

# Desarrollo de curvas espectrales del crecimiento anual de la vegetación, usando sensores remotos

## Development of remote sensing vegetation spectral growth curves

Fernando Paz-Pellat<sup>a</sup>, Martín Alejandro Bolaños-González<sup>a</sup>, Luis Alberto Palacios-Sánchez<sup>a</sup>,  
Fermín Pascual-Ramírez<sup>a</sup>, Edgardo Medrano-Ruedaflora<sup>a</sup>, Fernando Ibarra-Hernández<sup>a</sup>

### RESUMEN

El desarrollo de curvas del crecimiento de la vegetación (pastizales y matorrales), a nivel histórico, plantea retos importantes por falta de estadísticas en México. La tecnología de sensores remotos en plataformas espaciales, por medio de índices de vegetación o IV, permite realizar una aproximación en esta dirección. Este trabajo discute un esquema de modelación paramétrica (indirecta) de la curva de crecimiento de la biomasa en píxeles individuales de sensores Advanced Very High Resolution Radiometer o AVHRR y Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer o MODIS, permitiendo así su caracterización usando algoritmos de pre y post-proceso. Los resultados obtenidos de la aplicación de los algoritmos discutidos en este trabajo, permiten la obtención de curvas anuales del crecimiento a la escala de 100 ha (AVHRR) y 6.25 ha (MODIS), que pueden ser usadas en estudios de cambio climático y del manejo de agostaderos en México.

**PALABRAS CLAVE:** Curvas de crecimiento, Agostadero, índices NDVIcp e IVCP, Modelo paramétrico, AVHRR, MRIS, Cambio climático.

### ABSTRACT

Development of historic vegetation growth curves for both grasslands and shrublands in Mexico becomes a real challenge due to lack of statistics. Remote sensing technology using satellites, allows obtaining a first approximation through vegetation indices (VI). The present study discusses an indirect parametric modeling of the biomass growth curve in individual pixels of both Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), thus allowing their characterization using pre and post process algorithms. Results obtained through application of the algorithms discussed in the present paper, allow obtaining annual growth curves at 100 ha (AVHRR) and 6.25 ha (MODIS) scales that can be used in studies on climate change and on grassland/shrubland management in Mexico.

**KEY WORDS:** Growth curve, Grassland/shrubland, NDVIcp index, IVCP index, Parametric model, AVHRR, MODIS, Climate change.

El contar con curvas de crecimiento de la vegetación (pastizales naturales y matorrales, principalmente) a escala de país, permite analizar los efectos del cambio climático, así como el estado de este recurso en relación a las actividades ganaderas, entre otras. En especial, una base histórica de curvas de crecimiento a escala de celdas de una malla nacional (celdas de dimensiones de 1,000, 500 y 250 m) permitiría analizar los procesos de herbivoría que impactan la condición del agostadero en México, además de generar información para la estimación

The possibility of having access to vegetation growth curves of both grasslands and shrublands at country level allows analyzing effects of climate change, and also the status of this resource in relation to livestock raising, among other items. Especially, a historic database of growth curves at cell scale of a country grid (1,000, 500 and 250 m cells) would allow analyzing the herbivory process that impacts native pasture conditions in Mexico, besides generating information for estimating dynamically local stocking rates.

Recibido el 23 de marzo de 2010. Aceptado el 18 de noviembre de 2010.

<sup>a</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. pellat@colpos.mx. Correspondencia al primer autor.

de las capacidades de carga animal locales en forma dinámica.

Los sensores remotos en plataformas satelitales, disponibles desde los 70s, son una tecnología de carácter espacialmente exhaustivo, y con resolución temporal diaria de revisita al mismo sitio (escalas de 1,000 a 250 m), donde sobresale el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer; resolución espacial de 1,100 m a nadir; con información de cobertura de México de 1986 a la fecha) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; resolución espacial de 1,000 a 250 m, con información de 2000 a la fecha). Así, los sensores remotos brindan una oportunidad única de reconstruir la historia de manejo y efectos climáticos de la vegetación en México.

Los sensores remotos caracterizan la vegetación usando el alto contraste entre una banda fotosintética como el rojo (R) y una no fotosintética como el infrarrojo cercano (IRC)<sup>(1)</sup>. Este par de bandas están disponibles en los sensores AVHRR y MODIS, por lo que pueden usarse para el desarrollo de índices espectrales de la vegetación o IV, de los cuales se ha publicado gran cantidad<sup>(2,3,4)</sup>. En el crecimiento de la vegetación, en las fases iniciales, los sensores remotos observan una mezcla suelo-vegetación (vegetación con cobertura parcial del suelo; caso típico en pastizales y matorrales en la ganadería extensiva del país), por lo que los IV generalmente son diseñados para minimizar el efecto del suelo y obtener información únicamente de la vegetación<sup>(5)</sup>.

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de una metodología para parametrizar la curva anual de crecimiento espectral de pastizales y matorrales a nivel nacional, y poder realizar análisis de cambios temporales a escala de píxeles individuales en imágenes satelitales. En este trabajo se utilizó el índice NDVIcp<sup>(4)</sup> o Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas del Colegio de Postgraduados, para estimar el crecimiento de la vegetación usando un modelo paramétrico. Este modelo, usando una transformación del NDVIcp, es la base para el desarrollo de un algoritmo de pre-proceso y post-proceso de las bandas espectrales

Remote sensors in satellites, available since the 1970s, are spatially comprehensive, with a daily temporal resolution of revisit to the same site (1,000 to 250 m scales) where both the AVHRR sensor (Advanced Very High Resolution Radiometer, 1,100 m nadir spatial resolution and providing data on Mexico since 1986) and the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 1,000 to 250 m spatial resolution and providing information since 2000 to date). Therefore, remote sensing provides a unique opportunity for reconstructing both management history and climate effects on the vegetation of Mexico.

Remote sensing characterizes vegetation by means of high contrast between a photosynthetic band, such as Red (R) and a non photosynthetic such as Near Infrared (IRC)<sup>(1)</sup>. Both of these bands are available in both the AVHRR and MODIS sensors, and therefore can be used for developing vegetation spectral indices (IV), many of which have been published<sup>(2,3,4)</sup>. At the initial stages of plant growth, sensors detect a soil-vegetation combination (vegetation with limited soil covering, typical of grasslands and shrublands in extensive livestock raising), so VIs are designed for minimizing soil effect and thus obtaining vegetation data only<sup>(5)</sup>.

The purpose of the present study was developing a methodology for parameterizing the annual spectral growth curve in shrublands and grasslands at country level and analyzing temporal changes at individual pixel level in satellite images. In the present paper the (Colegio de Postgraduados Normalized Vegetation Index) NDVIcp<sup>(4)</sup> index was utilized for estimating vegetation growth using a parametric model. This model, using a NDVIcp transformation, constitutes the base for developing a pre-process and post-process algorithm of spectral bands of the AVHRR sensor (extendible to MODIS) for generating annual growth curves of vegetation at a pixel by pixel scales from a satellite image.

The NDVIcp index was designed for obtaining a linear relation with the LAI (Leaf Area Index) in the growing stages of vegetation (up to an approximately LAI of 3), minimizing soil effect. Taking into account that LAI has an approximately

del sensor AVHRR (extensible al MODIS) para generar curvas anuales de crecimiento de la vegetación a escala píxel por píxel de una imagen satelital.

El índice NDVI<sub>cp</sub> fue diseñado para tener una relación lineal con el índice de área foliar o IAF en la etapa vegetativa de la vegetación (hasta un IAF aproximado de 3), minimizando el efecto del suelo debajo de ésta. Considerando que el IAF tiene una relación aproximadamente lineal con la biomasa aérea o Bm<sup>(6)</sup> podemos hacer estimaciones robustas de Bm; aun para un umbral del nivel de estrés, donde la vegetación cambia su estrategia de acumulación de IAF y Bm, para incrementar las reservas de fotosintatos en la parte radical<sup>(7)</sup>.

La Figura 1a muestra el patrón temporal generalizado del crecimiento anual de la vegetación (pastizales) para IAF. En caso de matorrales, el IAF no inicia en cero.

La Figura 1b muestra el patrón descrito en la Figura 1a, pero para el espacio espectral del R-IRC, suelo debajo de la vegetación variando desde suelo seco (S1) a húmedo (S2), representando las condiciones esperadas durante el monitoreo por sensores remotos de un píxel.

Los patrones mostrados en la Figura 1, curvas iso-suelo (la vegetación varía y las propiedades ópticas del suelo son constantes), tienen los siguientes patrones:

*Patrón V.* Esta etapa va desde la emergencia (línea del suelo o IAF = 0; en matorrales es una línea para un IAF dado específico) hasta la antesis. En el espacio temporal, se caracteriza por un crecimiento exponencial del follaje (fase V1), hasta lograr el cubrimiento máximo del suelo (fotosintéticamente) y después hay una transición a un crecimiento tipo lineal (fase V2). En alguna vegetación se presenta otra fase exponencial (fase V3) después de la fase lineal, y se caracteriza por cambios en las propiedades ópticas de la hoja y nuevos órganos con propiedades ópticas diferentes a la hoja (fase reproductiva). La fase exponencial inicial, en el espacio espectral, se caracteriza por la evolución de las curvas iso-IAF (igual vegetación

linear relationship with aerial biomass (Bm)<sup>(6)</sup>, strong estimates of Bm can be performed, even for a stress threshold level, where vegetation changes its LAI and Bm accumulation strategy for increasing photosynthate reserves in root<sup>(7)</sup>.

