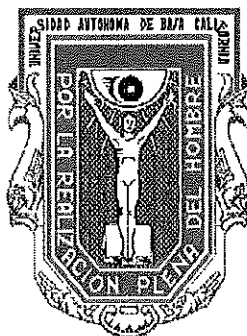


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS



MAESTRIA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS
DE ZONAS ARIDAS

Estimación de biomasa en pastizales utilizando sensores remotos (NOAA-
AVHRR y SPOT-VGT) en la cuenca del Río San Pedro, Sonora-México.

TESIS
Que para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

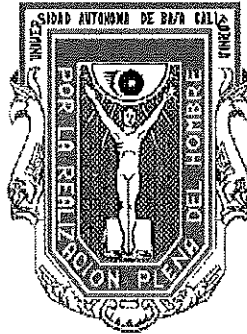
Presenta:

FAUSTO RAFAEL SANTIAGO LEON

Ensenada, Baja California, México.

Febrero, 2003

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS



MAESTRIA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS
DE ZONAS ARIDAS

Estimación de biomasa en pastizales utilizando sensores remotos (NOAA-
AVHRR y SPOT-VGT) en la cuenca del Río San Pedro, Sonora-México.

TESIS
Que para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

FAUSTO RAFAEL SANTIAGO LEON



Ensenada, Baja California, México.

Febrero, 2003

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS**

**Estimación de biomasa en pastizales utilizando sensores remotos (NOAA-
AVHRR y SPOT-VGT) en la cuenca del Río San Pedro, Sonora-México.**

**TESIS
Que para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
EN MANEJO DE ECOSISTEMAS
DE ZONAS ARIDAS**

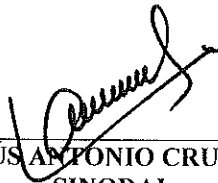
Presenta:

FAUSTO RAFAEL SANTIAGO LEON

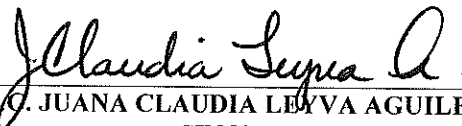
Aprobado por:



**DR. CHRISTOPHER JOHN WATTS THORP
DIRECTOR.**



**M.C. JESÚS ANTONIO CRUZ VARELA
SINODAL.**



**M.C. JUANA CLAUDIA LEYVA AGUILERA
SINODAL**

Ensenada, Baja California, México.

Febrero, 2003

AGRADECIMIENTOS.

**Agradezco a Dios.....
Por la vida y su omnipresencia.**

A mi Esposa Lorenia por el amor que me brinda y su apoyo.

A mis hijas Paulina y Loreana, por la felicidad que nos dan.

A mis padres por su apoyo y su perspectiva de la vida.

**A mis hermanos (Arturo, Flor, Patricia y Daniela) por el apoyo moral y por
aguantarme tanto.**

Agradezco de sobre manera a Chris Watts, por su tiempo y apoyo en la dirección de esta tesis.

A Antonio Cruz, por su apoyo y comentarios de redacción de esta tesis por la amistad brindada.

A Claudia Leyva por su apoyo en la maestría y su ayuda en la elaboración de esta tesis.

A la UABC-Facultad de ciencias, a sus maestros por la oportunidad de brindar el conocimiento y gracias a eso dudar más.

Al IMADES por su apoyo como institución y la utilización su infraestructura.

Al director de IMADES, Lic. Carlos Zatarain G., administrador Javier Valverde y compañeros de trabajo (Trini, Claudia, Aldo, Martín Reyes, Gonzalo, Licha, Eva, David, Gabriel Valencia, Norma, Eduardo López, Oti, Marielos, Tuly, Tere Solís, Sergio, Rafaela, Ma. Luisa, Luis Moreno, Cristina, Juan Carlos, Fermín.

A IRD antes ORSTOM por el apoyo durante el experimento SALSA en la cuenca del Rio San Pedro en Cananea, Sonora. En especial a Ghani Chehbouni, Eric Elguero, Oscar Hartogensis.

Al DICTUS por oportunidad de compartir experiencias y retos, así como a mis compañeros de trabajo (Enrique, Martín, Héctor, Adolfo, Silvia, Alex Nava, Chente, Delia, Mariana y Luis.

A mis amigos y compañeros de Ensenada con mucho aprecio:

José Luis Fermán , Luis Galindo “Master”, Alex García y Raquel, Ileana Espejel, Claudia Leyva –Moika, Mike Wilken, Luis Carlos y Cecy, Juan Carlos “banano”, Blanquita (FC), El Alexson, Roberto Martínez, Alex Tenorio, Guillermo Aramburo, Ernesto Campos, Roberto Pérez, Luz del Carmen.

Y con una gratitud especial y un aprecio de corazón a la Embajada de Guanajuato y Francia en Ensenada: Familia Seingier Arredondo.

A las cuñadas Avalos Román y a todos mis sobrinos.

A las familias León Díaz y Santiago Reyes.

A todos los que olvide mencionar y hacen de la vida lo más valioso.

Resumen.

Estimación de biomasa en pastizales utilizando sensores remotos (NOAA-AVHRR y SPOT-VGT) en la cuenca del Río San Pedro, Sonora-México.

Para obtener información con fines de planificación y administración de los recursos naturales se requiere de la aplicación de metodologías precisas, confiables y rápidas; donde la capacidad económica no sea sobrepasada y que estas sean eficientes para detectar y analizar cambios ambientales específicos como son los de cobertura vegetal natural e inducida. Una alternativa para la evaluación de recursos naturales de bajo costo son los sensores remotos NOAA-AVHRR y SPOT-VGT, los cuales por las características similares de información espacial tienen un gran potencial de uso. El objetivo de este estudio es el de estimar la biomasa de pastizal utilizando información de campo, así mismo la de conocer los índices de vegetación (IV) y características de radiación fotosintéticamente activa (RFA) así como la eficiencia, constantes y por etapas de la vegetación presente. En periodo de 1997-1999 se llevo a cabo la medición de biomasa en campo, así como la obtención de índices de vegetación en la cuenca del Río San Pedro, ubicado en el Estado de Sonora. En la estimación de biomasa se aplico el modelo de Monteith (1972) considerando los valores de IV, RFA y eficiencias. Encontrándose que las limitantes de desarrollo de la biomasa en la época húmeda los pastizales requieren de la precipitación y en donde la radiación fotosintéticamente activa no es un limitante para el desarrollo de la biomasa. Aplicando el modelo propuesto para la estimación de biomasa comparada con la medida en campo se obtuvieron resultados de correlaciones (R^2) y valores de error cuadrático de la media (RMSE) para los años de 1998 y 1999. En el año de 1998 utilizando el IV NDVI de NOAA-AVHRR y eficiencias por etapas se obtuvo $R^2 = 0.98$ y $RMSE = 2.69 \text{ g m}^{-2}$, por otra parte para el mismo año pero con SPOT-VGT se obtuvo $R^2 = 0.93$ y $RMSE = 5.84 \text{ g m}^{-2}$; en el año de 1999 con IV NDVI y eficiencias por etapas se obtuvo para NOAA-AVHRR $R^2 = 0.98$ y $RMSE = 4.82 \text{ g m}^{-2}$ y para SPOT-VGT, $R^2 = 0.98$ y $RMSE = 6.02 \text{ g m}^{-2}$. Basado en los resultados obtenidos se tiene que la biomasa estimada en comparación con la medida en campo es muy aproximada, con esto tenemos que la aplicación de esta herramienta es definitivamente un gran apoyo en la evaluación de áreas de pastizales, así como de comunidades de vegetación envueltas en procesos de afectación por actividades antropogénicas o naturales.

Palabra clave: sensores remotos, índices de vegetación, estimación de biomasa, NOAA-AVHRR, SPOT-VGT.

Abstract.

Estimation of biomass in grasslands using remote sensing (NOAA-AVHRR AND SPOT-VGT) in San Pedro River basin, Sonora; Mexico.

In order to gather and analyze data for natural resource management and planning purposes, the application of fast, reliable and low cost methodologies is desirable, as well as efficient methods for environmental change detection issues, like natural land cover. The NOAA-AVHRR and SPOT-VGT remote sensing imagery is a good low cost alternative for these purposes, their spatial information capabilities providing a great potential use. The objective of this study is to estimate grassland biomass: data field and NOAA-AVHRR and SPOT-VGT imagery was used to obtain Vegetation Index (VI), Photosynthetic Active Radiation (PAR) and efficiency (e). Biomass and VI data were gathered *in situ* between 1997 and 1999 within the San Pedro river basin, located in Sonora (Mexico). Monteith's model (1972) was used for the biomass estimation, using the VI, PAR and e . The VI, PAR and e data analysis showed that grassland growth in the wet season depends on precipitation and not on the PAR. Correlation (R^2) and Root Mean-Square Error (RMSE) for model output values and data field values for the 1998 and 1999 years was calculated. For 1998, using the NOAA-AVHRR Normalized Differences Vegetation Index (NDVI) and step-by-step efficiency resulted in $R^2=0.98$ and $RMSE=2.69 \text{ g m}^{-2}$, while using SPOT-VGT imagery led to in $R^2=0.93$ and $RMSE=5.84 \text{ g m}^{-2}$. Values for 1999 were $R^2=0.98$ and $RMSE=4.82 \text{ g m}^{-2}$ using NDVI and step-by-step efficiency, and $R^2=0.98$ and $RMSE=6.02 \text{ g m}^{-2}$ using SPOT-VGT. Results show that grassland biomass remote sensing estimates are satisfactorily correlated to *in situ* measures, validating the use of this tool in grassland coverage evaluation, and encouraging its use in other biotic community type's applications.

Keywords: Remote Sensing, Vegetation Index, Biomass estimation, NOAA-AVHRR, SPOT-VGT

I. Introducción.	1
I.1. Objetivo general.	2
I.1.1. Objetivos particulares.	2
I.2. Hipótesis.	3
I.3. Justificación.	3
II. Antecedentes.	5
II.1. Mapeo de vegetación.	5
II.2. Los sensores remotos desde el espacio.	6
Tabla II- 1. Cronología de los sensores remotos (satélites) de la serie Landsat puestos en órbita desde 1972. Tomado de Baylin y Gaisford, (1993).	7
Tabla II- 2. Comparación de los sensores NOAA-AVHRR y SPOT-VGT con los demás sensores en la actualidad tomada de Cracknell y Hayes (1991).	8
II.3. Sensores remotos en el mapeo de la vegetación.	9
II.3.1. NOAA-AVHRR 14.	10
II.3.1.1. Bandas espectrales.	10
Tabla II- 3. Rangos espectrales y resolución del sensor remoto NOAA-AVHRR (NOAA AVHRR user Manual, 1990).	
II.3.2. SPOT4-VGT.	12
Tabla II- 4. Rangos espectrales y resolución del sensor SPOT4-VGT (The Vegetation Programme, SPOT -VGT, 1998).	12
II.4. Vegetación.	13
II.4.1. Pastizales.	13
Figura II- 1. Pastizales en la zona de estudio en primavera y finales de verano, 1999 (fotos: Fausto Santiago).	14
II.5. Relación de la energía solar (espectro electromagnético) con la vegetación.	15
II.5.1. Subdivisión de la energía.	15
II.5.2. Luz.	16
Figura. II-5. Espectro visible dentro del espectro electromagnético (CCRS Manual, 1999).	17
Tabla II-5. Distribución del espectro visible (CCRS Manual, 1999).	17

Figura. II- 6. Variación de los colores en el espectro visible con el aumento de la longitud de onda.	18
II.5.3. Radiación infrarroja.	19
Figura II- 7. Distribución del espectro infrarrojo (CCRS Manual, 1999).	20
II.6. Descripción de la relación energía solar – vegetación.	21
Figura II- 8. Reacción de la vegetación a la energía solar.	21
Tabla II-6. Simbología a los componentes de energía del espectro electromagnético.	22
Tabla II-7. Respuesta de la vegetación a los rangos espectrales (CCRS, 1999).	22
II.7. Radiación: Interacción con la superficie.	22
Figura II- 9. Interacción de la radiación en la vegetación.	23
Figura II- 10. Reflexión especular.	24
Figura II- 11. Reflexión difusa.	24
Figura II- 12. Interacción en vegetación (hojas) de la energía.	25
II.8. Interacción en agua.	26
Figura II- 13. Interacción de la energía en el agua.	26
Figura II- 14. Respuesta de la radiación en la superficie terrestre.	27
II.9. Índices de vegetación.	29
Tabla II- 8. Índices de vegetación existentes y aplicados en la actualidad (Ermapper User Manual, 1996)	31
II.10. Índices de vegetación a utilizar en el desarrollo de este trabajo ::	34
II.10.1. NDVI (normalized difference vegetation index).	34
II.10.2. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).	34
II.10.3. SATVI (Soil Adjusted Total Vegetation Index).	35
II.11. Estimación de Biomasa: Modelo de Monteith.	37
III. Metodología.	38
Figura III-1. Diagrama de la metodología a desarrollar.	39
Figura III-2. Diagrama metodológico para sensores remotos.	40
III.1. Sensores remotos.	40

III.1.1. Obtención de las imágenes.	40
III.1.2. Selección de imágenes.	41
III.1.3. Calibración y georeferenciación.	41
III.1.4. Extracción de la información.	41
III.1.5. Corrección por algoritmos.	42
III.1.6. Calculo de índices de vegetación.	42
Figura III-3. Diagrama metodológico de biomasa medida en campo.	44
III.2. Biomasa medida en campo.	45
III.2.1. Muestreo de biomasa.	45
Figura III-4. Diagrama de metodología en la estimación de biomasa	46
III.2.2. Estimación de biomasa.	46
III.2.3. Índices de vegetación.	46
III.2.4. Radiación fotosintéticamente activa (RFA).	46
III.2.5. Precipitación.	47
III.2.6. Eficiencias.	48
Figura III-5. Ejemplo de graficado de biomasa medida vs. Índice de vegetación	48
III.2.7. Estimación de biomasa.	49
III.2.8. Modelo de Monteith.	49
IV. Resultados.	50
IV.1. Descripción del Área de estudio.	50
Figura IV-1. Ubicación de la cuenca del Río San Pedro y zona de estudio, en los estados de Arizona (E. U.) y Sonora (México).	51
IV.1.1. Fisiografía.	52
IV.1.2. Clima.	52
IV.1.3. Geología.	52
IV.1.4. Edafología.	53
IV.1.5. Vegetación.	53

IV.1.6. Actividades Productivas.	54
IV.2. Índices de vegetación derivados de los sensores remotos.	55
IV.2.1. Índices de vegetación AVHRR - NDVI.	55
Figura IV-2. Índices de vegetación de NOAA-AVHRR para 1998.	55
Figura IV-3. Índices de vegetación de NOAA-AVHRR para 1999.	55
IV.2.2. Índices de vegetación SPOT -VGT.	56
Figura IV-4. Índices de vegetación de SPOT-VGT 1998.	57
Figura IV-5. Índices de vegetación de SPOT-VGT 1999.	57
IV.3. Biomasa medida.	58
IV.3.1. Biomasa obtenida en el muestreo.	58
Tabla IV-1. Días de biomasa muestreada en campo en 1998 y 1999 (SALSA, 2000).	58
Tabla IV-2. Biomasa medida en campo en días del año juliano (DOY) en 1998 (SALSA, 1999).	59
Tabla IV-3. Biomasa medida en campo en días del año juliano (DOY) en 1999 (SALSA, 1999).	59
Figura IV-6 Biomasa medida para el año de 1998.	60
Figura IV-7 Biomasa medida para el año de 1999.	60
Figura IV-8 Biomasa muestreada en campo, 1998.	62
Figura IV-9 Biomasa muestreada en campo, 1999.	62
Figura IV-10 Precipitación en la zona de estudio en el año de 1998.	62
Figura IV-11 Precipitación en la zona de estudio en el año de 1999.	63
Figura IV-12 Precipitación acumulada vs. Biomasa medida, 1998.	63
Figura IV-13 Precipitación acumulada vs. Biomasa medida, 1999.	64
Tabla IV-4. Etapas de crecimiento delimitadas en días del año (DOY) para la biomasa medida en campo.	64
IV.4. Estimación de biomasa.	65
IV.4.1. Radiación fotosintéticamente activa (RFA).	65
Figura IV- 14. Radiación fotosintéticamente activa (RFA) para el año de 1998.	66
Figura IV- 15. Radiación fotosintéticamente activa (RFA) para el año de 1999.	66

Tabla IV- 5. Radiación fotosintéticamente activa media (RFAav) para 1998 y 1999..	67
IV.5. Eficiencias.	67
IV.5.1. Eficiencias constantes (Total).	68
IV.5.2. Eficiencias por etapas.	68
IV.5.2.1. Etapa uno.	68
IV.5.2.2. Etapa dos.	68
IV.5.2.3. Etapa tres.	68
Tabla IV- 6. Eficiencias de NOAA-AVHRR para los años de 1998 y 1999.	69
Tabla IV- 7. Eficiencias de SPOT-VGT para los años de 1998 y 1999.	69
IV.6. Biomasa medida vs. Índices de vegetación NOAA-AVHRR y SPOT-VGT para 1998 y 1999 (no acumulados y acumulados).	70
Tabla IV- 8. Correlación de índices de vegetación vs. Biomasa medida.	70
Tabla IV- 9. Correlación de índices de vegetación acumulados vs. Biomasa medida.	71
IV.7. Estimación de biomasa.	72
IV.7.1. Biomasa estimada por eficiencia total o constante.	72
Tabla IV- 10. Resultados de estimación de biomasa con eficiencias constantes, NOAA-AVHRR 1998 y 1999.	73
Figura IV 16. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencia constante, NOAA-AVHRR 1998.	73
Figura IV- 17 Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencia constante, NOAA-AVHRR 1999.	74
Tabla IV- 11. Resultados de estimación de biomasa con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1999.	74
Figura IV- 18 Biomasa estimada vs. Biomasa medida con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1998.	75
Figura IV- 19 Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1999.	76
IV.7.2. Biomasa estimada por eficiencia por etapas.	77
Tabla IV- 11. Resultados de biomasa estimada con eficiencia por etapas, NOAA-AVHRR 1998 y 1999.	77
Figura IV- 20. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas,	78

NOAA-AVHRR 1998.	
Figura IV- 21. Biomasa medida v. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, NOAA-AVHRR 1999.	78
Figura IV- 22. Biomasa medida v. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, NOAA-AVHRR 1999.	79
Tabla IV-12. Resultado de biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1998 y 1999.	80
Figura IV-23. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1998.	81
Figura IV-24. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1999.	82
V. Discusión y Conclusiones.	83
V.1. Biomasa medida en campo.	83
V.2. Índices de vegetación.	83
V.3. Radiación solar, Radiación Fotosintéticamente Activa promedio (RFAav).	84
V.4. Precipitación.	84
V.5. Eficiencias.	85
V.6. Biomasa estimada.	87
V.6.1. Biomasa estimada con eficiencias sin etapas o constantes.	87
V.6.2. Biomasa estimada con eficiencias por etapas.	88
VI. Recomendaciones.	90
VI.1. Medición de biomasa en campo.	90
VI.2. Índices de vegetación.	90
VI.3. Eficiencias.	90
VI.4. Estimación de biomasa.	90
VII. Bibliografía.	91
ANEXO	99
Reflectancia	100

I. Introducción.

La aplicación de los sensores remotos como herramienta tecnológica en ciencias de la tierra permite obtener parámetros físicos de la superficie terrestre con lo cual se logra diagnosticar, evaluar y modelar los recursos naturales acoplados a mediciones en campo. La continuidad de la información espacial de este tipo permite conocer la dinámica y estado de la cobertura vegetal (Goward, 1989).

Para obtener información con fines de planificación y administración de los recursos naturales, se requiere de la aplicación de metodologías precisas, confiables y rápidas; donde la capacidad económica no sea sobrepasada y que sean eficientes para detectar y analizar cambios ambientales específicos como son los de cobertura vegetal natural e inducida. Con el fin de conocer y tener un mejor entendimiento de las características y dinámica de la vegetación natural e inducida, se han desarrollado índices de vegetación, los cuales son algoritmos aplicados a sensores remotos de bajo costo como lo son NOAA-AVHRR Y SPOT-VGT (Kidwell, 1990).

Los índices de vegetación son una aproximación cercana a las características de la vegetación sobre la superficie terrestre, basado en la relación de la energía solar con en la cubierta de vegetación terrestre, se tiene una respuesta de energía captada por el sensor remoto en el rango visible e infrarrojo, donde estas dos cualidades de la energía aplicando los algoritmos de índices de vegetación nos proporcionan información de la salud de la cubierta vegetal (Prince, 1991; Tucker, 1985; Daubenmire, 1975).

En suma tenemos que la información derivada de sensores remotos (índices de vegetación), datos de campo (biomasa medida, radiación solar y eficiencia) y la aplicación de un modelo integral se tiene la posibilidad de poder llevar a cabo una estimación de la biomasa (Prince, 1991).

Con el presente trabajo se pretende aportar información metodológica y de componentes esenciales en la estimación de biomasa el cual puede ser utilizado por los tomadores de decisión como herramienta de soporte en la evaluación de ecosistemas de pastizales, así como de otras comunidades bióticas.

I.1. Objetivo general.

Estimar la biomasa en pastizales naturales, aplicando un modelo basado en muestreo de biomasa destructivo; en los meses de Julio a Agosto en los años de 1998 y 1999. Lo anterior teniendo como soporte información derivada de sensores remotos (índices de vegetación), radiación fotosintéticamente activa y eficiencia.

I.1.1. Objetivos particulares.

- Obtener los índices de vegetación en pastizales del sensor NOAA-AVHRR y SPOT-VGT.
- Obtener la radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) en los años de 1998 y 1999.
- Obtener los valores de eficiencias de los pastizales naturales para cada año derivado de los sensores remotos (constantes y por etapas).
- Estimar valores de biomasa utilizando índices de vegetación, radiación fotosintéticamente activa y eficiencia derivados de NOAA-AVHRR y SPOT-VGT 4.
- Utilizar los índices de vegetación, la biomasa medida en campo y la biomasa estimada para conocer la calidad de los pastizales en la zona de estudio.

1.2. Hipótesis.

La resolución de los sensores remotos de bajo costo que existen en la actualidad como NOAA-AVHRR y SPOT-VGT nos permite poder hacer cuantificaciones de biomasa basado en los índices de vegetación, por lo cual se plantea como hipótesis:

“Se considera que existe relación significativa entre los índices de vegetación derivados de sensores remotos con la biomasa medida en campo y la biomasa estimada”.

1.3. Justificación.

Las actividades productivas en Sonora y Chihuahua son esencialmente ganaderas y agrícolas, estas dos actividades productivas son el soporte de la mayoría de las comunidades de esta región (SALSA, 2000). Desde el punto de vista de la ganadería como actividad productiva extensiva, los ganaderos desconocen la capacidad de soporte de sus áreas de agostadero, además es un hecho que la elaboración de informes para determinar la calidad de agostadero para grandes áreas es demasiado costosa y de muy lenta respuesta (Sainz, 1999).

Aplicando la sensoria remota como una herramienta de manejo y de conservación para aquellas áreas sujetas a actividades productivas como el caso de las zonas de ganadería extensiva (Meyer, 1996). Con esto es posible obtener directrices de manejo, las cuales nos ayuden a conocer las capacidades de carga animal de áreas extensas, ya que debido al desconocimiento de la capacidad de carga animal de áreas de agostadero con diferentes tipos de vegetación se han llevado al máximo de explotación ocasionando graves problemas en la cobertura vegetal lo que favorece la pérdida de la capa de suelo por erosión y la pérdida definitiva de la vegetación natural (SALSA, 2000; Meyer, 1996).

En el caso de la agricultura los sensores remotos juegan un papel importante para la evaluación de las áreas de cultivo, seguimiento de rendimientos,

INTRODUCCIÓN.

utilización de agua, así como áreas afectadas por enfermedades y su propagación en las zonas agrícolas del mundo (Spot-Vegetation, 1998).

Si se considera como soporte la información que puede proveer los sensores remotos en áreas extensas y con mayor frecuencia de monitoreo es imprescindible el aplicar estas herramientas para identificar la dinámica global con un costo por km² menor (Goward, 1989).

