

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN LA ESTIMACIÓN  
DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE BOSQUES  
TEMPLADOS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA**

**POR:**

**ISMAEL FONTES PALMA**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ÁREA MAYOR EN  
RECURSOS NATURALES**



Aplicación de sensores remotos en la estimación de almacenamiento de carbono de bosques templados en el estado de Chihuahua. Tesis presentada por Ismael Fontes Palma como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias, ha sido aprobado y aceptada por:

---

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa  
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

---

D.Ph. Agustín Corral Luna  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

Ph.D. Iván Adrián García Galicia  
Coordinador Académico

---

D.Ph. Alfredo Pinedo Álvarez  
Presidente

12 Agosto 2020

---

Fecha

Comité:  
Ph.D. Federico Villarreal Guerrero  
Dr. Eduardo Santellano Estrada  
Dr. Martín Martínez Salvador

© Derechos Reservados  
AUTOR. ISMAEL FONTES  
PALMA  
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO  
FRANCISCO R. ALMADA  
KM. 1, CHIHUAHUA, CHIH.,  
MÉXICO C.P. 31453  
AGOSTO 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la oportunidad de continuar con mi crecimiento profesional.

A la FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA por abrirme las puertas para cursar los estudios de maestría.

Al CONACYT por el apoyo que me brindó para costear los gastos económicos durante el periodo de estudio.

Al comité de doctores que apoyaron el desarrollo de mis estudios: Martin Martínez Salvador y en el análisis estadístico Eduardo Santellano Estrada. A mi asesor de tesis Alfredo Pinedo Álvarez y el valioso apoyo de Jesús Prieto Amparán. Y por último a Federico Villarreal Guerrero quien me brindo el apoyo y la orientación para continuar con estudios de posgrado en la universidad.

A la Unidad de Manejo Forestal de San Juanito por su valioso apoyo y colaboración en la toma de datos de campo.

A mi familia por darme la confianza y el apoyo incondicional para cumplir mis sueños de superarme continuamente.

A mis amigos y compañeros de clases de la universidad, por su valioso tiempo de compartir ideas y tiempos de recreación.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por ser un ejemplo de educación y darme su valioso tiempo para seguir el camino del respeto. Agradecer la oportunidad de dejarme ser independiente en todo momento.

A mis hermanos por su apoyo, por mantener siempre esa unión en los buenos y no tan buenos momentos.

A mi esposa por la confianza, tolerancia y por tenerme la suficiente paciencia para lograr mis metas de vida.

A mis amigos por darme su tiempo para socializar y vivir este proceso de una manera más llevadera.

## **CURRICULUM VITAE**

El autor nació el 26 de noviembre de 1985 en la ciudad de Guachochi, Chihuahua, México.

2004 - 2009                      Estudios de licenciatura en la carrera de Ingeniería Industrial, egresado del Instituto Tecnológico Superior de Nuevo Casas Grandes.

2017 - 2019                      Estudiante de Maestría en Ciencias con área mayor en Recursos Naturales y línea de investigación en Monitoreo y evaluación de recursos naturales.

## RESUMEN

# APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN LA ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE BOSQUES TEMPLADOS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA

POR:

Ing. ISMAEL FONTES PALMA

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales

Secretaria de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Los ecosistemas forestales son importantes reservorios de carbono en el planeta. El objetivo de esta investigación fue estimar el contenido de carbono (C) almacenado en un bosque templado de la región de Bocoyna, Chihuahua. A través de información espectral de imágenes de satélite *versus* las variables dasométricas de un bosque templado, se generaron mapas predictivos de C. Se empleó una imagen del sensor Landsat OLI8, así como datos de inventario de campo. Se realizó un Análisis de Correlación para estudiar la asociación lineal entre pares de variables y, posteriormente, se empleó el análisis de Regresión Lineal para la generación de los modelos predictivos de carbono y volumen de madera; los datos espectrales se consideraron como variables predictoras o independiente y las variables dasométricas como variables de respuesta o dependientes. De acuerdo con los resultados obtenidos, las bandas que estiman con mayor precisión las variables del bosque (C en Ton\*ha<sup>-1</sup> y Vol. en

m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup>) fueron las bandas 4 y 6, presentado coeficientes de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) de 80.9 y 79.4, respectivamente. Los rangos espectrales de ambas bandas permitieron obtener estadísticos más consistentes para explicar la distribución espacial del Vol. (m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup>) y C (Ton\*ha<sup>-1</sup>). El uso de sensores remotos como las imágenes Landsat, proporcionan información base a nivel de pixel, que puede ser relacionada con variables del bosque para construir modelos que predicen con buen nivel de precisión la distribución espacial de atributos forestales. Dichos modelos pueden apoyar en el manejo forestal, para llevar acabo mejores prácticas en la conservación sostenible del bosque.

**Palabras clave:** Landsat OLI8, Forestal, Sierra Madre Occidental, deforestación, servicios ecosistémicos.

## **ABSTRACT**

### **REMOTE SENSING APPLIANCE IN THE CARBON STORAGE ESTIMATION OF TEMPERATE FOREST IN CHIHUAHUA STATE**

**BY:**

**ISMAEL FONTES PALMA**

Forest ecosystems are important carbon reservoirs on the planet. The objective of this research was to estimate the carbon content (C) stored in a temperate forest in the Bocoyna region, Chihuahua. Through spectral information of satellite images versus the dasometric variables of a temperate forest, predictive maps of C were generated. An image of the Landsat OLI8 sensor was used, as well as field inventory data. For the generation of the predictive models of carbon and wood volume, multivariate techniques such as correlation and linear regression analysis were used, spectral data were considered as dependent variable and dasometric variables as independent.

According to the results obtained, the bands that estimate the forest variables more accurately (C in  $\text{Ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  and Vol. in  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) were bands 4 and 6, with adjusted coefficients of determination of  $R^2_{\text{adj}}=80.9$  and  $R^2_{\text{adj}}=79.4$  respectively. The spectral ranges of both bands allowed to obtain more consistent statistics to explain the spatial distribution of Vol. ( $\text{M}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) and C ( $\text{Ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). The use of remote sensors such as Landsat images, provide basic information at the pixel level, which can be related to forest variables to build models that predict the spatial distribution of forest attributes with a good level of precision. These models can support forest management, to carry out best practices in the sustainable conservation of the forest.



