

IPICYT

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y
TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL DE LA SIERRA SAN
MIGUELITO POR MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE**

Tesis que presenta

Regina Escobar Carmona

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Director: Dr. Noel Pérez Carbajal

San Luis Potosí, S.L.P., ENERO de 2016



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Estimación de biomasa forestal de la sierra de san miguelito por medio de imágenes de satélite”*** presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Regina Escobar Carmona** y aprobada el **veintiocho de enero del dos mil dieciséis** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Director de la tesis

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial

Dr. José Tuxpan Vargas
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. bajo la dirección de Dr. José Noel Carbajal Pérez

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (297679) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 012 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 28 días del mes de enero del año 2016, se reunió a las 17:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Noel Carbajal Pérez	Presidente	IPICYT
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Secretario	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

Regina Escobar Carmona

sobre la Tesis intitulada:

Estimación de biomasa forestal de la sierra de San Miguelito por medio de imágenes de satélite

que se desarrolló bajo la dirección de

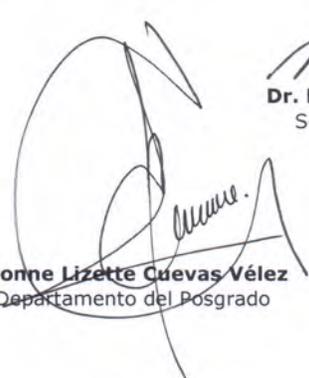
Dr. José Noel Carbajal Pérez

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 18:00 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 28 días del mes de enero de 2016.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



Dedicatoria

Dedico el esfuerzo invertido en esta tesis a mi mama Esperanza.

Agradecimientos

Agradezco a los doctores José Noel Carbajal Pérez, José Tuxpan Vargas y José Alfredo Ramos Leal por la paciencia y esfuerzos empleados para realizar esta tesis.

Agradezco la beca académica que con el aporte de todos los mexicanos hacen posible los fondos económicos del CONACYT, agradezco también al personal con quien conviví en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

A todos mis amigos, gracias por apoyarme en todo momento, y por qué siempre me han dado una amistad sincera, gracias a todos y a cada uno.

A mis compañeros de clase y de generación.

A las personas que me brindaron información y aportaron sus conocimientos a esta investigación, Angélica Romero Manzanares (COLPOS Montecillo), Jorge Alberto Flores Cano (UASLP), Maribel Pineda (CONAFOR), José Torres Jiménez (SEGAM), Ulises Rodríguez y Simón Carranco.

CONTENIDO

Constancia de aprobación.....	i
Créditos Institucionales	ii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	xi
Abstract	xii
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. <i>Justificación</i>	3
1.2 <i>Objetivos del estudio</i>	4
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos Particulares</i>	4
1.3 <i>Hipótesis</i>	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. BIOMASA FORESTAL	6
2.1 <i>Biomasa y su relación con incendios forestales y puntos de calor</i>	6
2.2 <i>Definición de biomasa y parámetros aplicados para su estimación</i>	10
2.3 <i>Importancia del carbono derivado de la biomasa forestal</i>	11
2.4 <i>Almacenes de carbono forestal</i>	13

2.5 Estimación de biomasa basada en Percepción Remota	15
CAPITULO 3.....	17
ÁREA DE ESTUDIO	17
3.1 Localización de la Sierra de San Miguelito y su tipo de clima	17
3.2 Fisiografía y geología	18
3.3 Edafología	20
3.4 Hidrología	21
3.5 Vegetación y uso de suelo	22
3.5.1. Vegetación de bosque en el área de estudio	23
3.6 Actividades económicas	27
CAPÍTULO 4.....	28
METODOLOGÍA.....	28
4.1 Adquisición de imágenes de satélite	28
4.2 Pre-procesamiento digital de imágenes de satélite.....	30
4.3 Diseño e implementación del módulo clasificador de la imagen de satélite.....	37
4.4 Muestreo de especies forestales en la zona de estudio.....	40
4.5 Factores de estimación de biomasa.....	43
4.5.1 Las emisiones por quema de biomasa forestal	44
4.6 Determinación de biomasa por medio de índices de vegetación	45
CAPÍTULO 5.....	48

RESULTADOS	48
5.1 Resultados del pre-procesamiento digital de imágenes de satélite	48
5.2 Resultados de la clasificación	50
5.3 Resultados de la aplicación de Índices de vegetación	50
5.3.1 Calculo de NDVI y rangos de clasificación.....	50
5.3.1.1 Comparación multitemporal de NDVI.....	52
5.3.2 Resultados del índice SAVI.....	53
5.3.3 Resultados del índice IAF.....	53
5.4 Biomasa calculada en la Sierra de San Miguelito	54
CAPÍTULO 6.....	58
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción Forestal 1960 – 2012.....	7
Tabla 2. Composición química de diferentes formas de biomasa	13
Tabla 3. Contenido de biomasa y carbono por tipo de vegetación a nivel nacional según la clasificación de INEGI.....	15
Tabla 4. Principales unidades de suelo en la Sierra de San Miguelito.....	20

Tabla 5. Adquisición de imágenes Landsat de la USGS.....	28
Tabla 6. Características de las imágenes adquiridas.....	29
Tabla 7. Metadatos para las imágenes Landsat 8.....	35
Tabla 8. Datos Landsat 5 MSS, 1985 y 1987.....	36
Tabla 9. Datos Landsat 5 TM, 1996 y 2005.....	37
Tabla 10. Estado de la vegetación en el área de estudio.....	52
Tabla 11. Resultado del cálculo de biomasa individual Ejido El Jaral.....	54
Tabla 12. Resultado del cálculo de biomasa individual Región La Amapola, Ejido Escalerillas.....	55
Tabla 13. Biomasa calculada y su contenido de carbón.....	55
Tabla 14. Masa de CO2 liberado a la atmosfera.....	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Puntos de calor en la Sierra de San Miguelito 2000-2010.....	10
Figura 2. Contenido de carbono en la biomasa forestal.....	12
Figura 3. Ubicación de la Sierra de San Miguelito.....	17
Figura 4. Mapa geológico simplificado del Complejo Volcánico Sierra San Miguelito.....	18
Figura 5. Distribución geográfica de <i>Pinus cembroides</i> en México.....	25
Figura 6. Dispersión y absorción de la radiación.....	31

Figura 7. Ventanas atmosféricas	32
Figura 8. Efecto de la dispersión molecular en la radiación	33
Figura 9. Algoritmo de clasificación digital ISO-DATA	38
Figura 10. Diagrama de flujo de la información digital	39
Figura 11. Ubicación de la parcela 1 de muestreo Ejido el Jaral	40
Figura 12. Visualización de densidad de las parcelas de muestreo.....	41
Figura 13. Especies muestreadas en Ejido El Jaral, parcela 1 de estudio.....	41
Figura 14. Especies registradas en la parcela 2 Región de la Amapola, Ejido Escalerillas	42
Figura 15. Comparación de imágenes multitemporales de los sensores Landsat MSS, TM y OLI.....	48
Figura 16. Precipitación anual, estación Villa de Reyes.....	49
Figura 17. Resultados de la clasificación de la imagen Landsat 8.....	50
Figura 18. Condición de la vegetación de acuerdo a los valores de NDVI	51
Figura 19. Comparación de NDVI	52
Figura 20. Comparación multitemporal del índice SAVI.....	53
Figura 21. Índice de área foliar.....	54
Figura 22. Mapa de biomasa en la Sierra de San Miguelito por tipo de vegetación	57

Resumen

La cantidad de biomasa en ecosistemas forestales sin valor comercial ha sido poco estudiada en México, debido a procedimientos costosos y destructivos para obtener las mediciones. La evaluación de biomasa por medio de percepción remota es una alternativa que se ha desarrollado en diferentes países y que en México ha sido relativamente poco aplicada. En este trabajo se aplicó una metodología integrada para la evaluación de biomasa forestal de la Sierra de San Miguelito por medio de imágenes de Satélite Landsat de los años 1987, 1996, 2005 y 2014. Se aplicaron los procedimientos de corrección radiométrica y atmosférica de las imágenes, para después implementar el algoritmo ISO-DATA de clasificación digital para la identificación de cubiertas vegetales. El cálculo de biomasa se realizó por medio de la aplicación de índices de vegetación NDVI, SAVI, y IAF. Estos índices precisaron la información recolectada en campo y la información recogida en otros trabajos de investigación. El índice NDVI es el parámetro adecuado para una mejor identificación del estado de conservación de los bosques y en la discriminación de la densidad de vegetación, con el cual se obtuvieron los valores de distribución de las cubiertas densas de vegetación con respecto de otras. El pino – encino se identificó con valores de 0.4 - 0.1. Los resultados de este trabajo revelan que el uso de imágenes de satélite LANDSAT es una buena alternativa para evaluar biomasa a nivel regional y los datos pueden ser usados para la cuantificación de gases liberados por los incendios forestales producidos en la región. Donde se obtuvieron 3 categorías en el aporte de biomasa por hectárea; aporte bajo < 13 toneladas, 23 toneladas aporte medio y 41 toneladas aporte alto.

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL DE LA SIERRA SAN MIGUELITO POR MEDIO DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Palabras clave: Biomasa, percepción remota, clasificación digital e incendio forestal.

Abstract

The amount of biomass in forest ecosystems without commercial value has been few studied in Mexico, due to costly and destructive procedures to obtain measurements. The evaluation of biomass through remote sensing is an alternative that has been developed in different countries but in Mexico has been poorly applied. In this paper, an integrated methodology was applied for the evaluation of forest biomass in the Sierra de San Miguelito through Landsat satellite images of the 1987, 1996, 2005 and 2014 years. Radiometric and atmospheric correction methods were applied, posteriorly it was implemented a digital classification algorithm ISO-DATA to identify land cover. Biomass calculation was performed by the application of the vegetation indices NDVI, SAVI, and IAF. These indices support the information collected in the field and the information gathered in other research. The NDVI is the appropriate setting for better identification of the condition of forests and the discrimination of vegetation density, in which the values of distribution of dense vegetation cover were obtained in relation to others. The pine - oak vegetation was identified with values between 0.4 and 0.1. The results of this study show that the use of Landsat satellite images is a good alternative to evaluate biomass at regional level and the resulting data can be used for quantification of gas released by forest fires in the region. Three categories were obtained in the contribution of biomass per hectare; low contribution < 13 tons, 23 tons average contribution and 41 tons high contribution.

FOREST BIOMASS ESTIMATION OF SIERRA SAN MIGUELITO THROUGH SATELLITE IMAGES

Keywords: Biomass, remote sensing, digital classification and forest fire.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de recursos forestales es uno de los principales intereses medioambientales del país, la biomasa forestal por su parte es un indicador útil para la determinación del estado de conservación de los bosques y el valor productivo de bosques maderables. El territorio mexicano cuenta con 138 millones de hectáreas de bosque que representa alrededor del 70 % de vegetación forestal de todo el país y los datos sobre el contenido de biomasa son una estimación según el tipo de ecosistema a nivel nacional, en los que se encuentran 30000 especies vegetales, comprendidas en matorrales xerófilos, bosques, selvas, pastizales y vegetación acuática (INEGI, 2014). Las zonas áridas de México representan más de 62 millones de hectáreas (Masera *et al.*, 1997).

Los bosques permiten desde siempre la subsistencia y el desarrollo de los seres vivos. Gracias a ellos, se obtienen, maderas, combustibles, materias primas maderables y no maderables que sirven como materia prima para la fabricación de muebles, materiales para la construcción, papel, cera, por mencionar algunos. Además los bosques son el hábitat de la vida animal y brindan servicios ambientales como la regulación del ciclo hidrológico, recarga y almacenamiento de agua, captura de carbono, generación y conservación de suelos.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la producción maderable en 2012 por grupo de especie fue de 5734959 m³ de madera en rollo, del cual el 76.64% corresponde a la especie de pino y el 23.36% lo complementan las especies de oyamel. Por otro lado, los recursos forestales no maderables conforman toda la parte no leñosa de la vegetación de un ecosistema forestal. Los recursos forestales no maderables alcanzaron las 231443 toneladas en el mismo año (INEGI, 2014).

El aprovechamiento y la disminución de los bosques afectan la cantidad de biomasa forestal, de manera que ha disminuido progresivamente (FAO, 2010). El uso de

combustibles fósiles, la deforestación y el cambio de uso de suelo en países tropicales son directa o indirectamente las fuentes principales de liberación de bióxido de carbono (CO₂) a la atmosfera (Brown y Lugo, 1990). El CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento climático global.

Los incendios forestales juegan un papel importante en la pérdida de la biomasa forestal. La cuantificación de biomasa quemada en incendios forestales permite la estimación de CO₂ que es emitido a la atmosfera. En 2013 se documentaron alrededor de 10391 incendios. Esto concuerda con el promedio anual de 8 mil incendios documentados por la CONAFOR en todo el país (CONAFOR, 2013). Los incendios afectaron principalmente las entidades de Baja California Sur, Baja California, México, Michoacán, Distrito federal, Durango, Chihuahua, Jalisco, Puebla, Hidalgo, Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Guerrero, y Tlaxcala, en conjunto tuvieron una afectación de aproximadamente 413594 ha (INEGI, 2014). La superficie promedio afectada por incendio fue de 48.43 ha en 2012.

La biomasa contenida en un bosque es entonces fundamental para realizar estimaciones de carbono en bosques y conocer su estado de conservación. Sin embargo, el cálculo de biomasa implica a menudo la aplicación de métodos destructivos, lo que presupone dificultades operativas con costos elevados. Una alternativa es realizar determinaciones directas en menor escala y emplear modelos de regresión (ecuaciones alométricas) que puedan proporcionar estimaciones confiables a partir de mediciones de árboles en pie (Deans et al., 1996; Sanquetta et al., 2002; Rodríguez *et al.*, 2007). Las metodologías para el cálculo de biomasa requieren gran inversión de tiempo y materiales, una alternativa que en el país ha sido poco desarrollada, es el uso de imágenes de satélite comúnmente utilizadas para la identificación de suelos, rocas, cuerpos de agua, ecosistemas, deforestación, incendios forestales y cambio de uso de suelo, entre otros.

En el campo del manejo de los recursos naturales es cada día más usual la implementación de imágenes satelitales desde 1972 con el Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), cuyas imágenes son distribuidas gratuitamente para el uso en investigaciones científicas. Mediante imágenes de satélite se ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro

planeta con el fin de tener a disposición la información necesaria para la toma de decisiones. Actualmente las técnicas de adquisición de información por medios remotos permiten examinar propiedades y procesos en los ecosistemas de manera sistemática y reducir los costos. Diversas investigaciones en el campo de las ciencias forestales y la geomática manifiestan resultados del cálculo de biomasa por medio de imágenes de satélite. El uso de imágenes de satélite ha sido de gran ayuda para estimar la biomasa forestal, evitando la troza de árboles en pie y disminuyendo los costos de su evaluación en campo.

1.1. Justificación

La evaluación y monitoreo de las reservas de energía constituye una nueva forma de cuantificar los reservorios de carbono. En el ámbito regional el cambio continuo de uso de suelo, deforestación por la expansión de carreteras y zonas urbanas ha implicado el desgaste y la pérdida de bosques. Un factor que juega también un papel importante en la devastación de bosques son los incendios forestales. Las estadísticas sobre el número de incendios y áreas afectadas revelan un proceso creciente de estos eventos tanto de origen natural como antropogénico. Aunque los incendios forestales ocurren prácticamente en todo el país, existe poco conocimiento sobre la cantidad de biomasa en los bosques, la cual es fundamental para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero. En este estudio estamos interesados en estimar la biomasa en los bosques cercanos a la ciudad de San Luis Potosí. En esta ciudad la conservación de bosques, parques y jardines es una preocupación actual, ya que la ubicación geográfica de la ciudad de San Luis Potosí implica un clima semidesértico y la presencia de épocas largas de estiaje, además de cambios abruptos de temperaturas. Todos estos factores crean ambientes propicios para la propagación de incendios forestales.

Los principales reservorios de energía para la ciudad de San Luis Potosí constan de dos Sierras que rodean el Valle de San Luis. Al Oriente de la ciudad está ubicada la Sierra de Álvarez y al Poniente el sistema montañoso de la Sierra de San Miguelito. Ambas sierras son de diferente composición y estructura fisonómica. Sin embargo, estas sierras brindan

servicios ambientales comunes, como es la producción de oxígeno, recarga de acuíferos, almacenes de biodiversidad y energía, además de que proveen productos forestales maderables y no maderables.

La conservación de estas reservas de energía debe ser una preocupación para las autoridades ya que la destrucción de superficies forestales promueven un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero. Además si la devastación es por incendios forestales existe una fuerte emisión de contaminantes a la atmósfera. Este cambio de cobertura vegetal además de disminuir los recursos forestales afecta severamente la disponibilidad de agua y la continuidad de los servicios ambientales que producen los ecosistemas. Por tanto se esperan efectos negativos, sobretodo en la escasez de los recursos para las actividades humanas.

En este sentido la cuantificación de biomasa forestal es de gran importancia para nuestro planeta, ya que 50% de la cobertura vegetal y su biomasa contenida es carbón (Brown *et al.*, 1993). Por lo tanto, el cálculo de biomasa adquiere importancia local, nacional y mundial, porque influye en los sistemas contables de los ciclos de carbono (Dauber *et al.*, 2003). La cuantificación de la biomasa es de gran ayuda pues su valor se ve reflejado directamente en las emisiones provocadas por los incendios forestales.

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivo General

Cálculo de la biomasa forestal en la Sierra de San Miguelito aplicando imágenes de satélite que ayude a estimar las emisiones de gases de efecto invernadero debido a incendios forestales.

1.2.2 Objetivos Particulares

- a) Identificar las cubiertas vegetales en la Sierra de San Miguelito por medio de imágenes de Satélite.

- b) Estimar la cantidad de biomasa forestal para las comunidades vegetales de las especies de bosque de la Sierra de San Miguelito por unidad de superficie por medio de los datos derivados de las imágenes de satélite.

- c) Establecer una metodología de sistemas de información geográfica (SIG) que pueda ser aplicada a otros ecosistemas en México.

1.3 Hipótesis

La radiación electromagnética emitida o reflejada por un objeto y su área circundante, permite la estimación de parámetros biofísicos como la biomasa. Empleando imágenes de satélite, la evaluación de biomasa es un método viable para los ecosistemas forestales de pino – encino presentes en la Sierra de San Miguelito y su biomasa calculada es un indicador fiable para cuantificar la fracción de CO₂ liberado a la atmosfera por incendios forestales en este ecosistema y en otros similares.