Basado en lo anterior es trascendental llevar a cabo investigaciones con los sensores remotos en el campo de los recursos naturales ligado con las actividades humanas, para determinar el estado, capacidad y potencial de aprovechamiento con el objetivo de tener un desarrollo sustentable.

II. Antecedentes.

II.1. Mapeo de vegetación.

Desde que se inicio en la aplicación de los sensores remotos instalados en satélites (1972), se han realizado proyectos importantes (LACIE¹, AGRISTARS² por USDA, MARS³ por ECC, TREES por JRC/ESA.) Donde se han desarrollado metodologías de utilización de sensores remotos para obtener cartografía temática de la tierra en diferentes ámbitos (ecosistemas naturales, zonas antropogenizadas, determinación de potencial de producciones pecuarias, etc.). Estos trabajos van encaminados a obtener información para la toma de decisiones, las cuales están ligadas directamente al aprovechamiento de los recursos naturales, determinación de impactos globales por deforestaciones y la evolución del clima (The Vegetation Programme SPOT-VGT 4, 1998).

La evaluación de los recursos naturales con esta herramienta es una de las principales necesidades de todos los países desarrollados y en vías de desarrollo, para delimitar y tener conocimiento de zonas de valor ecológico, económico y social lo cual es de suma importancia en las áreas que dependen de los recursos naturales como fuente directa de actividades productivas, (Agenda 21, 1992).

El proceso de mapeo de la vegetación basado en imágenes de satélite, es una alternativa de gran importancia en la interpretación de la cobertura vegetal y la evaluación de los recursos de una región.

Las imágenes de satélite con múltiples rangos espectrales pueden ser utilizadas para delimitar diferentes tipos de vegetación, basados en las características de su estado y estructura. El mapeo de vegetación utilizado

¹ *The Use of Landsat Data in a Large Area Crop Inventory Experiment (LACIE)*, National Aeronautics and Space Administration, Houston, Tex., 1975

² *Agriculture and Resources Inventory Surveys through Aerospace Remote Sensing (AGRISTARS)*, 1981.

³ *Monitoring Agriculture with Remote Sensing (MARS)* project of European Commission (EC).

comúnmente se basa en la determinación de la densidad de la vegetación, la cual puede derivar de la combinación de datos de campo e índices de vegetación, por ejemplo el NDVI (índice de vegetación normalizado por diferencias), (Tucker y Sellers, 1989; Goward *et al*, 1985; Gallo y Flesch, 1989) y otros índices de vegetación que consisten en combinaciones de bandas espectrales (Huete y Jackson, 1994).

Si se toma en cuenta la cobertura espacial de la imagen en área, la resolución espacial y los rangos espectrales que contiene se pueden elaborar mapas de la vegetación utilizando metodologías existentes así como nuevos modelos aplicados a estimación de vegetación (Prince, 1991).

En este capítulo se hace una revisión de antecedentes en el uso de los sensores remotos en el mapeo de vegetación, en particular los obtenidos por los sensores remotos que se utilizan en este trabajo NOAA-AVHRR y SPOT-VGT 4. Así como la descripción del modelo de Monteith a utilizar en la estimación de biomasa.

II.2. Los sensores remotos desde el espacio.

Los sensores remotos que orbitan sobre la tierra tienen características especiales y están diseñados para diferentes fines y aplicaciones. Se abordan primeramente los sensores remotos en los que se iniciaron los mapeos de vegetación por diversas metodologías y a mayor detalle en los sensores remotos que se utilizaron para obtener los datos de vegetación en este trabajo.

A principios de los años 70as los satélites llevaban a cabo mediciones en el espectro visible e infrarrojo, fueron diseñados para conocer la dinámica de la superficie terrestre. Los satélites pioneros en esta área fueron los satélites Landsat MSS (Multispectral Scanner) antes llamado ERTS (Earth Resources Technology Satellite) puestos en órbita en el año de 1972 los cuales fueron los primeros en obtener imágenes de baja órbita con una resolución de 80 m (Baylin y Gaisford, 1993).

A partir de ellos se dio el inicio al desarrollo de nuevos satélites, los cuales se diseñaron para diferentes propósitos (Tabla 1).

Tabla II- 1. Cronología de los sensores remotos (satélites) de la serie Landsat puestos en órbita desde 1972. Tomado de Baylin y Gaisford (1993).

SATELITE	SENSOR	LANZAMIENTO.	ALTITUD DE ORBITA (km)	RESOLUCIÓN (m)
Landsat 1	MSS-RBV	1972	907	80
Landsat 2	MSS- RBV	1975	908	80
Landsat 3	MSS- RBV	1978	915	80
Landsat 4	MSS-TM	1982	705	30
Landsat 5	MSS-TM	1984	705	30
Landsat 6	ETM+	**falta en lanzamiento	**	30
Landsat 7	ETM+	1998	705	30

En la serie de satélites NOAA-AVHRR su diseño fue para aplicaciones meteorológicas, aun cuando las mediciones que hacia en el rango visible e infrarrojo sirvieron para poder aplicar algoritmos en la estimación de biomasa. Con esto se logró un rápido desarrollo de algoritmos para estimar índices de vegetación que contribuían en un mapeo de la vegetación más eficiente en grandes áreas.

Los satélites SPOT fueron diseñados para obtener información de la superficie terrestre, principalmente la dinámica de la superficie en diferentes campos de ciencias de la tierra, incluida la aplicación al área de evaluación de vegetación.

El satélite SPOT-VGT provee información de las características similares a las de NOAA-AVHRR 14 respecto a la resolución espacial y rango electromagnético.

Tabla II- 2. Comparación de los sensores NOAA-AVHRR y SPOT-VGT con los demás sensores en la actualidad tomada de Cracknell y Hayes (1991).

Sensor.	Banda.	Numero de Banda.	Longitud De Onda. (μ m)	Resolución Espacial (m).
SPOT-4 VGT	Azul.	0	0.43-0.47	1150
	Rojo	1	0.61-0.68	1150
	IR cercano	2	0.78-0.89	1150
	SWIR	3	1.58-1.75	1150
LANDSAT TM	Azul.	1	0.45-0.52	30
	Verde.	2	0.52-0.60	30
	Rojo.	3	0.63-0.69	30
	Infrarrojo Cercano.	4	0.76-0.90	30
	Infrarrojo Medio.	5	1.55-1.75	30
	Infrarrojo térmico.	6	2.1-2.35	30
	Infrarrojo de Onda Corta	7	10.4-12.5	120
LANDSAT MSS	4	4	0.50-0.60	80
	5	5	0.60-0.70	80
	6	6	0.70-0.80	80
	7	7	0.80-1.1	80
AVHRR 14	Rojo	1	0.58-0.68	1100
	Infrarrojo.	2	0.725-1.10	1100
	3	3	3.55-3.93	1100
	4	4	10.3-11.3	1100
	5	5	11.5-12.5	1100

* Las celdas marcadas en negrita son las bandas y rangos espectrales que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo de tesis.

II.3. Sensores remotos en el mapeo de la vegetación.

Los primeros trabajos básicos en el mapeo de la vegetación con sensores remotos se realizaron a finales de la década de los 60as cuando Jordan (1969) describió el primer índice de vegetación llamado RVI (Ratio Vegetation Index) el cual utilizaba información del rango espectral infrarrojo cercano y rojo; Kriegler *et al.* (1969) fueron los primeros en presentar el concepto de índices de vegetación normalizados y después Rouse *et al.* (1973) presentaron el ahora conocido índice de vegetación normalizados por diferencias (NDVI) en donde se utilizaron los rangos espectrales de infrarrojo cercano y rojo.

Cabe destacar que el mapeo de la vegetación con sensores remotos como los que se utilizan en este trabajo permite con su resolución espacial de 1.1 km delimitar comunidades bióticas de gran cobertura; a medida que el tamaño del píxel sea menor la calidad del mapeo de la vegetación será mejor ya que se podrá diferenciar mejor los cambios entre comunidades bióticas.

Las plataformas como el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) tienen eficiencia probada en mapeo de la vegetación a escalas globales y continentales (Tucker *et al.* , 1985; Goward *et al.* , 1985; Justice *et al.*, 1985; Kogan, 1991; Nogi *et al.*, 1993; Kaufman *et al.*, 1992). El AVHRR es un satélite de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) el cual provee una resolución de 1 km. Para el mapeo continental de la vegetación, NOAA ha utilizado esta información en el cálculo global del verdor o Índice de Vegetación Global (GVI). El GVI tiene un píxel de 4 km el cual se ha aplicado a modelación en ecosistemas de bosques y emisión de gases a la atmósfera por la vegetación en escala global (Gaston *et al.*, 1997).

Para el caso del mapeo de vegetación en nuestra zona de estudio se utilizó el sensor NOAA-AVHRR 14 en modo HRPT (High Resolution Picture Transmission), el cual tiene una resolución espacial en píxel de 1.1 km. Lo que permite hacer una estimación de índices de vegetación a mayor detalle que con la información obtenida en modo reducido de GAC (Global Area Coverage) a resolución de 4km.

II.3.1. NOAA-AVHRR 14.

El sensor NOAA-AVHRR 14 (NOAA J) tiene cinco bandas de medición en el rango espectral, las cuales están distribuidas desde el rango visible, cercano infrarrojo e infrarrojo térmico (Tabla 3). El satélite NOAA-AVHRR 14 orbita a 833 km de altitud y puede obtener escenas de la tierra con un ancho de barrido (Swath) de 2399 km con una resolución de 1.1 km al nadir⁴ orbitando la tierra un poco mas de 14 veces al día (aproximadamente 100 minutos por orbita) (Watts y Saiz-Hernández, 1993).

Su orbita se denomina polar porque hace su recorrido de polo a polo. De hecho, la inclinación de la órbita no es de 90° como sería uno de órbita polar verdadera. Para que la órbita sea "sincronizada con el Sol" la inclinación de la órbita es de 98.8°, por lo que el satélite pasa siempre a la misma hora solar local. Sin embargo, la elevación solar cambia a través del año por el efecto estacional (NOAA AVHRR User Manual, 1990).

II.3.1.1. Bandas espectrales.

Los rangos de espectrales en los cuales NOAA-AVHRR toma las imágenes de la superficie se muestran en la tabla 3.

⁴ Nadir se refiere a la vista en ángulo vertical del satélite a la superficie.

Tabla II- 3. Rangos espectrales y resolución del sensor remoto NOAA-AVHRR (NOAA AVHRR user Manual, 1990).

Banda	Banda espectral.	Rango espectral. micrómetros	Resolución m
Banda 1	Rojo.	0.58-0.68	1100
Banda 2	Infrarrojo.	0.725-1.10	1100
Banda 3	Infrarrojo Mediano	3.55-3.93	1100
Banda 4	Térmico	10.3-11.3	1100
Banda 5	Térmico.	11.5-12.5	1100

Adquisición de la información.

La adquisición de la información del sensor remoto NOAA-AVHRR 14 puede ser en tres formatos.

1. High Resolution Picture Transmission (HRPT). Son los archivos con resolución completa que son bajados directamente del satélite en vuelo a la estación receptora (Utilizado en las instalaciones de IMADES).
2. Local Area Coverage (LAC). Áreas de particular interés que son grabadas en alta resolución (1 km) utilizando el sistema de grabado a bordo del satélite y enviados en vuelo directo a la estación receptora.
3. Global Area Coverage (GAC). Obtiene la información de la superficie en baja resolución (4 km) y después es almacenada por el mismo satélite. Los datos almacenados en el satélite más tarde son enviados a la estación receptora en tierra.

Las aplicaciones en las cuales puede utilizarse el sensor NOAA-AVHRR pueden ser:

- Evaluación de recursos naturales.
- Uso de suelo.
- Monitoreo Climático.
- Temperatura superficial (Tierra y océano).
- Nubosidad.
- Incendios forestales.

II.3.2. SPOT4-VGT.

El sensor remoto SPOT-VGT 4 consiste en cuatro bandas con diferentes rangos espectrales las cuales van desde el rango azul al infrarrojo de onda corta (Tabla 4). El satélite SPOT-VGT 4 tiene una franja de visión de 2200 km, órbita a una altura de 822 km de altura y tiene una resolución espacial de 1.15 km, (Sobrino, 2000)

El proceso de transferencia de la información captada por el satélite es obtenido a través de estaciones receptoras, las cuales tienen la capacidad de recibir la información a 2 GB s^{-1} y con la capacidad de proceso (The Vegetation Programme, SPOT -VGT, 1998).

Tabla II- 4. Rangos espectrales y resolución del sensor SPOT4-VGT (The Vegetation Programme, SPOT -VGT, 1998).

Banda	Banda espectral	Rango espectral. Micrómetros	Resolución m
Banda 1	Azul.	0.43-0.47	1150
Banda 2	Rojo.	0.61-0.68	1150
Banda 3	Infrarrojo Cercano.	0.78-0.89	1150
Banda 4	Infrarrojo de onda corta.	1.58-1.75	1150

El sensor SPOT4-VGT se puede utilizar en las siguientes aplicaciones:

- Caracterización de la superficie.
 - Estudios de clima y meteorológicos.
- Evaluación de agricultura, bosques y zonas de pastoreo.
 - Mapeo de uso de suelo.
 - Estimación de producción potencial
- Monitoreo y modelación de la biosfera terrestre.
 - Intercambio de carbono y Ciclos biogeoquímicos.
 - Intercambio de energía y agua.

El mapeo de la vegetación con datos de SPOT-VGT es generalmente de buena calidad considerando que la resolución espacial al igual que NOAA-AVHRR son resoluciones bajas, en cambio la información que proporcionaría la aplicación de los sensores remotos de Landsat TM sería mejor debido a la diferencia de resolución espacial, con una mejor resolución se tendría la diferenciación de los cúmulos de vegetación, para lo cual SPOT-VGT solamente puede aplicarse en áreas particularmente donde existen áreas heterogéneas de vegetación (Gjertsen, 1993). Los sensores que nos aportarían mayor resolución espectral y espacial más fina son los sensores remotos multiespectrales de alta resolución de diferentes plataformas como lo son Landsat MSS (80 m píxel), Landsat Thematic Mapper (TM) (30 m píxel), SPOT (Satellite Pour l' Observation de la Terre) (20 m píxel) que han sido utilizados a gran escala (Gjertsen, 1993; Luman y Ji, 1995; Coppin y Bauer, 1992; Matthews, 1983; Peterson *et al.*, 1987).

II.4. Vegetación.

La vegetación se define como el conjunto de plantas que habitan una región determinada, desde el punto de vista de las comunidades bióticas (Rzedowski, 1978).

II.4.1. Pastizales.

Los pastizales están ampliamente dominados por pastos, los cuales pueden ser anuales o perennes mezclados en diferentes proporciones en un área. El

promedio de la altura del pastizal esta correlacionado con la precipitación, lo cual hace variar el tamaño del pasto en la pradera de alto, medio y bajo.

Los pastizales cambian considerablemente de aspecto durante el año. En primavera los pastos son verdes y las herbáceas están en floración, a medio verano los pastos son de tonos cafés, liberan la semilla y las plantas predominantes están agonizantes ejemplo: figura 1 (Website Grasslands, 2000).

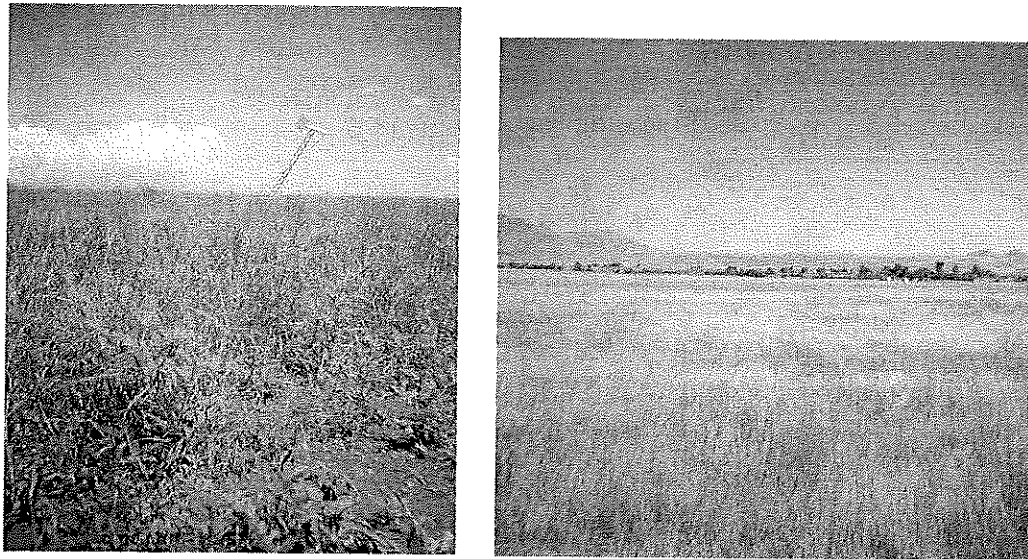


Figura II- 1. Pastizales en la zona de estudio en primavera y finales de verano, 1999 (fotos: Fausto Santiago).

II.5. Relación de la energía solar (espectro electromagnético) con la vegetación.

La energía necesaria para mantener la vida en la tierra proviene de la luz solar ya sea actuando directamente por medio de las plantas verdes, o indirectamente a través de otros organismos, los cuales excepto las bacterias quimo sintético, dependen en última instancia, de los compuestos orgánicos sintetizados por las plantas verdes (Daubenmire, 1999).

La clorofila gracias a su capacidad de absorber la luz del sol y convertirla en energía química contenida en moléculas simples de azúcar, constituye el vínculo de unión esencial entre casi todos los organismos vivientes y la energía solar. Además, la luz ejerce varios efectos simultáneos en las plantas, especialmente en la diferenciación de los tejidos y los órganos. En efecto, el agua es el único competidor de la luz en su influencia sobre la morfología y anatomía de las plantas. Menos evidentes, pero sin dejar de ser igualmente importantes, son los efectos de la luz sobre los procesos fisiológicos y sobre la composición química de las plantas (Daubenmire, 1999).

II.5.1. Subdivisión de la energía.

Toda la energía que la tierra recibe del sol esta en forma de ondas electromagnéticas, las cuales varían en longitud de casi 5,000 nm a 290 nm (nanómetros) (Figura 4). Esta serie o espectro solar se subdivide en longitudes de onda como sigue:

ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

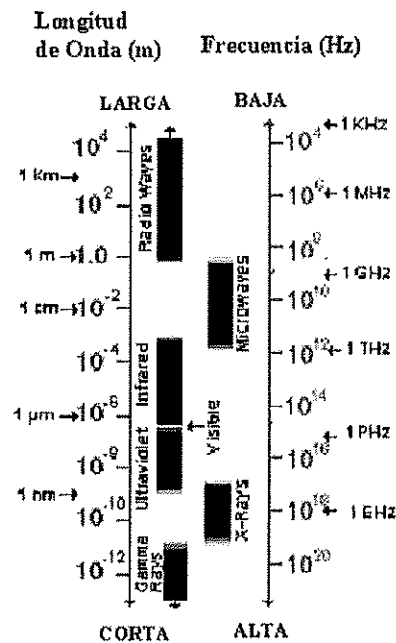


Figura II- 4. Distribución del espectro electromagnético (CCRS Manual, 1999).

II.5.2. Luz.

Las longitudes de onda entre 400 y 750 nanómetros, que comprende el segmento del espectro solar que atraviesa la envoltura atmosférica de la tierra con un mínimo de disminución en la energía se le denominan energía luminosa o de la luz porque puede verse a simple vista (Figura y Tabla 5). Las plantas han desarrollado pigmentos especiales (clorofila, caretonoides, flavinas, etc.) a fin de obtener el máximo de esta y aprovechar esta abundante fuente de energía; De igual forma los animales han perfeccionado los ojos para utilizarla (Daubenmire, 1999).

Tabla II-5. Distribución del espectro visible (CCRS Manual, 1999).

COLOR	RANGO ESPECTRAL (nm)
Violeta	400 - 446
Azul	446 - 500
Verde	500 - 578
Amarillo	578 - 592
Naranja	592 - 620
Rojo	620 - 700

Dependiendo del tipo de clima, lluvioso o seco alrededor de un 40 a 60% de la energía total de la radiación total que llega a la superficie terrestre se encuentra dentro de esta angosta gama. Las plantas verdes crecen normalmente solo cuando están expuestas a la combinación de la mayoría de las longitudes de onda luminosas (Daubenmire, 1999).

Cuando la luz atraviesa un prisma se dispersa en una serie de longitudes de onda exhibiendo colores diferentes (Figura 3).

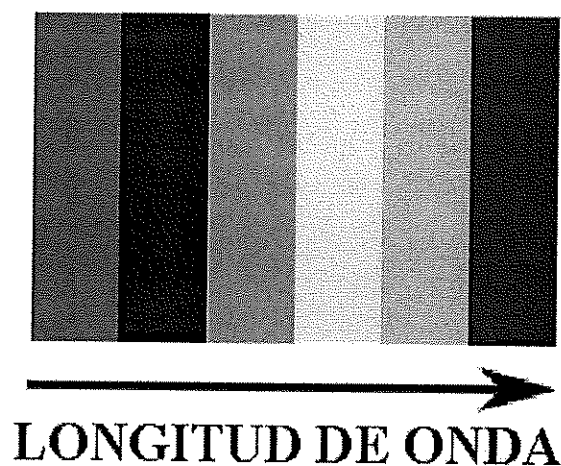


Figura. II- 6. Variación de los colores en el espectro visible con el aumento de la longitud de onda.

En la tabla 5 se muestra Todos los colores que constituyen el espectro visible que intervienen en la fotosíntesis, el verde y el amarillo se usan muy poco, las

principales longitudes de onda que se absorben se encuentran en áreas azules, violetas rojos y anaranjados (Figura 6). El fototropismo se rige principalmente por las longitudes de onda azul-violeta (Daubenmire, 1999).

II.5.3. Radiación infrarroja.

A esta categoría pertenecen las longitudes de onda mayores a la visibles, las cuales no son visibles al ojo humano; de esto el nombre de infrarrojo (por debajo del rojo). La presencia de la radiación infrarroja se puede detectar con la presencia de este tipo de energía únicamente por la sensación de calor que produce, y cuanto más grande sea la longitud de onda mayor será su efecto calorífico.

Los rayos infrarrojos procedentes del sol no son mayores de 3,000 nanómetros, y se conocen como infrarrojo cercano. Por último toda la radiación solar se convierte en longitudes de onda que exceden a los 3,000 nanómetros (infrarrojo lejano) y después es nuevamente radiada al espacio (Figura 7). Desde el punto de vista biológico el infrarrojo lejano solo es importante por sus efectos caloríficos. El infrarrojo cercano es importante para las plantas por su influencia en las hormonas que rigen la germinación y las respuestas a la luz diurna (Wassik y Stolwijk, 1956).

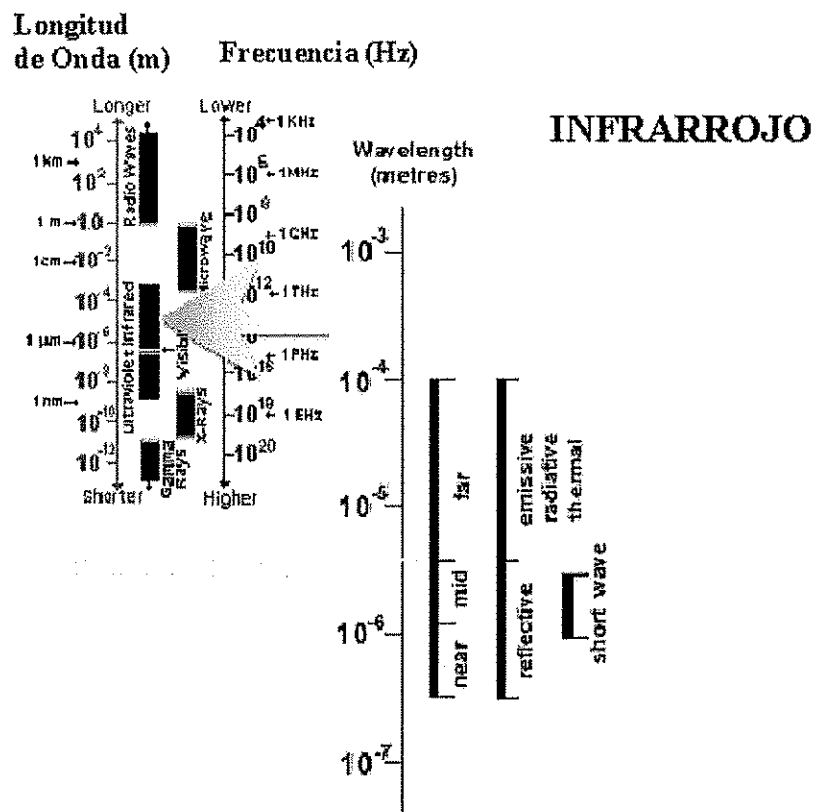


Figura II- 7. Distribución del espectro infrarrojo (CCRS Manual, 1999).

