

MONITOREO DEL DESARROLLO DE TRIGO EN EL VALLE DEL YAQUI, SONORA, USANDO IMÁGENES NOAA AVHRR*

Christopher Watts**
Juan A. Saiz Hernández***

Resumen

Se produjo una serie de compuestos del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) usando imágenes AVHRR del periodo de cultivo de trigo durante el ciclo otoño 1993-invierno 1994 en el Valle del Yaqui, Sonora. Los resultados del análisis de series de tiempo y el valor de 0.8 ($r^2 = 0.63$) del coeficiente de correlación de los valores NDVI del mes de marzo de 1994 con datos de porcentaje de superficie cultivada, se consideran aceptables en este primer estudio, lo que sugiere que la metodología constituye una buena opción para el monitoreo en tiempo real de los cultivos en el NW de México.

Summary

A series of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps were produced using AVHRR images for wheat during the crop cycle October 1993-Winter 1994 in the Yaqui valley, Sonora. The results from analysis of the time series and the value of 0.8 for the correlation coefficient ($r^2 = 0.63$) between the values of the NDVI map for March 1994 and field data were considered adequate in this first study, which suggests that the methodology represents a useful option for the real-time monitoring of crops in Northwest Mexico.

Introducción

A partir de la década pasada, los índices de vegetación derivados de las bandas visible e infrarroja reflejadas por el radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) de los satélites NOAA, han constituido una valiosa herramienta para determinar la variación espacial y los cambios fenológicos en la vegetación sobre grandes superficies de la Tierra (Tucker *et al.*, 1985).

Las aplicaciones, utilizando este tipo de datos, tales como los estudios sobre sequías y evaluación de la cubierta vegetal desarrollados en África, han sido tan relevantes, que importantes editoras especializadas en sensoria remota han dedicado ediciones especiales a este tema (Justice, 1986; Prince y Justice, 1991). En Estados Unidos los trabajos para evaluar la variación de la cobertura vegetal natural y de zonas agrícolas (Eidenshink, 1992), también han sido interesantes y, sin duda alguna, han motivado el incremento y la variedad en aplicaciones de estas metodologías en otras partes del mundo.

* Recibido: 5 de mayo de 1995.

** Instituto del Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora.

*** Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.

En este trabajo se presentan resultados obtenidos en la zona agrícola del río Yaqui, Sonora, utilizando índices de vegetación derivados de imágenes AVHRR recibidas en la estación instalada en el Instituto del Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (IMADES), en Hermosillo, Sonora, durante los meses de diciembre de 1993 a mayo de 1994, de los que se derivan importantes aspectos que permitirán extender la metodología a otras áreas con cobertura vegetal natural e inducida del noroeste de México.

Antecedentes

Cuando la luz incide sobre una superficie, una parte es reflejada, otra transmitida y otra absorbida. La división entre reflexión, transmisión y absorción es función de la superficie y la frecuencia de la luz. Para suelos, la mayor parte de la luz incidente se refleja o se transmite, con muy poco cambio de frecuencia. En cambio, para vegetación, existe un comportamiento muy diferente entre la banda visible y la infrarroja cercana: la mayor parte de la luz visible se absorbe y la mayor parte de la luz infrarroja cercana se refleja y se transmite. Estas diferencias forman la base para la definición de los *índices de vegetación* como función de las radianzas de las bandas visible (R_1) e infrarrojo (R_2). Se han definido muchos diferentes índices (Jackson y Huete, 1991) pero el más usado es el Índice de la Diferencia Normalizada (NDVI), debido a la eliminación parcial de la dependencia entre la geometría sol-objetivo-sensor (Gutman, 1991), que se define como:

$$NDVI = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (1)$$

Los sensores en los satélites LANDSAT, SPOT y NOAA (entre otros) poseen estas bandas. Entre las ventajas que tiene el sistema NOAA en el mapeo de la cobertura vegetal, se destaca el que el satélite puede cubrir grandes extensiones de la superficie terrestre. El barrido del sensor AVHRR es perpendicular a la línea de vuelo del satélite y lo suficientemente ancho para que haya traslape del área cubierta entre órbitas consecutivas. De esta manera puede observarse cualquier punto de la Tierra dos veces al día, pero tiene el gran inconveniente de que el ángulo de observación varía significativamente durante su ciclo (9 días para NOAA 11). Esto implica que la geometría sol-objetivo-sensor sea muy variable, ocasionando variaciones significativas en la reflectancia observada de las superficies (Holben y Fraser, 1984; Gutman, 1991; Jackson *et al.*, 1990). Esta variación puede considerarse "ruido" que dificulta el análisis de series de tiempo de reflectancia para detectar cambios en la superficie, ya que puede confundirse con los cambios buscados. La serie de Índice Global de Vegetación (IGV)(GVI), producida por el NOAA, padece este tipo de problema (Gutman, 1991).

