

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE LOS
AGOSTADEROS EN EL ESTADO DE COAHUILA, MEDIANTE
SENSORES REMOTOS Y UN MODELO DE SIMULACIÓN.**

ABDIEL SOTO PÉREZ

TESIS

**Presentada como requisito parcial
para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN ZOOTECNIA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
Subdirección de Postgrado**

**Buenvista, Saltillo, Coahuila, México.
Octubre 2013**

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCION DE POSGRADO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE LOS AGOSTADEROS
EN EL ESTADO DE COAHUILA, MEDIANTE SENSORES REMOTOS Y UN
MODELO DE SIMULACIÓN

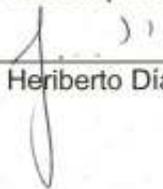
TESIS
POR:

ABDIEL SOTO PÉREZ

Elaborado bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobado
como requisito parcial, para optar el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ZOOTECNIA

Asesor principal



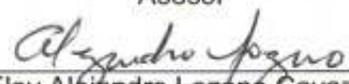
Dr. Heriberto Díaz Solís

Asesor



Dr. Dino Ulises González Uribe

Asesor



Dr. Eloy Alejandro Lozano Cavazos

Asesor



Dr. Ismael Cabral Cordero



Dr. Fernando Ruiz Zárate
Subdirector de posgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Octubre 2013

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a **DIOS**, por darme la vida y estar siempre conmigo en todo momento, por guiarme y darme la fuerza necesaria para seguir por el buen camino. Sin él no estaría escribiendo estas líneas y alcanzado un objetivo profesional más.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi "**ALMA MATER**" por haberme cobijado y brindarme todo lo necesario para mi formación profesional, a los maestros que día a día se esforzaron para transmitir sus conocimientos y ser parte del mi aprendizaje, gracias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Por su apoyo económico durante los dos años de estudio, ya que me permitió la realización de la maestría.

A mis asesores:

Dr. Heriberto Días Solís. Por su confianza y amistad y haber dedicado tiempo, apoyo incondicional y sugerencias para la realización de este trabajo

Dr. Dino Ulises González Uribe. Por sus conocimientos y gran apoyo al haber dedicado tiempo en la revisión, corrección, consejos y aportaciones en este trabajo.

Dr. Eloy Alejandro Lozano Cavazos. Por su paciencia, sugerencia y aportación en la realización de este trabajo.

Dr. Ismael Cabral Cordero. Por su paciencia, sugerencia y aportación en la realización de este trabajo.

Al **M.C. Camerino Rojas Montes y M.C Misael Rodríguez Arvizu**, por bríndame sus experiencias y conocimientos ya que fueron la base para el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Ricardo Vásquez Aldape**, por su amistad, conocimientos impartidos y facilitarme información para este trabajo.

A mis compañeros y amigos **Ing. Hilario Moreno Jalpa e Ing. Amauri Esquivel Romo** que de una u otra manera colaboraron en este trabajo.

A mis amigos, **Ing. Norberto Tipa, Ing. Hugo, Ing. Luis Alonso, Ing. Toño, Ing. Rafa, Ing. Estela Espinoza, Ing. Tere Bautista, Ing. Ana Belly Aguilar, Lic. Nigenda Santos y familia**. Gracias por su apoyo y por compartir tantos momentos juntos dentro y fuera de la universidad, con gran cariño y admiración les deseo lo mejor. Y aquellos que no menciono pero que saben que valoro su amistad.

A mis compañeros de generación de Maestría en Ciencias en Zootecnia: **Ing. Mayra, Ing. Karina, Ing. Cyntia, Ing. Angelica, Ing. Adrian Ramos, Ing. Fabio, Mvz. Oscar, Mvz. Humberto, Ing. Rendí, M.C. Carlos**. Gracias por su amistad sincera

DEDICATORIA

A mis padres:

Sr. Pánfilo Soto Gómez

Sra. Florevita Pérez Velásquez

Con amor y cariño escribo estas líneas, dándole las gracias por darme la vida y por sus sabios consejos, a ustedes que forjaron un carácter y sembraron en mí la semilla de la prosperidad y que ahora está dando frutos. Gracias porque me dieron la oportunidad de superarme, sin ustedes no estaría aquí cumpliendo mis sueños, ustedes son mi más grande ejemplo a seguir y es a ustedes a quien quiero premiar con mi esfuerzo.

Para mí no existe un mejor regalo de Dios que poder tenerlos aún en vida y brindarme esa alegría de decirles gracias papá, gracias mamá por todo el apoyo moral y económico que me han brindado, estoy eternamente agradecido, los quiero mucho y que Dios los bendiga hoy y siempre.

A mis hermanos:

Alex, Willi, Elizer, Ricky, Yuni y Greysi, gracias porque con su apoyo moral y económico, aun estando lejos de ustedes, me dieron una razón más para culminar mis estudios y así premiar el esfuerzo que hicieron en mí, gracias por compartir tantas alegrías, tristezas y grandes momentos en mi vida.

A mis sobrinos:

Jaqueline Samara, Samanta, Diego Yael y Jonathan Alonso. Mis pequeñitos, sé que aún no saben leer, pero espero que algún día éste le sirva para que hagan realidad sus sueños.

A toda mi demás familia:

Que de alguna manera me apoyaron y creyeron en mí.

A la familia Saucedo Tobías:

Por brindarme ese calor de hogar, estando tan lejos y ver por mi bienestar, por hacerme sentir como un integrante más de su hermosa familia, gracias por su grandioso cariño y afecto Sra. Diana Tobías Muñoz.

Excelencia a la sabiduría....

Hijo mío, si recibieras mis palabras, y mis mandamientos guardares dentro de ti, haciendo estar atento tu oído a la sabiduría; si inclinares tu corazón a la prudencia, si clamares a la inteligencia, y a la prudencia dieres tu voz; si como a la plata la buscares, y la escudriñares como a tesoros, entonces entenderás el temor de Jehová, y hallarás el conocimiento de Dios. Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia. Proverbios 2: 1-6

RESUMEN

Desarrollo de un sistema de seguimiento de los agostaderos en el estado de Coahuila, mediante sensores remotos y un modelo de simulación.

Por:

Abdiel Soto Pérez

Maestría en Ciencias en Zootecnia

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Octubre, 2013.

Dr. Heriberto Díaz Solís- Asesor principal

Palabras clave: Sensores Remotos, Modelo, Precipitación, IEA, NDVI, P-NDVI.

Se siguió la dinámica los agostaderos de Coahuila mediante sistemas de información geográfica y un modelo de simulación desde Enero 2009 hasta Abril 2013. Se obtuvieron precipitaciones mensuales observadas (PMO) de las estaciones de INIFAP, mediante una interpolación de la malla 20x20 km que cubre al estado de Coahuila. Con las precipitaciones se parametrizó el modelo SESS (Simple Ecological Sustainability Simulator) para obtener el IEA (Índice de Estado del Agostaderos). También se obtuvo el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), para obtener estos valores, las imágenes se descargaron del sensor MODIS (Moderate Resolutions Imaging Spectroradiometer) desde Marzo de 2000 hasta Abril 2013. A demás se obtuvo el P-NDVI (Proporción del Índice de Vegetación) este es el cociente del NDVI mensual actual entre el NDVI histórico.

Para observar la dinámica de estas variables se estableció tres puntos en el estado en los cuales se observó su comportamiento en todos los meses durante los años 2009 al 2012 y se elaboraron mapas que mostraron los cambios de dichas variables en cada año. También se observó el comportamiento de NDVI y P-NDVI a mayor escala durante las cuatro estaciones del año, mediante una malla de 500x500 m, en estas se alcanzaron a observar las regiones en donde se encuentran lagos, lagunas o presas. Se obtuvieron las relaciones entre la Proporción de la precipitación anual (PPA), IEA y P-NDVI de los 436 puntos del 2009 al 2013. Para la variable PPA contra el IEA obtuvo una correlación del 77%, la PPA contra el P-NDVI obtuvo una correlación del 65% y la correlación del IEA contra el P-NDVI fue del 49%.

ABSTRACT

Development of a system for monitoring rangeland in the state of Coahuila, using remote sensing and a simulation model.

Por:

Abdiel Soto Pérez

Maestría en Ciencias en Zootecnia

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Octubre, 2013.

Dr. Heriberto Díaz Solís- Asesor principal

Keywords: Remote Sensing, model, Precipitation, IEA, NDVI, P-NDVI.

Was followed rangeland dynamics of Coahuila through Geographic Information Systems and a simulation model from January 2009 to April 2013. Were obtained the Observed Monthly Precipitation (PMO) the INIFAP stations by interpolation of 20x20 km grid covering the state of Coahuila. With model rainfall was parameterized SESS (Simple Ecological Sustainability Simulator) for the IEA (Rangeland Conditions Index). We are obtained the NDVI (Normalized Vegetation Index Diference) to obtain these values; images are downloaded from the MODIS (Moderate Imaging Spectroradiometer Resolutions) from March 2000 to April 2013. Also was obtained P-NDVI (Proportion Vegetation Index) this is the monthly NDVI between the historical NDVI. To observe the dynamics of these variables was established three points in the state in which their behavior was observed in all months during the years 2009 to 2012 and was developed maps showing the changes of these variables in each years. We also observed the behavior of NDVI

and P-NDVI a larger scale during the four seasons, with a mesh of 500x500 m, were reached see in these regions where they are lakes, ponds or dams. Relations were obtained between the proportion anual precipitation (PPA), IEA and P-NDVI of 436 points from 2009 to 2013. For the variable IEA against PPA obtained a correlation of 77%, PPP against P-NDVI obtained a correlation of 65% and the correlation of the IEA against P-NDVI was 49%.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	xii
ÍNDICE DE CUADROS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
I. INTRODUCCION	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
CONDICION DEL PASTIZAL	4
APLICACION DE SENSORES REMOTOS AL SEGUIMIENTO DE LOS AGOSTADEROS	7
SENSORES REMOTOS	7
ANTECEDENTES DE LA PERCEPCION REMMOTA	9
COMPONENTES BASICOS	11
TIPOS DE RESOLUCIONES	11
IMÁGENES DE SATELITE	12
SENSOR MODIS	13
EL INDICE DE VEGETACION NORMALIZADO (NDVI)	13
SEGUIMIENTO DE LOS AGOSTADEROS	15
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA (SIG)	18
APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN	20
DESCRIPCION DEL MODELO SEES	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
SISTEMA DE SEGUIMIENTO	21
Precipitación mensual	21
NDVI (Normalized Diference Vegetation Index)	22
P-NDVI (Proporción de NDVI)	22
IEA (índice de Estado del Agostadero)	22
COBERTURA DE HERBACEA	23
FOTOGRAFIA DIGITAL Y MUESTREO DE CAMPO	23
Ubicación del área de estudio	23

Datos de campo	25
Fotografías digitales	25
Clasificación de las fotografías digitales	26
Estimación en campo	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
SISTEMA DE SEGUIMIENTO	27
PRECIPITACIÓN MENSUAL	27
NDVI MENSUAL	34
NDVI ESTACIONALES	38
P-NDVI MENSUAL	43
P-NDVI ESTACIONAL	47
IEA MENSUAL	53
RELACIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL OBSERVADA (PMO), PNDVI E IEA	59
FOTOGRAFIA DIGITAL Y MUESTREO DE CAMPO	65
Relación de los datos obtenidos en el programa ENVI 4.3 y los estimados en campo.	65
V. CONCLUSIONES	67
VI. LITERATURA CITADA	68

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Condición del pastizal de acuerdo a su composición botánica.</i>	<i>6</i>
<i>Cuadro 2. Sitios de muestreo del transecto de Linares Nuevo León a Ojinaga Chihuahua.</i>	<i>25</i>
<i>Cuadro 3. Clases que se asignaron a las imágenes procesadas en ENVI.....</i>	<i>26</i>
<i>Cuadro 4. Porcentaje de coeficientes de correlación de los 436 puntos de las variables PMO, IEA y PNDVI que se evaluaron en el estado de Coahuila. Los números dentro de los paréntesis representan los puntos que tuvieron coeficiente de correlación en los rangos indicados.</i>	<i>60</i>
<i>Cuadro 5. Coeficiente de correlación de la cobertura de herbáceas para las cuatro estaciones de año obtenido por ENVI y estimados en campo.....</i>	<i>66</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitos de muestreo en el estado de Nuevo León, Coahuila y Chihuahua.	24
Figura 2. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Múzquiz, Coahuila.	28
Figura 3. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Ocampo, Coahuila.	30
Figura 4. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Sabinas, Coahuila.	31
Figura 5. Mapas correspondientes a la Proporción de la Precipitación Anual del 2009 al 2012 en el estado de Coahuila.	33
Figura 6. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.	35
Figura 7. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Ocampo, Coahuila.	36
Figura 8. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Sabinas, Coahuila.	37
Figura 9. Mapas correspondientes al NDVI para los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012.	40
Figura 10. Mapas del promedio anual del NDVI de los años 2009 al 2012 en estado de Coahuila.	42
Figura 11. Distribución del P-NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.	44
Figura 12. Distribución del P-NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Ocampo, Coahuila.	45
Figura 13. Distribución del P-NDVI mensual de los años 2009 al 2013 en el municipio de Sabinas, Coahuila.	46
Figura 14. Mapas correspondiente al P-NDVI para los meses d Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012.	50
Figura 15. Mapas correspondientes al promedio anual de P-NDVI de los años 2009 al 2012 en Coahuila.	52

Figura 16. Distribución de IEA mensual de los años 2009 al 2013 para Múzquiz, Coahuila.	54
Figura 17. Distribución de IEA mensual de los años 2009 al 2013 para Ocampo, Coahuila.	55
Figura 18. Distribución de IEA mensual de los años 2009 al 2013 para Sabinas, Coahuila.	56
Figura 19. Mapas correspondientes al promedio de Índice de Estado del Agostadero de los años 2009 al 2012 en Coahuila.	58
Figura 20. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 8127 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.	61
Figura 21. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 7731 en el municipio de Ocampo, Coahuila.	62
Figura 22. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 8530 en el municipio de Sabinas, Coahuila.	64
Figura 23. Distribución de los valores de P-NDVI e IEA con la proporción de la precipitación anual del 2009 al 2012.	65
Figura 24. Distribución de los datos obtenidos en el programa ENVI 4.3 contra los valores estimados en campo.	66

I. INTRODUCCIÓN

Las tierras de pastoreo constituyen un recurso natural renovable y pueden ser manejadas en forma ecológica y de manera que continúen siendo productivas y ambientalmente estables para siempre. Sin embargo, el abuso de las tierras de pastoreo en la región es más la regla que la excepción y no se les da la oportunidad de regenerarse. En consecuencia, el proceso de desertificación está ampliamente extendido y el potencial de estas tierras se ve reducido a sólo una parte de lo que debiera ser (Instituto Nacional de Ecología, 1994).

La importancia de los pastizales ha sido estimada por varios factores, siendo uno de los más importantes la superficie que ocupan, en México se reconoce una extensión que va desde el 40% (casi 70 millones de hectáreas), hasta poco más del 60%(116.8 millones de hectáreas) de la superficie territorial, además de proveer el sustento a un gran número de animales en pastoreo. Los pastizales proveen alimentos como carne de varios tipos, frutos y especias, plantas con grandes potenciales industriales, otras con propiedades medicinales y farmacéuticas como sustancias psicoactivas, diuréticas, analgésicas y antibióticos (Cantú, 2010).

La situación actual que presentan los pastizales no es nada halagador, lo que es un hecho incontrovertible y evidente, que la gran mayoría de los pastizales del país están sobre pastoreados y por ende se caracterizan por una baja productividad, pudiéndose afirmar que actualmente un 80% del país sufre algún grado de erosión (Cantú, 2010).

Los pastizales, probablemente son de los ecosistemas más amenazados de México, debido al alto grado de deterioro que presentan, cambios históricos en el uso del suelo y menos del 1% de los pastizales se encuentran bajo un esquema

de conservación, además de una degradación de los suelos de pastizal en casi un 62% (Márquez *et al.*, 2009).

La condición del pastizal es el estado de salud de éste, basada en lo que el pastizal es capaz de producir en forma natural, es decir, el estado presente de la vegetación de un sitio de pastizal en relación a la comunidad clímax para ese sitio (Instituto Nacional de Ecología, 1994).

La Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA, 1967) desarrolló un método para recomendar coeficientes de agostadero (relación área/unidad animal adecuado para mantener una producción permanente).

Una manera de monitorear los agostaderos es utilizando la percepción remota con la cual es posible hacer un estudio sistemático de la vegetación sin estar en contacto directo con ella, aprovechando para ello, el reflejo emitido por la superficie terrestre (Rosete y Bocco, 2003, Pérez, 2005). Este nuevo sistema de seguimiento de la vegetación, se basa en registros climatológicos actuales e históricos, el uso de un modelo de simulación (SESS), imágenes satelitales públicas de agencias del gobierno de Estados Unidos, sistemas de información geográfica y recorridos de campo para la toma de decisión sobre su manejo.

OBJETIVOS:

GENERAL:

- Desarrollar un sistema de seguimiento de bajo costo y buena precisión de la dinámica de los agostaderos.

ESPECIFICOS:

- Obtener el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para el estado de Coahuila de 2009 al 2013.
- Obtener el índice de estado del agostadero (IEA) simulado por el modelo SESS para el estado de Coahuila de 2009 al 2013.
- Evaluar la relación entre la precipitación, datos simulados por SESS, y valores de NDVI.
- Desarrollar un sistema para estimar la cobertura de herbáceas basado en la clasificación de fotografía digital.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Los pastizales son tierra de vegetación nativa o introducida que es pastoreada o tiene el potencial para serlo y manejada como un ecosistema natural. Los pastizales incluyen praderas, terrenos forestales y matorrales, donde los animales pueden pastar, estos han sido tradicionalmente valorados como un importante recurso de forraje para la ganadería. Hoy en día existe una creciente conciencia de las importantes funciones y valores que los pastizales proporcionan a la sociedad (Barry *et al.*, 2003).

CONDICIÓN DEL PASTIZAL

Del latín. *Conditions*, índole, naturaleza o propiedad de las cosas, la situación o estado físico, bueno o malo, en que se encuentra una persona, animal o cosa (Real Academia Española, 1992).

La condición del pastizal es un concepto y medida muy importante fundamentalmente, constituye una medida de la desviación a partir de la forma más alta de vegetación que se puede alcanzar mediante el manejo apropiado y práctico. La condición del pastizal en realidad es un intento del hombre para medir el grado de regresión o sucesión secundaria que ha ocurrido (Instituto Nacional de Ecología, 1994).

Dyksterhuis (1949), desarrolló el concepto de condición de pastizal aplicado a los sitios que conforman al pastizal mismo. Definió al sitio como un área donde la combinación de factores edáficos, topográficos, climáticos y vegetativos hacen

diferente, en potencial forrajero, a las áreas adyacentes. Desarrolló el método de condición del pastizal dándole un enfoque cuantitativo a las clases o categorías que usamos actualmente. También, propuso una manera sistemática de evaluar condición del pastizal utilizando cuatro clases de condición:

1. Excelente: 100-75 % de vegetación clímax
2. Buena: 75-50 % de vegetación clímax
3. Regular: 50-25 % de vegetación clímax
4. Pobre: 25-0 % de vegetación clímax

En la figura 1. Se muestra las clases de condición.

Condición, en relación con el pastizal, es referido comúnmente como “condición del pastizal”, y se define como el estado de salud o productividad de ambos, el suelo y la vegetación de un pastizal en cuanto a lo que podría o debería ser bajo condiciones climáticas normales y bajo las mejores prácticas de manejo. Para evaluar los estados de condición por lo general se utiliza la proporción de fitomasa aérea (cantidad de pasto) de las especies que componen el pastizal natural, así se establecen clases de condición excelente, buena, regular y mala (Dyksterhuis, 1949).

La Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostaderos (COTECOCA, 1967) desarrolló un método para recomendar coeficientes de agostadero (relación área/unidad animal adecuado para mantener una producción permanente). Los objetivos de los trabajos de campo, fueron: a) delimitar y mapear regiones ecológicas homogéneas expresadas en tipos de vegetación, subdivididos en sitios; y b) determinar la carga recomendada para cada sitio, expresada en unidades animal. La aplicación del método implicó reconocer los 3 elementos siguientes:

1. Regiones ecológicas, tales como pastizales, matorrales o bosques, se determinaron en base a datos climáticos conforme a la clasificación de Köppen.

2. Tipos de vegetación, los que son resultado del efecto del complejo clima-suelo y se expresan, como partes de una región ecológica, por su fisonomía o formas de vida (forma de crecimiento que muestra una relación obvia con algún factor del medio ambiente y usualmente es una característica constante. Estas incluyen características cualitativas y cuantitativas de dicha vegetación.

