

I. Aplicación del Sensoramiento Remoto en Decisiones Agronómicas.

Desde hace varios años, el sensoramiento remoto se ha percibido como una herramienta que posee un potencial importante para ser incorporada en el proceso de toma de decisiones de la actividad agrícola. Sin embargo, los últimos avances tecnológicos focalizados en el desarrollo de la operatividad de los sensores en el campo (por ej.: nuevos softwares, aumento de la capacidad de almacenamiento de la información, procesamiento estadístico acelerado de la información, versatilidad en la resolución espectral, interfaces con GPS, etc), son los que han permitido a los productores agropecuarios incorporar esta herramienta. El sensoramiento remoto permite en una forma rápida y precisa evaluar la distribución espacial y temporal de la variabilidad de las características dentro de un potrero, de un establecimiento, de una cuenca o de toda una región.

El sensoramiento remoto es una ciencia emergente que se basa en la medición a distancia de la luz reflejada por un objeto utilizando sensores. Estos sensores son dispositivos que responden a un estímulo, en este caso la radiación de luz reflejada, y producen una señal que se puede medir. La luz reflejada, o reflectancia (R), generalmente se la expresa en porcentaje del total de luz incidente y se utiliza para extraer e interpretar información respecto a las distintas características del objeto de medición. En el caso de la producción agrícola, el objeto de medición es el suelo, el cultivo, la pastura o el bosque.

En el caso de cultivos, pasturas o cualquier material vegetal verde, la reflectancia presenta una distribución característica en el espectro de luz determinada principalmente por la presencia de clorofila y otros pigmentos (Figura 1). El pigmento clorofila, presente dentro de los cloroplastos de los tejidos vegetales y especializado en la utilización de la luz para el proceso de fotosíntesis, absorbe fuertemente la luz azul y la luz roja y con una menor intensidad la luz verde. En consecuencia, los niveles de luz reflejada en el espectro visible son muy bajos especialmente en el rango del azul y del rojo (a mayor absorción de luz, menor es el porcentaje de reflectancia). Sin embargo, y debido a que los vegetales no utilizan la luz incidente en el infrarrojo cercano, la absorción por pigmentos en esta región del espectro de luz es nula, determinando niveles altos de reflectancia en este rango espectral.

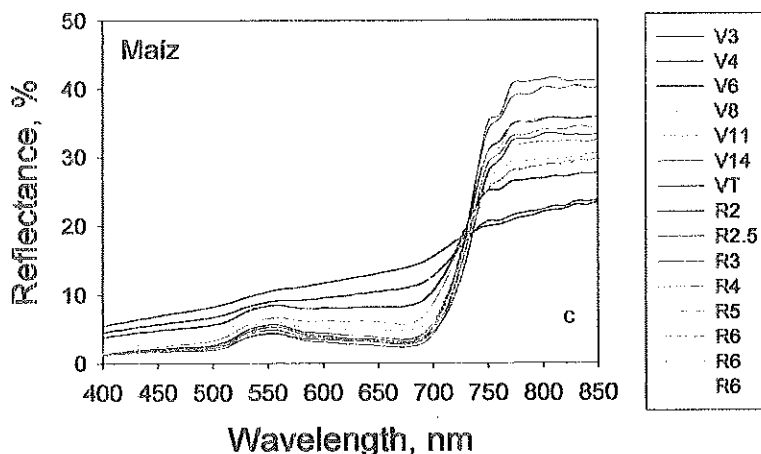


Figura 1. Cambios en la Reflectancia (visible e infrarroja cercana) de un cultivo de maíz durante la estación de crecimiento (estadio V3 a R6) (Ciganda, 2007).

