



**IPICYT**

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

División de Ciencias Ambientales

**INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA, COMO  
HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DE LA GEOMORFOLOGÍA Y SU  
EFECTO EN LA MORTANDAD FORESTAL**

Tesis que presenta

**Francisco Fabián Calvillo Aguilar**

Para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias Ambientales**

Director de la Tesis:

**Dr. José Tulio Arredondo Moreno**

San Luis Potosí, S.L.P., Febrero de 2019



## Constancia de aprobación de la tesis

La presente tesis de Maestría en Ciencias en la especialidad de Ciencias Ambientales fue elaborada por Francisco Fabián Calvillo Aguilar y aprobada el 6 de febrero de 2019 por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dr. José Tulio Arredondo Moreno**  
Director de la tesis

**Dra. Elisabeth Huber-Sannwald**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Miembro del Comité Tutorial



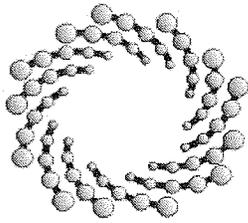
## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Tulio Arredondo Moreno.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con número de registro 608583.

Este trabajo fue parcialmente apoyado por fondos del proyecto SEP-CONACyT num. SEP-CB-2013-220788

El posgrado en Ciencias Aplicadas con opción en Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica se encuentra inscrito dentro del Programa Nacional de Posgrado del CONACyT.



**IPICYT**

# 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 072 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 6 días del mes de febrero del año 2019, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dra. Elisabeth Huber- Sannwald</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tulio Arredondo Moreno</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

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

**MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

sustentó el C.

**Francisco Fabián Calvillo Aguilar**

sobre la Tesis intitulada:

*Integración de técnicas de percepción remota, como herramienta para el estudio de la geomorfología y su efecto en la mortandad forestal*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Tulio Arredondo Moreno**

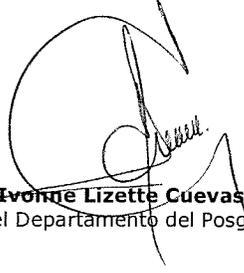
El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 14:50 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 6 días del mes de febrero de 2019.

  
**Dr. Horacio Flores Zúñiga**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



## Dedicatorias

A Dios padre...

¡Espíritu ven de los cuatro vientos!

## Agradecimientos

Existe una frase de mi mucho agrado que dice: “*somos el resultado de los libros que leemos, la música que escuchamos, los viajes que hacemos y las personas que amamos*”, muy a mi pesar no conozco quién es el autor. Yo sólo podría añadirle, “*y de las circunstancias que enfrentamos*”.

De este modo, no podría terminar de agradecer a todos los que han influido en la entrega de este documento, culmen de mi etapa como estudiante de maestría. A todos los que faltasen... ¡Gracias!

Agradezco eternamente a mi familia con la que siempre he contado tanto en el aspecto moral, como el material y por supuesto en el espiritual; y sobre todas las cosas a mis padres, mi hermana, mis abuelas y por supuesto a Kira, que son mi mayor amor, y único sentido de pertenencia a un hogar.

En cuanto al IPICyT, a mis asesores, a los Dres. E. Huber, J. Alfredo y J. Tuxpan, que siempre mostraron una actitud amigable y dispuesta a ayudar tanto en lo personal como en lo académico, muy en especial le agradezco al Dr. J. Tulio que me brindo el reto y el apoyo para la realización de esta tesis, además de las múltiples pláticas trascendentales.

Por último, a todos mis compañeros, amigos y camaradas que conocí en San Luis Potosí. Al equipo, Carlos Aguirre, Josué Delgado y Ulises Rodríguez, gracias por compartir su conocimiento, experiencias y amistad.

A mis compañeros de maestría, y en especial a Claus, Ma-Carmen, Juanjo, Moni, Richard Tex-tex, Val, Netos y Lariza; a mis compañeros de habitación Aúl, Ivan (sin acento) y Violet, y con mucho cariño a Alexas, Andy-Guzman, Edgarst, Lupi-Yera y San-San, que además de su amistad, su apoyo fue invaluable en los tiempos difíciles.

Si has llegado a leer estas líneas, de corazón muchas gracias, “*Ti mo panolti kualli*”.

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Acta de examen de grado	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de cuadros	x
Lista de figuras	xi
Lista de Anexos	xiii
Resumen	xiv
Abstract	xv
1. Introducción	16
2. Hipótesis y objetivos	20
2.1 Hipótesis	20
2.2 Objetivo general y específicos	20
2.2.1 Objetivo General:	20
2.2.2 Objetivos específicos:	20
3. Materiales y métodos	21
3.1 Sitio de estudio	22
3.1.1 Localización	22
3.1.2 Uso del suelo y vegetación	24
3.1.3 Fisiografía	25
3.2 Variables geomorfológicas	26

3.3 Precipitación	26
3.3.1 Obtención de valores de precipitación	26
3.3.2 Series con datos faltantes	27
3.3.3 Mapa de precipitación	28
3.3.3 Precipitación e imágenes satelitales	28
3.4 Análisis de imágenes satelitales	29
3.4.1 Obtención de imágenes y pre-procesamiento	29
3.4.2 Índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI)	31
3.4.3 Determinación de la cobertura forestal	32
3.6 Sitios de muestreo y verificación	33
3.5 Análisis estadístico	34
4. Resultados	36
4.1 Análisis global de la superficie forestal	36
4.1.1 Análisis global de precipitación	36
4.1.2 Análisis global de NDVI	38
4.1.3 Relación global NDVI y precipitación	42
4.1.4 Relación NDVI e índice de área foliar (LAI)	43
4.1.5 Variables geomorfológicas	44
4.2 Análisis por categorías	46
4.2.1 Categorías por tipo de capas vectoriales	46
4.2.2 Relación de las categorías por tipo, NDVI y precipitación	48
4.2.3 Relación de las categorías por tipo, y variables geomorfológicas	48
5. Discusión	50

5.1 Relación multitemporal NDVI y precipitación	50
5.2 Relaciones multitemporal y espacial NDVI por tipo de superficie	52
5.3 Perspectivas	54
5.3 Estudios futuros	55
6. Conclusión	56
7. Referencias	57
8. Anexos	66

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Asociaciones del bosque de Quercus de la sierra de Santa Rosa.	24
Cuadro 2. Fórmula del índice topográfico de humedad (TWI).	26
Cuadro 3. Escenas LadSat utilizadas para el estudio.	30
Cuadro 4. Fórmula de ajuste de brillo para bandas de escenas satelitales Landsat	31
Cuadro 5. Estaciones meteorológicas consideradas para el área de estudio.	36
Cuadro 6. Valores calculados de precipitación anual.	37
Cuadro 7. Resultados de la prueba de tendencia Mann-Kendall para las series de precipitación.	38
Cuadro 8. Resultados de la prueba de tendencia Mann-Kendall para los valores globales de NDVI de la serie de tiempo 1992 - 2017	41
Cuadro 9. Correlación entre variables geomorfológicas con Anomalía NDVI del año 2017 y NDVI Compuesto Medio.	46
Cuadro 10. Polígonos generados de combinar suelo, geología e hidrogeología dentro del área forestal de interés.	46
Cuadro 11. Coeficiente de determinación $r^2$ de las estadísticas zonales por categoría, NDVI y Precipitación anual, para la serie de tiempo 1992 - 2015	48
Cuadro 12. Coeficientes de determinación de la relación NDVI Medio Compuesto y Anomalía NDVI del 2017, por tipo de combinación, con las variables geomorfológicas.	49