**Key words:** Landsat OLI8, Forest, Sierra Madre Occidental, deforestation, ecosystem service.

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Captura de Carbono en bosques templados de México.....	4
Aplicación de sensores remotos.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Descripción del área de estudio.....	7
Metodología.....	10
Procesamiento de la información.....	12
Análisis Estadísticos.....	13
RESULTADOS Y DISCUSION.....	15
Análisis de Correlación.....	15
Modelo de regresión lineal simple.....	17
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
LITERATURA CITADA.....	31

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Características y resolución de las bandas de las imágenes del sensor Landsat OLI 8.....	12
2	Matriz de correlación de Pearson, entre las variables estructurales del bosque versus los datos espectrales de las bandas del satélite Landsat OLI 8 .....	14
3	Modelos de regresión lineal simple entre las variables estructurales del bosque (Vol. (m <sup>3</sup> *ha <sup>-1</sup> ) y C (Ton*ha <sup>-1</sup> ) y las bandas del satélite.....	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación de los sitios de muestreo localizados en la microcuenca Situriachi, municipio de Bocoyna, en el estado de Chihuahua.....	11
2	Modelos de regresión lineal de la variable carbono versus las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7 del sensor Landsat OLI8.....	23
3	Modelos de regresión lineal de la variable volumen versus las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7 del sensor Landsat OLI8.....	25

## INTRODUCCIÓN

Los bosques representan grandes extensiones de vegetación que tienen una amplia distribución en el planeta, en ellos ocurren diversos procesos biogeoquímicos que son necesarios para la vida. El ciclo del carbono (C) es uno de estos procesos que es altamente dinámico y sus concentraciones requieren de un gran almacén. Las áreas forestales, representadas por los bosques templados, ofrecen la oportunidad de ser grandes reservorios de C, lo capturan y almacenan en forma de hojas, tallos y ramas. La biomasa acumulada por el bosque es aprovechada bajo algún sistema de manejo forestal, la materia residual es desintegrada por organismos descomponedores del ecosistema.

Según datos de INEGI, la superficie de bosques templados en México representa el 17.4 % equivalente a 34 millones de hectáreas. Alrededor de 13.2 miles de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> son capturadas anualmente por dichos bosques, representando el 54 % del total nacional (24.5 miles de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año) (Torres-Rojo y Guevara, 2002).

Por décadas, las estimaciones de biomasa en bosques templados se han llevado a cabo bajo métodos de evaluación tradicionales, las cuales a través de una unidad muestral se miden variables como la altura del árbol, diámetro, cobertura aérea, diámetro basal, entre otras. Estos métodos, aunque son muy precisos, demandan gran cantidad de recurso humano, dinero y tiempo. En las últimas décadas el desarrollo de la tecnología en el área de sensores remotos, la disposición de imágenes de satélite de mediana resolución espacial y el desarrollo de modelos geoestadísticos, han permitido obtener modelos de estimación de biomasa con un nivel de precisión, lo cual ha representado una

herramienta de apoyo en los propósitos para el manejo, producción, conservación y protección de las áreas forestales.

Por lo anterior, este trabajo de investigación plantea los siguientes objetivos; a) Estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque templado en el municipio de Bocoyna, Chihuahua, b) Obtener el mejor modelo geoespacial entre los datos de la biomasa y la información espectral del satélite y, c) Generar los mapas de almacenamiento de carbono del bosque templado.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Bosques templados

Los bosques templados son el segundo ecosistema de mayor cobertura en México (después de los desiertos). Sin embargo, son los ecosistemas de bosques los que ocupan mayor cobertura forestal del país con una extensión de 32 millones de hectáreas. Dichos ecosistemas proporcionan una gran variedad de servicios ecosistémicos de los cuales uno de los importantes es la captura de carbono (Galicia *et al.*, 2013). En estos ecosistemas del país ocurre la mayor diversidad de encinos en el mundo, con un poco más de 200 especies distribuidas a lo largo de la Sierra Madre Occidental (Navar, 2009). De esta cantidad, el estado de Chihuahua contribuye con 34 especies (21% del total nacional): 19 encinos blancos, 14 encinos rojos y un encino intermedio. Las 34 especies de encinos ubican a esta familia de árboles como la más dominante y ecológicamente representa el componente biótico más importante en los bosques templados de Chihuahua (Arizaga *et al.*, 2009).

México es también el país con mayor número de especies de pinos en el mundo (García *et al.*, 1998). Las pináceas son representadas a nivel nacional por 4 géneros y 61 especies (Gernandt *et al.*, 2014). En Chihuahua se encuentran los mismos 4 géneros y 23 especies, o sea el 34% del total nacional. Igual que los encinos, las pináceas forman parte inherente de los bosques templados de Chihuahua y sin duda, es el grupo de plantas que modifica más los factores ambientales de la Sierra Madre Occidental por ser constituidos por elementos perennifolios (siempre verdes) y como tal, tiene

mucha influencia sobre las variaciones diarias y temporales de la temperatura, así como sobre la ocurrencia y cantidad de lluvias. Además de árboles, los bosques templados incluyen un estrato arbustivo de gran importancia, ya que evita la erosión y mantiene la humedad del suelo. A nivel de suelo, hay un estrato rasante de líquenes y hongos; cuando existe suficiente humedad, los musgos (*Bryophita sensu stricto*) funcionan como esponjas de retención de agua y almacenadores de carbono de hasta  $151 \text{ kg} \cdot \text{Cm}^{-3}$  (Akumu, 2014).

El incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) contribuye el cambio climático global, el cual representa un problema ecológico severo. Dicho fenómeno se debe directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y se añade a la variabilidad natural del clima (Conde, 2005). El fenómeno se puede traducir en la erosión de suelos, reducción de riqueza biótica, contaminación de mantos acuíferos, patrones de evapotranspiración cambiantes, entre otros fenómenos (Wilson, 1999; Krysanova *et al.*, 1998; Mander *et al.*, 1998).

El aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  ocasiona que una parte de la radiación de onda larga que emite la tierra hacia el espacio, sea regresada a la superficie de la tierra, lo cual hace que aumente la temperatura y se altere el clima en general (Magaña, 2004; IPCC, 2007). Tal y como lo concluyó Arrhenius hace ya más de un siglo, que, las quemadas de combustibles fósiles derivan emisiones de  $\text{CO}_2$  que podrían propiciar un clima más cálido. (Field y Raupach, 2004). Actualmente se puede confirmar sólidamente la relación que



hay entre el clima global y el CO<sub>2</sub> atmosférico, sustentándose en estudios de los climas del pasado y en modelos climáticos sofisticados (Cubash *et al.*, 2001).

Las actividades antropogénicas alteran considerablemente los ciclos biogeoquímicos de la tierra y es el ciclo del C el más prominente y reconocido (Malhi *et al.*, 2002). Durante el siglo pasado se tuvo la mayor tasa de incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> que el mundo ha visto en los últimos 20 milenios. (Prentice, 2001; IPCC, 2001a). Estimaciones del IPCC (1995) dicen que México contribuye con el 1.45% de las emisiones anuales del planeta. Dentro de estas emisiones se clasifica al sector energético, mediante el uso de combustibles fósiles, como el principal emisor de GEI en el país con 83.8 Mega toneladas cúbicas (MtC) (Gay y Martínez, 1995). Consecutivamente, el cambio de uso de suelo y forestería, ocupa el segundo lugar con 30.2 MtC (Masera *et al.*, 1995b; Masera *et al.*, 1997, calculan 52.3 MtC, sin sustraer las tC fijadas por arbustos y matorrales). Por otro lado, los gases sintéticos tales como los hidroclorofluorocarbonos, los cuales que no existen de manera natural se emiten por las actividades industriales (Dawson y Spannagle, 2009).