II.6. Descripción de la relación energía solar – vegetación.

Las células de las hojas de las plantas son efectivas dispersoras de luz debido al alto contraste en el índice de refracción entre los volúmenes de la célula ricos en agua y espacios de aire intercelulares. La vegetación tiende a ser muy oscura en el rango visible de (400-700 nm) debido a la alta absorción que generan los pigmentos en las hojas (clorofila, xantofila, etc.), además hay un incremento de reflectividad alrededor de los (500 nm) que es el rango visible-verde en donde los pigmentos absorben menos energía.

En el rango espectral de (700-1300 nm) la vegetación refleja mayor cantidad de energía, esto debido a que las células de la vegetación son menos absorbentes que en el rango (400-700 nm).

De los 1300 a 2500 nm la vegetación es relativamente oscura, por la absorción del agua por las hojas. La celulosa y lignina y otros componentes en las plantas también son absorbidas en este rango espectral (CCRS Manual, 1999).

En la figura 8 se describe la penetración de cada una de las longitudes de onda en la vegetación, en donde las longitudes de onda reflejadas son verde (G) e infrarrojo (IR) y las que absorbidas son azul (B) y rojo (R) (CCRS Manual, 1999).

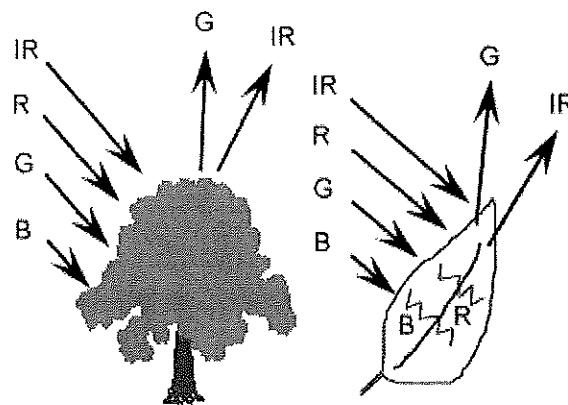


Figura II- 8. Reacción de la vegetación a la energía solar.

La descripción de los componentes de la figura 8 se muestra en la tabla 7, en donde cada letra tiene su relación a la medición del espectro electromagnético por el sensor remoto.

Tabla II-6. Simbología a los componentes de energía del espectro electromagnético.

Banda	Color.	Color.
IR	Infrared	Infrarrojo.
R	Red.	Rojo.
G	Green.	Verde.
B	Blue.	Azul.

En síntesis la vegetación responde con mayor facilidad a los siguientes rangos espectrales:

Tabla II-7. Respuesta de la vegetación a los rangos espectrales (CCRS, 1999).

Rango espectral (nm)	Característica.
400-700	Oscuro
700-1300	Brillante
1300-2500	Oscuro (más brillante que 400-700)

II.7. Radiación: Interacción con la superficie.

La radiación que no es absorbida o diseminada en la atmósfera puede ser reflejada o interactuar con la superficie, en donde existen tres formas de interacción que pueden presentarse cuando la energía interactúa con el objetivo (Campbell, 1987) (Figura 9).

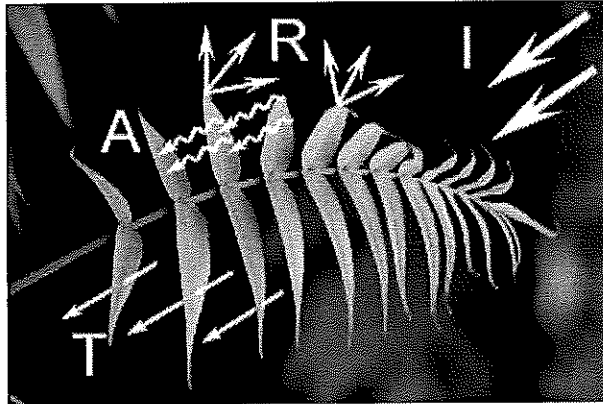


Figura II- 9. Interacción de la radiación en la vegetación.

La energía total incidente (I) puede interactuar con la superficie en una o más de estas tres vías. La proporción de cada una depende de la longitud de onda de la energía, el material y la condición del rasgo.

La absorción (A) ocurre cuando la radiación (energía) es absorbida por el objetivo, la transmisión (T) ocurre cuando la radiación pasa a través del objetivo. La reflexión ocurre cuando la radiación “rebota” fuera del objetivo y es re-direccionada hacia diferentes puntos.

En sensoria remota se aplica mayormente la utilización de la radiación reflejada de las superficies, esto en sensores pasivos. Podemos referir dos tipos de reflexión mostradas a continuación, en donde se representan los extremos en el camino donde la energía es reflejada de un objetivo como reflexión especular y reflexión difusa (CCRS-Manual, 1999).

Cuando la superficie es suave podemos obtener una reflexión especular o reflexión como de espejo donde toda la energía es re-direccionada de regreso en una sola dirección. La reflexión difusa ocurre cuando la superficie es rugosa y la energía es reflejada uniformemente en todas las direcciones.

En algunas condiciones de la superficie terrestre los sensores remotos “fallan o mienten” en la toma de información de la superficie, en donde un

objetivo particular genera reflexión especular o reflexión absolutamente difusas (Figuras 10 y 11).

Si las longitudes de onda son mucho más pequeñas que las variaciones de la superficie o la partícula clasifica según el área de una superficie, la reflexión difusa dominará. Por ejemplo, un grano de arena aparecería bastante liso para longitudes de ondas grandes, pero en longitudes de ondas cortas (microondas) se vería muy áspero (CCRS-Manual, 1999).

Con lo anterior ocurre hay que definir que la aplicación de los sensores remotos de modo pasivo (rango visible) su área de trabajo será limitada por estas características. Por otra parte cuando las características de la superficie sean más complejas el rango visible será sustituido por el rango de microondas este campo.

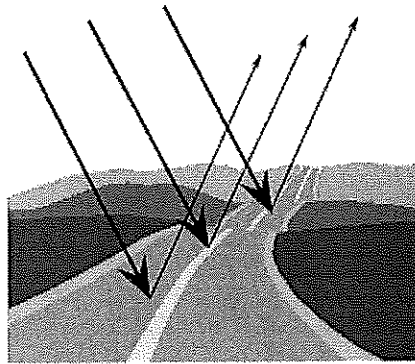


Figura II- 10. Reflexión especular.

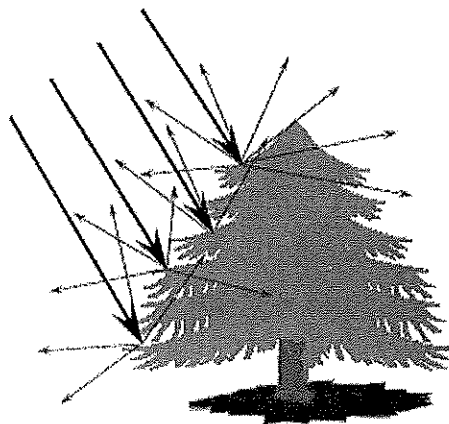


Figura II- 11. Reflexión difusa.

II.8. Descripción de interacción entre la superficie de hojas y agua.

II.8.1. Interacción en hojas.

El compuesto químico que contienen los cloroplastos de las células de las hojas llamado clorofila, absorbe fuertemente la radiación en longitudes de onda en rojo y azul y refleja la longitud de onda verde.

Las hojas parecen verdear en verano, cuando contienen la mayor cantidad de clorofila. En otoño la concentración de clorofila es menor en las hojas, por lo tanto hay menos absorción y proporcionalmente mas reflexión de la longitud de onda en rojo, lo que ocasiona que las hojas aparezcan rojas o amarillas (amarillo es una combinación longitudes de onda en rojo y verde). Si los ojos fueran sensibles al infrarrojo, los árboles aparecerían más brillantes para esta longitud de onda (CCRS-Manual, 1999).

Por lo tanto, si se llevan a cabo monitoreos de reflectancias en infrarrojo cercano se puede determinar la salud o deterioro de la vegetación.

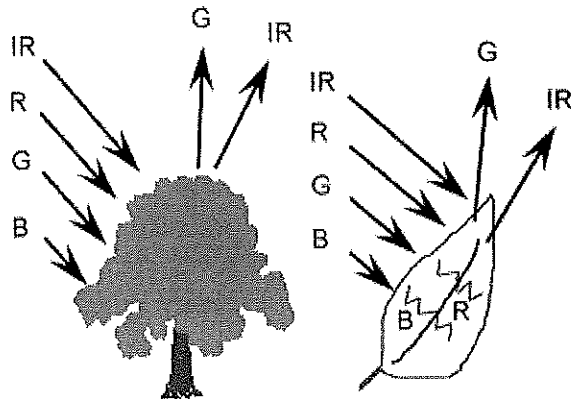


Figura II- 12. Interacción en vegetación (hojas) de la energía.

II.8.2. Interacción en agua.

Las ondas largas de radiación en el rango visible y cercano infrarrojo son absorbidas mayormente por el agua que la visible en ondas cortas. El agua típicamente parece azul o azul-verde debido a reflectancia más fuerte en estas longitudes de onda más cortas, y más oscuro si se acerca a la longitud de onda rojo o infrarrojo (CCRS Manual, 1999).

En un cuerpo de agua si se suspende sedimento en las capas superiores, se reflejara mayor cantidad de luz y proporcionara una apariencia más luminosa del agua. El color claro del agua mostrará un cambio en la longitud de onda más larga. En sedimento Suspendido (S), se puede confundir fácilmente con poca profundidad, en estos dos fenómenos parecen muy similares. En el caso de algas en agua, la clorofila de las algas absorbe más de la longitud de onda azul y refleja el verde, dando la apariencia del agua en color verde cuando las algas están presentes (Figura 13).

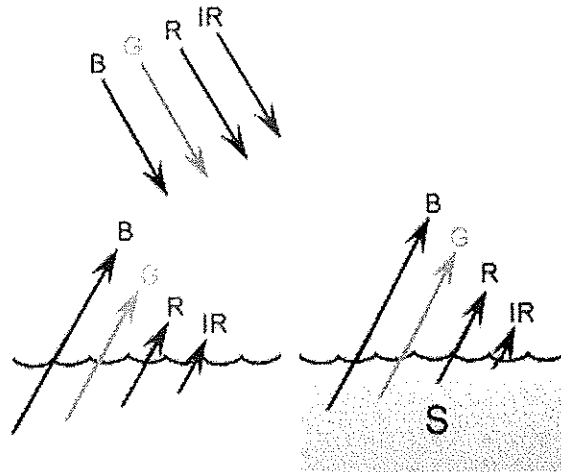


Figura II- 13. Interacción de la energía en el agua.

Podemos observar que en estos ejemplos que dependiendo de la complejidad del objetivo a observar, y las longitudes de radiación involucradas se pueden observar diferentes procesos y mecanismos de absorción, transmisión y reflexión. Midiendo la energía que es reflejada (o emitida) por los objetivos de una superficie en un rango amplio de longitudes de ondas podemos construir una **respuesta espectral** para cada objeto y la

comparación de patrones de respuesta a diferentes rasgos de una superficie (CCRS Manual, 1999).

Por ejemplo, la vegetación y el agua pueden reflejar energía similar en longitudes de onda visibles pero siempre son separadas por el infrarrojo. La respuesta espectral puede ser variable para el mismo tipo de objetivo y también puede variar con el tiempo (ejemplo: el verdor de las hojas).

Identificar donde se observa y entender los factores que influyen en la respuesta espectral de un objetivo, son componentes importantes para poder interpretar las características de la superficie basado en la interacción del espectro electromagnético.

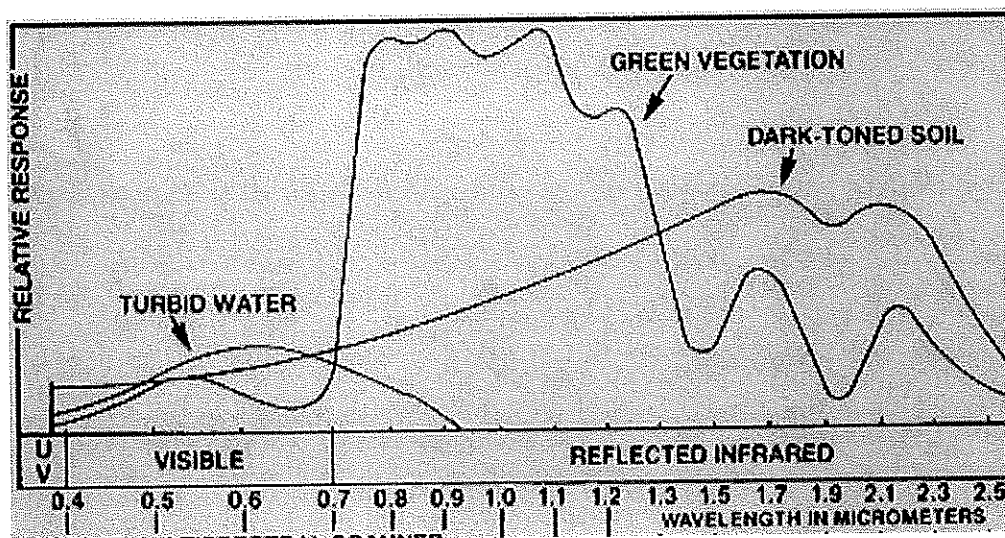


Figura II- 14. Respuesta de la radiación en la superficie terrestre.

El blanco puede aparecer cuando todas las longitudes de ondas son reflejadas de un objetivo y los colores percibidos en una combinación de interacción de radiaciones (absorción, transmisión, reflexión) por otra parte cuando un objeto absorbe todas las longitudes de ondas visibles aparece en color negro (CCRS Manual, 1999).

Con la definición de la relación de la energía con la vegetación se pueden describir los componentes principales para llegar a estimar las características de la cobertura vegetal.

ANTECEDENTES

En el Anexo I se describe la parte relacionada a la reflectancia, en donde se refiere a los elementos físicos que están detrás de los índices de vegetación y de la información digital cruda de los sensores remotos detallando elementos de importancia para la obtención de información de la superficie terrestre.

II.9. INDICES DE VEGETACIÓN.

Los índices de vegetación son mediciones espectrales robustas de la cantidad de vegetación presente en la superficie. Estos están típicamente envueltos en la transformación de dos o más bandas (rangos espectrales) diseñadas para detectar la variación de la vegetación, y permiten realizar comparaciones de datos espaciales temporales de la actividad fotosintética de la superficie terrestre (Tucker, 1991).

Diversos tipos de índices de vegetación son utilizados como una cuantificación radiométrica y como intermediarios en la evaluación de varios parámetros biofísicos de la vegetación (Baret y Guyot, 1991; Laguette, 1995).

Como:

- Indicadores estacionales e interanuales de los cambios de la vegetación.
- Estudios de detección de cambios (humanos y climáticos).
- Es una herramienta para el monitoreo y mapeo de vegetación.

Un índice de vegetación es un número generado por la combinación de rangos espectrales (bandas) proporcionados por sensores remotos, en donde la relación algebraica proporciona una relación de cantidad de vegetación (basado en las características del espectro emitido de la superficie) y la información grafica se representa en una imagen conformada por píxeles (Terrill, 1994)

Los métodos de procesamiento de imágenes de satélite tienen aplicación en el mapeo de vegetación, incluyendo su clasificación (el cruce de varias bandas) y la aplicación de relaciones de bandas. Muchos radios han sido probados, sin embargo utilizando datos de imágenes Landsat MSS encontró que el radio entre la banda rojo y cercano infrarrojo esta 7% a 14 % que la combinación verde / rojo que era el método previamente utilizado para este propósito (Tucker, 1979).

ANTECEDENTES

La componente principal que proporciona la combinación de radios de bandas es la detección de clorofila en hojas con biomasa verde. Estos radios fueron primeramente utilizados para la medición de densidad de vegetación.

Dentro del desarrollo de los índices de vegetación se han generado diferentes metodologías para tener diferentes aproximaciones a la cobertura vegetal (Tabla 9).

Índices de vegetación existentes son:

- Índices básicos.
- Índices minimizadores de efecto por suelo.
- Índices minimizadores de efecto por atmósfera.

Tabla II- 8. Índices de vegetación existentes y aplicados en la actualidad (Ermapper User Manual, 1996)

Índices básicos.	
Índice de vegetación y autor.	Índice de vegetación
Índice de vegetación proporcional (Jordan, 1969).	$RVI = \frac{NIR}{red}$
Índice de vegetación normalizado por diferencias. (Kriegler et al. 1969, y modificado por Rouse et al. 1973). en donde NDVI también se puede definir como:	$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$ $NDVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$
Índice de vegetación de onda corta. Es similar al calculo de NDVI, pero se aplica la banda de infrarrojo de onda corta por la banda en rojo (Cayrol, 1999).	$SWVI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$

Índice de vegetación de porcentaje infrarrojo. (Crippen, 1990).	$IPVI = \frac{NDVI + 1}{2}$ $IPVI = \frac{NIR}{NIR + red}$
Índice de vegetación de diferencias (Richardson & Everitt, 1992).	$DVI = NIR - red$
Índice de vegetación perpendicular (Richardson & Wiegand, 1977).	$PVI = SIN(a)NIR - COS(a)red$
Weighted difference vegetation index. (Clevers, 1988).	$WDVI = NIR - g * red$
Índices que reducen el efecto del suelo.	
Índice de vegetación ajustado por suelo. (Huete, 1988).	$SAVI = \frac{NIR - red}{NIR + red + L} (1 + L)$
Índice de vegetación transformado ajustado por suelo (Baret et al. 1989; Baret y Guyot, 1991).	$TSAVI = \frac{S(NIR - s * red + a)}{a * NIR + red - a * s + X * (1 + s * s)}$
Índice de vegetación modificado ajustado por suelo (Qi et al., 1994)	$MSAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L)$ donde $L = 1 - MSAVI$

Segundo índice de vegetación modificado ajustado por suelo (Qi et al., 1994).	$MSAVI2 = \left(\frac{1}{2}\right)(2(NIR + 1) - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8(NIR - red)})$
Índice de vegetación total ajustado por suelo. (Marsett et. al., 2000). donde: SWIR2 = banda 7 de Landsat ETM 7. L es igual 0.1 para los suelos de la zona de estudio (Huete, 1988, Qi et al, 1994) La ecuación 2 modificada por Watts-Santiago-León, (en proceso).	$1. SATVI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{RED}}{\rho_{SWIR} - \rho_{RED} + L} (I + L) - \frac{\rho_{SWIR2}}{2}$ $2. SATVI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{RED}}{\rho_{SWIR} - \rho_{RED} + L} (I + L)$
Índices de vegetación que reducen el ruido atmosférico.	
Índice global de monitoreo ambiental (Verstraete, 1991)	$GEMI = eta(1 - 0.25 \times eta) - \frac{red - 0.125}{1 - red}$ $eta = \frac{2(NIR^2 - red^2) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times red}{NIR + red + 0.5}$
Índice de vegetación de resistencia atmosférica. (Kaufman y Tanré 1992).	$ARVI = \frac{NIR - rb}{NIR + rb}$ $rb = red - gamma * (red - blue)$ En donde gama es usualmente igual a 1.0.

* Los índices en negritas de esta tabla son los utilizados en este trabajo.

II.10. Índices de vegetación a utilizar en el desarrollo de este trabajo:

II.10.1. NDVI (normalized difference vegetation index).

NDVI es un acrónimo para el índice de vegetación de diferencias normalizada. Es una formula en donde se utilizan dos bandas del satélite NOAA-AVHRR. Una de las bandas se encuentra en la región visible (VIS) donde es la banda 1 y otra esta en la región del cercano infrarrojo (NIR), donde es la banda 2, quedando la ecuación como se muestra en la tabla 9.

La razón del NDVI esta relacionada a la vegetación saludable que se refleja muy bien en la parte de cercano infrarrojo del espectro. Las hojas verdes tienen una reflectancia de 20% en el rango de (0.5 a 0.7) micrómetros (Verde a Rojo) y cerca del 60 % en el rango de 0.7 a 1.3 micrómetros (cercano infrarrojo). El canal visible nos proporciona un grado de corrección atmosférica. Los valores están normalizados en el rango de $-1 \leq \text{NDVI} \leq 1$.

El NDVI provee una estimación cruda de la salud de la vegetación y mediante el monitoreo proporciona cambios de la vegetación en el tiempo. Los posibles rangos de valores están dentro de -1 y 1 , pero el rango típico esta entre -0.1 para un área con nula vegetación a 0.6 para un área cubierta de esta.

En este índice de vegetación se utilizan los datos de NOAA-AVHRR 14 y SPOT4-VGT.

II.10.2. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).

El SAVI es el índice de vegetación ajustado por suelo, el cual fue propuesto por Huete (1988). Este índice es un híbrido entre los índices basados en radios entre bandas e índices perpendiculares. El razonamiento de este índice es que las líneas de igual vegetación no son paralelas y no todas convergen en un mismo punto. La construcción de este índice se inicio en mediciones de algodón y áreas de pastos con suelos oscuros y brillantes de fondo, en donde el ajuste "L" fue encontrado por el método de prueba error el

cual proporciona un igual índice de vegetación resultante para los suelos brillantes y oscuros (Tabla 9).

Donde L es un factor de corrección que va en el rango de 0 para alta densidad de cobertura y 1 para cobertura de vegetación baja. El factor comúnmente utilizado es 0.5 por ser un valor intermedio para la cobertura vegetal en características de pastizal.

Para este índice de vegetación se utilizarán los datos de NOAA-AVHRR 14 y SPOT4-VGT.

II.10.3. SATVI (Soil Adjusted Total Vegetation Index).

El índice de vegetación total ajustado por suelo fue desarrollado en USDA-ARS por Marsett *et. al.*, (2000), el cual tiene un buen ajuste en pastizales. La ecuación original del modelo se describe en la tabla 9.

En donde la ecuación original se modificó eliminando el componente de la banda 7 (Short Wave InfraRed, SWIR2) del satélite Landsat ETM 7, la cual los sensores utilizados no captan este rango espectral aplicando solamente para los datos de SPOT4-VGT (modificada por Watts y Santiago-León, 2001).

Con la modificación mencionada la ecuación final queda de la siguiente forma.

$$SATVI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{RED}}{\rho_{SWIR} - \rho_{RED} + L} (1 + L)$$

El propósito de la utilización de este índice de vegetación modificado es la de comparar los resultados obtenidos con los otros índices de vegetación. La banda de infrarrojo cercano nos puede ayudar a obtener información referente a la pérdida de humedad sobre la vegetación, y ayuda a determinar la senescencia de la vegetación al inicio de este proceso anual de la vegetación de pastizales.

II.11. Estimación de Biomasa: Modelo de Monteith.

Monteith (1972) fue de los primeros autores que introdujeron el concepto de "eficiencia de la producción"; sugirió que producción de la planta se pusiera en correlación con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida interceptada por dosel de la planta eventualmente, convertido a materia orgánica. Otras investigaciones han indicado que los índices de vegetación, tal como NDVI, está muy relacionado con la producción primaria neta (Goward *et. al.*, 1985); Por otra parte (Goward *et. al.*, 1987; Ruimy *et. al.*; 1994) ha mostrado de manera en consecuencia que un fragmento de dosel que absorbe radiación (RFA) puede ser linealmente relacionado con un índice de vegetación (NDVI, SAVI, etc.).