3. Sitios de pastizal, son áreas, dentro de un tipo de vegetación, que tienen la combinación de factores edáficos, topográficos, climáticos y de vegetación que hacen a un área diferente de otros sitios. Tal diferencia se efectúa conforme a los criterios siguientes:

- 1) Cuando existen diferencias en la clase (composición botánica) o cantidad (densidad) de especies que pertenecen al potencial clímax, y
- 2) Cuando la vegetación es semejante, pero se pueden detectar diferencias en productividad (tasa de producción de materia seca en un periodo dado de tiempo) y producción (forraje expresado como materia seca acumulada en un año). Se tienen en consideración las siguientes tres alternativas: a) un solo factor del ambiente puede diferenciar un sitio, b) cuando la topografía y el suelo, son semejantes pero existe un cambio climático gradual, y c) que las diferencias en rendimiento deben de ser significativas.

El Instituto Nacional de Ecología (1994), menciona que la condición del pastizal, determina el estado de “salud” y el potencial que tiene ese pastizal de mejorarse. Con base en la ecología cuantitativa se clasifican las especies vegetales en deseables, menos deseables e indeseables, de acuerdo a su producción y calidad forrajera y a su respuesta al pastoreo.

En esta forma, se diferencian las condiciones de pastizal, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Condición del pastizal de acuerdo a su composición botánica.

**ESPECIES DESEABLES EN LA
COMPOSICIÓN BOTANICA (%)**

CONDICIÓN DEL PASTIZAL	
Excelente	76-100
Buena	51-75
Regular	26-50
Pobre	0-25

APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS AL SEGUIMIENTO DE LOS AGOSTADEROS

El uso de nuevas herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG) y nuevas metodologías de evaluación de vegetación, aplicables a diferentes escalas espaciales dan la oportunidad de integrar a mayor escala los esfuerzos sobre evaluaciones de estado de la condición del pastizal (INIFAP, 2008).

Una manera ágil y de bajo costo para seguir la dinámica de grandes áreas es el uso de sensores remotos. Para analizar la vegetación se ha generalizado el uso de índices de vegetación (González *et al.*, 2008).

SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos permiten capturar información de los objetos sin tener un contacto directo con ellos, su uso en aplicaciones sobre recursos naturales tiene una larga historia, dado que proporcionan información confiable sobre superficies extensas con alta precisión y costos razonable (CONAGUA, 2005). El uso de los sensores remotos es la ciencia y el arte de obtener información útil (espacial, espectral y temporal) de un objeto, área o fenómeno a través del análisis e interpretación de datos de imágenes adquiridos por un equipo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Pérez, 2005), esto es posible gracias a la relación sensor-cobertura, la cual en el caso de los barredores multiespectrales se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar en tres formas:

Emisión, Reflexión y Emisión-Reflexión, el flujo de energía que se produce por alguna de estas formas va a estar en función de la transmisión de energía térmica (CONAGUA, 2005).

Se entiende por sensores remotos a cualquier instrumento de medición que permita obtener información de lo que ocurre en un lugar desde lejos del mismo. En particular, esto se consigue mediante el uso de fotografías aéreas y de imágenes satelitales. En los últimos años, el desarrollo de éstas últimas ha sido particularmente importante, dado al abaratamiento de los sistemas de cómputo, de las propias imágenes satelitales y al incremento en la resolución de las mismas. Existen varios tipos de sensores satelitales, pero todos funcionan recibiendo radiaciones electromagnéticas. Las principales diferencias tienen que ver con el tipo de radiaciones que reciben y si han sido generadas por el propio satélite (sensores activos, como los que usan radares) o si por el contrario reciben la radiación generada por el sol o por fuentes termales (sensores pasivos, en espectros de luz visible e infrarroja). La ventaja de estos últimos es que consiguen mucha información de un modo muy barato, mientras su principal limitación es la presencia de nubes (Arnillas y Tovar, 2005).

El objetivo de un estudio es obtener información cualitativa y cuantitativa de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Las fotografías aéreas, las imágenes de satélite y las imágenes de radar son algunos ejemplos de información obtenida a partir de la percepción remota. El método general consta de cinco componentes principales: la energía, la fuente de radiación, el blanco sobre el cual incide la radiación, el sensor y vía de transmisión (Rosete y Bocco, 2003).

Los sensores remotos en plataformas satelitales, disponibles desde los 70's, son una tecnología de carácter espacialmente exhaustivo, y con resolución temporal diaria de revisita al mismo sitio (escalas de 1,000 a 250 m), donde sobresale el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer; resolución espacial de 1,100 m a nadir; con información de cobertura de México de 1986 a la fecha) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; resolución espacial de 1,000 a 250 m, con información del 2000 al 2013). Así, los

sensores remotos brindan una oportunidad única de reconstruir la historia de manejo y efectos climáticos de la vegetación (Paz *et al.*, 2011).

ANTECEDENTES DE LA PERCEPCIÓN REMMOTA

La historia de la percepción remota comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndose fotosensibles. También durante millones de años dicho rudimento fotosensible evoluciono convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Este tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue muy mejorada para ser aplicada a la fotografía aérea. La segunda guerra mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo el “salto cuántico” en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales remplazaron las cámaras fotográficas (CONAGUA, 2005).

Los primeros satélites de observación terrestre comenzaron a operar a principios de la década de 1970. Desde entonces el sistema técnico- científico ha puesto a disposición de la sociedad herramientas y modelos conceptuales que traducen los datos registrados por los sensores remotos en conocimiento útil para la toma de decisiones en múltiples áreas incluyendo las ciencias ambientales y la conservación. Los sensores a bordo de satélites registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie en distintas bandas del espectro electromagnético. Las imágenes satelitales proveen entonces datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie y, en tal sentido, son mucho más que una fotografía (Paruelo, 2008).

A partir de que la NASA pone en órbita el primer satélite de uso exclusivo para cartografía y evaluación de los recursos naturales, de la Tecnología Satelital para los Recursos Terrestres (ERTS, por sus siglas en ingles), en 1972, se inician las aplicaciones civiles de la teledetección. Este proyecto denominado Landsat, a partir del lanzamiento del segundo satélite de la serie ERTS en 1975, resultó el

más fructífero para aplicaciones de la teledetección hasta el momento (García *et al.*, 2002).

Guerif *et al.*, (1993) menciona que la teledetección se ha utilizado para controlar la productividad de los cultivos en una serie de estudios recientes. La mayoría de ellos han utilizado las longitudes de onda visible e infrarrojo cercano, cuya medición llegó a estar disponible en una frecuencia alta en 1979 con el lanzamiento del satélite meteorológico NOAA-6 que lleva el radiómetro AVHRR.

En el ámbito mundial, las técnicas de teledetección han sido utilizadas en la identificación de cambios en la cobertura y el uso de la tierra. Esta valiosa tecnología consiste en la interpretación de imágenes de satélite por medio de programas de computación especializados y apoyada con el trabajo de campo y sirve para el seguimiento de fenómenos naturales u otras modificaciones que experimenta una región, como consecuencia de la intervención del hombre. Mediante el seguimiento o estudio se pueden detectar, por ejemplo, las zonas donde existe pérdida o recuperación significativa de superficies de cobertura vegetal entre años, y se puede presentar en forma cartográfica para que esta información sea utilizada por quienes toman decisiones (Perovic *et al.*, 2008).

El sistema de seguimiento puede descubrir todos los procesos y las características de este ecosistema complejo y ofrecer soluciones para el uso sostenible. En la actualidad, la determinación de productividad de los pastizales y su condición actual con métodos convencionales de estudio requiere mucho esfuerzo y tiempo. Hoy en día, la disponibilidad de los datos de teledetección con alta resolución espacial y temporal permite la realización de investigaciones sobre el seguimiento y la evaluación de la condición actual de la vegetación de los pastizales, la producción de biomasa disponible. La aplicación de la Distancia Detección (RS) y el Sistema de Información Geográfica (SIG) son métodos eficaz de identificación, y evaluación cuantitativa del estado actual de pastizales (Rajabov *et al.*, 2001).

COMPONENTES BASICOS DEL UN SENSOR (Pérez, 2005).

Fuente de energía: que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este, sería teledetección activa. La fuente de energía más importante es la energía solar.

Objeto a estudiar: formado por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones, que recibe la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o la emiten de acuerdo a sus características físicas.

Sistema sensor: compuesto por el sensor, propiamente dicho y la plataforma que lo sustenta. Su función es captar la energía procedente de la cubierta terrestre, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

Plataforma: Dispositivo o estructura en el cual se ubican y arreglan sensores para su uso en la tierra, desde el aire o espacio. Usualmente un satélite con un sensor a bordo, para la observación de la tierra, es conocido como un satélite de observación de la tierra, estos son característicos por su altitud, orbita y sensor.

Respuesta espectral: también llamado firma espectral y corresponden a la combinación de respuestas típicas provenientes de un objeto a estudiar observado por un sensor en varias bandas espectrales.

Sistema de recepción–comercialización: En donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado para que el usuario final acceda.

TIPOS DE RESOLUCIONES (Arnillas y Tovar, 2005).

Cuando hablamos de percepción remota tenemos cuatro tipos de resolución:

Resolución espacial

Es la distancia mínima entre dos objetos, de tal manera que el sensor los pueda separar como objetos distintos (tamaño de la celda). Se refiere al objeto

más pequeño que pueda distinguirse como unidad independiente y es representada por el tamaño de un pixel (celda).

Resolución espectral

Es el ancho del espectro electromagnético medido y el número de canales empleados, es decir, el número y ancho de las bandas espectrales registradas por el sensor (Rosete y Bocco, 2003). La capacidad de distinguir “tonalidades” dentro de un color.

Resolución radiométrica

Es la sensibilidad del sensor para diferenciar una señal, es decir, que partes de espectro electromagnético registra, su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe.

Resolución temporal

Es el lapso mínimo comprendido entre la toma de dos imágenes de una misma zona, esto es, la frecuencia con la que el sensor adquiere imágenes del mismo punto de la superficie terrestre.

IMÁGENES DE SATELITE

Una imagen satelital es una matriz digital de puntos (igual a una fotografía digital) capturada por un sensor montado a bordo de un satélite que orbita alrededor de la tierra, a medida que el satélite avanza barre la superficie con un conjunto de detectores que registran la energía reflectada. La teledetección espacial hace uso de las imágenes de satélite como un insumo de datos para extraer información del medio geofísico y geográfico. El número de bandas, las regiones del espectro electromagnético en las cuales éstas se encuentran localizadas, la resolución espacial y el tamaño de la imagen producida por los diferentes satelitales es variado. Las imágenes de satélite, se encuentran en formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de pixeles, en donde cada pixel tiene un valor digital o de reflectancia; ejemplificando, si la resolución de la imagen es de 30 m, cada pixel muestra un área en la superficie terrestre de 30x30

m (900 m²) con esto, la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900m² será promediada para darle su valor digital al pixel. La información contenida en cada pixel está en formato digital, normalmente de 8 bits ($2^8 = 256$) en una imagen en blanco y negro, en donde el 0 corresponde al color negro, 255 al color blanco y se encuentran 254 distintos tonos de gris intermedios (CONAGUA, 2005).

A pesar de de que existen varios tipos de datos de los satélites que proporcionan información temporal del uso de la tierra sin costo, los datos de satélite de estudios agrícolas son limitados en comparación con la aplicación el manejo forestal (Chen *et al.*, 2006).

SENSOR MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor que recolecta datos sobre el verdor de la vegetación, pero también ofrece otras capacidades, el sensor MODIS fue lanzado a bordo del satélite Terra en 1999, seguido en 2002 por el satélite Aqua, ambos parte del programa EOS de NASA. Su objetivo es proveer series de observaciones globales de la atmósfera, los océanos y la tierra <http://modis.gsfc.nasa.gov/>. Este sensor tiene 36 canales en el dominio óptico térmico y resoluciones espaciales entre 250 m y 1 km (CONAGUA, 2005).

EL INDICE DE VEGETACION NORMALIZADO (NDVI)

Un Índice de Vegetación puede ser definido como una variable o característica calculada a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (González *et al.*, 2008), de igual manera el aprovechamiento de otro tipo de estudios, tales como zonificaciones (Agroecológicas Ambientales y otras), así como estudios de suelos, erosión,

vegetación, brindan mayores pautas a los tomadores de decisiones, a fin que se pueda aproximar mucho más la visión de las pérdidas realizadas y generar mejores proyectos de recuperación (Sandoval, 2003).

El NDVI es históricamente uno de los primeros índices de vegetación. Se trata de una relación normalizada de los NIR (infrarrojo cercano) y las bandas de color rojo: $NDVI = (NIR - Rojo) / (NIR + Rojo)$. El NDVI ha sido usado en numerosos estudios para estimar la vegetación, biomasa, producción primaria, especies dominantes e índice de área foliar en varios tipos de modelos locales, regiones y globales. Las imágenes de NDVI derivado del Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA-AVHRR) proporcionan oportunidades para análisis de series de tiempo entre los cambios en el uso y cobertura de la vegetación a escala global (Maskova *et al.*, 2008). Estos índices no miden directamente productividad ni disponibilidad, pero tienen una estrecha relación con estas variables que permiten utilizarlos para análisis regionales. Es decir, que los cambios de índice de vegetación permiten decir si un determinado mes o año es mejor o peor respecto a su valor histórico (González *et al.*, 2008).

Los primeros estudios fueron de condiciones semiáridas de pastizales naturales, más tarde cuando los datos AVHRR estaban disponibles para el mundo entero, se llevaron a cabo varios estudios en una escala global. El cambio temporal en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se ha relacionado con la productividad primaria neta (Guerif *et al.*, 1993).

Varios índices espectrales han sido propuestos como estimadores de la presencia y condición de la vegetación, sin embargo, el índice de vegetación normalizada o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) ha sido el más usado, producto derivado de las imágenes de satélite que nos permite detectar actividad fotosintética, es decir que nos orienta cuanto puede estar creciendo un pastizal (Bendersky, 2011).

Las series temporales de NDVI con alta resolución temporal permiten seguir diferentes indicadores sintéticos de la dinámicos de la intercepción de radiación

por parte de la vegetación terrestre, tales como el promedio anual, la estacionalidad, la fenología del ecosistema, y la estabilidad, con los que se caracteriza y sigue diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas (Alcázar *et al.*, 2008).

SEGUIMIENTO DE LOS AGOSTADEROS

El seguimiento de los agostaderos es usado para cuantificar el efecto de manejo y variación ambiental de un lugar a través del tiempo. El seguimiento puede ser a corto plazo, por ejemplo, para cuantificar la biomasa utilizada durante un evento de pastoreo. También puede ser a largo plazo como cuantificar la tendencia en un determinado sitio de pastizal (NRCS, 1997).

El propósito de la mayoría de los programas de seguimiento es para mejorar la vegetación, proporcionando una herramienta para medir los cambios objetivamente. Esto significa que el seguimiento debe proveer información útil para la toma de decisiones (Taylor, 2003).

La conservación de los recursos naturales no es real, si el agente responsable no está observando biológica y económicamente en tiempo y espacio el efecto de las acciones de manejo implementadas sobre el objeto de conservación. El seguimiento es una herramienta que permite observar las tendencias de cambio en indicadores relacionados al manejo de ecosistemas, así como interpretar las relaciones entre diferentes variables mediante la observación (Ramírez *et al.*, 2009).

El seguimiento de los agostaderos sirve para detectar cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas a nivel espacial y temporal, lo cual es fundamental en la toma de decisiones para el manejo de ranchos ganaderos. Existen varias técnicas para realizar el seguimiento de los pastizales. Las técnicas tradicionales incluyen mediciones de la vegetación tales como cobertura basal y aérea, composición florística y producción de forraje. Una de las más recientes es la propuesta por Herrick *et al.*, (2005) la cual toma en cuenta las características cualitativas y cuantitativas del pastizal, agrupándola en cuatro indicadores básicos

(fotografías del paisaje, cobertura y composición de plantas, parches del suelo, y estabilidad del suelo).

Los pastizales son ecosistemas caracterizados por presentar una vegetación abierta dominada por especies herbáceas y cuya producción primaria es aprovechada directamente por los herbívoros (Gutiérrez *et al.*, 2009).

Tradicionalmente el seguimiento de los agostaderos se ha hecho para la producción ganadera, las tasas de crecimiento animal, condición y rendimiento productivo, estos, están constantemente evaluados junto con las condiciones ambientales. En el centro-norte de México, el manejo y uso que se hace en la mayoría de los pastizales es inadecuado, se caracteriza por el pastoreo continuo durante periodos prolongados y con alta carga animal. En algunas áreas de esos pastizales, el aprovechamiento persistente con elevada densidad animal dificulta la recuperación de las plantas después del pastoreo y cuando esa práctica es recurrente se presenta el sobrepastoreo, que ocasiona disminución de la cubierta vegetal e incrementa el suelo desnudo y la degradación del mismo, tanto por el viento como por escurrimientos de agua en la época de lluvia (Márquez *et al.*, 2009).

La vegetación ha sido objeto de seguimiento utilizando estructura, composición de las especies, frecuencia, densidad, producción, cubierta y diversas combinaciones. Cada método proporciona tipos de información que pueden ser utilizados para describir una comunidad de plantas y cada uno tiene diferentes limitaciones (Allen *et al.*, 2001).

La vegetación constituye un elemento clave de todo ecosistema terrestre, ya que alberga a todos los demás componentes de la biodiversidad, genera y mantiene condiciones ambientales propicias para la subsistencia de otras especies, contribuye a la generación de materia orgánica para el suelo, etc. Por otro lado, al ser las plantas los productores primarios del ecosistema, y estar por lo tanto en la base de toda cadena de relaciones entre especies, muchas poblaciones de animales dependen directa o indirectamente de la vegetación para poder subsistir. A su vez, las plantas también necesitan de los animales para

poder completar sus ciclos vitales. Por ejemplo, muchas plantas necesitan de ciertos animales para que sus flores sean polinizadas y así poder producir frutos, o bien necesitan que sus frutos sean comidos por ciertos animales para que sus semillas puedan germinar. Así, el funcionamiento del ecosistema depende no solo de las plantas, sino también de los animales y sus relaciones para que los procesos naturales (dispersión, polinización, descomposición, etc.), puedan desarrollarse normalmente (Perovic *et al.*, 2008).

La degradación de los agostaderos es un problema que se ha incrementado en México como en todo el mundo. Por lo que diferentes agencias han desarrollado metodologías para evaluar y seguir la condición de los agostaderos, basándose principalmente en uno de los servicios o productos (INIFAP, 2008).

En el norte de México, una primera evaluación de agostaderos en la década de los 60's reporta que, con base en las comunidades de gramíneas, 85% estaban sobre pastoreadas. Una década después la Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostaderos (COTECOCA) publicó una guía para determinar la condición de los agostaderos y capacidad de carga para todos los estados. El establecimiento de esta agencia fue con el objetivo de determinar legalmente el tamaño de la pequeña propiedad (capacidad de pastoreo para 500 unidades animal), y no para evaluar la condición de los agostaderos. Por lo tanto la principal limitante de esta guía es que las categorías de condición de agostadero: excelente, buena, regular y pobre están basados en la producción de plantas forrajeras deseables (INIFAP, 2008).

En México, la única guía para establecer la carga animal adecuada en los diferentes ecosistemas son los estudios de la Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA) desarrollados hace más de 30 años para cada estado de la república con base en muestreos estáticos para variables que en esencia son dinámicas (Díaz *et al.*, 2003).

Existen varias herramientas para poder desarrollar planes integrales de manejo: unas conceptuales y otras técnicas. Las herramientas conceptuales se refieren a los métodos para la delimitación de unidades paisajísticas

(ecogeográficas), con cierto grado de homogeneidad biofísica, necesaria para: 1) manejar el conocimiento acerca de la distribución de los recursos naturales, 2) evaluar la aptitud productiva del territorio y 3) evaluar los conflictos potenciales entre aptitud y uso actual. Estas unidades de paisaje permiten organizar espacialmente el territorio por medio del proceso conocido como elemento rector del plan de manejo integral comunitario. Las herramientas técnicas se refieren a un conjunto de procedimientos que sirven para observar y seguir los recursos naturales así como almacenar y analizar el resultado de estas observaciones. En la actualidad estas técnicas de observación y análisis se implementan en sistemas computarizados, que globalmente se conocen como sistemas de información geográficas (SIG). Para la generación de datos actualizados sobre terrenos específicos se recurre habitualmente a la utilización de técnicas de percepción remota, apoyadas con levantamientos y verificaciones en campo (Rosete y Bocco, 2003).

Actualmente existen métodos alternativos indirectos que usan imágenes captadas mediante sensores remotos en plataformas satelitales o aviones. Estas técnicas surgieron en la década de 1970 con el satélite LANDSAT, para seguir regularmente los recursos naturales terrestres (Valdez *et al.*, 2006).