### **Captura de Carbono en Bosques Templados de México**

Los bosques templados tienen la posibilidad de mitigar los Gases de Efecto Invernadero (GEI) por medio de la captura de carbono que se realiza en diferentes ecosistemas vegetales conocidos como sumideros, a pesar de ser, actualmente, fuentes netas de emisión de GEI (Masera, 1997; Ordóñez, 2001). En efecto, la vegetación asimila dióxido de carbono atmosférico, por medio del proceso fotosintético. Los árboles en particular, asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo capturan y

conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra (Apps *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 1999; Dixon *et al.*, 1994).

El complejo ciclo biogeo-químico del C en los ecosistemas forestales genera uno de los problemas abiertos sobre el cambio climático: la estimación precisa de los flujos de C entre la atmósfera y los bosques (García y Odoñez, 1999). En México, las investigaciones sobre la estimación y captura de carbono son escasas para los bosques templados de altura. Entre ellas pueden mencionarse la de Acosta *et al.*, (2009) que determinaron el carbono en la parte aérea y el suelo, en rodales de especies arbóreas (*Pinus*, *Abies*, *Quercus* y latifoliadas como *Agnus sp.* *Arbutus sp.*). Se estimó el carbono a través de la biomasa de cada componente; el pino y oyamel registraron las cantidades más altas de carbono con 301.9 Mega gramos por cada hectárea ( $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$  o toneladas por hectárea) y 183.2  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , respectivamente.

Es relevante señalar que, aunque el carbono existente en bosques en pie, actualmente no tiene un valor en el mercado, el precio podría ubicarse en 12.77 dólares por tonelada de dióxido de carbono del ecosistema ( $\text{tCO}_2\text{e}$ ) en un futuro, dentro del marco de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y se consideren la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación como una modalidad elegible en los mercados de carbono post-Kioto (Bezaury, 2009).

### **Aplicación de Sensores Remotos**

El empleo de imágenes provenientes de sensores remotos como los satélites puede proporcionar información de la superficie terrestre. Actualmente,

existe un amplio abanico de instrumentos o sensores, que proporcionan diversos tipos de imágenes, lo cual ha influido fuertemente en el campo de la investigación aplicada hacia el inventario, evaluación y monitoreo de recursos naturales (Sivanpillai *et al.*, 2005). Así mismo, Thomppo *et al.* (2002) afirman que los sensores remotos son una fuente de información de costo eficiente para aplicarse en extensas áreas y los datos de imágenes de satélite han sido probados en diversas tareas de los inventarios. La información proporcionada por los satélites facilita la medición y monitoreo de diversas variables de los recursos naturales. Los sensores remotos de media resolución espacial brindan información detallada de los ecosistemas naturales, su amplia cobertura de extensión territorial permite cubrir grandes extensiones del territorio, las cuales pueden ser mapeadas y monitoreadas fácilmente (Wang *et al.*, 2004).

El uso de satélites proporciona una herramienta poderosa en el monitoreo de la vegetación, proporciona una cobertura global con una resolución espacial de media a alta, aunque la biomasa no puede ser directamente medida desde el espacio, se ha demostrado que el verdor de la vegetación es fácilmente captado por los sensores remotos y su resolución espectral. Esta bondad permite generar modelos, donde se relacionan los datos del satélite con la información de las imágenes de satélite captadas por los sensores remotos, de este modo se pueden desarrollar métodos indirectos de estimación de la biomasa (Pinedo *et al.*, 2008; Prieto *et al.*, 2018).

Los datos que proporciona las imágenes de satélite, se encuentran concentrados en un arreglo matricial compuesto por pixeles, en los cuales se

almacena la información espectral que es captada por la biomasa o cualquier elemento de la superficie terrestre. Existen métodos paramétricos, como el ajuste de modelos matemáticos a través de modelos de regresión, donde se relaciona la información de la biomasa versus los datos espectrales del satélite (Hall *et al.*, 2006).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Área de Estudio

**Localización.** La microcuenca de la presa Situriachi se encuentra a 11 km de la localidad de San Juanito en el municipio de Bocoyna, inmerso en la conocida Sierra Tarahumara (Figura. 1). La microcuenca tiene una superficie de 11,019 ha. y se ubica en las coordenadas 27°56'16.36" latitud Norte y 107°39'3" longitud oeste. El municipio cuenta con 28,766 habitantes, los cuales se dedican a actividades relacionadas con la extracción y transformación de madera principalmente; la altitud es de 2,400 m.s.n.m. La red hidrológica de la microcuenca se conforma por aguas de los arroyos Sateapachi, Los Magueyes, Aracoyvo, Yervanis, San Isidro, Santa Rita, Rosabare, Mascarita, Los Gingos, El Zorro y Gumeachi; los cuales son afluentes al río Situriachi.

**Clima.** De acuerdo al sistema de clasificación de Köppen, hace una descripción del clima de la microcuenca el cual lo define como templado sub húmedo (C(E)W2) con lluvias en verano, mientras que de acuerdo con información de la Unidad de Manejo Forestal (UMF) de San Juanito menciona que la precipitación pluvial es de 500 a 700 mm anuales en promedio, donde los meses de julio y agosto son los más lluviosos (Estudio Regional Forestal, 2009). La temperatura promedio anual es de 12.6 °C y puede bajar a -3°C en invierno, sin embargo, las temperaturas extremas han alcanzado los -18°C en diciembre del 2003 y 40°C en junio de 1992 (CNA, 2005).

**Edafología.** Los suelos de esta región central son delgados con una profundidad de 30cm de espesor, se observa un gran problema de erosión hídrica. Se presentan aluviones derivados de rocas ígneas, así como suelos de