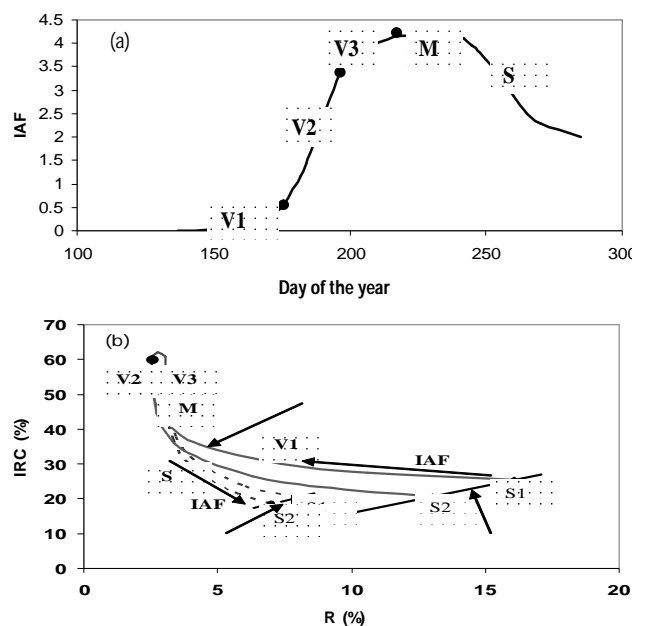
In Figure 1a the generalized pattern of vegetation annual growth in rangelands for LAI is shown. For shrublands, LAI does not start at zero. In Figure 1b the pattern described in Figure 1a is shown, but for the R-IRC spectral space, soil below vegetation, varying from dry (S1) to moist (S2), representing conditions expected in remote sensing monitoring of one pixel.

Patterns shown in Figure 1, iso-soil curves (vegetation changes and optical conditions of soil remain constant) show the following patterns:

*V Pattern.* This stage goes from emergence (soil surface line, LAI=0; in scrubland being a line for a specific LAI) to anthesis. In temporal space, it is characterized by foliage exponential growth (V1

Figura 1. Patrón generalizado del crecimiento de la vegetación: (a) espacio tiempo-IAF y (b) espacio del R-IRC

Figure 1. Generalized pattern of vegetation growth: (a) IAF-time space and (b) R-IRC space



con propiedades ópticas diferentes del suelo) hasta alcanzar el punto de saturación del rojo (reflectancia de medio denso o R<sub>1/2</sub>). La fase lineal está representada por una línea recta vertical, donde el valor del R permanece constante, hasta alcanzar el valor máximo de reflectancia del infinito de la banda del IRC (IRC<sub>∞</sub>). La fase exponencial 2 presenta un patrón donde el R se incrementa (cambios de color) y el IRC permanece constante o decrece.

*Patrón M.* Va desde la antesis hasta antes del inicio de la senescencia y se caracteriza por un IAF constante (nacimiento y muerte equilibrado de hojas). En el espacio del R, este patrón se caracteriza por un punto donde R y el IRC permanecen constantes o por una reducción del IRC.

*Patrón S.* Va desde el inicio de la senescencia hasta donde la Bm está totalmente muerta (línea del residuo o IAF = 0; en matorrales es una línea para un IAF dado específico). El espacio temporal se caracteriza por un patrón exponencial. El patrón es similar en el espacio del R-IRC y se caracteriza por el incremento del R debido a la degradación de los pigmentos de las hojas y la reducción del IRC por el deterioro de la estructura del mesófilo.

#### *Curva de crecimiento de la vegetación usando el índice NDVI<sub>cp</sub>*

Para analizar el patrón de crecimiento asociado al NDVI<sub>cp</sub>, se utilizan los datos experimentales de un pastizal natural (*Bouteloua* spp.) en la cuenca de Walnut Gulch en Arizona, Estados Unidos. La documentación de este experimento puede encontrarse en estudios publicados<sup>(8,9,10)</sup>. Bolaños *et al.*<sup>(11)</sup> analizan este experimento para el desarrollo de un modelo de la geometría sol-sensor en las reflectancias. Para contar con mediciones simultáneas del NDVI<sub>cp</sub> y la Bm, se interpolan algunos datos (polinomios) para hacer coincidir las mediciones disponibles.

Puesto que las reflectancias de la vegetación son dependientes de la cantidad de hoja y sus propiedades ópticas<sup>(12)</sup>, la comparación de índices espectrales debe ser realizada en términos de

phase) until maximum soil coverage (photosynthetically), followed by transition to a linear type growth phase (V2). In some kinds of vegetation another exponential growth phase (V3) after the linear phase is found, characterized by changes in leaf optical properties and appearance of new organs with different optical properties (reproductive phase). The initial exponential phase, in the spectral space, is characterized by evolution of the iso-LAI curves (same vegetation with different optical properties of soil) up to red saturation point (dense medium reflectance, R<sub>1/2</sub>). The linear phase is represented by a vertical straight line, where R remains constant, until reaching the highest reflectance value for the IRC band (IRC<sub>∞</sub>). Exponential phase 2 presents a pattern where R increases (changes in color) and IRC remains constant or falls.

*M Pattern.* From anthesis to just before senescence characterized by a constant LAI (leaf emergence and death in equilibrium). In the R space, this pattern is characterized by a point where both R and IRC remain constant or IRC decreases.

*S Pattern.* From beginning of senescence to the point where Bm is completely dead (residue line, LAI=0, in shrublands being a line for a specific given LAI). The temporal space is characterized by an exponential pattern. This pattern is similar in the R-IRC space and is characterized by an increment of R due to leaf pigment degradation and IRC fall owing to mesophyll deterioration.

#### *Vegetation growth curve using the NDVI<sub>cp</sub> index*

For analyzing the growth pattern associated to NDVI<sub>cp</sub>, data of native grass specie associated to grasslands (*Bouteloua* spp.) in the Walnut Gulch basin in Arizona, USA, is used. Documentation regarding this experiment can be found in published papers<sup>(8,9,10)</sup>. Bolaños *et al.*<sup>(11)</sup> examined this experiment for developing a model of the sun-sensor geometry in reflectance. In order to have simultaneous Bm and NDVI<sub>cp</sub> readings, data (polynomial) were interpolated for coincidence of available readings.

Due to the fact that vegetation reflectance is dependent on leaf quantity and its optical

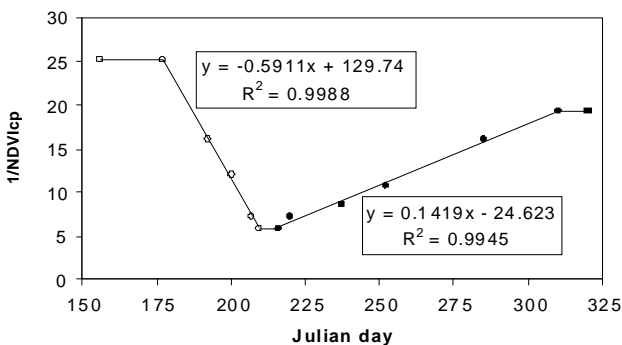
biomasa verde o viva. La relación entre la Bm y el NDVIcp es de tipo no lineal para la etapa vegetativa y de senescencia. Para aproximar linealmente una relación del NDVIcp con la Bm, se usó la transformación 1/NDVIcp, que muestra buen comportamiento. La ventaja de la transformación 1/NDVIcp, es que permite establecer modelos lineales de crecimiento de la vegetación en el espacio del tiempo (Figura 2). Esto es importante ya que simplifica los algoritmos operacionales para la estimación (parametrización) de los patrones anuales del crecimiento de los pastizales y matorrales a una escala píxel por píxel. El modelo paramétrico (funciones lineales) puede ser ajustado (definición de sus parámetros) usando mediciones del índice NDVIcp. De esta manera, el modelo de crecimiento de la vegetación es usado y no los valores directos de las mediciones del NDVIcp en imágenes satelitales.

*Modelo temporal general para el índice NDVIcp*

De acuerdo a los patrones mostrados en la Figura 2, la Figura 3a muestra el modelo desarrollado para la evolución temporal (X= día juliano) de 1/NDVIcp (=Y). En la Figura 3b se muestra el patrón temporal del NDVIcp, el cual no es lineal.