Basado en el trabajo de Prince (1991) se pretende aplicar el modelo de Monteith para estimar la biomasa producida, el cual está integrado por los componentes de la ecuación principal por índices de vegetación, NDVI (índice de vegetación de las diferencias normalizadas) obtenido de las bandas rojo e infrarrojo derivado de sensores remotos; además involucra la radiación fotosintéticamente activa (RFA ó PAR), absorbida por la vegetación en un intervalo de tiempo; el otro componente es la eficiencia " ε " la cual se estima del cociente de la relación de biomasa medida vs. Índice de vegetación entre la RFA en un tiempo " t " (Prince, 1991; Monteith *et. al.*, 1990).

$$Bt = \varepsilon \sum_{t < T} VI_t RFA_{av_t}$$

Donde:

Bt = Biomasa total estimada en $g\ m^{-2}$.

ε_t = Eficiencia en $g\ MJ^{-1}$.

VI = Índice de Vegetación (Sin unidades).

RFA_{av} = Radiación fotosintéticamente activa promedio en $MJ\ m^{-2}dia$ (se utilizara el promedio de la RFA en el periodo de solo crecimiento de la biomasa para este trabajo).

III. Metodología.

Para el desarrollo de esta tesis se aplicaron metodologías para la obtención de información de campo y el procesamiento de extracción de datos de sensores remotos, lo anterior para llevar a cabo una estimación precisa de biomasa en un área definida.

Se aplicaron metodologías de campo y de extracción de información de los sensores remotos, el procedimiento fue de obtener y extraer la información de las imágenes de satélite, datos meteorológicos y biomasa en campo, utilizando como apoyo la información obtenida del equipo de trabajo que estudio cada uno de los componentes (Tierra, Superficie y Atmósfera) en el proyecto binacional SALSA (Semi-Arid Land Surface and Atmosphere Program, 1998-1999) de los componentes mencionados dentro del programa SALSA

Basado en la evaluación de recursos naturales (Diallo, 1991) comparo los resultados de muestreo en campo y la información de índices de vegetación calculados de los sensores remotos, con el fin de conocer la relación con la superficie estimando productividad. Por otra parte, las imágenes de satélite con múltiples rangos espectrales, pueden ser utilizadas para delimitar diferentes tipos de vegetación, basadas en las características de su estado y estructura; por lo tanto es posible aplicar índices de vegetación que consisten en combinaciones de bandas espectrales y compararlos con datos de campo (Monteith y Unsworth, 1996; Huete y Jackson, 1994).

La combinación de metodologías se ha usado en la evaluación de pastizales en diferentes regiones del mundo, como son los estudios en Grasslands National Park en Canadá, en Dakota del Norte, Estados Unidos de Norteamérica y en la Cuenca del Río San Pedro en México, todos ellos dentro del proyecto Vegetation

METODOLOGÍA

Preparatory Programme (1998). También existen experiencias anteriores como el proyecto Hapex-Sahel en África en 1990-1992, (Goutorbe *et al.* , 1997).

El proceso que se siguió para llevar a cabo este trabajo se presenta como un diagrama metodológico integral dividido en tres componentes: Sensores remotos, Biomasa medida y Biomasa estimada, los cuales se desglosan también a continuación:

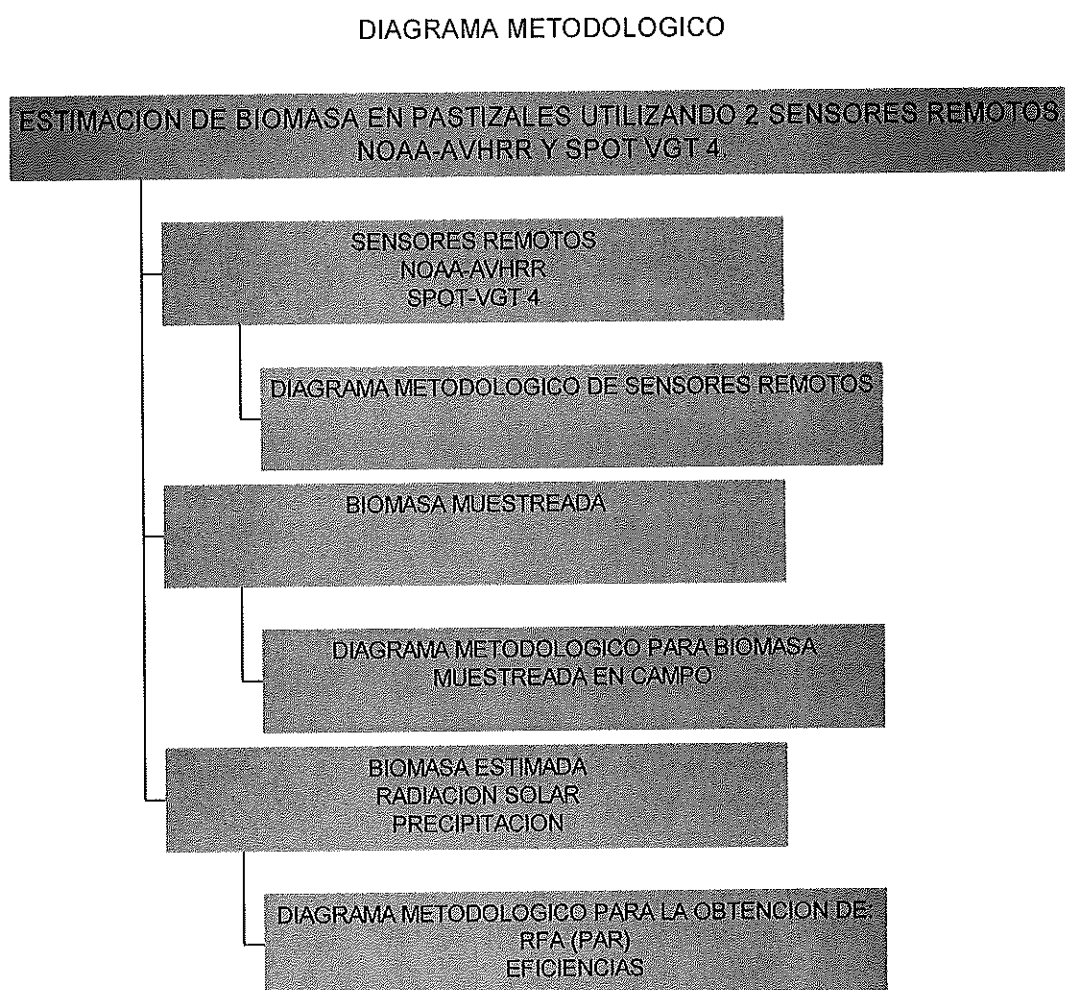


Figura III-1. Diagrama de la metodología a desarrollar.

Diagrama metodológico para sensores remotos.

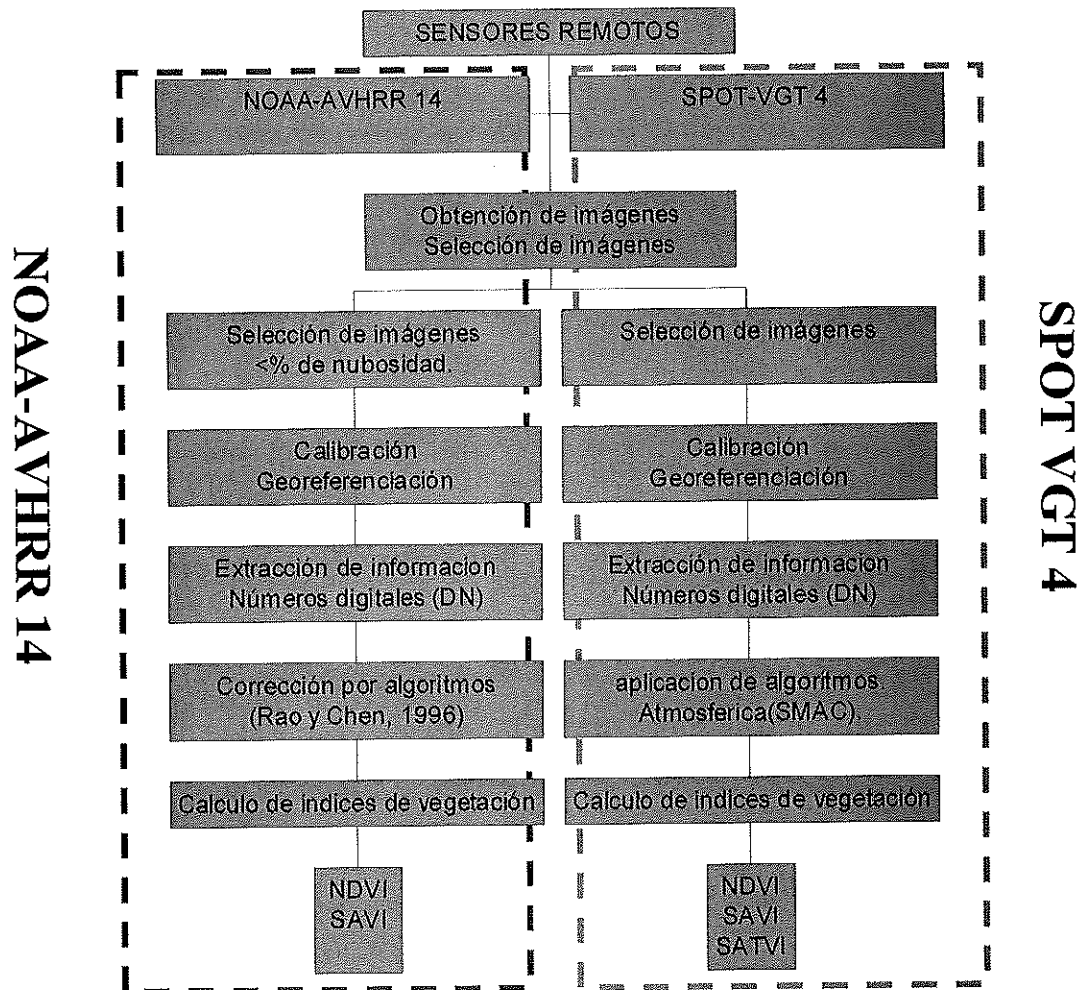


Figura III-2. Diagrama metodológico para sensores remotos.

III.1. Sensores remotos.

III.1.1. Obtención de las imágenes.

La obtención de las imágenes de satélites utilizadas en este trabajo se obtuvieron de dos fuentes, la primera para NOAA-AVHRR se obtuvieron de IMADES (Instituto del Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Estado de

Sonora) el cual tiene una estación receptora en la ciudad de Hermosillo, Sonora; las imágenes de SPOT-VGT se obtuvieron del proyecto SALSA, el cual obtuvo de la zona de estudio (Capítulo V) imágenes diarias en el periodo de Julio-Septiembre de los años de 1998 y 1999.

III.1.2. Selección de imágenes.

La selección de las imágenes para su análisis y obtención de la información contenida en sus bandas espectrales fueron elegidas a partir de la cobertura mínima de nubosidad, esta selección se llevo a cabo visualmente con el fin de tener imágenes con menor efecto en la atmósfera ocasionado por la nubosidad reduciendo la calidad de la información a obtener de la superficie.

III.1.3. Calibración y georeferenciación.

La calibración de las imágenes se aplica de acuerdo a los algoritmos existentes dentro del software utilizados (NOM; Noaa Operador Manager) para el caso de NOAA-AVHRR la información se obtuvo directamente del archivo original, el cual tiene en su estructura la referencia geográfica de toma de la escena en coordenadas geográficas latitud-longitud. Para el caso de SPOT-VGT las imágenes proporcionadas por el proyecto SALSA contienen las referencias geográficas de escena.

III.1.4. Extracción de la información.

La información extraída de las imágenes de satélite (NOAA-AVHRR y SPOT-VGT) consiste obtener las bandas espectrales y de los ángulos cenitales y azimutales del satélite y del sol (Capítulo III), lo anterior para poder aplicar después la corrección angular y atmosférica por algoritmos para el caso de NOAA-AVHRR (NOM, 2000; Rao, 1996) y el caso de SPOT-VGT (Berthelot *et al.*, 1994).

III.1.5. Corrección por algoritmos.

La corrección aplicada a las imágenes de los satélites NOAA-AVHRR y SPOT-VGT consiste en tener la información de la superficie (radianzas, reflectancias) y por medio de los algoritmos corregirlos con los ángulos de vista del satélite y de la posición del sol (Anexo I), estos aplicando para las imágenes de NOAA-AVHRR (Rao y Chen, 1996) y SPOT-VGT (Rahman, 1994).

III.1.6. Calculo de índices de vegetación.

Los índices de vegetación serán calculados a partir de las bandas obtenidas de las imágenes de satélite de los sensores remotos utilizados, en donde los principales rangos espectrales a utilizar serán el rojo, infrarrojo e infrarrojo de onda corta (Capítulo III). Cada uno de los índices de vegetación a obtener esta descrito en el Capítulo III, en donde cada uno tiene componentes diferentes, en el caso de NDVI solo requiere de las bandas espectrales en rojo e infrarrojo; el índice de vegetación SAVI al igual que NDVI requiere de las dos bandas anteriormente mencionadas pero se agrega un valor conocido como línea de suelo designada con la letra "L", este valor va de 1.0 a 0.0 donde el valor uno indica mayor cobertura de vegetación y al decrecer son áreas con vegetación mas dispersa.

Respecto al índice de vegetación SATVI aplicado en este trabajo, se aplica considerando las modificaciones a la ecuación original propuesta por Marsett *et. al.*, 2000, para imágenes de satélite Landsat ETM, con la modificación realizada por Watts y Santiago-León, (en proceso) para poder obtener los índices utilizando imágenes de SPOT-VGT.

Los valores obtenidos de índices de vegetación (NDVI, SAVI y SATVI) obtenidos de las imágenes NOAA-AVHRR y SPOT-VGT, se ordenaran para presentarlos

METODOLOGÍA

por día del año (DOY), lo anterior para localizar los índices de vegetación correspondientes a la biomasa medida en campo durante los años de 1998 y 1999.

Diagrama metodológico para biomasa medida en campo.

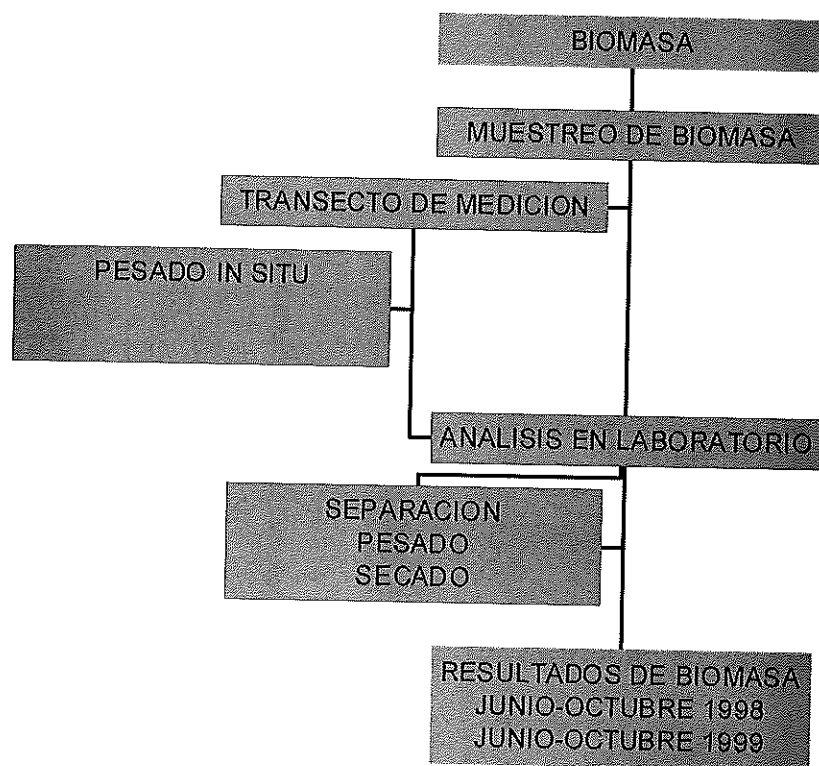


Figura III-3. Diagrama metodológico de biomasa medida en campo.

III.2. Biomasa medida en campo.

III.2.1. Muestreo de biomasa.

El muestreo de biomasa se llevara a cabo utilizando la metodología de muestreo sobre un transecto de 1 km semanalmente, en donde con un cuadro de PVC de 1 m² será puesto sobre la superficie y se cortara la biomasa existente al ras de suelo, sin destruir las raíces (solo biomasa). Los sitios de muestreo corresponderán a cada 200 m, esto es de los 1000 m se obtendrán 5 muestras representativas. Cada muestra obtenida de cada uno de los puntos a cada 200 m será depositada en bolsas de plástico y después pesadas en el sitio. Cabe señalar que durante los días con lluvia no era recomendado llevar a cabo el muestreo de biomasa por la posible alteración de las muestras a obtener a consecuencia de la lluvia (Diallo, 1991).

Al haber pesado la biomasa en campo se tiene el peso total, de esta manera el material obtenido en campo se separa en laboratorio en, biomasa verde, seca y amarilla; la separación de la biomasa se basa en un criterio subjetivo en cuanto al color del pasto cortado. Una vez ya separadas la biomasa en las tres clases mencionadas se pesan y seca en un horno durante 72 hrs. a 60 °C, para obtener el peso seco del material separado en peso verde seco (PVS) y peso amarillo seco (PAS), los resultados de biomasa verde seca se muestran en el Capítulo V. en las tablas (2 y 3)

Para la medición de biomasa se realizaron muestreos durante todo el desarrollo del pastizal, desde la primera precipitación hasta el término de su etapa de crecimiento y todo su ciclo vegetativo; las fechas de muestreo aparecen en la Tabla 1 del Capítulo IV,

Diagrama metodológico para la estimación de biomasa.

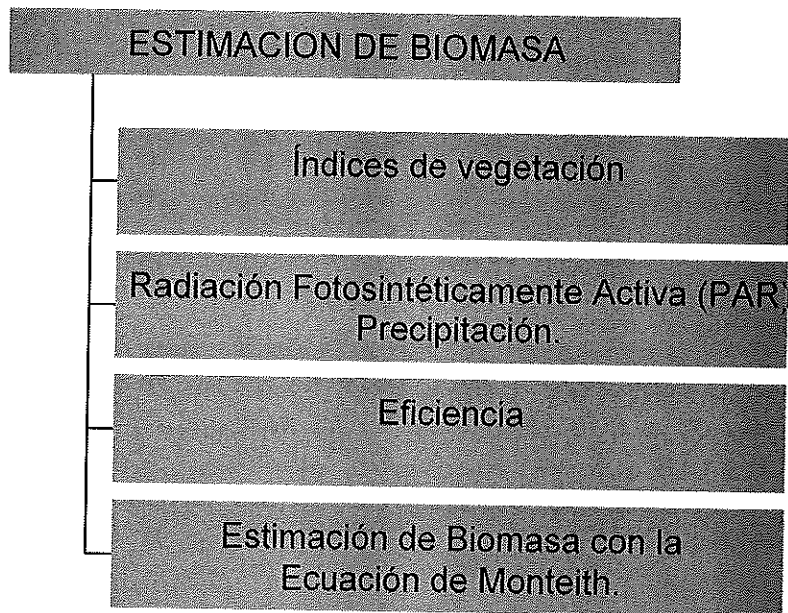


Figura III-4. Diagrama de metodología en la estimación de biomasa

III.3. Estimación de biomasa.

III.3.1. Índices de vegetación.

Los índices de vegetación descritos en el diagrama de sensores remotos (Figura 2) son obtenidos para los datos de biomasa correspondiente, en donde los índices de vegetación se acumulan para tener una descripción de la evolución de la biomasa medida en campo.

III.3.2. Radiación fotosintéticamente activa (RFA).

La información de radiación solar se obtuvo utilizando un radiómetro Kipp & Zonnen modelo CNR1 de radiación neta, el cual mide la radiación solar en onda corta e infrarroja. El radiómetro fue instalado durante 3 años en la zona de estudio el cual estaba conectado a un almacenador de datos CR10X marca

METODOLOGÍA

Campbell Scientific con capacidad de almacenamiento de un millón de datos en memoria física de la cual, cada día se respaldaba la información a una base de datos.

La obtención de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) se obtuvo utilizando la radiación de la onda corta (R_s), donde el 48% de esta es la radiación fotosintéticamente activa (Ruimey *et. al.*, 1994).

Las unidades en las cuales el radiómetro de campo obtuvo las mediciones están dadas en Watts $W\ m^{-2}$, por lo cual al aplicarse al análisis de la estimación de biomasa es necesario convertirla a unidades de $MJ\ m^{-2}/\ día$; por lo tanto la conversión se aplicó considerando la ecuación siguiente para la obtención de RFA en $MJ\ m^{-2}/\ día$.

$$RFA = R_s (\text{Watts } m^{-2}) * \text{Unidad de tiempo (en segundos)} / 1.10^{06} \text{ J.}$$

Quedando de la siguiente manera el resultado:

$$RFA = W\ m^{-2} * \text{Dia (Seg)}; RFA = MJ\ m^{-2} \text{ Dia.}$$

III.3.3. Precipitación.

El equipo de toma de datos de precipitación se llevaba a cabo con un pluviómetro de balancín digital marca Texas Electronics modelo TE525MM, el cual almacenaba la información a un almacenador de datos marca Campbell Scientific modelo CRX-10 datalogger. Esta instrumentación instalada en la zona de estudio, era mantenida por el equipo de trabajo del proyecto SALSA (1997-1999), la información se obtenía vía conexión directa al almacenador de datos diariamente.

III.3.4. Eficiencias.

Las eficiencias tienen unidades de g / MJ^{-1} , se obtuvieron aplicando una regresión a los datos de biomasa vs. Índices de vegetación, en donde se obtuvo la pendiente referida al origen "0", donde se obtiene una ecuación $y = mx$, en donde el valor de m se divide entre la radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) para el periodo de análisis.

Ejemplo: considerando tres valores para cada eje y cruce por cero.

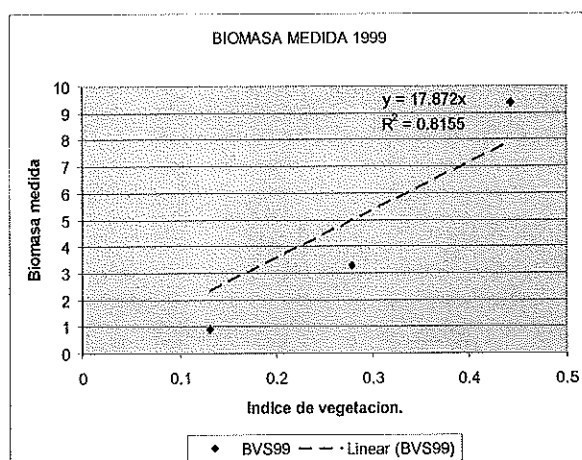


Figura III-5. Ejemplo de graficado de biomasa medida vs. Índice de vegetación

Dado los valores proporcionados de biomasa medida e índices de vegetación a un tiempo t se lleva a cabo un grafica de los mencionados en el formato de grafica de dispersión de datos en XY, de donde se obtiene la ecuación de la línea entre estos valores, de $y = 17.872x$; de esta ecuación se selecciona el valor de 17.872 el cual tendrá unidades de g / m^2 los cuales se dividen entre la RFAav ($MJ m^{-1} Día$), obteniendo valores de $g MJ^{-1}$.

En los casos de eficiencias constantes y por etapas, las primeras consideran a un tiempo t a todo el muestreo como una sola toma de datos obteniendo la

ecuación de la recta, aplicando lo anteriormente descrito se obtiene la eficiencia para todo los datos graficados. En cambio por etapas considera etapas de tiempos ($t + 1$), esto es que el análisis se lleva cabo por bloque de datos, los cuales se delimitaran por incrementos.