Por otra parte, el ángulo de barrido varía de 55 grados hacia la izquierda a 55 a la derecha y se obtienen 2 048 valores o píxeles en cada banda. La gran extensión del barrido produce grandes diferencias, según la posición del pixel en la línea, en el recorrido de la radiación del pixel al sensor y en la dimensión horizontal de los píxeles (Watts y Cabanillas, 1993). Estas distorsiones están resumidas en la **tabla 1**, donde se ve que un pixel a los extremos mide 476% más que a nadir y el recorrido atmosférico es de 169% mayor. Por tanto, se concluye que los extremos de la imagen son poco útiles en trabajos cuantitativos. El problema es que si se reduce el ancho de la imagen también se reduce la frecuencia de las tomas. Watts y Cabanillas (1993) recomiendan la utilización de los 1 024 píxeles centrales, con lo que se obtiene una distorsión relativamente pequeña (máximo 35%) y produce una frecuencia de tomas de 3 consecutivas en cada ciclo de 9 días, es decir, tres días con imágenes y luego seis sin ellas.

En los estudios sobre cambios en la vegetación no se requiere de observaciones diarias, y prescindir de imágenes durante una semana es aceptable. Por otra parte, las planicies de Sonora poseen un clima semiárido con poca nubosidad y no es probable que un sitio quede cubierto por nubes durante muchos días consecutivos. En áreas con mayor nubosidad se tendría que aceptar mayor distorsión en la imagen para obtener una frecuencia de toma adecuada.

Tabla 1. Variación de la longitud del pixel y del recorrido atmosférico en relación con el ángulo de barrido. El pixel 0 corresponde a la posición de nadir y el 1 024 al extremo izquierdo o derecho

Pixel	Deformación del pixel (%)	Variación del recorrido atmosférico (%)
0	0	0
256	8	4
512	35	18
768	114	51
1 024	476	169

Metodología

El área en estudio comprende la zona agrícola del Río Yaqui, Sonora (**Figura 1**) que, además de contar con extensas áreas de vegetación inducida y una geometría de los predios agrícolas regular y muy bien definida, cuenta con un importante registro de datos sobre los cultivos, infraestructura hidráulica y suelos, entre otros.

Los índices de vegetación (NDVI) se produjeron a partir de las imágenes del satélite NOAA 11 que se están recibiendo mediante un sistema receptor de bajo costo desarrollado en Bradford, Inglaterra. Las dimensiones de la escena capturada pueden ser escogidas por el usuario variando desde un mínimo de 512 líneas y 512 columnas hasta 2 048 líneas y 1 536 columnas, lo que depende de la memoria RAM de la computadora personal del sistema de recepción.

