificaciones respecto a la curva de tipo medio. En el caso del trigo cv. Astral, a partir de la antesis se inicia una variación importante en el tipo de firma. En la situación anterior a la antesis (figura 2), las firmas se adaptan a la curva de la hoja de tipo medio, con reflectancias en el visible inferiores al 10 por 100 y reflectancias entre el 60 y el 80 por 100 en el infrarrojo próximo. Durante esta fase del crecimiento se observa una cierta variación de la firma espectral, consistente en un leve descenso de la reflectancia en la zona del visible y un cierto aumento en la del infrarrojo próximo, con desplazamiento del máximo desde 840 a 900 nm.

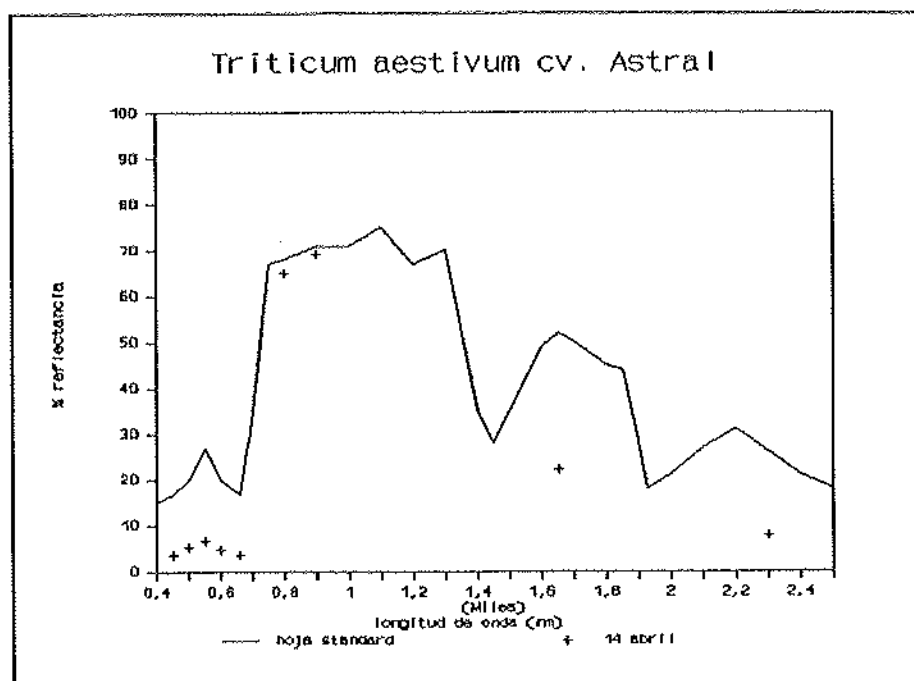


Figura 1.— Comparación entre la curva de reflectancia de una hoja standard y la firma espectral de *Triticum aestivum* cv Astral, el día 14 de abril. (aprox. durante la antesis).