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede definir como un método o técnica de tratamiento de la información geográfica que permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada. Para ello, se debe contar tanto con las fuentes de información como con un conjunto de herramientas informáticas (computadora y programas de computación) que facilitarán esta tarea; todo ello enmarcado dentro de un proyecto que habrá sido definido por un conjunto de personas, y controlado, así mismo, por los técnicos responsables de su implantación y desarrollo. En definitiva, un SIG es una herramienta capaz de combinar información gráfica (mapas) y alfanumérica

(estadísticas) para obtener una información derivada sobre el espacio (Perovic *et al.*, 2008). Por lo tanto, podemos mencionar que un SIG permite integrar distintos tipos de información, por ejemplo imágenes satelitales y que se puede trabajar a nivel local, regional o nacional y así facilitar o expresar los resultados en un mapa.

Rosete y Bocco (2003), mencionan que los SIG son sistemas que permiten la captura, ingreso, almacenamiento y análisis de datos geográficos así como la presentación de la información resultante, también como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de toda la información geográficas y sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos (Mena, 2007).

Los sistemas de información geográfica (SIG) están integrados por cuatro elementos: el modulo de entrada de datos (selección y captura), el modulo de manejo de datos (almacenamiento, recuperación, base de datos geográficos), el modulo de análisis de datos (modelamiento y reglas o normas de análisis) y el modulo de salida de la información (productos generados, intermedios o finales) (Rosete y Bocco, 2003).

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) se ha incrementado notablemente en estos últimos años, gracias a que son un medio de integración de información que ayuda a orientar y a entender algunos de los problemas con mayor impacto, a los que se enfrenta el mundo actual. Es decir, son herramientas que permiten resolver problemas prácticos que van desde la visualización de información geográfica, pasando por el cálculo del movimiento de la tierra, hasta evaluar su impacto en una región susceptible a sismos (Mena, 2007).

Elementos de un Sistema de Información Geográfica.

Para comprender mejor cómo trabaja un sistema de información geográfica, es importante conocer cuáles son los elementos que lo constituyen. Un (SIG) está conformado por hardware, software, geodatos, procedimientos y una organización administrativa diseñado para capturar, editar, almacenar, recuperar, analizar,

visualizar y compartir datos georeferenciados con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Fallas, 2011).

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN.

Modelos de simulación

Para Roberts *et al.*, (1999), Un modelo de simulación es un programa que permite describir mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico o físico y que permite representar una simplificación del sistema.

DESCRIPCION DEL MODELO SESS

Simple Ecological Sustainability Simulator (SESS), es un programa por computadora que simula la dinámica del producción de forraje en función de la precipitación y los suelos, la condición del pastizal en función del pastoreo y la ganancia de peso de los animales en función de la cosecha y necesidades de energía, y la producción de ganado para evaluar la sustentabilidad ecológica y las alternativas para el manejo del sistema de producción extensiva de vaca-becerro en el noreste de México y el sur de Texas (Díaz *et al.*,2003).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Precipitación mensual

Para este estudio se utilizó una malla de puntos de 20x20 km, para el estado de Coahuila (436 puntos). La precipitación se obtuvo mediante una interpolación de los datos de las estaciones de INIFAP, las cuales se descargaron en este sitio (<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>). Con la precipitación obtenida se parametrizó el modelo SESS.

Datos MODIS

Las imágenes originales se descargaron siguiendo los cuadrantes estándar (resolución espectral de 250 m), Coahuila se encuentra ubicado dentro de dos zonas geográficas (G13 y G14) y fue necesario descargar dos imágenes del sensor MODIS para el estado, aquí se utilizó una nueva malla de puntos de 500x500 m, los puntos que cubren el estado con ésta son 602,555.

De acuerdo a la disponibilidad generada, en este estudio se descargaron imágenes satelitales mensuales del sensor MODIS, Marzo de 2000 hasta Abril de 2013. Con la malla antes descrita. Las escenas se descargaron del sitio: (<http://e4eil01.cr.usgs.gov:22000/WebAccess/drill;jsessionid=C3697E4E9FFFA2324A8311C7C470D94C?next=esdt&revisit=yes&esdt=MOD13A2.3&group=MOLT>), de manera gratuita

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Una vez que descargamos Las imágenes, fueron vistas en Arc Gis 10, para obtener información derivada y mediante una extracción se obtuvieron todos los puntos del estado con su respectivo valor de NDVI.

Para la obtención de los mapas, primero se cargó el archivo *.txt con las coordenadas y valores de NDVI, posterior a esto se hizo un proceso denominado “Feature to Raster” en éste se le asignaron 7 categorías, también se cargó el archivo “shape” del estado con sus municipios.

P-NDVI (Proporción de NDVI)

El P-NDVI (Proporción del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada), es el cociente del NDVI mensual actual, entre el valor promedio histórico del mismo mes.

$P\text{-NDVI} = \text{NDVI actual} / \text{NDVI histórico del mismo mes}$.

El valor de esta variable es de 0 a 2, con esto se hace más fácil su interpretación, así valores más valores bajos indican mala condición de la vegetación y valores altos indican buena condición de la misma.

IEA (índice de Estado del Agostadero)

El índice de Estado del Agostadero (IEA), es el resultado de dividir el IEA simulado con la serie de precipitación observada, entre el IEA simulado con la precipitación media histórica.

Para obtener los valores simulados de IEA, se corrió el modelo SESS en cada uno de los 436 puntos, estos valores representan la relación entre la biomasa sobre el suelo (kg/ha) en el mes actual y su promedio del mismo mes. Cuando el índice es mayor a 1, indica que hay mayor cantidad de biomasa que su

promedio histórico, de lo contrario, cuando el valor es menor a 1, la biomasa disponible en ese mes es menor con relación a su valor promedio.

Para la elaboración de los mapas de IEA. Primero se parametrizó el modelo SESS con las series de precipitación mensuales de Enero 2009 a Abril 2013 para los 426 puntos y los valores obtenidos se guardaron en un archivo *.txt, posterior a esto se cargó el archivo *.txt y el shape del estado con sus municipios en Arc Gis 10 y se hizo un interpolación, al final se asignaron 5 categorías para el IEA.

Relación de la Precipitación, IEA y P-NDVI

Los datos obtenidos de cada variable del 2009 al 2013, se analizaron mediante correlación para ver las relaciones entre estas.

COBERTURA DE HERBÁCEA

FOTOGRAFIA DIGITAL Y MUESTREO DE CAMPO

Ubicación del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el transecto de Linares Nuevo León hasta Ojinaga, Chihuahua en el Norte de México (Figura 1), se asignaron sitios de muestreo a cada 15km mas menos, de acuerdo a como la vegetación fue cambiando. Los sitios fueron de 250 x 250 m², estos puntos estuvieron georreferenciados, lo cual equivale a un pixel de una imagen de NDVI del sensor MODIS de los satélites Terra/Aqua que publica la NASA.

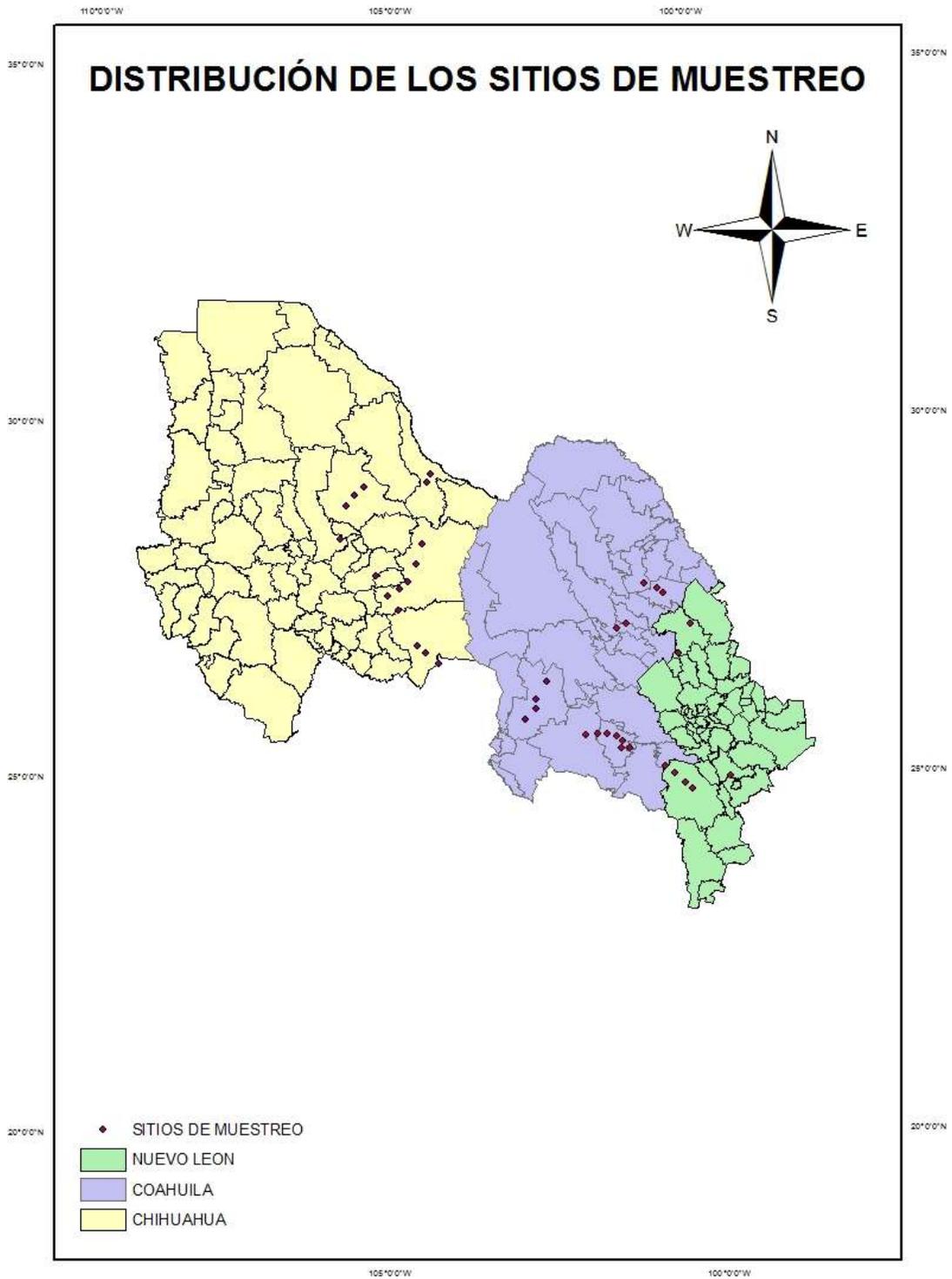


Figura 1. Sitos de muestreo en el estado de Nuevo León, Coahuila y Chihuahua.

Datos de campo

Se obtuvieron datos de herbáceas en 39 sitios del área de estudio con 20 puntos de muestreo en cada sitio de cada estación del año (Cuadro 2); el primer muestreo correspondió del 15 al 22 de Mayo de 2012, el segundo del 29 de Agosto al 05 de Septiembre, el tercer muestreo del 04 al 11 de Diciembre de 2012 y el cuarto muestreo correspondió del 25 de Marzo al 01 de Abril de 2013.

Cuadro 2. Sitios de muestreo con las coordenadas UTM del transecto de Linares Nuevo León a Ojinaga Chihuahua.

ID	X	Y	ELEVACIÓN	ID	X	Y	ELEVACIÓN
1	323411	2786642	2001	21	302421	3073042	1321
2	336074	2775325	1888	22	322283	3064195	1450
3	353123	2759767	1888	23	332020	3055816	935
4	362549	2748708	1888	24	573505	2951305	1027
5	423897	2767312	496	25	553090	2968042	1487
6	372463	3005820	1404	26	539715	2978526	1360
7	351492	2960475	1205	27	509280	3034378	1354
8	268257	2816589	1352	28	492863	3057739	1313
9	258518	2827234	1131	29	474162	3089359	1092
10	254464	2817288	1141	30	419578	3145434	1092
11	248147	2836537	1212	31	428184	3198427	954
12	233815	2840937	1188	32	441439	3215613	879
13	218660	2841477	1208	33	457068	3228391	448
14	201369	2840297	1328	34	559353	3248624	400
15	708715	2863514	1425	35	554710	3234546	323
16	725976	2880505	1296	36	546364	3138457	302
17	725169	2894907	1276	37	538205	3106766	288
18	742373	2923476	1235	38	524553	3080244	236
19	256105	3004204	1465	39	511910	3069014	415
20	272026	3011670	1297				

Fotografías digitales

Se tomaron 20 fotografías digitales a una altura de 4.2 m aproximadamente en cada sitio, con la finalidad de tener un área de 12.5 m² a nivel del suelo, las fotografías se procesaron mediante componentes físicos (hardware) y programa

de aplicación (ENVI 4.3) para hacer una clasificación del tipo de vegetación de cada sitio.

Clasificación de las fotografías digitales

Para la clasificación de imágenes digitales se utilizó el programa ENVI 4.3, las imágenes se cargaron al programa para su posterior clasificación, se le asignaron cuatro clases (Cuadro 3); estos fueron con base a la vegetación diferenciable que se encontraron en la imagen.

Cuadro 3. Clases que se asignaron a las imágenes procesadas en ENVI.

NÚMERO	CLASE
1	Arbusto
2	Gramínea
3	Herbácea
4	Suelo

Estimación en campo

Se elaboró un formato, en la cual se anotó la fecha, lugar, sitio, coordenadas, estado y tipo de vegetación. Al llegar a los sitios se hizo una descripción general del área, se obtuvieron las coordenadas de X y Y, también un estudio detallado de las especies presentes: Gramíneas, herbáceas, arbustos, y suelo desnudo, expresado en porcentaje de cobertura para cada variable.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Para describir el comportamiento de la precipitación, NDVI, P-NDVI e IEA mensuales de 2009 a 2013 en el estado de Coahuila, se obtuvo información de tres puntos de los 436 que conforman el estado (8127, 7731 y 8530). Estos puntos fueron elegidos al azar y están ubicados en los municipios de Múzquiz, Ocampo y Sabinas.

PRECIPITACIÓN MENSUAL

Se estimaron las precipitaciones mensuales del 2009 hasta Abril de 2013. Como se mencionó en el apartado anterior, dichas precipitaciones se obtuvieron de una malla de 20x20 km en el estado de Coahuila.

Múzquiz

En la Figura 2 se muestra la precipitación mensual observada (PMO) y la precipitación acumulada anual (PACU) de Múzquiz de los años 2009 al 2013, se puede observar que en el año 2009 la precipitación anual fue de 325 mm, la precipitación mensual observada menor y mayor para el año 2009 fueron 1 y 79 mm, correspondientes a los meses de Enero y Junio, respectivamente. Para el 2010, se presentó una precipitación anual de 554 mm, como bien se sabe, en el mes de Julio fue la llegada del huracán "Alex" en el Norte del país, para ese mes la precipitación media observada fue de 208 mm, siendo este la precipitación más alta del año. Sin embargo, el año 2011 fue considerado como un año "malo" ya

que se presentó una sequia en el Norte del país, llegándose a acumular una precipitación anual de 148 mm, la precipitación más baja se observó en el mes de Marzo con 1 mm, y la precipitación más alta fue en Julio con 43 mm, este es muy bajo comparado con Julio del 2010, en donde la precipitación fue de 208 mm. En el año 2012 llego a acumularse 99 mm más que la precipitación del año 2011, llegándose a acumular 247 mm, sin embargo, siguió siendo bajo, comparado con el 2009 y 2010. Para el año 2013 solo llegó a tener la precipitación hasta Abril, en el mes de Enero se presentó la precipitación más alta, con 36 mm, llegando a tener un acumulado de 55 mm hasta la fecha mencionada.

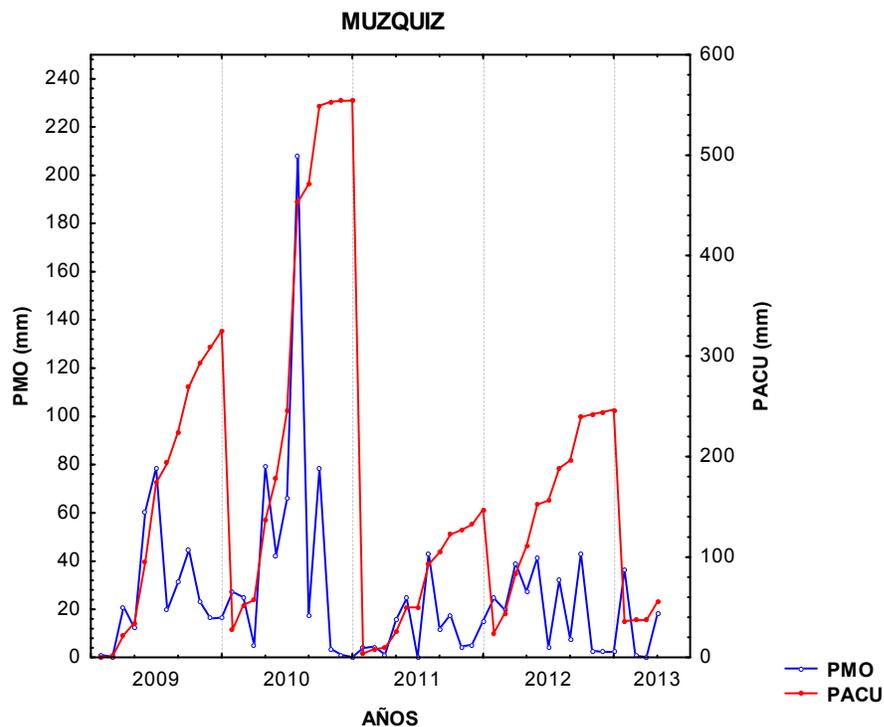


Figura 2. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Múzquiz, Coahuila.

Ocampo

En la Figura 3 muestra el comportamiento de la precipitación mensual observada (PMO) y la precipitación acumulada (PACU) del punto 7731, ubicado

en el municipio de Ocampo, este se encuentra localizado en la Región Centro-Desierto del estado. En el año 2009 éste llegó a tener una precipitación anual de 348 mm. En el mes de febrero la precipitación fue nula y el mes más lluvioso fue Mayo con una precipitación de 78 mm. Para el año 2010, en los meses de Marzo y Diciembre no se registraron precipitación, sin embargo, llegó a tener una precipitación anual de 510 mm, esto debido a que los meses de Junio, Julio y Septiembre tuvieron una precipitación de 66, 248 y 63 mm respectivamente; Julio, el mes con mayor precipitación del año 2010 fue debido al huracán “Alex” que se presentó en este mes. En el 2011, la precipitación para Ocampo no fue tan halagadora, ya que estuvo por debajo de su precipitación acumulada (PACU), la cual es de 333 mm y en este año tuvo una precipitación anual de 139 mm, la precipitación más alta se observó en el mes de Julio con 47 mm y la más baja se presentó en los meses de Enero y Marzo con una precipitación de 1 mm para cada mes. La situación mejoro para el año 2012, la precipitación estuvo por arriba del 2009 y del 2011, pero por debajo del año 2010, ya que la precipitación acumulada (PACU) del año 2012 fue de 214 mm, en este año, el mes más lluvioso fue Julio con una precipitación mensual de 50 mm y los meses de Noviembre y Diciembre la precipitación fue muy escasa, alcanzando a llover 3 mm para ambos meses. Para el año 2013, llegó a tener un acumulado de 42 mm, los meses de Enero y Abril tienen las precipitaciones más altas con 29 y 12 mm respectivamente.

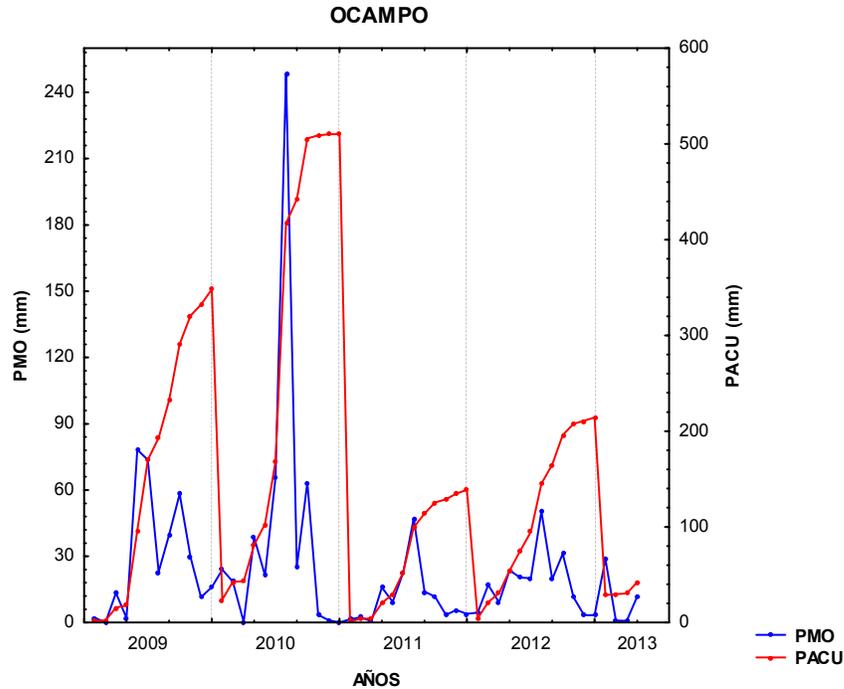


Figura 3. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Ocampo, Coahuila.