## Lista de figuras

Figura 1. Metodología esquematizada como diagrama de flujo.	21
Figura 2. Características físicas de la subcuenca.	22
Figura 3. Mapa de localización del área de interés, zona forestal de la cabecera de la subcuenca Hernández Álvarez, Guanajuato, México.	23
Figura 4. Esquema geológico de la sierra de Guanajuato y alrededores, adaptado de Nieto et al., (1992).	25
Figura 5. Precipitación mensual media para el periodo 1986 – 2015 y ventanas temporales para la búsqueda de escenas satelitales.	29
Figura 6. Vectorización de clase Bosque y comparación con el mapa temático Uso de suelo y vegetación, serie IV de INEGI (2016).	33
Figura 7. Recolección de datos para los sitios de muestreo, fotografía del dosel (A), procesamiento de fotografías hemisféricas (B) y evidencia de plagas forestales (c).	34
Figura 8. Mapa de precipitación para los años 2003 y 2011, de los más húmedos y secos respectivamente; y precipitación anual media para el periodo 1986 a 2015.	37
Figura 9. Precipitación anual de la subcuenca para el periodo 1992 – 2015, calculada por interpolación IDW y puntual de las estaciones meteorológicas del SMN (2016).	38
Figura 10. Comparativa entre escenas satelitales de noviembre del 2017, Sentinel 2-A y Landsat 08, al realizar el pre-procesamiento.	39
Figura 11. Ejemplo de las Anomalía NDVI para la serie de tiempo 1993 a 2016 por periodo, secas y lluvias.	39
Figura 12. Serie temporal del NDVI Compuesto (media de secas y lluvias por año).	40

Figura 13. NDVI Compuesto para el año 2017 con escenas Sentinel 2-A, obtenido de la media de cinco fechas intermedias.	40
Figura 14. Serie histórica del comportamiento de valores NDVI, compuesto y anomalías ( $\Delta$ ) para los periodos de lluvias y secas.	41
Figura 15. Comportamiento histórico del NDVI Compuesto y la precipitación media anual (PP).	42
Figura 16. Relación del NDVI compuesto con la precipitación.	42
Figura 17. Valores de las anomalías NDVI por estación, secas y lluvias; y de precipitación para todo el periodo de estudio.	43
Figura 18. Relación de las Anomalías NDVI, secas y lluvias, con la precipitación mensual.	43
Figura 19. Sitios de fotografías hemisféricas excluidos por ser no representativos, relicto de muy baja densidad (A) y plantación de eucalipto (B).	44
Figura 20. Relación del índice de área foliar (LAI) con el NDVI y la precipitación, valores en amarillo corresponden a los sitios más secos.	44
Figura 21. Variables geomorfológicas.	45
Figura 22. Índice topográfico de humedad (TWI).	45
Figura 23. Distribución de las categorías por tipo en el área forestal de la subcuenca.	47

## **Lista de Anexos**

Anexo 1. Datos de los sitios de muestreo y verificación.	66
Anexo 2. Fotografías hemisféricas por sitio, y visualización de anillos.	68
Anexo 3. Valor medio de las estadísticas de zona, para cada combinación por tipo.	71
Anexo 4. Mapa de permeabilidad hidráulica de la roca, de la subcuenca (rojo) adaptado de Peñuela y Carrillo, (2013) en contraste con el NDVI Compuesto del año 2017.	72

## Resumen

### **Integración de técnicas de percepción remota, como herramienta para el estudio de la geomorfología y su efecto en la mortandad forestal**

PALABRAS CLAVE: *Mortandad forestal, NDVI, Precipitación, Fisiografía, SIG, Sierra de Santa Rosa*

Bajo el contexto del cambio ambiental global, el proceso conocido como Mortandad Forestal Global, el cual consiste en la muerte de masas forestales por estrés hídrico, causado por los cambios en el régimen de precipitación y otros factores consecuentes; ha cobrado interés en la comunidad científica, desde la perspectiva meteorológica y ecofisiológica. Sin embargo, poco se ha estudiado sobre su relación con las características fisiográficas particulares de cada bosque.

De este modo, y con la finalidad de responder, si la fisiografía tiene una relación agravante o atenuante sobre los patrones de mortandad forestal, se ha propuesto determinar la relación de cambio en el régimen de precipitación con la dinámica de la mortandad forestal, mediante el índice NDVI, y cómo este se acopla a las condiciones particulares de fisiografía y geomorfología.

Con ello, se ha desarrollado un estudio multitemporal en la zona forestal del noreste de la Sierra de Santa Rosa, en el estado de Guanajuato, encontrando que el bosque de *Quercus* mostró una tendencia negativa en su NDVI, con una reducción del 0.07 % para el periodo 1992 – 2017. Sin embargo, tras su recuperación de un evento extraordinario de precipitación en el año 2003 actualmente el NDVI se encuentra en la media del mismo periodo, posiblemente relacionado con el incremento en la precipitación (18 %). Además, se determinó como significativa la influencia de las condiciones biofísicas, identificando una variable geomorfológica (Altitud) y dos fisiográficas (roca, Arenisca y permeabilidad, baja) como las más limitantes al NDVI, factores a considerarse en programas futuros de monitoreo y mitigación del proceso de mortandad forestal. Se discute la implementación de estudios socio-ecológicos, que permitan comprender si en la Sierra de Santa Rosa se está desarrollando una incipiente “Transición Forestal”.

## Abstract

### **Integration of remote sensing techniques, as a tool for the study of geomorphology and its effect on forest mortality**

KEY WORDS: *Forest mortality, NDVI, Precipitation, Physiography, Geographic Information Systems, Sierra de Santa Rosa.*

In the context of global environmental change, the process known as Global Forest Mortality, which consists of the death of forest masses due to water stress caused by changes in the rainfall regime, and other related factors, has gained interest in the scientific community from the meteorological and ecophysiological perspective. However, little has been studied about the relationship of forest mortality and particular physiographic characteristics of forest.

In this way, and with the purpose of answering the question, if the physiography has an aggravating or attenuating influence on the patterns of forest mortality, I proposed to determine the relationship between the change in the precipitation regime and the dynamics of forest mortality applying the spectral index NDVI; and how this may be coupled to particular physiographic and geomorphologic conditions.

With this, a multi-temporal study was developed in the forest area northeast of the Sierra Santa Rosa, in the state of Guanajuato, finding that the *Quercus* forest showed a negative trend in its NDVI (0.07%) for the period 1992 – 2017. However, after recovering from an extraordinary precipitation event in 2003, is currently in the middle of the same period, possibly related to an unexpected increase in precipitation (18%). The influence of the biophysical conditions was significant, identifying the geomorphological variable altitude and the two physiographic variables sandstone and low permeability as the most limiting to the NDVI. The implementation of socio-ecological studies that allow to understand if in the Sierra de Santa Rosa is developing an incipient "Forest Transition" is discussed.

# 1. Introducción

Es indudable el valor ambiental, económico y social que tienen los ecosistemas forestales, proporcionan una diversidad de servicios ambientales en los cuatro ámbitos, aprovisionamiento, regulación, cultura y soporte (Chapin *et al.*, 2011.), los cuales fueron valorados globalmente en los 90's por hasta US\$ 969 ha/año (Constanza, 1997). Sin embargo, por motivos naturales y antrópicos, se ha observado una disminución de la superficie forestal mundial, en un 3.1 % entre los años 1990 a 2015 (Keenan *et al.*, 2015), además de un declive en su productividad y supervivencia desde la década pasada (Zhao & Running, 2010).

En el caso particular de México, si bien la tasa de deforestación anual se redujo de 190,000 ha en la década de los 90's a 92,000 ha entre 2010 - 2015 (Keenan *et al.*, 2015), aún queda mucho por hacer, ya que se estima que para el año 2000, México ya había perdido más del 50 % de sus bosques templados originales (Galván, 2008) y en el caso específico del estado de Guanajuato, dónde se ubica la zona forestal del presente estudio, la superficie forestal decrece a una tasa neta de 1420 ha por año (Céspedes y Moreno, 2010).

Además de la creciente presión antrópica sobre los recursos forestales, se ha detectado a nivel mundial un incremento en la mortalidad de los bosques, atribuido a los cambios en el régimen de precipitación y las cada vez más largas e intensas sequías (Allen *et al.*, 2010). A este fenómeno dónde masas forestales pierden su vitalidad por el estrés hídrico, al enfrentar la sequía prolongada y altas temperaturas, se le ha denominado Mortandad Forestal Global (Mcdowell *et al.*, 2008), fenómeno que ha tomado relevancia en la comunidad científica.