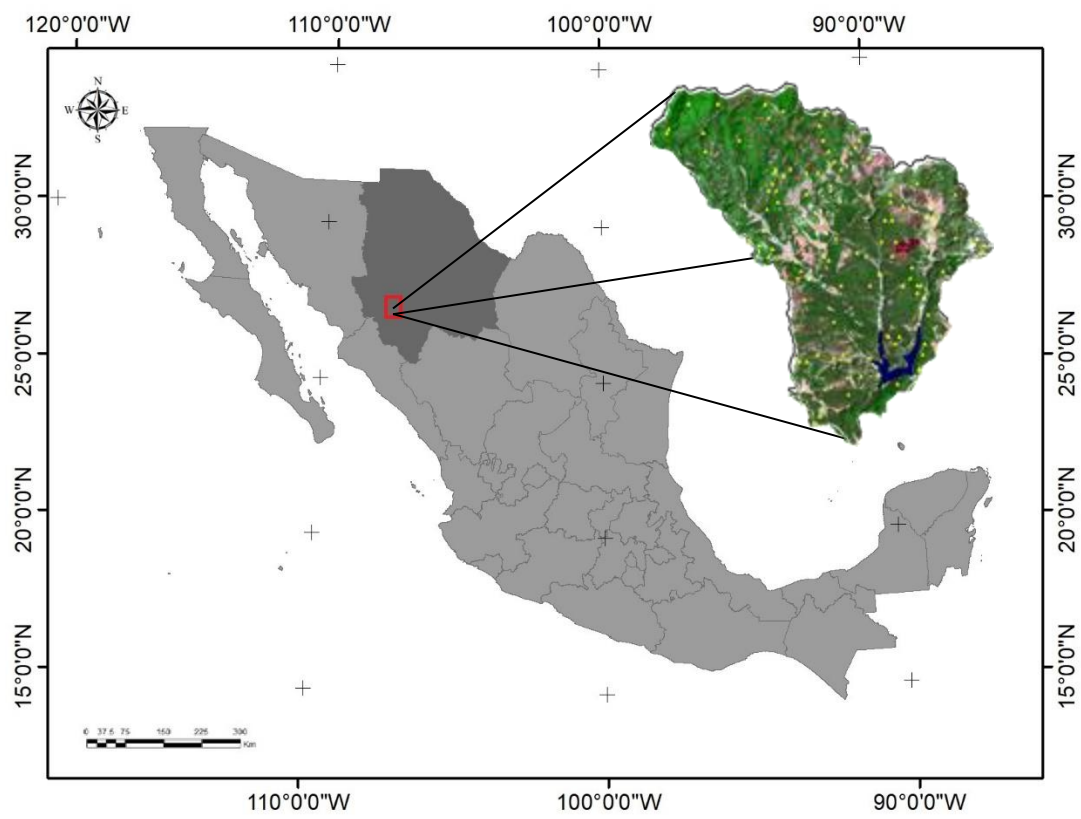


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo localizados en la microcuenca Situriachi en la localidad de San Juanito, municipio de Bocoyna, Chihuahua, México.

formación in-situ. El color de los suelos va de pardo grisáceo oscuro hasta el pardo rojizo; con materia orgánica en la capa superficial de pobre a moderadamente pobre (INEGI, 2003).

**Hidrología.** Las cartas hidrológicas de INEGI incluyen al municipio de Bocoyna en la región hidrológica 24 Bravo-Conchos (RH-24) de la cuenca Río Conchos-Presa la Boquilla. En este municipio nace el río Conchos, la corriente superficial más importante de la cuenca, en sus inicios recibe el nombre de Bocoyna, posteriormente recibe el río Sisoguichi, Narorachi y Agua Caliente, Guazarachi, Nonoava y Balleza, éstos dos últimos de gran importancia debido al volumen que aportan. Los recursos hídricos en la zona de estudio son principalmente superficiales y generados por la cuenca de los arroyos Sitúriachi y Setiapachi bajo una condición de escurrimiento torrencial.

**Vegetación.** En esta región de la SMO frecuentemente se encuentra la asociación entre las mismas especies, con otras especies del mismo género o formando masas más puras. En esta parte central del macizo forestal del estado, las masas boscosas están compuestas por el género *Pinus*, donde predomina el *Pinus arizonica*, *P. duranguensis* y *P. engelmannii*. Armendáriz y Chacón (1999) mencionan que en estas regiones se forman masas puras dominantes de *P. arizonica*, aunque comúnmente se encuentran *P. ayacahuite*, *P. leiophylla*, *P. lumholtzi* y especies del género *Quercus* (Narváez, 2005). Existen otras especies en las partes más onduladas de esta zona como *Quercus fulva*, *Q. rugosa* y *Q. sideroxila* que se asocian con especies de *Juniperus deppeana*, pastos, hierbas y arbustos como *Bouteloua gracilis*,

*Pteridium aquilatum* y *Arctostaphylos pungens*, *Ceanothus fendleri* y *Quercus depressipes*.

### **Metodología**

**Datos de campo.** Para la información de campo, se recolectó información de un total de 112 sitios dentro de la cuenca Situriachi durante el año 2017. La zona presenta un tipo de bosque templado mixto; sin embargo, la selección se realizó considerando únicamente los bosques de coníferas, ya que estos dominan la composición de la cuenca con un 85%. Los sitios se ubicaron aleatoriamente y fueron distribuidos representativamente de acuerdo a la forma de la cuenca.

El procedimiento de la generación de puntos al azar se repitió hasta alcanzar el número deseado de puntos. Los puntos aleatorios que no quedaron dentro de la región de interés, se descartaron. De acuerdo con Klein y Morales (2002), la ubicación de los sitios en forma aleatoria garantiza, por ejemplo, que la estimación de los efectos de los tratamientos silvícolas sea insesgada y cumpla con los requerimientos necesarios para una inferencia estadística apropiada.

**Adquisición de base de datos.** En este estudio se empleó una imagen de satélite del sensor Landsat OLI8 (Cuadro 1), descargada de forma gratuita del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://www.usgs.gov/>) con fecha de captura del mes de junio del 2016. La imagen de satélite cubre un área de 185 x 170 km<sup>2</sup> con una resolución espacial de 30 m en todas las bandas, excepto la térmica (60 m). Además de la imagen de satélite, también fue descargado un Modelo Digital de Elevación el cual se



<b>Satélite</b>	<b>Banda</b>	<b>Resolución (metros)</b>
<b>Landsat OLI 8</b>	1 (Costa)	30
	2 (Blue)	30
	3 (Green)	30
	4 (Red)	30
	5 (NIR)	30
	6 (SWIR 1)	30
	7 (SWIR 2)	30
	8 (Pancromática)	15
	9 (Cirrus)	30
	10 (TIRS 1)	30
	11 (TIRS 2)	30

Cuadro 1. Características y resolución de las bandas de las imágenes del sensor Landsat OLI 8.

usó para realizar correcciones topográficas y de esta manera eliminar los efectos de ruido que producen las zonas montañosas.

Para la medición de las variables estructurales del bosque como el diámetro normal, altura, área basal entre otras se emplearon; forcípula, receptor GPS (Global Position System), cintas diamétricas, hipsómetro, brújula para la medición del azimut, cinta métrica y mapa forestal del predio.

**Procesamiento de la información.** De acuerdo a De León *et al.* (2013), es necesario aplicar procesos de calibración a la imagen satelital antes de efectuar cualquier procedimiento, ello con la finalidad de transformar los valores originales de cada banda (niveles digitales) en valores de reflectancia. Así, la extracción de la información permitirá obtener resultados más precisos basados en parámetros físicos. Con base en información de Chandler *et al.* (2009), dicha transformación se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

Donde:  $L_{\lambda}$  es radianza espectral determinada por la apertura del sensor (en  $W/m^2\ sr\ \mu m$ );  $LMAX_{\lambda}$ , la radianza espectral del sensor escalada al valor  $Q_{cal\ max}$  (en  $W/m^2\ sr\ \mu m$ );  $LMIN_{\lambda}$ , la radianza espectral del sensor escalada al valor  $Q_{cal\ min}$  (en  $W/m^2\ sr\ \mu m$ );  $Q_{cal}$ , el valor cuantificado del pixel calibrado (en

números digitales); y  $Q_{cal\ max}$  y  $Q_{cal\ min}$ , son los valores máximos y mínimos cuantificados de pixel calibrado correspondiente al valor (en niveles digitales).