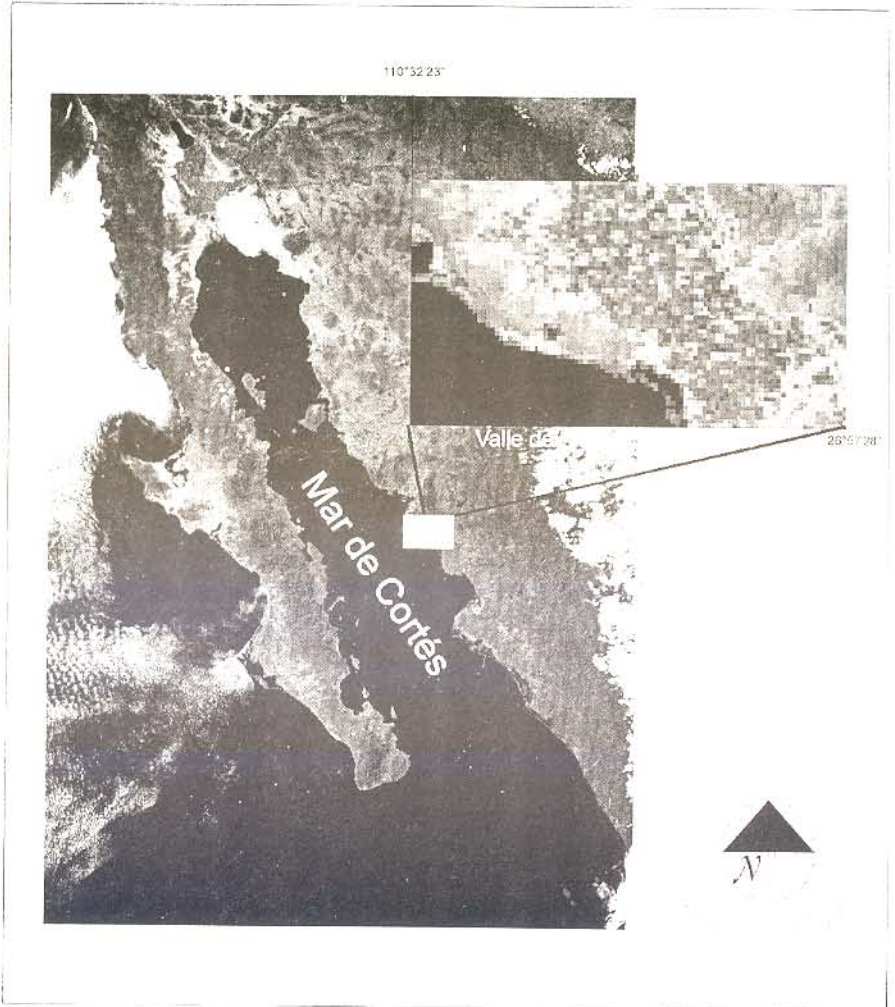


Figura 1. Imagen en falso color, bandas 1,1,2 del AVHRR del noroeste de México, mostrando la zona agrícola de riego del Valle del Yaqui, Sonora, realzando el sitio con un sector amplificado de la misma.

Los datos del AVHRR

El receptor capta los datos del AVHRR de cada satélite NOAA en formato de 10 bits (1 024 niveles de gris) y en arreglos de 1 024 renglones y 1 024 columnas en cinco bandas espectrales que van desde el rojo (visible) hasta el infrarrojo térmico. Las imágenes están grabadas en un formato especial (llamado Bloque) que incluye los 10 bits de cada pixel de las cinco bandas. La captura de imágenes del satélite NOAA 11 puede realizarse con una periodicidad de 9 días, lo que hace posible tener suficientes datos durante un mes para elaborar las imágenes NDVI.

Elaboración de imágenes del NDVI

El procedimiento de elaboración de las imágenes del NDVI se llevó a cabo con programas de cómputo incluidos con el sistema de recepción, así como con módulos del sistema de manejo de información geográfica IDRISI, y consistió en los pasos siguientes.

- a) Pre-navegación y calibración de los datos.
- b) Selección de las imágenes.
- c) Conformación de la serie.
- d) Extracción de los canales 1 y 2 en formato de 8 bits.
- e) Cálculo del NDVI.
- f) Reproyección del NDVI.
- g) Navegación de la imagen.
- h) Producto final.

- Pre-navegación y calibración de los datos

Los programas agregan información a los archivos Bloque sobre la órbita del satélite y la calibración de los sensores para que la posición de un pixel en la imagen pueda relacionarse con coordenadas geográficas y su valor con la radianza o reflectancia.

La localización geográfica calculada no es muy precisa debido a incertidumbre en algunos de los parámetros de la órbita, sobre todo la hora exacta. Por esto, el error en longitud generalmente no excede un minuto mientras que la latitud puede variar por más de 10 minutos.

- Selección de las imágenes

Se utilizó un programa especial para el despliegue de los archivos en forma Bloque que permitió el análisis visual de los datos de los satélites que capta la zona en estudio alrededor de las 17:00 horas. Se seleccionaron las imágenes con mínima presencia de nubes.

- Conformación de la serie

En este punto se seleccionó el espaciamiento en tiempo que debe darse entre cada imagen de la secuencia, por lo que, considerando la magnitud del período a estudiar, y que el cultivo del trigo usualmente se lleva a cabo durante los meses de noviembre y diciembre de un año y se cosecha durante mayo del año siguiente, se integró una serie de cinco imágenes correspondientes a las fechas 30 de diciembre de 1993 y 31 de enero, 5 de marzo, 5 de abril y 9 de mayo de 1994.

- Extracción de los canales 1 y 2

Se cuenta con módulos para extraer cualquier banda del archivo Bloque, realizar una transformación lineal de los valores y truncarlos a 8 bits. En este estudio se realizó una transformación de las bandas 1 y 2 para convertir los valores a reflectancias.