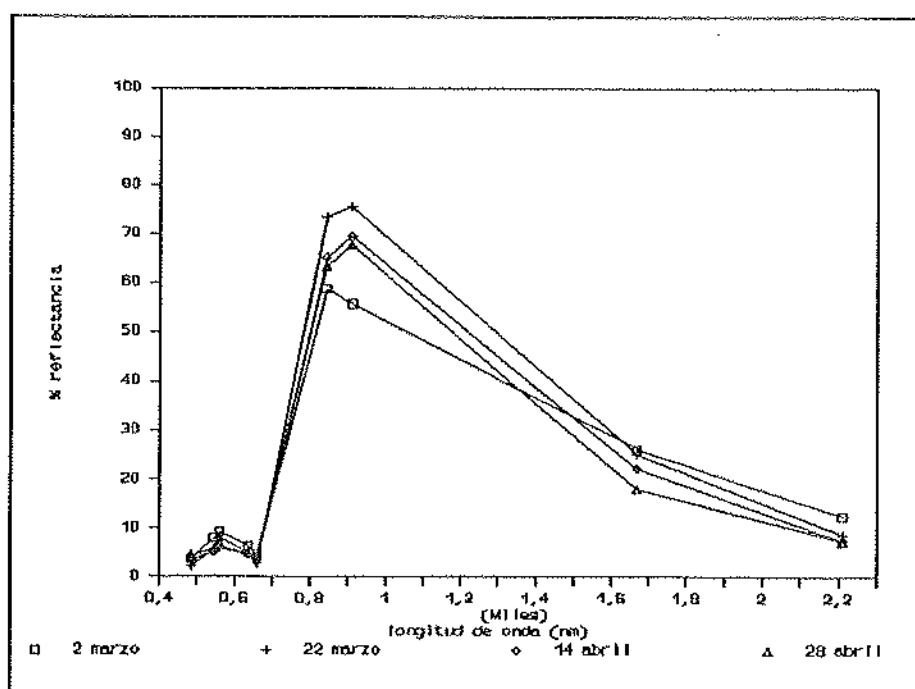


Figura 2.— Evolución de la signature espectral de *T. aestivum* cv Astral en el período anterior a la antesis.

Los índices de vegetación, expresados como la diferencia normalizada entre la reflectancia a 840 y a 660 nm, se mantienen en este período entre 0,8 y 0,9, alcanzándose el máximo el 22 de marzo, un mes antes de la antesis. A partir de este momento se observan leves descensos del índice de vegetación, relacionados con una cierta disminución progresiva de la superficie de las hojas.

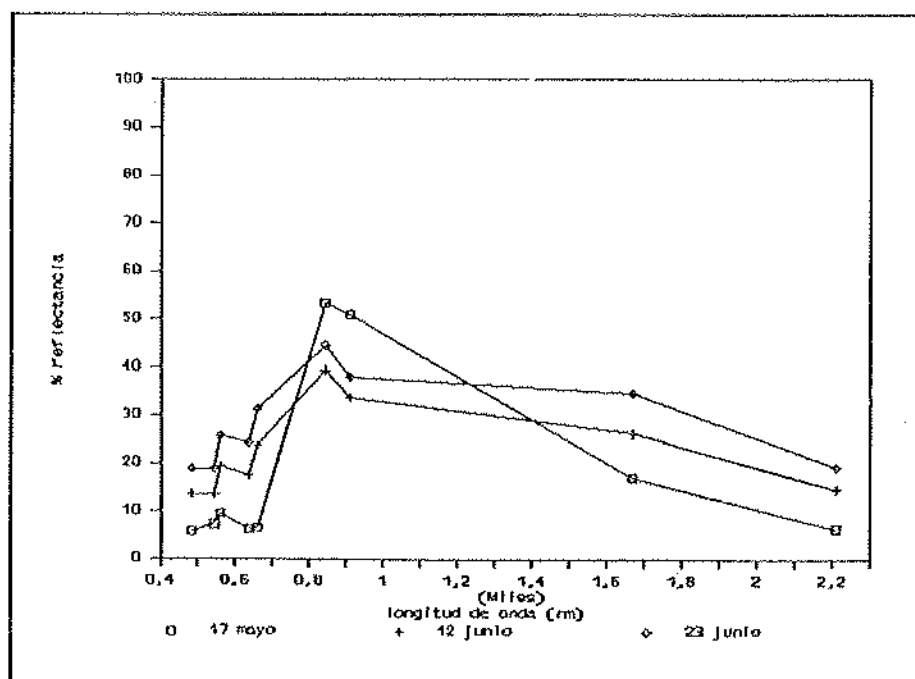


Figura 3.— Evolución de la signature espectral en *T. aestivum* cv. Astral en el período entre la antesis y la siega.

La evolución posterior a la antesis es muy distinta (figura 3), observándose un fuerte descenso de la reflectancia en la región del infrarrojo próximo (hasta menos del 40%), con desplazamiento de los máximos hacia los 800 nm ("blue shift"). Al mismo tiempo se produce un fuerte aumento de la reflectancia en el infrarrojo medio (1.600, 2.200 nm) y visible, desplazándose el máximo del verde al rojo (660 nm). En junio, poco antes de la maduración, la reflectancia a 660 nm supera el 20 por 100 y el índice de vegetación desciende a 0,2, excepto en parcelas regadas y abonadas en las que aún se mantiene en 0,4. La caída brusca del índice de vegetación, de 0,8 a 0,4, se produce durante el mes de mayo, aproximadamente un mes después de la antesis.

Los efectos de falta de agua o "stress hídrico" inducido por ausencia de riego se manifiestan principalmente en los niveles de reflectancia de la zona de 800 a 900 nm, mientras que apenas afectan la reflectancia de las longitudes de onda visibles (figura 4).