Sabinas

En la Figura 4 se puede ver el comportamiento de la precipitación mensual observada (PMO) y la precipitación acumulada (PACU) del punto 8530, ubicado en Sabinas, Coahuila; en el año 2009 este punto logró acumular una precipitación anual de 271 mm, la precipitación más alta se presentó en el mes de Mayo, la cual fue de 78 mm, por el contrario, los meses con precipitaciones bajas fueron Enero y Febrero con 2 mm. En el año 2010, la precipitación para ese punto fue excelente, ya que la precipitación anual fue de 676 mm, las precipitaciones más altas se presentaron en los meses de Abril, Julio y Septiembre, dicha precipitación fueron 107, 259 y 88 mm respectivamente, como se observa, la precipitación más alta fue en Julio, mes en que se presentó el huracán “Alex”. También recordamos que el año 2011, la sequia afectó gran parte del Norte del país, y las precipitaciones para este año se puede observar en la Figura 5, en donde se tuvo una precipitación anual de 266 mm, la precipitación más alta fue de 88 mm, correspondiente al mes de Julio, y Febrero con tan solo con 2 mm fue el mes con la precipitación más baja

de este año. Sin embargo, el 2012 para este punto fue mucho menor que el año 2009, 2010 y 2011, ya que tuvo una precipitación anual de 199 mm y Septiembre fue el mes de mayor precipitación con 54 mm, en contraparte los meses de Noviembre y Diciembre fueron los más bajos, teniendo una precipitación de 1 mm en ambos meses. El año 2013, tuvo una precipitación acumulada de 34 mm hasta el mes de Abril, Enero, fue el mes de mayor precipitación con 20 mm y en Marzo la precipitación fue nula.

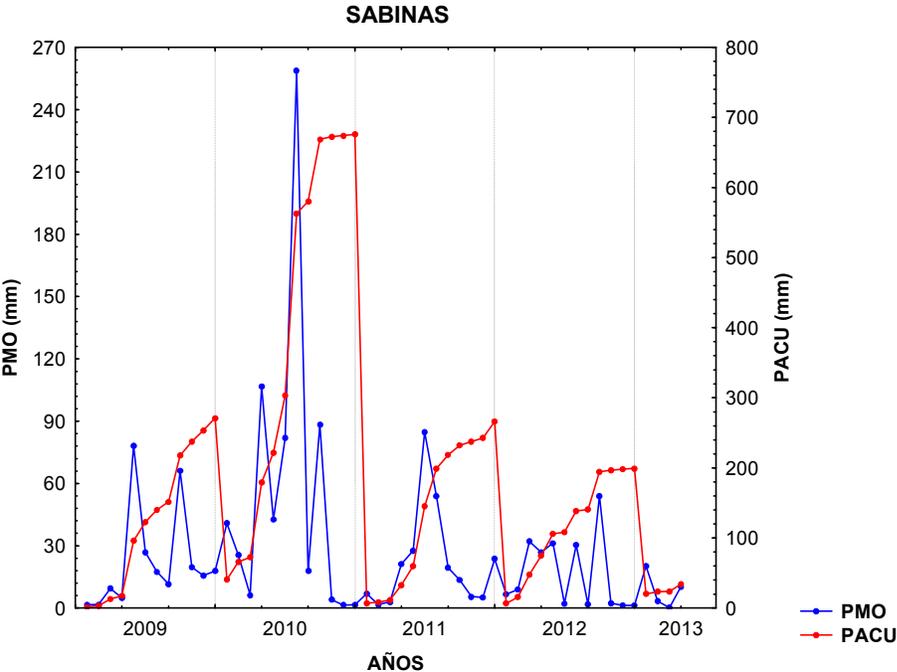


Figura 4. Precipitación mensual observada (PMO) y precipitación acumulada (PACU) de los años 2009 al 2013 en el Municipio de Sabinas, Coahuila.

En la Figura 5 se presentan cuatro mapas correspondientes a la Proporción de la Precipitación Anual (P-PA; Observada/Esperada) de los años 2009 al 2012, esta proporción es el cociente de la precipitación anual observada entre la precipitación anual histórica esperada. En el año 2009 se pudo observar que el Noreste del estado estuvo a 51 y 75% por debajo de su precipitación anual

histórica, los municipios de Acuña, Ocampo, San Pedro y Ramos Arizpe estuvieron 50% por arriba de su precipitación anual histórica, de ahí, los demás municipios estuvieron a 15% por debajo de su precipitación histórica. Para el año 2010, se puede observar el mapa de Precipitación Anual 2010, Coahuila presentó una precipitación de hasta 200% por arriba de su precipitación anual histórica en la mayoría de sus municipios, esto debido al huracán “Alex” que se presentó en este año; Torreón, Matamoros, Viesca y el centro de Sierra Mojada presentaron el 25% de precipitación por debajo de su media histórica. En el mapa de Precipitación Anual 2011, se observó que la mayor parte del estado la precipitación fue del 50% por debajo de su media histórica, la parte Norte de Sierra Mojada fue en donde se presentó la P-PA más baja, del 75 al 83% por debajo de precipitación media histórica. Para el año 2012, la precipitación fue mayor que en el 2011, sin embargo la mayor parte del estado estuvo por debajo de su precipitación media histórica, los municipios que tuvieron una precipitación del 50% por arriba de su media histórica, fueron algunas superficies de Arteaga y el Norte de Ocampo, ya que estos estuvieron en un rango de 1.01 y 1.50.

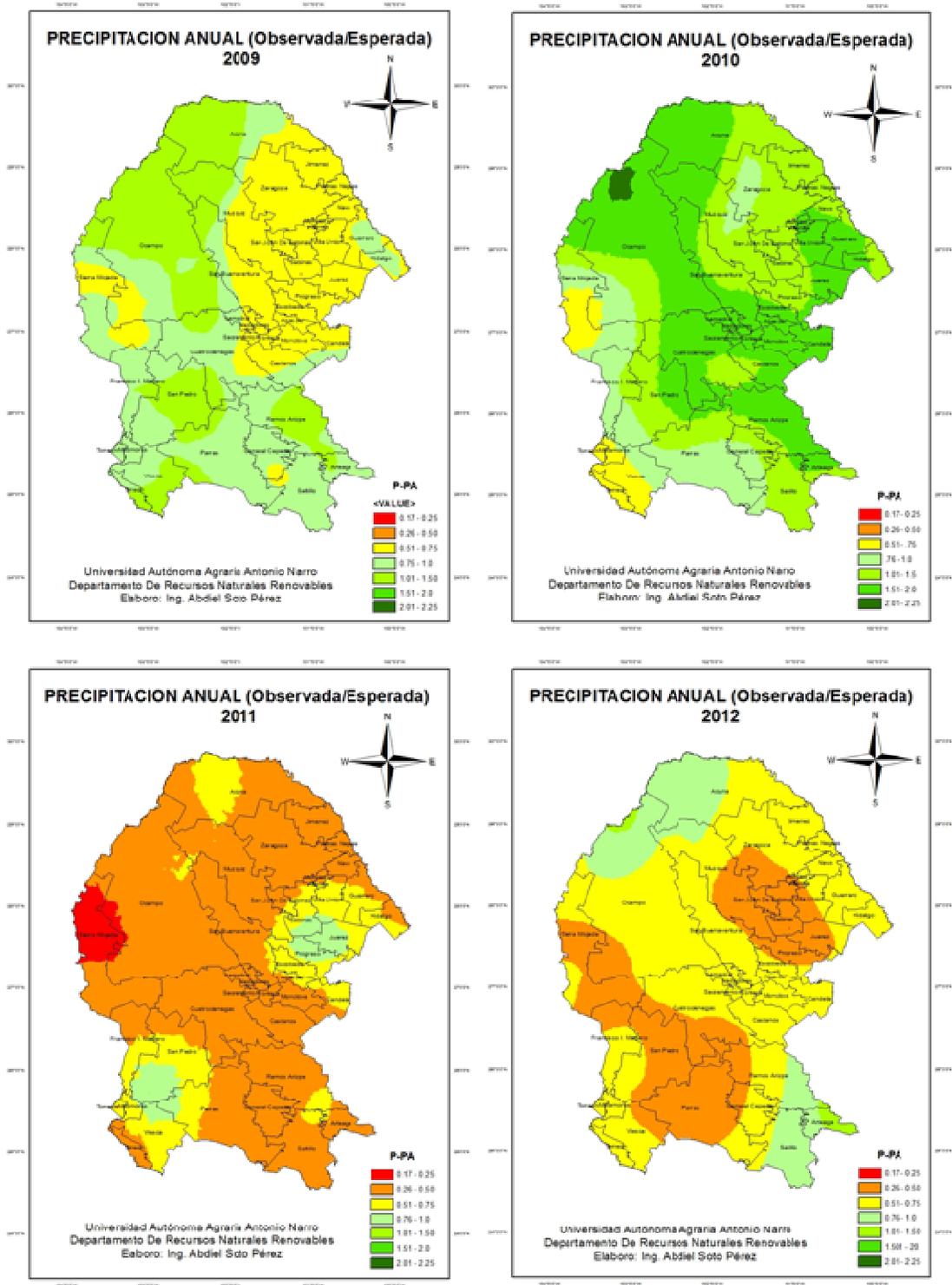


Figura 5. Mapas correspondientes a la Proporción de la Precipitación Anual del 2009 al 2012 en el estado de Coahuila.

NDVI MENSUAL

Se presenta la serie de valores de NDVI de los años 2009, 2010, 2011, 2012 y hasta Abril 2013 de los puntos 8127, 7731 y 8530 ubicados en los municipios de Múzquiz, Ocampo y Sabinas.

Muzquíz

En la Figura 6 se puede observar que el valor de NDVI para este punto en el año 2009 no se mantuvo constante, el valor más alto alcanzado en este año fue en Julio con un valor de 0.50, los valores más bajos se presentaron en los meses de Febrero y Abril con 0.33 y 0.34 respectivamente. Para el año 2010 en NDVI empezó con un valor alto de 0.41, Enero, Febrero y Marzo tuvieron los valores de NDVI más bajos, con 0.30 y 0.29 respectivamente, el NDVI para Abril se incrementó llegando a tener 0.44, en Julio se presentó el huracán "Alex" y con las altas precipitaciones (Figura 2), el NDVI de este mes alcanzó 0.48, los meses de Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre tuvieron valores de 0.40, 0.44, 0.50 y 0.42, sin embargo Diciembre tuvo una ligera caída, terminando el año con un NDVI de 0.39. En el Año 2011, se presentó una sequia en el norte del país la cual tuvo su efecto en los NDVI, todos los meses presentaron valores menores a 0.4, el valor más alto se presentó en Enero con 0.36, Marzo y Agosto presentaron los valores más bajos con 0.29, en el año 2012 los valores de NDVI se recuperaron ligeramente a partir de Abril con 0.40 como se puede observar en la Figura 7, el NDVI más alto se presentó en el mes de Septiembre con 0.48, en contraparte el valor más bajo fue en Marzo con 0.27 y el año 2013 los valores comenzaron a descender, en Enero se presentó un NDVI de 0.31, Febrero 0.32, Marzo 0.28 y Abril 0.26.

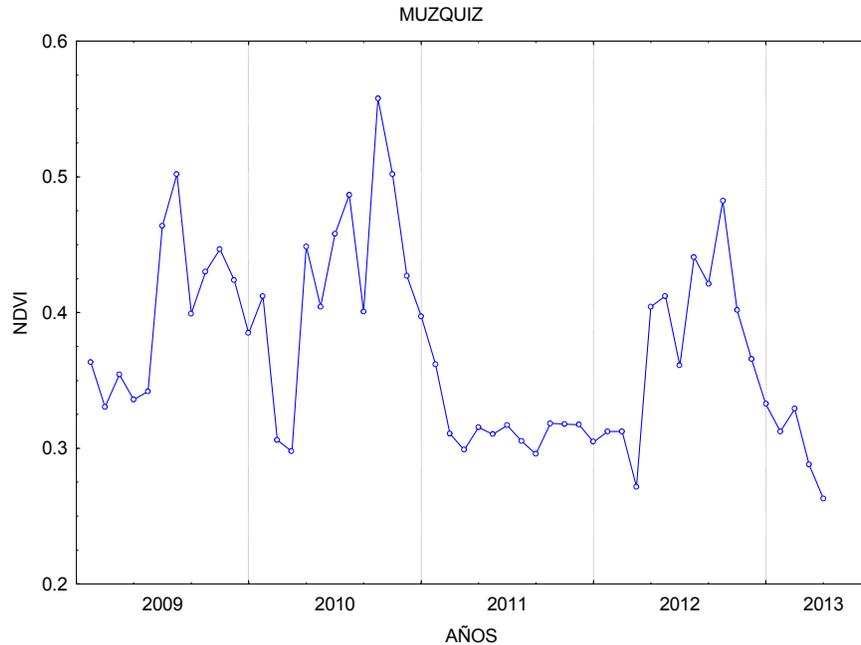


Figura 6. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.

Ocampo

En la Figura 7 se puede observar el valor de NDVI para este punto. Para el año 2009, empezó con un valor de 0.17, siendo este el valor más bajo del año, el cual perteneció al mes de Enero, cabe mencionar que Ocampo se encuentra ubicado en la Región Centro-Desierto del estado, posteriormente Febrero tuvo un ligero aumento llegando a tener un valor de 0.20, en Julio de ese mismo año se presentó el valor más alto, el cual fue de 0.33. El año 2010 comenzó con un valor relativamente bajo, llegando a tener en Enero y Febrero valores de 0.17 para ambos meses, a partir de Marzo se observó un ligero aumento con un valor de 0.19, sin embargo el mes con más NDVI fue Julio con 0.35. En el año 2011 el NDVI se mantuvo en un rango de 0.17 a 0.25, el mes con el valor más bajo se presentó en Diciembre y el valor más alto fue en Noviembre con valores de 0.17 y 0.25 respectivamente. El año 2012, Enero y Diciembre fueron los meses más bajos, llegando a tener valores de 0.16, en Febrero, Mayo y Agosto llegaron a tener valores de 0.19 y en Octubre se presentó el valor más alto con 0.20. En el

año 2013 se presentaron valores más bajos, comparado con el 2009, 2010, 2011 y 2012, llegando a tener en Enero 0.16, Febrero, Marzo y Abril obtuvieron un NDVI de 0.15 para cada mes.

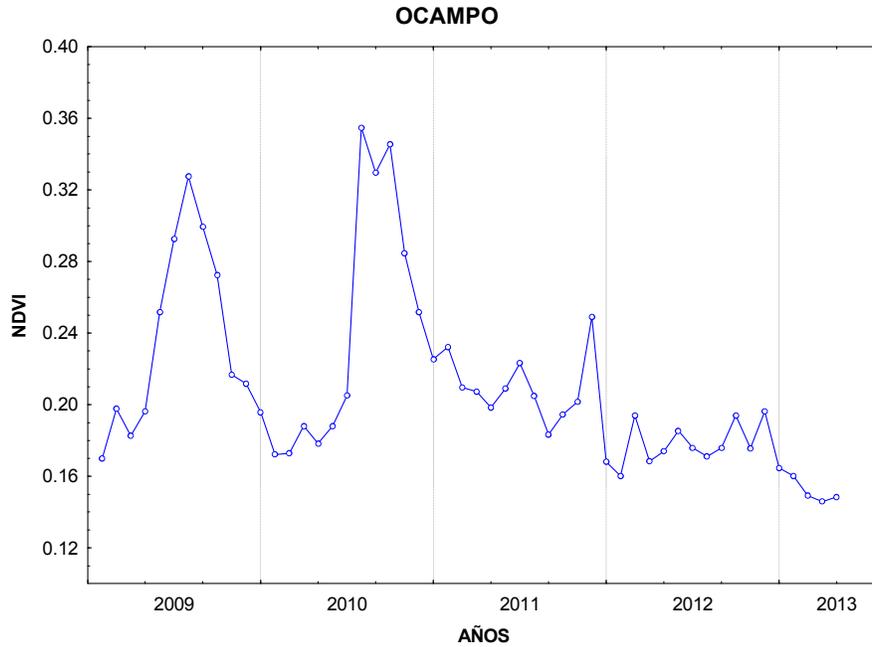


Figura 7. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Ocampo, Coahuila.

Sabinas

En la Figura 8 se puede observar el comportamiento de los NDVI en los años 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013. En el 2009 se observó un valor de 0.29 para el mes de Enero, Febrero presentó un valor de 0.24, y los meses de Marzo, Abril y Mayo presentaron valores de 0.27, el mes Junio fue quien tuvo el valor más alto de ese año con 0.45, sin embargo el NDVI fue descendiendo, terminando así, con un valor de 0.31 en el mes de Diciembre. El año 2010 empezó con valores bajos, Enero 0.25, Febrero 0.23 y Marzo 0.24, a partir de esa fecha los valores aumentaron ligeramente, llegando a tener un NDVI de 0.60 en el mes de Julio, como sabemos en este mes se presentó el huracán “Alex” en el Norte del país, siendo así el mes con el NDVI más alto, sin embargo, el valor empezó a

descender a partir de Agosto, llegando así al mes de Diciembre con un valor de 0.29. Para el año 2011, se presentó el valor más alto en el mes de Julio con 0.31 y Agosto el valor más bajo con 0.24. En el año 2012 el NDVI no se mantuvo constante ya que Febrero tuvo un valor de 0.23, Marzo 0.30 y nuevamente el valor bajo para el mes de Abril con 0.24, sólo Septiembre presentó el valor más alto con 0.34, no obstante así, el valor más bajo fue en Diciembre con 0.19. El año 2013 empezó con un valor de 0.26 en el mes de Enero, sin embargo los valores descienden en los meses de Febrero, Marzo y Abril, con valores de 0.17, 0.18 y 0.17, respectivamente.

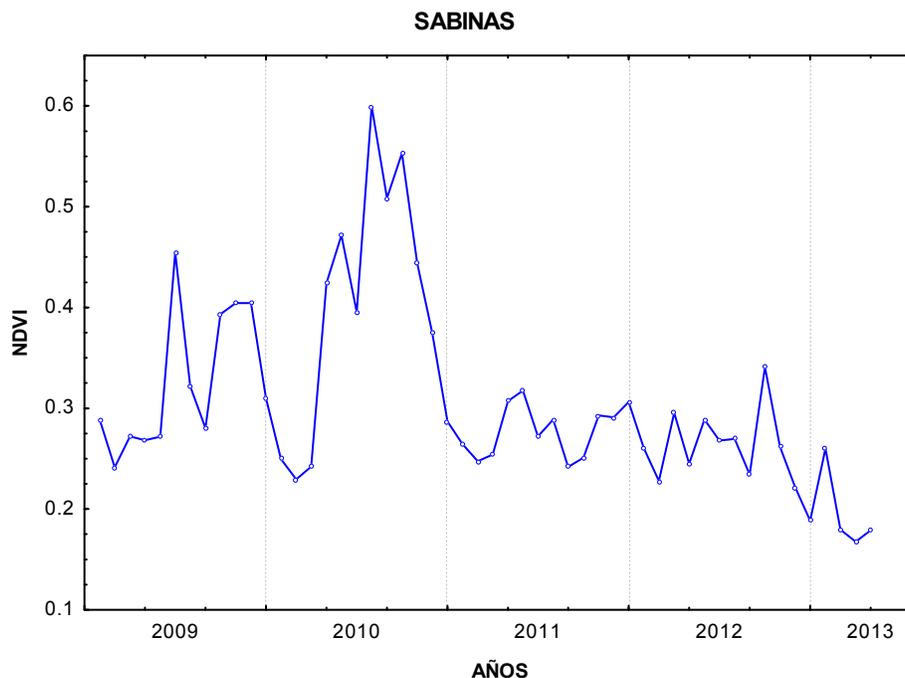


Figura 8. Comportamiento del NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Sabinas, Coahuila.