- Cálculo del NDVI

Las imágenes producidas en la etapa anterior tienen un formato estándar (8 bits por pixel sin encabezado) y pueden utilizarse en paquetes para procesamiento de imágenes como IDRISI o ILWIS. En este trabajo, la ecuación 1 se evaluó mediante un archivo de procesamiento por lotes desarrollado para el programa IDRISI, del que resultaron imágenes NDVI con valores reales en el rango de -1.0 a 1.0, donde los valores de 0 a 1 indican un incremento en color verde de la vegetación y los valores negativos representan características superficiales con ausencia de vegetación como cuerpos de agua, suelo desnudo, hielo o nubes.

- Reproyección de las imágenes NDVI

Las imágenes generadas en el punto anterior poseen coordenadas imagen (renglones y columnas) y, una vez reclasificada la imagen y convertidos los datos a formato de 8 bits, con valores de 1 a 250, donde el valor del índice de -1.0 equivale a 1, el de 0 a 125 y el de 1 a 250, se utilizan los datos de la órbita almacenados en el archivo Bloque para corregir las distorsiones geométricas en la imagen, extraer un sector y proyectarlo a coordenadas geográficas. El usuario puede seleccionar los límites de este sector, así como el tamaño de los píxeles. En este trabajo se seleccionaron píxeles de .01 grados cuadrados en un sector de 512 renglones por 512 columnas.

- Navegación de las imágenes

La corrección para los errores mencionados en el paso 1 se realizó interactivamente utilizando el módulo COLOR de IDRISI para desplegar cada imagen raster y, seguidamente, con el comando PLOT se desplegó un mapa vectorial de la costa, digitizado

de la carta topográfica de la zona editada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en escala 1:250 000, sobre la imagen y se ajustaron las coordenadas de ésta (en su archivo de documento DOC) hasta que las dos costas coincidieron.

- Producto final

El producto obtenido con esta metodología son las series de imágenes que se presentan en la **figura 2**. Para tener una clara apreciación de los cambios mensuales sufridos en la vegetación, se ha asociado a las imágenes una paleta en tono de gris, en la que los tonos claros representan valores altos de NDVI, es decir, una alta densidad y vigor en la vegetación, mientras que los oscuros una baja que puede indicar la presencia de vegetación seca, suelo desnudo, entre otros caracteres de la superficie del terreno.

Las imágenes NDVI se tienen en formato digital binario y con datos en 8 bits que pueden ser desplegados y analizados en IDRISI o en otros paquetes diseñados para el manejo de este tipo de datos.

- Correlación NDVI- Porcentaje de Área Cultivada

La respuesta del NDVI en la zona agrícola, por su naturaleza sujeta continuamente a un cambio notable de la cubierta vegetal, se evaluó comparando la relación porcentaje de área cubierta de vegetación vs NDVI (**Figura 3**). Para esto, se superpuso el plano vectorial de bloques a la imagen de marzo de 1994 (mes en el que se tiene mayor vigor y más alta densidad de follaje), se calcularon los valores promedio de NDVI de grupos de 3 x 3 bloques (6 x 6 km) y posteriormente se compararon con los porcentajes de área correspondientes a las mismas áreas cultivadas con trigo del ciclo otoño-invierno 1993-1994.

- Series de tiempo

El seguimiento de la evolución temporal del cultivo en cinco sectores, de acuerdo con los datos del padrón de usuarios proporcionado por la oficina del Distrito de Desarrollo Rural 048, Cajeme, Sonora, todos con un alto porcentaje de cubierta vegetal, se realizó mediante una serie de tiempo considerando los valores promedio de NDVI en cada sector (**Figura 4**).

Resultados

En la **figura 3**, en la que se muestra gráficamente la relación entre el NDVI y el porcentaje de área de bloque cultivado con trigo, se aprecia que la variación en el porcentaje de área cubierta de vegetación se refleja en el valor del NDVI, y para la escala utilizada, ésta se aproxima a la relación lineal.