CAPÍTULO 2

2. BIOMASA FORESTAL

2.1 Biomasa y su relación con incendios forestales y puntos de calor

Los bosques proporcionan múltiples beneficios y servicios ambientales, sociales y económicos, de ahí que contribuyan al desarrollo de la sociedad. Mantener la cubierta forestal en México, al igual que en otros países, constituye un verdadero desafío teniendo en cuenta las necesidades presentes y futuras de la población. Dentro de su superficie continental total, México cuenta con alrededor del 70% de vegetación forestal, equivalente a 138000000 hectáreas, en las que se encuentran 30000 especies vegetales (INEGI, 2012). Los ecosistemas terrestres son importantes en el ciclo global del carbono, ya que almacenan en su biomasa 638 Gt de carbono atmosférico (Brown, 1993). Sin embargo, la biomasa forestal ha disminuido debido a la pérdida de bosques (FAO, 2011).

Las evaluaciones de biomasa forestal y su contenido de carbono, que se han realizado en México son mayormente enfocadas a las zonas tropicales y templadas (Brown, 1997; Masera *et al.*, 1997; Vigil, 2010). Para las zonas áridas de México, que representan más de 62 millones de hectáreas (Masera *et al.*, 1997), se reportan para el 2007, 20127705 ha de matorrales boscosos (FAO, 2010). No obstante, es importante señalar que se ha documentado que el reservorio más importante de carbono en el país se ubica en la vegetación semiárida: 5 Gt CO₂ (Masera *et al.*, 1997).

Considerando los tipos de vegetación presentes en el Estado de San Luis Potosí en el período de 1960 al año 2000 se efectuaron diferentes estimaciones de cobertura forestal. De acuerdo al inventario de 1994, el 74.9% del territorio del Estado (4702497 ha) corresponden a terrenos forestales (SARH, 1994).

En el país los daños a la superficie forestal han sido evaluados. La CENAPRED reporta que el tipo de vegetación más afectada en los incendios forestales son los pastos, seguido de la superficie forestal, cada uno con diferentes tiempos de recuperación. De acuerdo con la producción forestal del 2012, la superficie de pastizal natural es la que

sufre más cambios (Tabla 1), sin embargo el bosque de pino también sufre pérdidas considerables.

Tabla 1. Producción Forestal 1960 – 2012

Tipo de vegetación	Área (km ²) 1960	% superficie estatal 1960	Área (km ²) 2000	% superficie estatal 2000
Chaparral (encinar arbustivo)		0	1,333	2.2
Bosque de encino	1869	3	2852	4.7
Bosque de pino	623	1	443	0.7
Bosque de pino – encino	4,049	6.5	1027	1.7
Pastizal natural	6,230	10	2,471	4.0
Pastizal inducido			2636	4.1

Fuente: Anuario Estadístico de la Producción Forestal (2012).

En México, las principales actividades que inciden en la emisión de carbono son por el consumo de energía en general y particularmente por el uso de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo de áreas forestales y los procesos de la industria del cemento (Gay y Martínez, 1995). También los incendios forestales contribuyen en la emisión de carbono. Por ejemplo en 2013 se documentaron un total de 10391 incendios forestales en el país, mismos que devastaron 41359399 ha. Sin embargo, los incendios forestales (o puntos de calor) detectados por sensores satélites indican una cantidad mucho mayor que el número de incendios forestales documentados (Bautista, 2015).

Los incendios forestales y su propagación no controlada afectan bosques, selvas y vegetación secundaria. Los incendios ocurren por causas naturales o pueden tener un origen antropogénico. Los incendios dependen de la disponibilidad del combustible existente en áreas determinadas. Los principales incendios forestales que se conocen son llamados incendios de copa, de corona o aéreo. Todos estos tipos de incendios causan la pérdida de bosques, y en consecuencia destruyen los hábitats de la fauna silvestre. Los meses durante los cuales ocurre la mayor cantidad de incendios son de

enero a mayo, lo cual coincide con la temporada de heladas y sequía, es decir, cuando la cantidad de material combustible es relativamente elevada (CENAPRED, 2001).

La ocurrencia de incendios forestales se debe en gran medida a actividades humanas, como son las prácticas agropecuarias, de roza-tumba y quema principalmente. En los últimos años han aumentado factores como los incendios intencionales, y por otras causas como fogatas, rayos, truenos líneas eléctricas y cultivos ilícitos. Sin embargo, los fenómenos climatológicos particulares pueden aumentar considerablemente la temperatura contribuyendo al secado de la vegetación y a la acumulación de material combustible en ciertas áreas. Los factores que favorecen el punto de ignición del combustible son relacionados con el clima, tipo de combustible y en algunos casos la topografía del lugar (Alcántara, 2001; CENAPRED, 2001).

Las técnicas de detección y cuantificación de áreas incendiadas han mejorado con la incorporación de sensores remotos, las imágenes de satélite aumentaron la precisión de la información desde 1998 (CENAPRED, 2001). Existen algunos intentos para efectuar predicciones sobre zonas susceptibles a la ocurrencia de incendios usando información satelital (Martínez Ramírez, 2012). En cuanto a la identificación de zonas, con peligro de incendios para cada temporada se utilizan básicamente cinco variables con base en la metodología del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendio Forestal (SEMARNAP, 1999):

Índice de humedad del combustible ligero. Indica la facilidad de ignición del material combustible. Es un rango numérico del contenido de humedad de los combustibles ligeros muertos de superficie en una masa forestal.

1. Índice de humedad del humus. Es un rango numérico que indica la sequedad de la materia orgánica muerta compactada, conocida como humus, para capas de 5 a 10 cm de espesor.
2. Índice de sequía. Mide los efectos de la sequía estacional o de largo plazo sobre los combustibles forestales pesados. Es un rango numérico que indica la sequedad de la materia orgánica muerta compactada en capas de 10 a 20 cm de

profundidad.

3. Índice de propagación. Es determinado en un rango numérico que señala la velocidad de propagación del fuego inmediatamente después de que se ha producido la ignición. Su valor se calcula al combinar los valores del índice de humedad del combustible ligero con el de la velocidad del viento.
4. Índice de consumo. Representa una combinación balanceada del índice de humedad del humus y el índice de sequía. Sus valores muestran la cantidad total de combustible disponible.

A partir de la combinación de los cinco índices anteriores se determina el Índice Meteorológico de Peligro (IMP), que proporciona una evaluación del potencial relativo del incendio basado solamente en las observaciones meteorológicas ya señaladas. El cálculo de este índice lo lleva a cabo el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendio Forestal (CFFDRS) el cual forma parte del Sistema Espacial del Manejo de Incendios (SEMI). Según el monitoreo de estaciones meteorológicas y la evaluación de los factores por peligro de incendio, la CONAFOR evalúa los puntos de calor por medio de imágenes de satélite.

En la Sierra de San Miguelito, los puntos de calor (Figura 1) se encuentran concentrados en varias zonas. Algunas de estas superficies ya han padecido incendios forestales, documentados por la prensa y la Dirección General de Protección Civil, S.L.P., cuya ocurrencia se presenta en los meses de marzo, abril, mayo y junio. La superficie mínima afectada fue del orden de 12 y la máxima de 45 hectáreas en 2007, 2011 y 2013, Las comunidades afectadas fueron Mesa de los conejos, Tierra Blanca y San Juan de Guadalupe (NOTIMEX, 2011; Dirección General de Protección Civil S.L.P., 2013).

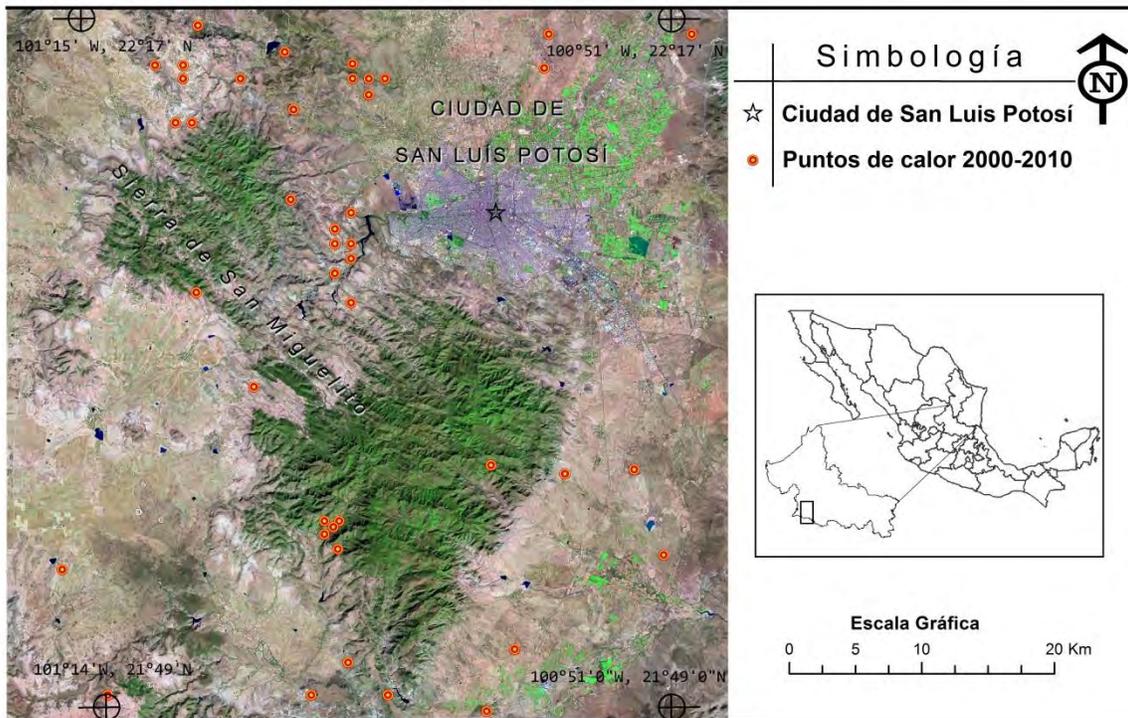


Figura 1. Puntos de calor en la Sierra de San Miguelito 2000-2010

Fuente de datos de puntos de calor: CONABIO, 2015.

2.2 Definición de biomasa y parámetros aplicados para su estimación

La biomasa se define como la masa por unidad de área de materia orgánica vegetal viva o muerta. La biomasa forestal consiste en la biomasa aérea y la biomasa debajo del suelo. La biomasa aérea representa toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, ramas, corteza, semillas y hojas, mientras que la biomasa por debajo del suelo se compone de todas las raíces vivas excluyendo raíces finas (menores de 2 mm de diámetro) (FAO, 2004).

Ordóñez (1999) refiere que el carbono en la vegetación es la suma del contenido en la biomasa aérea y la que se halla en la biomasa de las raíces. Desde el punto de vista energético la biomasa forestal se entiende como el total de materia permanente de madera en una unidad de área que incluye, follaje, corteza, ramas, flores, frutos y raíces (Ordóñez y Masera 2001).

Según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), la biomasa es la tasa

total de organismos vivos presentes en un área o volumen dado; el material vegetal recientemente muerto suele estar conceptualizado como biomasa muerta. La cantidad de biomasa se expresa mediante su peso en seco o mediante su contenido de energía, de carbono o de nitrógeno.

En términos generales la biomasa vegetal es la suma total de materia orgánica viva de las plantas fotosintéticamente activa en una unidad de área dada. En los ecosistemas forestales los principales componentes de la biomasa vegetal son: fuste de árboles, ramas corteza y follaje, y se expresa en términos de peso verde, o seco.

La unidad de cuantificación más precisa para expresar el rendimiento de biomasa de un árbol o de un conjunto de árboles es en gramos por árbol, kilogramos por árbol o toneladas por hectárea, debido a que el peso es más sensible que el volumen a las diferencias de la calidad donde se localice el árbol (González, 2008).

Para evaluar la biomasa y su contenido en energía es necesario considerar los parámetros y condiciones que definen su estructura. Las características principales varían con la composición de especies, árbol, altura, y forma, diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP), este último es el más comúnmente usado como variable principal para el cálculo de la biomasa aérea (Acosta, 2003; González, 2008; Ordoñez y Masera 2001). Lo más conveniente es usar los parámetros de referencia para futuros estudios (Foody et al., 2003).

La medición de la naturaleza tiene sus complicaciones, primero es necesario una medición de campo y después, mediante los diferentes métodos, se obtiene una estimación global por sistema (Acosta, 2003).

2.3 Importancia del carbono derivado de la biomasa forestal

La biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura la energía del sol, y convierte el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para

formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen (BUN-CA, 2002; Becerril, 2014).

La biomasa consiste principalmente de carbono y oxígeno. También contiene hidrógeno, un poco de nitrógeno, azufre, ceniza y agua, dependiendo de la humedad relativa. Cuando se realiza el proceso de combustión, se efectúa una reacción química que combina el carbono con oxígeno del ambiente, y forman CO_2 , que combinado con el hidrógeno y oxígeno forman vapor de agua. Cuando la combustión termina, el carbón se transforma en CO_2 , sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el CO_2 de la atmósfera. Pero, cuando la combustión no termina, se forman monóxido de carbono (CO), hidrocarburos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), entre ellos el metano (CH_4), y otras sustancias (Ordoñez y Masera 2001; BUN-CA, 2002; Vigil, 2010).

La biomasa seca sobre el suelo es el peso del tejido vivo de la planta después de que toda el agua haya sido removida, es decir, después de que las hojas, ramas y tallos se hayan secado por completo. En general, el agua representa aproximadamente el 50% de un árbol vivo (Figura 2), lo que se conoce como biomasa húmeda. El carbono representa el 50% de la biomasa seca (BUN-CA, 2002; FAO, 2010; Walker *et al.*, 2011; IPCC,2005).

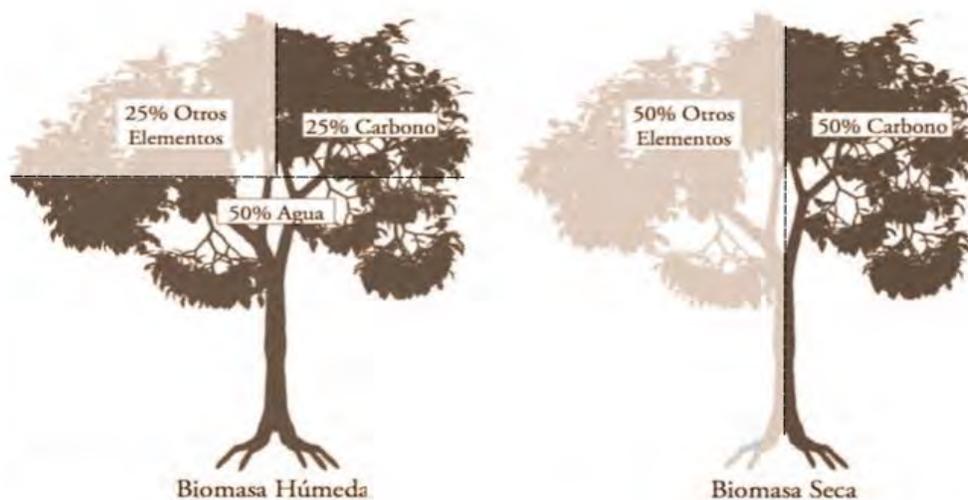


Figura 2. Contenido de carbono en la biomasa forestal. Fuente: (Walker *et al.*, 2011)

Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. Los elementos químicos más importantes en la biomasa son carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), y azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). La tabla 2 muestra la composición para varios tipos de biomasa.

Tabla 2. Composición química de diferentes formas de biomasa. Fuente: RWEDP (2002).

Madera	Porcentaje del peso (sin humedad)				
	C	H	N	S	Cl
Sauce	47.66	5.2	0.3	0.03	1.45
Madera suave	52.10	6.10	0.20		1.70
Corteza de madera dura	50.35	5.83	0.11	0.07	3.99
Madera dura	50.48	6.04	0.17	0.08	0.78
Eucalipto	50.43	6.01	0.17	0.08	1.76
Roble	49.89	5.98	0.21	0.05	1.29
Corteza de pino	52.30	5.80	0.29	0.03	2.90
Aserrín pino	52.49	6.24	0.15	0.03	0.60

De acuerdo con la tabla anterior las maderas provenientes de pino contienen alrededor de 52 % de carbono en la biomasa seca, a diferencia de maderas suaves como el sauce.

2.4 Almacenes de carbono forestal

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro, denso y poco reactivo, forma parte de la composición de la tropósfera. El balance del dióxido de carbono es sumamente complejo por las interacciones que existen entre la reserva atmosférica de este gas, las plantas que lo consumen en el proceso de fotosíntesis y el transferido desde la tropósfera a los océanos (Padilla, 2009).

El CO₂ es actualmente el principal compuesto que contribuye a aumentar el efecto invernadero (Isanza y Campos, 2007). Su concentración en la atmósfera aumentó en un 25% desde el inicio de la era industrial (Gay y Martínez, 1995; Brown, 1997; Masera *et al.*, 1997; Acosta, 2003; Foody *et al.*, 2003;). Este aumento se explica por el crecimiento de dos fuentes antrópicas de emisión del carbono: el consumo de energías fósiles (petróleo, gas, carbón) y los cambios en la utilización de las tierras o las transformaciones de los ecosistemas en particular la deforestación (Dixon *et al.*, 1994; Brown, 1997; Masera *et al.*, 1997).

De acuerdo con Bassham (1962) y Ávila *et al.*, (2001), el CO₂ es el gas que más contribuye al calentamiento global y la fotosíntesis es la principal forma de captura de Carbono, aun así los bosques no han sido considerados en el pago de servicios ambientales, debido entre otras razones, a la ausencia de información cuantificada sobre su potencial de almacenamiento y fijación de carbono.

A nivel nacional las reservas de carbono no han sido contabilizadas en su totalidad, las estimaciones actuales a nivel nacional se encuentran a escala 1:250 000. La información se ha derivado de las unidades cartografiadas por tipo de vegetación (Tabla 3). De acuerdo al contenido de biomasa aérea para los bosques de pino - encino ha disminuido.

Tabla 3. Contenido de biomasa y carbono por tipo de vegetación a nivel nacional según la clasificación de INEGI. Fuente (FAO, 2010).