Los niveles de reflectancia de un cultivo o pastura varían en los distintos rangos del espectro en función principalmente de la cantidad de biomasa por unidad de superficie (el tamaño de la “fábrica” vegetal) y de la intensidad del verde de esta biomasa (la eficiencia de funcionamiento de la “fábrica” vegetal). Algunos autores (Gitelson et. al, 2005, Ciganda et al., 2008a) resumen estas dos características midiendo la cantidad de clorofila por m² de superficie de suelo. Estas características están determinadas a su vez por el estadio de crecimiento del vegetal, el status nutricional, el status hídrico, la edad de las hojas, etc. Además, otras

⁵ Ing. Agr., Investigador Asistente, Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

⁶ Ing. Agr., Investigador Asistente, Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

características como la arquitectura del follaje, es decir el tipo y distribución de las hojas, es un factor fundamental que afecta la cantidad de luz interceptada, la cantidad de luz absorbida (por las distintas "capas" o estratos de hojas dentro del follaje), y en consecuencia la cantidad de luz reflejada hacia arriba y medida por un sensor. La arquitectura del follaje varía entre las especies por lo que es posible encontrar que dos especies con la misma cantidad de clorofila por m^2 , presentan curvas de reflectancia que varían en los niveles de luz reflejada para los distintos rangos del espectro.

Las variaciones en los niveles de reflectancia de luz no son iguales en todos los rangos del espectro (Figura 1). Dentro del espectro visible (400 nm -700 nm), por ejemplo, una mínima presencia de tejido verde es suficiente para absorber más del 90-95 % de la luz azul (400 nm a 500 nm). En consecuencia, la reflectancia en el azul no es una medida sensible a cambios en el cultivo. La luz roja (~ 660 nm- 690 nm) es más sensible a incrementos en la biomasa vegetal verde y/o a la intensidad del verde. En general, se ha reportado que es capaz de responder a cambios en el cultivo hasta valores de índice de área foliar de aproximadamente 2.5 o coberturas vegetales de ~55%. Por encima de estos valores esta banda de luz se vuelve insensible debido a que es intensamente absorbida por la clorofila lo que limita fuertemente su utilidad para extraer información de los cultivos con niveles de biomasa media a alta. La luz verde (~ 530 nm - 570 nm), responde a incrementos de IAF hasta niveles mayores que la banda roja pero se vuelve insensible para contenidos elevados de clorofila/ m^2 . La luz infrarroja cercana (730 nm- 1200 nm) no responde a la intensidad del verde, ya que no es absorbida por los pigmentos, pero debido a sus características físicas (longitud de onda más larga que la luz visible) penetra en el follaje, interacciona con el mismo, y es reflejada hacia arriba en función de la cantidad de follaje presente. En consecuencia, la reflectancia en el infrarrojo cercano es sensible al "tamaño" de la fábrica vegetal. Es importante destacar que esta banda de luz también se "satura", y por lo tanto pierde sensibilidad, a niveles muy altos de biomasa vegetal. Otro rango del espectro de luz, es el denominado "borde rojo" (~ 700 nm – 720 nm). Este rango representa el punto de inflexión entre el rojo y el infrarrojo cercano y varios autores (por ej., Gitelson et al. 2006, Steele et al., 2008, Ciganda et al., 2008) han demostrado su sensibilidad en un rango muy amplio de contenidos de clorofila/ m^2 .

La extracción de información acerca del estado de la vegetación utilizando sensoramiento remoto se maximiza eligiendo las bandas de luz sensibles a las características vegetales objetos de medición. A su vez, la combinación matemática de ciertas bandas aumenta aún más el potencial de extracción de información. A esta combinación de bandas comúnmente se los llama "Índices de Vegetación". En la bibliografía aparecen reportados muchos índices los cuales han sido desarrollados con distintos objetivos. La utilidad y las limitantes de cada índice estarán dadas por las bandas de luz que se utilizan para su cálculo. Uno de los índices más tradicionales y conocidos es el NDVI (índice de vegetación de la diferencia normalizada, calculado como: $(R_{\text{infrarrojo}} - R_{\text{rojo}}) / (R_{\text{infrarrojo}} + R_{\text{rojo}})$). Este índice intenta hacer uso de la sensibilidad de la banda roja a la presencia de clorofila y de la infrarroja a la cantidad de biomasa. Es un índice muy sensible a rangos de biomasa y contenidos de clorofila bajos a medio-bajos pero pierde su sensibilidad para extraer información en cultivos con contenidos de clorofila o cantidad de biomasa media a alta, generalmente asociados a estadios avanzados de crecimiento de un cultivo o pastura. Otros índices como el NDVI verde, calcula en igual forma que el anterior pero sustituye la banda roja por la verde. Esta sustitución de bandas lo hace sensible a situaciones de mayor contenido de clorofila y biomasa pero se torna insensible a contenidos elevados. Otros índices que utilizan la banda del borde rojo, por ej. $CI_{\text{borde rojo}}$, (calculado como $(R_{\text{infrarrojo}} / R_{\text{borde rojo}}) - 1$) muestran sensibilidad tanto a valores bajos, medios y muy altos de clorofila o biomasa verde (Figura 2).