NDVI ESTACIONALES

La Figura 9 muestra los mapas de NDVI estatales de los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012. En los mapas de NDVI para el estado de Coahuila se logran apreciar cuerpos de agua correspondientes a la presa "Don Martin" que se encuentra en el municipio de Juárez. Para el año 2009, en el mes de Marzo, se pudo observar que las regiones con mayor NDVI se encontraron en la sierra de Múzquiz, Arteaga y pequeñas superficies de Zaragoza, Cuatrociénegas y Saltillo, con valores que van de 0.60 a 1. En general todo el estado presentó valores bajos de NDVI con 0.16 a 0.75, sin embargo, se distinguen pequeñas superficies de Ocampo, Sierra Mojada, San Pedro y Parras, en donde el valor apenas alcanzaron 0.15. Para el mes de Junio, los valores más altos permanecieron en las mismas áreas que Marzo, sin embargo, se puede observar que en el Noreste del estado en general aumentaron los valores en la categoría 0.30 a 0.60. Para el mes de Septiembre, la precipitación que se presentó fue mayor que los meses anteriores, el cual se reflejo en la vegetación, se observó que la gran parte del estado presentó valores de 0.15 a 1. En el Oeste del estado se presentaron pequeñas superficies con los menores valores de NDVI. Para Diciembre, las superficies con los valores más bajos aumentaron, solo el Noreste, en general presentó valores de 0.30 a 1.0, en el año 2010, hasta el mes de Marzo el NDVI no presentó alguna mejoría, la mayor parte del estado presentaron valores de 0.15 a 0.60, solo unas pequeñas superficies de la sierra de Múzquiz y Arteaga presentaron valores de 0.6 a 1, la superficie con poca vegetación se encontraron en pequeñas superficies de Ocampo, Sierra Mojada, Parras, San Pedro y Viesca. Para Junio, se observó un incremento de este índice en la sierra de Múzquiz y Zaragoza, estas fueron las regiones con mayor vegetación, en los municipios de Ocampo y Sierra Mojada, se siguieron reduciendo las superficies con poca vegetación, también se observó una mejoría de la vegetación en Lamadrid y pequeñas superficies de Castaños, Monclova y General Cepeda. En Septiembre, hubo un incremento de este índice en casi todo el estado, esto debido al huracán "Alex" que se presentó en el mes de Julio. Para el mes de Diciembre no

podieron apreciarse valores mayores a 0.75, y a demás se incrementaron las superficies con valores bajos de NDVI, los valores más altos, en general se presentaron en el Noreste del estado. En el año 2011 se presentó la sequia en el Norte del país, disminuyendo así la vegetación en el estado, por consiguiente el mes de Marzo obtuvo valores de 0.15 a 0.30 en casi todo el estado, solo unas superficies de Zaragoza, Múzquiz, San Buenaventura, Hidalgo, Ramos Arizpe y General Cepeda presentaron valores de 0.30 a 0.45, sin embargo, las superficies con poca vegetación se observaron en Ocampo, Sierra Mojada, San Pedro, Viesca y Parras, alcanzando valores hasta 0.15. Para Junio, se observó que los valores menores de NDVI fueron aumentando en los municipios de Ocampo, Sierra Mojada, San Pedro, Viesca y Parras. Para Septiembre se observó casi el mismo comportamiento que el mes de Junio, sin embargo, a diferencia de ese mes, la Sierra de Múzquiz y Arteaga, y pequeñas superficies de San Buenaventura, Cuatrociénegas, Ramos Arizpe y General Cepeda, presentaron los valores más altos, de 0.60 a 1. El mes de Diciembre, se comportó similar que los meses de Junio y Septiembre, sin embargo, ahora la sierra de Múzquiz y Arteaga llegaron a presentar valores de 0.60 a 0.75. Para el año 2012, el mes de Marzo presentó los valores más bajos, en comparación al mismo mes de los años 2009, 2010, y 2011, solo una pequeña superficie de Nava presentó valores de 0.60 a 0.75, en contraparte, aumentaron las superficies con menores índices en el Oeste y la Laguna. Para Junio en general, Muzquiz, Zaragoza, Arteaga y pequeñas superficies de Cuatrociénegas, Hidalgo y Matamoros, presentaron los valores más altos. Sin embargo, las superficies con los valores más bajos en el mes de Marzo, se siguieron presentando en Junio. Para Septiembre el NDVI se comportó similar que el mes Junio, sin embargo, en este mes se pudieron observar valores de 0.76 a 1 en la Sierra de Múzquiz, Arteaga y pequeñas superficies de Acuña, San Buenaventura, Cuatrociénegas, Castaños, Ramos Arizpe y General Cepeda y para Diciembre el NDVI fue menor comparado con el mismo mes de los años 2009, 2010 y 2011, tuvieron valores de 0.01 a 0.15 en una pequeña superficie en Acuña, solo una pequeña superficie de Zaragoza, Múzquiz, Arteaga y Progreso presentaron valores de 0.50 a 0.75.

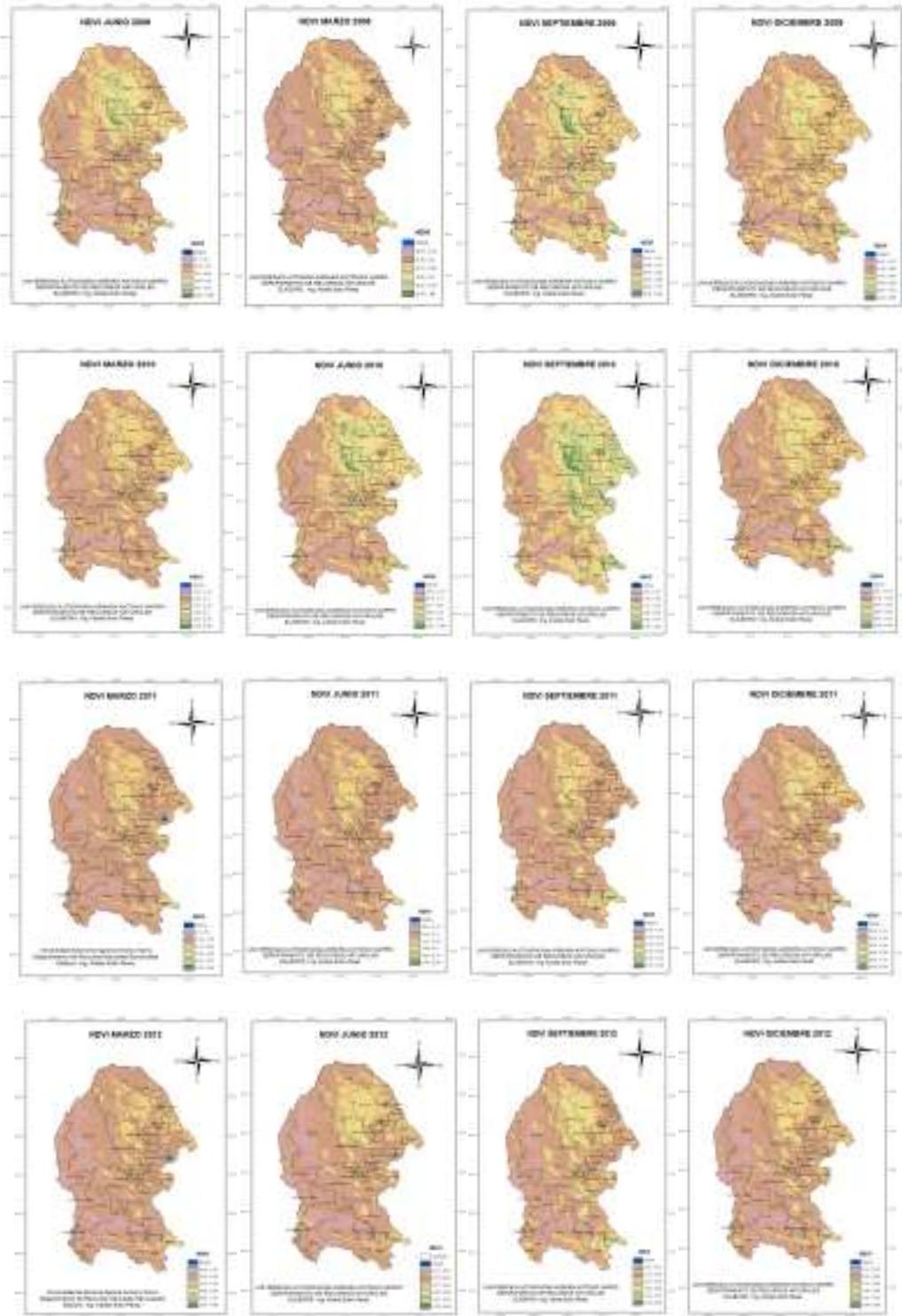


Figura 9. Mapas correspondientes al NDVI para los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012.

En la Figura 10 se muestra cuatro mapas correspondientes los promedios de NDVI de los años 2009 al 2012, estos fueron obtenidos de una malla 20x20 km. En el año 2009 se observó que la mayor parte de estado presentó promedio que fueron de 0.21 a 0.40, los valores más altos se presentaron en los municipios de Acuña, Zaragoza, San Buenaventura, Lamadrid y Arteaga, estos municipios presentaron promedios entre 0.41 y 0.60, sin embargo, el Sur de Sierra Mojada y una pequeña superficie de Ocampo, presentaron los valores más bajos, con 0.17 a 0.20. Para el año 2010, casi todo el Noreste y Monclova, Castaños, Frontera, Candela y Arteaga presentaron lo promedios más altos en un rango de 0.41 a 0.60, de ahí, todos los municipios presentaron promedio de 0.21 a 0.40. En el año 2011 se presentó una sequia en el Norte del país, que se vio reflejado en el NDVI, aumentando los promedios de NDVI que estuvieron en los rangos de 0.17 a 0.21, los cuales se observaron en los municipios de Sierra Mojada y pequeñas superficies de Ocampo, Francisco I Madero, Torreón y Parras., los promedios altos para este año se presentaron en Múzquiz y algunas superficies de Sabinas, Zaragoza y Acuña con promedio de 0.41 a 0.60, la baja precipitación en el año 2011, tuvo sus efectos también en el año 2012, ya que se observó que aumentaron las áreas con bajo promedio de NDVI (0.17-0.21), en contraparte las áreas con mayor promedio disminuyeron, solo se apreciaron pequeñas áreas en los municipios de Zaragoza y Múzquiz.

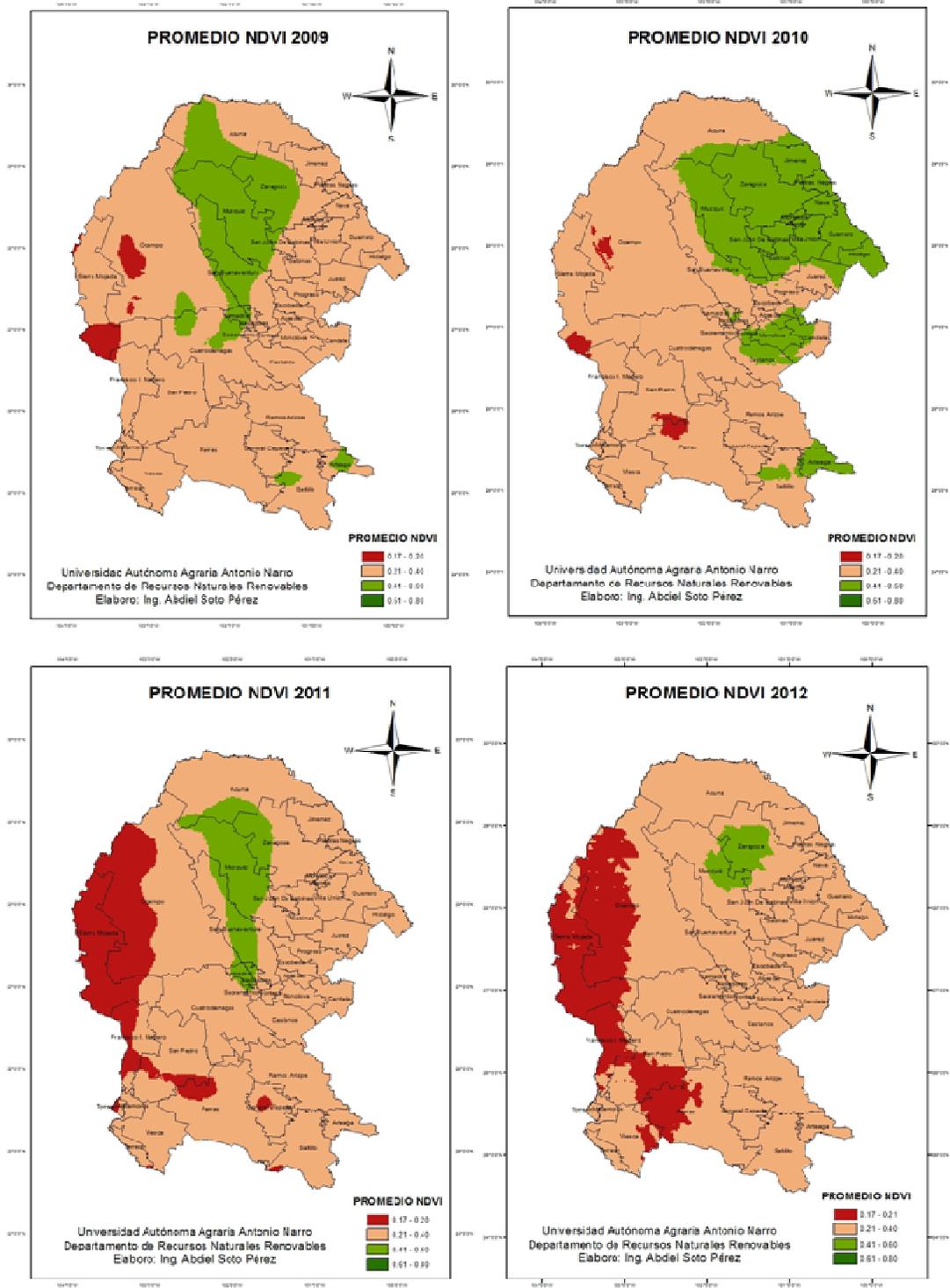


Figura 10. Mapas del promedio anual del NDVI de los años 2009 al 2012 en estado de Coahuila.

P-NDVI MENSUAL

Se presenta la serie de los valores de P-NDVI de 2009 a Abril 2013, de los puntos 8127, 7731 y 8530 ubicados en los municipios de Múzquiz, Ocampo y Sabinas, Coahuila.

Múzquiz

Como se observa en la Figura 11, el año 2009, los primeros meses tuvieron valores de NDVI por debajo de su promedio histórico, esto se refleja en el P-NDVI con valores menores a 1, sin embargo, los meses de Junio, Julio y Diciembre tuvieron valores por arriba de sus históricos, llegando a tener 1.08, 1.12 y 1.01 respectivamente, esto indica que dichos meses estuvieron a 8, 12 y 1 % por arriba comparado con sus respectivos valores históricos. El año 2010, la precipitación que se presentó en ese año, se vio reflejada en el NDVI, la cual en su mayoría de los meses, estuvieron por arriba de su histórico, recordamos que el huracán "Alex" se presentó en el mes de Julio de este año (Figura 2), los meses en donde los valores de NDVI fueron menores a su histórico, se presentaron con un P-NDVI de 0.91, 0.90, 0.89 y 0.95 para los meses de Febrero, Marzo, Agosto y Noviembre respectivamente. Los valores de P-NDVI para el año 2011, fueron bajos, estando en un rango de 2 a 29% por debajo de su valor histórico. Para el año 2012 se observó que los valores de P-NDVI de Mayo y Abril fueron de 1.10 para ambos meses, es decir, tuvieron valores del 10% por arriba de su valor histórico. De ahí, todos los meses presentaron valores por debajo de su valor histórico. Para el año 2013, los valores de P-NDVI fueron menores a 1, los NDVI siguieron siendo menores que su histórico.

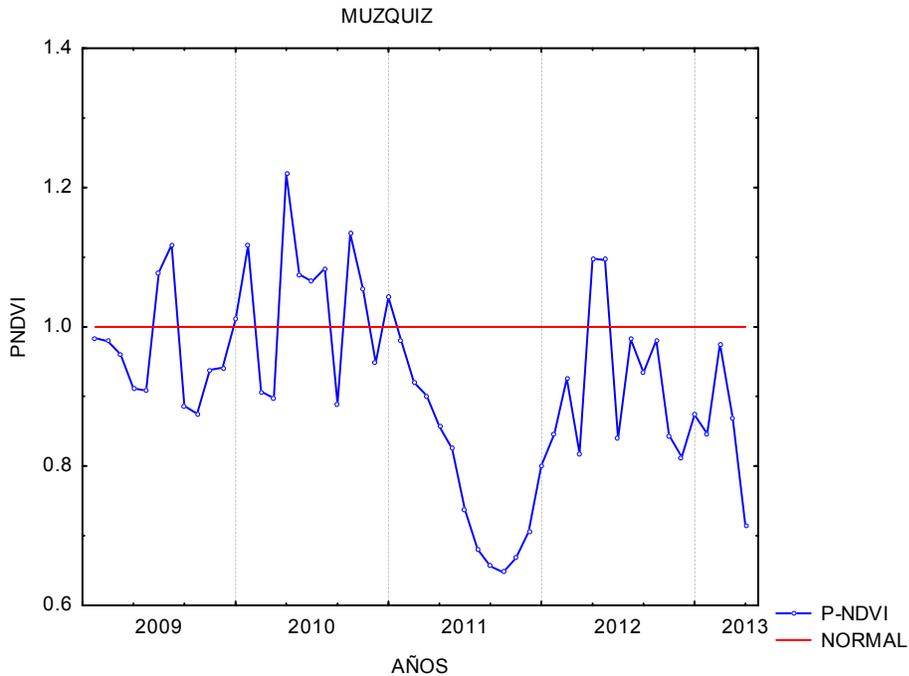


Figura 11. Distribución del P-NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.

Ocampo

En la Figura 12 se puede observar el comportamiento de los valores de P-NDVI. Para el año 2009, los valores fueron de regular a malo, presentando así, el valor más alto en Julio con un P-NDVI de 1.31, es decir, el NDVI estuvo 31% por arriba de su valor histórico y el P-NDVI más bajo se presentó en los meses de Enero y Noviembre con un P-NDVI de 0.87. En el año 2010 los valores de P-NDVI en Enero y Febrero tuvieron valores de 0.88 y 0.90, estos meses llegaron a tener 12 y 10% por debajo de su NDVI histórico, en Marzo, se recuperó ligeramente llegando a tener un P-NDVI de 1.02, solo el 2% por arriba se su NDVI histórico, sin embargo los meses con valores bajos continuaron en Abril, Mayo y Junio con valores por abajo de 1, a partir de Julio el P-NDVI se recuperó, llegando a tener un valor de 1.44, por lo tanto el NDVI estuvo 44% por arriba de su valor histórico. En el 2011, los primeros cuatro meses presentaron valores de P-NDVI por arriba de su valor histórico, Enero presentó un P-NDVI de 1.19, el cual estuvo 19% mayor a

su valor histórico, a partir de Mayo a Octubre los valores de P-NDVI fueron menores a 1 y en Noviembre se presentó un ligero aumento con el 2% más alto que su valor de NDVI histórico. La sequia del 2011 (Figura 3) se reflejó en el 2012, se observó que el mes en donde el NDVI estuvo a 10% por encima de su valor histórico fue en Febrero, presentando un P-NDVI de 1.10 y para el año 2013, el P-NDVI no mejoro, ya que los meses de Febrero y Abril, presentaron valores del 22% por debajo de su NDVI histórico.

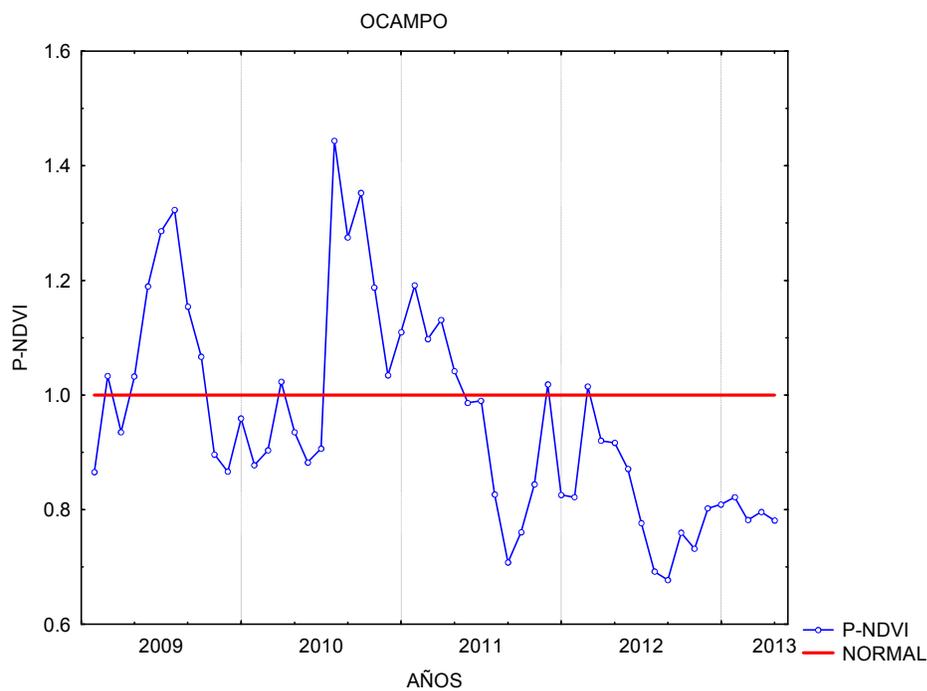


Figura 12. Distribución del P-NDVI mensual del año 2009 al 2013 en el municipio de Ocampo, Coahuila.