El estrés hídrico generado por la sequía promueve mecanismos negativos e irreversibles, como es la interrupción de la columna de agua en el interior de troncos y hojas, conocida como cavitación o fallo hidráulico. Además, la respuesta inmediata del árbol al estrés, es la oclusión de sus estomas, reduciendo la pérdida de agua, pero también la difusión de CO<sub>2</sub>, limitando la fotosíntesis y llevando al árbol a un

estado de inanición de carbono, lo que se traduce en una menor síntesis de compuestos secundarios, utilizados en la defensa de plagas y enfermedades (Mcdowell *et al.* 2008; Allen *et al.*, 2010).

Aunado a la pérdida de los servicios ecosistémicos que implica la reducción de las masas forestales, los eventos generalizados de mortalidad pueden tener efectos a largo plazo sobre la dinámica de las comunidades y las interacciones interespecíficas, con una retroalimentación positiva en la formación de CO<sub>2</sub> atmosférico y su posterior efecto en el clima (Mcdowell *et al.*, 2008), de ahí la relevancia de comprender y mitigar éste fenómeno.

En el marco actual del cambio climático, la expectativa no es positiva, si bien se prevé que la precipitación cambiará de manera heterogénea incrementándose en una tercera parte del globo, las regiones áridas serán cada vez más secas, y por ende habrá un mayor estrés hídrico en la cubierta vegetal de estas regiones (MEA, 2005). Además del efecto de éstos fenómenos cada vez más agudos como El Niño, que ya ha demostrado su relación con la mortandad forestal en otras regiones del globo (Allen *et al.*, 2010), se pronostica un alza sin precedentes en las tasas de mortalidad forestal principalmente en los ecotonos (Allen & Breshears, 1998).

Para entender el proceso de mortandad forestal, se ha propuesto el desarrollo de estudios de la sequía, desde una perspectiva climática más que meteorológica, además de estudios sobre las características inherentes de las especies; así como, los patrones de disturbio tanto naturales como antrópicos (Norman *et al.*, 2016). También, es importante determinar la capacidad de los árboles para obtener agua del suelo, estudiando su estructura radical o incluso la distribución de las fuentes de agua en el substrato (Baguskas *et al.*, 2014), por lo que las relaciones, son mucho más complejas que las derivadas de sólo la sequía meteorológica (Van Gunst *et al.*, 2016).

Por lo tanto, la mortandad forestal global, es uno de los problemas ambientales más preocupantes en la actualidad, y su entendimiento requiere del estudio de los mecanismos causales y de herramientas para su identificación temprana, a fin de

establecer estrategias de mitigación y adaptación, que integren flujos de datos meteorológicos y de percepción remota, junto con otros como el tipo de vegetación, frecuencia de incendios y plagas, para aclarar los efectos directos e indirectos de la sequía (Norman *et al.*, 2016). Algunos trabajos recientes han incorporado al estudio de la mortandad forestal, modelos climáticos y micrometeorológicos (Van Gunst *et al.*, 2016), y variables fisiográficas, tales como las consideradas por Baguskas *et al.*, (2014), como son la exposición, insolación, altitud y pendiente. Además de ello, se requiere considerar que la capacidad de un suelo para retener agua, está dada por su tipo, textura, estructura, profundidad, la permeabilidad de la roca y en su caso el grado de fracturamiento (Osman, 2013; Ortiz, 1990).

Uno de los métodos para integrar éstas complejas relaciones, tanto temporal como espacialmente, incluye el uso de la teledetección o “*remote sensing*”, disciplina originada en los años 60’s, que consiste en cualquier método de observación remota de un objeto, permitiendo su caracterización, sin tener contacto con él (ESA, 2014), y que engloba no solo el método de obtención de una image, sino también su procesamiento (Chuvieco, 1995). A través de los sistemas de información geográfica, estos métodos ya han sido aplicados al estudio de la mortandad forestal, mediante la evaluación de secuencias históricas de fotografías aéreas que muestran el cambio de la cubierta forestal (Allen & Breshears, 1998). Estos estudios también incluyen el uso de imágenes satelitales a través del monitoreo de reflectancia, con lo cual se ha estimado la cobertura y densidad forestal (Macomber & Woodcock, 1994). Un ejemplo consiste, en la implementación de índices espectrales de vegetación, tales como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), desarrollado por Tucker (1979), el cual responde a la actividad fotosintética, y permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación.

De este modo, el objetivo del presente estudio consiste en evaluar la relación que tienen las características fisiográficas y geomorfológicas en los patrones de mortandad o decaimiento forestal global asociados a los cambios en el régimen y distribución de la precipitación, mediante la comparación de masas forestales en decaimiento asociadas a valores bajo de NDVI, y las condiciones físicas de cada

sitio, con el fin de determinar su inclusión en programas de detección, vigilancia y mitigación de la mortandad forestal global.

Se propone evaluar la tendencia histórica de la precipitación en la zona forestal de la región noreste de la sierra de Santa Rosa, y su relación con la dinámica del índice espectral NDVI, obtenido a través de imágenes satélites multiespectrales Landsat y Sentinel, para determinar la existencia y correlación de la mortandad forestal con los cambios en el régimen de precipitación.

Así mismo, usando métodos de percepción remota como una herramienta de integración, se pretende establecer si existe relación entre los valores de NDVI y precipitación, con las condiciones fisiográficas: tipo de suelo, roca, y la permeabilidad hidrogeológica; y geomorfológicas: pendiente, exposición, altitud e índice topográfico de humedad.

Por las condiciones de lomerío que predominan en la región de estudio, y la relación del flujo superficial con la pendiente, se propuso incluir el índice topográfico de humedad, que determinado por Beven & Kirkby (1979), establece a través de un índice a dimensional la acumulación y flujo de agua esperado, en relación con la pendiente de un área de captación, el cual ya ha sido documentado como un índice de valor para estudios ecológicos (Kopecký & Čížková, 2010).

## **2. Hipótesis y objetivos**

### **2.1 Hipótesis**

Los patrones multitemporales de mortandad o decaimiento forestal global en la Sierra de Santa Rosa, causados por los cambios en el régimen de precipitación, estarán relacionados con la fisiografía de cada sitio, suelo, roca, permeabilidad y geomorfología, características que pueden agravar o atenuar dicho proceso.

### **2.2 Objetivo general y específicos**

#### *2.2.1 Objetivo General:*

Detectar la relación multitemporal de la mortandad forestal global en la Sierra de Santa Rosa, con los cambios en el régimen de precipitación y las condiciones fisiográficas, y geomorfológicas, mediante índice espectral NDVI y la precipitación media anual correspondientes al periodo 1993 a 2017.

#### *2.2.2 Objetivos específicos:*

- a. Evaluar la distribución espacial y la tendencia temporal de la región forestal de la Sierra de Santa Rosa.
- b. Estimar los patrones espacio - temporales del proceso de mortandad o decaimiento forestal global, mediante imágenes satelitales y el índice de vegetación NDVI.
- c. Caracterizar, mediante sistemas de información geográfica, las características fisiográficas y geomorfológicas de la Sierra de Santa Sosa.
- d. Relacionar las tendencias del NDVI con la precipitación de forma global y por condición fisiográfica establecida.

### 3. Materiales y métodos

La metodología para el análisis espacial y multitemporal que se desarrolla en las página siguientes, integró cuatro grandes grupos de información (Figura 1), Precipitación y Escenas Satelitales (NDVI); así mismo, el contexto biofísico parte del Mapa base, y los muestreos en Campo.