A partir de dicha fórmula, y atendiendo las recomendaciones de Chandler *et al.* (2009), el proceso concluyó en la obtención de radianza exoatmosférica, obteniendo valores de reflectancia Top-of-Atmosphere (TOA), que con base en el valor obtenido de  $L_\lambda$ , se incorpora en la ecuación 2:

$$p_\lambda = \left( \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda - \cos\phi_s} \right) \quad (2)$$

donde:  $p_\lambda$  es reflectancia TOA (adimensional),  $L_\lambda$  es radianza espectral (en  $W/m^2\ sr\ \mu m$ ),  $d^2$  es la distancia de la Tierra al Sol (en unidades astronómicas),  $ESUN_\lambda$  es definida como la media de la radiación solar exoatmosférica (en  $W/m^2\ sr\ \mu m$ ) y  $\cos\phi_s$  como el ángulo cenital solar (en grados).

### **Análisis Estadístico**

En un primer paso se llevó a cabo un Análisis de Correlación de *Pearson* entre las variables del bosque y las variables espectrales de las bandas del sensor Landsat, a fin de explorar las variables espectrales implicadas en una asociación lineal significativa ( $P \leq 0.05$ ) y proponer modelos con mayor poder predictivo.

En un segundo análisis, se utilizó el procedimiento estadístico de selección de modelos *STEPWISE* del paquete estadístico MINITAB® 16.1.0, a fin de probar todas las combinaciones posibles de modelos de regresión lineal

múltiple que involucrarán las variables estructurales del bosque y la información espectral de las bandas (selección “paso a paso”). Este método permitió definir un modelo integrado con la combinación de variables predictoras que permitieran las mejores estimaciones del volumen de arbolado y contenido de C. La siguiente ecuación 3 representa el modelo matemático empleado.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_i \quad (3)$$

$Y$  = Variable dependiente (variable forestal de interés  $\text{m}^3/\text{ha}^{-1}$ ,  $\text{Ton}/\text{ha}^{-1}$ ),  $\beta_0$ = coeficiente o intercepto en el eje  $Y$ ,  $\beta_1$  = pendiente de la regresión,  $x_1$  = variables espectrales de las bandas del satélite seleccionadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de Correlación

De acuerdo con los resultados encontrados en el análisis de correlación, existe una asociación lineal indirecta entre las variables estructurales del bosque y las bandas espectrales del sensor Landsat OLI8 (Cuadro 2). Todas las variables presentaron una alta asociación lineal significativa ( $P \leq 0.05$ ). La más alta correlación obtenida fue para la variable Vol ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) versus C ( $Ton \cdot ha^{-1}$ ) con un  $r_{xy} = 0.917$  ( $P < 0.0001$ ); sin embargo, su alta asociación lineal se debe a su composición, ya que para calcular el C se emplea el volumen. Las bandas infrarrojas y algunas del espectro visible han demostrado tener buenas relaciones con los atributos de la biomasa forestal (Pinedo, 2008; Vázquez, 2008). Resultados similares reporta López *et al.* (2015), en su estudio llevado a cabo en ecosistemas de bosques templados de Durango, donde reporta relaciones de  $r_{xy} > 0.71$  para la variable de biomasa forestal versus la información espectral del satélite Landsat TM5, en dicho estudio se resalta las relaciones que tienen las bandas infrarrojas del sensor (banda 4, banda 5 y banda 7) con los datos de la biomasa forestal.

En otro estudio, Martínez *et al.* (2016) llevaron a cabo un análisis empleando imágenes Landsat ETM para evaluar las relaciones entre información espectral del sensor y las variables estructurales de un bosque templado de la región de Durango. En dicho estudio encontró una  $r_{xy} > 0.47$  entre el índice de vegetación (NDVI) compuesto por las bandas 3 y 4 de Landsat y las variables del bosque.

Cuadro 2. Matriz de Correlación de Pearson, entre las variables estructurales del bosque *versus* los datos espectrales de las bandas del satélite Landsat OLI 8.

	Vol	C	b2	b3	b4	b5	b6
C	0.917						
<i>p-value</i>	<0.0001						
b2	-0.419	-0.472					
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001					
b3	-0.667	-0.787	0.528				
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001	<0.001				
b4	<b>-0.893</b>	<b>-0.901</b>	0.431	0.699			
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001			
b5	<b>-0.724</b>	<b>-0.804</b>	0.454	0.812	0.784		
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		
b6	<b>-0.767</b>	<b>-0.863</b>	0.559	0.798	0.794	0.766	
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
b7	-0.727	-0.705	0.499	0.51	0.79	0.599	0.65
<i>p-value</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

C= Carbono (Ton/ha<sup>-1</sup>), Vol= Volumen de madera (m<sup>3</sup>/ha<sup>-1</sup>), b2= banda 2, b3= banda 3, b4= banda 4, b5=banda 5, b6= banda 6, b7=banda 7. *P-value* <0.05 indica asociación lineal significativa entre pares de variables.

## Modelos de Regresión Múltiple

Una vez llevado a cabo el análisis de correlación entre algunas variables que componen la estructura forestal y los datos espectrales del satélite. El Cuadro 4, muestra los estadísticos de ajuste, así como los estimadores de los parámetros de los modelos de regresión desarrollados para estimar el Vol. ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) y C ( $Ton \cdot ha^{-1}$ ). Los ajustes obtenidos de acuerdo a los estimadores de los parámetros fueron altamente significativos al 95% de confiabilidad ( $p \leq 0.05$ ). Los datos espectrales de las bandas (b2, b3, b4, b5, b6 y b7) del satélite fueron considerados como las variables independientes o predictoras. Los modelos obtenidos, en su mayoría, presentaron bases estadísticas sólidas para estimar con precisión las variables del bosque (Vol. ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) y C ( $Ton \cdot ha^{-1}$ ), lo anterior, explicado por los criterios de bondad de ajuste como mayor coeficiente de determinación ajustado  $R_{adj}$  y menor valor en la raíz del cuadrado medio del error ( $RMSE$ ).

Las bandas que estiman con mayor precisión las variables del bosque (Vol. ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) y C ( $Ton \cdot ha^{-1}$ ) fueron las bandas **4** y **6**. El volumen del arbolado y la captura de carbono son variables que integran normalmente los inventarios forestales, mientras que las bandas 4 y la banda 6, representan la región del espectro visible (b4) y del infrarrojo medio (b6), para el caso del sensor que se evalúa en este estudio. Los rangos espectrales de ambas bandas permitieron obtener estadísticos más consistentes para explicar la distribución espacial del Vol. ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) y C ( $Ton \cdot ha^{-1}$ ).

Cuadro 3. Modelos de regresión múltiple entre las variables estructurales del bosque Vol. (m<sup>3</sup>\*ha<sup>-1</sup>) y C (Ton\*ha<sup>-1</sup>) y las bandas del satélite.

	Parámetros regresión ( $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_i$ )				$R^2_{adj}$	RMSE
	$\beta_0$	$\beta_1 X_3$	$\beta_2 X_2$	$\beta_3 X_3$		
C (Ton/ha <sup>-1</sup> )	4.614	4.42 (b3)	9.13 (b4)	3.74 (b6)	87.68	0.24
Vol (m <sup>3</sup> /ha <sup>-1</sup> )	294.1	1354 (b4)	218(b6)		80.15	32.96

$R^2_{adj}$  = Coeficiente de determinación ajustado, RMSE= Raíz del cuadrado medio del error.