Figura 2. Ajuste de un modelo paramétrico lineal al patrón del crecimiento de un pastizal, caracterizado por el índice espectral NDVIcp

Figure 2. Adjustment of a linear parametric model to a grassland growth pattern, characterized by the NDVIcp spectral index

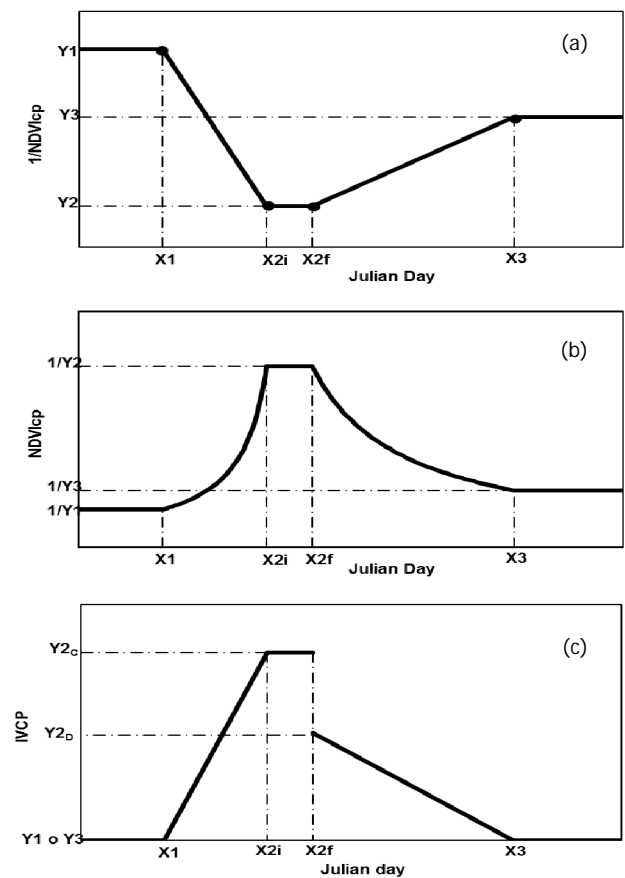


Points with squares (filled or not) reference the beginning and end of vegetation growth.

properties<sup>(12)</sup>, comparison of spectral indices should be made in terms of green or live biomass. Relationship between Bm and NDVIcp is of a non-linear type in both the vegetative and senescence stages. For approaching linearly a relationship of NDVIcp with Bm, the 1/NDVIcp transformation, which shows good performance, was utilized. The advantage of using this transformation lies in allowing the establishment of vegetation growth

Figura 3. Modelo paramétrico de crecimiento de la vegetación: (a) temporal de 1/NDVIcp, (b) del NDVIcp y (c) del IVCP parametrizado en forma independiente para la etapa vegetativa y senescencia

Figure 3. Vegetation growth parametric model: (a) 1/NDVIcp temporal, (b) NDVIcp, (c) IVCP parameterized separately for the vegetative and senescent growth stages



In IVCP, the C subindex in the Y values refers to the (vegetative) growing stage and D to the senescence (decreasing) stage.

En la Figura 3a, al inicio de la etapa vegetativa, se presenta una meseta inicial (suelo desnudo o vegetación perenne). La etapa vegetativa inicia en (X1, Y1) y termina en (X2i, Y2). Después de esta etapa se considera una meseta intermedia entre (X2i, Y2) y (X2f, Y2) y al final, una etapa de senescencia entre (X2f, Y2) y (X3, Y3). El modelo propuesto no considera en forma completa la etapa inicial de la fase exponencial inicial (V1), ni la exponencial final (V3), de la etapa vegetativa-reproductiva, por la aproximación lineal utilizada. Esto no tiene mayores implicaciones en la práctica, ya que estas transiciones no lineales son aproximadas por la intersección de dos líneas rectas (ver más adelante).

Las dos etapas generales del crecimiento de la vegetación, utilizando 1/NDVIcp, pueden estimarse de:

$$\left(\frac{1}{NDVI_{cp}}\right) = A1 + B1t, \text{ para la etapa vegetativa}$$

$$\left(\frac{1}{NDVI_{cp}}\right) = A2 + B2t, \text{ para la etapa de senescencia} \dots\dots\dots (1)$$

*Equivalencia entre el NDVIcp y la biomasa aérea de la vegetación*

Considerando un espacio geográfico dado (píxel de una imagen satelital) y un tiempo específico (por ejemplo, el tiempo donde Bm la alcanza su valor máximo en el año), la capacidad de carga animal está relacionada con la Bm seca total (kg M.S.) por:

$$CC = \frac{(Bm)(FA)(FAG)(FAA)}{4,928} = pBm \dots\dots\dots (2)$$

donde FA es el factor de aprovechamiento de la biomasa (0.5 u otro valor), FAG es el factor de biomasa aprovechable por el ganado (dependiente de la composición florística y disponibilidad forrajera en cada sitio; de 0 a 1), FAA es un factor de ajuste por condiciones abióticas (cercanía a cuerpos de agua y pendiente del terreno<sup>(13)</sup>); y 4,928 kg MS es el requerimiento de alimento para mantener una unidad animal todo el año (ingesta diaria del 3 % del peso corporal de un bovino con un peso de 450 kg). La Bm está dada en términos absolutos y es el resultado de multiplicar la densidad

linear models in time spaces (Figure 2). This is of importance as it simplifies the operational algorithms for estimating (parameterization) annual grassland and shrubland growth patterns at a pixel by pixel scale. The parametric model (linear functions) can be adjusted (parameter definition) through NDVIcp data. Thus, the vegetation growth model is used, rather than the direct values of NDVIcp data in satellite images.

*General temporal model for NDVIcp*

In accordance with patterns shown in Figure 2, Figure 3a shows the model developed for temporal evolution (X = Julian day) of 1/NDVIcp (=Y). In Figure 3b the temporal pattern for NDVIcp is shown, which is a non-linear model.

In Figure 3a, at the beginning of vegetative stage, an initial plateau can be observed (either bare soil or perennial vegetation). The vegetative stage begins at (X1, Y1) and ends at (X2i, Y2). Following this stage an intermediate plateau can be appreciated between (X2i, Y2) and (X2f, Y2) and finally a senescence stage between (X2f, Y2) and (X3, Y3). The proposed model does not take into consideration completely neither the initial phase (V1) of the exponential growth stage nor the final exponential phase (V3) of the vegetative-reproductive stage, because of the linear approach being used. This does not have any practical implications, because these non linear transitions are approximated by the intersection of two straight lines (see further on).

The two general vegetation growth stages can be estimated, using 1/NDVIcp, through:

$$\left(\frac{1}{NDVI_{cp}}\right) = A1 + B1t, \text{ for the vegetative stage}$$

$$\left(\frac{1}{NDVI_{cp}}\right) = A2 + B2t, \text{ for the senescence stage} \dots\dots\dots (1)$$

*Equivalence between NDVIcp and vegetation aerial biomass*

Taking into account a given geographical space (pixel of a satellite image) and a specific time

de biomasa (kg m<sup>-2</sup>) por la superficie (m<sup>2</sup>) que representa esta estimación, para un tiempo específico o ciclo. En el caso de usar la biomasa viva, se puede usar otro factor de ajuste por contenido de humedad.

Si consideramos un par de años consecutivos (k y k-1), suponiendo que los factores de ajuste no cambian apreciablemente, podemos establecer entre ellos la relación:

$$\frac{pBm_k}{pBm_{k-1}} = \frac{Bm_k}{Bm_{k-1}} = r \dots\dots\dots (3)$$

La ventaja de la relación de razones dada por la ecuación (3) es que filtra los factores de ajuste, evitando así tener que calibrarlos localmente. Este tipo de razonamiento puede extenderse para una serie de tiempo de la Bm, desde el año m al año n:

$$Bm_{n-m} = (r_m)Bm_{n-m-1} = (r_m)(r_{m-1})Bm_{n-m-2} = \dots = (r_m)(r_{m-1})(\dots)Bm_n \dots\dots\dots (4)$$

donde las r son razones entre años consecutivos, que reflejan los cambios de la biomasa. Así, es posible construir indicadores del estado de la vegetación en un píxel en relación a un año base. Las razones r pueden analizarse en relación a condiciones de manejo (nivel de pastoreo) o climáticas (precipitación).

De la relación (3) y (4), para evitar el uso de factores de ajuste locales, es necesario que la relación entre la Bm y un índice de vegetación IV cumpla:

$$Bm = kIV \dots\dots\dots (5)$$

Dada la relación entre 1/NDVI<sub>cp</sub> y la Bm, relación lineal con una constante aditiva (Figura 2), es necesario hacer una transformación para obtener una relación similar a la mostrada en (6):

$$IVCP = \left( \frac{1}{NDVI_{cp}} \right)_{\min} - \left( \frac{1}{NDVI_{cp}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

(i.e., the time when Bm attains its maximum value in a year), the stocking rate is related to total dry Bm (kg DM) by:

$$CC = \frac{(Bm)(FA)(FAG)(FAA)}{4,928} = pBm \dots\dots\dots (2)$$

Where FA represents biomass use factor (0.5 or another value); FAG being usable biomass by livestock (dependent on floristical composition and forage availability in each site, between 0 and 1); FAA is an adjustment factor for abiotic conditions (nearness to water courses and ground slope<sup>(13)</sup>); and 4,928 kg DM is the feed requirement to maintain an animal unit across one year (daily 3 % intake of body weight for a 450 kg cow). Bm is given in absolute terms and is the result of multiplying biomass (kg m<sup>-2</sup>) by the area (m<sup>2</sup>) represented in this estimation, for a specified time or cycle. If live biomass is used, another factor for adjusting humidity content can be applied.

If two consecutive years (k and k-1), supposing that adjustment factors do not significantly change, the following relationship between them can be set,

$$\frac{pBm_k}{pBm_{k-1}} = \frac{Bm_k}{Bm_{k-1}} = r \dots\dots\dots (3)$$

The advantage of the ratio provided by equation (3) lies in that it filters the adjustment factors, thus avoiding to be calibrated locally. This type of reasoning can be extended to cover a Bm time series, from year m to year n,

$$Bm_{n-m} = (r_m)Bm_{n-m-1} = (r_m)(r_{m-1})Bm_{n-m-2} = \dots = (r_m)(r_{m-1})(\dots)Bm_n \dots\dots\dots (4)$$

Where r represents ratios between successive years that reflect changes in biomass. Thus, it is possible to build indicators of the status of vegetation in a pixel in comparison to the base year. The r ratios can be analyzed in relation to either management conditions (grazing pressure) or climate (rainfall).