Tipo de vegetación	Cantidad de biomasa total arbórea (Miles de toneladas de materia seca)					
	Aérea 1993	Subterránea 1993	Aérea 2002	Subterránea 2002	Aérea 2007	Subterránea 2007
Bosque de pino	422,671	93,274	410,129	90,420	423,774	92,948
Bosque de pino-encino	726,127	146,543	709,104	143,101	683,254	138,101
Tipo de vegetación	Relación del carbono orgánico del suelo (COS (Gg)) por tipo de vegetación					
	Superficie (ha) 1993	Cos (Gg) 1993	Superficie (ha) 2003	Cos (Gg) 2003	Superficie (ha)2007	Cos (Gg)2007
Bosque de pino	7,527,230	541,631	7,277,254	529,800	7,279,002	530,094
Bosque de pino-encino	8,915,737	574,168	8,689,256	555,971	8,658,794	553,845

De acuerdo con la clasificación de INEGI, los depósitos de carbono se encuentran en tres formas; biomasa viva, materia orgánica muerta y suelos (Padilla, 2009) y se encuentra en dos reservas: parte aérea, es decir sobre la superficie del suelo y la parte subterránea. Cabe resaltar la importancia del carbono contenido en el mismo suelo.

2.5 Estimación de biomasa basada en Percepción Remota

La biomasa se calcula básicamente usando la densidad de la unidad de biomasa y el área de crecimiento forestal. La biomasa aérea se puede estimar con percepción remota óptica en dos formas diferentes, la biomasa forestal es estimada con modelos estadísticamente establecidos con relación entre respuestas espectrales y muestras de campo de las mediciones de biomasa o los registros de inventarios forestales. Este es un método no destructivo porque permite medir variables de árbol, tales como medición de las copas, la altura del árbol, y el diámetro del fuste y convertirlos en biomasa con ecuaciones que describen las relaciones entre las variables medidas llamadas modelo alométrico o ecuaciones alométricas (Brown y Lugo 1992; Foody *et al.*, 2003).

Los modelos se generan utilizando el análisis de regresión. Los parámetros del modelo o coeficientes se ven afectados por varios factores que influyen en el ambiente, el ángulo del sol, el ángulo de vista de satélite, el estado fenológico de crecimiento de la vegetación en el momento de adquisición de la imagen, y la topografía (Hanes, 2014).

La cantidad de energía de radiación en el espectro electromagnético que es emitida o reflejada por un objeto y el área circundante permite la estimación de los valores de biomasa. La observación del satélite representa el tope de la radiancia de la atmosfera, la cual es una combinación del dosel arbóreo y la radiancia atmosférica, la reflectancia refleja propiedades forestales (Zheng *et al.*, 2004, Hanes, 2014;).

La percepción remota o teledetección se ha utilizado ampliamente como una herramienta robusta para derivar la estructura del bosque y la biomasa aérea, ya que proporciona un medio práctico para evaluar espacialmente la biomasa forestal distribuida a nivel local, regional y global (Zheng *et al.*, 2004). Las técnicas de teledetección permiten examinar propiedades y procesos de los ecosistemas a escalas múltiples porque las observaciones por satélite se pueden obtener de grandes áreas de interés. Así mismo, las estimaciones tienen que ser vinculadas con diversos índices de vegetación (Acosta, 2003).

Los índices de vegetación (NDVI, SAVI, NDFI, AVI, GVI, etc.) mejoran la señal de la vegetación, reducen al mínimo la influencia de la radiación solar, el ángulo solar, el ángulo de visión del sensor, y los efectos de la atmósfera y el suelo. (Huete, 1988; Richardson *et al.*, 1992; Hanes, 2014).

Las imágenes de satélite de alta resolución como Ikonos, QuickBird, fotografías aéreas y sensores de radar como ERS, JERS, Envisat, PALSAR, o sensores de láser Lidar son herramientas muy poderosas. Todos estos métodos parten del supuesto de que se dispone de las medidas de campo para ajustar las relaciones que predicen la biomasa en función de las observaciones hechas por los sensores. Sin embargo, los métodos de percepción remota siguen siendo aún limitados en cuanto a la precisión de las mediciones de biomasa y la diferenciación de los tipos de bosques en función de los medios técnicos y financieros, los recursos humanos disponibles, la nubosidad y el riesgo de saturación de las señales utilizadas para ciertos tipos de vegetación (Hanes, 2014).

CAPITULO 3

ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Localización de la Sierra de San Miguelito y su tipo de clima

La Sierra de San Miguelito (SSM) se encuentra ubicada en el suroeste de Estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas siguientes: 101° 15' 13.7196" y 100° 54' 49.2948" Longitud Oeste, 21° 47' 55.9356" y 22° 16' 29.4168" Latitud Norte (Figura 3). La superficie de la Sierra de San Miguelito (SSM) está conformada por los municipios de Villa de Reyes, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí y Villa de Arriaga. Por su importancia natural, la SSM fue declarada como área natural protegida para el manejo forestal sustentable en 2005-2006 (CONAP, 2012).

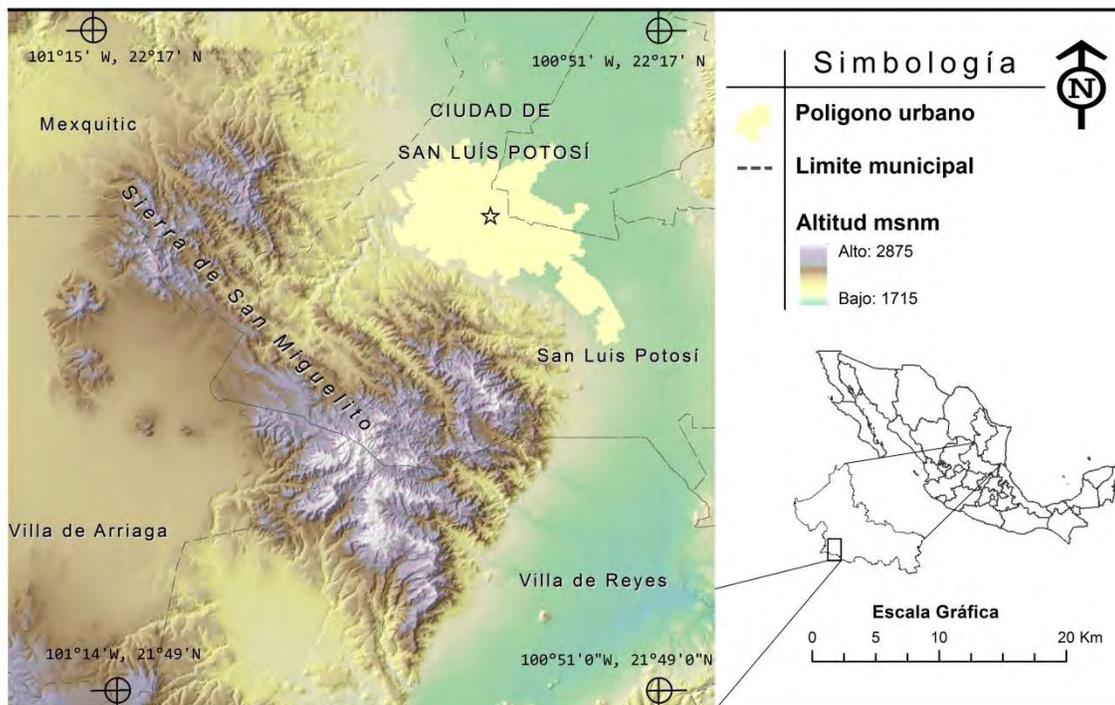


Figura 3. Ubicación de la Sierra de San Miguelito.

El clima de la Sierra de San Miguelito según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García cuenta con un clima BS1kw. Este es un clima seco estepario, semiárido templado (el menos seco de los secos), con lluvia invernal inferior al 5 %, con reducida

oscilación térmica, y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano (INEGI, 2000). De acuerdo con información meteorológica de estaciones cercanas, la Comisión Nacional del Agua reporta la precipitación promedio de los años 1979 a 2003 es de 361.1 mm, el año más seco 2000 fue de 168.7 mm y el año más lluvioso 1991 fue de 528. mm; siendo los meses de julio a septiembre los de mayor concentración en precipitación promedio.

3.2 Fisiografía y geología

La Sierra de San Miguelito se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica IX, denominada Mesa del Centro, la cual se ubica entre las Sierras Madre Occidental, Madre Oriental y al norte del Eje Volcánico Transversal (INEGI, 2001).

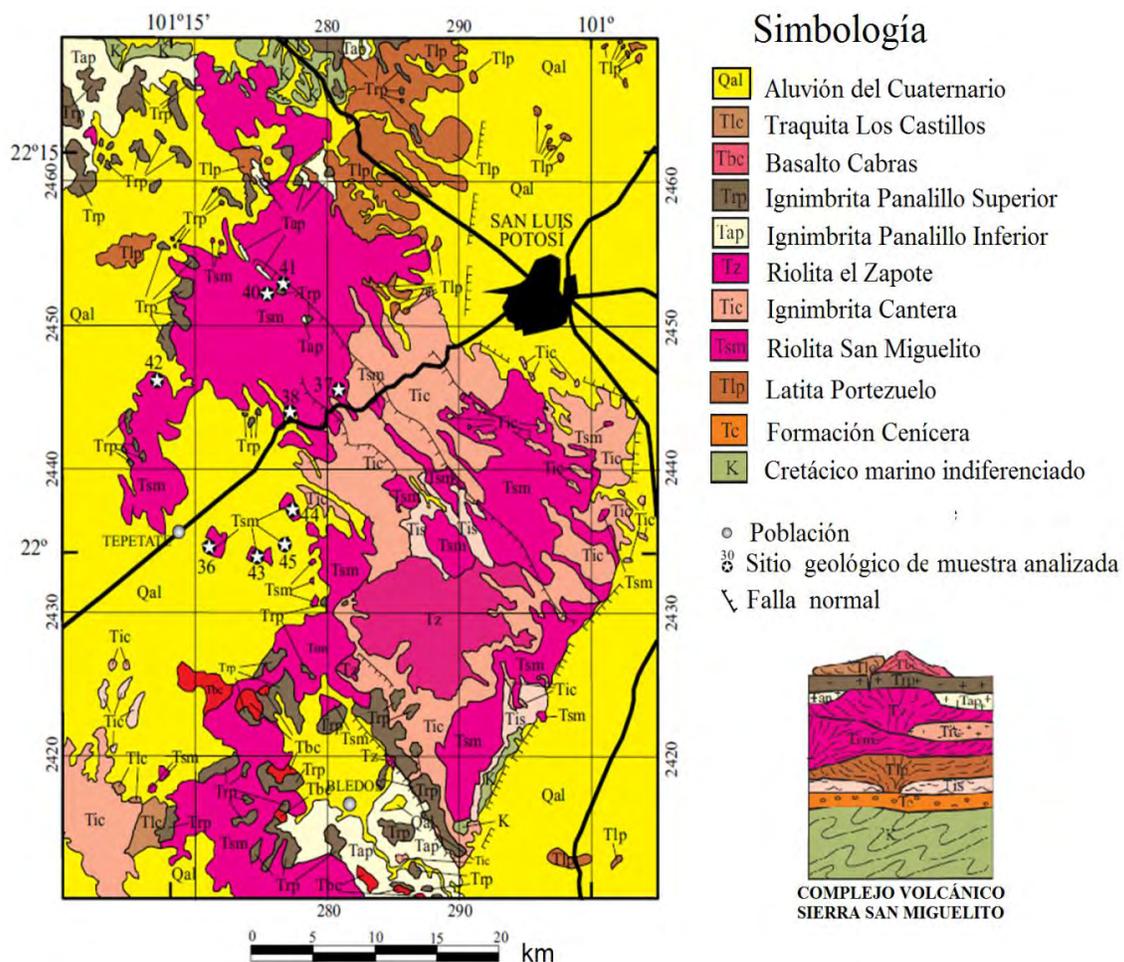


Figura 4. Mapa geológico simplificado del Complejo Volcánico Sierra San Miguelito.

(Modificado de Labarthe-Hernández *et al.*, 1982)

El Campo Volcánico de San Luis Potosí, se localiza en la porción sur-oriental de la Mesa Central y está formado principalmente por una secuencia de lavas y flujos piroclásticos con edades que van desde el Eoceno medio hasta el Cuaternario (Figura 4).

La Sierra de San Miguelito se ubica en tres subprovincias fisiográficas: subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

En el caso de la subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, comprende la porción centro-norte de la provincia, en ella dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en el noroeste y sierras bajas en el sureste. Una pequeña porción del Municipio de Mexquitic de Carmona se ubica en la parte oriental de esta subprovincia. Al noroeste de la ciudad de San Luis Potosí se levanta un conjunto de sierras de rocas sedimentarias marinas y continentales asociadas en mayor proporción con mesetas lávicas, clasificadas desde el punto de vista fisiográfico como pequeña sierra abrupta con mesetas.

Por otra parte, la subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato abarca el 90% del territorio de la Sierra de San Miguelito, se encuentra en el sur de la Mesa del Centro, tiene como vértice el área norte de la ciudad de San Luis. Consta de llanuras angostas entre sierras volcánicas que cubren la mayor parte del territorio y colindan de manera abrupta en el sureste con la Sierra Gorda, integrante de la Sierra Madre Oriental.

En tanto, la subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, ocupa la región central de la provincia Mesa del Centro, se caracteriza por sus extensas llanuras con piso de caliche y muy somera cubierta aluvial, a altitudes de 2000 m. Existen dos de esas llanuras: la de Ojuelos y la de Aguascalientes, estas se comunican en el norte pero quedan separadas en la mayor parte de su extensión por un grupo de mesetas en las que dominan rocas ígneas ácidas, muy disectadas y cuyas superficies tienen alturas de unos 2 300 msnm.

El relieve estructural original de la Mesa del Centro fue creado principalmente por fenómenos de vulcanismo terciario que dieron a esta provincia la característica de una altiplanicie petroclástica, sobrepuesta a un relieve antiguo de rocas sedimentarias

mesozoicas. Una característica que refleja la interacción entre el clima y la composición rocosa de la provincia, es la constitución de cuencas endorreicas, donde se producen altas evaporaciones y concentración de salinidad.

En la Sierra de San Miguelito, se han reconocido dos fases de deformación, la primera, anterior al emplazamiento de la Riolita San Miguelito (30 Millones de años) con dirección preferencial NE-SW y la segunda con un sistema de fallas NW-SE, la cual presentó dos fases, donde la primera corta los depósitos de la ignimbrita Cantera (30 Millones de años) y se asocia al emplazamiento de la Ignimbrita Panalillo (26.8 30 Millones de años). Mientras que la segunda, fue posterior al emplazamiento a ignimbrita Panalillo, dado que ésta fue afectada por este sistema de fallas (Tristan *et al.*, 2009).

3.3 Edafología

Los suelos en la Sierra de San Miguelito son muy delgados, con poco desarrollo, asociados a pendientes pronunciadas y continuos afloramientos rocosos; en las partes bajas de los cerros se localizan suelos de pie de monte.

Los principales suelos presentes en la Sierra San Miguelito, según INEGI (1970) y la guía para la descripción edafológica (INEGI, 2009) se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Principales unidades de suelo en la Sierra de San Miguelito

Tipos de suelos	Características
Rendzina	La Rendzina corresponde a los suelos pedregosos y que se presentan en climas semiáridos, tropicales o templados; se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente son suelos arcillosos poco profundos por debajo de los 25 cm y presentan bajos rendimientos para el cultivo de maíz, pero si se desmontan se pueden usar en la ganadería con rendimientos bajos a moderados pero con gran peligro de erosión en las laderas y lomas.
Phaeozem+ Leptosol	Suelos que se presentan en cualquier tipo de clima y relieve, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Los Fhaeozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o de alguna cementación muy fuerte en el suelo tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad, sin embargo, se pueden utilizar para la ganadería con resultados aceptables.
Phaeozem + Xerosol	Suelos que se presentan en cualquier tipo de clima y relieve, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas, se caracterizan por tener

	una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.
Leptosol + Phaeozem háplico + Regosol eútrico.	Son los suelos más abundantes del país; se caracterizan por su profundidad menor de 10 cm, limitado por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido y su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables dependiendo de otros factores ambientales.
Planoso I+ Xerosol lúvico.	Suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm. Su vegetación es de pastizal o matorral y se caracterizan por presentar debajo de la capa más superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas tanto que lo cubren como las capas que lo subyacen, debajo de esta capa se presentan subsuelo muy arcilloso, o bien, roca o tepetate, todas impermeables y se utilizan con rendimientos moderados en la ganadería de bovinos, ovinos y caprinos, y su rendimiento agrícola depende de la subunidad de planosol que se trate.
Yermosol háplico + Xerosol háplico.	Se localizan principalmente en climas áridos, su vegetación es el matorral o pastizal. En ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo. La capa de los yermosoles es aún más pobre en humus y generalmente más clara que los Xerosoles. Su uso agrícola está restringido a las zonas donde se puede contar con agua de riego. El aprovechamiento de especies como candelilla, nopal y lechuguilla son comunes en estos suelos.

3.4 Hidrología

La hidrología superficial de la Sierra de San Miguelito corresponde a la Región Hidrológica RH-26-Pánuco, y RH-37-El Salado. Es una de las vertientes interiores más importantes del país, se ubica en la altiplanicie septentrional, en toda la porción noroccidental del Estado. Limita al sureste con la Región Hidrológica 26, Pánuco y está constituida por una serie de cuencas cerradas que se caracterizan por la carencia de grandes corrientes superficiales.

De acuerdo a INEGI (2001), la porción de la Sierra de San Miguelito ubicada en la Región Hidrológica 37, se circunscribe en la cuenca de San José de los Pilares y otras, en el extremo Noreste de la Sierra; dicho extremo se localiza a su vez en la subcuenca de la Presa de San José. En la misma región hidrológica pero en el extremo Noroeste de la montaña, se localiza en la cuenca "San Pablo y otras", dicho extremo a su vez se ubica en la subcuenca presa de San Pablo.

En tanto que la porción de la Sierra Ubicada en la Región Hidrológica 26, Pánuco, se ubica dentro de la cuenca del Río Tamuín, en la subcuenca del Alto Río Santa María.

La cuenca-presa San José-Los Pilares y otras se encuentra en la región centro-occidente de la entidad y cubre 17.95% de su extensión. Limita al norte con la cuenca Matehuala, al este con la cuenca Sierra Madre, al sur y sureste con la Región Hidrológica 26, Pánuco; al oeste y suroeste con la cuenca San Pablo y otras (INEGI, 2001). En esta cuenca destacan algunas sierras por la gran cantidad de corrientes superficiales de carácter intermitente. Sobresalen entre otras, los arroyos Las Magdalenas, Cañada Verde, Palomas, Potrerillos, Ojo de Agua, El Laurel, El Tepozán, El Tule, Bocas, Calabacillas, San Pedro e Independencia. En la porción sur de esta cuenca, donde se asienta la ciudad de San Luis Potosí, son importantes los ríos Mexquitic, Santiago y Española, así como los arroyos Paisanos y San Antonio.

