

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA ANIMAL EN AGOSTADEROS USANDO UN ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE PENDIENTES NORMALIZADAS

ANIMAL CARRYING CAPACITY ESTIMATION IN RANGELANDS USING A NORMALIZED SLOPES VEGETATION INDEX

Adán Villa-Herrera¹, Fernando Paz-Pellat¹, María J. Pérez-Hernández¹, Camerino Rojas-Montes², Misael Rodríguez Arvizu², Sandra Ortiz-Acosta¹, Marcos Casiano-Domínguez¹, Heriberto Díaz-Solís²

¹GRENASER, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5 Carretera México- Texcoco, Montecillo. 56230. México. (ferpazpel@gmail.com). ²Departamento de Recursos Naturales, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, CP 25315, México.

RESUMEN

La estimación de la capacidad de carga animal es un requisito para el manejo ganadero sustentable, por lo que es necesario el desarrollo de marcos teóricos y experimentales innovadores que permitan realizar esta tarea en términos operacionales y a bajo costo. El uso de sensores remotos ofrece una alternativa que debe explorarse a profundidad para conocer sus limitaciones. Bajo esta perspectiva, en este trabajo se analiza la situación de la utilización de información de campo de reflectancias en una o dos visitas al mismo sitio, por lo que se expandió el marco teórico asociado a los patrones espectrales de las líneas de igual vegetación en el espacio espectral de las bandas del rojo e infrarrojo cercano; esto permitió desarrollar un índice de vegetación de pendientes normalizadas con una relación lineal con el índice de área foliar y la biomasa aérea verde de la vegetación. Esta relación fue validada usando datos de diferentes experimentos, obteniéndose resultados adecuados. La metodología desarrollada bajo una perspectiva de la estimación de la capacidad de carga animal en los pastizales y matorrales del estado de Coahuila fue evaluada usando la información generada en la campaña de muestreo del 2009-2010, que se realizó en 24 sitios de 1.5 km × 1.5 km. Los resultados mostraron, a pesar de algunos problemas experimentales, que es posible realizar estimaciones confiables de la capacidad de carga usando sensores remotos.

Palabras clave: índices de vegetación, sensores remotos, capacidad de carga animal,

ABSTRACT

Animal carrying capacity estimation is a prerequisite for sustainable livestock management, so that the development of theoretical and innovator experimental frameworks to perform this task in operational terms and at low cost is needed. The use of remote sensing offers an alternative which must be deeply explored to know its limitations. Under this perspective, in this study the use of field information of reflectances is analyzed in one or two visits to the same site by which the theoretical framework associated with the spectral patterns of vegetation isolines in spectral space of the bands of red and near infrared was expanded; this allowed developing a normalized slopes vegetation index with a linear relationship with the leaf area index and green aboveground biomass of vegetation. This relationship was validated using data from different experiments, obtaining suitable results. The methodology developed under a perspective of animal carrying capacity estimation in grasslands and scrublands of the state of Coahuila was evaluated using information generated in the sampling campaign of 2009-2010, which was conducted at 24 sites of 1.5 × 1.5 km. The results showed that, despite some experimental problems, it is possible to make reliable estimations of carrying capacity using remote sensing.

Key words: vegetation indices, remote sensing, animal carrying capacity

INTRODUCTION

Animal carrying capacity estimation on a given type of vegetation is a necessary element for sustainable livestock management (Holencheck *et al.*, 1989). In Mexico, the only reference of this type of estimates at national

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2014. Aprobado: julio, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 599-614. 2014.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la capacidad de carga animal en un tipo de vegetación dado es un elemento necesario para el manejo ganadero sustentable (Holencheck *et al.*, 1989). En México la única referencia de este tipo de estimaciones a escala nacional es la desarrollada por la Comisión Técnica Consultiva para la determinación de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA, 1967), cuyos estudios en su gran mayoría datan de la época de los 60 y 70. En esta perspectiva, la falta de información sobre este parámetro crítico de manejo ganadero limita los esfuerzos asociados al establecimiento de programas de apoyo ganadero del gobierno basados en resultados (ajuste de capacidad de carga animal), tal como está planteado en el PROGAN (SAGARPA, 2007 y 2008). Independientemente del uso de metodologías más actuales a las utilizadas por la COTECOCA (1967) en relación a la dinámica sucesional de la vegetación (NRCS, 1997), los tiempos y costos asociados a la caracterización de la biomasa forrajera en los ecosistemas de México impone serias restricciones para su viabilidad operacional, particularmente si se considera la capacidad de carga como algo dinámico que varía en función del clima, suelo, geoforma, etc. (Holencheck *et al.*, 1989). Una posibilidad interesante, particularmente cuando está asociada con información satelital, es el uso de modelos biofísicos simples del crecimiento de la vegetación, que puedan ser parametrizados con datos climáticos existentes normalmente (Díaz-Solis *et al.*, 2003).

La tecnología de los sensores remotos puede ser utilizada para el desarrollo de relaciones de datos espectrales con la biomasa aérea a escalas espaciales y temporales útiles para el manejo de los hatos ganaderos. El estado de la vegetación puede ser caracterizado por el contraste alto entre la banda espectral del rojo (*R*) y el infrarrojo cercano (*IRC*), que la distingue de otros objetos terrestres (Tucker, 1979). Estas dos bandas están disponibles en la mayoría de los satélites públicos y comerciales, por lo que han servido de base en el desarrollo de índices espectrales de la vegetación o IV. Así, se ha desarrollado un gran número de IV (Verstraete y Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2001; Paz *et al.*, 2007) para su uso en la generación de relaciones con variables biofísicas (biomasa aérea o *Bm*, índice de área foliar o *IAF* y

level is that developed by the Technical Advisory Committee for Determining Rangeland Coefficients (COTECOCA, 1967), whose studies mostly date back to the 60s and 70s. From this perspective, lack of information about this critical parameter of livestock management limits the efforts associated to the establishment of farmer support programs from the government based on results (adjustment of animal carrying capacity), as it was proposed in the PROGAN (SAGARPA, 2007 and 2008). Regardless of the use of more current methodologies than those used by the COTECOCA (1967) in relation to successional vegetation dynamics (NRCS, 1997), times and costs associated with the characterization of forage biomass in the ecosystems of Mexico impose serious restrictions on its operational viability, particularly when one considers the carrying capacity as something dynamic that varies depending on factors such as climate, soil and geomorphology (Holencheck *et al.* 1989). An interesting possibility, particularly when associated with satellite data, is the use of simple biophysical models of vegetation growth that can be normally parameterized with existing climate data (Díaz-Solis *et al.*, 2003).

Remote sensing technology can be used for the development of relationships of spectral data with aboveground biomass at spatial and temporal scales useful for management of cattle herds. The state of vegetation can be characterized by the high contrast between the spectral red (*R*) and near infrared (*NIR*) bands, which distinguishes it from other terrestrial objects (Tucker, 1979). These two bands are available in most public and commercial satellites, which have been the basis in the development of spectral vegetation indices or VI. Thus, a large number of VI has been developed (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.* 2001; Paz *et al.*, 2007) for use in the generation of relationships with biophysical variables (aboveground biomass or *Bm*, leaf area index or *LAI* and canopy cover or *fv*, mainly). Among these, *NDVI* (Rouse *et al.*, 1974) or normalized differences vegetation index, $NDVI = (NIR - R) / (IRC + R)$ is one of the most used, although its operational application in terms of perception of producers has been questioned (Rowley *et al.*, 2007). Paz *et al.* (2007) have reviewed the mathematical structure of the VI, included *NDVI* and have proposed the *NDVI_{cp}*, for estimating *LAI* and *Bm* since this index has a linear relationship with these parameters and

cobertura aérea o *fv*, principalmente). Entre estos, el *NDVI* (Rouse *et al.*, 1974) o índice de vegetación de diferencias normalizadas, $NDVI = (IRC - R) / (IRC + R)$, es uno de los más utilizados; aunque su aplicación operacional en términos de percepción de los productores ha sido cuestionada (Rowley *et al.*, 2007). Paz *et al.* (2007) han revisado la estructura matemática de los *IV*, incluido el *NDVI* y han propuesto el *NDVI_{cp}* para realizar estimaciones del *IAF* y la *Bm*, dado que este índice tiene una relación lineal con estos parámetros y tiene bases teóricas y experimentales que soportan su diseño. Este tipo de *IV* está basado en curvas iso-*IAF*, en el espacio espectral del *R-IRC*, por lo que puede resultar útil en los muestreos de una o dos ocasiones en un determinado tipo de vegetación. Aunque el *NDVI_{cp}* fue propuesto para hacer que el *NDVI* normal tuviera bases teóricas y experimentales, tiene sus limitaciones. Así, el objetivo en este trabajo es revisar las hipótesis del *NDVI_{cp}* como punto de partida para el desarrollo de un nuevo índice (*IVPN* o índice de vegetación de pendientes normalizadas), que mantiene los mismos requerimientos de patrones lineales con el *IAF* y la *Bm* de la vegetación, por lo que esta hipótesis es analizada usando datos de experimentos internacionales y en forma extensiva en pastizales y matorrales del estado de Coahuila, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Índices espectrales de la vegetación

Con la intención de introducir las bases del diseño de *IV*, es importante entender la dinámica del crecimiento de la vegetación asociada al espacio espectral del *R-IRC* (reflectancias). En la Figura 1a se muestran simulaciones radiativas (mismos patrones que los experimentos) de un cultivo, donde el crecimiento de la vegetación está definido por las líneas iso-*IAF* (misma cantidad de vegetación). El cultivo simulado está sobre cuatro suelos con propiedades ópticas diferentes (cambios en la humedad, rugosidad, textura, materia orgánica u óxido de hierro). Paz *et al.* (2005) detallan estas simulaciones.