Sabinas

En la Figura 13 se observa el comportamiento del P-NDVI mensuales en Ocampo de los años 2009 al 2013. Para el año 2009, Agosto presentó el P-NDVI más bajo, con el 80% por debajo de su NDVI histórico, Junio el valor más alto con el 29% por arriba de su valor histórico, Marzo y Octubre se mantuvieron con valores de 1, por lo tanto el NDVI se mantuvo en condiciones normales. En el 2010, Enero, Febrero y Marzo presentaron los valores más bajos de P-NDVI,

dichos valores fueron: 0.92, 0.90 y 0.90 respectivamente, esto indica que para dichos meses estuvieron a 8 y 10% más bajo con relación a su valor histórico, y los meses de Abril hasta Diciembre alcanzaron valores mayores a 1, siendo el más alto Julio con 1.72, el NDVI para esa fecha fue del 72% por arriba de su histórico, como se observa en la Figura 4, Julio del 2010 alcanzó precipitaciones altas debido al huracán “Alex” que se presentó en este mes. En el 2011, la sequia que se presentó (Figura 4), se reflejo en el crecimiento de la vegetación, ya que el valor más bajo fue Octubre con 0.72, es decir el NDVI estuvo 28% por debajo de su histórico y el valor más alto fue en Diciembre con 1.06, por lo tanto el NDVI estuvo 6% por arriba de su valor histórico. En el año 2012 el P-NDVI no pudo recuperarse, tan solo el mes de Marzo presentó un 10% por arriba de su valor histórico de NDVI y Noviembre obtuvo un P-NDVI de 0.6, esto quiere decir que el NDVI estuvo al 40% por debajo de su valor histórico. En año 2013, Abril presentó el P-NDVI más bajo de todos los años de estudio, teniendo un valor de 0.59.

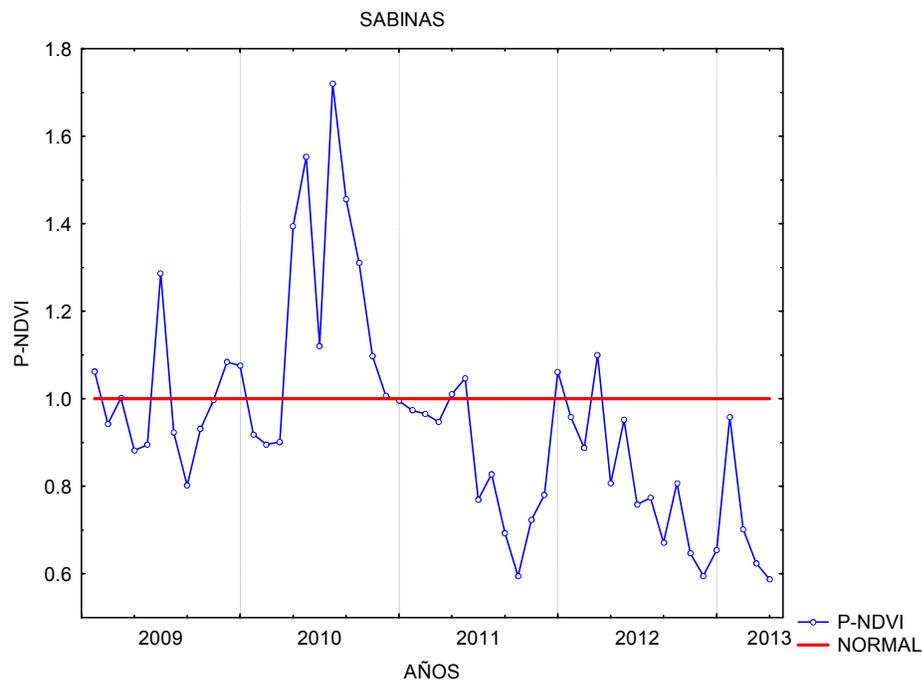


Figura 13. Distribución del P-NDVI mensual de los años 2009 al 2013 en el municipio de Sabinas, Coahuila.

P-NDVI ESTACIONAL

La Figura 14 se muestra los mapas de P-NDVI estatales de los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012. En los mapas de NDVI para el estado de Coahuila se logran apreciar cuerpos de agua correspondientes a la presa "Don Martin" que se encuentra en el municipio de Juárez. Para el año 2009, el mes de Marzo se observó que en general todo el estado presentó valores de 0.71 a 1.0, es decir el NDVI fue 30% menor que su histórico. Para Saltillo, General Cepeda, Arteaga, Viesca, Múzquiz y Sierra Mojada, se presentaron valores de 1.01 a 1.5, es decir, el NDVI estuvo 50% por arriba que su histórico, unas pequeñas superficies en la región laguna presentaron un NDVI del 100% por arriba de su NDVI histórico, sin embargo en algunas superficies de Piedras Negras, Hidalgo, Guerrero, progreso y la Región Laguna presentaron valores del 70% por debajo de su NDVI histórico. El mes de Junio tuvo una mejoría, ya que el P-NDVI de 1.51 a 2.0 se observaron en diferentes regiones del estado. La mayoría de los municipios se encontraron con un P-NDVI de 1.01 a 1.50, es decir, el NDVI para estos municipios estuvo del 1 al 50% por arriba de su histórico, sin embargo, los sitios en donde el NDVI fue hasta el 70% menos que su histórico permanecieron en las mismas superficies con respecto a Marzo, para el mes de Septiembre se pudieron apreciar pequeñas superficies de la Región Laguna valores de 1.51 a 2.0, y las superficies que presentaron un NDVI por debajo de su histórico, aumentaron, se observó mayor superficie en el Norte y el Noreste del estado, la mayor parte del estado presentaron P-NDVI entre 0.71 a 1.50 y para el mes de Diciembre el P-NDVI, se recuperó ligeramente ya que solo pequeñas superficies de Acuña, Jiménez, Francisco y Madero y Matamoros presentaron los P-NDVI más bajos de 0.011 a 0.70, y las superficies en donde el NDVI estuvo por arriba de su histórico se observaron en pequeñas superficies de Sierra Mojada, Cuatocienegas, San Pedro, Sacramento, Castaños y Ramos Arizpe con un P-NDVI de 1.51 a 2.0, de ahí, los municipios restantes tuvieron un P-NDVI entre 0.70 a 1.50, ya para el 2010 se observó que la mayoría de los municipios presentaron valores de P-DVI de 0.71 y

1.0, es decir, el NDVI estuvo por debajo de su histórico, los municipios de Ramos Arizpe, Parras, Francisco I Madero, San Pedro, Jiménez, Hidalgo y Guerrero presentaron un P-NDVI de 1.01 a 1.50, es decir, es en los municipios el NDVI estuvo por arriba de su histórico, también se pudo observar pequeñas superficies en donde el NDVI estuvo por arriba del 50% de su histórico, sin embargo en la Laguna se observaron sitios donde el NDVI estuvo hasta el 70% debajo de su histórico. En Junio el P-NDVI estuvo por arriba de 1 en casi todo el estado, en algunas superficies del Noreste se observó como el NDVI estuvo del 50 al 100% por arriba de su nivel, los valores más bajos aun se siguieron presentando en pequeñas superficies de la Laguna. Como sabemos el huracán "Alex" se presentó en el mes de Julio de este mismo año, el cual también tuvo su efecto en el NDVI, ya que para el mes de Septiembre todo el estado presentó valores por arriba de 1, y aumentaron las superficies que tuvieron un NDVI hasta el 100% por arriba de su histórico, solo una superficie de Ocampo, Cuatrociénegas y San Pedro, tuvieron un NDVI del 30% por debajo de su histórico, ya que presentaron un P-NDVI de 0.71 a 1.0, sin embargo, para Diciembre, el NDVI presentó valores bajos en todo el estado, excepto San Buenaventura y unas superficies de Sierra Mojada, Ocampo, Escobedo, Abasolo, Monclova, Candela, Saltillo y Ramos Arizpe, ya que estos presentaron un P-NDVI de 1.01 a 1.50, es decir estos municipios tuvieron un NDVI hasta el 50% por arriba de su histórico. Para el 2011, en Marzo el NDVI no pudo recuperarse, ya que en general en todo el estado, el P-NDVI estuvo entre 0.71 y 1, solo unas pequeñas superficies de San Pedro, Parras y Progreso, presentaron valores de NDVI del 50% por arriba de su histórico, en contraparte los valores más bajos se presentaron en algunas superficies de Jiménez, Piedras y Nava, en este año se presentó la sequia en el Norte del país, la cual se vio reflejado en los valores de P-NDVI, como se observó el mes de Junio, aumentaron las superficies en donde su NDVI fue hasta del 70% por debajo de su valor histórico, de ahí, todo el estado presentó un P-NDVI de 0.71 y 1, solo unas pequeñas superficies de Sierra Mojada, Cuatrociénegas, San Buenaventura y Abasolo, presentaron un P-NDVI de 1.01 a 1.50, es decir, en esos municipios el NDVI estuvo hasta el 50% por arriba de valor histórico. El mes de Septiembre

presentó el P-NDVI más bajo en comparación del mismo mes de los años 2009, 2010 y 2012 ya que todo el estado tuvo valores por debajo de 1, también aumentaron las superficies en donde el NDVI estuvo hasta el 70% por debajo de su histórico y en Diciembre las superficies en donde el NDVI fue hasta el 70% por debajo de su histórico disminuyeron, sin embargo, en casi todo el estado tuvieron un NDVI del 30% por debajo de su valor histórico. Para el año 2012, en general el mes de Marzo el NDVI estuvo a 30% por debajo de su valor histórico, el P-NDVI más bajo se presentó en algunas superficies, principalmente en Acuña, Múzquiz, Zaragoza, San Buenaventura y castaños, estos llegaron a tener un P-NDVI de 0.011 a 0.70, es decir, el NDVI para esas superficies fue de hasta 79% por debajo de su histórico, para el mes de Junio, los valores más bajos se siguieron presentando en las mismas superficies que Marzo de este mismo año, y en general, todo el estado presentó un P-NDVI de 0.71 y 1.0, es decir, en casi todo el estado el NDVI fue menor que su histórico. En Septiembre, los municipios de Piedras Negras, Zaragoza, Nava, Villa Unión, Guerrero, Hidalgo, Juárez y Progreso, presentaron los valores más bajos de P-NDVI, también, aunque en menor rango, Acuña, Ocampo, Sierra Mojada, Francisco I Madero, San Buenaventura y Castaños con un P-NDVI de 0.011 a 0.70, es decir, en estos municipios los valores de NDVI estuvieron hasta el 70% por debajo de su valor histórico, los demás municipios presentaron valores de NDVI del 30% por debajo de su NDVI histórico. Para Diciembre el NDVI no pudo recuperarse, por eso todo el estado presentó un P-NDVI por debajo de 1, sin embargo aunque las superficies en donde el NDVI fue del 70% por debajo de su histórico, fueron menos que el mes de Septiembre, en general, el NDVI de Diciembre estuvo por debajo de su valor histórico para todo el estado.

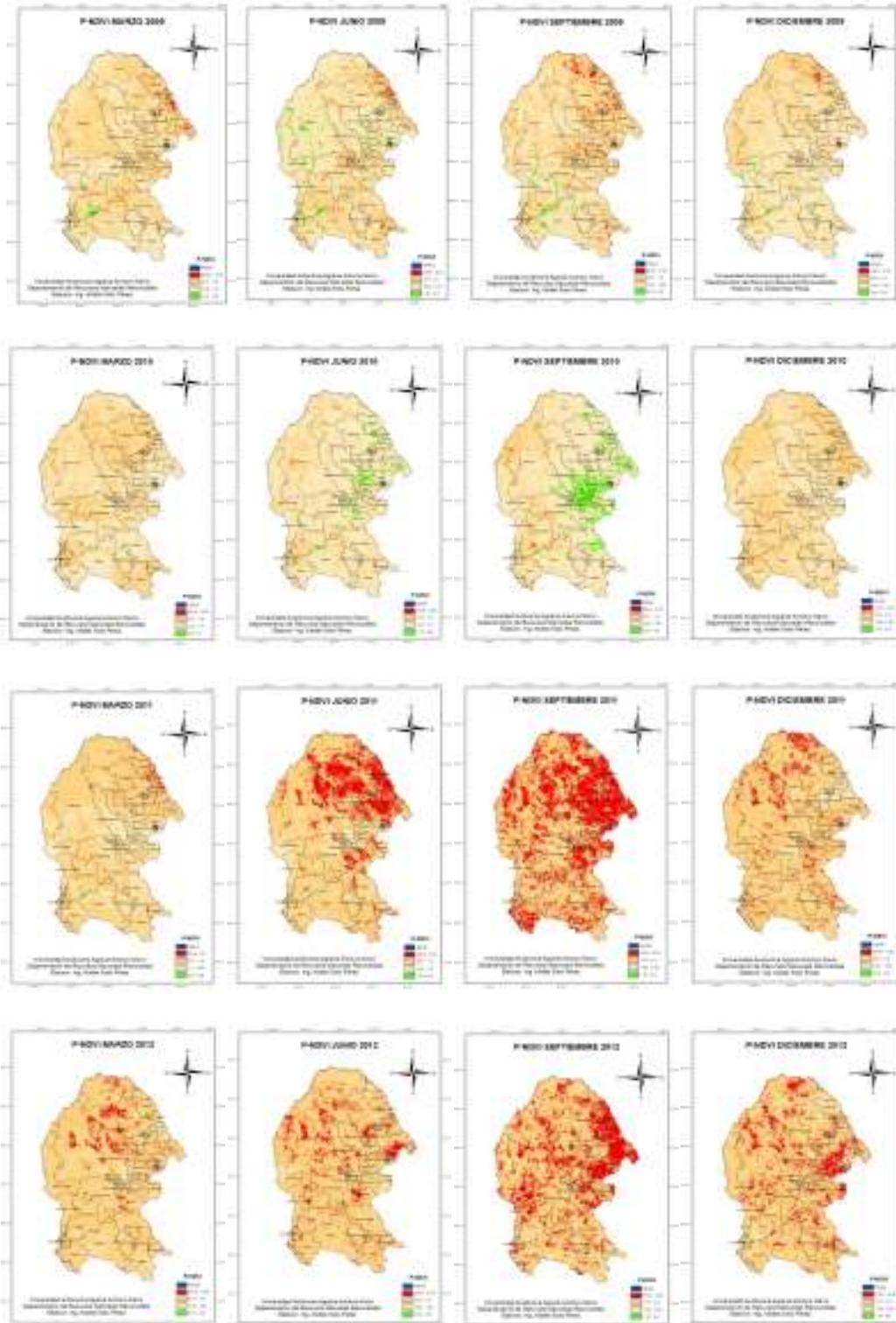


Figura 14. Mapas correspondiente al P-NDVI para los meses d Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de los años 2009 al 2012.

En la Figura 15 se muestran cuatro mapas del promedio de P-NDVI de los años 2009 al 2012. Para el año 2009 se observó que unas pequeñas superficies de Acuña y Jiménez presentaron los P-NDI más bajos con 0.52 a 0.85, este indicó que el NDVI estuvo a 35% por debajo de su promedio histórico, el Noreste del estado, Arteaga y unas superficies de Ramos Arizpe y Saltillo, presentaron los valores entre 0.86 y 1.0, este indicó que el NDVI estuvo al 15% por debajo de su promedio histórico, el P-NDVI más alto se presentó en una superficie de Francisco I. Madero, este municipio llegó a tener un NDVI hasta el 20% por arriba de promedio histórico, los demás municipios llegaron a tener valores desde 1.11 a 1.20, en el año 2010 la precipitación que se presentó se vio reflejado en el P-NDVI, se observó que el valor de NDVI se encontró por arriba de su promedio histórico en todo el estado, sin embargo los valores de PNDVI más altos se encontraron en los municipios de Morelos, Guerrero, Hidalgo, Villa Unión, Sabinas, Progreso, Juárez, Escobedo, Lamadrid, Nadadores, Sacramento, Frontera, Candela, Castaños, Ramos Arizpe, General Cepeda y unas superficies de Acuña, Sierra Mojada, Ocampo, Cuatrocienegas y Parras con un rango de 1.21 a 1.40, es decir el NDVI estuvo 40% por arriba de su promedio de NDVI histórico. Para el año 2011, la sequía que se presentó en el Norte del país también se reflejó en la vegetación ya que los valores de P-NDVI más bajos se encontraron en los municipios de Zaragoza, Jiménez, Múzquiz, Piedras Negras, Nava, Sabinas, Villa Unión, Morelos, Allende, Guerrero, Hidalgo y unas superficies de Ocampo, San Buenaventura, Sierra Mojada, San Pedro, Juárez y Castaños, ya que estos tuvieron un valor de 0.52 a 0.85, los demás municipios tuvieron valores de 0.86 a 1.0, estos valores indican que el NDVI estuvo a 15% por debajo de su promedio. Para el año 2012, el P-NDVI se recuperó ligeramente en el Norte del estado, sin embargo, los P-NDVI más bajos aumentaron en el centro y en general, todo el estado estuvo por debajo de 1, debido a que el NDVI estuvo por debajo de su promedio histórico.

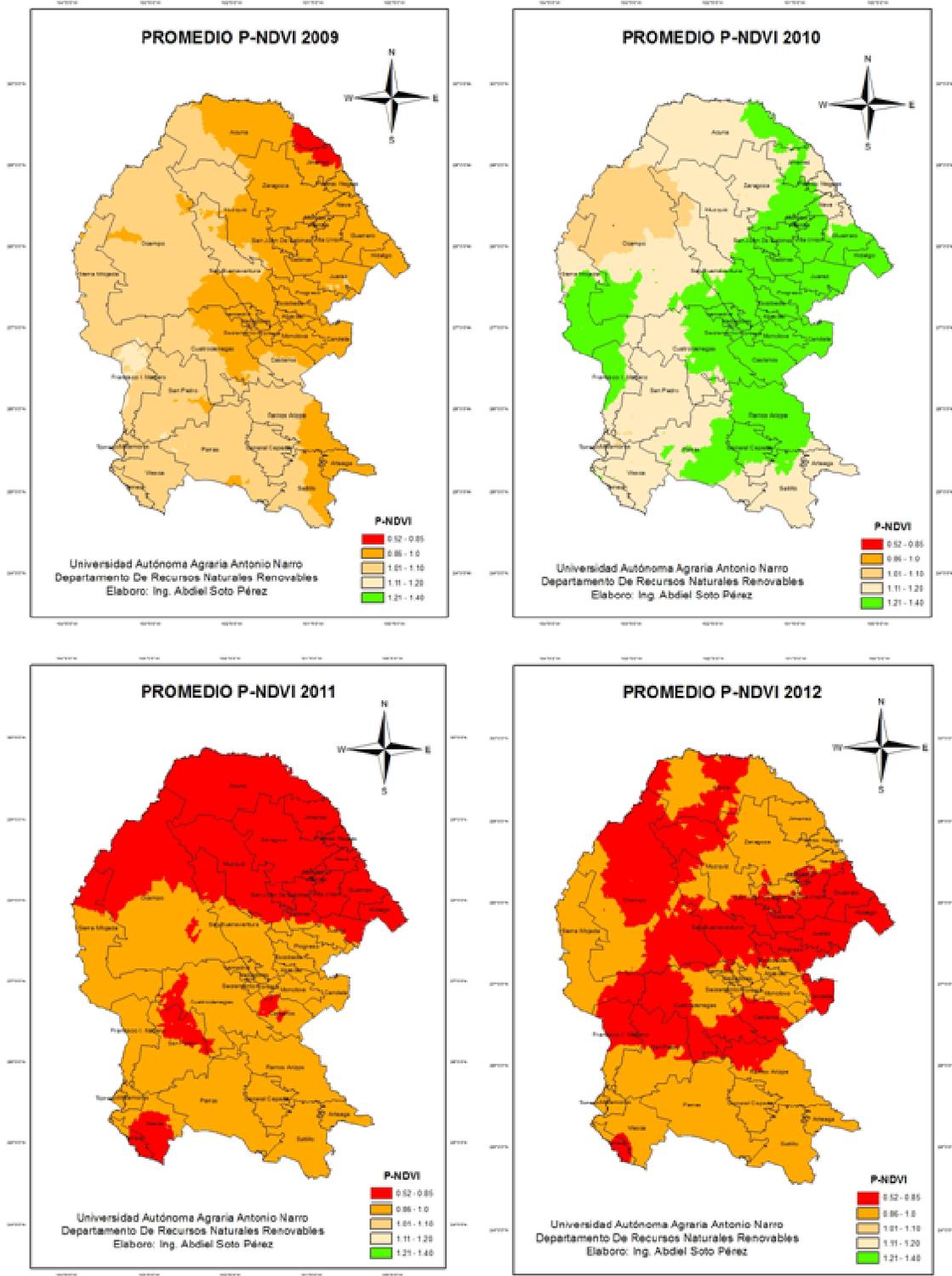


Figura 15. Mapas correspondientes al promedio anual de P-NDVI de los años 2009 al 2012 en Coahuila.

IEA MENSUAL

En esta variable, se presenta el comportamiento del Índice de Estado del Agostadero (IEA) para los años 2009 al 2013, de los puntos 8127, 7731 y 8520, ubicados en Múzquiz, Ocampo y Sabinas Coahuila.