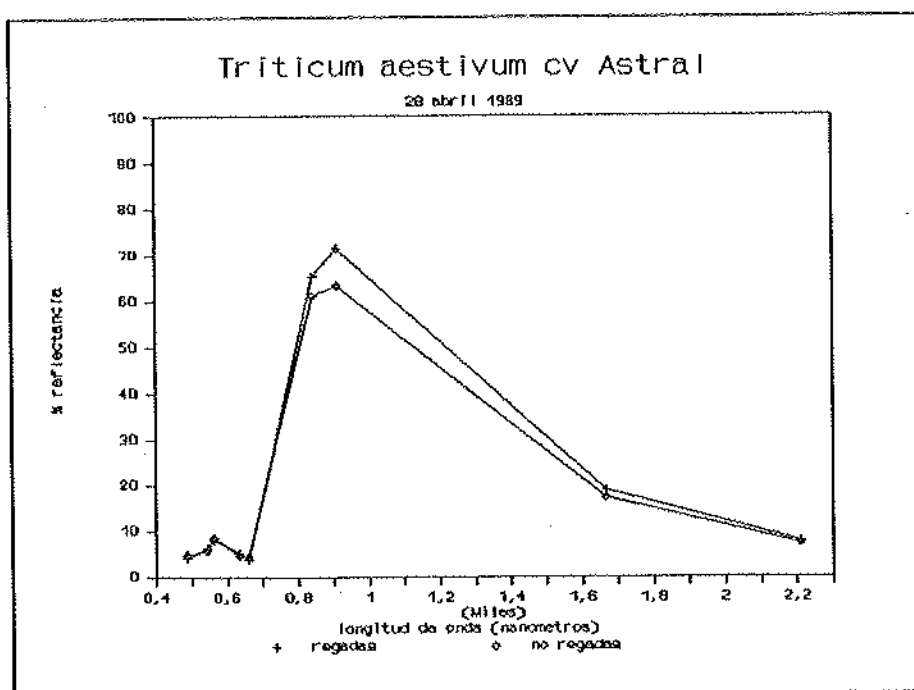


Figura 4.— Comparación entre la signatura espectral de las parcelas regadas y no regadas de *T. aestivum* cv. Astral, independientemente de los tratamientos de abonado.

Al igual que en el trigo, en *Medicago sativa*, el stress hídrico se manifiesta también fundamentalmente en variaciones de la reflectancia de las longitudes de onda entre 800 y 900 nm, mientras que en la zona visible apenas se aprecian diferencias (figura 5).

Por el contrario, los distintos niveles de abonado se reflejan en diferencias en la zona visible (figura 6) y muy particularmente en las relaciones entre el azul y el rojo (figura 7). Las máximas diferencias se presentan durante la antesis y en las semanas inmediatamente anteriores a la misma. Un mayor nivel de abonado nitrogenado se refleja en una disminución de la reflectancia en el visible, más acentuada en la zona próxima a 550 nm (figura 6), así como en un incremento de la relación azul/rojo (figura 7), debido probablemente a un aumento de la proporción de clorofilas (a + b) respecto a los carotenos en las parcelas abonadas (Tabla 1). La relación clorofila a/b es prácticamente constante en los cuatro tratamientos hasta el inicio de la madurez en que desciende bruscamente el nivel de clorofila a respecto a clorofila b.

Los distintos tratamientos a que fue sometida la plantación de trigo influyeron no solamente en la cantidad de pigmentos por unidad de superficie, sino también en la superficie total de las hojas (Tabla 1) y en su disposición. Así las parcelas abonadas y regadas presentan una mayor superficie de hoja bandera que el resto de parcelas. El déficit hídrico es el factor prioritario en el control de la superficie de la hoja, ya que mientras la falta de riego disminuye dicha superficie del orden del 50 al 60 por 100, la falta de abonado tan sólo la disminuye en cerca de un 30 por 100. Por el contrario, el régimen de abonado es

el principal factor de control de la concentración y contenido total de pigmentos de la hoja. Así inmediatamente después de la antesis se observa que en la parcelas no abonadas, independientemente del régimen hídrico, la cantidad total de clorofilas por hoja es prácticamente idéntica y que este valor es tan sólo la mitad del que existe en las parcelas abonadas no regadas o la tercera parte del correspondiente a las parcelas regadas y abonadas (Tabla 1). Asimismo, los tratamientos influyeron también en la geometría de las plantas, presentando las parcelas regadas y abonadas una estructura más planófila, que se traduce en una mayor superficie reflectante y absorbente por unidad de peso y superficie.