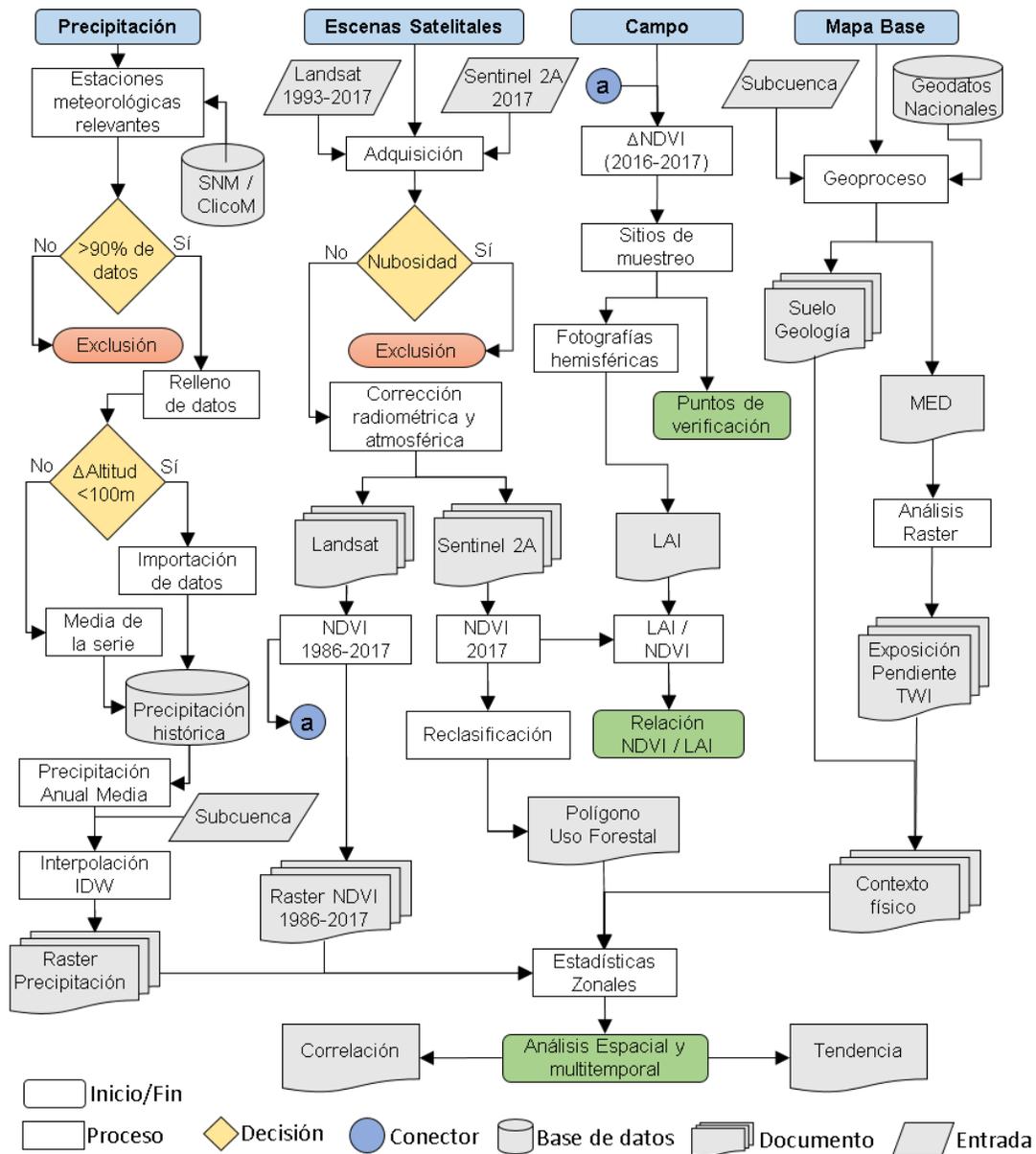


Figura 1. Metodología esquematizada como diagrama de flujo.

### 3.1 Sitio de estudio

#### 3.1.1 Localización

El sitio de estudio abarca el área forestal (8,960 ha) en la cabecera de la subcuenca Hernández Álvarez de la cuenca del Río Laja (INEGI, 2018), la cual comprende parte de los municipios de San Felipe (74 %) y Guanajuato (26 %), además de colindar con los municipios de Dolores Hidalgo y de León (Figura 3). El complejo es parte de la Sierra de Santa Rosa (Martínez *et al.*, 2009) y se ubica en las coordenadas extremas 21° 19' 17.34" N, 101° 71' 12.48" O y 21° 9' 20.34" N, 101° 18' 47.54" O.

El sitio de estudio, muestra un rango de precipitación media anual entre 519.1 a 834.8 mm (SMN, 2016), se presentan dos grupos climáticos; Semiseco templado y Templado subhúmedo (Figura 2). La región norte que es la más árida del tipo  $BS_{1kw}$ , y en dirección sur con un incremento de precipitación  $C(w_0)$ ,  $C(w_1)(w)$  y  $C(w_2)$  (INEGI, 2008). Así mismo, se presentan tres clases dominantes de suelo Luvisol, Regosol y Phaeozem, que permiten la infiltración (Peñuelas y Carrillo, 2012); tres clases de roca, Granodiorita, Riolita Toba-ácida y Arenisca-conglomerado, y dos características de permeabilidad, Baja a media y Media a alta (CONABIO, 2017).

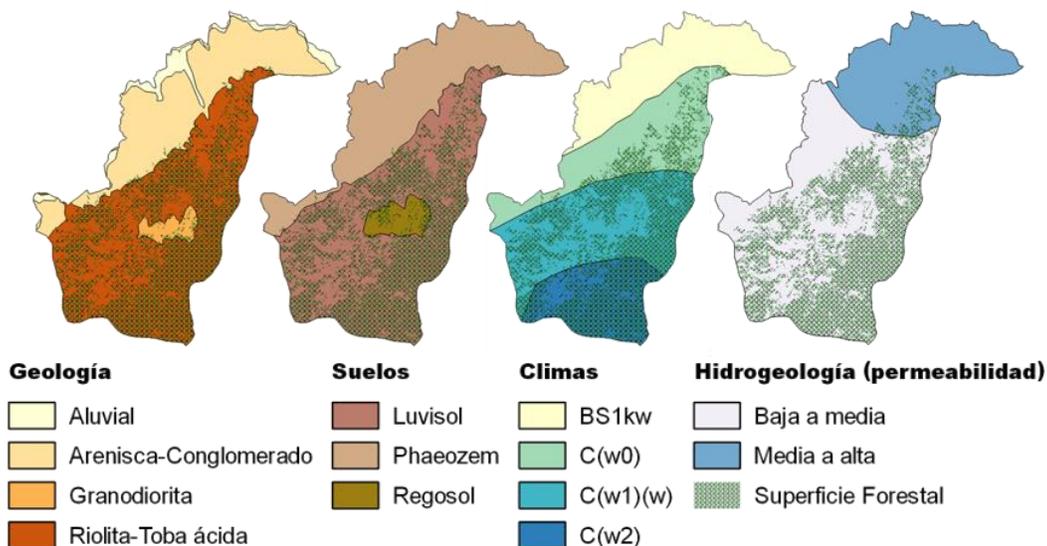


Figura 2. Características físicas de la subcuenca.