Cabe señalar que el primer análisis en el graficado de valores en x y y considera el cruce por cero, en la siguiente comparación y ecuación de la recta se definirá a no cruzar por cero, esto es que los valores estarán ya avanzando en el tiempo si tener el mismo inicio.

Obtenidos estos valores se procede a aplicar el modelo de Monteith considerando los valores anteriormente descritos.

III.4. Estimación de biomasa.

III.4.1. Modelo de Monteith.

El modelo de Monteith considera los valores de índices de vegetación (NDVI, SAVI, SATVI), así como los valores de eficiencias por etapas o constantes (e) y la radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) como se describe en el Capítulo III.

Con la aplicación de este modelo en los escenarios propuestos de eficiencias (constantes y por etapas) y los índices de vegetación, se calcularan los valores de biomasa estimada comparando los resultados de esta con la biomasa medida en campo.

IV. Resultados.

IV.1. Descripción del Área de estudio.

El sitio de estudio se encuentra dentro de la cuenca del Río San Pedro, misma que está compartida entre México y Estados Unidos de Norteamérica. Aproximadamente un tercio de la cuenca del Río San Pedro se encuentra en el estado mexicano de Sonora y las otras dos terceras partes restantes se localizan en el estado de Arizona, EUA.

Específicamente, la zona de estudio se encuentra ubicada geográficamente en la porción sur de la cuenca del Río San Pedro, que es considerada una de las zonas menos perturbada, dado que los ganaderos sin seguir un programa de manejo y aplicando solamente el conocimiento empírico han llegado a lograr un equilibrio razonable en el uso del pastizal.

Esta porción de la cuenca del Río San Pedro se localiza entre los municipios de Cananea, Naco y Santa Cruz en Sonora. (Figura. 1).

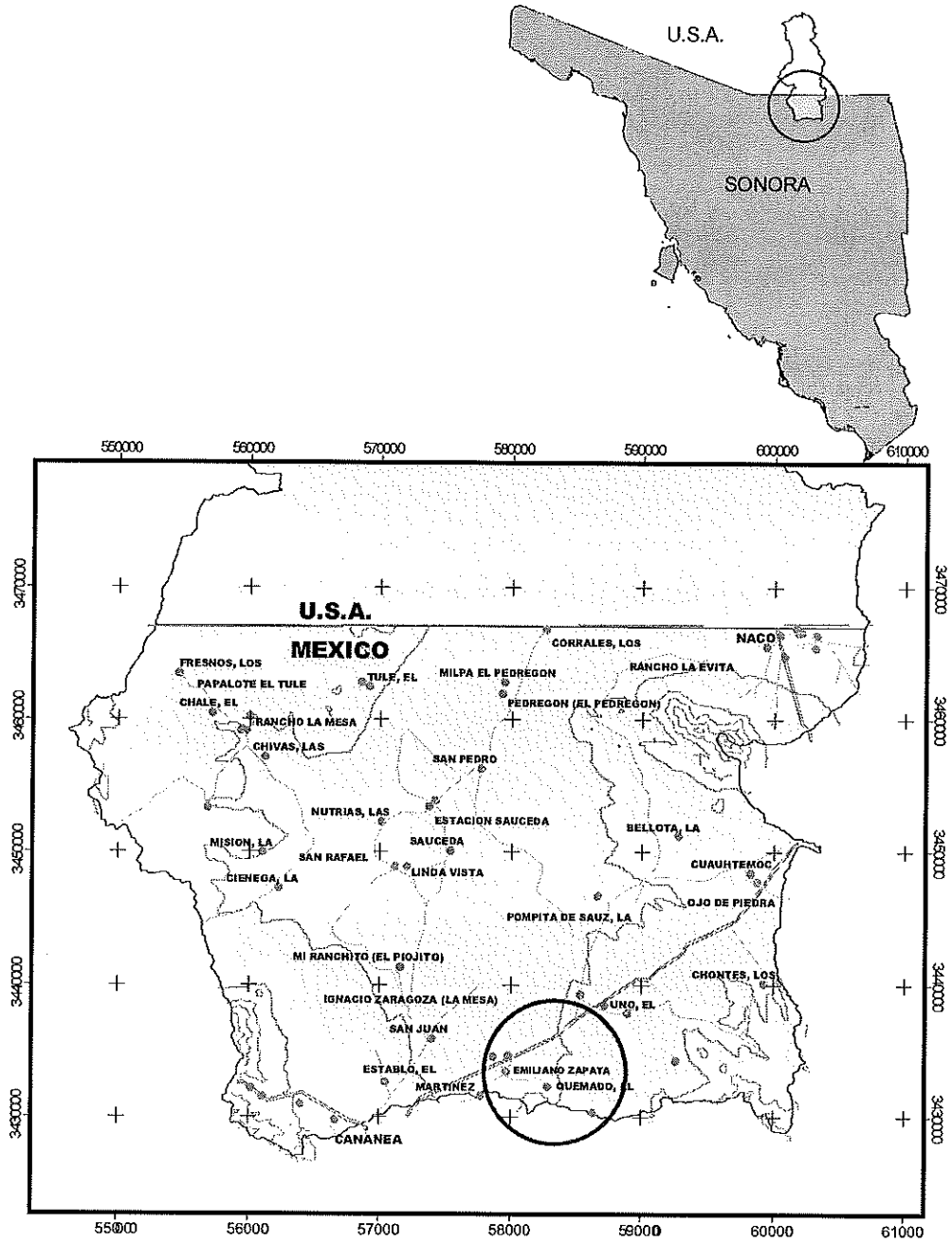


Figura IV-1. Ubicación de la cuenca del Río San Pedro y zona de estudio, en los estados de Arizona (E. U.) y Sonora (México).

El sitio de muestreo se encuentra 3 km. al sur-este del Ejido Emiliano Zapata en el municipio de Cananea, en las coordenadas geográficas ($-110^{\circ}08'45$ W; $31^{\circ}01'30$ N; a una elevación 1460 m), a 12 km. al Sureste de la ciudad de Cananea, Sonora.

IV.1.1. Fisiografía.

La parte alta de la cuenca en donde se encuentra la zona de pastizales con mejor calidad es en su mayor parte un valle aluvial inter montano, en donde también hay combinaciones de llanura con lomeríos en la parte media alta de la cuenca con sierras altas y sierras plegadas en menor proporción. (INEGI, 1985).

IV.1.2. Clima.

El clima en la zona de la cuenca alta del Río San Pedro es de dos tipos: en la parte de lomeríos y sierras se define como semi-seco (BS1 kw (x'), templado con verano cálido. Con temperatura media anual de 12°C a 18°C y mínima media anual de 3°C a 1°C . Con régimen de lluvias en verano (Junio-Septiembre) con rangos de precipitación anual de 400 a 550 mm, con porcentaje mayor del 10% de lluvias invernales (INEGI, 1985). En la zona baja coincidiendo con la ubicación del Río se localiza el clima seco (Bso kw (x') el cual tiene las mismas características de precipitación, temperatura y distribución de lluvias en año (INEGI, 1985).

IV.1.3. Geología.

La geología de la zona esta principalmente compuesta por conglomerados del cenozoico en la zona de lomeríos y pastizales, aluvión del cuaternario en la rivera del Río, asociación de lutita y areniscas entre las sierras, asociación de arenisca y tobas ácidas en la parte baja de las sierras, y en menor

proporción areniscas del mesozoico, calizas del cretácico, tobas y granitos dispersas en las inmediaciones de las sierras, (INEGI, 1993).

IV.1.4. Edafología.

Las características de los suelos presentes en la zona de la cuenca descritas de acuerdo con el POET (Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Sonora, 1995) son las siguientes:

Valle ínter montano:

Suelos de textura media, delgados limitados por roca coherente el cual está compuesto por suelos Feozem háplico, Regosol Eútrico, Litosol, Rendzina, Regosol calcárico, Vertisol crómico, Vertisol háplico, Cambisol eútrico y Cambisol crómico.

Sierras plegadas:

Se encuentran suelos de textura media, poco profundos compuesto por Feozems háplico y Regosol eútrico, los cuales están restringidos a la zona de

Zona del Río San Pedro y arroyos:

En muy baja proporción se presentan los suelos de textura fina, delgados, limitados por rocas coherentes compuesto por: Feozem háplico, Litosol, Vertisol crómico, Vertisol háplico, Regosol eútrico y Regosol calcárico.

IV.1.5. Vegetación.

La vegetación de la zona de estudio esta caracterizada por pastos perennes, principalmente del genero *Bouteloua spp.* y en menor proporción *Eragrostis spp.*, en el suelos de tipo arenoso, con 67% de arena y 12% de arcilla (Cayrol, 1999).

IV.1.6. Actividades Productivas.

Las principales actividades productivas en orden de importancia para esta zona sobre la cuenca alta del Río San Pedro es la minería como actividad primordial para la mayoría de la población, otra actividad importante es la ganadería extensiva y por ultimo la agricultura la cual esta restringida a las áreas con suelos depositados (INEGI, 1993).

IV.2. Índices de vegetación derivados de los sensores remotos.

IV.2.1. Índices de vegetación AVHRR - NDVI.

Los datos de índices de vegetación de NOAA-AVHRR se delimitaron al periodo de crecimiento de biomasa muestreada en campo. Lo anterior para que la biomasa mediada en campo se pudiese comparar directamente. A continuación se muestran los índices de vegetación para los periodos de muestreo de biomasa para los años 1998 y 1999 (Figura 2 y 3).

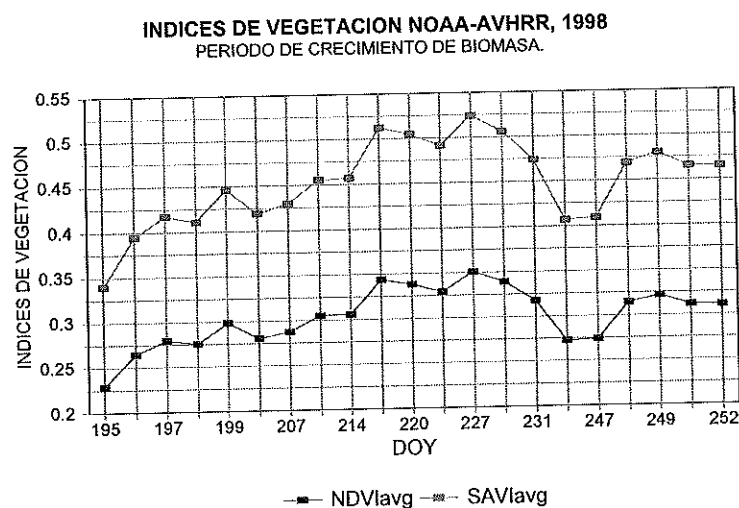


Figura IV-2. Índices de vegetación de NOAA-AVHRR para 1998.

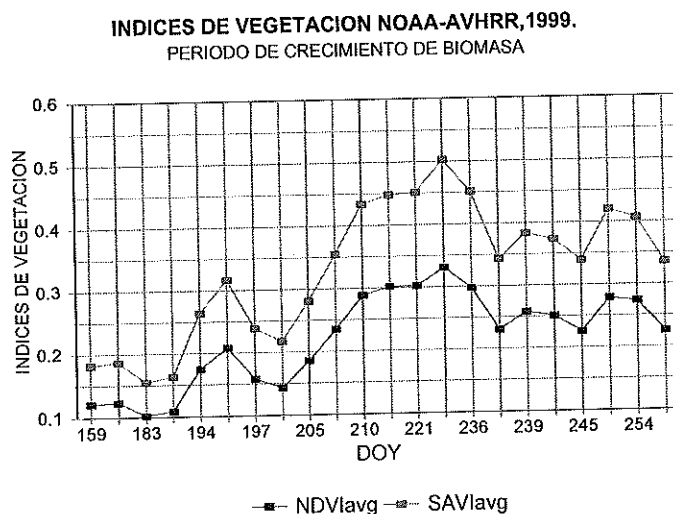


Figura IV-3. Índices de vegetación de NOAA-AVHRR para 1999.

RESULTADOS.

Los resultados obtenidos de los índices de vegetación nos permite compararlos con la biomasa medida, con esto podemos obtener una correlación de biomasa medida vs. Índices de vegetación.

En la tabla 8 se presentan los resultados de la correlación de índices de vegetación obtenidos comparados con la biomasa muestreada para el periodo de solo crecimiento de la biomasa. Estos presentan una correlación muy baja para ambos sensores remotos, en cambio si la biomasa la comparamos con los índices de vegetación acumulados presentan una correlación mayor (Tabla 9).

La comparación de los índices de vegetación con la biomasa nos permitirá la selección o la exclusión de los índices de vegetación (VI) que tenga mayor correlación con la biomasa, una vez seleccionado VI nos permite llevar a cabo el siguiente paso en el análisis.

IV.2.2. Índices de vegetación SPOT –VGT.

Los índices de vegetación que se muestran en las figuras a continuación son los resultados obtenidos al igual que los de NOAA-AVHRR para el periodo de crecimiento de biomasa para los años de 1998 y 1999 (Figura 4 y 5).

En los índices de vegetación que se muestran para el sensor remoto SPOT-VGT son NDVI, SAVI y SATVI, de las ecuaciones en el capítulo III.

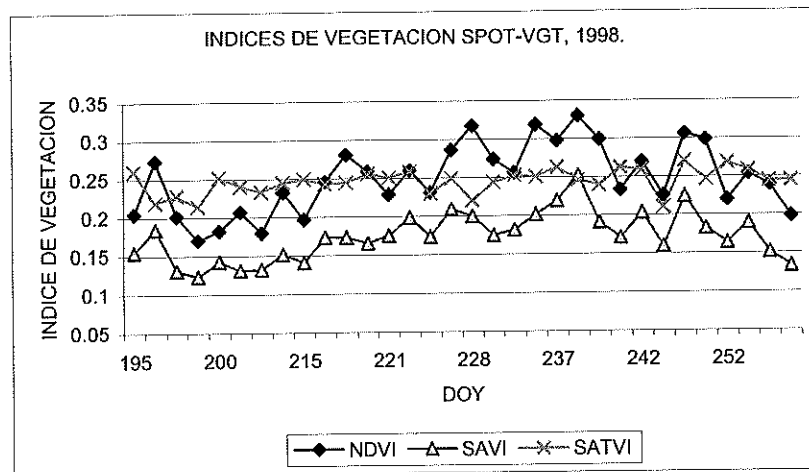


Figura IV-4. Índices de vegetación de SPOT-VGT 1998.

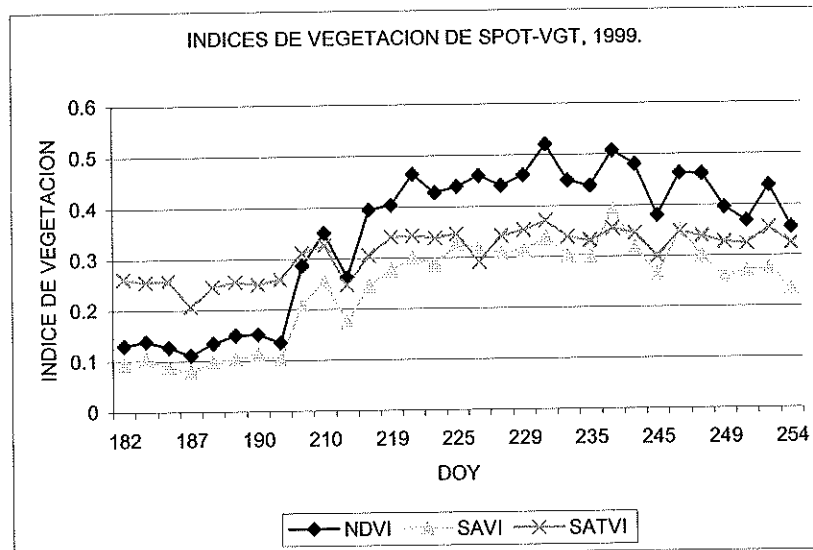


Figura IV-5. Índices de vegetación de SPOT-VGT 1999.

IV.3. Biomasa medida.

IV.3.1. Biomasa obtenida en el muestreo.

La biomasa muestreada correspondiente a los años de 1998 y 1999 correspondieron al inicio de la precipitación de los dos años, la biomasa medida en campo y la fecha se muestra en la tabla siguiente (Tabla 1).

Tabla IV-1. Días de biomasa muestreada en campo en 1998 y 1999 (SALSA, 2000).

Día.	Mes.	Año.	Día.	Mes.	Año.
16	Julio	1998	02	Julio	1999
23	Julio	1998	09	Julio	1999
29	Julio	1998	16	Julio	1999
5	Agosto	1998	23	Julio	1999
12	Agosto	1998	30	Julio	1999
19	Agosto	1998	06	Agosto	1999
26	Agosto	1998	12	Agosto	1999
06	Septiembre	1998	20	Agosto	1999
12	Septiembre	1998	27	Agosto	1999
20	Septiembre	1998	03	Septiembre	1999
27	Septiembre	1998	11	Septiembre	1999
03	Octubre	1998	17	Septiembre	1999
10	Octubre	1998	24	Septiembre	1999
			02	Octubre	1999
			08	Octubre	1999
			15	Octubre	1999
			22	Octubre	1999

Tabla IV-2. Biomasa medida en campo en días del año juliano (DOY) en 1998 (SALSA, 1999).

Día.	Mes.	DOY	BVS98 (g m ⁻²)
16	Julio.	197	14.4
23	Julio.	204	14.8
29	Julio.	210	23.7
5	Agosto.	217	32.2
12	Agosto.	224	34.9
19	Agosto.	231	64.6
26	Agosto.	238	61.6
6	Septiembre.	249	71.8

Tabla IV-3. Biomasa medida en campo en días del año juliano (DOY) en 1999 (SALSA, 1999).

Día.	Mes.	DOY	BVS99(g m ⁻²)
2	Julio.	183	0.9
9	Julio.	190	3.3
16	Julio.	197	9.4
23	Julio.	204	16
30	Julio.	211	27.7
6	Agosto.	218	43
12	Agosto.	224	82.3
20	Agosto.	232	94
27	Agosto.	239	100.8
3	Septiembre.	246	103.7
11	Septiembre.	254	113

Los días en los cuales se obtuvieron datos de biomasa en el periodo de solo crecimiento se muestran en las tablas (2 y 3).

La biomasa medida en campo para todo el año se presenta en las figuras 6 y 7 en donde se puede apreciar las fechas limites de crecimiento en los dos años, donde la etapa de solo crecimiento se delimita hasta donde la biomasa medida dejar incrementarse y empieza a disminuir (senescencia).

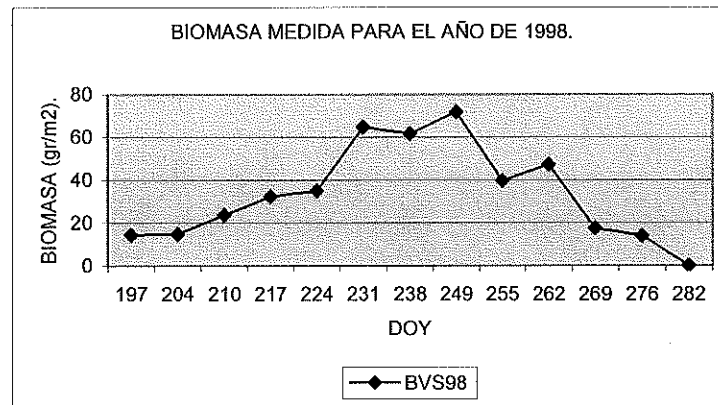


Figura IV-6 Biomasa medida para el año de 1998.

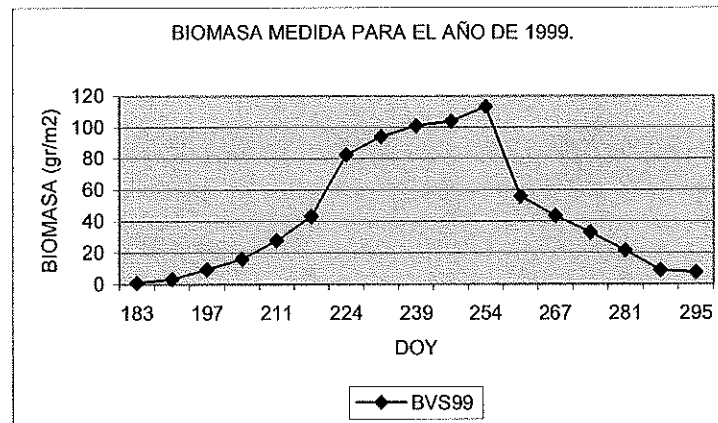


Figura IV-7 Biomasa medida para el año de 1999.

2.2. Comparación de biomasa medida en campo con precipitación para los años de 1998 y 1999.

La precipitación anual para 1998 y 1999 se muestran en las figuras 10 y 11; en donde se puede observar que en el año de 1998 las precipitaciones fueron más dispersas, en comparación con el año de 1999 cuando fueron más constantes.

Los resultados obtenidos de biomasa medida en gramos para el año de 1998 son menores a los encontrados en 1999. Comparando los resultados de biomasa medida con la precipitación acumulada en la zona de estudio gráficas 12 y 13, podemos observar que la respuesta de la vegetación a la precipitación tiene una relación muy estrecha; cuando se conoce que las componentes esenciales del desarrollo de la vegetación para la zona de estudio son suelo, agua y radiación solar como fuentes de recursos.

La comparación de la biomasa medida para el periodo de solo crecimiento con la precipitación total, es un componente que nos permite suponer que la baja producción de biomasa en el año de 1998 puede ser a consecuencia de la baja precipitación en los primeros días, caso contrario a lo ocurrido en 1999 se aprecia mayor precipitación al inicio del crecimiento de la biomasa y mayor cantidad de biomasa medida.

Con lo anterior en la Tabla 4 tenemos las etapas de crecimiento de la biomasa, donde esta se delimito en base a las características de la curva de crecimiento (Figura 8 y 9).

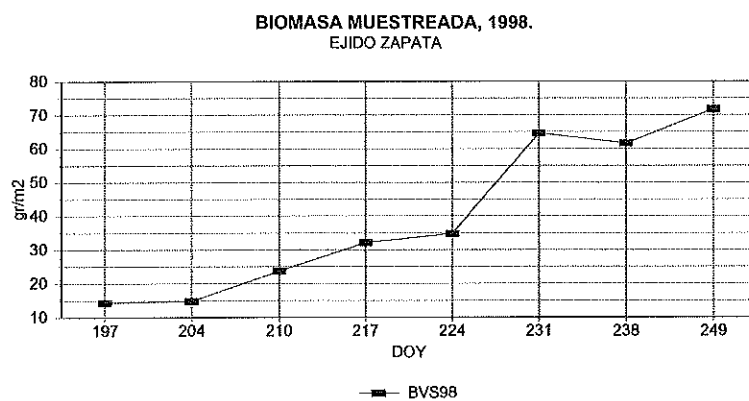


Figura IV-8 Biomasa muestreada en campo, 1998.

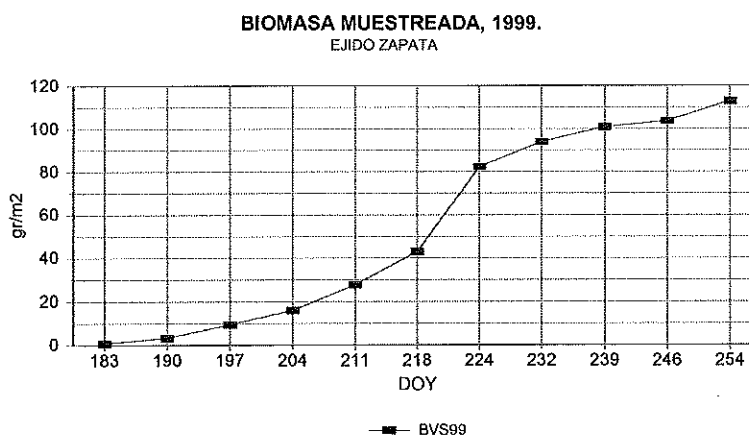


Figura IV-9 Biomasa muestreada en campo, 1999.