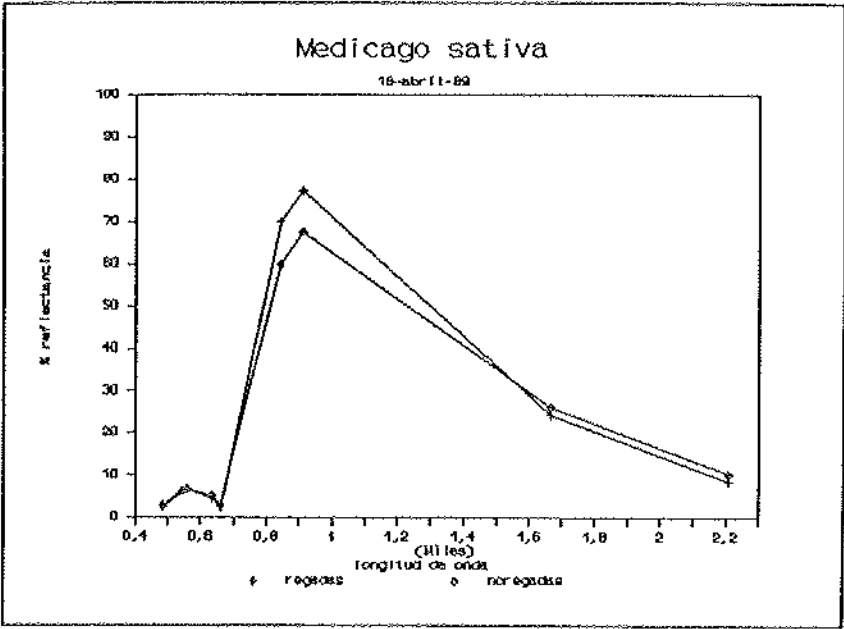


Figura 5.— Comparación de las signatures espectrales entre parcelas regadas y no regadas de *Medicago sativa*.

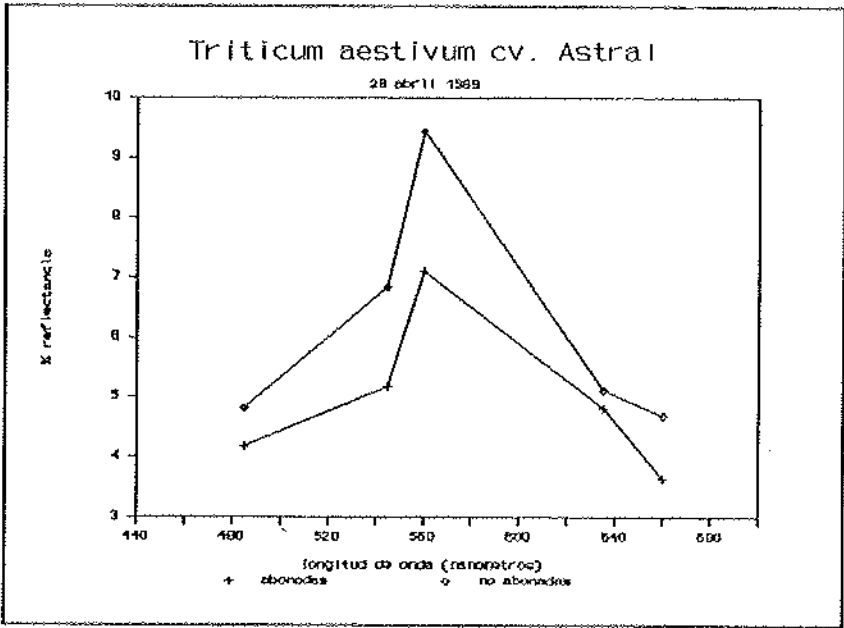


Figura 6.— Signaturas espectrales de parcelas abonadas y no abonadas de *T. aestivum* cv. Astral, independientemente del régimen hídrico.