Las líneas iso-*IAF* ($IRC = a_0 + b_0R$; a_0 y b_0 dependen del *IAF*), Figura 1a, van desde la línea del suelo ($IRC = a_s + b_sR$; a_s y b_s son constantes) con $IAF = 0$ hasta el punto de saturación (las reflectancias no cambian de valor) de las bandas (R_∞ , IRC_∞), donde el medio es ópticamente denso o de reflectancias en el infinito (Ross, 1981). Para un suelo fijo (propiedades ópticas), el crecimiento (*IAF*) sigue líneas iso-suelo (Figura 1a). En relación

has theoretical and experimental basis that support its design. This type of *VI* is based on iso-*LAI* curves, in the spectral space of *R-NIR*, which can be useful in samplings of one or two times in a given vegetation type. Although *NDVI_{cp}* was proposed in order that normal *NDVI* had theoretical and experimental bases, it has limitations. Thus, the objective of this study is to review the *NDVI_{cp}* hypotheses as a starting point for the development of a new index (*IVPN* or normalized slopes vegetation index) which maintains the same requirements of linear patterns with *LAI* and *Bm* of vegetation, by which this hypothesis is analyzed using data from international experiments and extensively in grassland and scrubland vegetation of the state of Coahuila, Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Spectral vegetation indices

With the intention to introduce the basics of the *VI* design, it is important to understand the dynamics of growth of vegetation associated with the spectral space of *R-NIR* (reflectance). Figure 1A shows radiative simulations (same patterns than those of experiments) of a crop, where vegetation growth is defined by the iso-*LAI* lines (same amount of vegetation). The simulated crop is on four soils with different optical properties (changes in moisture, roughness, texture, organic matter or iron oxide). Paz *et al.* (2005) detail these simulations.

The lines iso-*LAI* ($NIR = a_0 + b_0R$; a_0 y b_0 depend on *LAI*), Figure 1A, ranging from soil line ($IRC = a_s + b_sR$; a_s y b_s are constants) with $LAI = 0$ to the saturation point (reflectances do not change of value) of the bands (R_∞ , IRC_∞), where the medium is optically dense or of reflectance in the infinity (Ross, 1981). For a fixed soil (optical properties), growth (*LAI*) follows iso-soil lines (Figure 1A). Regarding the pattern between parameters a_0 and b_0 of iso-*LAI* lines there is a first exponential type phase and then a change to one linear (with change in slope), and a transition between them (Figure 1B).

To be able to perform estimations of *LAI* and *Bm*, it is necessary to know to which iso-*LAI* line the point (*R*, *IRC*) belongs, problem that implies to know the soil reflectance. Since the amount of vegetation in a pixel is independent of the optical properties of the soil or of its changes, the design of the vegetation indices has been based on minimization of the soil effect (Huete, 1988). To do this it is necessary to know or approximate the relationship between a_0 and b_0 , Figure 1B. In this perspective, Paz *et al.* (2007) developed the index *NDVI_{cp}*:

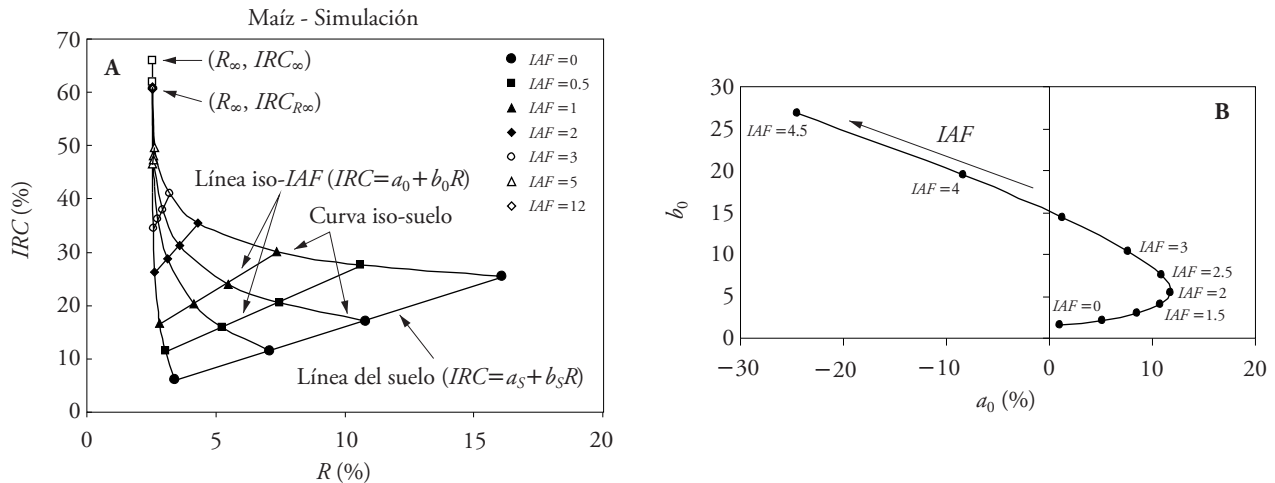


Figura 1. Simulaciones radiativas del crecimiento (IAF) de un cultivo. (A) Patrones espectrales asociados al espacio del R-IRC y, (B) patrones asociados al espacio a_0 - b_0 de las líneas iso-LAI.

Figure 1. Growth radiative simulations (LAI) of a crop. (A) Spectral patterns associated with the space of R-NIR and (B) patterns associated with the space a_0 - b_0 of the iso-LAI lines.

al patrón entre los parámetros a_0 y b_0 de las líneas iso-LAI hay una primera fase tipo exponencial y después un cambio a una lineal (con cambio de pendiente), con una transición entre ellas (Figura 1b).

Para poder realizar estimaciones del IAF o la Bm, es necesario saber a qué línea iso-LAI el punto (R, IRC) pertenece, problema que implica conocer la reflectancia del suelo. Dado que la cantidad de vegetación en un pixel es independiente de las propiedades ópticas del suelo o de sus cambios, el diseño de los índices de vegetación se ha basado en la minimización del efecto del suelo (Huete, 1988). Para hacer esto es necesario conocer o, aproximar, la relación entre a_0 y b_0 , Figura 1b. En esta perspectiva, Paz *et al.* (2007) desarrollaron el índice $NDVI_{cp}$:

$$NDVI_{cp} = \frac{(IRC - a_0) - R}{(IRC - a_0) + R} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \quad (1)$$

donde b_0 (pendiente de las curvas iso-LAI) se aproxima de la relación:

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (2)$$

con c y d como constantes empíricas más o menos generales ($c=1.0$ y $d=-0.024$). La relación para las simulaciones radiativas y experimentos de algodón de Huete *et al.* (1985) y de maíz de Bausch (1993), discutidos ampliamente en Paz *et al.* (2007), se muestra en la Figura 2. En términos operacionales, el valor de b_0 se estima de Paz *et al.* (2007):

$$NDVI_{cp} = \frac{(NIR - a_0) - R}{(NIR - a_0) + R} = \frac{b_0 - 1}{b_0 + 1} \quad (1)$$

where b_0 (slope of the iso-LAI curves) approximates from the relationship:

$$\frac{1}{b_0} = c + da_0 \quad (2)$$

with c and d as empirical constants more or less general ($c=1.0$ and $d=-0.024$). The relationship for the radiative simulations and experiments with cotton of Huete *et al.* (1985) and with maize of Bausch (1993), widely discussed in Paz *et al.* (2007), is shown in Figure 2. In operational terms, the value of b_0 is estimated of Paz *et al.* (2007):

$$b_0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3)$$

$$A = R$$

$$B = -\left(\frac{c}{d} + IRC\right)$$

$$C = \frac{1}{d}$$

For use on grasslands and scrublands, $NDVI_{cp}$ reasonably meets its function and generate reliable estimates up to about a LAI of 3.0 (Paz *et al.*, 2007). $NDVI_{cp}$ has a linear relationship with LAI (Paz *et al.*, 2007) whereby assuming a linear relationship between LAI and the aboveground biomass or Bm (Goudriaan and van Laar, 1994), reliable estimates can be made of this latter