Región Hidrológica 26, Pánuco (RH-26). Se considera la más importante por su escurrimiento, ya que en esta zona se genera una amplia red fluvial. Dentro de esta Zona se localiza la Cuenca Río Tamuín, el cual cuenta con un rango de escurrimiento de 100 a 200 mm (INEGI, 2001). Cubre una superficie equivalente a 38.94% del territorio potosino; dentro del cual limita al norte y noroeste con la Región Hidrológica 37, El Salado y al este con las cuencas Río Tamesí, Río Pánuco y Río Moctezuma, las tres pertenecientes a la Región Hidrológica 26 (INEGI, 2001). Constituye la cuenca que más aportación de aguas superficiales ofrece, ya que cuenta con una compleja red fluvial, en la que destacan por su importancia los ríos Verde y Santa María.

3.5 Vegetación y uso de suelo

En la Sierra de San Miguelito, la cubierta vegetal se expresa bajo diferentes ecosistemas, que responden a la interacción de factores tales como el clima, la topografía, hidrología, el suelo y la geología. El manejo de los recursos en general juega un papel importante en la regulación del escurrimiento superficial y la recarga del acuífero, así como en la protección del suelo contra la erosión. De acuerdo con INEGI

(2000) el tipo de vegetación predominante es el bosque de pino, cubriendo el 16% de la superficie total de la Sierra. El chaparral es el tipo de vegetación más importante después del bosque de pino.

La superficie que ocupa el tipo de vegetación por uso agrícola corresponde al 3.26% del total de la Sierra y tiene las siguientes características. Se presentan 174.03 has (0.21%) para agricultura de riego, 2177.453 has (2.68%) con agricultura de temporal anual y 300.18 has (0.37%), con agricultura de temporal permanente para cultivos anuales.

Por otra parte, las actividades pecuarias se desarrollan en el pastizal, aunque muchas veces se encuentra en condiciones precarias por lo que se extiende a otras asociaciones vegetales, donde el ganado puede alimentarse. El uso pecuario con respecto de la superficie de pastizal corresponde casi a la mitad de la Sierra con un 41.75%.

El pastizal inducido con erosión apreciable abarca aproximadamente una superficie de 2464 has que corresponde al 3.03%. El pastizal natural con erosión apreciable con 19435 has representa el 23.93% del área. El pastizal natural con erosión apreciable y vegetación secundaria arbustiva con 687 has representa el 0.85%. El pastizal natural con 9420 has representa el 11.60% y por último el pastizal natural con vegetación secundaria arbustiva con 1903 ha representa el 2.43% del área.

3.5.1. Vegetación de bosque en el área de estudio

Las investigaciones en el ámbito forestal en el área de estudio revelan la importancia de las masas forestales en la región y manifiestan las principales especies de los bosques de la Sierra de San Miguelito. Las principales especies o especies dominantes en el estrato arbóreo conforman dos especies identificadas como *Pinus cembroides* Zucc y *Quercus spp.* De acuerdo con Romero (1996) y Carrillo (2009) a continuación se presentan las principales características de *Pinus cembroides* Zucc.

Sinonimia

Pinus culminicola var *discolor* (D.K. Bailey et hawksw.) Silba., *Pinus discolor* D.K. Bailey, *Pinus lagunae* (Rob.-Pass) Passini, *Pinus johannis* Rob.- Pass, *Pinus orizabensis* (D.K. Bailey) D.K. Bailey et hawksw.

Nombres comunes: *Bischicuri* (lengua tarahumara) – Chihuahua; pino piñón; piñón; piñón prieto; piñonero

Asociación vegetal: Bosque de coníferas, Bosque de *Quercus*

Forma biológica

Árbol de 5, 10 y hasta 15m de altura, con un diámetro normal de 30 cm y hasta 70 cm. Es de tronco corto y ramas ascendentes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo. Es una especie de lento crecimiento. Los árboles tardan varios años en fructificar por primera vez. (Eguiluz, 1987; Martínez, 1948).

Distribución geográfica

La distribución geográfica de *Pinus cembroides* en México abarca los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, San Luís Potosí, Querétaro, Hidalgo, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (Perry, 1991) (Figura 2).

Es una de las especies de pino de mayor distribución en México, así como, una de las especies más resistentes a la sequía. Las condiciones que influyen sobre el crecimiento del piñonero y la producción de conos son: bajas temperaturas, bajas concentraciones de Calcio y Magnesio, exposición SW y una mayor cobertura de la vegetación. Es una especie de alto potencial adaptativo, resistente a heladas, sequías y temperaturas elevadas. En los sitios donde crece la especie, la humedad es baja y media en las laderas, y buena en los valles (SIRE, 2001).

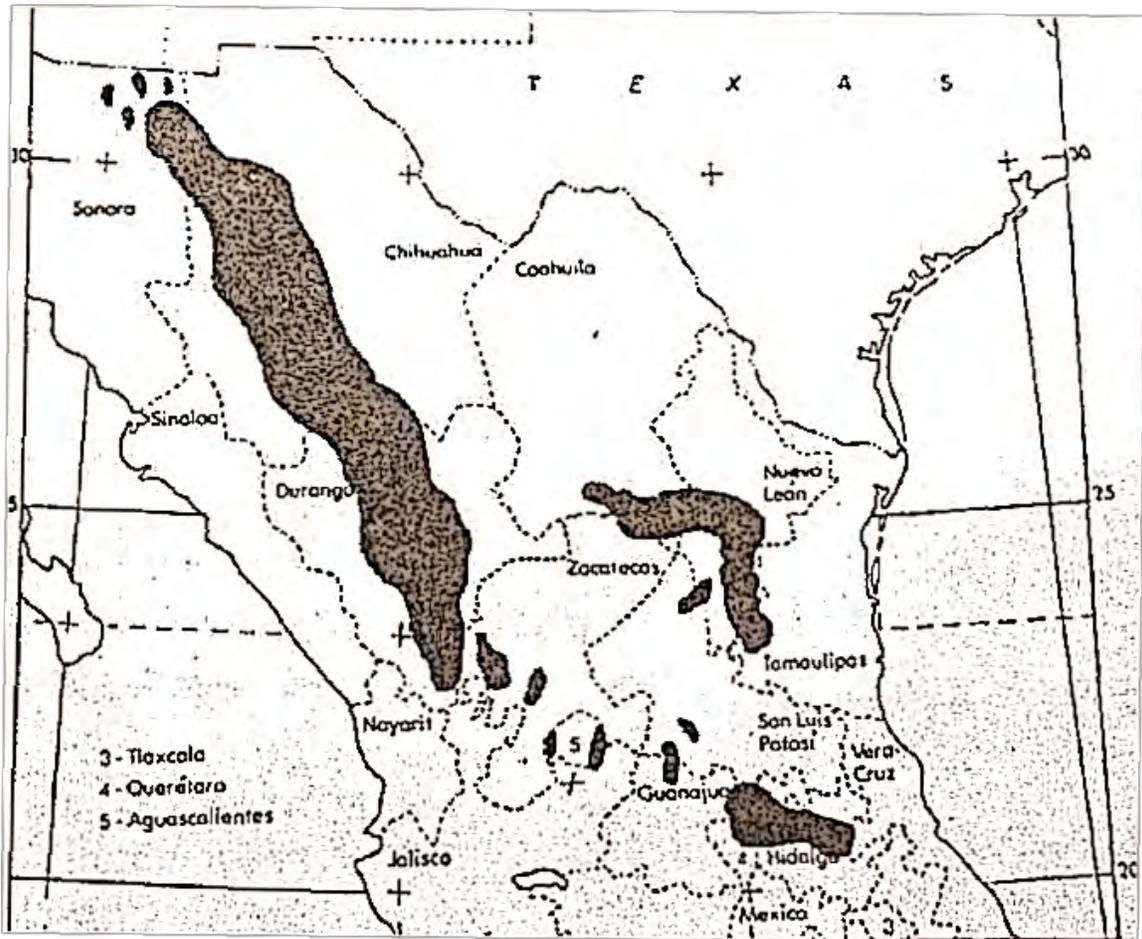


Figura 5. Distribución geográfica de *Pinus cembroides* en México. Fuente: Perry (1991) en (Morales, 2013).

Usos

Su madera tiene poco valor comercial, se emplea como madera aserrada para construcción rural y postes, también es apreciada en la elaboración de muebles rústicos e instrumentos musicales; sin embargo, no tiene utilidad para muebles de alta calidad. También se usa como leña y carbón, y pulpa para papel. La resina se utiliza como materia prima en impermeabilizantes y como pegamento casero, también se extrae aceite de pino y alquitrán (Carrillo, 2009). Esta especie tiene importancia económica por su semilla (piñón), y abastece poco más del 90% de los piñones conocidos en el mercado (Romero, *et al.*, 1996).

Es una especie muy adecuada para reforestar zonas áridas, semiáridas y zonas muy

erosionadas, es un árbol recomendable para decorar parques, jardines y campos deportivos, por sus bajos incrementos en altura (Morales, 2013).

La especie de encino que se encuentra en la Sierra de San Miguelito, es mejor conocida de manera genérica con su nombre científico *Quercus spp* ya que es una especie que no conserva una estructura uniforme, y sus características pueden variar en forma y tamaño.

En México el género *Quercus* comprende entre 150 a 200 especies de árboles, algunos son árboles corpulentos, otros son arbolitos y otros arbustos casi rastreros. Son de crecimiento lento y alcanzan larga vida (INEGI, 2001; Rezedowsky, 1978). Presentan gran variedad en la forma y tamaño de las hojas que son duras y siempre son alternas; se distinguen por sus frutos (bellotas) que tiene en la base una cápsula (INEGI, 2001).

Los encinos se desarrollan en ecosistemas de clima templado y frío, junto con los pinos conforman estructuras uniformes y asociaciones ecológicas que pueden existir en masas puras, mezcladas o bien asociadas con otras especies de latifoliadas. Por lo general son árboles perennifolios o caducifolios con alturas de entre 3 hasta 25 m con diámetros de 20 hasta 50 cm, con copas amplias y redondeadas cuando su crecimiento es libre, con hojas coriáceas y rígidas (Nixon 1993).

El género *Quercus* forma parte de las especies de mayor importancia ecológica en los ecosistemas de pino – encino. Por su distribución en los macizos montañosos de México, forman el principal componente fisonómico en estos ecosistemas y son responsables de la aportación del mayor componente en términos de biomasa. Se presentan en un intervalo altitudinal entre los 1200 a 2800 m, por lo que resguardan mayor diversidad de especies por su estructura de crecimiento (Rezedowsky 1978; Nixon, 1993).

Entre los usos de esta especie destaca la madera para su transformación industrial, principalmente para la generación de energía (Zavala, 1987). Los bosques de encinares guardan un potencial importante como fuente de servicios ambientales (Masera *et al.*1995).

3.6 Actividades económicas

La agricultura de acuerdo con SAGARPA (2004) e INEGI (2002), se desarrolla en cuatro municipios que conforman la Sierra de San Miguelito de la siguiente forma.

El cultivo de maíz representa para el municipio de San Luis Potosí el 2.01 % con un volumen de producción de 3,848 t, donde el municipio de Villa de Reyes tiene el 2.57 % (9,374 t) y el 1.89 % (4,184 t) el municipio de Mexquitic de Carmona con respecto a la producción estatal. El cultivo de frijol por su parte representa el 12.70 % (6,259 t.) de la producción estatal para el municipio de Villa de Arriaga, siendo este municipio el único de los cuatro que participa de este cultivo a nivel estatal. En cuanto al cultivo de Chile seco la participación únicamente es del municipio de San Luis Potosí con el 5.66 % a Nivel estatal con un volumen de 900 t. El cultivo de tomate rojo arroja un volumen de 31,200 t, que representa al 20.34 % de la producción estatal. La Cebada se presenta únicamente en el municipio de Villa de Arriaga con un volumen de 1.908 t, que representa incluso el 100 % a nivel estatal. La avena forrajera se produce en dos de estos cuatro municipios, con el 15.46 % (4,800 t) y el 11. 59 % (3,600 t), respectivamente para los municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí, respectivamente. Por la parte de Alfalfa verde se presenta en los municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí con el 19.04% (172,177 t) y el 15.50 % (140,195 t), de volumen de producción estatal respectivamente.

Por otra parte la actividad de la ganadería comprende bovinos, porcinos, ovinos y caprinos, principalmente. La producción porcina se presenta con mayor importancia en los municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí que participan con el 18.34 % (58,460 cabezas) y 12.35 % (39,371 cabezas) respectivamente. La producción de bovinos representa una baja participación a nivel estatal, destaca el municipio de Villa de Reyes con el 2.35% (19,800 cabezas), seguidos de San Luis Potosí y Villa de Arriaga con el 2.11 y 2.10 % respectivamente. El municipio de Mexquitic de Carmona participa apenas con el 0.67 % de cabezas.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1 Adquisición de imágenes de satélite

La fase primera de la metodología consiste en la adquisición de imágenes de satélite y el pre-procesamiento digital. Este proceso comienza por la adquisición de imágenes de satélite por medio de la plataforma Glovis del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Este portal ofrece la descarga de imágenes satelitales gratuitas de fechas desde 1972 para el uso en investigaciones científicas.

Las imágenes adquiridas corresponden al área de estudio con el número de escena 2845, Satélite Landsat de 5 años (Tabla 5). Esto con el fin de encontrar escenas de fechas similares con base en la imagen de referencia LANDSAT 8 OLI-TIRS y las estaciones secas del año en San Luis Potosí de acuerdo a la disponibilidad de imágenes libres de cobertura de nubes, bandeamiento y ruido en las imágenes. De esta manera se trata de obtener imágenes con calidad óptima para su procesamiento digital posterior.

Tabla 5. Adquisición de imágenes Landsat de la USGS

Año	Imagen - Sensor	Fecha de adquisición	Azimut	Angulo solar	Datum y elipsoide	Zona
1985	LANDSAT 5 MSS	26/09/1985	125.2805285	53.31925511	WGS84	Zona14 N
1987	LANDSAT 5 MSS	16/09/1987	118.2956639	54.69112534	WGS84	Zona14 N
1996	LANDSAT 5 TM	07/08/1996	92.70922441	55.50806757	WGS84	Zona14 N
2005	LANDSAT 5 TM	12/05/2005	93.27725206	65.44293181	WGS85	Zona14 N
2014	LANDSAT 8 OLI-TIRS	21/05/2014	89.22689025	68.58634842	WGS84	Zona14 N

En cuanto a la calidad de los datos, la resolución radiométrica de landsat 8 ha mejorado en comparación con los sensores anteriores, ya que esta propiedad en Landsat 8 es de 12 bits en comparación con las imágenes TM, ETM+ y MSS que son de 8 bits. El

mejoramiento de la resolución radiométrica incrementa la capacidad de detección de cambios en la superficie terrestre a causa de una mayor cantidad de valores posibles en el sensor.

Las características de las imágenes cambian según el sensor del que provienen, sin embargo las imágenes Landsat conservan propiedades similares en la longitud de onda (Tabla 6). De acuerdo a las comparaciones establecidas por la USGS, en las imágenes Landsat 8 y 5 TM, MSS. Las bandas para crear el compuesto en infrarrojo, son las bandas [5, 4, 3], [4, 3, 2] y [3, 2, 1] para cada sensor respectivamente (Tabla 6), la composición en color natural y falso color también cambian debido a la adición de la banda 1 en Landsat 8 que sirve para la detección de aerosoles (USGS, 2014).

Tabla 6. Características de las imágenes adquiridas. Fuente: USGS, 2014

Bandas Espectrales de OLI	Longitud de onda	Resolución	Landsat 5 TM	Landsat 5 MSS
Banda 1 - Costero / Aerosol	0.433 - 0.453 μm	30 m		
Banda 2 - Azul	0.450 - 0.515 μm	30 m	Banda 1	Banda 1
Banda 3 - Verde	0.525 - 0.600 μm	30 m	Banda 2	Banda 1
Banda 4 - Roja	0.630 - 0.680 μm	30 m	Banda 3	Banda 2
Banda 5 - Infrarrojo cercano	0.845 - 0.885 μm	30 m	Banda 4	Banda 3
Banda 6 - Infrarrojo de onda corta	1.560 - 1.660 μm	30 m	Banda 5	Banda 4
Banda 7 - Infrarrojo de onda corta	2.100 - 2.300 μm	30 m	Banda 7	
Banda 8 - Pancromática	0.500 - 0.680 μm	15 m		
Banda 9 - Cirrus	1.360 - 1.390 μm	30 m		
Bandas Espectrales de TIRS	Longitud de onda	Resolución		
Band 10 - Infrarrojo termal o de onda larga	10.30 - 11.30 μm	100 m	Banda 8	
Band 11 - Infrarrojo termal o de onda larga	11.50 - 12.50 μm	100 m		

La resolución espacial de las imágenes es de 30 metros a excepción de las imágenes MSS de 60 metros, por lo que estas últimas fueron sub-muestreadas a 30 metros para que pudieran ser compatibles y procesadas con el mismo tamaño de pixel. El corte de la

imagen se realizó en 1852 filas y 1818 columnas que constituyen una superficie de 303024 hectáreas.

4.2 Pre-procesamiento digital de imágenes de satélite

El pre-procesamiento de los datos significa la preparación de cada una de las imágenes de satélite con el objetivo de obtener los valores de la energía que es captada por el sensor (radiancia). Puesto que la radiancia es la unidad radiométrica más importante captada por los sensores.

De esta manera, la radiancia es la cantidad de radiación confinada en un ángulo sólido de observación, por unidad de superficie en una dirección específica. La reflectancia o reflectividad está determinada por la estructura geométrica de las superficies, es decir la forma natural que tiene cada objeto y está determinada por la proporción de energía reflejada y la energía incidente expresada en valores que van de 0 a 1. (Gomasasca, 2013; Chuvieco, 1990).

La atmosfera produce efectos importantes en la recolección de datos por el sensor, estos efectos son la difusión y absorción de la radiación. La difusión es causada por las partículas tales como el polvo, humo, polen y vapor de agua, porque las partículas de estos elementos, absorben, refractan y dispersan la energía de radiación solar directa. El efecto de absorción de las partículas modifica la cantidad de energía que llega a la superficie, de esta manera es afectada en su longitud de onda, intensidad, y dirección (Figura 6), a causa de ello origina cambios en el brillo original de los objetos observados por un sensor remoto (Liang *et al.*, 2012; Gomasasca, 2013).