For the (3) and (4) ratios, for avoiding use of local adjustment factors, it is necessary that the

El nuevo índice IVCP (Índice de Vegetación del Colegio de Postgraduados), permite obtener una relación similar a (3), ya que la constante aditiva entre  $1/NDVI_{cp}$  y  $B_m$  es filtrada. El valor de  $(1/NDVI_{cp})_{min}$  se puede obtener de la evolución temporal del índice  $1/NDVI_{cp}$ . Así, considerando a las etapas vegetativa y de senescencia en forma independiente, en la etapa vegetativa se puede usar  $Y_1 = (1/NDVI_{cp})_{min}$  y en la de senescencia  $Y_3 = (1/NDVI_{cp})_{min}$ . La Figura 3c muestra el modelo del IVCP para esta estrategia de parametrizar  $(1/NDVI_{cp})_{min}$ .

Para poder contar con un registro histórico de curvas de crecimiento para valorar la condición del agostadero, se utilizaron imágenes satelitales del sensor AVHRR<sup>(14,15)</sup>, disponibles para México desde 1986 (cobertura nacional). El software utilizado denominado SPIA (Sistema para Proceso de Imágenes AVHRR) consiste de dos algoritmos generales: pre-proceso y post-proceso.

*Algoritmo de pre-proceso*

El procesamiento de imágenes satelitales del sensor AVHRR, algoritmo de pre-proceso, consistió de los siguientes pasos:

*Referenciación geográfica.* Las imágenes satelitales del sensor AVHRR, después de su lectura, son referenciadas geográficamente usando un modelo orbital<sup>(16)</sup> para su re-proyección en coordenadas Cónicas Conforme de Lambert en una malla nacional con celdas de 1 km x 1 km, usando el método del Vecino más Cercano. El error de referenciación fue de 1 a 3 píxeles, que no tiene repercusión importante, para la implementación, usando polígonos de uso del suelo 1:250,000 del INEGI.

*Discriminación de nubes y sombras.* El software SPIA realiza un proceso de generación de códigos de calidad de la información contenida en cada píxel. En especial, este proceso sirve para discriminar píxeles con nubes, los cuales son sacados del proceso del  $NDVI_{cp}$ . La base del algoritmo de discriminación de nubes el algoritmo CLAVR-1(Clouds from AVHRR-Phase I) usado por la NASA<sup>(17)</sup> (North American Space Agency).

relationship between  $B_m$  and a vegetation index (VI) complies with,

$$B_m = kIV \dots\dots\dots (5)$$

Because the relationship between  $1/NDVI_{cp}$  and  $B_m$  being linear with an additive constant (Figure 2) it is necessary to perform a transformation for obtaining a relationship similar to (6),

$$IVCP = \left( \frac{1}{NDVI_{cp}} \right)_{min} - \left( \frac{1}{NDVI_{cp}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

This new index IVCP (Colegio de Postgraduados Vegetation Index) allows obtaining a relationship similar to (3), because the additive constant between  $1/NDVI_{cp}$  and  $B_m$  is filtered. Value for  $(1/NDVI_{cp})_{min}$  can be obtained from the time evolution of the  $1/NDVI_{cp}$  index. Thus, considering both the vegetative and senescence stages separately, in the vegetative stage  $Y_1 = (1/NDVI_{cp})_{min}$  can be used and  $Y_3 = (1/NDVI_{cp})_{min}$  in the senescence stage. In Figure 3c, the IVCP model for this strategy of parameterizing  $(1/NDVI_{cp})_{min}$  is shown.

In order to be able to have a historical record of growth curves for assessing rangeland conditions, satellite images of the AVHRR sensor<sup>(14,15)</sup> available for Mexico since 1986 (full country coverage) were used. The software used for this enterprise is known as SPIA (System for Processing AVHRR Images) and consists of two general algorithms: pre process and post process.

*Pre process algorithm*

Processing satellite images of the AVHRR sensor, pre process algorithm, consists of the following steps:

*Geographical reference.* The satellite images of the AVHRR sensor, after being read, were referenced geographically using an orbital model<sup>(16)</sup> for their re-projection in Lambert conic conformal projection coordinates in a countrywide grid with 1 km\*1 km cells, using the nearest-neighbor method. Registry error was 1 to 3 pixels, not



Al aplicar el algoritmo CLAVR-1, modificado, las posibles clases de objetos son: claro, sombra, nieve/hielo. Siguiendo el esquema propuesto en el algoritmo CLAVR-1, se utiliza la clase "mixto" ( $p =$  parcial) para denotar la situación donde existe ambigüedad (una o más pruebas fallan para etiquetarlo como nube o claro) en la clasificación:

En la porción solar del espectro electromagnético (0.3 a 3  $\mu\text{m}$ ), la radiación solar incidente domina sobre la radiación térmica emitida. La cantidad de radiación reflejada depende de la composición química y física de la superficie terrestre y la atmósfera. Esta composición es lo que distingue a las clases de superficies terrestres y a constituyentes atmosféricos. Las diferencias en su composición, generalmente, hacen a algunos altamente reflectivos (nubes, nieve y hielo), a otros moderadamente reflectivos (desiertos, suelo desnudo) y, todavía, a otros, los hacen poco reflectivos (océano, vegetación densa). Esta propiedad puede ser usada para detectar la presencia de estos componentes, utilizando las diferencias en sus reflectancias.

Las diferencias en composición también pueden causar que estas componentes reflejen la radiación solar en forma más eficiente en ciertas partes del espectro, que en otras. Esta propiedad puede ser usada para discriminar la presencia de ciertos componentes superficiales/atmosféricos. Por ejemplo, la nieve refleja altamente en longitudes de onda menores a 1  $\mu\text{m}$  y pobremente, más allá de 1.5  $\mu\text{m}$ , mientras que la vegetación verde refleja pobremente debajo de 0.7  $\mu\text{m}$ , pero lo hace en forma moderada más allá de 0.8  $\mu\text{m}$ . Las nubes tienden a dispersar la radiación en forma uniforme con las longitudes de onda, mientras que la bruma tiende a dispersar más en longitudes de onda menores.

En el infrarrojo térmico (3 a 20  $\mu\text{m}$ ), los componentes superficiales/atmosféricos pueden ser discriminados, pero como resultado de procesos físicos diferentes: absorción y re-emisión de radiación, en vez de reflexión y dispersión. La radiación infrarroja es proporcional a la temperatura de la escena, por lo que es posible separar superficies calientes y frías (por ejemplo, nubes

having important repercussion for implementation, by means of 1:250,000 INEGI soil use polygons.

*Cloud and shadow discrimination.* The SPIA software performs a code generation process for data quality of each pixel. Particularly, this process is useful for discriminating pixels with clouds, which are taken out of the NDVIcp process. The base of the cloud discrimination algorithm is the CLAVR-1 algorithm (Clouds from AVHRR-Phase 1) used by NASA<sup>(17)</sup>.

When the CLAVR-1 algorithm is applied, the possible object classes are clear, shadow, snow/ice. Following the pattern suggested in the CLAVR-1 algorithm, the "mixed" class ( $p =$  partial) for indicating ambiguity in a particular situation is used (one or more tests fail to classify it as clear or cloud) in the classification:

In the solar part of the electromagnetic spectrum (0.3 to 3  $\mu\text{m}$ ), the incident solar radiation dominates the emitted thermal radiation. The amount of reflected radiation is dependent on physical and chemical composition of the Earth's surface and of the atmosphere. This composition is what distinguishes classes of Earth surface and atmospheric constituents. Differences in composition make some components highly reflective (clouds, snow and ice) and other lesser reflective (sea, dense vegetation). This property can be used for detecting the presence of these components, profiting from these differences in reflectance.

Differences in composition can be the cause of some components reflecting solar radiation more efficiently in certain parts of the spectrum than in others. This property can be used for discriminating the presence of certain surface/atmospheric components. For example, snow reflects extremely well in wavelengths of less than 1  $\mu\text{m}$  and poorly over 1.5  $\mu\text{m}$ , while green vegetation reflects poorly below 0.7  $\mu\text{m}$  and moderately over 0.8  $\mu\text{m}$ . Clouds show a tendency to disperse radiation uniformly with wavelengths, while mist tends to disperse more in lower wavelengths.

In the thermal infrared (3 to 20  $\mu\text{m}$ ), surface/atmospheric components can be discriminated, but

sobre desiertos en el día). Las firmas espectrales son aquellas cuya emisividad varía con la longitud de onda, tal como entre las nubes cirrus delgadas y el vapor de agua atmosférico en la región de 10 a 12  $\mu\text{m}$  del espectro electromagnético.

Las técnicas para discriminar píxeles claros usando el sensor AVHRR, utilizan las cinco bandas (b) disponibles: rojo o R (b1, centrado en 0.63  $\mu\text{m}$ ) que mide la radiación visible reflejada, la cual es atenuada débilmente por absorción de ozono y por la dispersión molecular y de partículas; infrarrojo cercano o IRC (b2, centrado en 0.83  $\mu\text{m}$ ), el cual es moderadamente atenuado por vapor de agua y poco afectado por la dispersión molecular y de partículas; infrarrojo térmico reflectivo o IRTR (b3, centrado en 3.7  $\mu\text{m}$ ); infrarrojo térmico 1 o IRT1 (b4, centrado en 10.8  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo térmico 2 o IRT2 (b5, centrado en 11.9  $\mu\text{m}$ ), los cuales detectan la radiación en el infrarrojo térmico, donde la atenuación es debida principalmente al vapor de agua, incrementando en resistencia al aumentarse la longitud de onda. El IRTR es también sensible a la radiación solar reflejada por la superficie terrestre y las nubes, y es sólo débilmente atenuado por la dispersión de partículas.