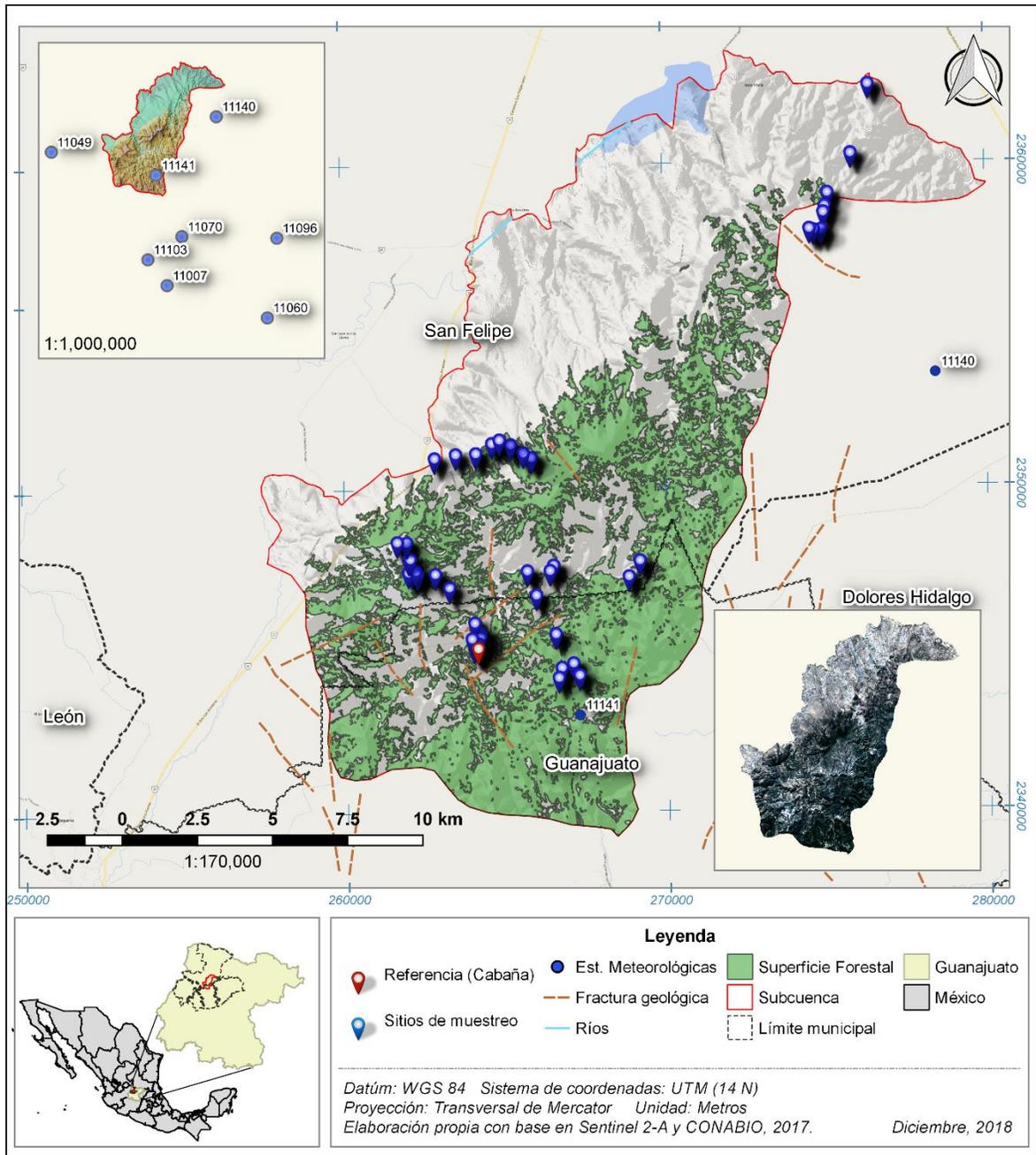


Figura 3. Mapa de localización del área de interés, zona forestal de la cabecera de la subcuenca Hernández Álvarez, Guanajuato, México.

### 3.1.2 Uso del suelo y vegetación

Las coberturas del suelo al interior de la cabecera de la subcuenca Hernández Álvarez (Figura 2), pueden agruparse en tres tipos, agrícola (18 %), pastizal (24 %) y bosque de encino (58 %) según la carta temática de Uso del suelo y vegetación de INEGI (2016). Sin embargo, el área forestal determinada mediante percepción remota, corresponde solo al 38 % del área total con 8,960 ha (Figura 6).

La Sierra de Santa Rosa, que abarca el área forestal de la subcuenca, es de relevancia ecológica al ser una de las pocas zonas medianamente conservadas del estado de Guanajuato, cuenta con especies endémicas que están en riesgo por la presión antrópica, principalmente la extracción de madera y la producción de carbón (Martínez & Téllez, 2004; Martínez *et al.*, 2009). Estudios florísticos describen la sierra como un bosque de *Quercus*, en cuya región oriental se presentan comunidades de matorral crasicaule y mezquital, además de bosque de *Pinus - Quercus* a mayor altitud (Martínez & Tellez, 2004).

El bosque de *Quercus* de esta región posee 14 especies de encino asociadas en cuatro grupos, con composición, estructura y rangos altitudinales particulares (Cuadro 1), destaca *Q. potosina - Q. castanea* como la más dominante, además de la presencia de 22 especies arbustivas y arbóreas, pertenecientes a géneros tales como *Ageratina*, *Arbutus*, *Comarostaphylis* y *Solanum*; y en particular las especies *Arctostaphylos pungens*, *Barkleyanthus salicifolius* y *Ageratina glabrata*, tolerantes a los suelos quemados para la producción de carbón (Martínez *et al.*, 2009).

Cuadro 1. Asociaciones del bosque de *Quercus* de la sierra de Santa Rosa.

Asociación	Rango altitudinal	Número de especies
<i>Quercus coccolobifolia</i>	2000 – 2600	13
<i>Q. laurina – Q. rugosa</i>	2600 – 2750	12
<i>Q. potosina – Q. castanea</i>	2300 – 2600	29
<i>Q. potosina – Q. eduardii</i>	2400 – 2500	17

Adatado de Martínez *et al.*, 2009

### 3.1.3 Fisiografía

La Sierra de Santa Rosa, se ubica en la subprovincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato (CONABIO, 2017), el cual es un complejo de sierras y valles intermontanos con orientación noroeste – sureste al interior-sur de la Mesa del Centro, colinda al sur con la Sierra de Guanajuato y el Eje Neovolcánico Transversal, presenta una importante falla de tipo normal, el graven Villa de Reyes (Figura 4), que se caracteriza por sus bordes aserrados (Aranda *et al.*, 1989; Martínez *et al.*, 2009).

La región, considerada como una meseta volcánica (Aranda *et al.*, 1989), posee características estratigráficas de rocas volcánicas y depósitos sedimentarios remanentes, que permiten la infiltración y la posterior recarga de acuíferos (Nieto *et al.*, 1992; Peñuelas & Carrillo, 2012; López & Tristán, 2013).

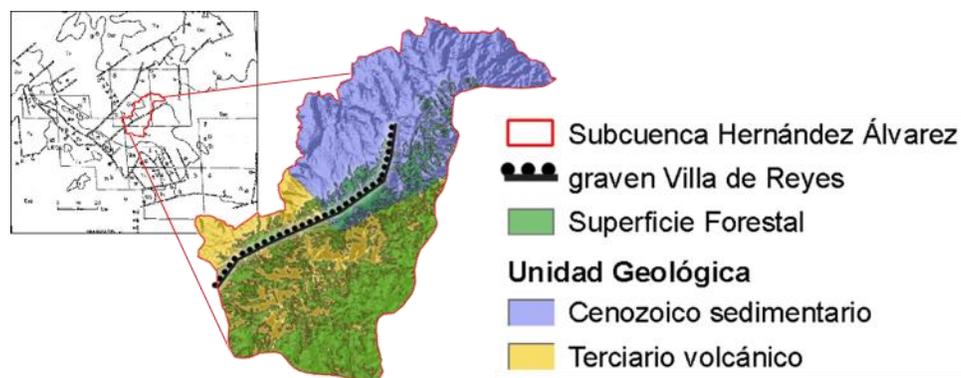


Figura 4. Esquema geológico de la sierra de Guanajuato y alrededores, adaptado de Nieto *et al.*, (1992).

## 3.2 Variables geomorfológicas

Las variables geomorfológicas, altitud, pendiente y exposición fueron determinadas a través del modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 15 m (INEGI, 2013) y uso del software QGIS 2.18. Además, se determinó el Índice topográfico de humedad (TWI) con el módulo GrassGIS; éstas variables pueden explicar el flujo superficial del agua sobre la topografía del sitio y por ello ser un factor importante en la estructura de la vegetación y la condición forestal (Kopecký & Čížková, 2010; Baguskas *et al.* 2014).