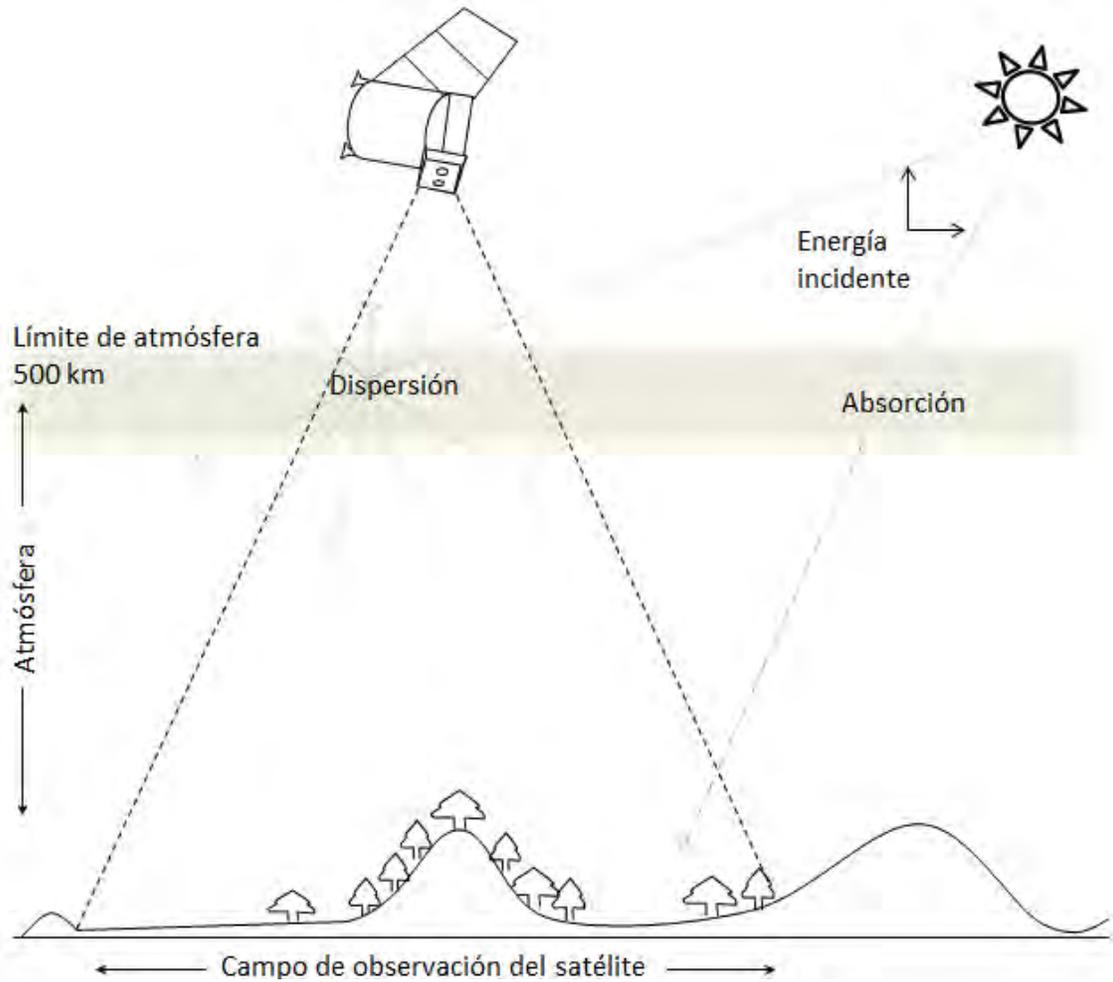
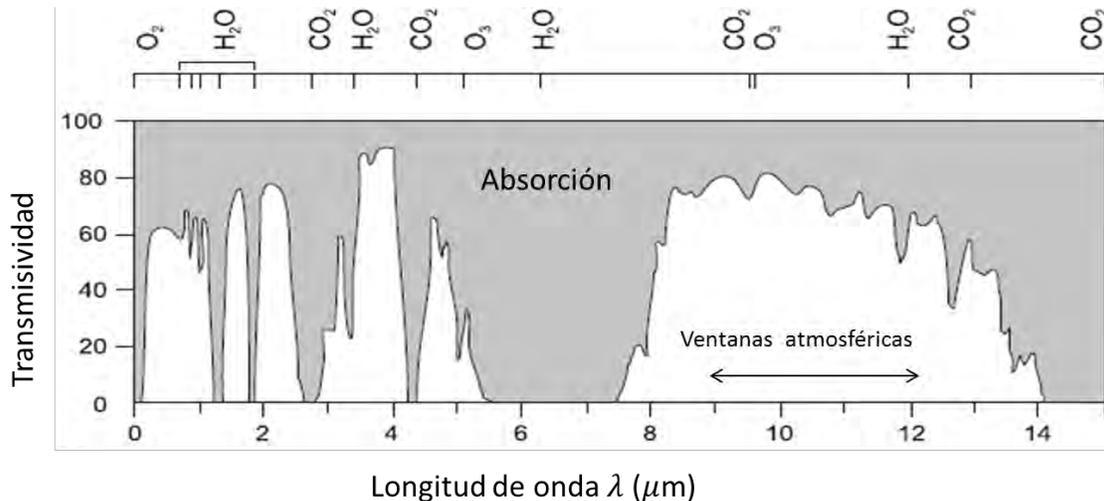


Figura 6. Dispersión y absorción de la radiación

La corrección radiométrica busca entonces mejorar la precisión de las medidas de reflectancia obtenidas del sensor y eliminar ruidos en los ND (niveles digitales o número digital) de la imagen. Además, compensa las diferencias en los valores de radiancia y la conversión de los ND a valores de radiancia y reflectancia por medio de modelos de la atmósfera y las geometrías de iluminación.

La corrección atmosférica por su parte corrige el efecto que imprime la atmósfera sobre la señal recibida por el sensor (Figura 7), convierte los datos obtenidos por un sensor remoto en valores de reflectancia en la superficie. Además de que los diferentes tamaños (D) de las partículas que constituyen los componentes de la atmósfera afectan la longitud de onda λ (Figura 7), en el espectro electromagnético se observan las llamadas ventanas

atmosféricas por donde pasa la energía hacia la superficie. Cada componente de la atmósfera es responsable de la absorción de la radiación en función de λ ; O_2 y O_3 absorben radiación en la región ultravioleta (0.1-0.4 μm), mientras que H_2O y O_3 absorben en el rango visible (0.4-0.7 μm), H_2O y CO_2 absorben más en el infrarrojo (0.7-30.7 μm) (Figura 7). En cuanto a la transmisividad, es entendida como la transparencia de la radiación, y depende también en el tiempo y lugar de adquisición (Gomasasca, 2013). Las regiones del espectro electromagnético que no son absorbidas por los componentes de la atmósfera, son ventanas atmosféricas útiles para la percepción remota, los intervalos (ventanas atmosféricas) más usados se encuentran entre 0-6 μm (Figura 7). Los sensores Landsat aprovechan la región de 0.450-2.300 μm para la obtención de datos en el espectro visible e infrarrojo.



Moléculas	Componente de la atmósfera
H_2O	Vapor de agua
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
O_3	Ozono
O_2	Oxígeno

Figura 7. Ventanas atmosféricas. Fuente: con base en (Gomasasca, 2013)

El método para la obtención de la reflectancia de la superficie considera también el efecto

de la dispersión molecular que llega al sensor como producto de la interacción de la radiación con los componentes moleculares de la atmósfera (Figura 8). También implica calcular los valores correspondientes a la radiancia para la fecha de la imagen, la influencia de los ángulos θ , φ para cada imagen (Figura 8).

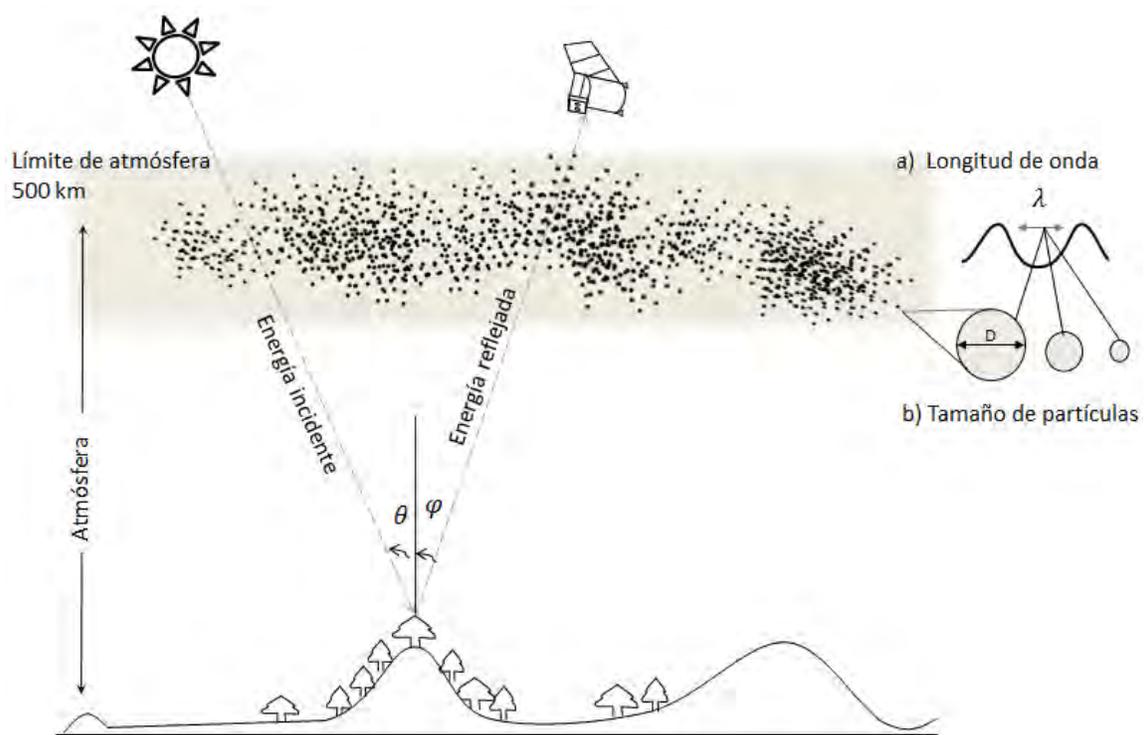


Figura 8. Efecto de la dispersión molecular en la radiación

Los valores de reflectancia son necesarios cuando se trata de usar los datos satelitales para el análisis cuantitativo de las propiedades biofísicas de los elementos de la superficie terrestre, identificar y evaluar los procesos que en ella ocurren mediante la comparación de diferentes escenas en estudios multitemporales (USGS, 2015; Chuvieco, 1990).

La corrección de los ND a valores de radiancia se utiliza para generar imágenes de reflectividad o temperatura de la superficie. La información en los ND se encuentra en modo relativo, mayor brillo mayor reflectividad. La reflectividad es una variable cuyos valores son compatibles para distintos lugares y para distintas fechas, hace más sólida la interpretación de los datos y el análisis integrado de imágenes de distintos sensores (Chuvieco, 1996).

Los procesos de corrección se llevaron a cabo en el software Matlab Académico, con la utilización de la línea de comandos específicos para vectores y matrices usados para procesamiento de imágenes. Antes de la corrección de imágenes, se realizó el ajuste de brillo con respecto al valor máximo de brillo de la imagen L8, el brillo es el valor medio del histograma de la imagen, por lo que se igualaron los valores medios del histograma de las imágenes.

El método de corrección atmosférica se explicará en dos pasos según la metodología aplicada por la USGS para Landsat 8.

1.- En primer lugar pasar ND a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración.

2.- Estimar los valores de reflectividad aparente mediante los valores de irradiancia solar y la fecha de adquisición de la imagen.

Para comparar imágenes de distintas fechas, es ventajoso transformar los valores de radiancia en reflectancia por que se remueve el efecto producido por el ángulo solar y se compensan las diferencias en los valores de irradiancia solar extra-atmosférica.

Las imágenes Landsat 8 del sensor OLI y TIRS se convirtieron en radiancia espectral por medio de la siguiente ecuación:

$$L\lambda = ML Q_{cal} + AL$$

Donde:

$L\lambda$ = radiancia espectral al tope de la atmosfera ($W / (m^2 sr \mu m)$) Watts por metro cuadrado por estereorradián.

ML= factor de cambio de escala multiplicativo de la banda específica

AL= factor aditivo reescalado de la banda específica

Q_{cal} = valor del pixel cuantificados y calibrados (DN)

Tabla 7. Metadatos para las imágenes Landsat 8

Banda	ML	AL	Mp	Ap
Banda 3	0.011565	-57.82601	0.00002	-0.1
Banda 4	0.0097524	-48.76215	0.00002	-0.1
Banda 5	0.005968	-29.84000	0.00002	-0.1

La conversión de radiancia a reflectancia planetaria se realizó con los coeficientes de cambio de escala de reflectancia proporcionados en el archivo de metadatos con la siguiente formula:

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}$$

Donde:

ρ_{λ} = reflectancia planetaria

M_{ρ} = factor de cambio de escala multiplicativo

A_{ρ} = aditivo reescalar de la banda especifica

Q_{cal} = valor del pixel (DN)

Para las imágenes Landsat 5 TM y MSS se usó la metodología y los parámetros de Chander *et al.*, (2009) donde la radiancia L_{λ} se calculó con la siguiente formula.

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale}$$

Donde:

$$G_{rescale} = \frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$\text{Brescale} = \text{LMIN}\lambda - \left(\frac{\text{LMAX}\lambda - \text{LMIN}\lambda}{\text{Qcalmax} - \text{Qcalmin}} \right) \text{Qcalmin}$$

Donde:

$L\lambda$ = radiancia espectral de apertura del sensor ($W / (m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$)

$Qcal$ = valor del píxel (DN)

$Qcalmin$ = Valor mínimo calibrado del píxel

$Qcalmax$ = Valor máximo calibrado del píxel

$LMIN\lambda$ = radiancia espectral mínima adquirida por el sensor

$LMAX\lambda$ = radiancia espectral máxima adquirida por el sensor

$Grescale$ = Factor de ganancia reescalado en la banda específica

$Brescale$ = Factor de compensación reescalado en la banda específica

La conversión de radiancia a reflectancia planetaria se realizó con la siguiente fórmula

$$\rho\lambda = \frac{\pi \cdot L\lambda \cdot d^2}{\text{ESUN}\lambda - \cos\theta_s}$$

Donde:

$\rho\lambda$ = reflectancia planetaria

$L\lambda$ = radiancia espectral

d = Distancia del sol a la tierra (unidades astronómicas)

$\text{ESUN}\lambda$ = Irradiancia solar media exo-atmosférica

θ_s = Angulo solar en el zenit en grados

Tabla 8. Datos Landsat 5 MSS, 1985 y 1987

Banda	Qcalmin	Qcalmax	LMIN λ	LMAX λ	ESUN λ	(1985) d	(1987) d
Banda 1	1	255	3	268	1824	1.00262	1.00539
Banda 2	1	255	3	179	1570	1.00262	1.00539
Banda 3	1	255	5	148	1249	1.00262	1.00539

La distancia del sol a la tierra d es específica para cada imagen de acuerdo con la fecha

de adquisición de la imagen por el sensor.

Tabla 9. Datos Landsat 5 TM, 1996 y 2005

Banda	Qcalmin	Qcalmax	LMIN λ	LMAX λ	ESUN λ	(1996) <i>d</i>	(2005) <i>d</i>
Banda 2	1	255	-2.84	333	1796	1.01399	1.01020
Banda 3	1	255	-1.7	264	1536	1.01399	1.01020
Banda 4	1	255	-1.51	221	1031	1.01399	1.01020

La corrección atmosférica resta el efecto de la dispersión atmosférica implícita en los píxeles de cada banda y levanta el valor global del brillo de la imagen en cada banda. Tras la corrección atmosférica se mejoró el rango dinámico de intensidad de la imagen (Richards *et al.*, 2006).

Una vez obtenidos los valores radiancia y reflectancia para cada imagen de satélite, se ajustó el brillo, por medio de la redistribución de los valores extremos en el histograma, por lo que permite una mejor comparación visual de las imágenes.

4.3 Diseño e implementación del módulo clasificador de la imagen de satélite

El procesamiento digital de la imagen trata de encontrar las categorías de información, a través de las características espectrales de áreas homogéneas.

Dos tipos de clasificación son ampliamente utilizados; no supervisada y supervisada. El primero es un método de clasificación que no depende del conocimiento e información externa para la asignación de píxeles a diferentes clases. El segundo método se conoce como clasificación supervisada o semiautomático, esta clasificación es más precisa que la no supervisada, pero depende del conocimiento y habilidades del usuario o especialista (Gomasca, 2013).

En la presente investigación se aplicó la clasificación no supervisada, que consiste en la generación de grupos de píxeles (clúster) basado únicamente en estadística (media, varianza y desviación estándar). Este método se basa generalmente en el concepto de

distancia Euclidiana y el resultado puede ser manipulado o incluso realizar una postclasificación.

El algoritmo ISO-DATA se puede describir en 4 pasos (Figura 9), lo primero es definir el número de clases, según la interpretación visual que el usuario hace de la imagen y el conocimiento adicional del área de estudio. Una vez definidas las clases obtenemos la media de cada clase o categoría. Enseguida calculamos la distancia del pixel a clasificar con respecto de la media de cada clase, se elige la distancia mínima y se forman grupos con conjuntos de pixeles con mismas característica, se actualiza el valor medio de cada clase y se regresa al paso 3 para generar nuevos grupos y completar el ciclo de clasificación.