Los modelos de regresión presentaron los errores (RMSE) más bajos, mientras que los coeficientes de determinación ajustados  $R^2_{adj}$  fueron altos. En el caso del C presentó valores de RMSE de  $0.24 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  con la contribución en el modelo de las bandas 3, 4 y 6. Por otro lado, se encontró que el Vol arrojó un RMSE de  $32.96 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  con la integración en el modelo de las bandas 4 y 6. Resultados similares, fueron encontrados por Pérez *et al.* (2018) los cuales analizaron variables forestales obtenidas con un modelo de regresión lineal. Los valores de RMSE que reportaron fueron de  $3.85 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $30.19 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  y  $21.65 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$  para el Área Basal (AB), Volumen (V) y Biomasa (B), mientras que los valores de  $R^2_{adj}$  fueron de 0.59, 0.66 y 0.58 para el AB, V y B, respectivamente. Por otro lado, Hall *et al.* (2006) en bosques boreales de Alberta Canadá, evaluaron las relaciones entre variables forestales como, biomasa del arbolado y volumen del árbol versus los datos del sensor Landsat ETM+. Los modelos que reportan dichos autores son coincidentes con los encontrados en este estudio. De acuerdo con sus reportes, las bandas 3,4 y 5 con la variable de altura del arbolado mostro un  $R^2_{adj} = 0.65$ , mientras que las bandas 3, 4 y 7 con cobertura aérea fue de  $R^2_{adj} = 0.57$ .

En otro estudio llevado a cabo por Aguirre *et al.* (2011), entre datos espectrales del sensor de alta resolución espacial SPOT 5 HRG y el carbono arbóreo aéreo ( $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) en un bosque de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, México, se obtuvieron resultados que sugieren una alta correlación entre las variables forestales y los índices espectrales relacionados con la humedad de la vegetación.

Jakubaukas y Price, (1997) en un trabajo similar a este, mencionan que los factores relacionados con la estructura del bosque como; altura, área basal y la biomasa se consideran mejor pronosticados utilizando una combinación de bandas de Landsat de la región del visible e infrarrojo del espectro electromagnético. En otro estudio Pérez *et al.* (2018) utilizando imágenes Landsat en bosques de Durango genero modelos de regresión fueron significativos ( $P \leq 0.05$ ) con la prueba de hipótesis de los parámetros, y con el coeficiente determinación ajustada de 0.58, 0.66 y 0.59 para el AB ( $m^2 \cdot ha^{-1}$ ), V ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) y B ( $Mg \cdot ha^{-1}$ ) respectivamente. Mientras que, por otro lado, Cortés *et al.* (2014), utilizando imágenes del sensor Landsat ETM+ estimaron la biomasa aérea de especies de arbolado de comunidades de eucalipto obteniendo un error cuadrático medio de  $25.81 \text{ ton} \cdot ha^{-1}$ .

Una vez determinado los modelos y seleccionados los de mejor ajuste, fueron utilizadas las ecuaciones de regresión para estimar cada una de las variables seleccionadas en este estudio C ( $\text{Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y Vol ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ). La Figura 8 y 9, muestra los modelos espaciales obtenidos a partir de las predicciones de las bandas 4 del sensor Landsat OLI8. Las diferentes tonalidades de color verde y naranja, describe la distribución espacial de los valores de C ( $\text{Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y Vol ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ), los modelos fueron para las áreas de bosque templado de la microcuenca Situriachi.

Hall *et al.*, (2006) modelaron los atributos de la estructura forestal del rodal, usando datos del sensor Landsat ETM+, a través de modelos de regresión relacionaron la información espectral del sensor versus los datos de biomasa y volumen de madera del rodal. Los resultados de los modelos permitieron generar imágenes predictoras de las variables estructurales biomasa y volumen. Los mejores ajustes de regresión fueron para las bandas 3, 4 y 7, de dichos modelos fueron generados los modelos espaciales.

Por otro lado, Pinedo (2008) utilizó un modelo de regresión lineal para relacionar el volumen y la cobertura área con las bandas del sensor SPOT de un bosque templado en la región de Guadalupe y Calvo. No obstante, que los autores evaluaron un sensor diferente al empleado en este estudio, los rangos espectrales que van de los canales visibles y un infrarrojo, corresponden a los evaluados en este estudio. Los buenos ajustes y relaciones de los modelos permitieron generar modelos de predicción de las variables anteriormente mencionadas.

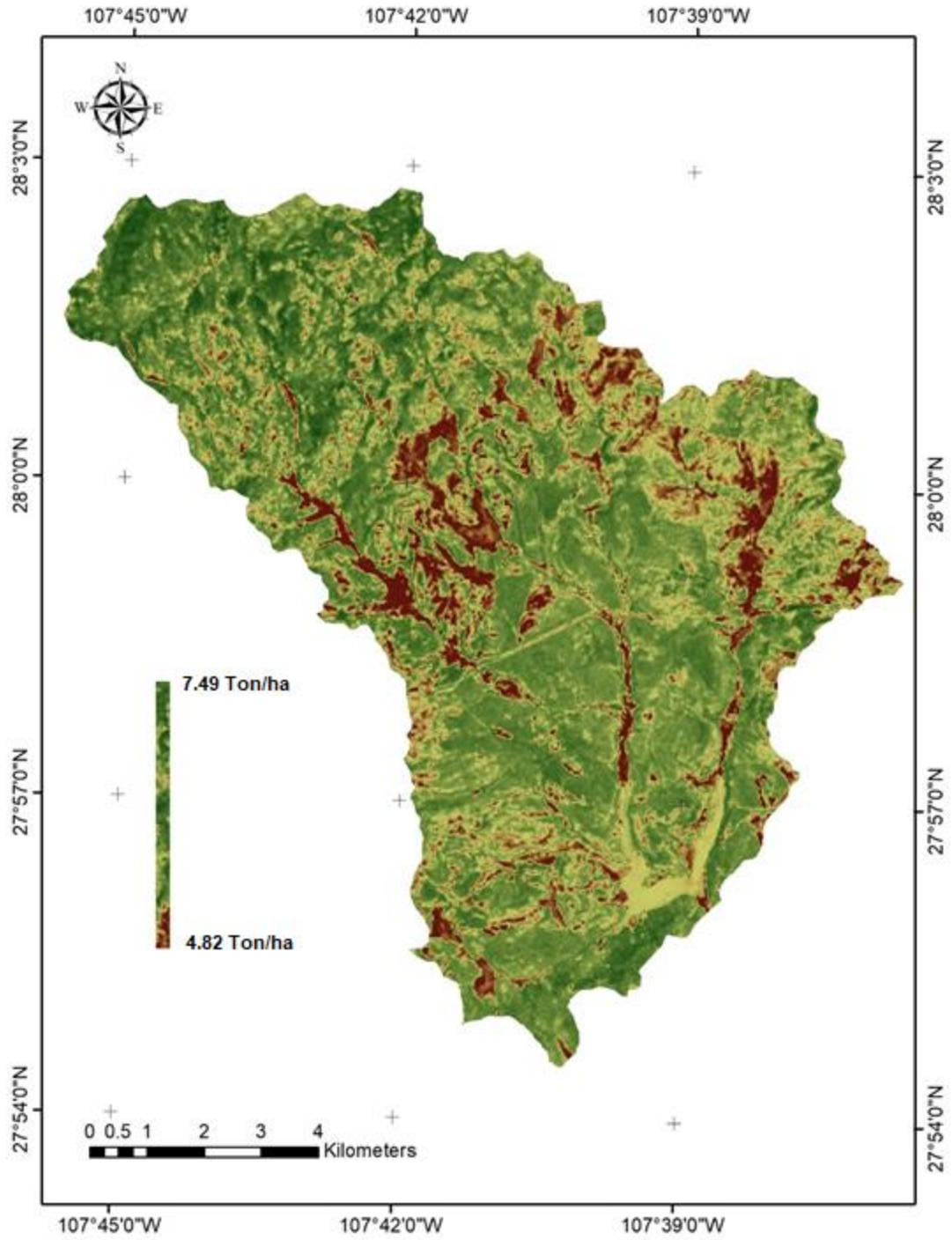


Figura 8. Distribución espacial de la variable C, estimada a través de un modelo de regresión lineal en el área de bosques templados de Situriachi, Chihuahua, México.