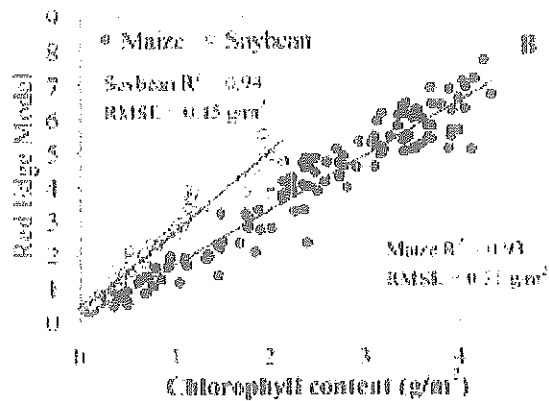


Figura 2. Relación entre el índice de vegetación $CI_{\text{borde rojo}}$ y el contenido de clorofila en el follaje de maíz y soja (Gitelson et al, 2005).

La utilización de uno u otro índice en la agricultura de precisión está determinada, principalmente, por la configuración espectral (tipo y ancho espectral de bandas de luz) de los sensores comercialmente disponibles ya sea montados en satélites, en aviones, en la maquinaria agrícola (sensores de campo) o manuales. En el caso de sensores satelitales o aéreos, el producto que se obtiene es una imagen en la cual cada pixel contiene información de la reflectancia de luz de cada banda. El procesamiento de estas imágenes con softwares especializados permite calcular los índices de vegetación en distintos momentos del año y conocer su distribución espacial. Por ejemplo, utilizando las imágenes del sensor Landsat TM, es posible calcular el índice de vegetación NDVI y el NDVI verde. Sin embargo no es posible el cálculo de índices que incluyan la banda del borde rojo debido a que el sensor montado en Landsat no está configurado para medir la luz reflejada en esta banda. En el caso de los sensores de campo, en los últimos años se han logrado avances muy importantes en cuanto a la operatividad de estos sensores para utilizarlos individualmente o en conjunto montados en maquinaria agrícola. Algunos de estos sensores extraen información del cultivo utilizando el NDVI, otros el NDVI verde, otros el NDVI ambar, etc. La facilidad en la operatividad de estos sensores sumado a la elevada capacidad de almacenamiento y a la obtención de información en tiempo real, facilita y atrae fuertemente su inclusión en la actividad agrícola. Es importante distinguir, sin embargo, la operatividad del sensor o del equipo de sensores, de su potencial de generación de información el cual está medularmente basado en las bandas de luz o el índice de vegetación para el cual está configurado.

II. Uso del NDVI para la Selección de Ambientes (zonas homogéneas) en Cultivos Extensivos.

Las imágenes que se utilizarán para realizar el cálculo del NDVI a nivel de chacra son las del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5. Este sensor tiene las siguientes características: Resolución espectral: 7 bandas (Bandas 1, 2 y 3, espectro visible; Bandas 4, 5, 6 y 7 desde el infrarrojo cercano hasta el térmico); Resolución espacial (tamaño del píxel): 30 x 30 m; Resolución temporal: 16 días; Cobertura: Cada imagen cubre 185 x 185 Km.

A nivel nacional se utilizan las bandas de las imágenes del sensor AVHRR, el cual está montado en el satélite NOAA. Las imágenes de este sensor, tienen 5 bandas, la resolución espacial es de 1.1 x 1.1 km y la resolución temporal es de 1 día.