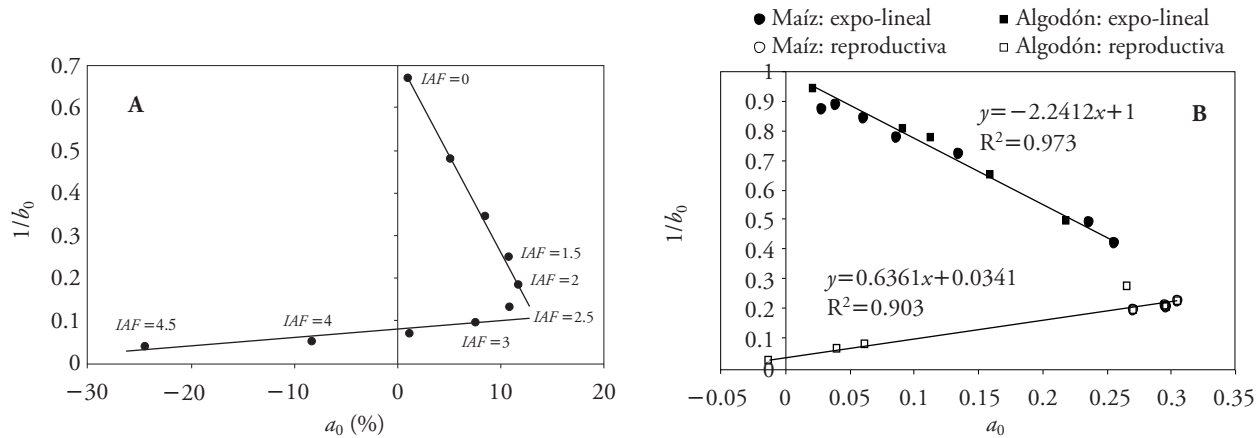


Figura 2. Patrones entre a_0 y $1/b_0$ de las líneas iso-LAI. (A) Simulaciones radiativas de la Figura 1B y, (B) datos de los experimentos con maíz y algodón.

Figure 2. Patterns between a_0 and $1/b_0$ of the iso-LAI lines. (A) Radiative simulations of Figure 1B and, (B) data from maize and cotton experiments.

$$b_0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = R$$

$$B = -\left(\frac{c}{d} + IRC\right)$$

$$C = \frac{1}{d}$$
(3)

Para su uso en pastizales y matorrales, el $NDVI_{cp}$ cumple razonablemente su función y genera estimaciones confiables hasta alrededor de un IAF de 3.0 (Paz *et al.*, 2007). El $NDVI_{cp}$ tiene una relación lineal con el IAF (Paz *et al.*, 2007), por lo que suponiendo una relación lineal entre el IAF y la biomasa aérea o Bm (Goudriaan y van Laar, 1994) se pueden hacer estimaciones confiables de esta última variable. Cuando la vegetación pasa cierto nivel de estrés, la relación entre el IAF y la Bm se desacopla (las plantas incrementan sus reservas de fotosintatos en la parte subterránea), relajando la relación entre biomasa aérea y producción foliar (Stockle *et al.*, 2003). La mayoría de los IV publicados en la literatura usan una relación lineal entre a_0 y b_0 para la fase exponencial y la transición exponencial a lineal (Figura 1B). El $NDVI_{cp}$ fue diseñado para caracterizar el patrón no lineal de esta región. Ninguno de los IV publicados aproxima en forma completa el patrón exponencial-transición-lineal (a excepción del IV_CIMAS de Romero *et al.*, 2009) y sólo las dos primeras fases.

La curva de crecimiento de la biomasa aérea viva (verde) en matorrales y pastizales (crecimiento unimodal) antes del crecimiento anual asociado al periodo de lluvias presentó un meseta (Figura 3, región A) y después un crecimiento caracterizado por un patrón expo-lineal en la etapa vegetativa hasta llegar a una

variable. When vegetation goes through some critical level of stress, the relationship between LAI and Bm decouples (plants increase their photosynthate reserves in their underground organs) relaxing the relationship between aboveground biomass and leaf production (Stockle *et al.*, 2003). Most of the VI published in the literature use a linear relationship between a_0 and b_0 for the exponential phase and the exponential to linear transition (Figure 1B). $NDVI_{cp}$ was designed to characterize the non-linear pattern of this region. None of the VI published approaches in full form the exponential-transition-linear pattern (except VI_CIMAS of Romero *et al.*, 2009) and only the first two phases.

The growth curve of live aboveground biomass (green) in scrublands and grasslands (unimodal growth) before the annual growth associated with the rainy season presented a plateau (Figure 3, region A) and then a growth characterized by an exponential pattern in the vegetative stage until reaching a plateau of equal green Bm or LAI (region B), to subsequently enter the phase of senescence characterized by an exponential pattern terminating in a plateau associated to dormancy (region C).

$NDVI_{cp}$, relationship (1), is a VI based only on slopes of the iso- IAF lines that implicitly assumes (hypothesis associated with the original $NDVI$) a soil line with $a_s=0$ and $b_s=1$ ($NDVI_{cp}=0$). For soil lines ($LAI=0$) with $b_s<1$, $NDVI_{cp}$ is negative. Apart from this problem of assuming the slope and a_s of the relationship (2), of the soil line, the relationship between $NDVI_{cp}$ and LAI is of empirical type.

Relationships between LAI and parameters of iso- LAI lines for radiative simulations of Figure 1 are shown in Figure 4. In analytical terms, approximations of interactions of first order (photons entering the soil-vegetation medium collide only

meseta de igual Bm verde o IAF (región B), para posteriormente entrar en la etapa de senescencia caracterizada por un patrón exponencial que termina en una meseta asociada a la latencia (región C).

El $NDVI_{cp}$, relación (1), es un IV basado solo en las pendientes de las líneas iso- IAF que supone implícitamente (hipótesis asociada al $NDVI$ original) una línea del suelo con $a_s=0$ y $b_s=1$ ($NDVI_{cp}=0$). Para líneas del suelo ($IAF=0$) con $b_s<1$, el $NDVI_{cp}$ es negativo. Aparte de este problema de suponer la pendiente y a_s de la relación (2), de la línea del suelo, la relación entre el $NDVI_{cp}$ y el IAF es del tipo empírico.

Las relaciones entre el IAF y los parámetros de las líneas iso- IAF para las simulaciones radiativas de la Figura 1 están mostradas en la Figura 4. En términos analíticos, aproximaciones de interacciones de primer orden (los fotones que entran al medio suelo-vegetación solo chocan una vez con él) y medios turbios (radiativamente homogéneos e infinitesimales), se puede establecer (Huete, 1987; Yoshiaka *et al.*, 2000):

$$\begin{aligned} a_0 &= IRCv + a_s T_{IRC}^2 - Rvb_0 \\ b_0 &= b_s \left(\frac{T_{IRC}^2}{T_R^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

donde v se refiere a un medio compuesto solo por vegetación (follaje), donde el suelo es negro (absorbe todos los fotones que chocan con él) y T es la transmitancia. Las relaciones de las ecuaciones (4) (Figura 4) son aplicables al caso de medios radiativos tridimensionales (Gao *et al.*, 2000), pero los parámetros deben interpretarse en términos de medios radiativos equivalentes.

Un patrón menos complejo de a_0 con relación al IAF (Figura 4 y de las relaciones (4)) puede analizarse con la ley de Beer-Lambert, $T=\exp(-K IAF)$, donde K es un coeficiente de extinción, para establecer la relación entre b_0 y IAF :

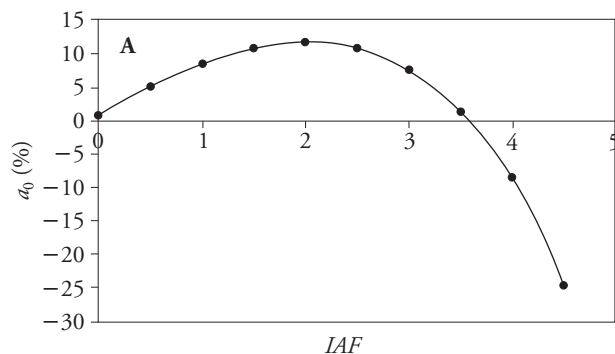


Figura 4. Relación entre el IAF y los parámetros a_0 y b_0 de las líneas iso- IAF .
Figure 4. Relationship between LAI and parameters a_0 and b_0 of the lines iso- LAI .