Múzquiz

En la figura 16 se puede observar que en el año 2009, todos los meses tuvieron un valor de IEA mayores a 1, por lo tanto la cantidad de biomasa para este sitio fue mayor con relación a su valor histórico. Para el año 2010, con la llegada del huracán “Alex” la precipitación acumulada fue de 554 mm (Figura 2) y como la biomasa está relacionada con la precipitación, ese año se presentaron valores de 1.6 para el mes de Mayo y Agosto 1.7, es decir, que en Mayo había 60% más de biomasa, con relación a su valor histórico, y Septiembre tuvo una cantidad de biomasa acumulada a nivel del suelo del 70% más que su valor histórico, los meses de Enero, Febrero y Abril, presentaron valores de 1.1, 10% por arriba de su valor histórico. Sin embargo para el año 2011, los meses en donde la biomasa estuvo por arriba de su valor histórico fueron: Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo y Junio, a partir de Julio y hasta Diciembre los valores fueron menores a 1, esto indica que la cantidad de biomasa acumulada fue menor con relación a su valor histórico. Para el año 2012 todos los meses estuvieron por debajo de 1, excepto el mes de Junio, por lo tanto la biomasa acumulada para el año fue menor con relación al valor histórico. En el año 2013 los valores de IEA fueron menores a 1.

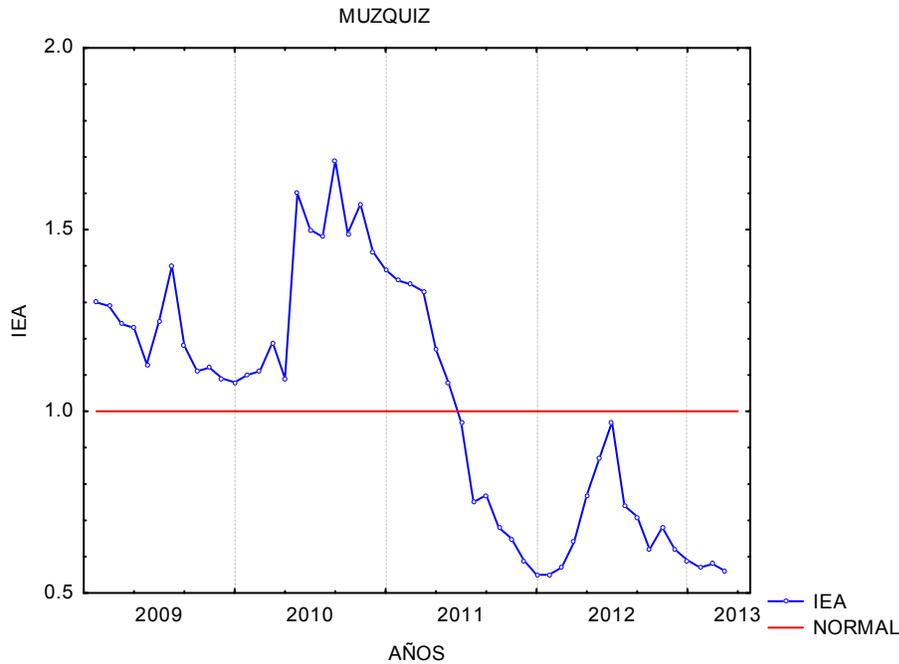


Figura 16. Distribución de IEA mensual de los años 2009 al 2013 para Muzquiz, Coahuila.

Ocampo

En la figura 17 se puede observar que los valores de IEA de Enero a Mayo los valores fueron menores a 1, por lo tanto, la cantidad de biomasa fueron menores con relación a su valor histórico, sin embargo a partir de Junio hasta Diciembre, con excepción del mes de septiembre, los valores de IEA fueron mayores a 1, por lo tanto la biomasa acumulada fue mayor a su valor histórico para dichos meses. Para el año 2010, el único mes en donde la biomasa acumulada fue ligeramente menor a su histórico fue en Abril, con un valor de 0.96, para este mes solo estuvo 4% por debajo de su valor histórico, de ahí, todos los meses el valor de IEA fue mayor a 1 (Figura 17), debido a las altas precipitaciones que se presentó en ese año por la llegada del huracán “Alex”. En el año 2011 se presentó una sequia en el Norte de país (Figura 3) afectando así la producción de biomasa, en donde la mayor parte del año, la cantidad de biomasa producida fue menor con relación a su valor histórico, los meses en donde los valores fueron

0.6, es decir la biomasa en el suelo estuvo a 40% por debajo de su valor histórico. En el 2013, el valor de IEA no mejoro, si no todo lo contrario, los valores en los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril fueron: 0.33, 0.33, 0.31 y 0.28 respectivamente, por lo tanto la biomasa en Enero y Febrero estuvieron al 67%, Marzo a 69% y Abril a 72% por debajo de su valor histórico.

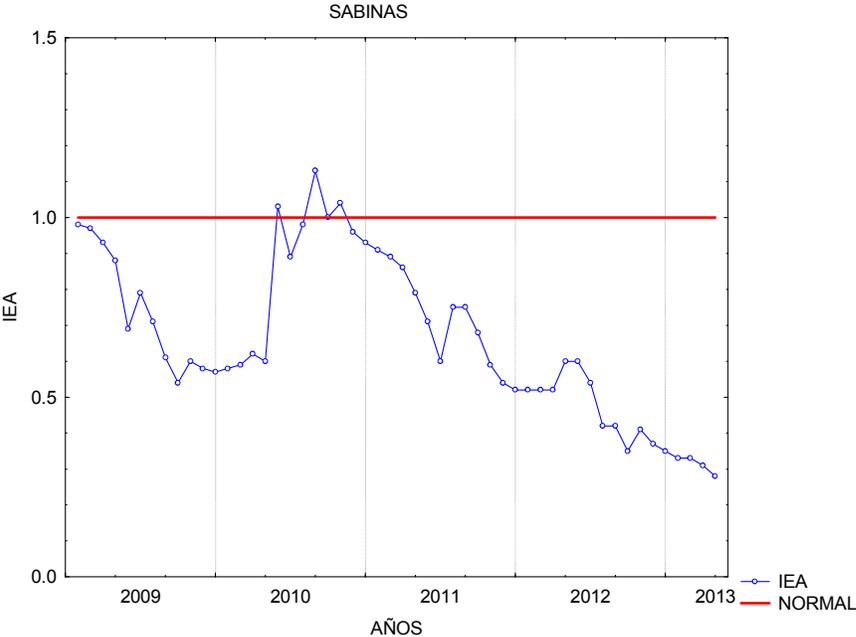


Figura 18. Distribución de IEA mensual de los años 2009 al 2013 para Sabinas, Coahuila.

La Figura 19 muestra cuatro mapas correspondientes al promedio de IEA de los años 2009 al 2012. En año 2009 se observó un IEA bueno ya que la mayor parte del estado presentó valores de 0.91 a 1.25, como lo mencionamos anteriormente, el IEA su estado normal es 1, y un índice en donde esta solamente el 10% por debajo su biomasa histórica no se considera malo, los municipios en donde la biomasa en el suelo fue del 25 al 50% mayor que la biomasa histórica se presentaron en pequeñas superficies de Acuña, Ocampo y San Buenaventura, una superficie de Acuña también presento valores del 50 al 100% por arriba de su biomasa histórica, ya que el IEA fueron de 1.51 y 2.0, los municipios de Múzquiz, Jiménez, Zaragoza, Piedras Negras, Nava, Sabinas, Juárez, Guerrero, Progreso, Escobedo, Morelos, Allende, Villa Unión, Arteaga, Saltillo, y unas superficies de

Ocampo, Sierra Mojada, San Buenaventura, Escobedo y Cuatrociénegas, presentaron valores de 0.51 a 0.90, es decir, en esos municipios la producción de biomasa fue del 40% por debajo de su biomasa histórica. En el año 2010 se observó que el Noreste del estado, excepto Guerrero e Hidalgo, presentaron promedios del 40% por debajo de su biomasa histórica, de ahí, debido a las altas precipitaciones ocurridas en ese año, el IEA aumentó en casi todo el estado, los valores más altos se presentaron en algunas superficies de Acuña, Ocampo, San Pedro, Cuatrociénegas y Ramos Arizpe, en estos municipios el IEA estuvo en un rango de 1.51 a 2.0, por lo tanto la producción de biomasa en esas superficies fueron de hasta el 100% por arriba de su biomasa histórica. En el año 2011, se presentó una sequía en el norte del país, el cual también se reflejó en los valores de IEA, ya que tan solo algunas superficies de Acuña, Ocampo, Múzquiz, Progreso, Juárez, Ramos Arizpe, Arteaga, Saltillo, y parte de la Laguna, presentaron los valores más altos, donde la producción de biomasa fue hasta del 25% por arriba de su biomasa histórica, la mayor parte de los municipios tuvieron un IEA de 0.51 a 0.90, es decir, la producción de biomasa fue del 40% por debajo de su histórico, sin embargo los valores más críticos estuvieron en Centro de Múzquiz y Sierra Mojada, con valores de 0.28 a 0.50 estos llegaron a tener una producción de biomasa hasta un 72% por debajo de su biomasa histórica. En el 2012, el IEA no fue tan halagador, ya que todo el estado estuvo por debajo de su biomasa histórica, con valores menores a 1, aumentaron las áreas en donde el IEA tuvo valores entre 0.28 a 0.50, esto debido a la sequía del 2011, el IEA no pudo recuperarse para este año.

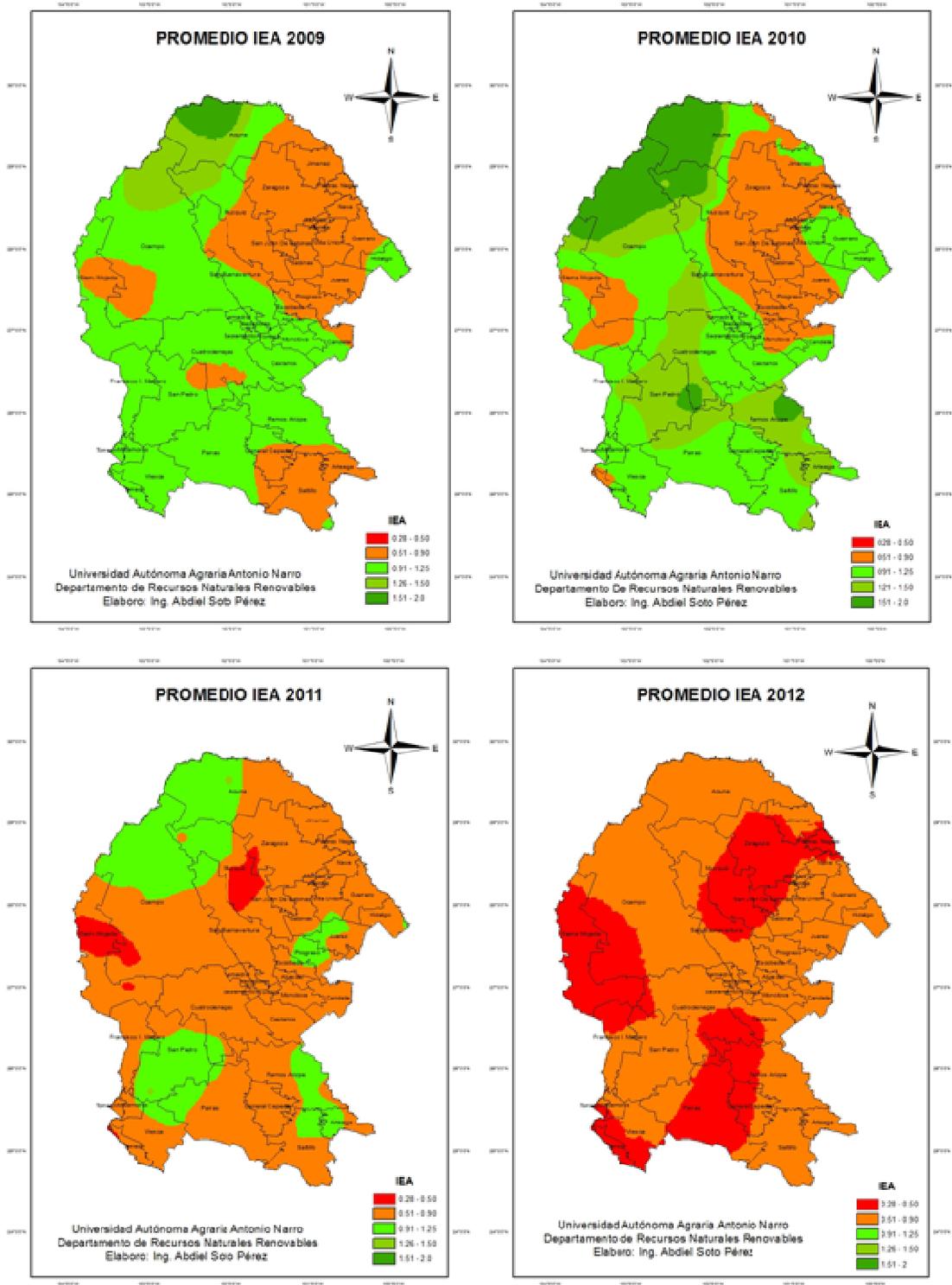


Figura 19. Mapas correspondientes al promedio de Índice de Estado del Agostadero de los años 2009 al 2012 en Coahuila.

RELACIÓN DE PRECIPITACIÓN MENSUAL OBSERVADA (PM0), PNDVI E IEA

Se obtuvieron las relaciones entre la Proporción de la precipitación anual (PPA), IEA y P-NDVI de los 436 puntos del 2009 al 2013. Para la variable PPA contra el IEA obtuvo una correlación del 77%, la PPA contra el P-NDVI obtuvo una correlación del 65% y la correlación del IEA contra el P-NDVI fue del 49%.

En el Cuadro 4 se puede observar las correlaciones separado por percentiles de las variables Proporción de la Precipitación Anual (PPA; Observado/Esperado) P-NDVI e IEA de los 436 puntos en los años 2009 al 2013, de acuerdo a Zar (2010). Para las variables PPA contra el IEA se observó que el 73.39% de las relaciones obtuvieron una correlación por arriba de 0.76, el 23.39% presentó una correlación entre 0.51 a 0.75, el 1.83% obtuvo correlaciones entre 0.26 a 0.50 y solo el 1.38% de los puntos obtuvieron correlaciones menores a 0.25; para la variable PPA contra P-NDVI se observó que el 83.2% de los 436 puntos obtuvo una correlación por arriba de 0.76 y tan solo el 1.6% presentaron correlaciones menores a 0.25, también se hizo una regresión para las variables IEA contra el P-NDVI y se observó que existe una relación entre ambas variables, el 64% de los puntos presentó una correlación mayor a 0.76, el 25.1% presentó una correlación de 0.51 a 0.75, el 6.9% presentó una correlación de 0.50 a 1.26 y solo el 3.7% de las relaciones obtuvo una correlación por debajo de 0.25.

Cuadro 4. Porcentaje de coeficientes de correlación de los 436 puntos de las variables PPA, IEA y PNDVI que se evaluaron en el estado de Coahuila. Los números dentro de los paréntesis representan los puntos que tuvieron coeficiente de correlación en los rangos indicados.

	IEA				P-NDVI			
PPA	≥ 0.76	0.75-0.51	0.5-0.26	<0.25	≥ 0.76	0.75-0.51	0.50-0.26	<0.25
	(320)	(102)	(8)	(6)	(364)	(56)	(9)	(7)
	73.3%	23.39%	1.83%	1.38%	83.2%	13.1%	2.1%	1.6%
P-NDVI	(275)	(110)	(35)	(16)				
	64%	25.1%	6.9%	3.7%				

La Figura 20 muestra la relación del P-NDVI, IEA y la precipitación mensual observada (PMO), en el punto 8127, ubicado en Múzquiz. En el 2009 se observó que la precipitación para ese año, fue menor a los 100 mm, solo el mes de Junio alcanzó una precipitación de de 79 mm, y como el P-NDVI e IEA dependen de la precipitación, este se reflejo para el NDVI e IEA de los meses de Junio y Julio, alcanzando los valores más altos de 1.1 y 1.4, respectivamente, las altas precipitaciones ocurridas en el 2010 se reflejaron solamente en el P-NDVI con valores de 1.4 a 1.6, sin embargo, el IEA mas alto ocurrió en el mes de Agosto con un valor de 1.69, a finales de este año, tanto el N-DVI como el IEA, los valores fueron descendiendo. Debido a la baja precipitación en Octubre, Noviembre y Diciembre del 2010, y todo el año 2011, el P-NDVI no pudo recuperarse, y en todos los meses presentó valores por debajo de 1, la precipitación más alta se observó en Julio con 43 mm, sin embargo el IEA en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo, la biomasa estuvo 36% por arriba de su valor histórico. Para el año 2012, solo se acumulo 99 mm más que el 2011, esto también se vio reflejado para el NDVI y el IEA, ya que ambos presentaron valores por debajo de

1, para el 2013, Febrero presentó el P-NDVI más alto con 0.98 y Enero el más bajo con 0.84, el IEA termino con un valor de 0.48 en el mes de Abril del 2013.

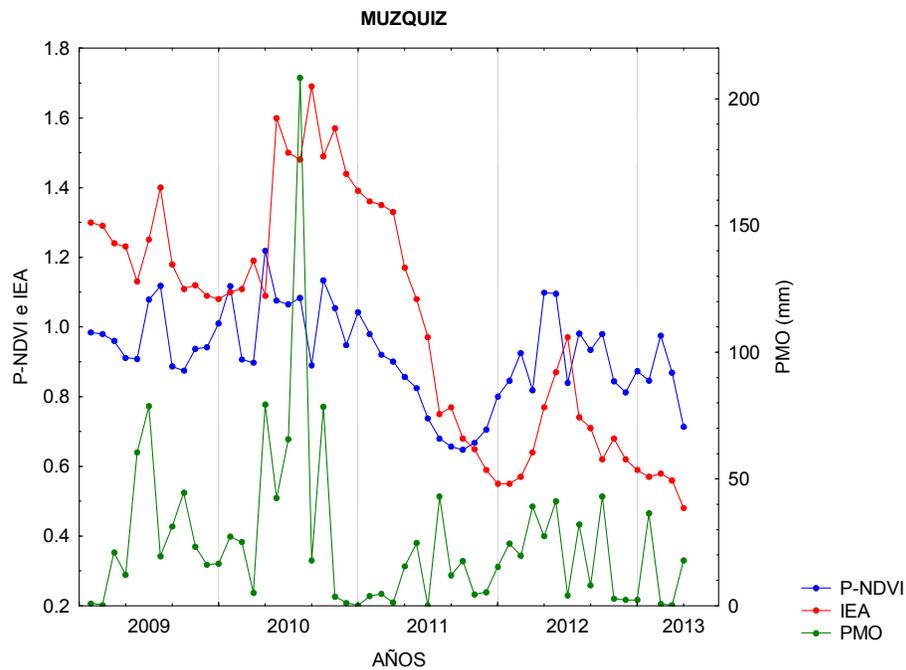


Figura 20. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 8127 en el municipio de Múzquiz, Coahuila.

La Figura 21 muestra la relación del P-NDVI, IEA y la precipitación mensual observada en el punto 7731, ubicado en Ocampo. Se observó que la precipitación en los primeros meses del año 2009, Enero, Febrero, Marzo y Abril presentaron las precipitaciones más baja de este año, también el PNDVI e IEA se comportaron en general de la misma manera, sin embargo, Julio presentó el IEA más alto con 1.24 y el P-NDVI más alto fue en ese mismo mes con 1.32, en el año 2010 la precipitación fue mayor que su histórico, con 177 mm más, esto favoreció a la vegetación y por lo tanto a la producción de biomasa, la mayoría de los meses presentaron valores de P-NDVI por arriba de 1, el más alto fue en el mes de Julio con 1.44, es decir el NDVI para ese sitio estuvo a 44% por arriba de su NDVI histórico, cabe mencionar que en el mes de Julio se observó la precipitación más alta con 248 mm debido a la llegada del huracán “Alex” que se presentó en ese mes y los meses que presentaron P-NDVI por debajo de 1, fueron: Enero,

Febrero, Abril y Mayo. El 2011 fue un año muy seco, y en ese punto tan solo se llegó a acumular una precipitación de 139 mm anual y la precipitación promedio histórica es de 333 mm, es decir estuvo a 41% por debajo de su histórico, este se puede observar en la Figura 2, que a partir de Abril la precipitación fue en descenso, así también en este mes el P-NDVI e IEA los valores empezaron a descender, Enero, Febrero, Marzo y Abril presentaron los P-NDVI más altos, con 1.19, 1.10, 1.13 y 1.04 respectivamente, y en Noviembre se observó un ligero aumento, sin embargo el IEA, solo los primeros tres meses del año presentaron valores altos, 1.08, 1.06 y 1.04 respectivamente, de ahí todos los meses presentaron valores por debajo de 1. En el 2012 aunque la precipitación fue 75 mm más que el año 2011, el P-NDVI e IEA no pudieron recuperarse, para el P-NDVI solo el mes de Febrero presentó condiciones normales (1.01) y todos los meses, presentaron valores por debajo de 1, así también para los valores de IEA, solo el mes de Agosto alcanzó el valor más alto con 0.66, y para el año 2013, el P-NDVI estuvo en un rango de 0.78 a 0.82, sin embargo, el valor más alto de IEA se presentó en Febrero con 0.56.