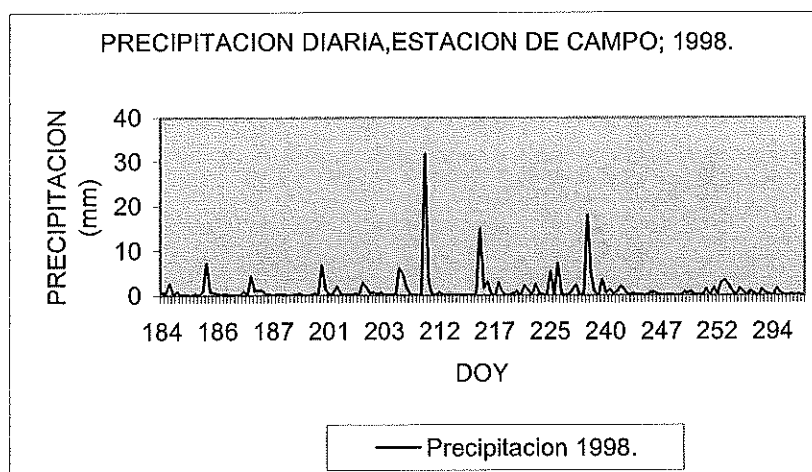


Figura IV-10 Precipitación en la zona de estudio en el año de 1998.

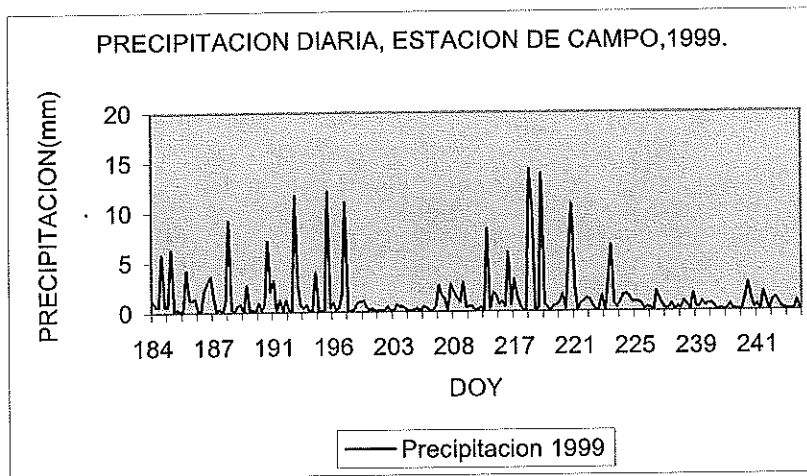


Figura IV-11 Precipitación en la zona de estudio en el año de 1999.

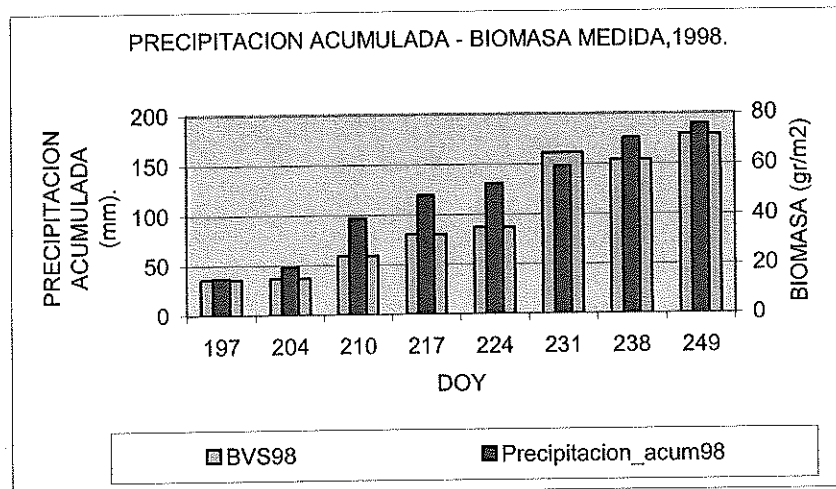


Figura IV-12 Precipitación acumulada vs. Biomasa medida, 1998.

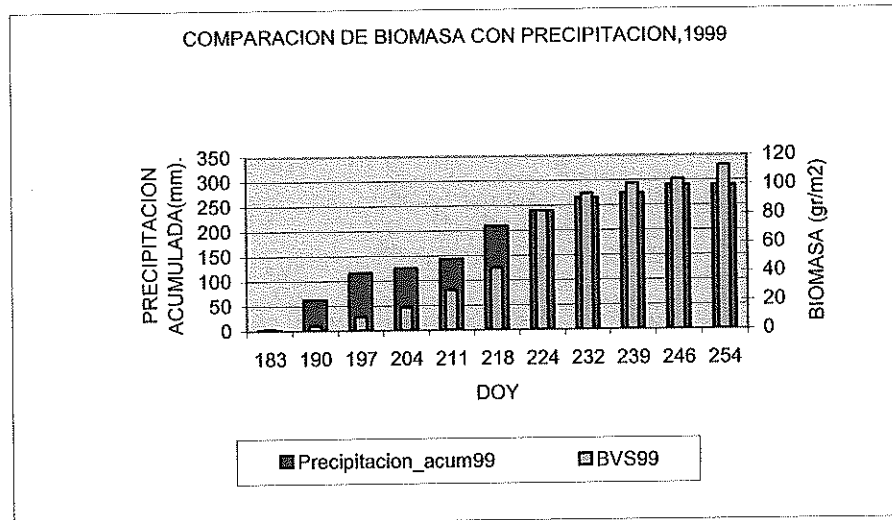


Figura IV-13 Precipitación acumulada vs. Biomasa medida, 1999.

Tabla IV-4. Etapas de crecimiento delimitadas en días del año (DOY) para la biomasa medida en campo.

AÑO	ETAPA	RANGO EN DIAS DEL AÑO (DOY)
1998	1	197-217
	2	224-231
	3	238-249
1999	1	183-211
	2	218-232
	3	239-254

IV.4. Estimación de biomasa.

IV.4.1. Radiación fotosintéticamente activa (RFA).

La radiación fotosintéticamente activa (RFA) obtenida para la zona de estudio en los años de 1998 y 1999 se presenta en las figuras 14 y 15. Los valores observados de radiación se obtuvieron en las unidades de Watts por metro cuadrado ($W\ m^{-2}$). Encontrándose valores de radiación de onda corta (R_s) promedios en 1998 de $222.30\ W\ m^{-2}$ y en 1999, $212.90\ W\ m^{-2}$.

Aplicando la metodología descrita en el capítulo IV para la obtención de la RFA y conversión a Mega Joules por metro cuadrado al día ($MJ\ m^{-2}\ día$) se tiene que la radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) obtenida para el año de 1998 en el periodo de crecimiento de la biomasa fue mayor en comparación con la RFAav que se presentó en el año de 1999, lo anterior solamente para el periodo de crecimiento de biomasa.

Los valores de radiación de onda corta obtenidos en la zona de estudio para el año de 1998 fueron en promedio diario de $222.30\ W\ m^{-2}$; en el caso de 1999 el promedio diario fue de $212.90\ W\ m^{-2}$. Los valores en mega joules de la radiación fotosintéticamente activa se muestran en la (Tabla 5).

Este resultado nos permite confirmar que las variaciones de radiación en el área de estudio son bajas y que la radiación en el periodo de estudio es constante a excepción de los días que son nublados. Apoyado en lo anterior se concluye que la RFA no es una limitante directa en el desarrollo de los pastizales en la zona de estudio.

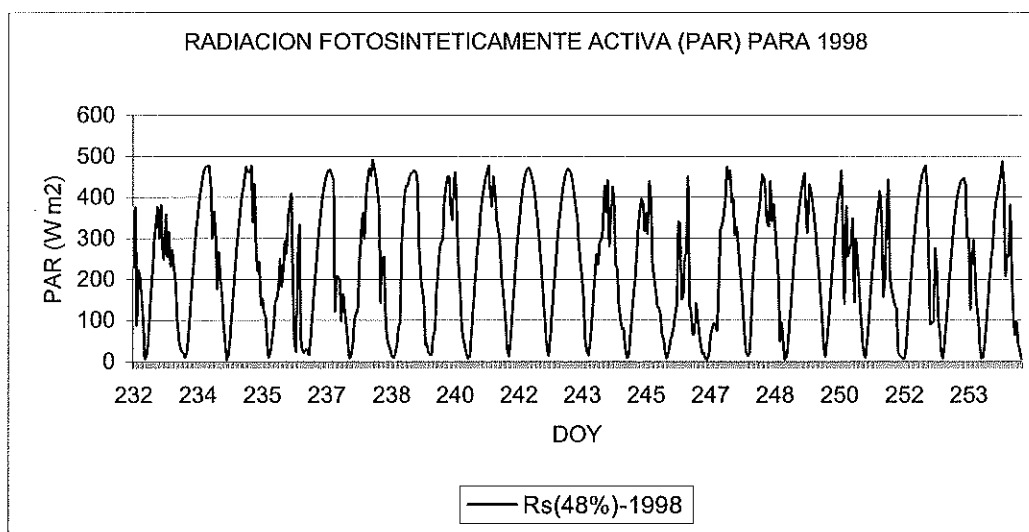


Figura IV-14. Radiación fotosintéticamente activa (RFA) para el año de 1998.

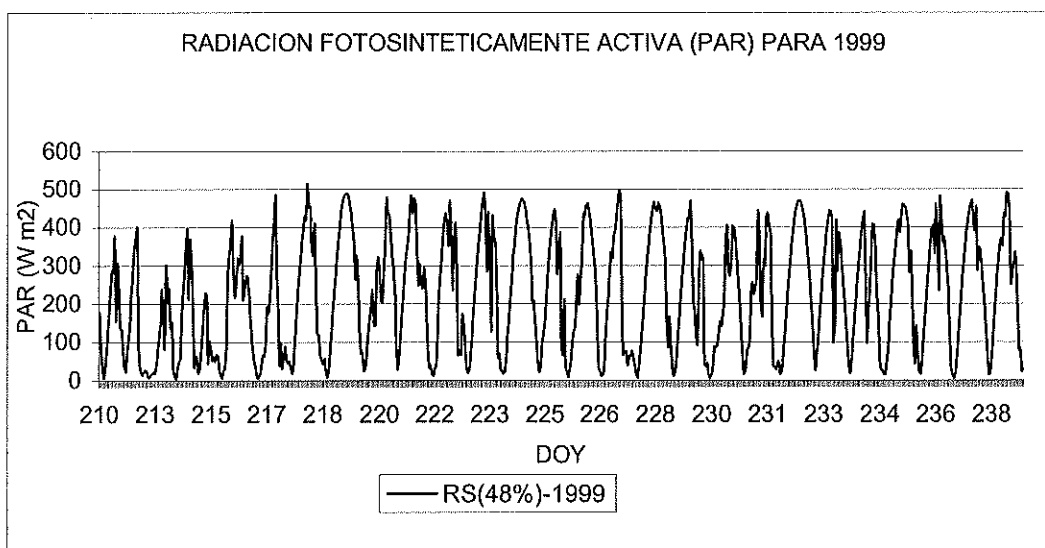


Figura IV-15. Radiación fotosintéticamente activa (RFA) para el año de 1999.

Tabla IV-5. Radiación fotosintéticamente activa media (RFAav) para 1998 y 1999.

Año.	RFAav ¹ (M J m ⁻² /Día)
1998	19.21
1999	18.40

IV.5. Eficiencias.

Basado en la relación de biomasa medida y los índices de vegetación acumulados obtenidos, se obtiene como resultado la eficiencia (ε) la cual nos permite conocer las características de capacidad de desarrollarse la vegetación y aumentar su biomasa.

A continuación se presentan las eficiencias² obtenidas de la biomasa medida de 1998 y 1999 contra los índices de vegetación obtenidos de los sensores remotos para los años de 1998 y 1999.

Los resultados de eficiencias que se presentan en las tablas 6 y 7, se indican las eficiencias por etapas y constante. Las eficiencias constantes tienen la finalidad de tener la primera aproximación en el modelo de Monteith en donde se considera que la vegetación tenga un crecimiento constantes, caso contrario a la eficiencia por etapas en donde se marcan fases de crecimiento basado en la observación de los datos obtenidos en campo, lo cual permite tener una estimación mas precisas de la biomasa.

Las eficiencias constantes obtenidas esta basado en el procedimiento descrito en la metodología del capítulo IV de eficiencias, en donde se calculan para todo el periodo de crecimiento; caso contrario a la metodología de eficiencia por etapas descritas en el capítulo IV.

¹ PAR, Radiación Fotosintéticamente Activa, se utiliza la media encontrada para cada año en análisis.

² La eficiencia esta en unidades de gramos por mega joules (g MJ⁻¹)

Las eficiencias obtenidas para cada etapa se describen a continuación:

IV.5.1. Eficiencias constantes (Total).

Las eficiencias constantes obtenidas no considerando etapas se aprecia que con en el sensor NOAA-AVHRR en 1998 y 1999 para SAVI son mayores con 1.64 g MJ⁻¹ y 2.84 g MJ⁻¹ respectivamente, al igual para SPOT-VGT utilizando el mismo índice de vegetación SAVI con valores en 1998 y 1999 de 2.73 g MJ⁻¹ y 2.55 g MJ⁻¹.

La obtención de las eficiencias por etapas y constante (totales) nos permite poder aplicar el modelo de Monteith y lleva a cabo la estimación de biomasa (Tablas 3 y 4).

IV.5.2. Eficiencias por etapas.

IV.5.2.1. Etapa uno.

Las eficiencias máximas obtenidas en la "etapa uno" para NOAA-AVHRR en 1998 se obtuvieron con el índice de vegetación SAVI con una valor de 1.54, 1999 con el mismo sensor remoto se obtuvo para NDVI el valor de 1.71 g MJ⁻¹. Para el sensor remoto SPOT-VGT en 1998 con SAVI se obtuvo una eficiencia de 2.85 g MJ⁻¹ y para el mismo índice de vegetación en 1999 se obtuvo un valor de 1.79.

IV.5.2.2. Etapa dos.

Las eficiencias obtenidas para NOAA-AVHRR en la etapa de mayor producción de biomasa que es la "etapa dos" los valores de eficiencia máxima en 1998 fueron para SAVI con valores de 5.44 g MJ⁻¹ y en 1999 para el mismo índice con un valor de 6.71 g MJ⁻¹. Con el sensor remoto SPOT-VGT en 1998 con SAVI se presento un valor de 8.48 g MJ⁻¹ y en 1999 con el mismo índice 4.42 g MJ⁻¹.

IV.5.2.3. Etapa tres.

Las eficiencias obtenidas en la "etapa tres" que es la etapa final del crecimiento de la biomasa se obtuvieron para NOAA-AVHRR en 1998 los valores máximos de 1.74 g MJ^{-1} en SAVI y en 1999 de 1.14 g MJ^{-1} con NDVI. Por otra parte para SPOT-VGT en 1998 se obtuvieron valores máximos de 2.9 g MJ^{-1} con SAVI y 1999 en SAVI con una eficiencia máxima de 0.968 g MJ^{-1} .]

Tabla IV-6. Eficiencias de NOAA-AVHRR para los años de 1998 y 1999.

SENSOR REMOTO	INDICE DE VEGETACIÓN.	ETAPAS			
		I	II	III	Constante.
NOAA-AVHRR 1998	E NDVI.	1.5	4.97	1.61	1.58
	E SAVI.	1.54	5.44	1.74	1.64
NOAA-AVHRR 1999	E NDVI.	1.71	4.62	1.14	2.68
	E SAVI.	1.64	6.71	0.86	2.84

Tabla IV-7. Eficiencias de SPOT-VGT para los años de 1998 y 1999..

SENSOR REMOTO	INDICE DE VEGETACION	ETAPAS			
		I	II	III	Constante.
SPOT-VGT 1998	ENDVI	2.08	6.02	1.77	1.97
	ESAVI	2.85	8.48	2.9	2.73
	ESATVI	1.76	6.12	2.15	1.89
SPOT-VGT 1999.	E NDVI	1.31	2.87	0.721	1.79
	E SAVI	1.79	4.42	0.968	2.55
	E SATVI	0.872	3.8	0.945	1.78

IV.6. Biomasa medida vs. Índices de vegetación NOAA-AVHRR y SPOT-VGT para 1998 y 1999 (no acumulados y acumulados).

Los resultados de correlación de biomasa vs. Índices de vegetación se presentan en la tabla 8, en donde podemos apreciar que para el año de 1998 con el sensor NOAA-AVHRR y SPOT-VGT existen correlaciones muy bajas, esto es utilizando índices de vegetación no acumulados.

Las correlaciones que se presentan para ambos sensores remotos son muy bajas en el año de 1998, en cambio para 1999 con SPOT-VGT las correlaciones son mayores (tabla 9). Los resultados están basados en la correlación directa entre índices de vegetación no acumulados, básicos para conocer la correspondencia de la biomasa medida vs. los índices de vegetación encontrados en el mismo sitio.

Tabla IV -8. Correlación de índices de vegetación vs. Biomasa medida.

Año.	Índice de Vegetación.	NOAA-AVHRR. R ²	SPOT-VGT. R ²
1998.	NDVI	.04	0.64
	SAVI	.017	0.43
	SATVI	NA	0.15
1999.			
	NDVI	0.55	0.72
	SAVI	0.54	0.69
	SATVI		0.70

Otro resultado es la comparación de la biomasa medida contra los índices de vegetación acumulados. Como podemos apreciar en la tabla 9 en donde las correlaciones más altas son encontradas en el índice de vegetación NDVI para ambos sensores remotos en 1998, en cambio las correlaciones mas altas para 1999 están en NDVI de NOAA-AVHRR y SATVI de SPOT-VGT.

Tabla IV -9. Correlación de índices de vegetación acumulados vs. Biomasa medida.

Año.	Índice de Vegetación.	NOAA-AVHRR R ² .	SPOT-VGT R ²
1998	NDVI	0.93	0.93
	SAVI	0.92	0.93
	SATVI	NA	0.92
1999.	NDVI	0.94	0.95
	SAVI	0.89	0.94
	SATVI	NA	0.95

Los resultados obtenidos de la comparación de índices de vegetación no acumulados y acumulados vs. biomasa medida, que se muestran en las tablas 5 y 6 nos permite tener una referencia de "calidad" de resultados y de poder aplicar los índices de vegetación con mayor correlación al modelo de Monteith.

Tabla IV-10. Resultados de estimación de biomasa con eficiencias constantes, NOAA-AVHRR 1998 y 1999.

NOAA-AVHRR 1998.	Resultados.	NDVI-C ³ .	SAVI-C
	RMSE (g/m ²).	6.100	6.398
	R ²	0.930	0.923
NOAA-AVHRR 1999.	Resultados.	NDVI-C ³ .	SAVI-C
	RMSE (g/m ²).	10.599	14.623
	R ²	0.944	0.894

Los resultados de biomasa estimada en 1998 para ambos sensores remotos.

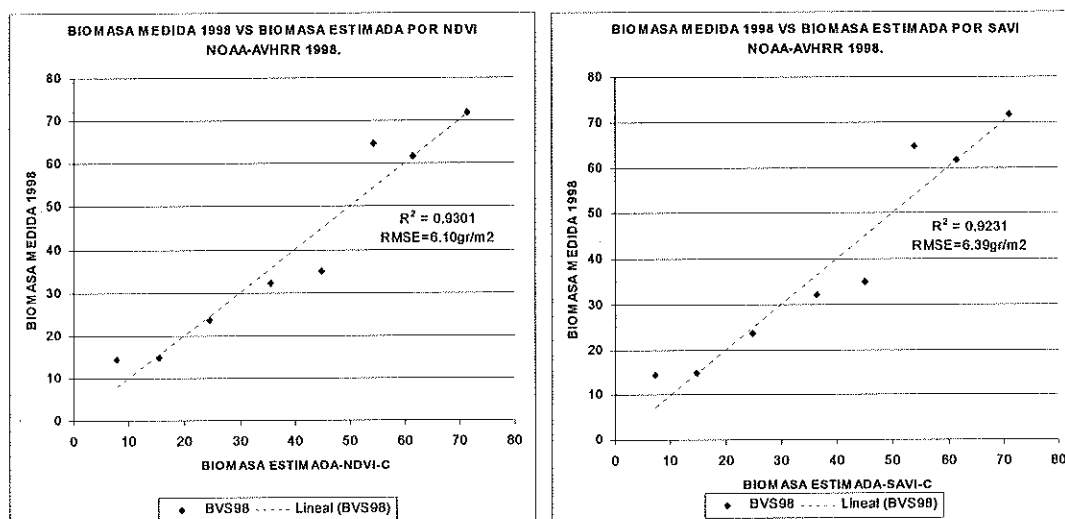


Figura IV -16. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencia constante, NOAA-AVHRR 1998

³ La letra C indica constante, referente a biomasa estimada con eficiencias constantes.

RESULTADOS.

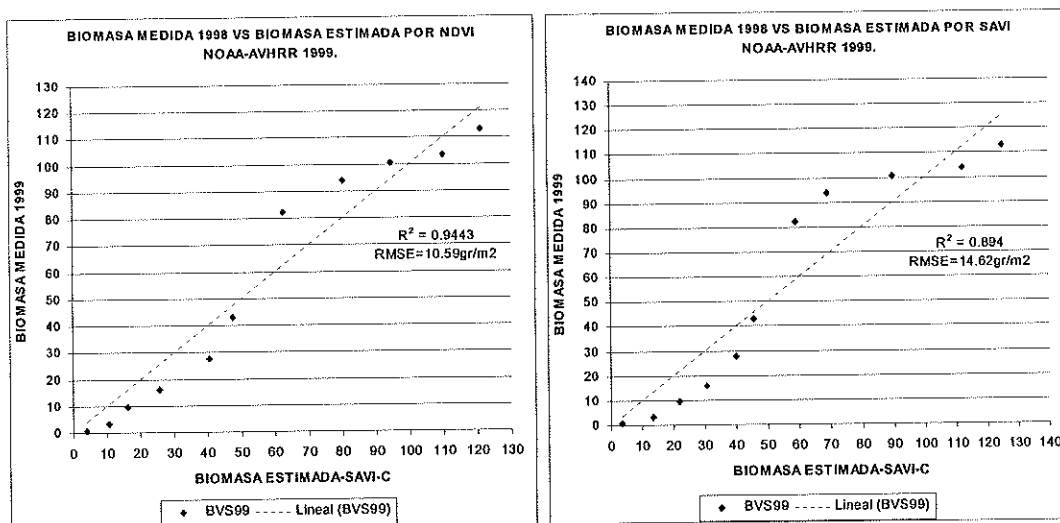


Figura IV-17 Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencia constante, NOAA-AVHRR 1999.

Tabla IV -11. Resultados de estimación de biomasa con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1999.

SPOT-VGT 1998.	Resultados.	NDVI-C	SAVI-C	SATVI-C
	RMSE (g/m2).	6.395	6.316	6.202
	R^2	0.923	0.925	0.928
SPOT-VGT 1999.				
	RMSE (g/m2).	10.024	10.773	13.849
	R^2	0.950	0.942	0.905

RESULTADOS.