En el algoritmo modificado, todos los valores de reflectancias (R e IRC) son considerados como exo-atmosféricos y están dados en porcentajes. Los valores de temperaturas de brillantez (ecuación de Planck) IRT1 e IRT2 son también exo-atmosféricos y están dados en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ). La banda IRTR no es usada en la construcción del algoritmo para detectar píxeles claros, ya que los errores asociados a su calibración, en la generación de los sensores AVHRR de los ochentas y noventas, son muy altos.

La Figura 4 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en el sistema SPIA, donde la variable U representa valores umbrales para las pruebas implementadas.

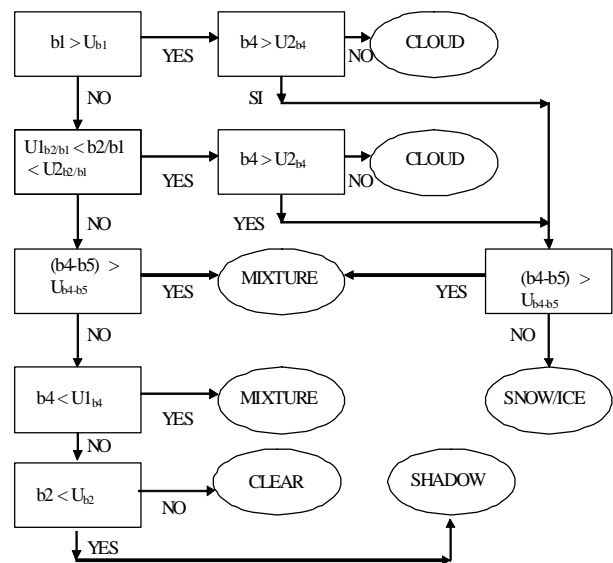
El proceso dinámico de imágenes consistió en la asignación de códigos numéricos de la calidad de información disponible. La imagen re proyectada y referenciada es analizada píxel por píxel, para

as a result of different absorption and re-emission of radiation, instead of refraction and dispersion. Infrared radiation is proportional to scene temperature, so it is possible to separate cold from hot surfaces (for example clouds over deserts during daytime). Spectral signatures are those whose emission varies as function of wavelength, as between thin cirrus clouds and atmospheric water vapor in the 10 to 12  $\mu\text{m}$  region of the electromagnetic spectrum.

Techniques for discriminating clear pixels using the AVHRR sensor use the five available bands (b): red or R (b1, centered at 0.63  $\mu\text{m}$ ) that measures visible reflected radiation, which is attenuated weakly by ozone absorption and by molecular and particle dispersion; near infrared or IRC (b2, centered at 0.83  $\mu\text{m}$ ), moderately attenuated by water vapor and scarcely affected by molecular and particle dispersion; reflective thermal infrared or IRTR (b3, centered at 3.7  $\mu\text{m}$ ); thermal infrared 1 or IRT1 (b4, centered at 10.8  $\mu\text{m}$ ) and thermal infrared 2 or IRT2 (b5, centered at 11.9  $\mu\text{m}$ ), which detect radiation in the thermal infrared, where attenuation is due mainly to water vapor, increasing

Figura 4. Esquema usado para el algoritmo CLAVR-1 modificado.

Figure 4. Scheme used for the CLAVR-1 modified algorithm



asignarle un código numérico. Los primeros códigos están asociados a la calidad de la información, por lo que es necesario revisar los indicadores de calidad contenidos en las imágenes AVHRR<sup>(14,15)</sup>, así como verificarlos al procesar la información extraída de las imágenes.

*Estimación del índice NDVI<sub>cp</sub>.* A nivel de cada píxel de la imagen satelital, se estimó el índice NDVI<sub>cp</sub><sup>(4)</sup>, después de proyectar las reflectancias a nadir usando un modelo de geometría sol-sensor<sup>(11)</sup>. Los parámetros empíricos del índice NDVI<sub>cp</sub> fueron optimizados para reducir efectos atmosféricos<sup>(18)</sup>. Por razones de eficiencia numérica, el sistema SPIA multiplica los valores del NDVI<sub>cp</sub> por 1000, por lo que en lo siguiente se considera esta situación.

#### *Algoritmo de post-proceso*

Primeramente, los datos generados por el sistema SPIA (a nivel píxel por píxel) *día juliano* y *NDVI<sub>cp</sub>* son analizados si cumplen el criterio temporal de aceptación ( $X = \text{día juliano}$ ) de  $XII \leq X \leq XFF$  (valores de defecto  $XII = 90$  y  $XFF = 340$ ; donde  $II$  significa inicio del ciclo de crecimiento y  $FF$  el final). Los datos que pasan el criterio, son analizados para determinar si su número  $N \geq NPZ$  (valor de defecto:  $NPZ = 10$ ) es suficiente para continuar los análisis. Los datos que cumplen esta condición son ordenados de menor a mayor (base día juliano). Esto permite analizar la estructura temporal de los NDVI<sub>cp</sub> (denominados *RY*) en forma temporalmente ordenada. Se permiten días juliano con más de un dato (varias imágenes en el mismo día).

El siguiente paso es, determinar el valor máximo de *RY* (*RY*<sub>max</sub>), asociado a *X*<sub>max</sub>, utilizando el criterio de búsqueda temporal  $XIM \leq X \leq XFM$  (valores de defecto:  $XIM = 180$  y  $XFM = 334$ ). Estos valores utilizan un conocimiento previo del pico de crecimiento de la vegetación. Con los datos ordenados (*RY*) en tiempo,  $i = 1, 2, \dots, n$ , se analizan pares de datos contiguos para definir tres patrones básicos: decreciente (patrón 1), creciente (patrón 2) y plano (patrón 3), (Figura 5).

Para definir el criterio de aceptación de parejas contiguas de datos, se calcula el índice:

in resistance with wavelength. IRTR is sensitive too to solar radiation reflected by ground surface and clouds and only faintly attenuated by particle dispersion.

In the modified algorithm, all reflectance values (*R* and *IRC*) are considered as exo-atmospheric and shown as percentages. Values of brightness temperature (Planck's equation), *IRT1* and *IRT2*, are also exo-atmospheric and are shown in Kelvin degrees (°K). The IRTR band is not used in algorithm construction for detecting clear pixels, because errors associated to calibration, in the 1980s and 1990s generation of AVHRR sensors, are very high.

Figure 4 shows the flow diagram of the algorithm put into operation in the SPIA system, where the *U* variable represents threshold values for the implemented tests.

The dynamic imaging process consisted in allocation of numerical codes to quality of available data. Reprojected referenced images were analyzed pixel by pixel, and a numerical code was attached. The first codes are associated to data quality, so it becomes necessary to check over the quality indicators contained in the AVHRR images<sup>(14,15)</sup>, and to verify them when processing data extracted from images.

*Estimation of the NDVI<sub>cp</sub> index.* The NDVI<sub>cp</sub> index was estimated for each pixel of satellite images, after reprojecting off-nadir reflectances through a sun-sensor geometry model<sup>(11)</sup>. Empiric parameters of the NDVI<sub>cp</sub> index were optimized for reducing atmospheric effects<sup>(18)</sup>. Due to numerical efficiency, the SPIA system multiplies NDVI<sub>cp</sub> values by 1,000, so in the following sections this factor is taken into account.

#### *Post-process algorithm*

First of all, all data generated by the SPIA system (for each pixel) *Julian day* and *NDVI<sub>cp</sub>* are analyzed and tested for compliance with the temporal acceptance criterion ( $X = \text{Julian day}$ ) of  $XII \leq X \leq XFF$  (default values for  $X = 90$  and for  $XFF = 340$ ; where  $II$  signifies beginning of the growing stage and  $FF$  end of the growing stage). Data that pass

$$dRY = \frac{RY(i) - RY(i-1)}{RY(i-1)} \dots\dots\dots (7)$$

Así, la reglas de aceptación a los patrones básicos son:

- Si  $dRY < 0$  y  $abs(dRY) > E \Rightarrow$  Patron 1
- Si  $dRY > 0$  y  $abs(dRY) > E \Rightarrow$  Patron 2
- De otra forma  $\Rightarrow$  Patron 3 ..... (8)

Donde E es un valor decisión (valor de defecto: E = 0.2).

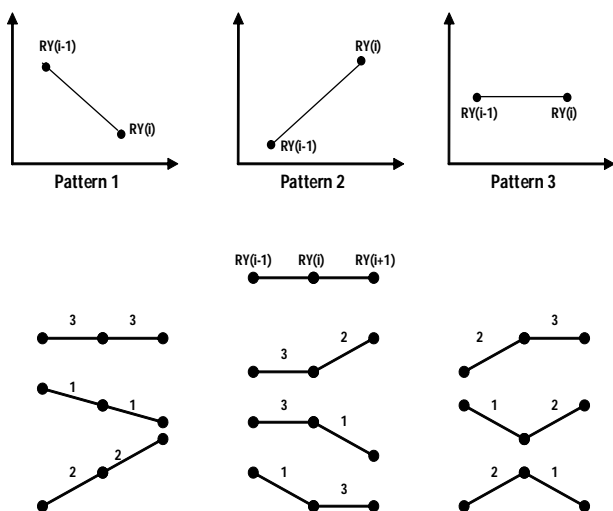
Como resultado final de este primer proceso de detección de patrones, todas las parejas contiguas de valores son etiquetadas con un patrón específico.