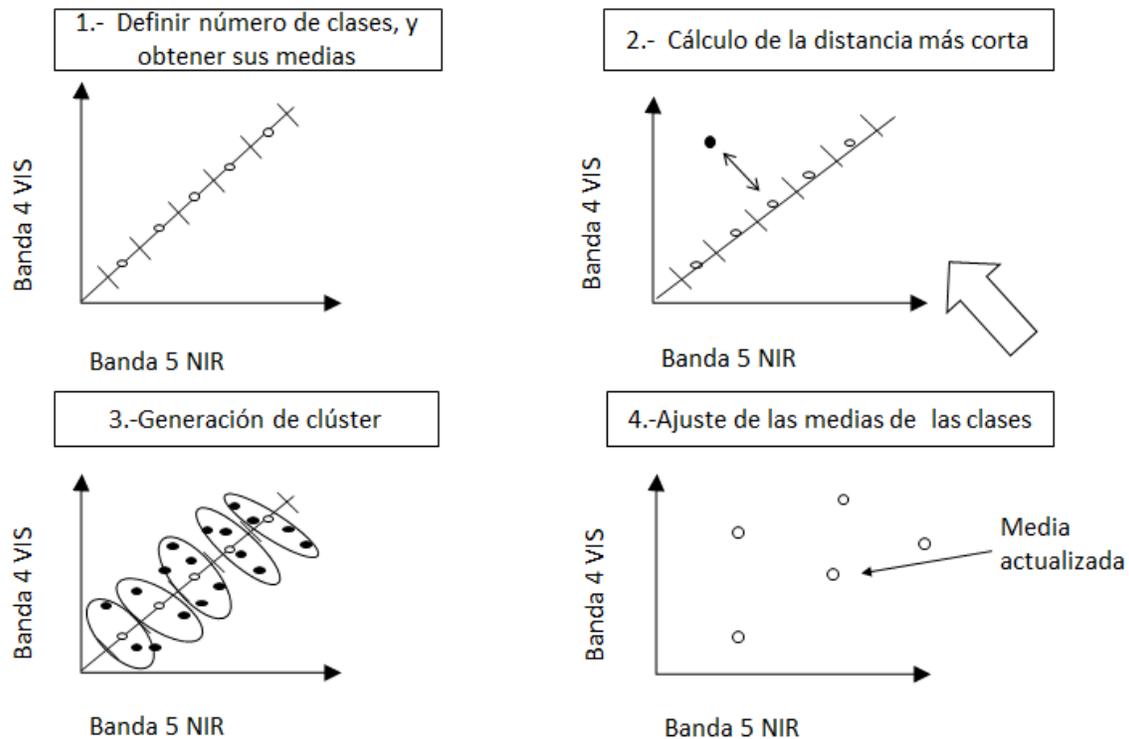


Figura 9. Algoritmo de clasificación digital ISO-DATA

El procedimiento de clasificación digital en este trabajo integra los procesos de adquisición de imágenes Landsat, el pre-procesamiento digital de imágenes constituye; corrección atmosférica, radiométrica, ajuste de brillo como se observa en la figura 10.

Después del pre-procesamiento de las imágenes, en seguida procede la clasificación digital con base en el algoritmo ISO-DATA. Éste comienza con la determinación de clases (7 clases en la imagen) y selección de muestras por el usuario (Figura 10), esto es la asignación de las clases observadas en la imagen de satélite y tres muestras representativas de los valores de reflectancia para cada clase. A partir del cálculo de la distancia mínima y su comparación con la desviación estándar de los valores de firma espectral se determina la clasificación del pixel en cuestión. Si cumple la característica es clasificado, de lo contrario regresa al cálculo de la distancia mínima y continua el ciclo hasta terminar con el último pixel y finalizar. Este algoritmo de clasificación es comúnmente usado puesto que ofrece buenos resultados, ya que clasifica la mayoría de los pixeles por medio de la distancia mínima hacia todas las clases existentes.

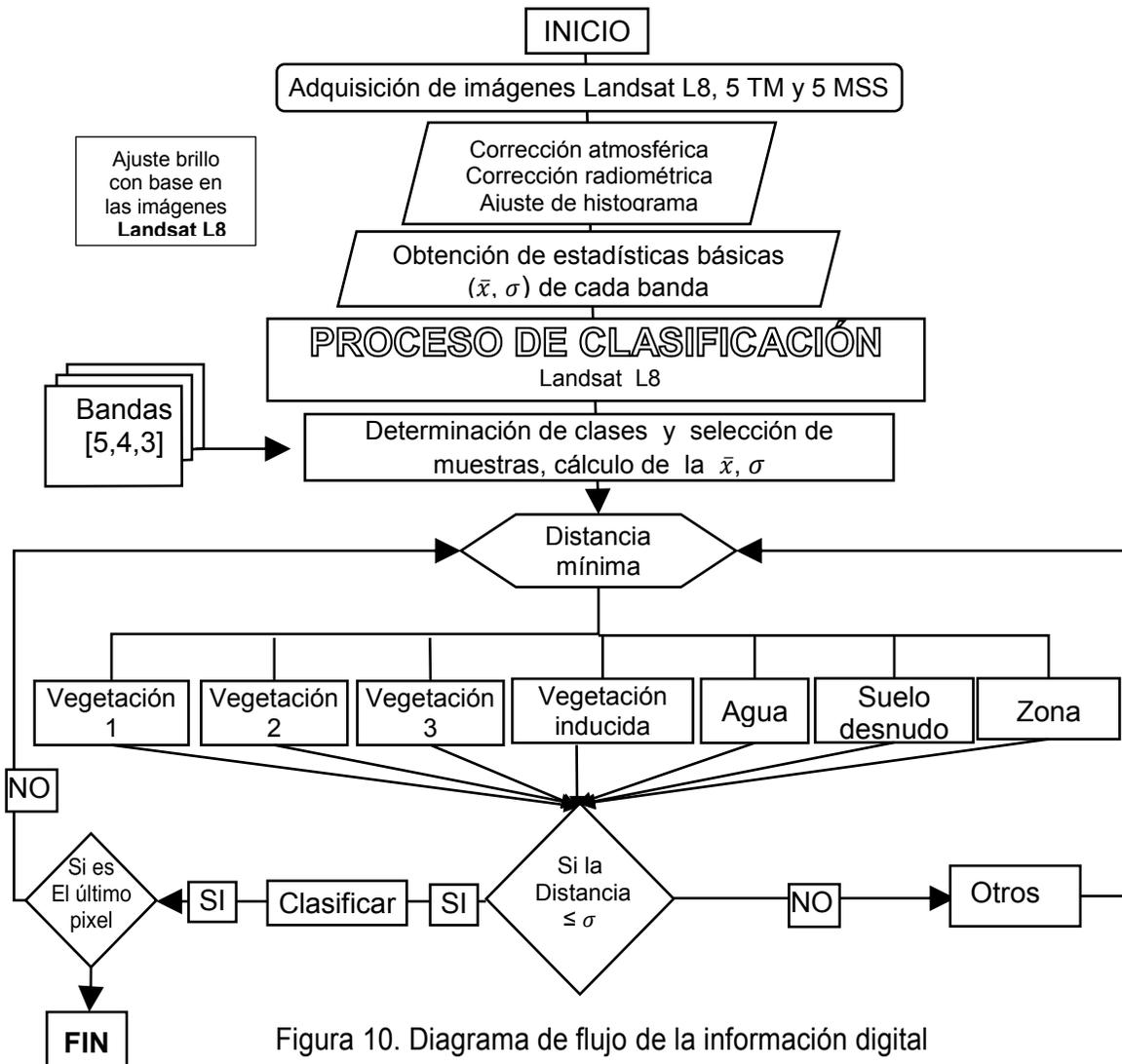


Figura 10. Diagrama de flujo de la información digital

El pre-procesamiento y clasificación digital de la imagen de satélite establecieron las categorías evaluadas. Por otro lado, para efectuar el cálculo de biomasa y verificar los tipos de vegetación de la Sierra de San Miguelito, se realizaron muestreos en campo.

4.4 Muestreo de especies forestales en la zona de estudio

Los lugares estudiados fueron El Ejido Jaral y Ejido de la Amapola, en donde se muestrearon las especies de pino y encino del área de estudio. Los datos recabados fueron diámetro a la base del fuste o tronco, diámetro medio, diámetro a 1.30 m (DAP), altura total, en adición se registró el radio de la copa y la altura donde inicia la ramificación del árbol.



Figura 11. Ubicación de la parcela 1 de muestreo Ejido el Jaral

Se determinaron parcelas de muestreo de 50 x 50 metros en el sotobosque, en dónde se tomó en consideración la densidad de especies presentes en el área de estudio.

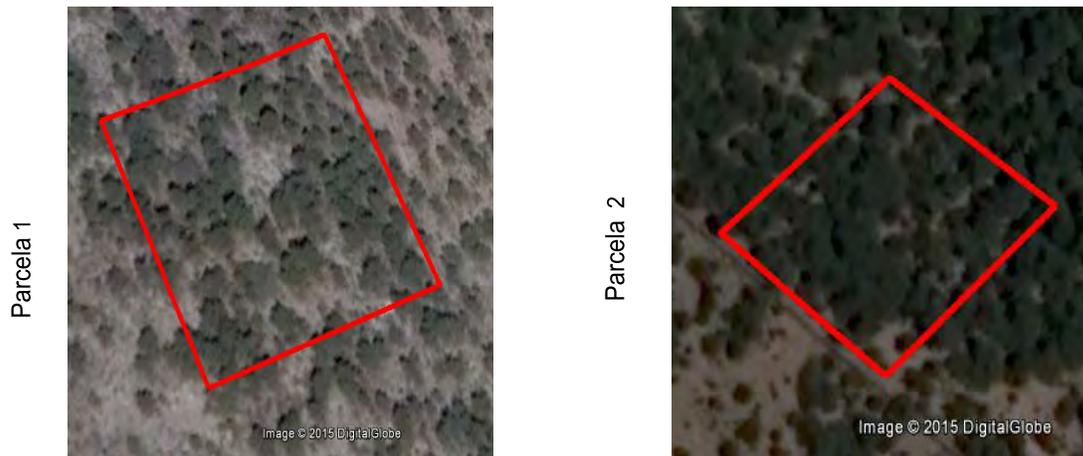


Figura 12. Visualización de densidad de las parcelas de muestreo Fuente; Digital Globe, 2015

La parcela 1 Ejido el Jaral se encuentra en las coordenadas $22^{\circ} 07' 33.52''$ N y $101^{\circ} 08' 43.88''$ O, a los 2171 m.



Figura 13. Especies muestreadas en Ejido El Jaral, parcela 1 de estudio

Se recogieron datos de 38 árboles de las especies de pino encino de la parcela 1.

Los instrumentos de medición fueron cintas métricas flexibles, y un tablón de madera que se utilizó como escala para medir alturas, además de clinómetro para la medición de ángulos.

La parcela número 2 se localiza en las coordenadas $22^{\circ} 02' 27.89''$ N y $101^{\circ} 07' 33.74''$ O y a los 2171 m de altitud.



Figura 14. Especies registradas en la parcela 2 Región de la Amapola, Ejido Escalerillas

En la parcela 2 se registraron 121 árboles de las especies de pino y encino.

El total de registros se procesaron en bases de datos para la obtención del volumen del fuste de acuerdo a la forma geométrica del paraboloides y la estimación de la biomasa de copa con base en la estimación del fuste, ya que la biomasa de copa representa casi el doble de la biomasa del fuste para *Pinus cembroides* de acuerdo con los datos de Martínez (2014).

4.5. Factores de estimación de biomasa

La biomasa aumenta a través del tiempo con el crecimiento del árbol y está relacionada con las condiciones de la edad, especie y sitio en el que se desarrolla. La estimación de biomasa considera básicamente el volumen de las masas forestales por la densidad básica de la madera.

El factor de densidad básica de la madera es muy importante en la determinación de biomasa ya que depende de las características del contenido de humedad, peso y dureza de la madera. Los métodos empíricos con base en el método de Smith (1954) para calcular la densidad básica de la madera, han obtenido resultados similares en unidades de (g/cm^3) donde la media se estima en 0.42, valor mínimo 0.385 y 0.463 como valor máximo, obtenidos de 48 árboles de *Pinus patula* (Valencia y Vargas, 1997).

El uso de la densidad promedio es aplicado para diversos estudios, puesto que la densidad básica de la madera fluctúa de 0.42 a 0.45 g/cm^3 (González, 2008; Bonilla, 2009). Sin embargo, para las especies de *Pinus cembroides* Zucc se conocen valores de 0.58 g/cm^3 (Vaca 1992; citado en Martínez, 2014) y 0.657 g/cm^3 (INIFAP, 2012).

El factor de densidad de biomasa utilizado en este estudio fue seleccionado de acuerdo con el tipo de vegetación dominante de *Pinus cembroides* Zucc, de acuerdo a los datos establecidos por Martínez (2014) que corresponde a 0.58 g/cm^3 densidad básica de la madera y 0.57 g/cm^3 como el peso seco de la copa que incluye ramas y hojas.

Gayoso (2002) citado por Avendaño (2006) determinó que la cantidad de biomasa en un árbol se reparte en: fuste principalmente con un 55-70%, las ramas del 5-37%, el follaje de 1-15% y la corteza del 5-16%, mientras que para Muñoz *et al.*, (2005) y Luna (1999) la biomasa de hojas y ramas representa un total de 65.23%, mientras que el fuste constituye el 34.77 % de la biomasa total. No obstante en algunos árboles analizados la biomasa llega a representar hasta 87.14% en árboles maduros.

Los estudios para la especie de pino *Pinus cembroide Zucc* evaluados por métodos directos (cosecha) indican el porcentaje de biomasa en hojas y ramas es de 65.23% y el fuste representa 34.77 % de la biomasa total (Martínez, 2014).

En los sensores ópticos, la observación de la biomasa foliar es importante, pues las observaciones de la cubierta se basan en los datos recogidos de reflectancia espectral en la región del visible e infrarrojo y dificultades para penetrar más allá de las capas de la cubierta superior. Como resultado, la reflectancia de un árbol se rige por el follaje del árbol en vez de su biomasa leñosa (Sader *et al.*, 1989; Rahman, 2010).

4.5.1 Las emisiones por quema de biomasa forestal

La biomasa es el parámetro principal para estimar las emisiones de los gases de efecto invernadero, con la biomasa podemos conocer la fracción de carbono liberado a la atmósfera. Para estimar las emisiones de CO₂ causado por incendios forestales se ha implementado el método de Seiler y Crutzen (1980), el cual estima las emisiones por quema de biomasa.

$$M=A \cdot B \cdot C$$

$$M(C) = C \cdot M$$

$$M(CO_2) = CE \cdot M(C)$$

Donde

M = Masa total de vegetación quemada

A= es el área quemada

B= cantidad de biomasa que se quema 29%

E= eficiencia de la quema 90%

C = Porcentaje de carbono 45%

M(C) = Masa de carbono liberado

CE = Eficiencia de combustión 90%

M (CO₂)= Carbono liberado a la atmósfera

4.6. Determinación de biomasa por medio de índices de vegetación

Los valores de reflectancia manipulados en un índice permiten evaluar con mayor precisión las propiedades biofísicas; el estado de salud de la vegetación, contenido de humedad dentro de los cuales el índice más conocido y usado es el índice normalizado de vegetación (NDVI), se utiliza frecuentemente para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de biomasa (Tucker, 2005; Carvacho et al., 2010 ;Ji et al., 2012). La actividad fotosintética de la vegetación permite determinar en gran medida el vigor y por ende el contenido de biomasa. El cálculo del NDVI se realiza con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde NIR es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano y R representa la reflectancia en la banda roja del visible. Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales (Carvacho et al., 2010).

Los índices resaltan la firma espectral por el contraste de bandas y reducen el ruido causado por el brillo del suelo, la iluminación, la topografía y las condiciones atmosféricas (Ji et al., 2012).

De esta manera en las zonas donde la cobertura vegetal es baja (es decir, <40%) y la superficie del suelo está expuesta, la reflectancia de la luz en el rojo e infrarrojo cercano pueden influir en los valores de la vegetación. Esto es especialmente problemático cuando las comparaciones se hacen a través de diferentes tipos de suelo (Huete, 1988).

El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) es una modificación del NDVI para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cubierta vegetal es baja.

El índice SAVI se estructura de manera similar a la de NDVI pero con la adición de un factor de corrección de brillo del suelo L, el valor de L varía según la cantidad o la cubierta de la vegetación verde: L = 0.5 es el valor utilizado por defecto (Huete, 1988; Richardson,

et al., 1992).

El valor del índice SAVI es calculado con la siguiente fórmula:

$$SAVI = (1 + l) \frac{NIR - R}{NIR + R + l}$$

Donde NIR es el valor de reflectancia de la banda del infrarrojo cercano, el rojo es la reflectancia de la banda roja, y L es el factor de corrección de brillo 0.5 y el resultado del índice SAVI son valores que van desde -1 a 1. Cuanto menor sea el valor, menor será la cantidad de cubierta de vegetación verde (Huete, 1988).

Los índices de vegetación pueden combinar varias características espectrales del dosel o (copa), sin embargo las características del follaje y su estructura expresadas a través de sus características biofísicas, fisiológicas y bioquímicas (pigmentos, cantidad de agua), no se encuentran bien definidos en cada índice. La mayoría de los índices de vegetación tienden a ser específicos y por lo tanto, no son robustos cuando se aplican a través de diferentes especies, con diferentes arquitecturas de copa, estructuras de las hojas, contenido de clorofila, fracción de vegetación verde y biomasa (Gitelson et al 2003; Glenn et al. 2008).

El índice de área foliar (IAF) mide la fracción de la radiación fotosintéticamente activa y absorbida. Con el IAF se han obtenido algunos resultados exitosos para diferentes cultivos. Los IAF son estructurados de acuerdo a la especie de evaluación, estructura foliar y arquitectura de copa, por lo que este estudio evaluará la idoneidad del IAF propuesto por (Viña *et al.*, 2011) con base en el NDVI, puesto que el NDVI ha mostrado ser uno de los mejores índices para detectar cambios y presupone una relación lineal entre el contenido de clorofila en el dosel y el IAF.

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{NDVI - Y_0}{a}}\right)}{b}$$

Donde Y_0 , a , b , con los coeficientes del modelo $Y_0 = 0.2064$, $a = 0.7298$ y $b = 0.6159$ con un error cuadrático medio (RMSE) de 1.176. Los resultados de este índice se estiman en m^2/m^2 .

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 Resultados del pre-procesamiento digital de imágenes de satélite

La corrección de imágenes de satélite da como resultado una mejor visualización y permitió observar mejor los cambios en las imágenes de diferentes años, además la detección de nubes y su remoción es fácilmente aplicada, con el uso de los valores extremos, en este caso todos los valores cercanos a 1 (Figura 15).

De acuerdo con Darvishsefat *et al.*, (2004), la resolución espacial ideal para estudiar variables de densidad forestal no tiene que ser tan detallada, pues la enorme variabilidad de la reflectancia causada por la sombra de las copas de los árboles o la rugosidad del follaje no es registrada. De esta manera las imágenes de satélites como Spot y Landsat son una buena alternativa para la estimación de biomasa y carbono forestal.