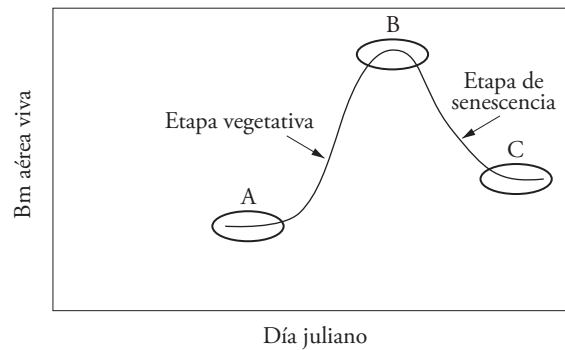


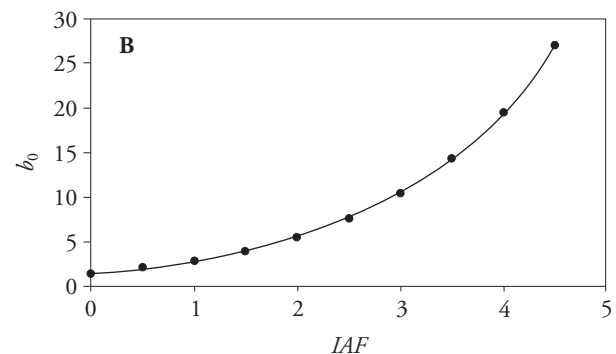
Figura 3. Patrón del crecimiento de la biomasa aérea viva en matorrales y pastizales con crecimiento unimodal.
Figure 3. Growth pattern of aboveground living biomass in scrublands and grasslands with unimodal growth.

once with it) and turbid media (radiatively homogeneous and infinitesimal), can be established (Huete, 1987; Yoshiaka *et al.*, 2000):

$$\begin{aligned} a_0 &= NIRv + a_s T_{NIR}^2 - Rvb_0 \\ b_0 &= b_s \left(\frac{T_{NIR}^2}{T_R^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

where v refers to a medium only composed by vegetation (foliage), where soil is black (absorbs all photons that collide with it) and T is transmittance. The relationships of equations (4) (Figure 4) are applicable to the case of three-dimensional radiative media (Gao *et al.*, 2000), but the parameters must be interpreted in terms of radiative equivalent media.

A less complex pattern of a_0 in relation to LAI , (Figure 4 and of relationships (4)) can be analyzed with the Beer-



$$\frac{b_0}{b_S} = \left(\frac{T_{IRC}^2}{T_R^2} \right) = \frac{\exp(-2K_{IRC}LAF)}{\exp(-2K_RLAF)} = \exp[2(K_R - K_{IRC})LAF] \quad (5)$$

De evidencia experimental restringida (Rodskjer, 1972; Hue, 1987) se puede usar $K_{IRC}=0.5 K_R$, por lo que la relación (5) queda como:

$$\begin{aligned} \frac{b_0}{b_S} &\approx \exp[K_R LAF] \\ \frac{b_0}{b_S} &\geq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

La ventaja de la relación (6) es que ésta puede ser calibrada fácilmente en campo para estimar el valor de K_R con un ceptómetro o cámara de ojo de pescado (Breda, 2003; Weiss *et al.*, 2004) y b_S estimada con un radiómetro espectral. Así, de la relación (6) se puede proponer un índice de vegetación de pendientes normalizadas (IVPN) como:

$$\begin{aligned} IVPN &= \ln\left(\frac{b_0}{b_S}\right) \\ LAF &= \left(\frac{1}{K_R}\right) IVPN \end{aligned} \quad (7)$$

que bajo la hipótesis de $Bm=p LAF$, donde p es una constante empírica, entonces se obtiene:

$$Bm = \left(\frac{p}{K_R}\right) IVPN \quad (8)$$

Es importante enfatizar que LAF y Bm se refieren solo a la componente viva (verde) de la vegetación y no a la mezcla de material muerto y vivo o solo muerto.

Los ángulos de visión e iluminación (geometría sol-sensor) en las mediciones de reflectancias modifican los valores de las pendientes de las líneas iso- LAF , por lo que es necesario estandarizarlos a una geometría fija, para poder así comparar patrones temporales en un tipo de vegetación. El modelo desarrollado por Bolaños y Paz (2010) fue usado para este fin y está definido como:

$$\begin{aligned} \chi &= (90 - \theta_v) + \theta_s \\ \chi &= 90 + gRn \end{aligned} \quad (9)$$

donde θ es un ángulo cenital (sin signo), v se refiere a visión y s a solar; Rn representa una reflectancia, R o IRC , normalizada

Lambert law, $T=\exp(-K LAF)$, where K is an extinction coefficient, to establish the relationship between b_0 and the LAI :

$$\frac{b_0}{b_S} = \left(\frac{T_{NIR}^2}{T_R^2} \right) = \frac{\exp(-2K_{NIR}LAI)}{\exp(-2K_RLAI)} = \exp[2(K_R - K_{NIR})LAI] \quad (5)$$

Of restricted experimental evidence (Rodskjer, 1972; Hue, 1987) $K_{NIR}=0.5 K_R$ can be used, so that the relationship (5) remains as:

$$\begin{aligned} \frac{b_0}{b_S} &\approx \exp[K_R LAI] \\ \frac{b_0}{b_S} &\geq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

The advantage of the relationship (6) is that it can be easily calibrated in field to estimate the value of K_R with a ceptometer or fisheye camera (Breda, 2003, Weiss *et al.*, 2004) and b_S estimated with a spectral radiometer. Thus, from the relationship (6) a normalized slopes vegetation index (IVPN) can be proposed as:

$$\begin{aligned} IVPN &= \ln\left(\frac{b_0}{b_S}\right) \\ LAI &= \left(\frac{1}{K_R}\right) IVPN \end{aligned} \quad (7)$$

that under the hypothesis of $Bm=p LAI$, where p is an empirical constant, it is then obtained:

$$Bm = \left(\frac{p}{K_R}\right) IVPN \quad (8)$$

It is important to emphasize that LAI and Bm only refers to the living component (green) of vegetation and not to the mixture of dead and live material or just dead.

Illumination and vision angles (sun-sensor geometry) in measurements of reflectance modify values of slopes of the iso- LAI lines, so it is necessary to standardize them to a fixed geometry to compare temporal patterns in a vegetation type. The model developed by Bolaños and Paz (2010) was used for this purpose and is defined as:

$$\begin{aligned} \chi &= (90 - \theta_v) + \theta_s \\ \chi &= 90 + gRn \end{aligned} \quad (9)$$

where θ is a zenith angle (unsigned); v refers to a vision and

[multiplicada por $\cos(\chi)$] y χ es una variable angular de posición que reduce la complejidad de la geometría sol-sensor al usar simetrías angulares. La ventaja del modelo de la relación (9) es que sólo requiere un dato, por lo que la constante g puede ser estimada de la reflectancia medida.

Validación del IVPN

La Figura 5 muestra la relación entre el IVPN y el IAF para los experimentos de maíz y algodón discutidos, donde el ajuste experimental soporta la aproximación utilizada.

La relación experimental entre el IVPN y la Bm verde para el experimento de algodón (Figura 6a) soporta la relación (8), etapa vegetativa-reproductiva. Otro experimento es el analizado por Bolaños y Paz (2010). Los datos de este experimento fueron recolectados durante el verano de 1990 como parte del experimento Monzón 90 en la cuenca experimental Walnut Gulch en el sureste de Arizona, Estados Unidos. El sitio de

s to solar; Rn represents a reflectance, R or NIR , normalized [multiplied by $\cos(\chi)$]; and χ is an angular variable of position that reduces the complexity of the sun-sensor geometry by using angular symmetries. The advantage of the model of the relationship (9) is that it only requires a datum, so that the constant g can be estimated from the measured reflectance.

IVPN validation

Figure 5 shows the relationship between IVPN and LAI for the maize and cotton experiments discussed, where the experimental adjustment supports the used approximation.

The experimental relationship between IVPN and green Bm for cotton experiment (Figure 6a) supports the relationship (8), vegetative-reproductive stage. Another experiment is that analyzed by Bolaños and Paz (2010). Data of this experiment were collected during the summer of 1990 as part of the experiment Monsoon 90 in the Walnut Gulch experimental

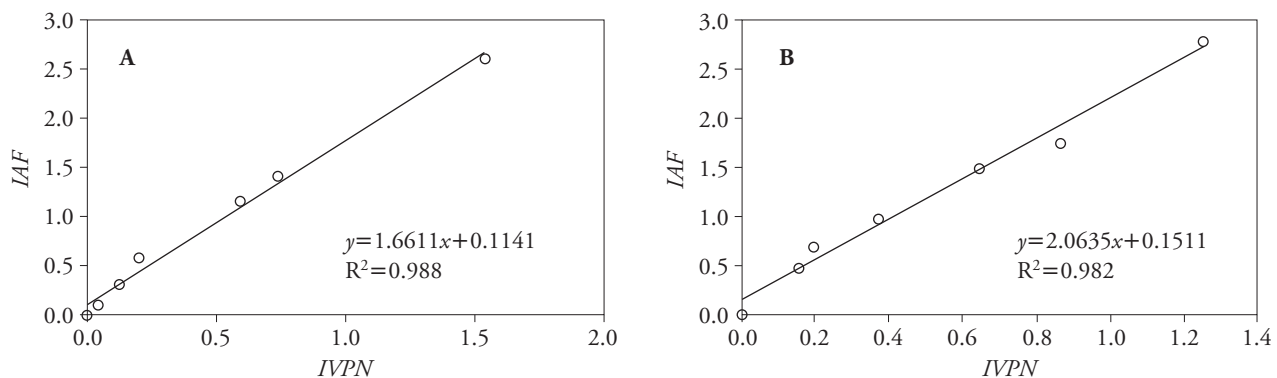


Figura 5. Relación entre el IVPN y el IAF. (A) Cultivo de maíz y, (B) cultivo de algodón.