*Análisis de patrones planos de la etapa inicial del crecimiento*

El proceso inicial (primera revisión) general usado en todas las etapas de crecimiento de la vegetación (RY), consiste en el análisis de pares continuos de patrones, PP, para determinar si ambos pertenecen al patrón general buscado (patrón plano en este

Figura 5. Patrones básicos de la estructura temporal del crecimiento de la vegetación, así como de pares continuos de patrones

Figure 5. Basic patterns for temporal structures of vegetation growth, as well as of adjoining pattern pairs



the test are analyzed for determining if their number  $N \geq NPZ$  (NPZ default value = 10) is enough for continuing. Data that comply with this condition are ranked from low to high (in accordance with Julian days). This allows analyzing the temporal structure of the NDVIcps (known as RY) temporally ranked. Julian days with more than one datum are allowed (several images in the same day).

The next step is to determine the maximum RY value (RYmax) associated to Xmax, by means of the temporal search criterion  $XIM \leq X \leq XFM$  (default values, XIM=180, XFM=334). These values employ previous data of peak vegetation growth. With RY data sorted by date  $i=1,2,\dots,n$ , adjoining data pairs are analyzed for definition of three basic patterns: decrease (pattern 1), increase (pattern 2) and level (pattern 3) (Figure 5).

For definition of adjoining data pair's acceptance criterion the following index is estimated:

$$dRY = \frac{RY(i) - RY(i-1)}{RY(i-1)} \dots\dots\dots (7)$$

In this way, rules for acceptance of basic patterns are:

- If  $dRY < 0$  and  $abs(dRY) > E \Rightarrow$  Pattern 1
- If  $dRY > 0$  and  $abs(dRY) > E \Rightarrow$  Pattern 2
- Otherwise  $\Rightarrow$  Pattern 3 ..... (8)

Where E is a decision value (default value E = 0.2)

As a final result of this first process for detecting patterns, all adjoining pairs are labeled with a specific pattern.

*Analysis of level patterns in the initial growth stage*

The general initial process (first revision) used for all vegetation growth stages (RY), consists of analyzing adjoining patterns pairs (PP) for determining if both belong to the general pattern previously labeled (three data pairs at a time). Possible adjoining patterns for PP(j-1) and PP(j) are shown in Figure 5.

caso). Para esto, el análisis es realizado de los patrones etiquetados anteriormente (tres pares de datos a la vez). Los posibles patrones en PP(j-1) y PP(j) continuos (3<sup>2</sup>) están mostrados en la Figura 5.

De los patrones de la Figura 5, el Cuadro 1, muestra los valores de RY (y X) que son considerados como pertenecientes al patrón plano inicial de la curva de crecimiento (primera revisión), analizando los datos entre X = 2 y X = Xmax + 1. En el caso de los patrones 1-2 y 2-1, Figura 5, se utiliza como criterio de aceptación:

$$dRYP = \frac{RY(i+1) - RY(i-1)}{RY(i-1)} \dots\dots\dots (9)$$

De los valores aceptados en esta primera revisión, se verifica si el primer dato (primer día juliano de la serie original) está entre las parejas aceptadas. Si no está este dato, entonces se revisa si cumple la condición abs{RY(inicial de la serie aceptada)-RY(1)} < VCI (valor de defecto: VCI = 10). Si es así, este valor es agregado a la lista de parejas aceptadas. Con esto, se termina la primera revisión de posibles parejas de datos para caracterizar la etapa inicial (plana) del crecimiento de la vegetación.

La segunda revisión consiste en determinar qué valores usar de RY para calcular el promedio de

Of all the patterns included in Figure 5, in Table 1 RY (and X) values are shown that are considered as belonging to the initial level pattern of the growth curve (first revision), analyzing data between X=2 and X=Xmax + 1. For patterns 1-2 and 2-1, Figure 5, the following equation is applied as acceptance criterion:

$$dRYP = \frac{RY(i+1) - RY(i-1)}{RY(i-1)} \dots\dots\dots (9)$$

The first datum (first Julian day in the original series) is verified for presence in the accepted pairs of values accepted in this first revision. If not present, then it is revised for compliance with the following condition abs{RY(initial value of the accepted series)-RY(1)} < VCI (default value, VCI=10). If it complies, this value is added to the accepted pairs list. When these steps are completed, the first revision of possible data pairs for characterizing the vegetation initial growth stage (level) is brought to a close.

The second revision consists in determining what RY values are going to be used for estimating their average as an approximation to the value of RY1 (Y1=1/RY1). For this, a revision for confirmation of non presence of temporal values over Xmax+1 is performed, and if positive, they

Cuadro 1. Patrones PP para etapa inicial y la creciente

Table 1. PP for the initial and growing patterns

PP(j-1)	PP(j)	Valores aceptados para la etapa inicial de crecimiento	Valores aceptados para la etapa creciente
3	3	RY(i-1), RY(i), RY(i+1)	Ninguno
1	1	Ninguno	Ninguno
2	2	Ninguno	RY(i-1), RY(i), RY(i+1)
3	1	RY(i-1), RY(i)	Ninguno
3	2	RY(i-1), RY(i)	RY(i), RY(i+1)
1	3	RY(i), RY(i+1)	Ninguno
2	3	RY(i), RY(i+1)	RY(i-1), RY(i) y si dRYP > E, RY(i+1)
1	2	RY(i-1), RY(i+1), si dRYP < E	RY(i), RY(i+1)
2	1	RY(i-1), RY(i+1), si dRYP < E	RY(i-1), RY(i)

estos como una aproximación al valor de RY1 ( $Y1 = 1/RY1$ ). Para esto se revisa que no existan valores temporales mayores que  $X_{max} + 1$  y si es así, estos se rechazan. El criterio para considerar que un valor de RY contribuye al promedio es usar:

$$abs\left\{\frac{PRY - RY(i)}{PRY}\right\} < E1 \dots\dots\dots (10)$$

Donde: PRY representa un promedio calculado en forma progresiva en función del número de datos analizados y E1 es un valor que define el criterio de aceptación (valor de defecto:  $E1 = 0.1$ ). Este proceso sesga el promedio (ecuación 10), a favor de los primeros valores de la serie temporal analizada. El último valor de RY aceptado de la serie, RY<sub>imi</sub>, es guardado para ser utilizado más adelante. Esto termina la segunda revisión de las posibles parejas, para caracterizar la etapa inicial (plana) del crecimiento de la vegetación.

La tercera revisión considera el promedio de RY, PRYI, calculado de los valores aceptados en la segunda revisión y utiliza el criterio:

$$abs\left\{\frac{PRYI - RY(i)}{PRYI}\right\} < E2 \dots\dots\dots (11)$$

Donde: E2 es el valor que define el criterio de aceptación (valor defecto:  $E2 = 0.08$ ). Con esta última revisión se corrige el sesgo introducido en la segunda revisión. Los valores aceptados de RY son usados para calcular el promedio y con esto, estimar  $Y1 \{= 1/promedio(RY)\}$ .

En cualquiera de las revisiones, si no hay datos aceptados, el proceso define  $Y1 = -999$  (dato faltante). Al existir un solo dato, se acepta éste para estimar Y1. La primera (X<sub>ic1</sub>, RY<sub>ic1</sub>) y última (X<sub>icn</sub>, RY<sub>icn</sub>) pareja de datos aceptados es guardada para análisis posteriores.

*Análisis de patrones planos de la etapa final del crecimiento*

La selección de parejas de datos para caracterizar esta etapa final plana del crecimiento de la

are rejected. The criterion for considering that a RY value contributes to the average is by means of:

$$abs\left\{\frac{PRY - RY(i)}{PRY}\right\} < E1 \dots\dots\dots (10)$$

Where PRY represents an average estimated progressively as a function of the number of data analyzed and E1 is a value that sets the acceptance criterion (default value,  $E1=0.1$ ). This process skews the average (equation 10), towards the first values of the temporal series being analyzed. The last accepted value of the series, RY<sub>imi</sub>, is held in reserve for later use. This ends the second revision of possible pairs for characterizing the vegetation initial growth stage (level).

The third revision takes into account the average of RY, PRYI, calculated from values accepted in the second revision and uses the following criterion:

$$abs\left\{\frac{PRYI - RY(i)}{PRYI}\right\} < E2 \dots\dots\dots (11)$$

Where E2 is the value that sets the acceptance criterion (default value,  $E2=0.08$ ). In this last revision the skew introduced in the second review is corrected. RY accepted values are used to calculate the average and then calculate  $Y1\{=1/average(RY)\}$ .

In any revision, if no data are accepted, the process defines  $Y1=-999$  (missing data). When a single data is available, it is accepted for estimating Y1. The first (X<sub>ic1</sub>, RY<sub>ic1</sub>) and last (X<sub>icn</sub>, RY<sub>icn</sub>) pairs of accepted data is reserved for later analyses.

*Analysis of level patterns in the final growth stage*

Selection of data pairs for characterizing the final vegetation level growth stage is similar to the one just described. However, some differences in certain features should be considered: a) values analyzed in this stage, are those going from X<sub>n-1</sub> (X<sub>n</sub> being the last value of the original series) to X<sub>max-1</sub>, in decreasing order; b) it should be verified that the last value of this series is included in the first

vegetación, es similar al caso de la etapa inicial descrita ya. Los rasgos que la diferencian son: a) los valores analizados en esta etapa son los que van desde  $X_{n-1}$  ( $X_n$  es el último valor de la serie original) hasta  $X_{max} - 1$ , en orden decreciente; b) se verifica que el último valor de la serie esté incluido en la primera revisión, usando como valor de aceptación a VCF (valor de defecto:  $VCF = 10$ ), en vez de VCI; c) se guarda  $RY_{imf}$ , último valor (primer valor), antes de la segunda revisión; d) la primera ( $X_{fd1}$ ,  $RY_{fd1}$ ) y última ( $X_{fdn}$ ,  $RY_{fdn}$ ) pareja de los datos aceptados es guardada para análisis posteriores; e) se calcula  $Y_3 \{= 1/\text{promedio}(RY)\}$ , de los valores aceptados para esta etapa.