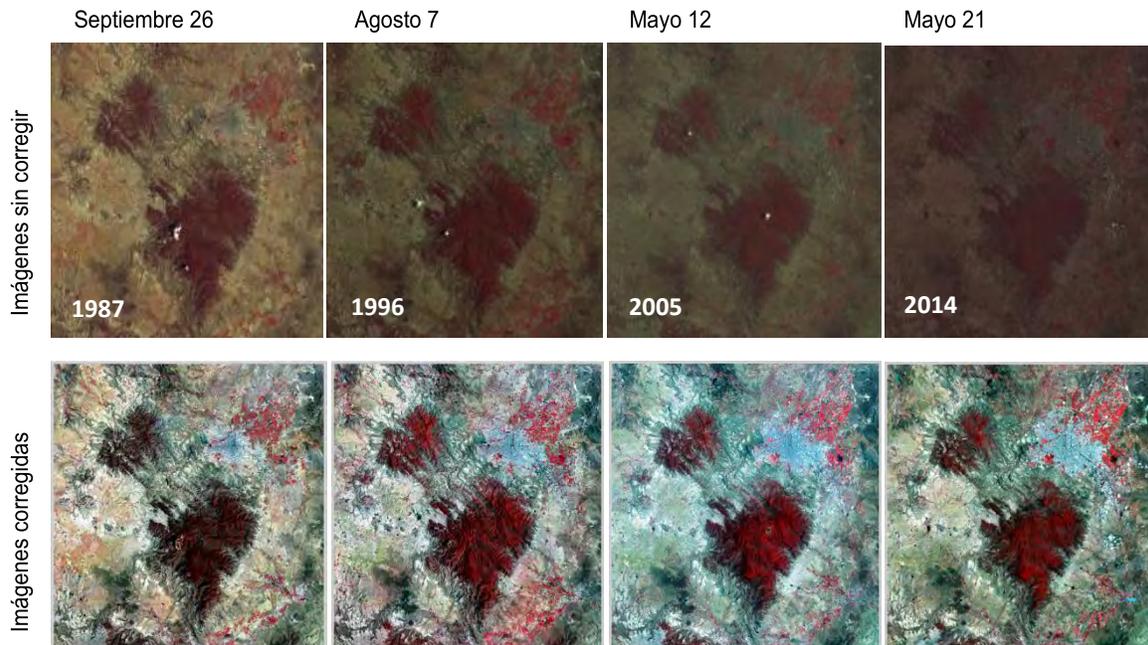


Figura 15. Comparación de imágenes multitemporales de los sensores Landsat MSS, TM y OLI

Las correcciones además de mejorar la resolución radiométrica, con ellas es posible detectar los cambios no únicamente en la vegetación sino también en los suelos, cuerpos de agua y el crecimiento urbano.

La precipitación y temperatura son dos variables que influyen en gran medida en las imágenes para cada fecha y temporada de la imagen. En el rango espectral del infrarrojo cercano (0.845 - 0.885 μm), la radiación emitida por la superficie puede ser relacionada con la radiación registrada por un sensor remoto con la temperatura y la humedad de la superficie investigada. Por lo que un análisis de temperatura y precipitación de cada fecha de las imágenes complementa la interpretación de las imágenes.

Las observaciones hechas en cada imagen corregida, indican fenómenos apreciables, ya que en las imágenes podemos observar el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de San Luis Potosí, de acuerdo con la temporalidad de las imágenes, se aprecian áreas agrícolas de riego con aguas residuales del área conurbana del municipio de Soledad de Graciano Sánchez.

Otro fenómeno observado y que tiene relación directa con la precipitación, son los procesos de erosión hídrica especialmente observados en la Zona de Villa de Reyes, donde se presentó una precipitación anual cerca de los 600 mm en 2002 y 2004 (Figura 16), lo cual se refleja en la imagen del 2005.

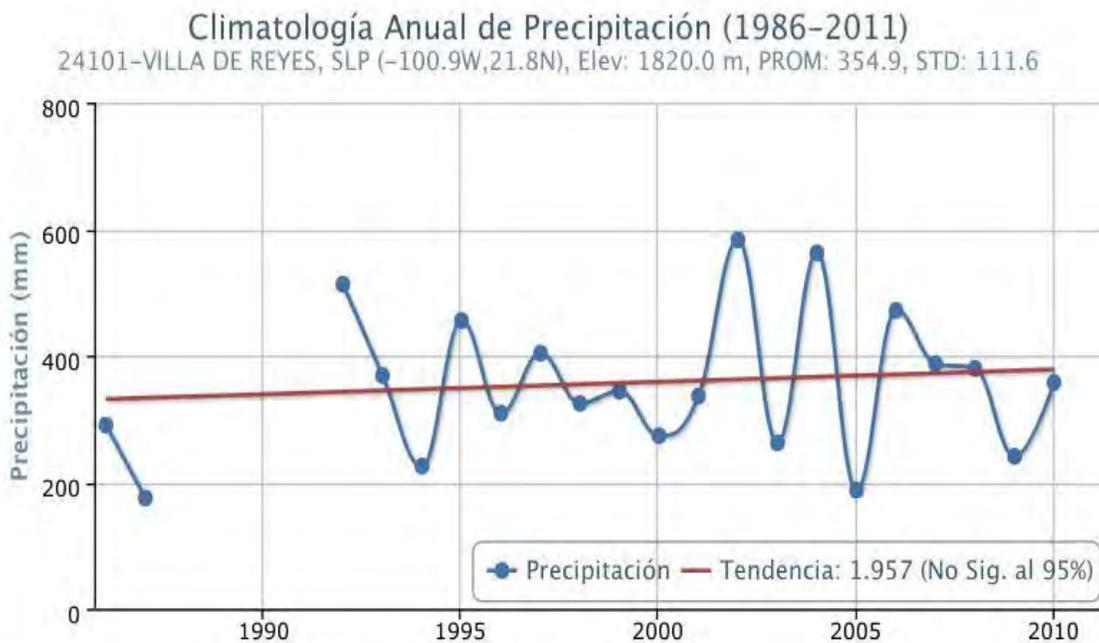


Figura 16. Precipitación anual, estación Villa de Reyes

5.2 Resultados de la clasificación

El módulo clasificador arrojó resultados de las diferencias principalmente en el contenido de humedad de la vegetación. Las clases que se observaron son las que pertenecen a los tipos de vegetación presentes en el área de estudio, que de acuerdo con el inventario nacional forestal del 2009, en el área predomina el bosque de pino-encino y su variante en esta zona, conocido como chaparral. Este último también es usado para designar el bosque de pino-encino con vegetación secundaria. De acuerdo con lo anterior, la clasificación digital identificó las superficies agrícolas húmedas, y parques o jardines (vegetación inducida) con valores de reflectancia muy similares, lo que sugiere una condición de igual humedad y mantenimiento de áreas homogéneas.

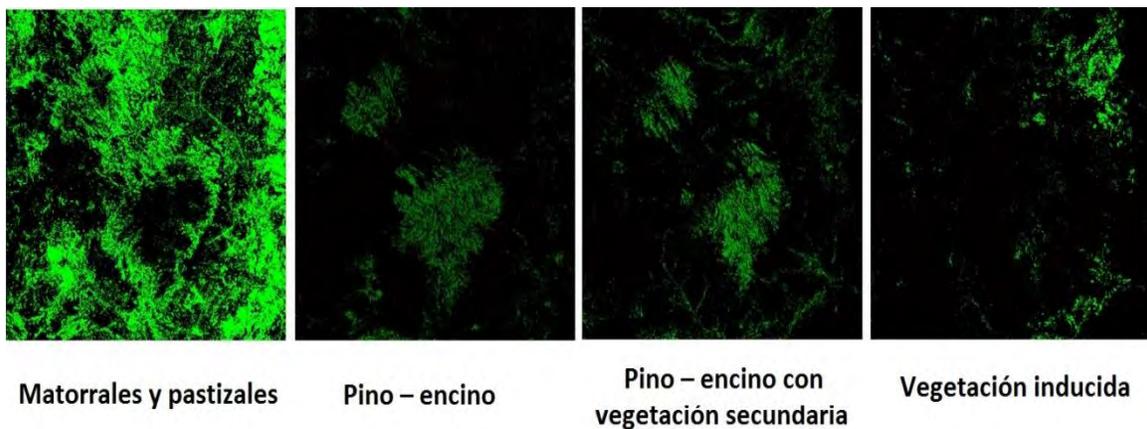


Figura 17. Resultados de la clasificación de la imagen Landsat 8

La superficie de vegetación natural comprende 246664 ha, dentro de esta se encuentra el bosque de pino - encino con 21405 ha y el bosque de pino-encino con vegetación secundaria cuenta con 20193 ha, por último la vegetación inducida suma 5978 ha.

5.3 Resultados de la aplicación de Índices de vegetación

5.3.1 Calculo de NDVI y rangos de clasificación

El cálculo de NDVI dio como resultado la condición de la vegetación de acuerdo con los intervalos observados. Los valores menores a 0 identificaron las áreas con menor valor

de reflectancia como los cuerpos de agua que tienen el valor más bajo. Los valores que se acercan a 0 son considerados como las cubiertas diferentes al estrato arbóreo, tales cubiertas representan los suelos sin vegetación aparente y áreas urbanas. Cabe resaltar que los suelos en esta escala de observación no manifiestan el contenido de biomasa de las especies más desérticas y pequeñas como los matorrales y pastizales (menores de 1m de altura). De acuerdo con lo anterior, la escena contempla el 84 % de la superficie total con valores por debajo de 0 (Figura 18-a).

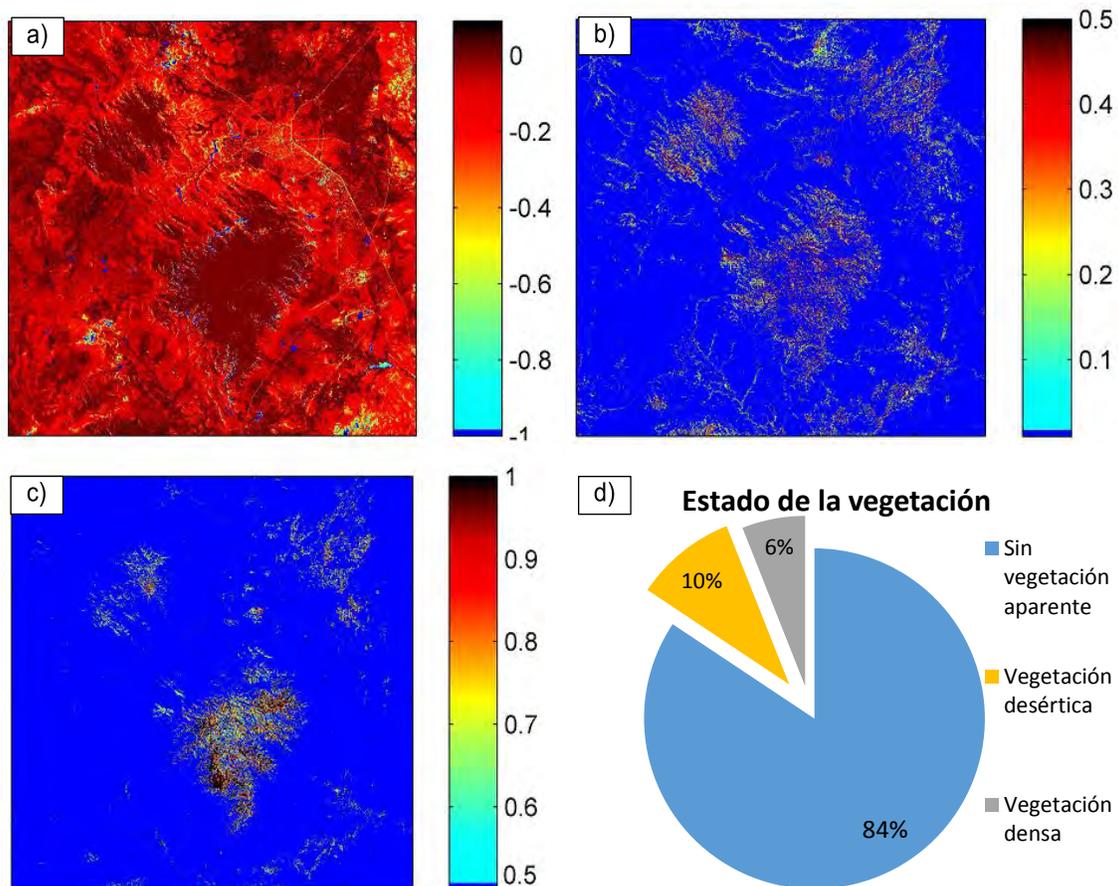


Figura 18. Condición de la vegetación de acuerdo a los valores de NDVI

El 10% de la superficie 29184 ha corresponde a lo que se ha denominado como vegetación desértica (menos densa) cuyo rango se encuentra entre 0.1 y 0.5 (Figura 18-b). La vegetación densa o en mejor estado de conservación corresponde sólo al 6%, entre los valores 0.5 y 1 y su superficie es de 18147 ha (Tabla 9).

Tabla 10. Estado de la vegetación en el área de estudio

Condición de la vegetación	Hectáreas	Porcentaje
Sin vegetación aparente	255300	84%
Vegetación desértica	29200	10%
Vegetación densa	18500	6%

5.3.1.1 Comparación multitemporal de NDVI

La comparación del NDVI de cada año revela aumentos y pérdidas de biomasa (Figura 19) por medio de la condición de la vegetación. De acuerdo con los datos observados, la vegetación se incrementa en volumen y biomasa por crecimiento, otra forma de incremento de la biomasa es por expansión en superficie.

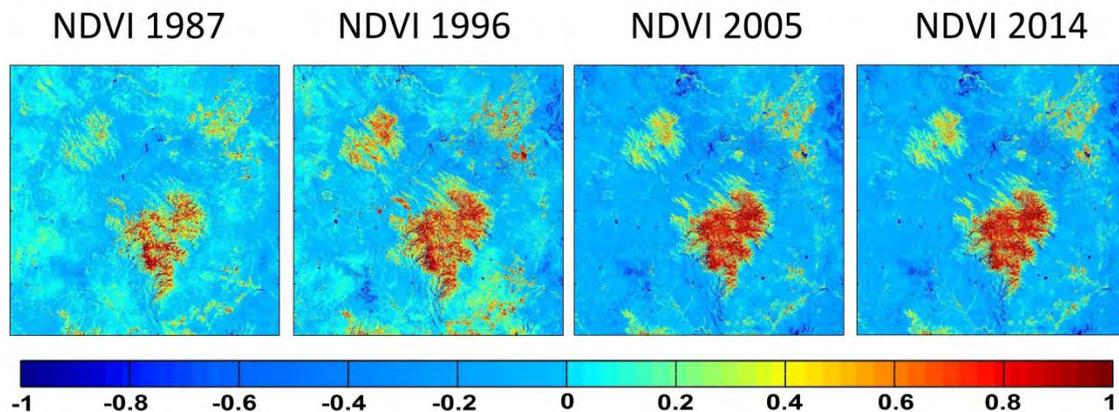


Figura 19. Comparación de NDVI

El aumento por crecimiento de las especies y por expansión en la superficie puede observarse en la comparación de las fechas evaluadas.

La comparación visual de NDVI muestra en resumen incrementos en la densidad y mayor conservación de biomasa para 1996, y para los años siguientes se mantiene invariable. Además de que se presume una mayor conservación de los bosques a partir de la declaración como área natural protegida a partir del 2005.

5.3.2 Resultados del índice SAVI

El índice SAVI arroja los resultados para la estimación de cubiertas verdes en contraste con el suelo, este índice refuerza los resultados de NDVI. Los valores se distribuyen en la imagen (Figura 20) en valores negativos que corresponden a los cuerpos oscuros, que absorben radiancia (azul marino) que son los cuerpos de agua entre otros. Los valores entre -0.4 y 0 corresponden entonces a suelo desprovisto de vegetación, por consiguiente todos los valores positivos después de cero contienen al menos un porcentaje de cobertura vegetal, por último los valores más altos representan los bosques con vegetación más densa.

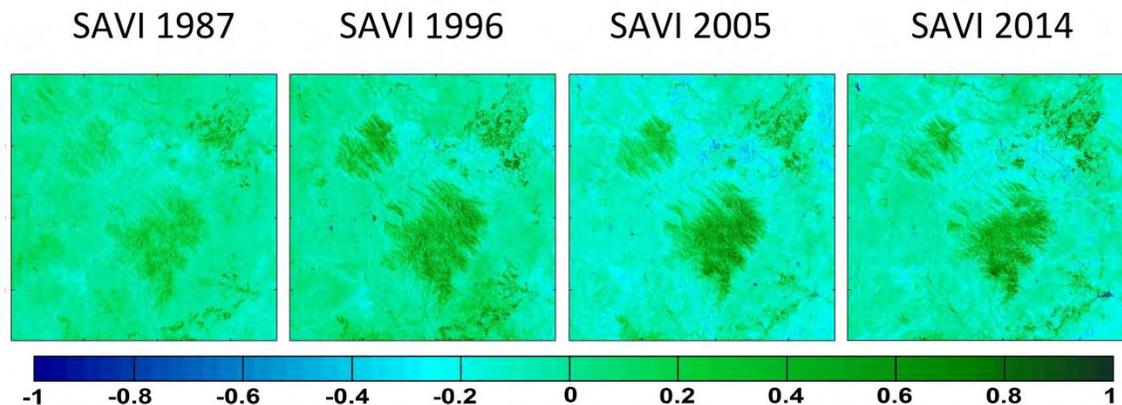


Figura 20. Comparación multitemporal del índice SAVI.

5.3.3 Resultados del índice IAF

El índice de área foliar arroja valores negativos en áreas sin vegetación los valores positivos se incrementan de mayor densidad, con valores de 0.5 y hasta 2 (Figura 21). Donde el modelo presume los valores más altos con mayor absorción de clorofila y

árboles densamente foliados.

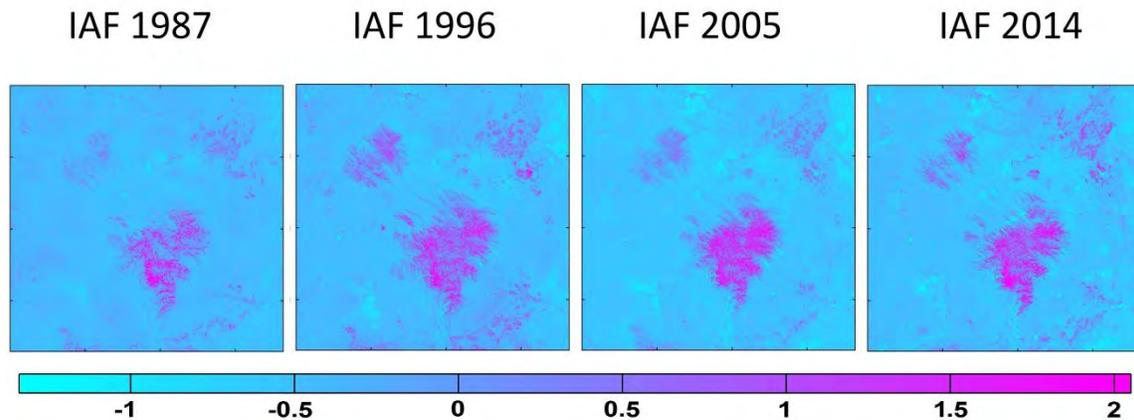


Figura 21. Índice de área foliar

5.4 Biomasa calculada en la Sierra de San Miguelito

Los resultados del muestreo en las parcelas de estudio se resumen a continuación.