Figure 5. Relationship between IVPN and LAI. (A) Maize crop and, (B) cotton crop.

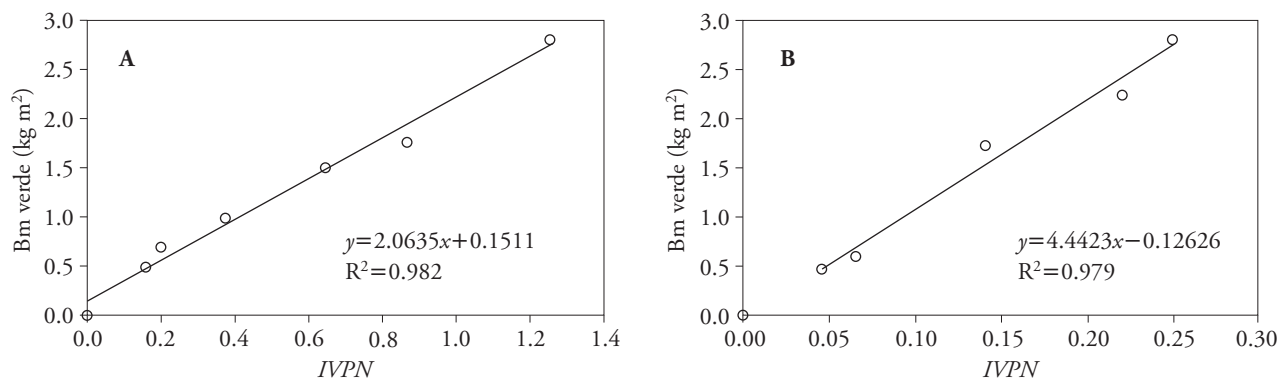


Figura 6. Relación entre el IVPN y la Bm verde. (A) Cultivo de algodón y, (B) pastizal natural.

Figure 6. Relationship between IVPN and green Bm . (A) Cotton crop and, (B) natural grassland.

muestreo consistió de pastizales (*Bouteloua* spp.) sobre pendientes variantes menores del 5 %. El follaje del pastizal fue homogéneo con una cobertura máxima del 40 % y consistió de cantidades variantes de material verde, senescente y muerto dependiendo del estado de crecimiento (Huete *et al.*, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1994). El ajuste experimental en este pasto (Figura 6B), donde se observa que la relación (8) es adecuada para el caso de la curva completa del crecimiento (etapa vegetativa y de senescencia).

Estimación de la capacidad de carga animal

La capacidad de carga animal, en unidad animal o *UA*, está relacionada con la biomasa aérea fresca total *Bm* por:

$$\begin{aligned} CC &= \frac{\text{Oferta de alimento}}{\text{Demanda de alimento}} \\ CC &= \frac{(Bm)(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4927.5} \\ CC &= qBm = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN \\ q &= \frac{(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4927.5} \end{aligned} \quad 10$$

donde *FH* es el factor de conversión de peso fresco total (*PFT*) a peso seco total (*PST*) calculado por el cociente de *PST/PFT*; *FA* es el factor de aprovechamiento de la biomasa forrajera, que generalmente tiene un valor de 0.5; *FAG* es el factor de conversión de biomasa total a biomasa forrajera o aprovechable por el ganado dependiente de la composición florística y disponibilidad en cada sitio, varía de 0 a 1 y es el cociente de *PSTF/PST*, donde *PSTF* es el peso seco total forrajero; *FAA* es el factor de ajuste abiótico por pendiente del terreno y cercanía a cuerpos de agua (Holencheck *et al.*, 1989) y 4927.5 kg de MS es el requerimiento anual por alimento de una *UA* (3 % de ingesta diaria de alimento en relación a su peso, vaca de 450 kg) (COTECOCA, 1967).

La capacidad de carga es el número de *UA* por unidad de superficie, generalmente 1 ha; una forma alternativa de expresarla es el coeficiente de agostadero (*CA*) que es la superficie que se requiere en ha para cubrir la demanda anual por forraje de una *UA*. El *CA* es el inverso de la capacidad de carga.

Campaña de muestreo en el estado de Coahuila, México

Durante el 2009 y 2010 se realizó una campaña de muestreo de pastizales y matorrales en el estado de Coahuila, el cual cuenta con una extensión de 151 563 km², ocupa el tercer lugar a nivel nacional en extensión y tiene coordenadas geográficas extremas al norte 29° 53', al sur 24° 32' de latitud norte; al este 99° 51', al oeste 103° 58' de longitud oeste.

watershed in southeastern Arizona, USA. The sampling site consisted of grassland (*Bouteloua* spp.) on variant slopes less than 5 %. The grassland foliage was homogeneous with a maximum coverage of 40 % and consisted of varying amounts of green, senescent and dead material depending on the state of growth (Huete *et al.*, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1994). The experimental adjustment in this grass is shown in Figure 6B where it is observed that the relationship (8) is suitable for the case of the full curve of growth (vegetative and senescence stage).

Animal carrying capacity estimation

The animal carrying capacity, in animal unit or *AU*, is related to total fresh aboveground biomass (*Bm*) by:

$$\begin{aligned} CC &= \frac{\text{Food supply}}{\text{Food demand}} \\ CC &= \frac{(Bm)(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4927.5} \\ CC &= qBm = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN \\ q &= \frac{(FH)(FA)(FAG)(FAA)}{4927.5} \end{aligned} \quad 10$$

where *FH* is a conversion factor of total fresh weight (*PFT*) to total dry weight (*PST*) calculated by the ratio *PST/PFT*; *FA* is the utilization factor of forage biomass (generally 0.5); *FAG* is the conversion factor of total biomass to forage or usable biomass by livestock depending on the floristic composition and availability in each site, it varies from 0 to 1, and it is the ratio *PSTF/PST*, where *PSTF* is total dry forage weight, *FAA* is the abiotic adjustment factor by slope of terrain and proximity to water bodies (Holencheck *et al.*, 1989) and, 4927.5 (kg DM) is the annual food requirement of a *UA* (3 % of daily food intake in relation to its weight, a 450 kg cow) (COTECOCA, 1967).

Carrying capacity is the number of *AU* per unit area, usually 1 ha; an alternative way of expressing is the coefficient of rangeland (*CA*) which is the surface required to meet the annual demand for forage of an *AU*. The *CA* is the inverse of the carrying capacity.

Sampling campaign in the state of Coahuila, Mexico

During 2009 and 2010 a sampling campaign of grasslands and scrublands was conducted in the state of Coahuila, which has an area of 151 563 km², ranks third at domestic level in terms of area and has extreme northern geographical coordinates 29° 53' north, and to south 24° 32' north latitude; to east 99° 51' to west 103° 58' of west longitude.

El muestreo se enfocó al levantamiento de datos radiométricos, fotográficos y de biomasa del estrato herbáceo y arbustivo.

Para esta campaña se establecieron 24 Sitios Permanentes de Muestreo (SPM) en el estado de Coahuila, los cuales se ubicaron de tal forma que se cubriera la mayor parte de los ecosistemas forrajeros de la entidad (Figura 7).

Un SPM es un área cuadrangular de 225 ha ($1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$), en su interior contiene 9 Estaciones de Muestreo (EM), donde los límites entre estaciones se ubican cada 200 m. Con el objeto de llevar un mejor control y estandarizar la nomenclatura, las EM se enumeraron de Norte a Sur y de Este-Oeste dentro de los SPM (Figura 8).

Las EM son subsitios de 1 ha ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$), donde en su interior se distribuyeron 17 Puntos Generales de Muestreo (PGM), separados 12.5 m entre sí y, en cada cuadrante se estableció un punto denominado Punto de Muestreo de Biomasa (PMB), Figura 9.

En cada PGM se realizaron mediciones de reflectancias (misma bandas espectrales que el sensor TM del satélite Landsat 5) usando un radiómetro multi-espectral modelo MSR16R de Cropscan^{MR} y mediciones de la cobertura vegetal usando una cámara digital modelo Cyber-shot DSC-V1 de Sony^{MR} con resolución de 5.0 megapíxeles. En los PMBs, adicionalmente a las mediciones radiométricas y de cobertura vegetal, se pesó en fresco el total del estrato herbáceo en un área circular de 1.6 m de diámetro (misma área de visión que el radiómetro), además se

Sampling was focused on the survey of radiometric, photographic data, and of biomass data of the herbaceous and shrub stratum.

For this campaign 24 permanent sampling sites (SPM) were established in the state of Coahuila, which were located in such a way to cover most of the forage ecosystem of the state (Figure 7).

A SPM is a quadrangle area of 225 ha ($1.5 \times 1.5 \text{ km}$), inside this area there are 9 Sampling Stations (EM), where the limits among stations are located each 200 m. In order to keep a better control and standardize the nomenclature, the EMs are listed from north to south and east-west within the SPMs (Figure 8).