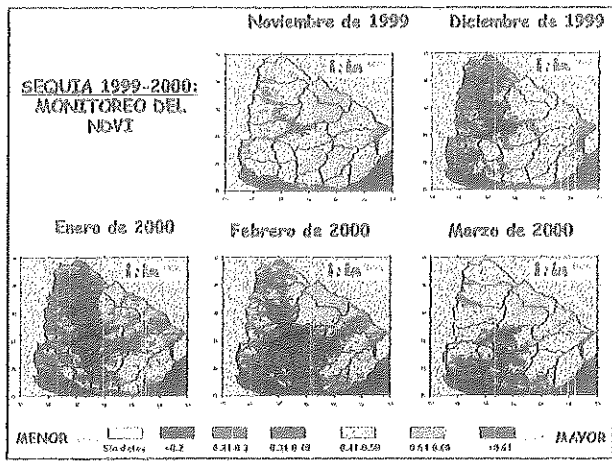
¿Qué es el NDVI?

El NDVI es un índice que permite de manera rápida, estimar la presencia de vegetación así como en cierta medida la calidad y desarrollo de la misma. Se basa en la relación de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético (rojo e infrarrojo) donde la vegetación emite o refleja según su estado (fig. 3).

$$NDVI = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{rojo}}$$

Figura 3. Cálculo del NDVI.

Cuando la vegetación está en buen estado, absorbe la radiación en la fracción del rojo – la clorofila absorbe esta radiación – mientras que el infrarrojo es reflejado al atravesar las membranas celulares. A diferencia de cuando la vegetación está sufriendo estrés, que la radiación en la fracción del rojo es en mayor parte reflejada.



Uso del NDVI a nivel nacional

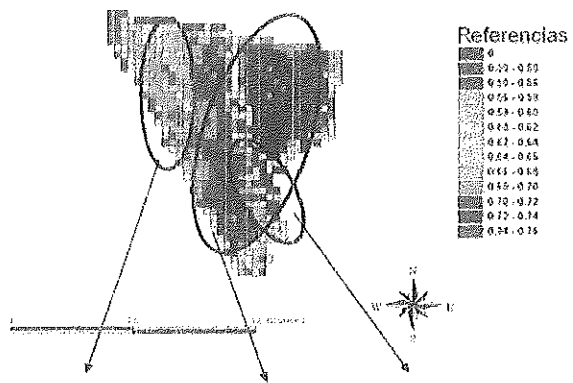
Los ambientes pueden ser determinados a nivel de chacras como a nivel Nacional, es por esto que en la figura 4, se muestran los valores del NDVI para el período de sequía de noviembre de 1999 hasta marzo de 2000.

Figura4. Monitoreo del NDVI durante la sequía 1999-2000.

Uso del NDVI a nivel de chacras comerciales: 2 casos de estudio

A continuación se presenta en la figura 5, el NDVI de la chacra “Algarrobo Grande” de un trigo en noviembre de 2005, se observan 3 zonas con marcadas diferencias en el NDVI, una zona con valores bajos del índice, una zona con valores medios y una con valores altos.

NDVI: Trigo Invierno del 2005



NDVI medio NDVI alto NDVI bajo

Figura 5. NDVI para un trigo del año 2005.

El valor del NDVI puede variar dentro de un mismo potrero, según: las características físicas y/o químicas del suelo, el estado sanitario y nutricional de la vegetación, el estado fenológico del cultivo.

A modo de ejemplo, se analizarán las regiones con distinto valor del NDVI, según el mapa de suelos del potrero. Para poder los valores del NDVI por unidad de suelos, se realizó la intersección de los mapas de suelo y de NDVI mediante un SIG. Los resultados de se ven en la figura 6, donde se muestran los valores del índice para cada una de las unidades de suelo.