La biomasa calculada en el Ejido El Jaral fue de 2169 kg en toda la superficie lo que da como resultado 8.67 toneladas por hectárea en parcelas con densidad media-baja, 41 árboles registrados.

Tabla 11. Resultado del cálculo de biomasa individual Ejido El Jaral

	DAP cm	Altura m	Volumen del fuste cm ³	Biomasa de fuste (gr)	Radio de copa m	Biomasa de hojas y ramas (gr)	Biomasa Total Kg
Moda	6.8	4.3	21438	12434	1.9	23327	36
Mínimo	1.9	2.7	5617	3258	1.	6112.3	6
Máximo	17.5	9	136899	79402	3.3	148961	228

En la Región de La Amapola el número de árboles fue de 124, categorizado como un sitio de densidad media-alta, y el aporte de biomasa total en el sitio fue de 5615 kg, lo que da como resultado 22.45 toneladas por hectárea.

Tabla 12. Resultado del cálculo de biomasa individual Región La Amapola, Ejido Escalerillas

	DAP cm	Altura m	Volumen del fuste cm ³	Biomasa de fuste (gr)	Radio de copa m	Biomasa de hojas y ramas (gr)	Biomasa Total Kg
Moda	7	3.4	18831	10922.2	1.8	20491	31.4
Mínimo	1.6	1.7	1035	600	2.3	1126	1.7
Máximo	36	4.6	547339	317456.7	3.6	595562	913

Los resultados obtenidos fueron integrados con los datos de biomasa elaborados por la Universidad Autónoma Metropolitana (1991) con datos de 3176 árboles tomados de 111 sitios en campo desde 1986. Es así que la biomasa individual por tipo de especie tiene pocos incrementos a través del tiempo, además de que se estabiliza en arboles adultos tomando en cuenta las edades de las especies de 100-200 años¹.

Tabla 13. Biomasa calculada y su contenido de carbón

Aporte de biomasa	Promedio ton/ha	Contenido de carbono Mg /ha
Alto	41.1	19.3
Medio	23.9	11.2
Bajo	13.8	6.5

El contenido de carbono en la biomasa representa aproximadamente el 50% de la biomasa según los parámetros del IPCC (2007), así que la conversión de biomasa a carbono es la multiplicación de biomasa por un factor de conversión de 0.47 que es usado por INEGI (FAO, 2010).

De acuerdo a lo anterior las emisiones por quema de biomasa, con respecto de la superficie afectada fueron estimadas con el método de Método de Seiler y Crutzen

¹ Información compartida por Ulises Rodríguez Robles, Investigación IPICYT.

(1980) (Tabla 15).

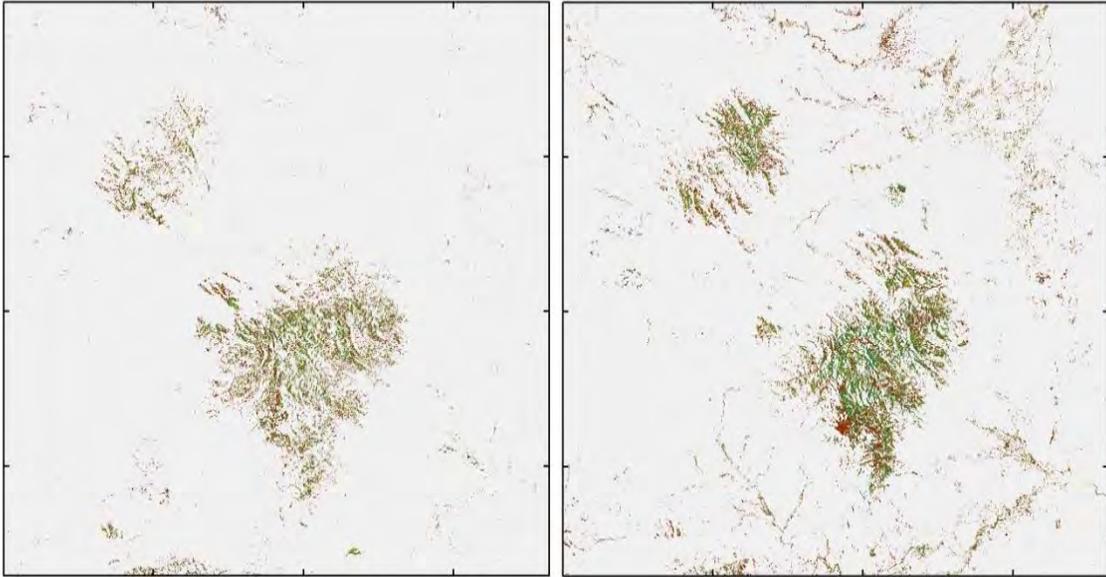
Tabla 14. Masa de CO₂ liberado a la atmosfera

Superficie afectada (ha)	Masa de CO ₂ liberado a la atmosfera Mg		
	Densidad de biomasa		
	Baja 13.8 ton/ha	Media 23.9 ton/ha	Alta 41.1 ton/ha
45	251	436	749
12	67	116	199

La comparación del índice NDVI y el aporte de biomasa por hectárea arrojó como resultado el mapa de biomasa para las especies de pino-encino de la Sierra de San Miguelito, los resultados fueron categorizados en aporte de biomasa alto, medio y bajo (Tabla 15). La suma total de estas áreas arrojó 559 933 toneladas para toda la superficie de la SSM.

Bosque de pino- encino

**Bosque de pino encino con vegetación
secundaria (Chaparral)**



Aporte de Biomasa

Figura 22. Mapa de biomasa en la Sierra de San Miguelito por tipo de vegetación

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Las propiedades biofísicas de los bosques son difíciles de medir, porque la dinámica de crecimiento y estructura de los árboles son muy irregulares, sin embargo, por medio de la percepción remota, las imágenes de satélite permiten obtener una aproximación de las propiedades biofísicas de la cobertura vegetal.

Las imágenes de satélite Landsat proveen resolución radiométrica, espacial y temporal adecuada para la evaluación de biomasa de bosques a nivel regional, ya que cubren grandes áreas y la colección disponible abarca escenas desde 1972 hasta la actualidad.

El tratamiento digital de las imágenes de satélite permite mejores resultados en la diferenciación de clases, por consiguiente existe un mayor aprovechamiento de la resolución de la imagen de satélite para la aplicación de los índices de vegetación y la identificación de otros fenómenos como la agricultura, los procesos de crecimiento urbano, deforestación y erosión.

El potencial de los índices de vegetación para revelar el estado de conservación de los bosques es una herramienta muy útil para la estimación de biomasa, cabe destacar el índice NDVI como el de mayor uso en investigaciones de biomasa y estado de conservación de los bosques.

Los resultados de la biomasa aérea para la zona de estudio consideran como aporte bajo de biomasa <13 toneladas en promedio por hectárea y el aporte máximo se encuentra alrededor de 41 toneladas por hectárea que son similares en literatura.

La resolución espacial y escala de medición juegan un papel importante en la estimación de biomasa, ya que la estimación del CO₂ y otros componentes liberados a la atmósfera por los incendios forestales requieren datos puntuales. Los datos expuestos aquí resultan 19.32 Mg/ha en áreas con densidad alta y 6.50 Mg/ha en áreas de baja densidad.

Mediante observaciones de campo es poco práctica la medición de biomasa, los

enfoques basados en percepción remota para el cálculo de biomasa calibrado con pocos muestreos, permite realizar cálculos para áreas extensas con las mismas características. Las imágenes de satélite Landsat están categorizadas como imágenes de resolución media y se les atribuye la capacidad de lograr una alta precisión en grandes áreas lo que reduce considerablemente la incertidumbre de las estimaciones de campo.

En resumen, este trabajo constituye una primera aproximación para la obtención de valores de biomasa relacionados con la estructura del bosque de pino-encino de la Sierra de San Miguelito a nivel regional. Es necesario señalar que existen limitaciones metodológicas relacionadas con la escases de información de la diversidad de especies no muestreadas, por lo que existe la necesidad de producir y distribuir datos geospaciales de atributos forestales de especies no comerciales como las especies del estrato arbustivo y pastizales, ya que estos tipos de vegetación también forman parte importante de los ecosistemas, además de que brindan servicios ambientales no remunerados. En este sentido se recomienda la actualización y retroalimentación de los datos del Inventario Nacional Forestal.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre S., Arturo, 2013. Modelación geoespacial de variables de densidad forestal. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. 119 p.

Alcántara, M.E., 2001. Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgo de Desastres en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Anyamba A, Tucker CJ. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *J Arid Environ* 63(3):596–614

Ávila, Gabriela, Jiménez Francisco, Beer, John, Gómez, Manuel, Ibrahim, Muhammad, 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforesteria en las Américas* 8.

Avitabile V, Baccini A, Friedl MA, Schullius C. 2012. Capabilities and limitations of Landsat and land cover data for aboveground woody biomass estimation of Uganda. *Remote Sensing of Environment*, 117, 366–380.

Bassham, J. A. 1962. La ruta del carbono en la fotosíntesis. *Scientific American*. Traducido por J. Kohashi. 206(6): 88-100.

Bautista Vicente, F.S. (2015) Emisiones Totales Anuales de CO₂ por Incendios Forestales en el Periodo 1999-2010 en México y Estimación de Índice de Riesgo. Tesis de doctorado, Geociencias Aplicadas, IPICYT.

Bonilla, P. E. 2009. Uso de relaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 64 p.

Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry paper*, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, Rome, Italy. 134 p.

Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry paper*, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, Rome, Italy. 134 p.

Brown, S., Ch. Hall, W. Knabe, J. Raich, M. Trexler y P. Woomer. 1993. Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution*. No. 70: 71-94.

Brown, S., y Lugo, A. E., 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6, 1-32.

Carrillo Flores, Jenni Arlette, 2009. Estructura y regeneración de *Pinus cembroides subsp. orizabensis* D.K. Bailey y en Santa Maria las Cuevas, Tlaxcala. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Carvacho Bart, L. y Sánchez Martínez, M. 2010. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737

Chuvieco S. Emilio, 1990. *Fundamentos de Teledetección espacial*. Madrid España.

CONAFOR, 2013. *Incendios Forestales en México, Temporada 2013*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAMP, 2012. Borrador del Programa de manejo del Parque Nacional Gogorrón.

Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, 2007. Escala 1:250 000 Serie IV Continuo Nacional. INEGI.

Darvishsefat, A. A., P. Fatehi, P. A. Khalil, A. Farzanehb. 2004. Comparison of SPOT-5 and Landsat-7 for forest area mapping. XXth ISPRS Congress Proceedings. Istanbul, Turkey. Commission 7: 423-426.

Dauber, E.; Teran, J.; Guzman, R. 2003. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1): 1-10.

Deans, J.; Mora, J.; Grace, J. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating

semi-decidual tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management* 88(3): 215 - 225.

Dengshen Lu, 2005. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.27 No. 7, 1297-1328

Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.

FAO, 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007 IUSS Grupo de Trabajo WRB. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

FAO, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 (Informe Nacional, México.), La Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010 (FRA 2010). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

Foody GM, Boyd DS, Cutler MEJ, 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sens Environ* 85:463–474

Foody GM, Boyd DS, Cutler MEJ, 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sens Environ* 85:463–474

Gay, C. 2000. El Cambio climático, el problema global más importante del futuro. *Gaceta UNAM*, Noviembre 13. No. 3411: 12-13.

Gayoso, AJ; Guerra, CJ. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33 – 38.

Gitelson AA, Gritz Y, Merzlyak MN, 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J Plant Physiol* 160(3):271–282

Glenn EP, Huete AR, Nagler PL, Nelson SG, 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors Basel* 8(4):2136–2160

Gomasasca, Mario A., 2013. *Bases de Geomántica*. National Research Council of Italy, Institute for the Electromagnetic Sensing of the Environment, Milano, Italia.

Gonzalez de Tanago J, Bartholomeus H, Joseph S et al. 2015. Terrestrial LiDAR and 3D tree Quantitative Structure Model for quantification of aboveground biomass loss from selective logging in a tropical rainforest of Peru. In: *Proceedings of Silvilaser 2015 Conference*. La Grande Motte, France. 28-30 September 2015.

González Zárate, Mequeas , 2008. Estimación de biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Hanes, J.M. (Ed.), 2014. *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*, Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Hernández, J., Peña, K., Corvalán, P., Donoso, S., Emery, X., 2012. Geostatistical Estimation of Biomass Stock in Chilean Native Forests and Plantations. INTECH Open Access Publisher.

Hoffer RM., 1978. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Swain PH, Davis SM (eds) *Remote sensing: the quantitative approach*, McGraw-Hill Book Company, New York, pp 227–289

Huete, A. R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25:295-309.

INEGI, 2001. *Catálogo técnico de nombres comunes de las especies forestales maderables*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI, 2002. Síntesis Geográfica del Estado de San Luis Potosí, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI, 2012. Anuario estadístico de la producción forestal 2012, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI, 2014. Estadísticas a propósito del día internacional de los bosques. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. 85p.

IPCC. 2005. La captación y el almacenamiento de Dióxido de Carbono: resumen para responsables de políticas y resumen técnico. Informe del grupo de trabajo III del IPCC. Ginebra, Suiza. 56 p.

IPCC. 2007. Resumen Técnico. In Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY.

Isanza D., J. F. y Campos R., D. 2007. Cambio climático: Glaciaciones y calentamiento global. Colombia. 287 p.

Ji, L., Wylie, B.K., Nossov, D.R., Peterson, B., Waldrop, M.P., McFarland, J.W., Rover, J., Hollingsworth, T.N., 2012. Estimating aboveground biomass in interior Alaska with Landsat data and field measurements. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 18, 451–461.

Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 85.

Liang, Shunlin, Li, Xiaowen, Wang, Jindi (Eds.), 2012. Advanced Remote Sensing, 1a ed. Science Direct, USA.

Lu D., 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing* 26: 2509-2525.

Lyon, J.G., Yuan, D., Lunetta, R.S., C.D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64(2):143-150.

Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA). 1 ed. San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA), 2002.

Martínez Ramírez.M.A. (2012) Cartografía de riesgo de incendios forestales aplicando sensores remotos y SIG.

Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.

Masera OR, Ceron A, Ordóñez A., 2001. Forestry mitigation options for Mexico: finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6: 291-312.

Morales Bautista, Jesús, 2013. Propuesta de administración silvícola para la producción de piñón en el ejido la Florida, Cardonal, Hidalgo. Universidad Autónoma Chapingo.

OLI Command and Telemetry Handbook, Rev N. EROS. LDCM-ICD-011. Landsat Data Continuity Mission (LDCM) Mission Operations Element (MOE) to Ground Network Element (GNE) Interface Control Document (ICD).

Ordoñez Benjamín, J. Antonio, Masera, Omar, 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1) 3–12.

Ordóñez, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F

Rahman Sarker, Latifur, 2010. Estimation on forest biomass using remote sensing. Tesis de Doctorado. The Hong Kong Polytechnic University, Department of Land surveying and

Geo-informatics, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

Rashed, T., Jürgens, C. (Eds.), 2010. Remote Sensing of Urban and Suburban Areas, Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer Netherlands, Dordrecht.

Richards, John A., Jia, Xiuping, 2006. Remote Sensing Digital, Image Analysis, 4th Edition. ed. Springer, Australia.

Richardson, A.J., J.H. Everitt. 1992. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International* 7(1):63-69. - Compared several different vegetation indices (including SAVI) to see which ones performed best for predicting biomass in rangelands. SAVI performed about as well as other vegetation indices.

Rodríguez-Laguna, R; Jiménez-Pérez, J.; Aguirre-Calderón, O.; Jurado-Y Barra, E. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México* 32 (101): 39-56.

Romero Manzanares, Angélica, García Moya, Edmundo. Passini, Marie-Françoise 1996. *Pinus cembroides* s. l. y *Pinus johannis* del Altiplano Mexicano: una síntesis. *Acta botanica Gallica* 143, 681–693.

RWEDP, 2002. "Wood energy basics". Regional Wood Energy Development. Programme in Asia, Bangkok, Thailand. Disponible en <http://www.rwedp.org>.

Rzedowski, J., 1978. Vegetación de México. 1a. Edición Digital (2006), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp.504

SAGARPA, 2004. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola por Municipios, Servicio de Información y Estadística, Agroalimentaria y Pesquera.

Sanquetta R., C.; Farinha W., L.; Arce E., D. 2002. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea de *Pinus tadea* en el sur del estado de Paraná, Brasil. *Patagonia Forestal* (8)1: 1-9.

Senseman, G.M., Bagley, C.F., and S.A. Tweddale. 1996. Correlation of rangeland cover

measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. *Geocarto International* 11(3):29-38.

Tristán-González, Margarito, Aguillón-Robles, Alfredo, Barboza-Gudiño, José Rafael, Torres-Hernández, José Ramón, Bellon, Hervé, López-Doncel, Rubén, Rodríguez-Ríos, Rodolfo, Hernández, Guillermo Labarthe, 2009. Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61 (3): 287–303.

Universida Autónoma Metropolitana, 1991. Estudio Denso Estructural y Bionómico de los pinos piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus discolor* Bail. Y Hawks.) En el Ejido Escalerillas, Municipio de San Luis Potosí. Informe de Servicio Social, Universidad Autónoma Metropolitana

USGS, 2014. Frequently Asked Questions about the Landsat Missions. How do Landsat 8 Band combinations differ from Landsat 7 or Landsat 5 satellite data?. Using the USGS Landsat 8 Product. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. URL: <http://landsat.usgs.gov>.

Valencia Manzo, Salvador., Vargas Hernández, Jesús, 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 81–87.

Vigil Neri, Roberto, 2010. Estimación de Biomasa y Contenido de Carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. En el campo forestal experimental “Las Cruces”, Texcoco, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, México.

Viña, Andres; A. Anatoly. Gitelson, L., Anthony, Robertson-Nguy, Peng, y, Robertson-Nguy, Peng, Yi, 2011. Comparison of different vegetation indice for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Enviroment* 115: 3468-3478

Walker, W., A. Baccini, M. Nepstad, N. Horning, D. Knight, E. Braun, y A. Bausch. 2011. Guía de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal. Versión 1.0. Woods

Hole Research Center, Falmouth, Massachusetts, USA.

Zavala CH., F. 1987. Estudio de la primera etapa de desarrollo de conos femeninos de *Pinus cembroides* Zucc. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montesillo, Mexico, 113p.

Zheng D, Rademacher J, Chen J, Crow T, Bresse M, Moine JL, Ryu S., 2004. Estimating aboveground biomass using Landsat ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sens Environ* 93(3):402–411

Zolkos SG, Goetz SJ, Dubayah R, 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 128, 289–298.