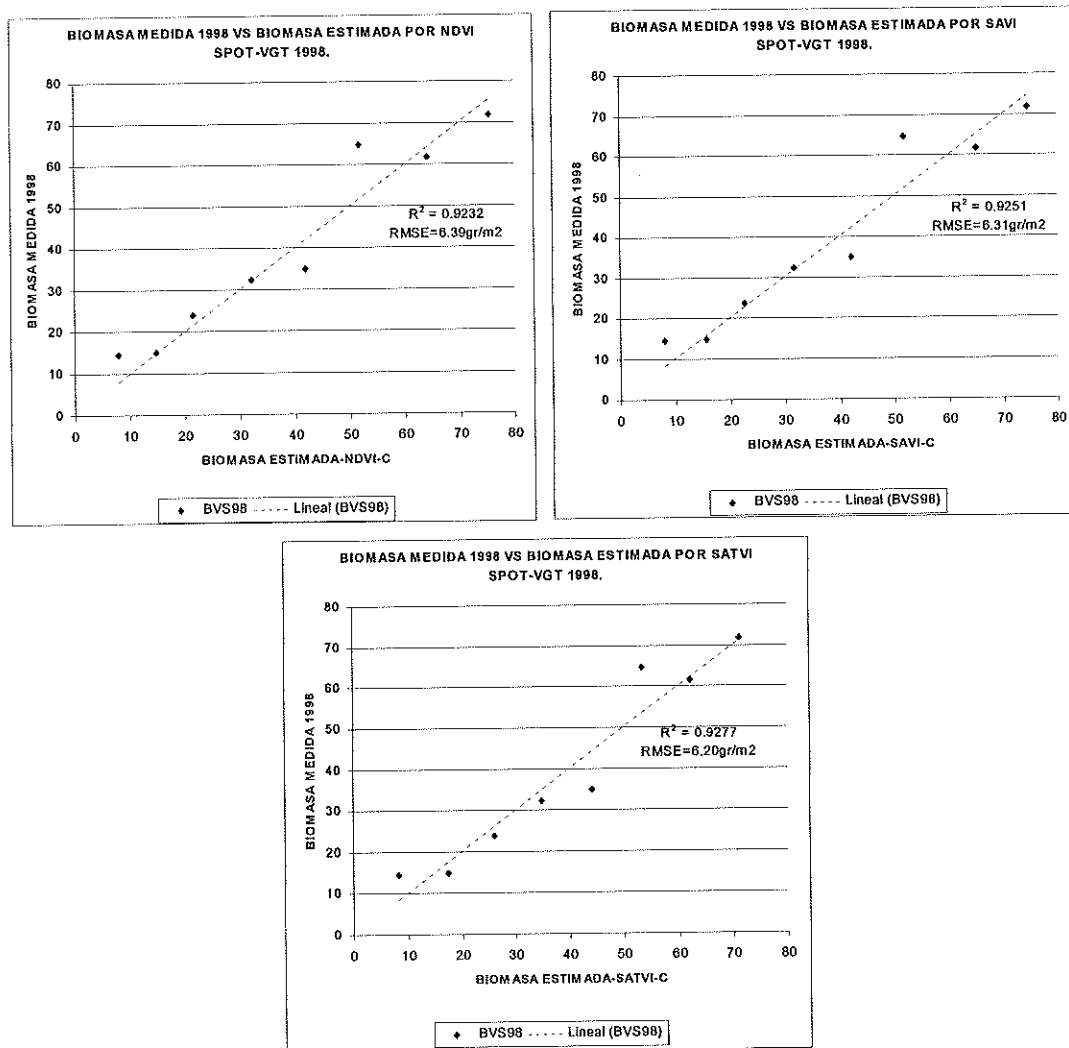


Figura IV-18 Biomasa estimada vs. Biomasa medida con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1998.

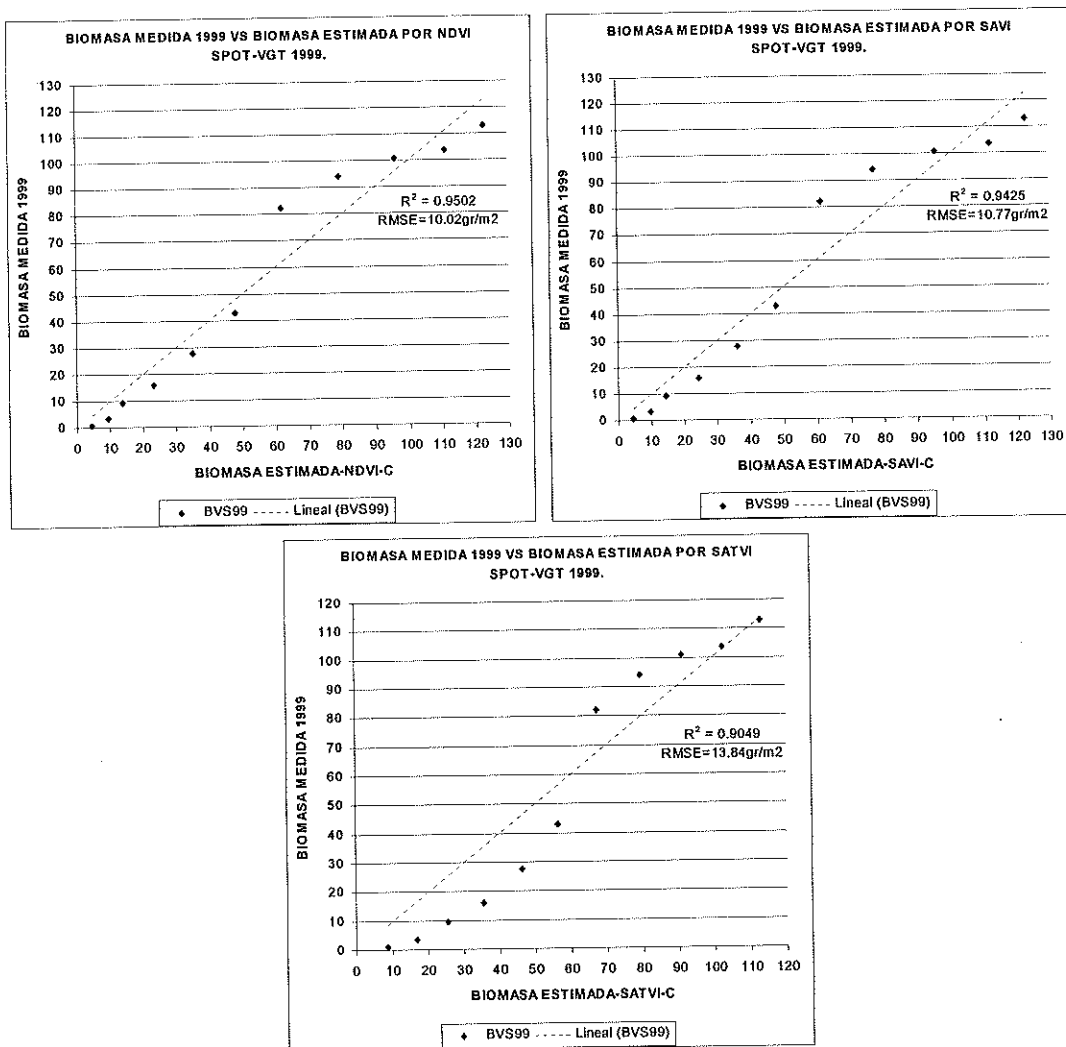


Figura IV-19. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias constantes, SPOT-VGT 1999.

IV.7.2. Biomasa estimada por eficiencia por etapas.

La obtención de la biomasa por el método de Monteith implica a los componentes principales de RFAav, Eficiencias por etapas e índices de vegetación acumulados. Aplicando la ecuación de Monteith nos permite tener un modelo con mayor aproximación a la biomasa medida, esto bajo el análisis de la etapa de solo crecimiento de la biomasa para los años de 1998 y 1999.

Los resultados de la biomasa estimada por etapas para el año de 1998 se muestran en la tabla 9, en donde se aprecia que la biomasa estimada por NDVI de NOAA-AVHRR es el más aproximado y SAVI es escasamente de menor precisión a la biomasa medida. En el caso de 1999 para NOAA-AVHRR se tiene que el índice de vegetación SAVI es el más preciso con una correlación de R^2 0.993 y un valor de RMSE de 3.86 gr. /m².

Tabla IV -12. Resultados de biomasa estimada con eficiencia por etapas, NOAA-AVHRR 1998 y 1999.

NOAA-AVHRR 1998.	Resultados.	NDVI-E	SAVI-E
	RMSE (g/m ²).	2.695	3.003
	R^2	0.986	0.983
NOAA-AVHRR 1999.			
	RMSE (g/m ²).	4.827	3.865
	R^2	0.988	0.993

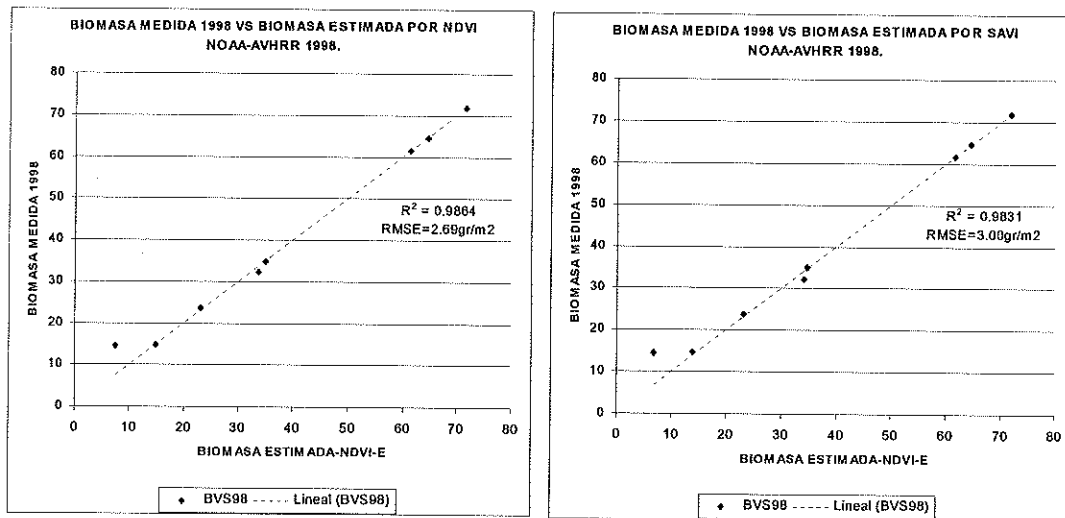


Figura IV -20. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, NOAA-AVHRR 1998.

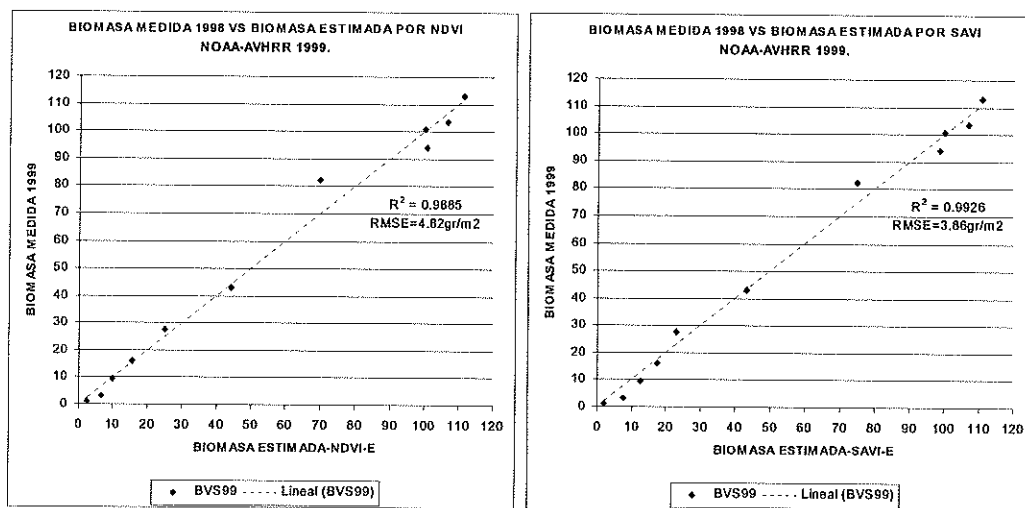


Figura IV -21. Biomasa medida v. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, NOAA-AVHRR 1999.

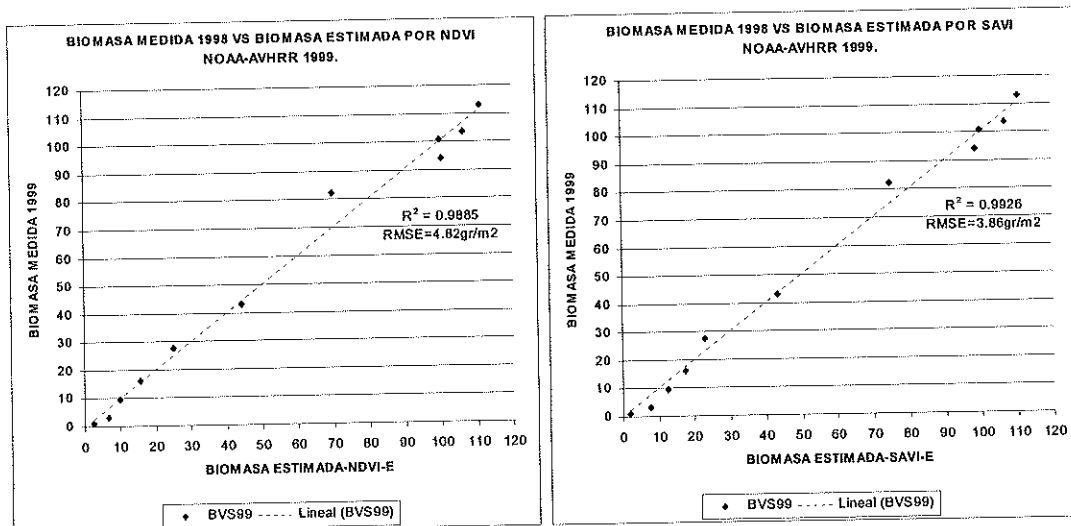


Figura IV -22. Biomasa medida v. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, NOAA-AVHRR 1999.

RESULTADOS.

Los resultados para el año de 1998 se muestran en la tabla 13 en donde el índice de vegetación SATVI de SPOT-VGT es el que tiene correlación R^2 de 0.977 g /m² y un RMSE de 3.47 g /m², quedando los valores obtenidos de los otros índices de vegetación NDVI y SAVI en segundo y tercer orden por mejores resultados con la biomasa medida en campo. En el año de 1999 para SPOT-VGT se obtienen resultados similares con correlaciones altas, en donde SAVI es el índice de vegetación que proporciona mayor correlación R^2 de 0.99 con un valor de RMSE de 4.52 g /m², quedando SATVI y NDVI en segunda y tercera posición por valor de aproximación.

Tabla IV -13. Resultado de biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1998 y 1999.

SPOT-VGT 1998.	Resultados.	NDVI-E	SAVI-E	SATVI-E
	RMSE (g/m ²).	5.841	6.850	3.476
	R^2	0.936	0.912	0.977
SPOT-VGT 1999.				
	RMSE (g/m ²).	6.029	4.529	4.813
	R^2	0.982	0.990	0.989

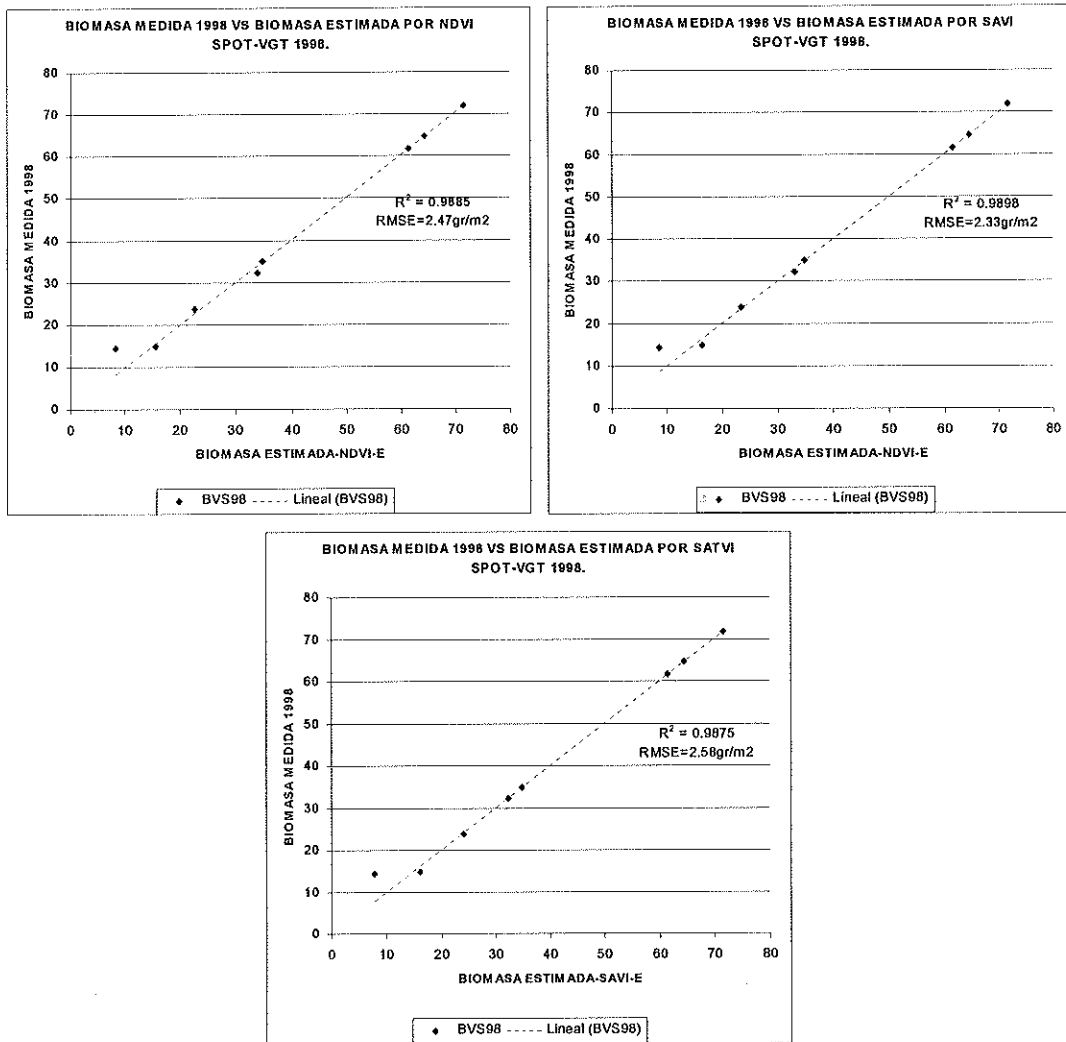


Figura IV -23. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1998.

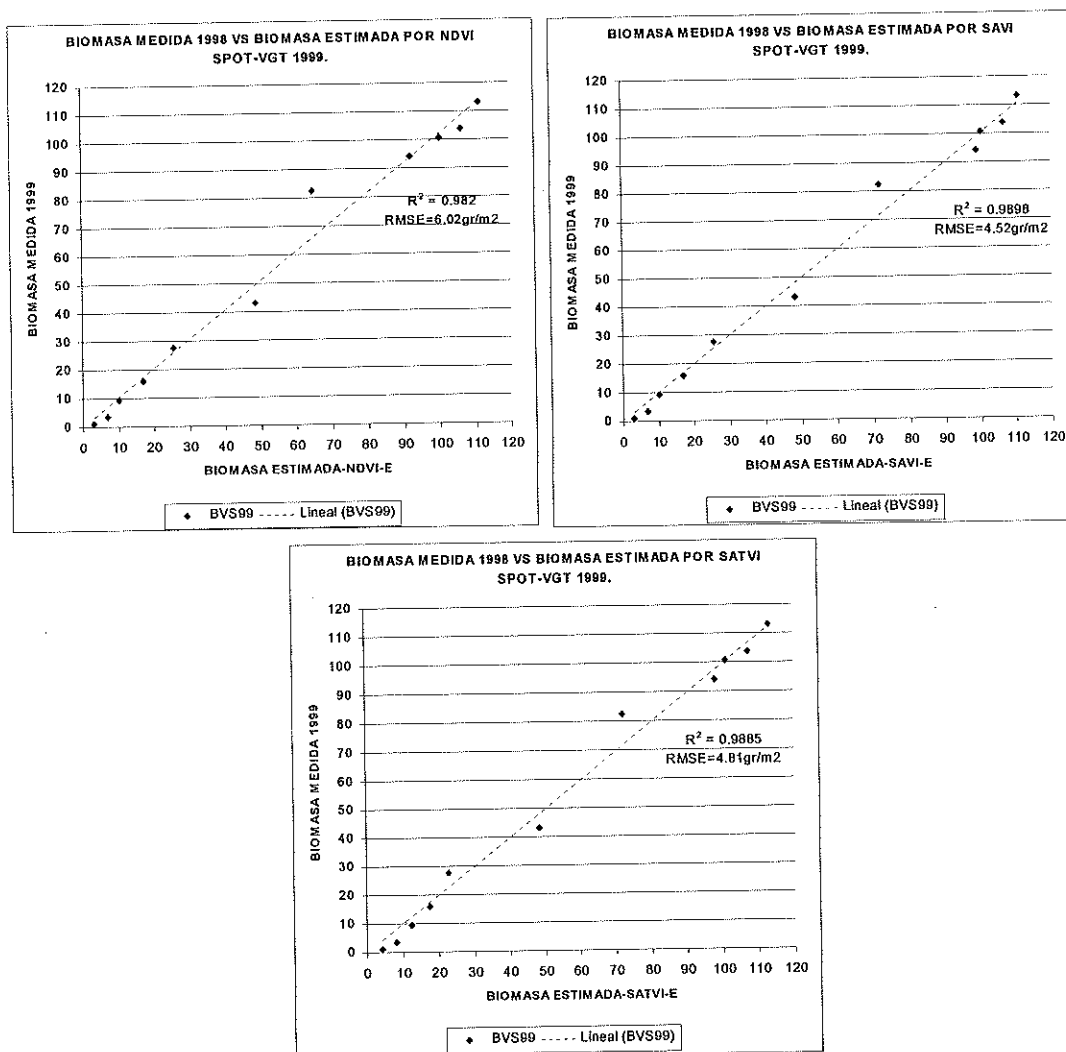


Figura IV -24. Biomasa medida vs. Biomasa estimada con eficiencias por etapas, SPOT-VGT 1999.

V. DISCUSION Y CONCLUSIONES.

V.1. Biomasa medida en campo.

La biomasa medida del año de 1998 se inicio el día 16 de julio al 9 de octubre, por otra parte el año de 1999 se inicio el 2 de julio al 22 de Octubre.

De las fechas anteriores se selecciono solamente el rango de crecimiento de la biomasa en donde quedo de la siguiente manera, para 1998 fue del 16 de julio al 6 de septiembre, y para 1999 fue del 2 de julio al 6 de septiembre. Estas fechas cubrieron la etapa de solo crecimiento de la biomasa descrito en el capitulo de metodología.

Los meses propuestos para el muestreo de biomasa se basaron en las características de crecimiento estacional del pastizal en la zona de estudio.

V.2. Índices de vegetación.

Los resultados de índices de vegetación obtenidos para NOAA-AVHRR y SPOT-VGT fueron de gran ayuda para visualizar y conocer el comportamiento de la biomasa.

La comparación de biomasa vs. índices de vegetación no acumulados no presentaron una buena correlación, caso contrario al aplicar la biomasa medida vs. índices de vegetación acumulados presentaron una buena correlación. Con esto tenemos que los índices de vegetación directos nos proporcionan información de campo directa, pero si se acumula la información de estos a un tiempo (t) tenemos una buena correlación con la biomasa acumulada.

Por otra parte los índices de vegetación acumulados comparados con la biomasa nos proporcionaron información más confiable con la biomasa medida en campo.

Los índices de vegetación utilizados en el desarrollo de este trabajo como lo fueron NDVI, SAVI y SATVI fueron muy eficaces en la descripción de las características de vegetación medida presentes en la zona de estudio.

V.3. Radiación solar, Radiación Fotosintéticamente Activa promedio (RFAav).

La radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) obtenida para la zona de estudio en la etapa de crecimiento el año de 1998 fue mayor a la que se presentó en 1999. Con lo anterior en 1999 se presentaron días nubosidad más frecuentes y por ende mayor cantidad de precipitación, reduciendo escasamente la cantidad de energía proveniente del sol para el periodo del muestreo de biomasa.

Con lo anterior podemos afirmar que la RFAav no fue un recurso limitante para el desarrollo de la biomasa en 1999, cuando esta fue mayor para el año de 1998 con menor cantidad de biomasa.

V.4. Precipitación.

La precipitación para la zona de estudio para el año de 1998 fueron precipitaciones de muy baja cantidad y dispersas en toda la etapa de crecimiento del pastizal. En el año de 1999 las precipitaciones fueron de mayor cantidad y constantes en el periodo de crecimiento de la biomasa.

En 1998 la biomasa se comportó con una curva de crecimiento con pocos cambios, por otra parte en 1999 la curva de crecimiento se presentó con cambios visibles y un comportamiento menos lineal.