The EMs are sub-sites of 1 ha ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$), where inside 17 General Sampling Points (PGM) were distributed, separated 12.5 m apart and, in each quadrant a point called Biomass Sampling Point (PMB) was established, Figure 9.

In each PGM reflectance measurements were made (same spectral bands that the TM sensor of Landsat 5 satellite) using a multi-spectral radiometer model MSR16R of CropscanTM and measurements of vegetation cover using a digital camera model Cyber-shot DSC-V1 of SonyTM with resolution of 5.0 megapixels. In the PMBs, additionally to the radiometric and vegetation cover measurements, total herbaceous stratum was weighed in fresh in a circular area of 1.6 m in diameter

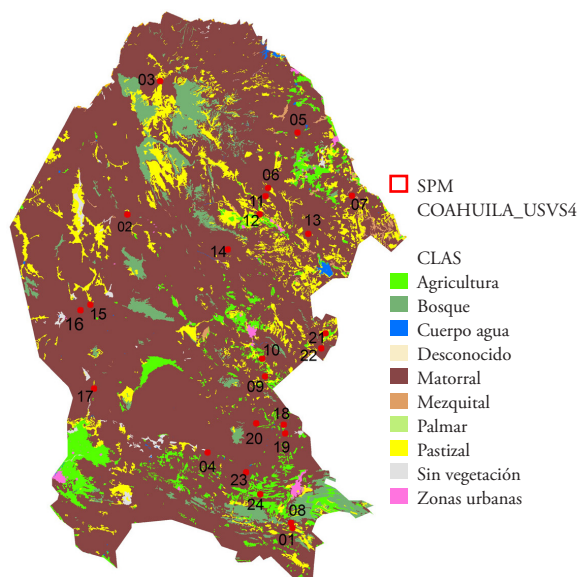


Figura 7. Distribución de los Sitios Permanentes de Muestreo en el estado de Coahuila.

Figure 7. Distribution of the Permanent Sampling Sites in the state of Coahuila.

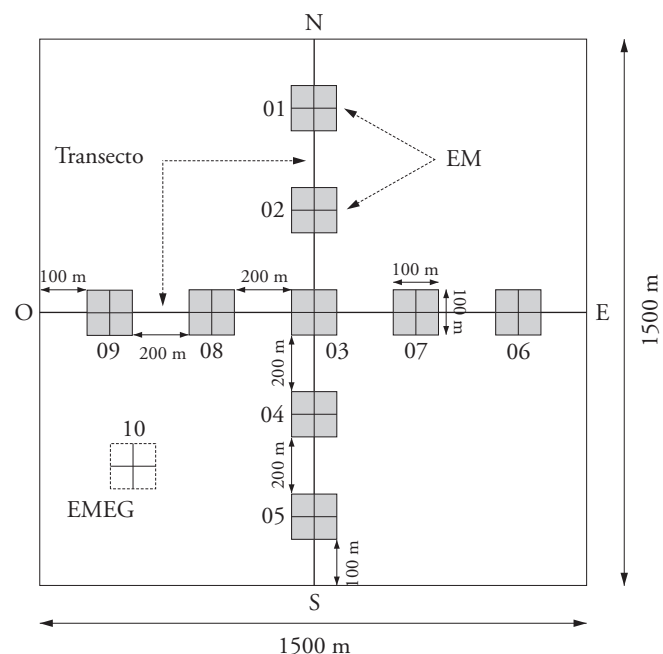


Figura 8. Esquema de un sitio permanente de muestreo (SPM) con sus estaciones de muestreo (EM).

Figure 8. Scheme representation of a SPM and distribution of EMs.

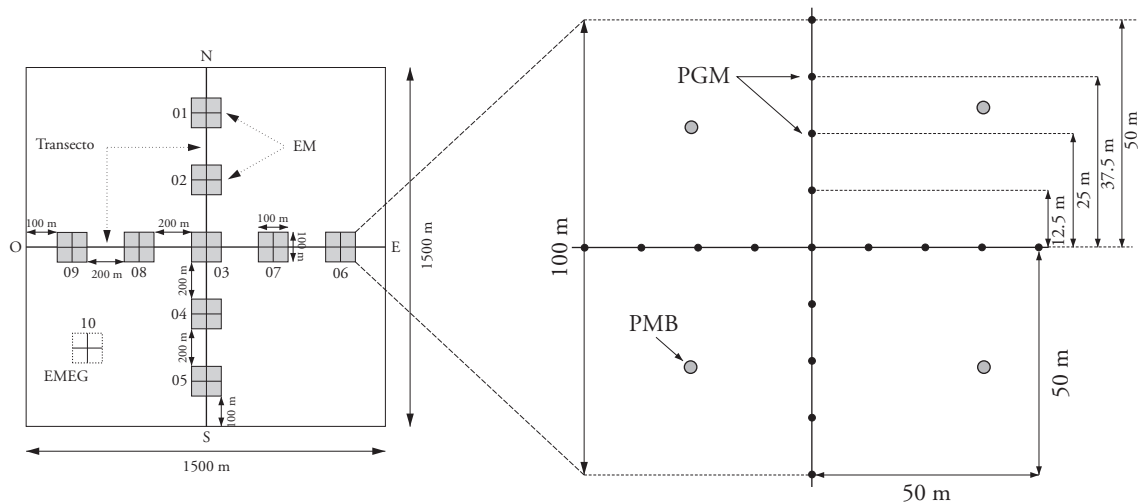


Figura 9. Distribución de los puntos de muestreo en una EM de un SPM.
Figure 9. Distribution of the sampling points in an EM of a SPM.

pesaron en fresco las especies forrajeras y no forrajeras en este estrato. Los pesos frescos fueron convertidos a pesos secos al llevar las muestras de biomasa a peso constante en el secado en horno. La biomasa de cada SPM es el promedio de 18 (2 PMB por EM) o 36 (4 PMB por EM) muestras individuales, por visita.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La discusión de este apartado se centra en la escala de SPM, bajo la consideración de que en la mayoría de las 24 distribuidas en el estado de Coahuila solo se realizó una visita y máximo dos, por lo que no hay información multi-temporal suficiente para un análisis a escala de EM o puntos de muestreo. En esta perspectiva, el desarrollo teórico del *IVPN* permite analizar los patrones espectrales por SPM usando líneas de igual vegetación. En el caso de la estimación de la capacidad de carga animal, ésta es aproximada solo por el estrato herbáceo y no considera la parte arbustiva (ramoneo). Asociado a esto, un problema de la metodología de muestreo de los PMB es que en muchos casos la *Bm* recolectada no representó el total, ya que existían cactáceas o pequeños arbustos que definían un valor mayor de la biomasa. Las mediciones radiométricas y de la cobertura vegetal consideraron todo tipo de plantas en el área de medición, por lo cual se espera que en algunas EM de las SPM analizadas (particularmente en matorrales) la relación entre el *IVPN* y la *Bm* se vea enmascarada por esta situación. No obstante, se realizó una revisión de las mediciones

(same area of vision than the radiometer), also the forage and non-forage species were separated and weighed in fresh in this stratum. Fresh weights were converted to dry weights when carrying the biomass samplings to constant weight in the dry in oven. The biomass of each SPM is the average of 18 (2 PMB by EM) or 36 (4 PMB by EM) individual samples per visit.

RESULTS AND DISCUSSION

The discussion in this section focuses on the SPM scale, under the consideration that in most of the 24 SPMs distributed in the state of Coahuila only one visit was made and no more than two, so that there is no multi-temporal sufficient information for an analysis at scale of EM or sampling points. In this perspective, the theoretical development of the *NSIV* allows us to analyze spectral patterns by SPM using lines of same vegetation. In the case of the animal carrying capacity estimation, this is approached only by the herbaceous stratum and does not consider the shrub part (browsing). Associated with this, a problem of the sampling methodology of PMB is that in many cases the collected *Bm* did not represent the total, as there were cacti and small shrubs that defined a greater value of biomass. Radiometric and vegetation cover measurements considered all types of plants in the area of measurement, whereby it is expected that in some EM of the SPMs analyzed (particularly in scrublands) the relationship between *IVPN* and *Bm* be seen masked by this situation.

y se detectó en cual SPM ocurría con mayor gravedad este problema, por lo que estos fueron eliminados de los análisis espectrales.

Relaciones entre las biomásas de los SPM

La Figura 10 muestra la relación entre el Peso Fresco Total (*PFT*) y el Peso Seco Total (*PST*) de los promedios de la biomasa recolectada en los SPM. Asimismo, en esta misma figura se muestra la relación entre el *PST* y el Peso Seco Total Forrajero (*PSTF*). Las relaciones mostradas fueron hechas con regresiones lineales, forzadas a pasar por el origen. Así, de la relación (10) se tiene que $FH = PST/PFT$ y $FAG = PSTF/PST$. El factor *FA* puede dejarse como igual a 0.5 y *FAA* es dependiente de la topografía y cuerpos de agua de áreas específicas en el estado de Coahuila.