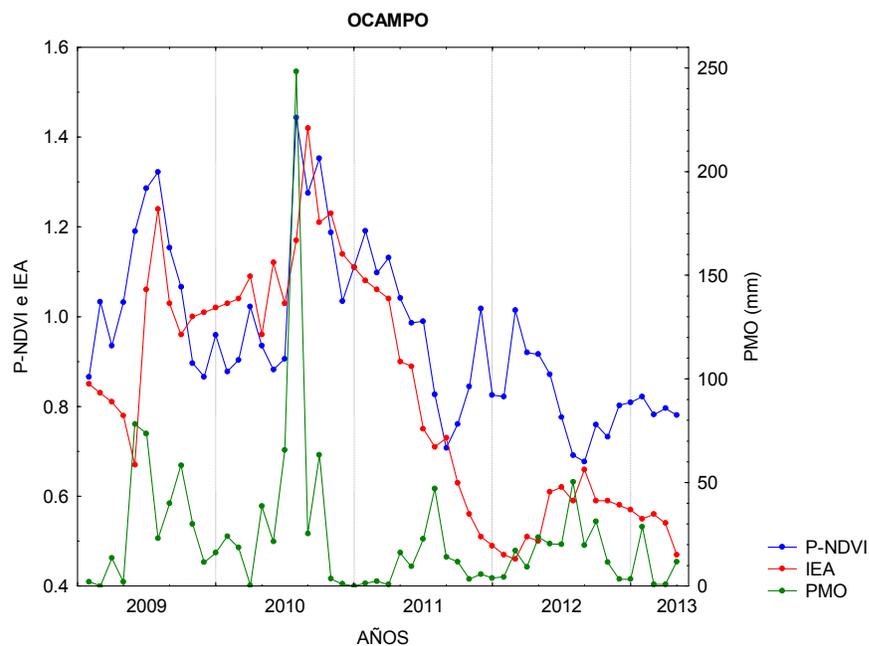


Figura 21. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 7731 en el municipio de Ocampo, Coahuila.

La Figura 22 muestra la relación del P-NDVI, IEA y la precipitación mensual observada (PMO) en el punto 8530, ubicado en Sabinas. Este punto presentó un coeficiente de correlación de 0.64 entre el P-NDVI e IEA. Para el año 2009 la precipitación anual fue menor que su promedio histórico, este se vio reflejado en el PNDVI e IEA, los meses de Febrero, Abril, Mayo, Junio, Julio y Septiembre, presentaron los valores que estuvieron por debajo de 1, y el IEA todo el año, estuvo por debajo de 1. La alta precipitación que se presentó en el 2010 debido al huracán "Alex" causó que la vegetación se recuperara, así, de esta manera se observó que la mayoría de los meses el P-NDVI fue mayor a 1, solo los meses de Enero, Febrero y Marzo, presentaron los P-NDVI más bajos con 0.91, 0.89, 0.90 respectivamente, sin embargo, el IEA no pudo recuperarse en su totalidad, solo Mayo, Agosto, Septiembre y Octubre, presentaron valores por arriba de 1. Para el año 2011 llovió 266 mm en ese sitio, esto se vio reflejado el P-NDVI e IEA, solo los meses de Abril, Mayo y Diciembre presentaron P-NDVI altos con 1.01 y 1.04, no así, el IEA que todo los meses del año, excepto el mes de Enero que alcanzó un IEA de 0.90, es decir los valores estuvieron por debajo de su biomasa histórica en todo el año. El 2012, solo obtuvo una precipitación de 199 mm anuales, de esta manera el P-NDVI e IEA ambos presentaron valores por debajo de 1, excepto el mes de Marzo, el cual su valor de P-NDVI fue de 1.10 y para el año 2013, hasta Abril, el P-NDVI y el IEA no pudieron recuperarse hasta esa fecha.

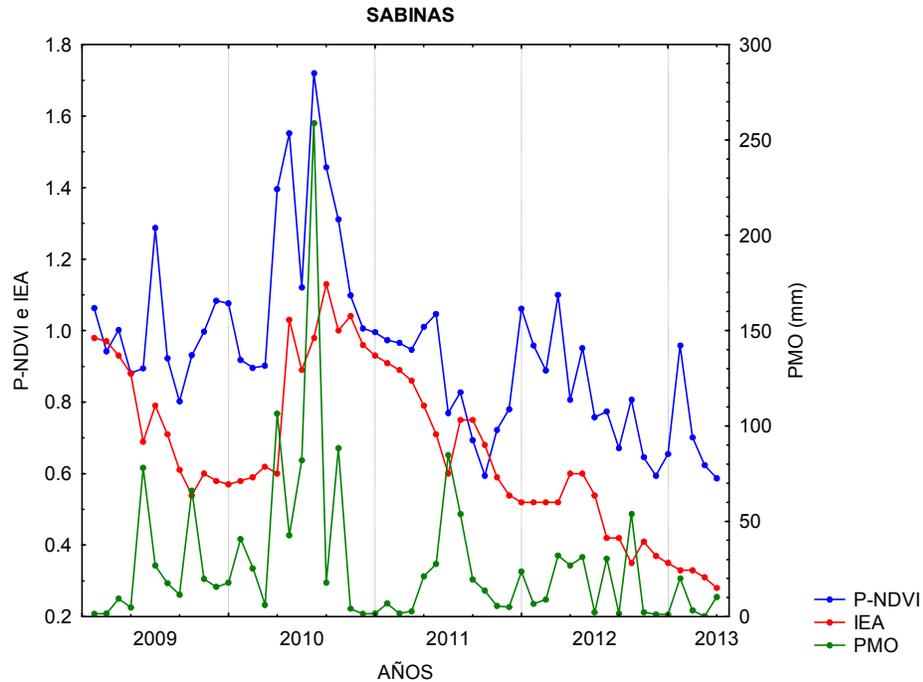


Figura 22. Relación del P-NDVI, IEA y PMO para el punto 8530 en el municipio de Sabinas, Coahuila.

En la Figura 23 se muestra la distribución del promedio de P-NDVI y promedio del IEA con la proporción de la precipitación anual. Los valores que se presentan fueron del 2009 al 2012. En el Cuadro 4 se puede observar las correlaciones de estas, en esta Figura se observa como los valores se encontraron en una relación lineal positiva, el coeficiente de correlación para el P-NDVI e IEA fueron de 0.79 y 0.41, respectivamente.

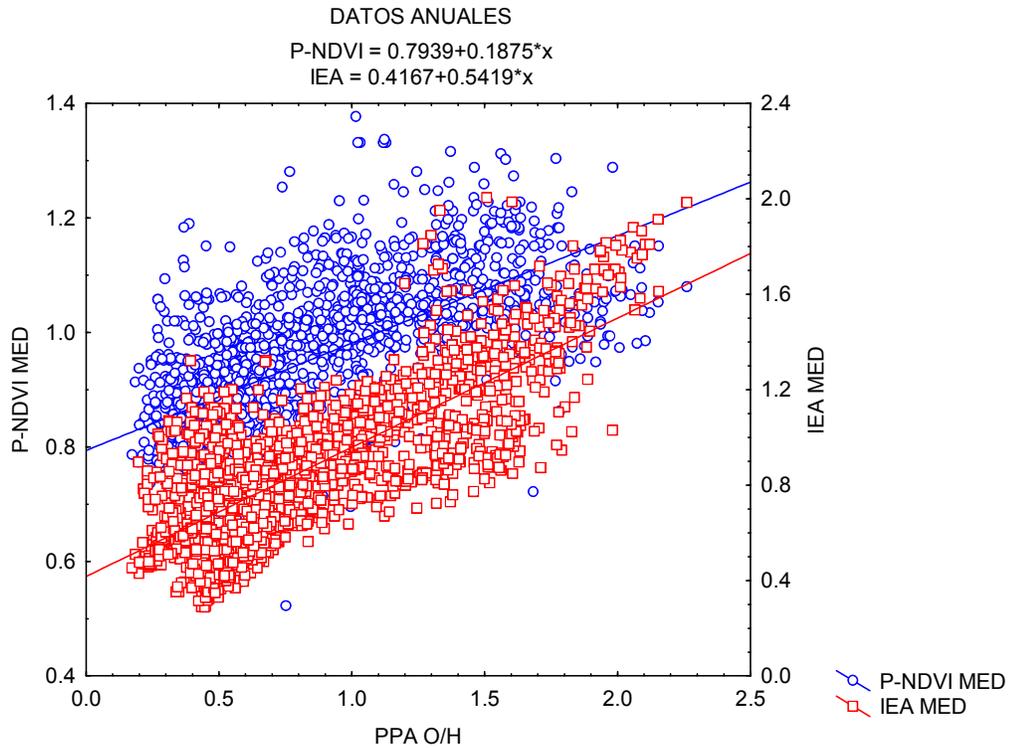


Figura 23. Distribución de los valores de P-NDVI e IEA con la proporción de la precipitación anual del 2009 al 2012.

FOTOGRAFIA DIGITAL Y MUESTREO DE CAMPO

Relación de los datos obtenidos en el programa ENVI 4.3 y los estimados en campo.

Los datos presentados en el cuadro 5 muestran la correlación lineal de la cobertura de herbácea por estación, se observó que en todas las estaciones el análisis de correlación presentaron valores altos, arriba de 0.95, solo la estación de verano presenta una correlación de 0.92, cabe señalar algo importante para este análisis estadístico, que en la mayoría de los sitios los datos de herbáceas fueron muy bajos o nulos en gran parte de los sitios de estudio.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de la cobertura de herbáceas para las cuatro estaciones de año obtenido por ENVI y estimados en campo.

ESTACION	COEFICIENTE DE CORRELACION
Primavera	0.98
Verano	0.92
Otoño	0.96
Invierno	0.96

La Figura 24 muestra la distribución de los valores obtenidos en el programa ENVI 4.3 con los datos estimados en campo de los 39 sitios durante las cuatro estaciones. El coeficiente de correlación entre estas variables fue de 0.94, este valor se debe a que la mayoría de los sitios no presentaron herbáceas, y los que presentaban, eran con porcentajes de cobertura muy bajos.

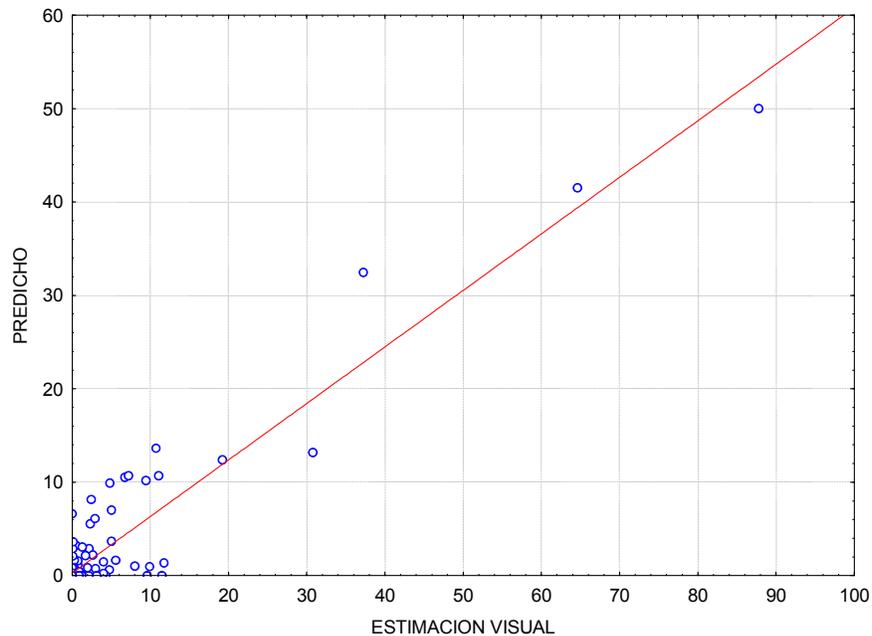


Figura 24. Distribución de los datos obtenidos en el programa ENVI 4.3 contra los valores estimados en campo.

V. CONCLUSIONES

La imagen satelital es una herramienta útil y fácil de aplicar para el seguimiento de los agostaderos ya que se mostró las condiciones del mismo en el estado de Coahuila en los años 2009 al 2013. La dinámica de la vegetación estimados por los sensores remotos como el NDVI y P-NDVI se relacionaron con la precipitación observada. También es posible obtener el Índice de Estado del Agostadero (IEA) simulado con el modelo SESS para obtener la producción de biomasa simulada para un sitio en particular. Por lo tanto podemos concluir que si existe una manera fácil, confiable y económica para el seguir la dinámica de los agostaderos a grandes escalas, aunque este sistema puede perfeccionarse.

También es posible disponer de las fotografías digitales, para estimar la cobertura de herbáceas estimados en campo y los clasificados en el programa ENVI 4.3.

VI. LITERATURA CITADA

- Alcázar S. D., Baldi G., Durante P., Garbulsky M.F. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en aéreas protegidas: tres casos de distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas*, vol 17, núm. 3, Septiembre-Diciembre, 2008, Asociación Española de Ecología Terrestre. Alicante España. pp 108-117.
- Allen G Rasmussen., Michael P. O'Neill., Lisa Schmidt. 2001, Monitoreo de agostaderos. Departamento de Recursos Naturales. Universidad del Estado de Utah. Logan, Utah. pp2.
- Arnillas M C A y Tovar N A. 2005. Elaboración de un plan de monitoreo para la salud de la biodiversidad en la Provincia de Oxapampa-Pasco.
- Barry W Adams., Gerry Ehlert., Colin Stone., Donna Lawrence., Mike Alexander., Mike Willoughby., Carcey Hincz., Darlene Moisey., Angela Burkinshaw., Jennifer Carlson. 2003. Evaluación de la salud del pastizal y bosques. *Range management*. pp 7.
- Bendersky D. 2011. Determinación de anomalías del Índice verde normalizado (NDVI) de pastizales de la providencia de Corrientes. *Boletín. Monitoreo de pastizales N°7 01 de Abril de 2011*. pp 1.
- Cantú B. J. E. 2010. Manejo de pastizales. El pastizal como ecosistema, evaluación del pastizal y sistema de pastoreo. Departamento de Producción Animal. Torreón, Coahuila. Agosto de 2010.
- CONAGUA. 2005. PERSEPCION REMOTA "Fundamentos de Teledetección Espacial". pp 15.

- COTECOCA. 1979. Comisión Técnico Consultivo para la Determinación de los Coeficientes de Agostaderos. Coahuila. México. pp. 243.
- Chen Y. P., Fedosejevs G., Lopez M. T., Arnold J. G. 2006. Evaluación de MODIS-EVI, MODIS-NDVI y NDVI-vegetación, datos de compuestos con medidas agrarias: Un ejemplo en los campos de maíz en el Oeste de México. *Environmental Monitoring and Assessment* (2006) 119: 69–82.
- Diaz S. H., Kothmann M.M., Hamilton W.T., Grant W.E. 2003. Un simulador sencillo de sustentabilidad ecológica (SEES), para el manejo de la carga animal en pastizales semiáridos. *Agricultural systems* pp. 655-680.
- Dyksterhuis, E.J. 1949. Condition and management of rangeland based on quantitative ecology. *Journal of Range Management* 2(3): 104-115.
- Errick J E., J W Van Zee, K.M Havstad, L.M Burkett y W.G Whitford. 2005. Manual de monitoreo para pastizales, matorral y ecosistemas de las sabanas. Volumen I: Quick Star. Tucson, Arizona: Universidad de Arizona USDA-ARS Jornada Experimental Range, Las Cruces, New México. pp 36.
- Fallas J. 2011. Sistemas de Información Geográfica. Que es un SIG? Universidad Nacional de ciencias ambientales. pp. 4.
- García N. H., García D.R.R., Moreno S. R, Gonzales R. A. 2002. Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Investigaciones geográficas (Mx)*, Abril número 047. Universidad Nacional Autónoma de México. DF, México. Pp. 92-112.
- González L., Paredes P., Rial P. 2008. Severidad de la sequía en santa cruz: evaluación a través de índices de vegetación de imágenes modis. Laboratorio de Teledetección y SIG. EEA Santa Cruz. Convenio INTA – Provincia de Santa Cruz. pp.1.

- Guerif M., Sabine de Brisis., Bernard S. 1993. Combinación NOAA-AVHRR, SPOT HRV Datos de evaluación del grado rendimientos de los cultivos de ambientes semiáridos. EARSeL Advances In Remote Sensing, Vol 2, No 2-VI 1993.
- Gutiérrez L. R., Mario D. A., Velásquez V.M.A., Flores O.A. 2009. Determinación de la carga animal en el pastizal mediano abierto de Zacatecas México. VI Simposio Internacional de Pastizales. Monterrey, N.L. pp 128.
- INIFAP, 2008. Rancho experimental la campana 50 años de investigación y transferencia de tecnología en pastizales y producción animal. Chihuahua, México.
- Instituto Nacional de Ecología. 1994. Manejo y rehabilitación de agostaderos de las zonas áridas y semiáridas de México (Región Norte). pp 10.
- Márquez M. M., Raúl Rene R., Garduño, R. D. Valdez, C., F. Blanco M. y Pérez P.V.G. 2009. Estado de degradación del suelo en los pastizales de la cuenca del rio Juchipila. VI Simposio Internacional de Pastizales. Monterrey, N.L. pp 17.
- Maskova Z., Zemek F y Kuet J. 2008. Diferencia normalizada del índice de vegetación (NDVI) en el manejo de los prados de montaña. Boreal Environment Research 13: 417-432.
- Mena H. U. 2007. Aplicación de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil. Boletín iie, Abril-Junio del 2007. pp 3.
- National Research Council. 1994. Salud del Pastizal. Nuevos métodos para la clasificación, inventario y monitoreo de los pastizales.
- Paz P. F., Bolaños G. M. A., Palacios S. L.A., Pascual R.F., Medrano.r.e., Ibarra .H.F. 2011. Desarrollo de curvas espectrales del crecimiento anual de la vegetación, usando sensores remotos. Revista Mexicana. Ciencias pecuarias 2010; 2(4) pp. 445-464.

- Paruelo, J.M., Lauenroth, W.K. y Roset, P. A.2008. Technical note: Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Journal of Range Management*. 53(2):190-193.
- Pérez G. U. 2005. La percepción remota. Laboratorio de información geográfica. Universidad de Tolima, Febrero 2005. pp 34.
- Perovic, P., C. Trucco, A. Tálamo, V. Quiroga, D. Ramallo, A. Lacci, A. Baungardner y F. Mohr. 2008. Guía técnica para el monitoreo de la biodiversidad. Programa de Monitoreo de Biodiversidad-Parque Nacional Copo, Parque y Reserva Provincial Copo, y Zona de Amortiguamiento. APN/GEF/BIRF. Salta, Argentina.
- Real Academia Española. 1992. Diccionario de la Lengua Española. Edición electrónica. Espasa-Calpe, S.A. Madrid.
- Rovajob F., Mardonov B. K., Nasyrov M. G., Muminov M. A., Mukinov T. X. 2010. Aplicación de la teledetección y sistemas de información geográfica para el monitoreo de los pastizales en Uzbekistán. *Journal of Environmental Science and Engineering*. Volume 4 No 6 (Serial No 31).
- Ramírez C. H., Villareal W. C., Martínez H. E. J., Ramos P. B., Zárata M. A. 2009. Monitoreo para la conservación de pastizales en la reserva de biosfera mapimí. VI Simposio Internacional de Pastizales. Monterrey, N.L. pp. 139.
- Roberts, N., D.F. Andersen, R.M. Deal, M.S. Garet, y W.A. Shaffer. 1994. Introduction to computer simulation. A system dynamics modeling approach. Productivity Press. Portland, Oregon, USA. p. 3.
- Rosete F y Bocco G. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramienta integrada para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica*, Julio-Septiembre, número 068. Instituto Nacional de Ecología DF, Mexico. pp 43-54.

- Sandoval. 2003. Monitoreo de quemas de pastizales y cuantificación de superficies devastadas por incendios forestales mediante imágenes NOAA-AVHRR y LANDSAT ETM.
- Taylor C. A. 2003. Monitoreo de pastizales y fuego: Los incendios forestales y quemas prescritas, ciclo de nutrientes y sucesión de las plantas. *Investigación y administración de tierras áridas* 17:429-438, 2003.
- Valdez L. J. R., González G. M., M de los Santos H. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia*, mayo-junio, año/vol. 40, número 003. Colegio de postgraduados. Texcoco, Mexico. Pp. 383-394.
- Zar J. H. 2010. *Bioestadística analysis*. 5ed. Pearson Hall. Saddle River, Nueva Jersey. pp. 718.