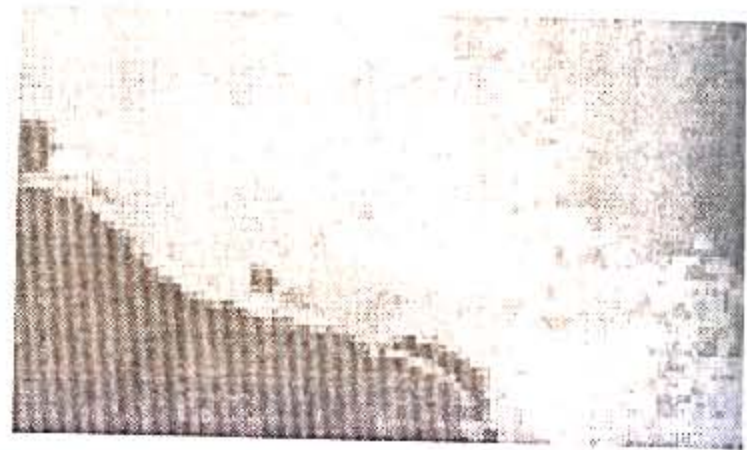
DICIEMBRE 30 DE 1993



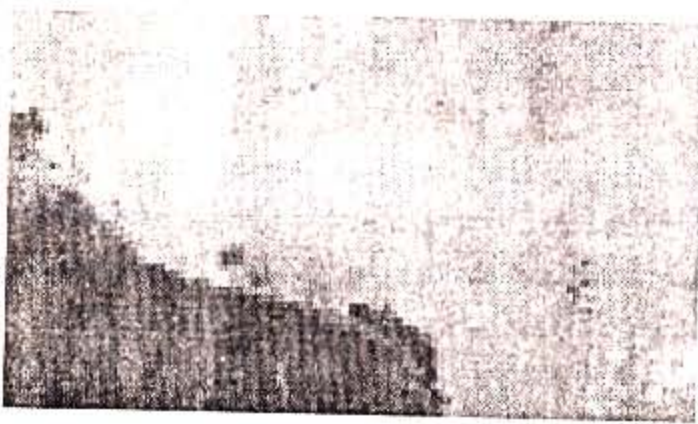
ENERO 31 DE 1994



MARZO 5 DE 1994



ABRIL 5 DE 1994



MAYO 9 DE 1994



Figura 2. Secuencia de imágenes NDVI de la zona agrícola del Valle del Yaqui, Sonora, estimadas con datos del AVHRR de NOAA 11.

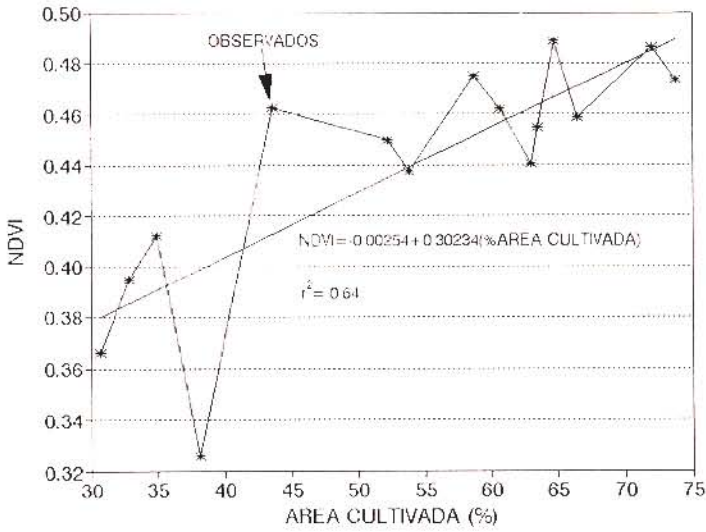


Figura 3. Relación entre porcentaje de área cultivada y NDVI.

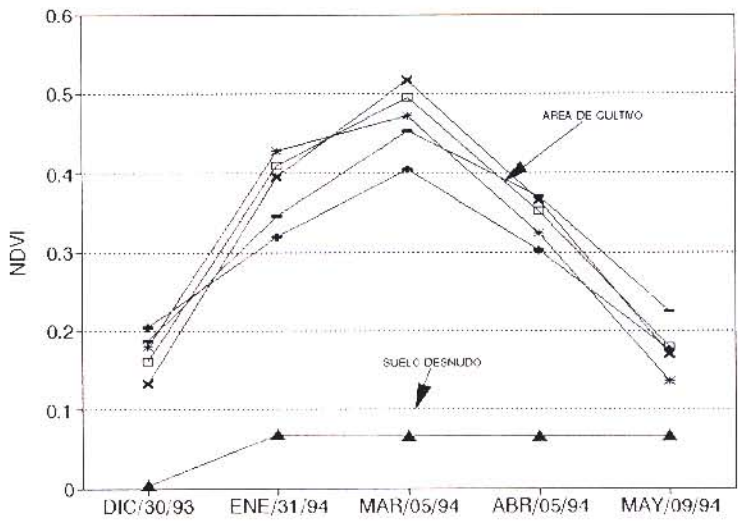


Figura 4. Variación del NDVI durante el periodo de cultivo del trigo. Obsérvese la curva correspondiente a suelo desnudo.

$$NDVI = 0.0025394\%AREA_{cosecha} - 0.30234 \quad (2)$$

para la que se estimó un coeficiente de correlación $r^2 = 0.63$.