En la Figura 10 se consideró que *FH* permanece constante durante todo el periodo de crecimiento de la vegetación, lo cual es no necesariamente cierto por lo que deben realizarse ajustes estacionales para considerar diferentes contenidos de agua de la biomasa (NRCS, 1997).

Patrones entre a_0 y b_0 en las SPM

Con las mediciones de reflectancia de las bandas del *R* e *IRC*, estandarizadas a un ángulo cenital de iluminación de 30°, de los PMB en las estaciones de muestreo de los SPM, se estimaron en forma directa por regresión lineal los parámetros a_0 y b_0 de las líneas igual de vegetación en toda la SPM. Para analizar la relación entre a_0 y $1/b_0$, ecuación (2), se

Despite this, a review of the measurements was performed and was detected in which SPM this problem occurred with more severity, so these were removed from the spectral analysis.

Relationships among the biomasses of the SPMs

Figure 10 shows the relationship between Total Fresh Weight (*PFT*) and Total Dry Weight (*PST*) of biomass averages collected in the SPMs. Also, in this same figure the relationship between *PST* and Total Dry Forage Weight (*PSTF*) is shown. The relationships shown were made with linear regressions forced to pass through the origin. Thus, of relationship (10) we have that $FH = PST/PFT$ and $FAG = PSTF/PST$. The *FA* factor can be left equal to 0.5 and *FAA* is dependent on topography and water bodies from specific areas in the state of Coahuila.

In Figure 10 it was considered that *FH* remains constant throughout the growth period of vegetation, which is not necessarily true by which seasonal adjustments should be made to consider different water contents of the biomass (NRCS, 1997).

Patterns between a_0 and b_0 in the SPMs

The reflectance measurements of *R* and *IRC* bands, standardized to a zenith angle of illumination of 30°, of the PMB in the sampling stations of SPM, were used to estimate directly by linear regression the parameters a_0 and b_0 of the lines of same vegetation in all SPM. To analyze the relationship

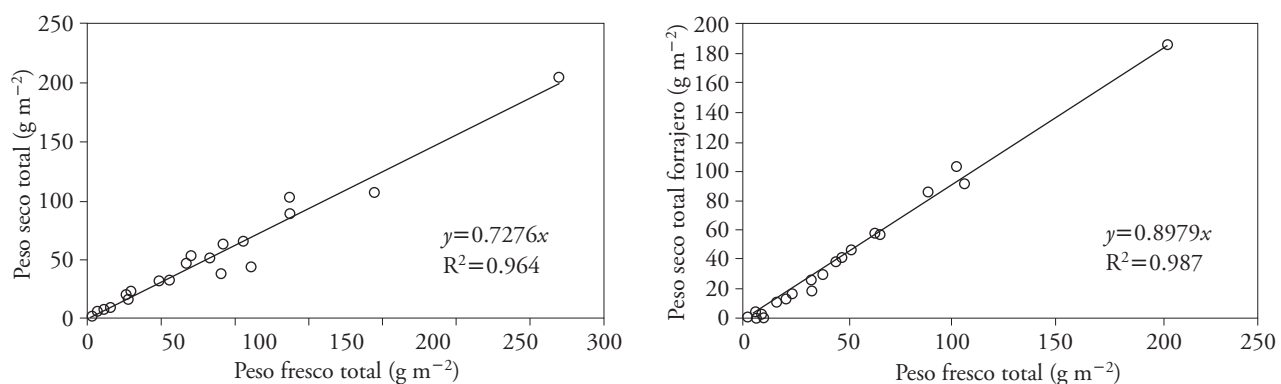


Figura 10. Relación entre las diferentes fracciones de la biomasa promedio de las SPM.

Figure 10. Relationship between the different fractions of the average biomass of SPMs.

revisaron las SPM que tenían información asociada a la etapa vegetativa del estrato herbáceo. La Figura 11 muestra esta situación para las únicas SPM con estos datos. Se observa en esta figura que la constante c es aproximadamente 0.8 y la d es -0.025 , donde esta última aproxima bien el valor de $d = -0.024$ definido en la Figura 2b.

La situación de una pendiente de la línea del suelo (b_s) menor que 1 fue planteada como motivación para el desarrollo del IVPN. Después de revisar y analizar la información asociada a suelo desnudo en las SPM, se decidió usar un valor de $b_s = 0.85$ como representativo de las diferentes condiciones encontradas en los SPM del estado de Coahuila.

Relación entre el IVPN y el peso fresco total del estrato herbáceo en los SPM

El PFT (peso fresco total) medido en los PMB de los SPM no representa necesariamente la biomasa verde, ya que muchas mediciones se realizaron sobre mezclas de vegetación verde y muerta (senescente); además de lo discutido en relación a la mezcla de otras especies no herbáceas en las mediciones de reflectancias (que se refleja en el IVPN). No obstante lo anterior, la relación lineal entre el IVPN y la Bm aérea total fresca (Figura 12), regresión lineal forzada al origen, en los SPM para el caso de matorrales y pastizales es adecuada. Las relaciones (Figura 12) implican que $(p/K_R) = 2877.3$ en la estimación de la capacidad de carga en pastizales y 1112.2 en matorrales.

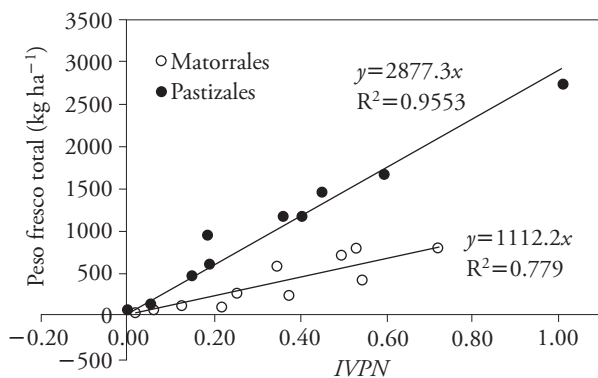


Figura 12. Relación entre el IVPN y la Bm fresca total del estrato herbáceo en los sitios permanentes de muestreo.

Figure 12. Relationship between IVPN and total fresh Bm of the herbaceous stratum in the permanent sampling sites.

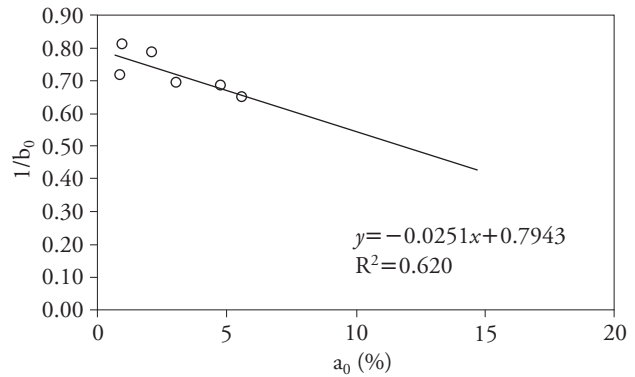


Figura 11. Relación entre a_0 y $1/b_0$ para SPM muestreados durante la etapa vegetativa del crecimiento del estrato herbáceo.

Figure 11. Relationship between a_0 and $1/b_0$ for SPM sampled during the vegetative stage of the herbaceous stratum growth.

between a_0 and $1/b_0$, equation (2), SPMs having information associated to the vegetative stage of the herbaceous stratum were reviewed. Figure 11 shows this situation for the SPMs with these data. In this figure it is observed that the constant c is approximately 0.8 and d is -0.025 , where this latter approximates enough the d value -0.024 defined in Figure 2b.

The situation of a slope of the soil line (b_s) less than 1 was raised as motivation for the development of IVPN. After reviewing and analyzing the information associated with bare soil in the SPMs, it was decided to use a value of $b_s = 0.85$ as representative of the different conditions found in the SPMs of the state of Coahuila.

Relationship between IVPN and total fresh weight of herbaceous stratum in the SPMs

The PFT (total fresh weight) measured in the PMBs of the SPMs does not necessarily represent the green biomass, since many measurements were performed on mixtures of green and dead (senescent) vegetation; in addition to that discussed in relation to the mixture of other species non-herbaceous in the measurements of reflectances (reflected in the IVPN). Notwithstanding the above, the linear relationship between the IVPN and total fresh aboveground Bm (Figure 12), linear regression forced to the origin, in the SPMs for the case of scrublands and grasslands, is adequate. The

Los resultados mostrados en la Figura 12 muestran un buen ajuste estadístico, por lo que pueden ser considerados como adecuados para los fines de estimaciones a escala estatal de capacidad de carga.