Las diferencias de biomasa medida en los años de 1998 y 1999, se correlacionan con la precipitación como se muestra en el capítulo V de resultados en la gráfica 9 y 10.

Apoyado en lo anterior se concluye que los comportamientos de las curvas de crecimiento y acumulación de biomasa en ambos años correspondieron a la presencia de precipitación, por lo tanto existe una relación más estrecha entre la biomasa y la precipitación.

V.5.Eficiencias.

Las eficiencias estimadas utilizando los valores de índices de vegetación y la radiación fotosintéticamente activa promedio (RFAav) nos proporcionaron los valores de eficiencia de tipo constantes y por etapas, los cuales se aplicaron utilizando el modelo de Monteith.

Eficiencias sin etapas o constantes.

Estas e eficiencias nos proporcionaron el primer acercamiento a la estimación de biomasa aplicada al modelo de Monteith.

En el año de 1998 con NOAA-AVHRR los valores de eficiencias constantes fueron de 1.58 g MJ^{-1} y de 1.64 g MJ^{-1} para NDVI y SAVI respectivamente. En el año de 1999 con NOAA-AVHRR se obtuvieron valores de eficiencias constantes de 2.68 y 2.84 g MJ^{-1} .

En el caso de SPOT-VGT en el año de 1998 se obtuvieron valores de 1.97, 2.73 y 1.89 g MJ^{-1} . Para los índices de vegetación NDVI, SAVI y SATVI. En el caso de 1999 para el mismo sensor remoto e índices de vegetación se obtuvieron valores de 1.79, 2.55 y 1.78 g MJ^{-1} .

Eficiencias por etapas.

Año 1998.

Para el caso de eficiencias por etapas en 1998 para NOAA-AVHRR y el índice de vegetación NDVI se presentaron valores de **1.5 a 4.97** g MJ⁻¹ y un promedio de 2.39 g MJ⁻¹; en SAVI valores de 1.54 a 5.44 g MJ⁻¹ y en promedio 2.56 g MJ⁻¹.

En 1998 utilizando SPOT-VGT con NDVI se presentaron valores de 1.77 a 6.02 g MJ⁻¹ y en promedio 2.98 g MJ⁻¹; para SAVI de 2.85 a 8.48 g MJ⁻¹ y en promedio de 4.27 g MJ⁻¹. En el caso de SATVI se obtuvieron valores de 1.76 a 6.12 g MJ⁻¹ y en promedio de 2.94 g MJ⁻¹.

Año 1999.

En el caso de 1999 para NOAA-AVHRR y el índice de vegetación NDVI se presentaron valores de **1.14 a 4.62** g MJ⁻¹ con valor promedio de 2.34 g MJ⁻¹; para SAVI fueron de 0.86 a 6.71 g MJ⁻¹ y promedio de 2.81 g MJ⁻¹.

En 1999 utilizando SPOT-VGT con NDVI los valores fueron de 0.72 a 2.87 g MJ⁻¹ y en promedio de 1.57 g MJ⁻¹, para SAVI fue de 0.96 a 4.42 g MJ⁻¹ con promedio de 2.28 g MJ⁻¹ y para SATVI fue de 0.87 a 3.8 g MJ⁻¹ con promedio de 1.69 g MJ⁻¹.

Comparando los resultados obtenidos con NDVI con los obtenidos por Prince (1991) al aplicar la estimación de eficiencias por etapas encontró valores de 0.2 a 4.8 g./MJ; Hanan et al. (1997), obtuvo un valor promedio de 0.7 g. /MJ; Jauri et al. (2000) obtuvo valores de 0.48 a 2.5 g./MJ en 1998 y 0.9 a 2.7 g./MJ en pastizales para la misma zona de estudio.

Con lo anterior se tiene que las eficiencias con NDVI obtenidas en este trabajo son similares en los valores promedios de Prince (1991) en el Sahel y los obtenidos por Jauri (2000) en Cananea, Sonora.

Con esto, tenemos que las pequeñas diferencias de las eficiencias obtenidas por otros autores son mínimas teniendo un buen resultado este analisis.

V.6.Biomasa estimada.

La estimación de biomasa se llevo a cabo aplicando el modelo de Monteith (Prince, 1991) en donde se utiliza índice de vegetación, radiación fotosintéticamente activa y eficiencia.

La biomasa estimada con el modelo de Monteith (Prince, 1991; Monteith, 1972) utilizando eficiencias constantes y por etapas derivó excelentes correlaciones con la biomasa medida.

V.6.1. Biomasa estimada con eficiencias sin etapas o constantes.

Los resultados de biomasa estimada por eficiencias constantes nos proporciono la primera aproximación utilizando el índice de vegetación NDVI para el año de 1998, y en 1999 el índice de vegetación con mayor correlación a la biomasa medida fue NDVI y SATVI.

La biomasa estimada por eficiencias constantes proporciono correlaciones mayores al 90% con la biomasa medida en campo con valores de RMSE del orden 6 a 10 g m⁻².

Aun cuando la aproximación obtenida aplicando el modelo de Monteith los valores de eficiencias constantes es buena, esta nos proporciono una buena aproximación a la biomasa medida en campo.

V.6.2. Biomasa estimada con eficiencias por etapas.

La biomasa estimada con eficiencias por etapas presento que los índices de vegetación con mayor correlación a la biomasa medida fueron en 1998 NDVI y SATVI y en 1999 SAVI y NDVI, SAVI y SATVI.

Las correlaciones encontradas con eficiencias por etapas fueron mayores al 95% comparado con la biomasa medida en campo, esto afirma que la biomasa estimada por etapas es mas precisa. Obteniendo valores de $\bar{RMSE}$ de 2.69 a 6.85 g /m².

Con esto tenemos que el modelo de Monteith y sus variables como lo son los índices de vegetación, eficiencias y la radiación fotosintéticamente activa, son aplicados en este análisis proporcionaron una aproximación a los datos de campo obtenidos con metodologías directas.

Con los resultados de estimación de biomasa en 1998 y 1999 con NOAA-AVHRR y SPOT-VGT, asumimos que la utilización de cualquiera de los índices de vegetación empleados en la estimación de biomasa de pastizales es aceptable.

Los resultados de biomasa estimada comparada con la biomasa medida en campo, nos permite tener una aproximación validada a las características del pastizal en la zona de estudio.

Aplicando las metodologías de este tipo en estimación de biomasa nos permitirán conocer las características de funcionabilidad de comunidades bióticas; las cuales cumplan una función vital del punto de vista ecológico y socioeconómico.

Por consiguiente este tipo de resultados nos permiten tener elementos justificantes para la implementación del manejo, el cual tendrá la función de conservar, proteger y restaurar los recursos naturales y la biodiversidad de los ecosistemas.

VI. Recomendaciones.

VI.1. Medición de biomasa en campo.

Se recomienda que las mediciones de campo de biomasa se apeguen al control de calidad para evitar errores, los cuales alterarían la calidad del trabajo a desarrollar.

VI.2. Índices de vegetación.

Se recomienda que la elección y aplicación de los índices de vegetación a utilizar sea definido en base a las características del tipo de vegetación, cobertura y considerando el efecto de otros factores como lo es el suelo y la atmósfera.

VI.3. Eficiencias.

Se recomienda que el análisis para la obtención de la información de radiación fotosintéticamente activa sea estricto.

VI.4. Estimación de biomasa.

Se recomienda que las estimaciones de biomasa a futuro se tengan los valores diarios si es posible de las variables de radiación fotosintéticamente activa, índices de vegetación y eficiencias, con lo cual se tendría una estimación de biomasa mas precisa.

VII. Bibliografía.

- ❖ Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T. & Hatfield, J. L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agro. 1. 76*: 300-306.
- ❖ Baret F. G. and Guyot ,1991. Potentials and limits of vegetation Indices for LAI and APAR assessment, *Journal Remote Sensing of Environment*, 35:161-173.
- ❖ Baret, F., Guyot, G. and Major, D.J., 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. in *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89, Vancouver (Canada)*, 3, pp.1355-1358
- ❖ Baylin y Gaisford, 1993. *International satellite directory*, 8th edition. Design Publishers. Sonoma, California, Paginated in sections.
- ❖ Berthelot, B., G. Dedieu, F. Cabot, and S. Adam, Estimation of surface reflectances and vegetation index using NOAA/AVHRR: methods and results at global scale., pp. 33-40, Val d'Isere, 1994.
- ❖ Bidwell R. G. S. , 1979. *Fisiología Vegetal*, primera edición , AGT Editor S.A.; pp 409-438.
- ❖ Campbell, J.B. (1987) *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, New York.
- ❖ Cayrol, P., Chehbouni, A., Kergoat, L., Dedieu, G. Mordelet, P., and Nouvellon, Y. 2000. Grassland Modelling and Monitoring with SPOT-4 vegetation instrument durin the 1997-1999 SALSA experiment. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 105:pp 91-115.
- ❖ CCRS Manual: *Fundamentals of Remote Sensing tutorial*, 1999. Canadian Centre of Remote Sensing. <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>.

- ❖ Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite imagens from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7:1,417-1,434.
- ❖ Huete A. R., 1988. A Soil Adjusted Vegetation Index SAVI; *Remote Sensing of Environment*, 25:pp 295-309.
- ❖ Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979-1997, Cartas temáticas, escala 1:250,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- ❖ Jauri Martínez Mario Alberto, 2000. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería "El uso de sensores remotos en la estimación de biomasa, en pastizales de agostadero del norte de sonora"; Instituto Tecnológico de Sonora, Campus Cd. Obregón.
- ❖ Jordan, C. F. (1969) "Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor," *_Ecology_*, vol. 50, pp. 663-666.
- ❖ Justice, C.O., J.R.G. Townshend, B.N. Holben, and C.J. Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 6:1271-1318.
- ❖ Kaufman, Y. J., Tanre, D. (1992) "Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, in *_Proc. IEEE Int. Geosciences and Remote Sensing Symposium '92_*, IEEE, New York, 261-270.
- ❖ Kidwell, K.B., 1990, Global Vegetation Index User's Guide, U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite Data and Information Service/National Climatic Data Center/Satellite Data Services Division.

- ❖ Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., and Richardson, W.(1969)
"Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition, in _Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment_, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp.97-131.
- ❖ Laguette S., Vidal A., Vossen P., Using satellite into productivity model, in : Proceedings of IGARSS'95, Firenze, Italy, July 1995, pp. 1465-1467.
- ❖ Landsberg, J.J. and Waring, R.H.,1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95:pp 209-228.
- ❖ Landsberg, J.J., Prince, S.D., Jarvis, P.G., Mcmurtrie, R.E., Luxmoore, R. and Medlyn, B.E.,1997. Energy conversion and use in forests:an analysis of forest production in terms of radiation utilisation efficiency. In : *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity at Scales from the Stand to the Globe*. Eds: Gholz, H.L., Nakane, K., and Shimoda, H. Kluwer Academic Publishers:Dordrecht.
- ❖ Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (1994) *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- ❖ Los, S.O., C.O. Justice, C.J. Tucker, 1994. A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17):3493-3518.
- ❖ R. Marsett, P. Heilman, 2000, Rangeland vegetation cover estimation from remotely sensed data, 2nd International conference on Geospatial

Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 10-12 January, 2000. II-243-252., 2000.

- ❖ Monteith J. L and Unsworth M.H, 1990. Principles of Environmental Physics. Second, Edward Arnold a member of the Hodder Headline Group London New York Sydney Auckland; pp 80-81.
- ❖ Monteith J. L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems, *Journal of Applied Ecology*; 9:pp 747-766.
- ❖ Monteith, J.L. 1972, Solar radiation and productivity in tropical exosystems, *Journal. Applied in Ecology*. 9:747-766
- ❖ NOAA KLM User's Guide, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c7/sec7-1.htm>.
- ❖ Nogi, A., Sun, W. and Takagi, M. (1993) An Alternative Correction of Atmospheric Effects for NDVI Estimation, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1993*, Tokyo, Japan, Aug 18-21, Vol. 3, pp. 1137-1139.
- ❖ NOM NOAA OPERATIONS MANAGER VERSIÓN 4.01, VOLUME I. NATURAL RESOURCES INSTITUTE. LARST Group, Environmental Sciences Department. 2000
- ❖ Prince S. D.; 1991; A model of regional primary production: Comparison of results for sahelian grasslands 1981-1988; *internacional Journal of Remote Sensing* ; Vol. 12, No.6 (pp 1301-1311).
- ❖ Qi, J., Chehbouni, A., Huete A. R., Kerr, Y. H. and Sorooshian S. 1994. A modified Soil Adjusted Vegetation Index; *Remote Sensing Environment*, 48:pp119-126.

- ❖ Rahman H., and Dedieu, G., SMAC, A Simplified method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum, *Int. J. Remote sensing*, 1994, Vol.15, n°1, 123-143.
- ❖ Rao, C.R.N., and J. Chen, 1996: Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-14 spacecraft. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2743-2747.
- ❖ Rdzedowski, J.;1978. *Vegetacion de Mexico*; segunda edicion, Editorial LIMUSA, pp 215-235.
- ❖ Richardson, A. J. and Everitt, J. H. (1992) "Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity, *_Geocarto International_*, vol. 1, pp. 63-69.
- ❖ Richardson, A. J. and Wiegand, C. L.,1977. Distinguished Vegetation from Soil Background information, *Potogrammetric Engineering and Remote Sensing* , 43(2):pp 1541-1552.
- ❖ Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1973. "Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS," *_Third ERTS Symposium, NASA SP-351_*, vol. 1, pp.309-317
- ❖ Ruimey, A., Saugier, B. and Dedieu, G.,1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal Geophys. Res.* 99:pp 5263-5283.
- ❖ Ruimy, A., Saugier, B., et al., 1994, Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data, *Journal of Geophysical Research*, 99:5263-5283.

- ❖ Semarnap, Inventario Nacional Forestal de la Republica Mexicana, 1995.
- ❖ Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliso, A., Lopez-Garcia, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J., Dempere, L., 2000. Teledetección. Sobrino, J.A. Editorial Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia, Valencia; España.
- ❖ SPOT-VEGETATION, 1998. Images Server: <http://sirius-ci.cst.cnes.fr:8080/>; http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/satellit.htm.
- ❖ Terrill W. Ray: Div. of Geological and Planetary Sciences : California Institute of Technology; ER Mapper 6.0 Applications, 1994.
- ❖ Tucker, C. J. (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of the Environment. 8:127-150.
- ❖ Tucker, C.J., and Sellers, P.J., 1986, Satellite remote sensing of primary production, International Journal of Remote Sensing, 7:1395-1416.
- ❖ Tucker, C.J., Dregne, H.E. and Newcomb, W.W., 1991. Expansion and contraction of the Saharan desert from 1980 to 1990. Science, Vol.253, 299-301.
- ❖ Verstraete, M. M. (1994) 'The contribution of remote sensing to monitor vegetation and to evaluate its dynamical aspects', in *Vegetation, Modelling and Climatic Change Effects*, Edited by F. Verstraete and R. Ceulemans, SPB Academic Publishing, The Hague, 207-212.
- ❖ Watts C. J. (en prensa). Sensores Remotos Satelitales: Una Introducción; Editorial Universidad de Sonora.

- ❖ Watts C. J., Santiago-León F. R. (en proceso). Comparación de índices de vegetación ajustados por suelo: una alternativa con imágenes de bajo costo.
- ❖ Watts, C.J. y Saiz-Hernández, J.A. (1993). Cómo se seleccionaron las orbitas de los satélites NOAA-AVHRR?
- ❖ Website-Grasslands <http://www.ups.edu/biology/museum/worldbiomes.html>.

ANEXO.

- Reflectancia.

REFLECTANCIA

La percepción remota óptica intenta utilizar información sobre la radianza¹ medida en diferentes bandas para caracterizar una superficie. Se puede definir la reflectancia espectral total según

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{E_{\lambda}}$$

Ecuación 1. Reflectancia espectral total.

La medición de esta reflectancia total, implica medir toda la irradianza² y excitancia³ que llega y sale de la superficie. Un ejemplo de este tipo de medición es el uso de piranómetros que pueden medir fielmente la radiación sobre una hemiesfera y se utiliza para medir toda la irradianza solar sobre una superficie. Se puede utilizar otro piranómetro, apuntado hacia abajo, para estimar la excitancia también. Normalmente, estos instrumentos son de banda ancha (300 – 4000 nm) y miden casi toda la radiación solar y la relación de excitancia sobre irradianza se llama el albedo de la superficie.

Sin embargo, esta definición de reflectancia espectral no incluye información alguna sobre la distribución direccional del flujo reflejado. En general, se puede definir la función de distribución de reflectancia BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) según

$$\gamma(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i) = \frac{L(\theta_r, \phi_r)}{E(\theta_i, \phi_i)}$$

Ecuación 2. Función de distribución de reflectancia BRDF.

Donde:

L = Radianza ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

E = Irradianza (W).

θ_r = ángulo cenital de radianza.

ϕ_r = ángulo acimutal de radianza.

θ_i = ángulo cenital de irradianza.

ϕ_i = ángulo acimutal de irradianza.

¹ La radianza es flujo radiante por unidad de área en un ángulo sólido dejando la fuente en una dirección por unidad proyectada del área fuente en una dirección, el símbolo es L ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

² La irradianza es un flujo de radiación incidente sobre una superficie plana se representa con E y sus unidades son (W m^{-2}).

³ La excitancia es la parte de la irradianza que deja la superficie en donde incide, la cual es representada por M (W m^{-2}).

* I. Coldwell, Robert N. Manual of Remote Sensing, American Society of Photogrametric. Vol I, 1983.

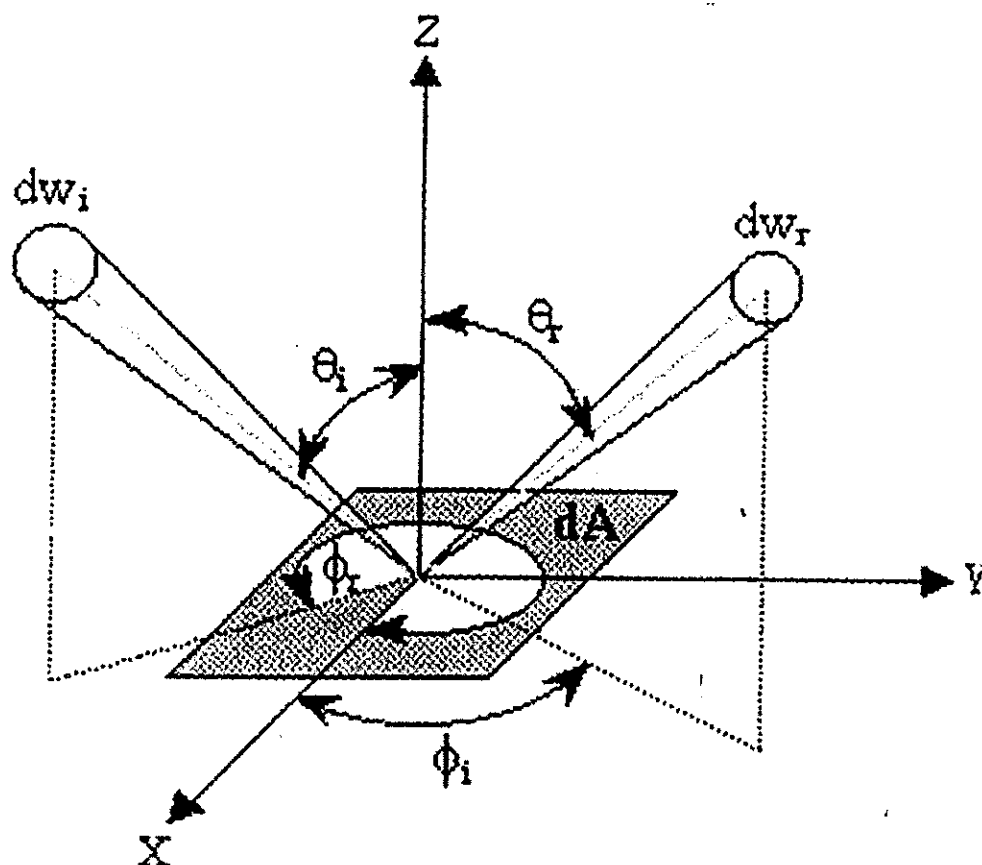


Figura. 1. Parámetros geométricos que intervienen en la reflexión de la radianza (NOAA USER MANUAL, 1996).

en este grafico se puede visualizar los parámetros que interactúan en la ecuación anterior, donde dw_i es la fuente de irradiancia o la energía que incide sobre la dA , en donde la excitancia es visualizada desde dw_r .

Donde BRDF tiene unidades de sr^{-1} , ya que representa la radianza en una dirección particular debido a una irradianza en otra, por lo que es una función de 4 ángulos. Además, en general BRDF depende de longitud de onda. Es posible medir BRDF en el laboratorio o (con mayor dificultad) en el campo. Es muy difícil medirla desde satélites, ya que no se cuenta con todos los ángulos para una caracterización completa. En este contexto es importante mencionar un nuevo sensor MISR que se lleva a bordo del satélite TIERRA. Es capaz de realizar mediciones a 9 diferentes ángulos de elevación simultáneamente.

En general, BRDF tiene características complejas y desconocidas. Sin embargo, hay dos casos especiales idealizados importantes:

- a) Reflector especular: se comporta como un espejo y solamente hay reflexión cuando $\theta_r = \theta_i$ y $\phi_r = \phi_i + 180$. En todas las otras direcciones la reflectancia es cero. Un reflector casi especular tendría la mayor parte

del lujo reflejado en un cono alrededor de la dirección especular. Un ejemplo común es la superficie del agua en un lago o el mar. En muchas imágenes se observa la reflexión brillante del Sol en el agua.

- b) Reflector difuso o Lambertiana: muestra la misma reflectancia en todas direcciones. Un caso menos idealizado tendría una reflectancia uniforme excepto a ángulos cenitales cerca de 90° y cerca de los angulares especulares. De hecho, la nieve tiene un comportamiento similar al ideal, excepto a los ángulos indicados. Una complicación común con superficies es la diferencia observada entre la reflexión hacia adelante comparada con la reflexión hacia atrás.

En general, la mayoría de las superficies son casi Lambertianas y se hace la superposición de que sean Lambertianas perfectas. En muchos casos, la suposición es justificada si se limitan a ángulos cenitales menores a 60° . Tiene la enorme ventaja práctica que se puede asumir que la radianza observada en cierta dirección por el detector es igual a la radianza que hubiéramos observado en otra dirección. Si consideramos la excitancia espectral total se escribe

$$M_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_\lambda(\theta_r, \varphi_r) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi$$

Ecuación 3. Excitancia espectral total.

Pero para una superficie Lambertiana se tiene que la radianza es independiente de los ángulos y se tiene

$$M_\lambda = L_\lambda \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi = \pi L_\lambda$$

$$L_\lambda = [E_{\lambda, TOA} \tau_\lambda(1) + E_{dl}] \frac{\rho_\lambda}{\pi} \tau_\lambda(2) + L_{u\lambda}$$

Y se puede escribir la reflectancia espectral total

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_\lambda}$$

Ecuación 4. Reflectancia espectral total para una superficie Lambertiana.

En el caso exoatmosférico TOA (Top of Atmosphere,) tenemos

$$E_{\lambda, TOA} = E_{\lambda, solar} d_{DOY}^2 \cos\theta$$

Ecuación 5. Reflectancia para superficies Lambertianas desde TOA.

Donde $E_{\lambda, \text{solar}}$ es la constante solar para el rango de longitud de onda de la banda de interés, y d_{DOY}^2 es la distancia de la tierra al sol en unidades astronómicas en cualquier día del año del año.

Para el desarrollo de este trabajo se considera que la superficie de la zona de estudio es de reflexión difusa (Lambertiana).

Las reflectancias a utilizar serán las que se obtengan de la ecuación 5 para superficies Lambertianas.

Con lo anterior los supuestos son:

1. las radianzas captadas por el satélite se consideran sin ningún efecto que las atenúe en la atmósfera.
2. se considera una superficie perfectamente difusa, la cual refleja en una superficie Lambertiana la cantidad de energía del espacio.