El TWI descrito por Beven & Kirkby (1979), estima de forma adimensional, la cantidad de agua que potencialmente se acumula en cada pixel, considerando la pendiente ( $>0^\circ$ ) y el área de captación específica (Cuadro 2); así a valores mayores de TWI indicarán un mayor flujo de agua superficial.

*Cuadro 2. Fórmula del índice topográfico de humedad (TWI).*

Parámetro	Descripción	Fórmula
$A_s$	Área de acumulación de flujo en la celda (pixel).	$TWI = \ln \frac{A_s}{\tan \beta}$
$\beta$	Pendiente de la celda (pixel).	

## 3.3 Precipitación

### 3.3.1 Obtención de valores de precipitación

Se realizó la consulta de las estaciones meteorológicas disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), obtenidas a través de su servidor web (SMN, 2016), y consideradas como de influencia a la zona de estudio, para lo cual se aplicaron los siguientes criterios con apoyo del software QGIS 2.18:

- Distancia menor a 50 km del área de estudio, establecido mediante un “buffer” al polígono del sitio de interés.
- Diferencia altitudinal menor a 100 m. El rango altitudinal del área de estudio, 2097 a 2960 m.s.n.m., se obtuvo mediante el modelo digital de elevación (MED) y una estadística de zona.

Una vez definidas las estaciones relevantes (Figura 3), los datos de precipitación mensual se adquirieron en el portal web Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM, 2018), en promedios mensuales por estación meteorológica para el periodo comprendido entre los años 1986 a 2015, que resultó el último año con registros disponibles. La calidad de la información en los registros se sostuvo mediante la exclusión de las estaciones que no cumplieran con los siguientes criterios:

- a. Congruencia de registro y ubicación. Se verificó la ubicación geográfica, comparando la información entre SMN, CLICOM y visualización en el sitio mediante el software Google Earth Pro 7.3, excluyendo las estaciones que presentaron una ubicación incorrecta respecto al nombre y municipio de registro, dado que se encontraron irregularidades entre portales y años de registro, 2014 y 2017.
- b. Integridad de datos. Estudios de precipitación en México, como el propuesto por Guajardo et al., (2017), evalúan la integridad lógica de los datos, de este modo, se descartaron las estaciones que presentaron irregularidades en las series de registros, tales como, valores importados de otras estaciones y largos periodos con precipitación nula (diferenciando entre “ND” y “0”).
- c. Años de registro. Con base en la metodología propuesta por el Atlas Climático Digital de México (Fernández *et al.*, 2016), se descartaron las estaciones con menos del 90% de registros para todo el periodo de estudio.

### *3.3.2 Series con datos faltantes*

Para el cálculo de la precipitación anual de cada estación meteorológica, los datos de las series mensuales incompletas se determinaron como el promedio de los 10 años anteriores para el mismo mes faltante, en caso de no contar con los 10 años disponibles, el valor fue importado de la estación más equivalente para ese mismo mes y año. Se determinó como estación más equivalente aquella con una diferencia de altitud menor a 100 m y una lejanía no mayor a 50 km de la estación en análisis.

Con base en el criterio anterior se trataron los datos faltantes, excepto las series correspondientes a la estación 11049 en cuyo año 1995 los meses faltantes se promediaron con nueve años de valores anteriores y no diez. Así mismo, los datos faltantes de la estación 11103 fueron importados de la estación 11094 dada la forma de microcuenca en la que ambas se encuentran. Una vez obtenidas las series completas para cada año y estación, se calculó la precipitación anual, mensual media del periodo y anual media de toda la región por año de registro.

### *3.3.3 Mapa de precipitación*

La elaboración de los mapas de precipitación se realizó con ayuda del software QGIS 3.4, mediante el módulo de interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada), incorporando las coordenadas y valores de precipitación anual de cada estación meteorológica representativa. El Raster resultante se ajustó a la extensión y resolución del MED, para así obtener píxeles equivalentes a 15 metros de resolución espacial. La interpolación IDW considera las distancias de los valores conocidos a la superficie interpolada, asume una alta correlación espacial, y como es el caso, se recomienda cuando se cuenta con pocos, y muy dispersos valores conocidos (Kravchenko, 2003).

### *3.3.3 Precipitación e imágenes satelitales*

Si bien, la determinación de índices de vegetación como el NDVI tiene la ventaja de minimizar el ruido que genera la nubosidad en las escenas satelitales, es de relevancia su consideración, para procurar la calidad de la información (Huete *et al.*, 2004). Por ello, para evitar en lo posible la presencia de nubosidad y con finalidad comparativa entre periodos de precipitación, se establecieron dos ventanas de búsqueda de las escenas satelitales, febrero-abril como fin del periodo de secas y septiembre-octubre como fin del periodo de lluvias (Figura 5).

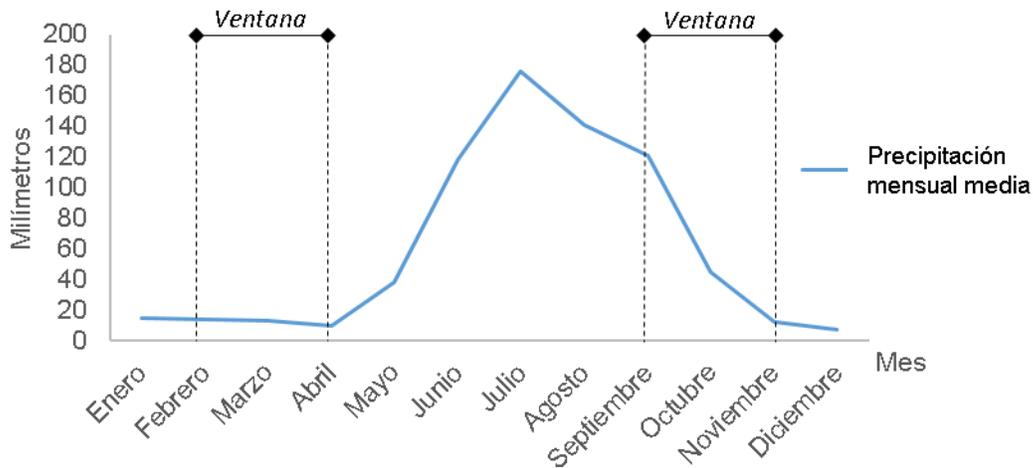


Figura 5. Precipitación mensual media para el periodo 1986 – 2015 y ventanas temporales para la búsqueda de escenas satelitales.

### 3.4 Análisis de imágenes satelitales

#### 3.4.1 Obtención de imágenes y pre-procesamiento

La obtención de las escenas satelitales Landsat para el análisis multitemporal del NDVI se realizó con la búsqueda y descarga de escenas, para las ventanas temporales establecidas, en el portal web EarthExplorer del United States Geological Survey (USGS, 2018) mediante el “path/row” 028045. Se seleccionaron las escenas que cumplieron con nula nubosidad en la zona de interés, procesamiento TP (terrain correction) e información “Tier 1”, que corresponde a las características de mayor calidad (USGS, 2017).

Para realizar el análisis comparativo entre las ventanas temporales, secas y lluvias, solo se contemplaron las fechas que tuvieron su equivalente en ambos periodos (Cuadro 3), descartando así el periodo 1986 a 1992 y 14 años intermedios.

Cuadro 3. Escenas LadSat utilizadas para el estudio.

Año	Secas		Lluvias	
	Mes	Sensor*	Mes	Sensor*
1993	Marzo	LT05	Noviembre	LT05
1995	Marzo	LT05	Octubre	LT05
1997	Marzo	LT05	Septiembre	LT05
2000	Marzo	LE07	Noviembre	LT05
2004	Marzo	LE07	Octubre	LE07
2006	Marzo	LE07	Octubre	LE07
2008	Marzo	LE07	Octubre	LE07
2011	Marzo	LE07	Septiembre	LE07
2014	Marzo	LC08	Octubre	LC08
2016	Marzo	LC08	Noviembre	LC08
2017	Marzo	LE07	Noviembre	LC08

\*LT05 = Landsat 05 TM, LE07 = Landsat 07 ETM, LC08 = Landsat 08 OLI

El pre-procesamiento de las escenas satelitales Landsat consistió en la obtención de los valores de reflectancia superficial de cada banda, para cada una de las escenas adquiridas (Cuadro 3). Se utilizó la metodología propuesta por Chander *et al.*, (2009) para las escenas de los sensores Landsat 05 (Thematic Mapper) y Landsat 07 (Enhanced Thematic Mapper); y la metodología descrita por Ariza (2013) para el sensor Landsat 08 (Operational Land Imager); posteriormente la corrección atmosférica se realizó por el método de Substracción de Objetos Oscuros (Chávez, 1988), todo el pre-procesamiento de escenas Landsat se realizó mediante rutinas en el software MatLab 8.5 (MatLab, 2015).