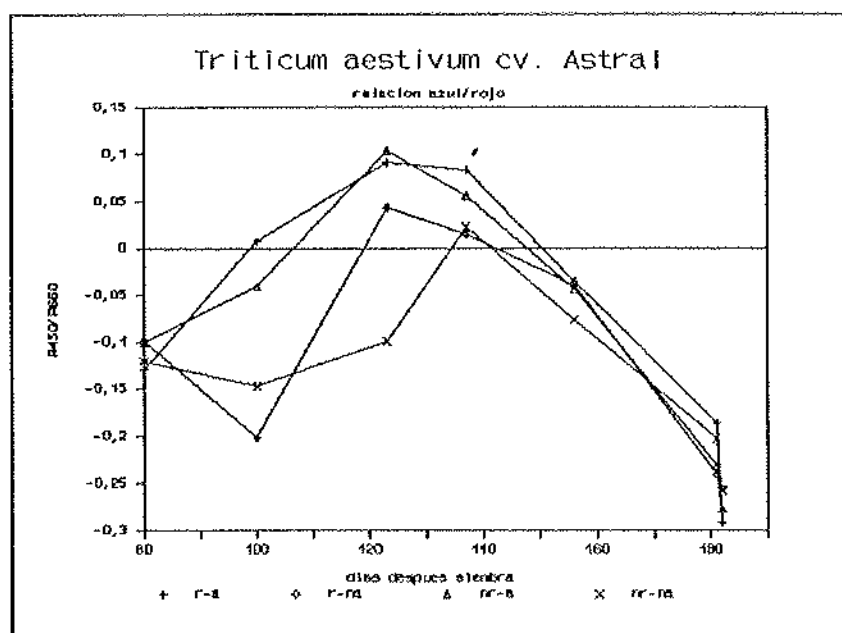


Figura 7.— Evolución de la relación entre la reflectancia en longitudes de onda 480/660 nm en *T. aestivum* cv. Astral.

TABLA 1

Fechas	Días d.s.	Area media cm ²	Clorf. a+b μg/cm ²	Clorf. a+b μg/hoja	Clorf. a+b/car
No regadas no abonadas					
2-5-89	137	11,21	54,17	607,2	3,83
18-5-89	153	8,74	60,53	529,0	4,57
8-6-89	174	7,40	0,43	3,2	0,53
No regadas abonadas					
2-5-89	137	13,31	82,64	1.100,0	5,85
18-5-89	153	8,82	95,04	838,2	5,22
8-6-89	174	7,62	1,72	13,1	1,05
Regadas abonadas					
2-5-89	137	26,21	67,36	1.765,5	4,14
18-5-89	153	22,81	68,32	1.558,4	4,84
8-6-89	174	18,02	22,79	410,7	3,25
Regadas no abonadas					
2-5-89	137	18,88	35,97	679,1	3,36
18-5-89	153	14,93	34,48	514,8	4,12
8-6-89	174	12,51	7,02	87,8	1,85

4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con un radiómetro de mano en cultivos de trigo y alfalfa muestran una gran semejanza de las reflectancias con las previamente obtenidas en el laboratorio para hojas verdes consideradas de tipo medio (Bariou, et al. 1985) o para cultivos de trigo utilizando distintos tipos de espectroradiómetros, aunque existen algunas pequeñas divergencias. Los valores medios en la zona del espectro visible y en 1.600 y 2.200 nm coinciden plenamente con los resultados publicados para trigo de invierno (Leamer, et al. 1978; Hinzmann, et al. 1986). Sin embargo, en la zona del infrarrojo próximo (800 a 1.000 nm) los valores para la alfalfa o para cv. Astral (60 a 80%) son relativamente más altos a los encontrados por los citados autores, que se mantienen por debajo del 50 por 100 de reflectancia. Los valores encontrados por nosotros en esta zona del espectro están sin embargo más próximos a los citados por Bariou, et al (1985) para una hoja de tipo medio (figura 1), aunque en este caso, los valores en el visible e infrarrojo medio sean más altos.

La evolución de la signatura espectral asociada al proceso ontogénico del trigo es muy similar a las anteriormente descritas. En todos los casos se observa una fuerte disminución de la reflectancia en la zona del infrarrojo próximo, a partir de la antesis, asociada a una disminución de superficie y peso seco medio de hoja debida a la translocación de nutrientes hacia el grano. Al mismo tiempo se observa un progresivo aumento de la reflectancia en las longitudes de onda visibles y muy especialmente en la de 660 nm, que debe relacionarse con la consecuente pérdida de pigmentos fotosintéticos.