*Análisis de patrones de la etapa creciente*

Se analizan las parejas de datos entre  $X_{icn}$  y  $X_{max} + 1$  para revisar los pares continuos de patrones, PP, para definir qué valores aceptar en la primera revisión del proceso. Esto es realizado de acuerdo al Cuadro 1. Para el par PP 2-3, se revisa que la ecuación 10 cumpla  $dRYP > E$  para aceptar el valor  $RY(i+1)$  en forma adicional a los inicialmente aceptados.

Posterior a la selección inicial de valores de patrón creciente, se revisa si el último valor del patrón plano inicial ( $X_{icn}$ ,  $RY_{icn}$ ) está en la lista de pares aceptados. Si no es así, se agrega a la lista. Los valores aceptados, en pares contiguos, son revisados para ver si su patrón es creciente.

Adicionalmente, se revisa que:

$$RY(i) \geq DVD \left( \frac{1}{Y1} \right) \dots\dots\dots (12)$$

como criterio de aceptación (que no estén muy debajo del valor del patrón plano inicial), usando la proporción DVD como valor de decisión (valor de defecto:  $DVD = 0.90$ ).

Los valores de  $RY$  aceptados para la etapa creciente son transformados a valores  $Y$  ( $Y = 1/RY = 1/NDVI_{cp}$ ) y analizados usando un proceso iterativo, regresión lineal, de eliminación de valores que no se ajusten al modelo lineal dado en la Figura 5a:

revisión, using VCF (default value,  $VCF=10$ ) as the acceptance threshold, instead of VCI; c)  $RY_{imf}$ , last value (first value) is set aside before the second revision; d) the first ( $X_{fd1}$ ,  $RY_{fd1}$ ) and last ( $X_{fdn}$ ,  $RY_{fdn}$ ) pairs of accepted data is held in reserve for later analyses; e)  $Y_3 \{= 1/\text{average}(RY)\}$  is estimated from accepted values for this stage.

*Analysis of growing stage patterns*

Data pairs between  $X_{icn}$  and  $X_{max} + 1$  are analyzed for reviewing adjoining patterns, PP, for defining which values should be accepted in the first stage of the process. This is performed in accordance with Table 1. For the PP 1-3 pair, the equation 10 should comply with  $dRYP > E$  for accepting the value  $RY(i+1)$  in addition to those accepted initially.

After the initial selection of increasing pattern values, it should be verified that the last value of the initial level pattern ( $X_{icn}$ ,  $RY_{icn}$ ) is included in the list of accepted pairs. Otherwise, it should be added to the list. Accepted values in adjoining pairs should be checked to confirm if it is an increasing pattern.

In addition, it is ensured that

$$RY(i) \geq DVD \left( \frac{1}{Y1} \right) \dots\dots\dots (12)$$

represents an acceptance criterion (should not be very below the value of the initial level pattern), using the DVD proportion as decision value (default value,  $DVD=0.90$ ).

Accepted  $RY$  values for the growing stage are transformed to  $Y$  values ( $Y=1/RY=1/NDVI_{cp}$ ) and analyzed by means of an iterative process, linear regression, for eliminating values that do not fit the linear model shown in Figure 5a:

a) A general value acceptance criterion adjusted through linear regression to a (decreasing) straight line, is used. The acceptance criterion is the correlation coefficient  $R^2 \geq R2U$  (default value,  $R2U=0.8$ ).

a) Se utiliza un criterio general de aceptación de valores que se ajustan a una línea recta (decreciente) por regresión lineal. El criterio de aceptación es que el coeficiente de correlación  $R^2 \geq R2U$  (valor de defecto:  $R2U = 0.8$ ).

b) Cuando las parejas (X, Y) iniciales no cumplen el criterio de aceptación, se realiza un proceso iterativo no considerando una pareja a la vez y calculando el  $R^2$  de este ejercicio. La pareja con  $R^2$  mayor, después de no considerarla, es eliminada y el proceso es repetido hasta que el  $R^2$  general (después de la eliminación)  $\geq R2U$  o queden sólo dos valores. Los parámetros A1 y B1 de la línea recta ajustada, son guardados para representar el patrón creciente (decreciente en Y), de acuerdo a la Ecuación (6).

c) Cuando sólo hay un par de valores, se asigna  $A1 = -999$  y  $B1 = -999$ .

d) Se revisa que  $B1 < 0$  para aceptar a B1.

El proceso definido determina la caracterización de la etapa creciente (en NDVIcp) de la curva de crecimiento de la vegetación.

*Análisis de patrones de la etapa decreciente*

La caracterización del patrón de la etapa decreciente de la vegetación sigue las mismas consideraciones que la etapa creciente, con las siguientes modificaciones:

- Se analiza la serie temporal que va de Xfd1 a Xmax -1, en forma decreciente
- La aceptación de los pares contiguos de patrones está definida en el Cuadro 1, sustituyendo 1 por 2.
- Se revisa si está el primer valor (en tiempo) del patrón plano final, Xfd1, y si no está, lo agrega a la serie aceptada del criterio del Cuadro 1 modificado. Algo similar hace con el último valor (en tiempo) del patrón creciente, Xmpc.
- Se revisa que no haya valores  $X < Xmpc$  y que sean decrecientes

b) When initial pairs (X,Y) do not meet the acceptance criterion, an iterative process not considering one pair at a time is performed, and calculating  $R^2$ . The pair with the highest  $R^2$ , after not being considered, is eliminated and the process is repeated until the general  $R^2 \geq R2U$  (after elimination), or when only two values are left. The parameters A1 and B1 of the adjusted straight line are set aside for representing the increasing pattern (decreasing in Y) in accordance with equation (6).

c) When only one pair of values are present,  $A1 = -999$  and  $B1 = -999$

d) For accepting B1,  $B1 < 0$  is reviewed.

This process determines the characterization of the growing stage (in NDVIcp) of the vegetation growth curve

*Analysis of decreasing stage patterns*

Characterization of the pattern of vegetation decreasing stage follows the same guidelines as the increasing (growing) stage, with the following modifications:

- The temporal series from Xfd1 to Xmax-1 is analyzed decreasingly.
- Acceptance of adjoining pairs in patterns is defined in table 1, substituting 1 for 2.
- Presence of the first value (time) of the final level pattern, Xfd1, should be checked. If not present, it should be added to the accepted series of the criterion in Table 1 modified. Something similar should be performed with the last value (time) of the increasing pattern, Xmpc.
- The absence of values  $X < Xmpc$  should be checked and also that values should be decreasing.
- If values meet the following criterion should be checked. For acceptance (default value,  $DVD = 1.10$ ):

$$RY(i) \geq DVC \left( \frac{1}{Y3} \right) \dots\dots\dots (13)$$



- Se revisa si los valores cumplen el criterio:

$$RY(i) \geq DVC \left( \frac{1}{Y3} \right) \dots\dots\dots (13)$$

para aceptarlos (valor defecto: DVC = 1.10).

- Los valores RY aceptados, son convertidos a Y, y analizados, usando una regresión lineal iterativa de los pares (X, Y), similar a la usada en la etapa creciente.
- Los parámetros A2 y B2 de la línea recta ajustada por regresión lineal son guardados y caracterizan el patrón decreciente (en NDVIcp) de la vegetación.

*Análisis de patrones de la etapa de meseta del crecimiento*

Las parejas entre Xicn y Xfd1 son analizadas para caracterizar el patrón plano de la meseta inicial, siguiendo un proceso similar al discutido para la etapa inicial y final del crecimiento de la vegetación. El promedio de los valores aceptados es usado para calcular Y2 {= 1/promedio (RY)}, si éste existe.

El valor estimado de la meseta, en caso de existir, es revisado en comparación de la intersección de las dos líneas rectas etapa decreciente y creciente en Y (Figura 5a).

Cuando los parámetros de las líneas rectas (A1, B1) y (A2, B2) existen, la intersección es calculada de:

$$X2int = \frac{A2 - A1}{B1 - B2} \dots\dots\dots (14)$$

$$Y2int = A1 + B1(X2int)$$

Si Y2 y Y2int existen (y son mayores que cero), entonces se revisa Y2 < Y2int y si esto sucede, Y2 = Y2int. De otra manera, Y2 es usada.

*Aplicación del algoritmo de detección de patrones*

El proceso de caracterización de los patrones de la curva de crecimiento de la vegetación, en base anual píxel por píxel, se aplicó a todos los píxeles

- Accepted RY values are converted to Y, and analyzed through an iterative linear regression of the (X, Y) pairs, similar to that used in the growing stage.
- A2 and B2 parameters of the straight line adjusted through linear regression are set aside and characterize the decreasing (in NDVIcp) vegetation pattern.

*Analysis of patterns of the plateau growth stage*

Pairs between Xicn and Xfd1 are analyzed for characterization of the level pattern of the initial plateau, following a similar process to those described for the initial and final vegetation growth stages. The average of accepted values is used for calculating Y2 {= 1/average(RY)}, if present.

The estimated value for the plateau, if present, should be checked in comparison of the intersection of the two straight lines decreasing and growing stages in Y (Figure 5a).