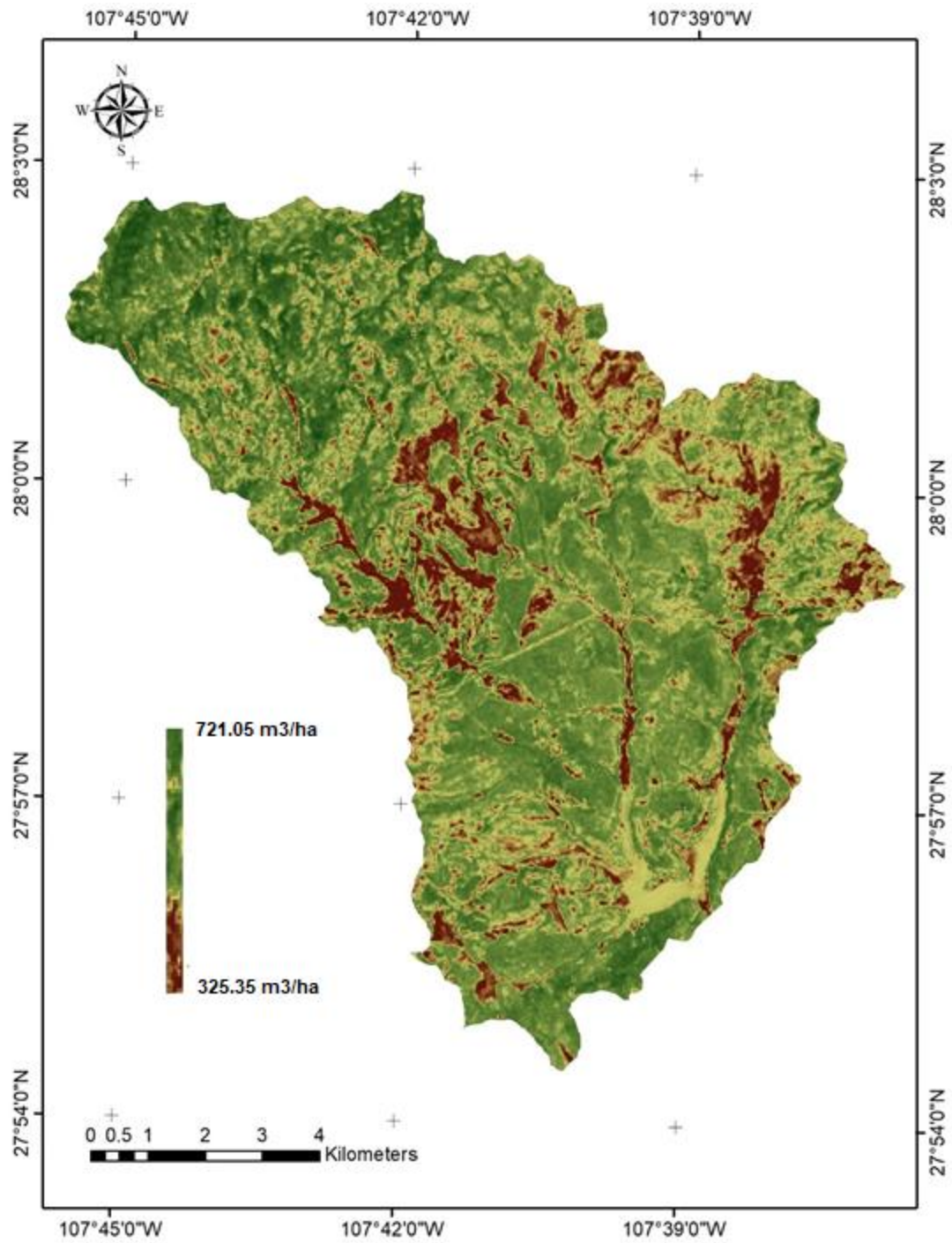


Figura 9. Distribución espacial de la variable Vol, estimada a través de un modelo de regresión lineal en el área de bosques templados de Situriachi, Chihuahua, México.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este estudio se presentó un método para determinar de forma indirecta el carbono aéreo, así como el volumen de madera del arbolado en especies de coníferas de bosques templados de la región de Bocoyna, Chihuahua, México. La metodología utiliza las imágenes del sensor Landsat OLI8 como variables predictoras de las características estructurales del bosque. De acuerdo, con los resultados encontrados el uso de sensores remotos como las imágenes Landsat, proporcionan información base, como información espectral a nivel de pixel que puede ser relacionada con variables del bosque para construir modelos que predicen con buen nivel de precisión la distribución espacial de atributos forestales.

Sin embargo, el desarrollo de modelos predictivos estará sujeto a la adquisición de imágenes libres de nubes, también otra limitante es el factor de escala y la selección de temporalidad adecuada al momento de llevar a cabo los inventarios de carbono. No obstante, el uso de sensores remotos y las herramientas geoestadísticas, siguen representando una gran ventaja cuando se quiere hacer estimaciones de grandes extensiones del terreno.

## LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.
- Aguirre S., C. A., J. R. Valdez L., G. Ángeles P., H. M. de los Santos P., y A. I. Aguirre S. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45: 105-19.
- Akumu, C. E., & McLaughlin, J. W. (2014). Modeling peatland carbon stock in a delineated portion of the Nayshkootayaow river watershed in Far North, Ontario using an integrated GIS and remote sensing approach. *Catena*, 121, 297-306.
- Apps, M. J., Kurz, W. A., Luxmoore, R. J., Nilsson, L. O., Sedjo, R. A., Schmidt, R., ... & Vinson, T. S. (1993). Boreal forests and tundra. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70(1-4), 39-53.
- Arizaga, S. (2009). *Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos*. Instituto Nacional de Ecología.
- Armendáriz. O.R., Chacón, S.J.M. 1999. Caracterización de una plantación de *pinus arizonica* engelm, en el municipio de Bocoyna, Chihuahua. Narváez, 2005
- Bezaury, J. E. B. (2009). El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos. *México: The Nature Conservancy*.
- Brown, S.L., Schroeder, P., Kern, J.S., 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecol. Manage.* 123, 81–90.
- Chander, G., B. Markham and D. Helder (2009), "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors", in *Remote Sensing of the Environment*, no. 113, pp. 893-903.
- CNA, 2005. Datos climatológicos de estación La Laguna, municipio de Bocoyna, Chih. Subgerencia técnica. Departamento de aguas superficiales e ingeniería de riegos. Comisión Nacional del Agua.