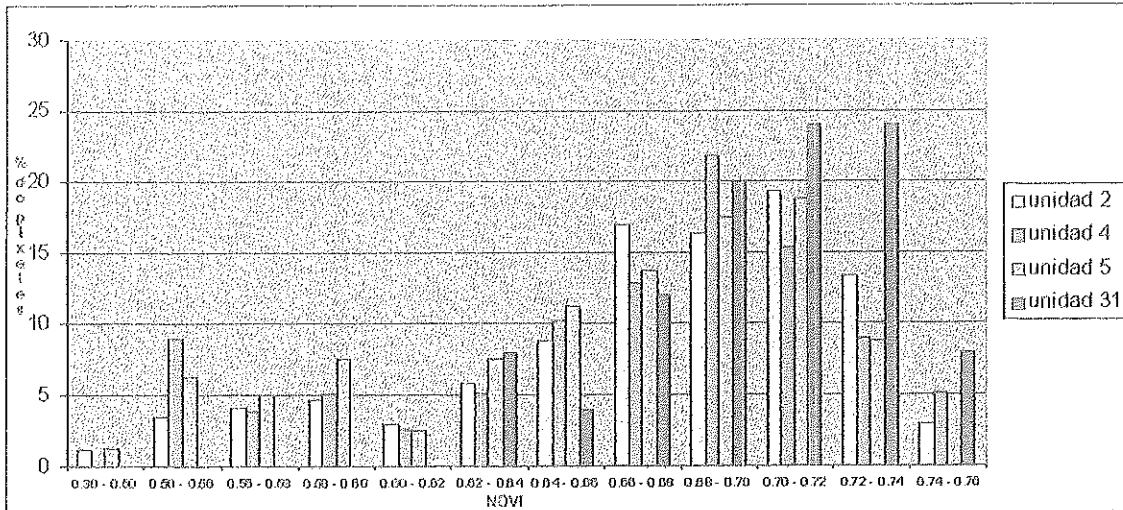


Figura 6. Valor del NDVI para cada una de las unidades de suelo.

En la figura 6 se ve que el mayor porcentaje de píxeles tiene un alto valor del índice (mayor a 0.62) y que dentro de estos altos valores, el suelo de la unidad 31, es el que presenta los mayores valores. Si de las siguientes características de los suelos: pendiente, espesor del suelo, agua disponible y drenaje, seleccionamos el drenaje por ser la variable que puede en mayor medida interferir en un cultivo de invierno, se puede observar en la figura 7, como esa unidad es la que tiene un drenaje "rápido" lo que posiblemente junto con otras características, expliquen el mayor valor del índice para ese suelo.

Mapa de suelos clasificado por DRENAJE

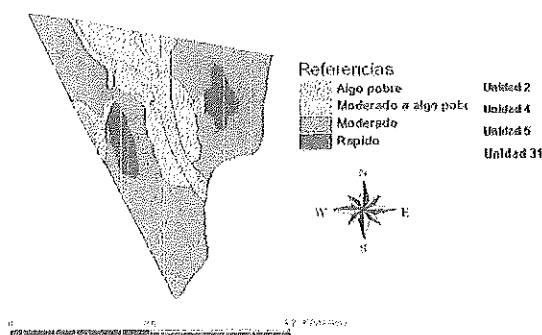


Figura 7. Mapa de drenaje.

Consideraciones finales

La teledetección o sensoramiento remoto, a través del NDVI, es una herramienta de diagnóstico útil a la hora de determinar ambientes ya sea a nivel regional como a nivel de chacras.

Es además una herramienta eficaz para determinar variaciones temporales y espaciales.

Es de ayuda, junto con información de suelos (características físico-químicas) así como de resultados físicos (como mapas de rendimiento), para la toma de decisiones de índole agronómica.

Bibliografía:

Ciganda, V., A.A. Gitelson, and J. Schepers. 2008a. Vertical Profile and Temporal Variation of Chlorophyll in Maize Canopy: Quantitative "Crop Vigor" Indicator by Means of Reflectance-Based Techniques, *Agron. J.* 100:1409–1417. doi:10.2134/agronj2007.0322

Ciganda, V.S., A.A. Gitelson, J. Schepers, 2008. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, *in press*.

Ciganda, V.S. 2007. Distribution of Chlorophyll in Maize Canopy: Technique, Quantification, and Implications for Remote Sensing. University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE. Tesis de Doctorado.

Gitelson, A.A., A. Viña, D.C. Rundquist, V. Ciganda, T.J. Arkebauer, 2005. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08403, doi: 10.1029 / 2005GL022688.

Steele, M. R., A. A. Gitelson, and D.C. Rundquist. 2008. Non-Destructive Estimation of Leaf Chlorophyll Content in Grapes, *American Journal of Enology and Viticulture*, *in press*.