El abonado nitrogenado en líneas generales afecta poco la superficie relativa de hoja, pero por el contrario modifica totalmente el contenido global de pigmentos en la hoja. Debido a ello, los efectos del abonado son fácilmente observables en las radiaciones de onda visibles, principalmente en la región del verde (550 nm), tal como ya habían puesto de manifiesto Thomas y Gausman (1977), pero por el contrario tienen poca incidencia en la reflectancia del infrarrojo. Hinzmann, et al. (1986), utilizando también trigo de invierno, con un nivel de abonado nitrogenado de 60 kg/ha, observa aumentos de reflectancia de infrarrojo sólo hasta la antesis, mientras que con un nivel de 120 kg/ha, las diferencias de reflectancia en esta región del espectro se mantienen durante todo el tiempo. Podría ser debido a una cierta saturación de la capacidad de llenado de la espiga, lo que mantendría una mayor superficie foliar hasta el momento de la cosecha. Este fenómeno también se insinúa en el caso de cv. Astral regado y abonado, que en las últimas semanas registra un cierto aumento de la superficie foliar (Tabla 1), que no va acompañado de un incremento del índice de vegetación debido a la falta de pigmentos verdes en estas hojas ya muy amarillentas.

El abonado nitrogenado no modifica únicamente la cantidad total de pigmentos presentes en la hoja sino que modifica asimismo la relación entre clorofilas y carotenos, lo que se traduce en una variación de la relación de la cantidad de energía reflejada en las longitudes de onda azules y rojas. Un aumento de nitrógeno supone un incremento de la proporción de clorofilas respecto a carotenos y por lo tanto un incremento de la absorción a 660 nm. Esta relación azul/rojo puede ser un parámetro más indicado para evaluar el estado de la nutrición nitrogenada, que el simple nivel de reflectancia a una longitud de onda dada, mucho más sujeto a las condiciones de reflectancia de la superficie vegetal.

Contrariamente a lo que sucede con el abonado nitrogenado, el régimen hídrico apenas modifica el contenido de pigmentos foliares, pero influye decisivamente en el tamaño de las hojas (Tabla 1). El menor contenido hídrico asociado a la falta de riego se traduce en una disminución de la reflectancia en la región del infrarrojo próximo, que puede atribuirse a una disminución de los espacios intercelulares por colapso incipiente de la estructura interna de la hoja como respuesta al bajo contenido hídrico (Sinclair, et al. 1971). De forma similar podría explicarse, al menos en parte, la disminución aún más acusada de la reflectancia en el infrarrojo próximo que tiene lugar durante la senescencia foliar (figura 3). Sin embargo, hay que tener también presente las modificaciones anatómicas asociadas (apertura estomática, paredes celulares, citoplasma, etc.) que también contribuyen a la reflectancia en la región del infrarrojo próximo (Gausman, 1977).

Los efectos combinados del nivel de abonado y del régimen hídrico, afectando independientemente a la reflectancia en la zona del rojo y del infrarrojo próximo, se traducen en alteraciones de los índices de vegetación, expresados como relación entre el rojo y el infrarrojo, que los hacen difícilmente correlacionables con un único parámetro vegetativo. Así, si se expresa el índice de vegetación como la diferencia normalizada entre la reflectancia a 840 y 660 nm, y se relaciona con la superficie foliar (figura 8) o con el peso fresco, se observa que los puntos para las distintas épocas del crecimiento se agrupan en torno a funciones relativamente lineales y paralelas pero desplazadas entre sí según el tratamiento. Entre las parcelas regadas y abonadas y las parcelas no regadas ni abonadas el desplazamiento en ordenadas es del orden de 10 cm² de hoja, sobre una superficie máxima de 26 cm², o de 0,5 g de peso por hoja sobre un peso máximo de 1 g por hoja. Un resultado similar obtienen Aase y Siddoway (1980) al analizar la relación entre el índice de vegetación y el peso seco de la hoja en cultivos de trigo de invierno con distintas densidades de plantación.