- Conde. C. 2005. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Primer Coloquio sobre las Dimensiones Psicosociales del Cambio Ambiental Global. *En: Más allá del cambio climático: las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*. SEMARNAT, UNAM. México. 287 p.
- Cubash U, Meehl GA, Boer GJ, Stouffer RJ, Dix M, Noda A, Senior CA, Raper S. 2001. Projections of future climate change. *In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, vander Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA, editors. Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge, U.K: Cambridge Univ. Press. pp. 525-582.
- Dawson. B., M. Spannagle. 2009. *The Complete Guide To Climate Change*. Primera edición. Editorial Routledge. New York, USA. 436 p.
- De León-Mata, G. D., Pinedo-Alvarez, A. y Martínez-Guerrero, J. H. 2014. Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín, Instituto de Geografía, UNAM, Mexico*. 84, 42-53.
- Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185-190.
- Field, C., M. Rapach. 2004. *The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world*. SCOPE. Editorial Islands Press. Washington, USA. 527 p.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- García, E. *Climas (Clasificación de Köppen, Modificado por García) Escala 1:1000,000*; CONABIO: Distrito Federal, Mexico, 1998. Gernandt et al., 2014.
- García O. F. y A. Ordoñez. 1999. El papel de suelos forestales en la captura de carbono. Enviada a Nuestros Bosques.
- Gay, C. y J. Martínez. 1995. Mitigations of emissions of greenhouse gases in Mexico. *Interciencia*, 20(6):336:342.



- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 126-133.
- Hall RJ, Skakun RS, Arsenault EJ, Case BS. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management* 225(1–3):378–390.
- INEGI. *Síntesis de información geográfica del Estado de Chihuahua*, 1st ed.; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: Aguascalientes, Méx, 2003; p. 113.
- Intergovernmental Panel on climate change (IPCC). 1995. Climate change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. Cambridge.
- Intergovernmental Panel on climate change (IPCC). 2001<sup>a</sup>. Cambio Climático, 2001; Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 94 p.
- Intergovernmental Panel on climate change (IPCC), 2007, Climate Change 2007: Synthesis Report. Contributions of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pachauri, R. K. & Reisinger, A.,1, Geneva, Switzerland. 104 pp.
- Klein, C., & Morales, D. (2002). Consideraciones metodológicas al establecer parcelas permanentes de observación en bosque natural o plantaciones forestales.
- Krysanova, V., W. Mueller y A. Becker. 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/wáter qality model for mesoscale watersheds. *Ecological-Modeling* 106 (3-2): 261-289.
- López-Serrano, P. M., C. A. López-Sánchez, R. A. Díaz-Varela, J. J. Corral-Rivas, R. Solís-Moreno, B. Vargas-Larreta y J. G. Álvarez González, J. G. 2015. *Estimating biomass of mixed and uneven-aged forests using spectral data and a hybrid model combining regression trees and linear models*. *iForest Biogeosciences and Forestry*. 9: 226-234.
- Magaña R. V. O. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. *En: J. Martínez y A. Fernández, (Compiladores). Cambio Climático: una visión desde México. INE-SEMARNAT. pp. 17-27. México.*

- Malhi Yadvinder, Meir P., Brown S. 2002. Forests, carbón and global climate. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 360: 1567-1591.
- Mander, U., A. Kull, V. Tamm, V. Kuusements y R. Karjus. 1998. Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscapes. *Landscape and Urban Planning* 41(3-4):229-238.
- Martínez B, R. A., O. A. Aguirre C., B. Vargas L., J. Jiménez P., E. J. Treviño G. y J. I. Yerena Y. 2016. *Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(35): 91-105.
- Masera, O. R., T. Hernandez, A. Ordoñez y A. Guzmán. 1995b. Land use change and forestry. *In: Preliminary National Inventory of Greenhouse Gases: Mexico. UNEP PROJECT GF/410292-01(PP/3011)*. Instituto Nacional de Ecología. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. U.S. Country Studies Program. September. Mexico, D.F.
- Masera, O.; Ordóñez, M.J.; Dirzo, R. Carbon emissions from Mexican forests: Current situation and long-term scenarios. *Clim. Change* 1997, 35, 265–295.
- Narváez, F.R. y Armendáriz, O.R. (2005). El suelo y clima en relación con la calidad de sitio de las plantaciones forestales en los municipios de Bocoyna, Guerrero y Madera del estado de Chihuahua. En memoria del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, México. pp 94-95.
- Návar, J. 2009. *Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico*. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434. Arizaga et al., 2009.
- Ordóñez, J. A., de Jong, B., & Masera, O. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinuspseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27-47.
- Pérez, M. R.; Romero, S. M., González, H. A., Martínez, A., L., Arriola, P., V. 2018. Estimación de atributos forestales mediante teledetección en bosques mixtos de Durango, México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, Vol. 4 (2): 49-70.
- Pinedo, A. A. 2008. Modelación de atributos de bosques templados con Landsat TM y Spot-HRV e índice de sitio como indicador de productividad. Tesis Doctoral, Facultad de Zootecnia, Universidad

Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

- Prentice, I. C. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *In: Climate change 2001: the scientific basis* (ed. IPCC), Cambridge University Press, UK. pp. 183-237.
- Prieto-Amparan, J. A., Villarreal-Guerrero, F., Martínez-Salvador, M., Manjarrez-Domínguez, C., Santellano-Estinerada, E., & Pinedo-Alvarez, A. (2018). Atmospheric and Radiometric Correction Algorithms for the Multitemporal Assessment of Grasslands Productivity. *Remote Sensing*, 10(2), 219. Estudio Regional Forestal, 2009.
- Rojó, J. M. T., & Guevara, A. S. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta ecológica*, (63), 40-59.
- Sivanpillai, R., Smith, C. T., Srinivasan, R., Messina, M. G., & Wu, X. B. (2005). Estimating regional forest cover in east Texas using Enhanced Thematic Mapper (ETM+) data. *Forest Ecology and Management*, 218(1-3), 342-352. Thomppo et al., (2002).
- Tomppo, E., M. Rosengren., P. Aalto. and P. Kennedy. 2002. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing and Environment*. 82:156-171.
- Vázquez, Q.G.; Pinedo, A.A.; Manjarrez, D.C.; De Leon, M.G.; Hernandez, R.A. Analysis of temperate forest fragmentation using spatial medium-resolution remote sensing in Pueblo Nuevo, Durango. *Tecnociencia Chihuahua*, 2013, 7, 88–98.
- Wang, P. M., Rich, K., Price, W. D., Kettle. 2004. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains *International Journal of Remote Sensing*. 25, 3127 – 3138.
- Wilson E. O. 1999. *The diversity of life*. W. W. Norton & Co. New York. 424 p. *Tropical Forest Update* 8(1) 2-5.