When parameters of the straight lines (A1, B1) and (A2, B2) are present, the intersection is estimated from:

$$X2int = \frac{A2 - A1}{B1 - B2} \dots\dots\dots (14)$$

$$Y2int = A1 + B1(X2int)$$

If Y2 and Y2int are present (and higher than zero), then Y2 < Y2int should be checked, and if true, Y2 = Y2int. Otherwise, Y2 is used.

*Application of the algorithm for detecting patterns*

The process for characterization of patterns of the vegetation growth curve, in a pixel by pixel annual base, was used on every pixel in all vegetation types found in grasslands and shrublands throughout the country, and in each one, eight values (Y1, Y2, Y2int, Y3, A1, A2, B1, A2, B2) that define parameters of the annual growth curve were estimated. The X1, X2i, X2f and X3 parameters are obtained from the evaluated parameters.

en los tipos de vegetación de pastizales y matorrales del país y, en cada uno, se obtienen ocho valores que definen los parámetros de la curva de crecimiento anual: Y1, Y2, Y2int, Y3, A1, B1, A2, B2. Los parámetros X1, X2i, X2f y X3 se obtienen de los parámetros evaluados.

En la Figura 6a se muestra un caso extremo, típico de valores temporales de 1/NDVIcp, usando varios satélites del sensor AVHRR. Los valores altos de 1/NDVIcp corresponden a situaciones con efectos atmosféricos residuales (píxeles contaminados con nubes). Los datos de la Figura 6a fueron analizados con el algoritmo desarrollado y la Figura 6b muestra los resultados obtenidos. Se observa en la Figura 6b que los valores aceptados en cada etapa, caracterizan en forma adecuada (para los valores de defecto usados), la curva de crecimiento de la vegetación.

La Figura 7a muestra los valores de 1/NDVIcp para un píxel, caso extremo típico, del municipio

In Figure 6a an extreme case is shown, typical of the temporal values of 1/NDVIcp, using several satellites of the AVHRR sensor. The high 1/NDVIcp values correspond to situations with residual atmospheric effects (pixel polluted by clouds). Data of Figure 6a were analyzed with the developed algorithm and Figure 6b shows the results obtained. In Figure 6b it can be observed that the accepted values in each stage, characterize adequately the vegetation growth curve (for the applied default values).

Figure 7a shows the 1/NDVIcp values for one pixel, a typical extreme case, of Hidalgo municipality in Durango State. Applying the developed algorithm to Figure 7a, results shown in Figure 7b are achieved. The adjusted model in this figure shows a case where only accepted data for characterizing the decreasing pattern of the vegetation growth curve are present. Besides, this figure shows that the initial growth pattern is more

Figura 6. Ajuste completo del modelo paramétrico: (a) patrón temporal de 1/NDVIcp para un píxel; (b) resultados de la aplicación del algoritmo de detección de patrones

Figure 6. Complete adjustment of the parametric model: (a) temporal 1/NDVIcp pattern for one pixel; (b) results due to application of the pattern detection algorithm

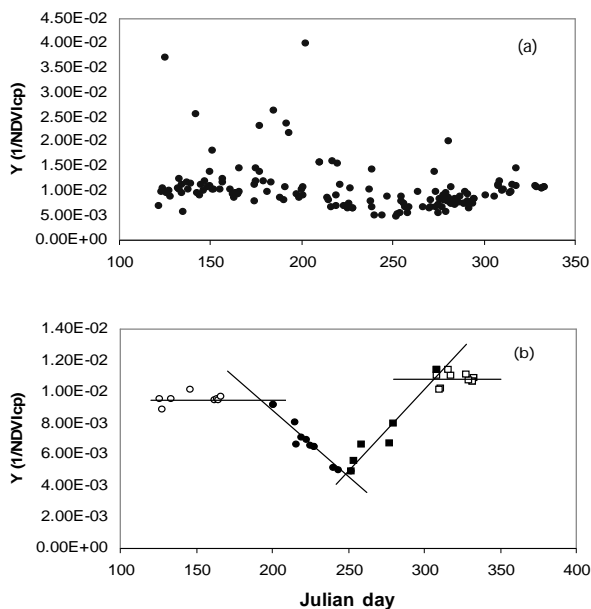
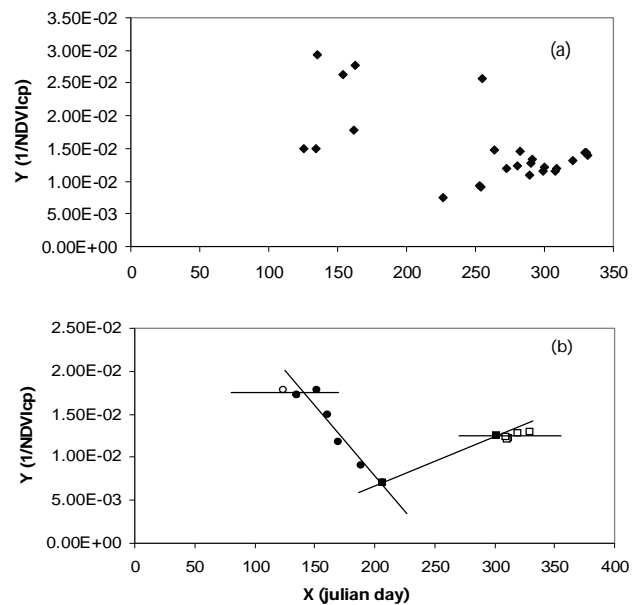


Figura 7. Ajuste parcial del modelo paramétrico: (a) patrón temporal de 1/NDVIcp para el píxel 288; (b) resultados de la aplicación del algoritmo de detección de patrones.

Figure 7. Partial adjustment to the parametric model: (a) temporal 1/NDVIcp pattern for pixel 288; (b) results due to application of the pattern detection algorithm



de Hidalgo, Durango. Aplicando el algoritmo desarrollado a la Figura 7a, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 7b. El modelo ajustado en la figura mencionada muestra el caso donde sólo hay dos datos aceptados para caracterizar el patrón decreciente de la curva de crecimiento de la vegetación. Asimismo, esta figura muestra que el patrón inicial del crecimiento resulta más difícil de caracterizar por falta de datos (se eliminan muchos de ellos en el algoritmo de filtrado de patrones).

La utilización de la tecnología de sensores remotos para la estimación de las curvas de crecimiento de la vegetación usando índices espectrales, permite tener una aproximación al estudio de los procesos de cambio, climáticos o de manejo, a una escala de píxeles individuales de imágenes satelitales.

La obtención de curvas paramétricas espectrales del crecimiento de la vegetación en términos de archivos históricos, permite contar con información para reconstruir el pasado del manejo del agostadero (pastizales y matorrales) del país, al menos desde 1986 a la fecha (sensor AVHRR en una malla nacional con celdas de 100 ha) o del 2000 a la fecha (sensor MODIS, con celdas de 6.25 ha). El uso de estas series de tiempo de los patrones anuales del crecimiento del agostadero, es analizado en otros trabajos de los autores, para estudiar los efectos del cambio climático y las prácticas de manejo asociadas a las actividades ganaderas en el país.

## LITERATURA CITADA

- Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* 1979;8(2):127-150.
- Verstraete MM, Pinty B. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 1996;34(5):1254-1265.
- Gilbert MA, González J, García FJ, Meliá J. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens Environ* 2002;82(2-3):303-310.
- Paz F, Palacios E, Bolaños M, Palacios LA, Martínez M, Mejía E, Huete AR. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 2007;41(5):539-554.
- Huete AR. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sens Environ* 1988;25(3):295-309.
- Goudriaan J, van Laar HM. Modelling potential crop growth processes. textbook with exercises. Current issues in production ecology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1994.
- Stockle CO, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur J Agron* 2003;18(3-4):289-307.
- Huete AR, Hua G, Qi J, Chehbouni A. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. *Remote Sens Environ* 1992;41(2-3):143-154.
- Chebouni A, Kerr YH, Qi J, Huete AR, Sorooshian S. Toward the development of a multidirectional vegetation index. *Water Resour Res* 1994;30(5):1281-1286.
- Qi J, Huete AR, Cabot F, Chehbouni, A. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semi-arid watershed. *Water Resour Res* 1994;30(5):1271-1279.
- Bolaños M, Paz F, Palacios E, Mejía E, Huete A. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 2007;41(5):527-537.
- Jacquemoud S, Bacour C, Poilve H, Frangi JP. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopy reflectance: direct and inverse mode. *Remote Sens Environ* 2000;74(3):471-481.
- Holechek JL, Pieper RD, Herbel CH. Range management, principles and practices. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall; 1989.
- Kidwell KB editor. NOAA polar orbiter data users guide (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 and NOAA-14). NOAA-NESDIS-NCDC. Suitland, MD. 1998.

*End of english version*

15. Goodrum G, Kidwell KB, Winston W, editors. NOAA KLM user's guide. NOAA-NESDIS-NCDC. Suitland, MD. 2001.
16. Palacios LA, Pascual F, Paz F. Modelo de navegación satelital de imágenes de satélite multiespectrales para el monitoreo de zonas de riego. Congreso Nacional de Irrigación (CD-ROM). Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación. Acapulco, Guerrero. 2005:9.
17. Stowe LL, Davis PA, McClain EP. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer. *J Atmos Oceanic Technol* 1999;16(6):656-681
18. Paz F, Bolaños M, Palacios E, Palacios LA, Martínez M, Huete AR. Optimización del índice espectral de la vegetación NDVIcp. *Agrociencia* 2008;42(8):925-937.