El área de interés se determinó como la superficie forestal dentro de la subcuenca (Figura 3), esta superficie se obtuvo de la clasificación semisupervisada de las escenas proporcionadas por el satélite Sentinel-2 que posee mayor resolución espacial (10 m) en comparación con Landsat (30 m). Las escenas Sentinel fueron obtenidas del portal web Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2018) para el año 2017, que cumplieran con nula nubosidad en la zona de interés y de características 2-A. La corrección radiométrica para la obtención de la reflectancia superficial se realizó mediante el módulo Sen2Core del software SNAP (ESA, 2017).

### 3.4.2 Índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI)

El índice de vegetación NDVI, desarrollado por Tucker (1979), permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, consiste en la relación de las bandas roja (R) e infrarroja cercano (NIR) dada por la fórmula:

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

Previo al cálculo del índice NDVI, se realizó el ajuste de brillo para las bandas de los satélites Landsat 5, 7 y 8, que consiste en igualar las medias de los histogramas con el fin de hacerlas comparativas (Cuadro 4), mediante rutinas en el software MatLab 8.5. Las escenas satelitales para las bandas de referencia fueron las más antiguas, con fecha marzo 24 de 1993 para el periodo de secas, y noviembre 11 de 1993 para el periodo de lluvias.

*Cuadro 4. Fórmula de ajuste de brillo para bandas de escenas satelitales Landsat*

Parámetro	Descripción	Fórmula
$e'_{n+1}$	Banda con brillo ajustado	$e'_{n+1} = e_{n+1} \left( \frac{Me_{n+1}}{Me_1} \right)$
$e_{n+1}$	Banda sin brillo ajustado	
$Me_{n+1}$	Valor medio de la banda a ajustar	
$Me_1$	Valor medio de la banda de referencia	

El ajuste de brillo se realizó en dos series:

- Todas las escenas de ambos periodos se ajustaron a marzo del 1993 para las comparaciones mediante el NDVI Compuesto, que es el promedio intra-anual, y el NDVI Global medio obtenido con el promedio inter-anual de los NDVI Compuestos.
- Ajuste según su periodo; escenas de periodo de secas ajustadas a marzo 24 de 1993 y escenas de periodo de lluvias ajustadas a noviembre 11 de 1993, con la finalidad de obtener los valores de Anomalía NDVI en toda la serie temporal por periodo.

La Anomalía NDVI, consiste en un factor que muestra la fluctuación del valor de análisis en relación con la media global, dividiendo la distancia del valor a la media entre la desviación estándar del periodo (Wilks, 1995). Los valores positivos representan condiciones de la vegetación por encima de la media, negativos condiciones por debajo y los valores próximos a cero una nula fluctuación. Los valores en el cambio del verdor de masas forestales han sido ampliamente utilizados en la evaluación de la mortandad forestal (Breshears *et al.*, 2005; Sofue *et al.*, 2017). La anomalía se determinó para el periodo de estudio 1993 – 2017, por periodo secas y lluvias (Figura 11), mediante la fórmula:

$$\Delta NDVI = \frac{NDVI - \overline{NDVI}_{1993-2017}}{\sigma_{1993-2017}}$$

### 3.4.3 Determinación de la cobertura forestal

El área de estudio que corresponde a la región forestal dentro de la subcuenca, se determinó mediante una reclasificación del NDVI Compuesto (media anual) del año 2017, generado con las escenas Sentinel 2-A, enero 10 y 30, marzo 1° y 24, abril 30, octubre 27 y noviembre 16. Los rangos de reclasificación se determinaron con puntos de validación *ex situ* a través del software GoogleEarth Pro 7.3 y la composición RGB (Rojo-Verde-Azul) de la última escena, estableciendo como cubierta forestal valores > 0.63 del NDVI Compuesto.

Realizada la reclasificación, se aplicó un filtro (3x3) para suavizar el Raster y eliminar píxeles aislados; posterior a su vectorización se eliminaron las áreas menores a 1 hectárea, así como las correspondientes a parches de vegetación en áreas agrícolas y urbanas. La cobertura final en formato vectorial (.shp), se comparó con los mapas temáticos de Uso de Suelo y Vegetación, series I a VI (COANBIO, 2017), siendo la serie VI la más actual (2014) y equivalente. Sin embargo, por las áreas de suelo desnudo al interior, el polígono de elaboración propia se eligió como final para el área de estudio (Figura 6).

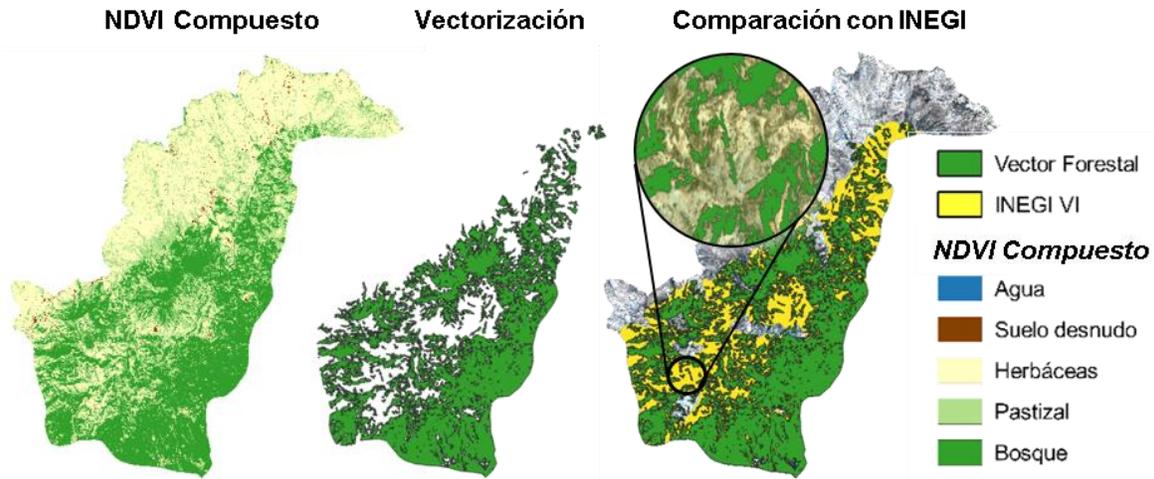


Figura 6. Vectorización de clase Bosque y comparación con el mapa temático Uso de suelo y vegetación, serie IV de INEGI (2016).

### 3.6 Sitios de muestreo y verificación

Dentro del área de interés (vector forestal), se establecieron los puntos de muestreo y verificación (Figura 3), definidos como los valores más negativos de la Anomalía NDVI calculada para los años 2011 y 2016, seleccionando sitios que cubrieran los diferentes tipos de suelo y geología presentes. De este modo, se realizaron 47 sitios (Anexo 1), visitados entre de julio y septiembre del 2018, cubriendo tres tipos de suelo y geología; en cada uno se registró la ubicación y altitud mediante GPS (Etrex 10 Garmin), tipo de cobertura y de ser el caso, presencia de plagas forestales.