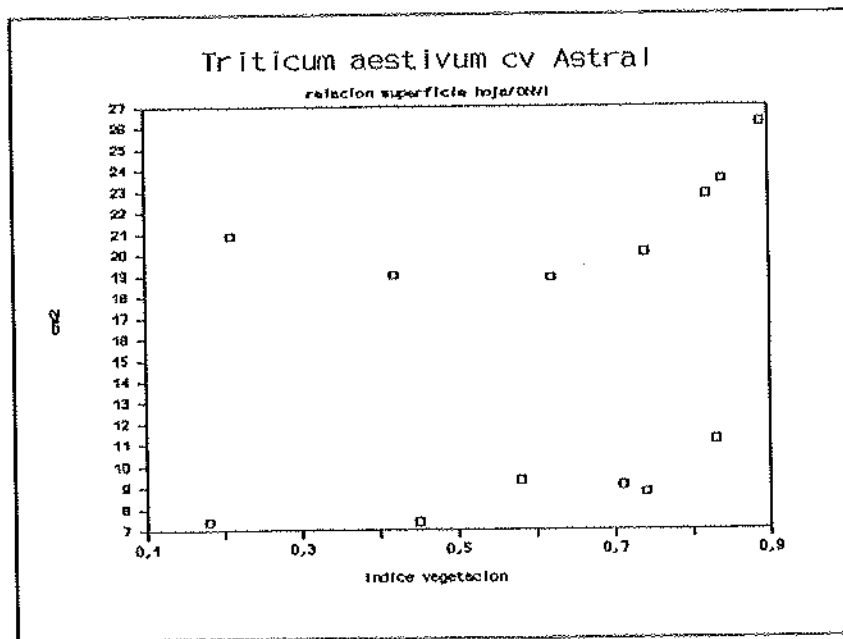


Figura 8.— Regresión de la superficie de la hoja bandera respecto al índice de vegetación para las parcelas abonadas y regadas (gráfica superior) y para las parcelas no regadas y no abonadas (gráfica inferior).

BIBLIOGRAFIA

- Aase, J.K. and Siddoway, F.H. 1980. Determining winter wheat stand densities using spectral reflectance measurements. **Agron. J.** 72: 149-152.
- Boissard, P. et al. 1988. Estimation a un stade precoce et par radiometrie du nombre potentiel d'epis du ble tendre en gran cultures. En **Spectral Signature of objects in remote sensing**: 121-124. E.S.A. Paris.
- Bariou, R.; Lecamus, D. et Le Henaff, F. 1985. **Réponse spectrale des vegetaux**. Univ. de Rennes 2, Rennes, 71 p.
- Bauer, M.E. 1975. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops. En **Advances in agronomy**. New York Academic Press. New York: pp. 271-309.
- Collier, P. 1989. Radiometric monitoring of moisture stress in irrigated cotton. **Int. J. Remote Sensing** 10: 1.445-1.450.
- Gausman, H.W., 1974. Leaf reflectance of near infrared. **Photogrametric Engineering** 40: 183-191.
- Gausman, H.W., 1977. Reflectance of leaf components. **Remote Sens. of Environment**, 6: 1-9.
- Gueriff, M. et al. 1988. Estimation de la biomasse et du rendement de cultures de ble dur a partir des indices de vegetation SPOT. En **Spectral signature of objects in remote sensing**: 137-141. E.S.A. Paris.
- Harlan, J.C. and Liu, S., 1975. A one year site LANDSAT study for determination of unharvested winter wheat acreage. **Tec. Rep. RSC66**. Texas AM Univ. College Station.
- Hinzman, L.D. Bauer, M.E. and Daughtry, C.S.T. 1986. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment** 19: 47-61.

- Kipling, J.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sens. Environment** **1**: 155-159.
- Leamer R.W.; Noriega, J.R. and Wigand, C.L. 1978. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. **Agron. J.** **70**: 115-118.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. **Methods in Enzimology**, **148**: 350-382.
- Sinclair, T.R., Hoeffler, R.M. and Scheiber, M.M. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. **Agron. J.** **63**: 861-868.
- Thomas, J.R. and Oerther, G.F. 1972. Estimating nutrient content of sweet peper leaves by reflectance measurements. **Agron. J.** **64**: 11-13.
- Thomas, J.R. and Gausman, H.W. 1977. Leaf reflectance versus leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agron. J.** **69**: 799-802.
- Waring, R.H. et al. 1985. Precursors of change in terrestrial ecosystems. **Bioscience**. **36**: 433 p.