La dispersión se debe principalmente al desigual grado de desarrollo del cultivo ocasionado por la diferencia en las fechas de siembra que, como es usual en el Valle del Yaquí, Sonora, se realiza durante los meses de noviembre, diciembre e incluso enero. Otros factores que también influyen son las distintas variedades de trigo que se utilizan y, aunque en menor medida, la presencia de otros cultivos en los bloques analizados.

La **figura 4** representa el comportamiento del NDVI durante el período diciembre de 1993 a mayo de 1994. Aquí se aprecian valores reducidos del índice de diciembre, época de siembra y un incremento en enero, hasta alcanzar un máximo en marzo, durante la etapa de máximo desarrollo del trigo, para después decrecer hasta alcanzar de nuevo valores bajos durante los meses de cosecha, que son abril y mayo. Como punto de comparación, en la misma figura se tiene el comportamiento del índice de vegetación de un sitio fuera de la zona agrícola, el cual no presenta una variación significativa durante todo el período de análisis.

Conclusiones y consideraciones futuras

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el potencial del AVHRR en el monitoreo de la vegetación sobre áreas agrícolas de extensión y características climáticas similares a las del Valle del Yaquí, Sonora. Se hace patente también la necesidad de afinar la metodología mediante un trabajo de campo más intenso, para que se pueda extender a otros cultivos típicos de la zona en estudio como maíz, algodón y soya, entre otros, e incluir la estimación de rendimientos.

En futuros estudios se pretende cuantificar los efectos introducidos por aspectos tales como la variabilidad de la iluminación del sol y la visibilidad del satélite, así como la calibración radiométrica, lo que incidirá notablemente en la precisión de los resultados y ayudará en gran parte a cuantificar con mayor precisión los efectos de la heterogeneidad del mosaico de cultivos, el desigual grado de desarrollo ocasionado por efecto del clima y la disparidad de la fecha de siembra.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo en la realización del proyecto "Evaluación de la vegetación en Sonora usando imágenes AVHRR", del que se derivó este trabajo. De igual forma, brindan un reconocimiento a la jefatura y personal de la oficina del Distrito de Desarrollo Rural 048.

Cajeme, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, por la información proporcionada.

Referencias

- Eidenshink, J. C. (1992), "The 1990 Conterminous U.S. AVHRR Data Set", *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, vol. 58, núm. 6, pp. 809-813.
- Gutman, G. G. (1991), "Vegetation Indices from AVHRR: an Update and Future Prospects", *Remote Sensing of Environment*, núm. 23, pp. 121-135.
- Holben, B. N. y R. S. Fraser (1984), "Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing", *International Journal of Remote Sensing*, núm. 5, pp. 145-160.
- Jackson, R. D., P. M. Teillet, P. N. Slater, G. Fedosejeves, M. F. Jasinski, J. K. Aase y M. S. Moran (1990), "Bidirectional Measurements of Surface Reflectance for View Angle Correction of Oblique Imagery", *Remote Sensing of Environment*, núm. 32, pp. 189-202.
- Jackson, R. D. y A. R. Huete (1991), "Interpreting Vegetation Indices", *Preventive Veterinary Medicine*, núm. 11, pp. 185-200.
- Justice, C. O. (1986), "Monitoring the Grasslands of Semiarid Africa Using NOAA-AVHRR Data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, núm. 11.
- Prince, S. D. y C. O. Justice (1991), "Coarse Resolution, Remote Sensing of the Sahelian Environment", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, núm. 6.
- Tucker, C. J., C. L. Vanpraet, M. J. Sharman y VanIttersum (1985), "Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984", *Remote Sensing of Environment*, núm. 17, pp. 233-249.
- Watts, C. J. y R. Cabanillas (1993), "Algunas consideraciones sobre las características de la órbita y el barrido de la serie NOAA", Nota Técnica, *Boletín SELPER-MÉXICO*, núm. 15, pp. 7-18.