De la relación (10), y de los resultados obtenidos en su calibración en Coahuila, México, se puede establecer ($FAA=1.0$, $FA=0.5$, $FH=0.73$, $FAG=0.90$):

$$CC = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN$$

$$q = 6.66667E - 05, \text{ pastizales y matorrales}$$

$$\frac{p}{K_R} = 2877.3, \text{ pastizales}$$

$$\frac{p}{K_R} = 1112.2, \text{ matorrales}$$

$$CC = 0.192 IVPN, \text{ pastizales}$$

$$CC = 0.074 IVPN, \text{ matorrales} \quad (11)$$

Las relaciones (11) establecen la conversión de mediciones radiométricas ($IVPN$) a capacidades de carga animal para pastizales y matorrales en el estado de Coahuila. Para coeficientes de agostadero, que son el inverso de la capacidad de carga animal, se consideró que los valores máximos del $IVPN$ de la Figura 11 eran para una condición excelente del agostadero (COTECOCA, 1967). Así, los valores máximos de $IVPN$ de 1.0 y 0.75 de las vegetaciones de pastizal y matorral, respectivamente, implican para estos mismos tipos de vegetación coeficientes de agostadero de 5 y 18 ha por U, ambos en condición excelente. Estos valores son comparables con las estimaciones de COTECOCA (1979) y Díaz-Solís *et al.* (2003). Para mejorar la precisión de las estimaciones de la capacidad de carga animal a partir del $IVPN$, deberán definirse los intervalos de valores de este índice para cada una de las condiciones identificadas del agostadero que son: excelente, buena, regular y pobre.

CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo fue generalizar el desarrollo de un índice espectral ($IVPN$), más allá de las limitaciones del índice $NDVI_{cp}$ publicado, bajo la consideración de que el índice debe tener una relación lineal con el índice de área foliar o biomasa del follaje.

relationships (Figure 12) imply that $(p/K_R)=2877.3$ in the carrying capacity estimation in grasslands and 1112.2 in scrublands. Results shown in Figure 12 show a good statistical adjustment, so they can be considered as suitable for the purposes of state-level estimations of carrying capacity.

From relationship (10), and from the obtained results in its calibration in Coahuila, Mexico, it can be established ($FAA=1.0$, $FA=0.5$, $FH=0.73$, $FAG=0.90$):

$$CC = \left(\frac{pq}{K_R} \right) IVPN$$

$$q = 6.66667E - 05, \text{ grassland and scrublands}$$

$$\frac{p}{K_R} = 2877.3, \text{ grasslands}$$

$$\frac{p}{K_R} = 1112.2, \text{ scrublands}$$

$$CC = 0.192 IVPN, \text{ grasslands}$$

$$CC = 0.074 IVPN, \text{ scrublands} \quad (11)$$

Relationships (11) establish conversion of radiometric measurements ($IVPN$) to animal carrying capacity for grasslands and scrublands in the state of Coahuila. For rangeland coefficients, which are the inverse of animal carrying capacity, it was assumed that maximum values of $IVPN$, Figure 11, were for an excellent condition of the rangeland (COTECOCA, 1967). Thus, the maximum values of $IVPN$ of 1.0 and 0.75 for vegetation of rangelands and scrublands, respectively, imply for these same types of vegetation coefficients of rangeland of 5 and 18 ha per U, both in excellent condition. These values are comparable to estimations by (COTECOCA, 1979) and Díaz-Solís *et al.* (2003). To improve the precision of estimations for animal carrying capacity from $IVPN$, the intervals of values for this index must be defined for each of the conditions identified for the rangeland, which are: excellent, good, regular and poor.

CONCLUSIONS

The main contribution of this paper was to generalize the development of a spectral index ($IVPN$), beyond the limitations of the $NDVI_{cp}$ index

Las estimaciones de la biomasa total, en todos los estratos, pueden ser relacionadas con los valores del *IVPN* satelital, de tal manera que se puedan establecer relaciones funcionales que permitan expandir las estimaciones en forma espacial y temporalmente exhaustiva en todo el estado de Coahuila; además de permitir tener estimaciones de la curva de crecimiento de la vegetación para caracterizar a la capacidad de carga animal en términos dinámicos. Los desarrollos mostrados permiten su aplicación extensiva en el país para obtener actualizaciones, y series temporales, del uso de la vegetación forrajera y así poder realizar una planeación del uso ganadero.

Los desarrollos teóricos y la evidencia experimental presentada permiten obtener una estimación aproximada de la capacidad de carga animal en los pastizales y matorrales del estado de Coahuila. Para realizar estimaciones completas en un multi-estrato, es necesario relacionar la biomasa del estrato herbáceo con la biomasa total. Esto es explorado en otra publicación de los autores usando información tomada con un helicóptero de radio control con instrumentación similar a la discutida en este trabajo.

Es importante enfatizar que las estimaciones realizadas son promedio de los sitios de 1.5 km×1.5 km (225 ha) y que tienen errores asociados a cada factor de calibración discutido. Así, es necesario realizar un análisis de incertidumbre (propagación de errores) asociado a la estimación de las capacidades de carga animal a otras escalas espaciales.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo se realizó con apoyo de varios proyectos del Colegio de Postgraduados con la Coordinación General de Ganadería de SAGARPA en México, por lo que se agradece el financiamiento y apoyo que se obtuvo.

LITERATURA CITADA

- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing Environ.* 46: 213-222.
- Bolaños, M., y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría de iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Ciencias Pec.* 1: 349-361.
- Breda, J. J. N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.* 392: 2403-2417.
- Chehbouni, A., Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete, and S. Sorooshian.

published under the consideration that the index must have a linear relationship with the leaf area index or foliage biomass.

Estimates of total biomass in all strata, may be related to the satellite *IVPN* values, so that they can establish functional relationships that permit to expand estimates spatially and temporally exhaustive throughout the state of Coahuila; besides allowing to have estimates of the curve of vegetation growth to characterize the animal carrying capacity in dynamic terms. Developments shown allow their extensive application in the country to get updates, and time series, of the use of forage vegetation and be able to make a planned livestock use.

Theoretical developments and experimental evidence presented allow obtaining an approximate estimation of the animal carrying capacity in grasslands and scrublands of the state of Coahuila. To perform complete estimates on a multi-stratum, it is necessary to relate biomass of the herbaceous stratum to total biomass. This is explored in another publication by the authors using data taken with radio control helicopter with similar instrumentation discussed in this paper.

It is important to emphasize that these estimates are average of sites of 1.5 km×1.5 km (225 ha) and that have errors associated with each calibration factor discussed. Thus, it is necessary to perform an uncertainty analysis (error propagation) associated with animal carrying capacity estimation to other space scales.

—End of the English version—



1994. Toward the development of a multidirectional vegetation index. *Water Resources Res.* 30: 1281-1286.
- COTECOCA. 1967. Metodología para determinar tipos vegetativos, sitios y productividad de sitios. Publicación No. 8, México, D.F. 84 p.
- COTECOCA. 1979. Coahuila. Tipos de vegetación, sitios de productividad forrajera y coeficientes de agostadero. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero. México.
- Díaz-Solís, H., M. M. Kothmann, W. T. Hamilton, and W. E. Grant. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands, *Agric. System* 76: 655-680.

- Gao, X., A. R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing Environ.* 74: 609-620.
- Gilabert, M. A., J. González, F. J. García, and J. Meliá. 2001. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environ.* 82: 303-310.
- Goudriaan, J., and H. M. van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. textbook with exercises. *Current Issues in Production Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.
- Holenchek, J. L., R. D. Pieper, and C. H. Herbel. 1989. *Range Management, Principles and Practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 501 p.
- Huete, A.R. 1987. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. *Agron. J.* 79: 61-68.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing Environ.* 25: 295-309.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing Environ.* 17: 35-53.
- Huete A. R., G. Hua, J. Qi, and A. Chehbouni. 1992. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. *Remote Sensing Environ.* 41: 143-154.
- NRCS. 1997. *National Range and Pasture Handbook*, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C. 472 p.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Qi J., A.R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni. 1994. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. *Water Resources Res.* 30: 1271-1279.
- Rodskjer, N. 1972. Measurements of solar radiation in barley and oats. *Swedish J. Agric. Res.* 2: 71-81.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. W. Junk, Norwell, MA, 391 p.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. MASA/GSFC. Type III. Final Report, Greenbelt, MD. 371 p.
- Rowley, R. J., K. P. Price, and J. H. Kastens. 2007. Remote sensing and the rancher: linking perception and remote sensing. *Rangeland Ecol. Manage.* 60: 359-368.
- SAGARPA. 2007. Acuerdo por el que se Establecen las Reglas de Operación de los Programas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Diario Oficial de la Federación* del 31 de diciembre de 2007. 132 p.
- SAGARPA. 2008. Lineamientos Específicos del Componente Producción Pecuaria Sustentable y Ordenamiento Ganadero y Avícola (PROGAN) del Programa de Uso Sustentable de Recursos Naturales para la Producción Primaria de las Reglas de Operación de los Programas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Diario Oficial de la Federación* del 10 de marzo de 2008. 27 p.
- Stockle, C. O., M. Donatelli, and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographs infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environ.* 8: 127-150.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coppin. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.* 121: 37-53.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-NIR reflectance space. *Remote Sensing Environ.* 74: 313-326.