En los 26 sitios con cobertura forestal se realizaron fotografías hemisféricas del dosel (Anexo 2), utilizando una cámara equipada con lente “ojo de pez” (Nikon Coolpix 855) para la determinación del Índice de Área Foliar (LAI) mediante el uso del software Gap Light Analyzer v.2. La cámara fue colocada, para todos los sitios, a una distancia de 70 cm del suelo con ayuda de un trípode y nivelando el lente con apoyo de un nivel de burbuja (Figura 7). Las capturas se realizaron con orientación geográfica norte, y procurando un cielo parcialmente nublado para garantizar el mejor contraste sin reflejos de sol (Frazer, Canham & Lertzman, 1999).



*Figura 7. Recolección de datos para los sitios de muestreo, fotografía del dosel (A), procesamiento de fotografías hemisféricas (B) y evidencia de plagas forestales (c).*

### **3.5 Análisis estadístico**

Los valores utilizados para las pruebas estadísticas se obtuvieron para cada Raster, por área total y combinación de tipo (Cuadro 10) mediante el complemento “Estadísticas de Zona” del software QGIS 2.18, el cual hace un conteo de los pixeles contenidos en un determinado polígono, obteniendo la suma, media, desviación estándar, valor mínimo y máximo del conjunto de pixeles.

Además, se generaron un total de 657 puntos aleatorios, repartidos en grupos de 50 para cada tipo de combinación, excepto la menor “P-RT-MA” con sólo siete y la mayor “L-RT-BM” con 200 (50 para cada cuartil del rango de altitud). Para cada uno de los puntos aleatorios, se extrajo el valor del pixel en esa ubicación de cada raster de las variables geomorfológicas, Altitud, Exposición, Pendiente, TWI, y los raster con los valores de NDVI Compuesto y Anomalía, y Precipitación Anual Media.

Todas las pruebas estadísticas se realizaron en el software R Studio V. 1.1.463 (R, 2018), obteniendo:

- a. Regresiones lineales. Se evaluó el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y el valor de significancia  $p$  ( $\alpha = 0.05$ ) para determinar la relación entre los parámetros NDVI (Estacional, Compuesto y Anomalía) respecto a las variables geomorfológicas, precipitación anual e índice de área foliar.
- b. Análisis de tendencia no paramétrica. Se utilizó el índice Mann-Kendall (Phlert, 2018) con valor de significancia  $p$  ( $\alpha = 0.05$ ), para determinar la tendencia, y el índice de pendiente de Sen (Sen, 1968) para estimar la pendiente en las series temporales de NDVI (Estacional, Compuesto y Anomalía) y precipitación.

La prueba de tendencia índice Mann-Kendall, una de las pruebas no paramétricas más ampliamente utilizadas para detectar tendencias significativas en series de tiempo, es una función de los rangos de las observaciones en lugar de los valores reales, no se ve afectada por la distribución real de los datos, es menos sensible a valores atípicos y más robusta a la autocorrelación, condiciones que la favorecen para la detección de tendencias significativas (Hamed, 2008; Zhang *et al.*, 2019). Su cálculo considera las relaciones entre emparejamientos posibles de los pares de datos,  $x_i y_i$ , de los cuales hay  $n(n-1)/2$  para una muestra de tamaño  $n$ , evaluando pares concordantes y discordantes (Wiks, 2006), así mismo, calcula el coeficiente  $K_T$  (tau de Kendall) con el que se obtiene la pendiente de Sen (Sen, 1968). Ambas pruebas no paramétricas se han utilizado tanto en la evaluación de variables hidrológicas como de índices de vegetación y mortandad forestal (Cavazos *et al.*, 2008; Gustafson & Sturtevant, 2013; Alemu *et al.*, 2015).

## 4. Resultados

### 4.1 Análisis global de la superficie forestal

#### 4.1.1 Análisis global de precipitación

Como resultado de los criterios anteriormente establecidos para la búsqueda de estaciones meteorológicas relevantes, y la calidad de datos a través de su congruencia, integridad y años de registro, sólo se consideraron ocho de las 28 estaciones presentes en el área de influencia en la zona de estudio (Cuadro 5), de este modo, la precipitación media anual para la serie de tiempo de 1986 a 2015 establece un gradiente entre los 550.8 a 892.6 mm (Cuadro 6).

Con los datos de precipitación anual por estación y la interpolación IDW, se corrobora que la región más húmeda según el mapa de climas (Figura 2), corresponde al Sureste de la subcuenca (Figura 8), que además presenta las mayores elevaciones altitudinales. Sin embargo, con un índice de determinación  $r^2 = 0.32$  y significancia  $p > 0.01$  para la relación precipitación y altitud, queda claro que la relación es más compleja.

*Cuadro 5. Estaciones meteorológicas consideradas para el área de estudio.*

Código	Periodo de registro	Porcentaje de datos	Ubicación		Altitud	Municipio
			Latitud N	Longitud W		
11007	1967 - 2016	98.1	20.991667	-101.222222	2354	Guanajuato
11049	1962 - 2016	97.9	21.211111	-101.425833	2347	León
11060	1937 - 2016	94.4	20.938611	-101.045556	2059	Salvatierra
11070	1954 - 2016	97.5	21.072222	-101.196111	2552	Guanajuato
11096	1941 - 2016	92.4	21.069722	-101.028889	2239	Salamanca
11103	1973 - 2016	96.3	21.034167	-101.255833	2147	Guanajuato
11140	1997 - 2016	97	21.269444	-101.135556	2115	San Felipe
11141	1979 - 2016	97.7	21.173333	-101.241667	2473	Guanajuato

Cuadro 6. Valores calculados de precipitación anual.

Estación	Precipitación Anual						Precipitación Media Anual	
	1986	1987	1988	»»	2013	2014		2015
11007	834.3	474.8	696.9		900.5	945.1	1018.9	765.8
11049	715.8	578.9	615		744.6	846.3	992.1	667.6
11060	701.9	544.5	615.7		783.2	527.4	718	691.3
11070	652.4	500.3	569.9		853.2	432.2	1137.2	665.9
11096	743.2	662	622.2		946.7	713.7	964.2	727.7
11103	739.8	614.6	657.7		769.8	801	959.8	732.9
11140	568.7	419.7	515.1		747.2	651.8	791	550.8
11141	1102.1	774.4	757.7		1756.2	985.2	1264.7	892.6
<i>Media Anual</i>	757.2	571.1	631.2		937.6	737.8	980.7	

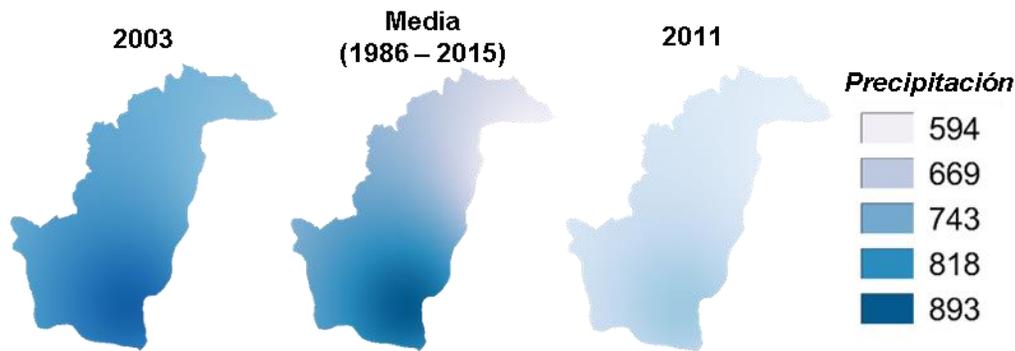


Figura 8. Mapa de precipitación para los años 2003 y 2011, de los más húmedos y secos respectivamente; y precipitación anual media para el periodo 1986 a 2015.

Los resultados de la interpolación IDW, así como los valores de precipitación tomados directamente de las estaciones meteorológicas del SMN (2016), mostraron una desviación estándar, la cual equivale a más de la quinta parte respecto a la media, así como coeficientes de determinación  $r^2$  muy bajos (Figura 9), por lo que además se evaluó el índice de tendencia de Mann-Kendall, para tres series de datos de precipitación, arrojando tendencias positivas pero no representativas (Cuadro 7).

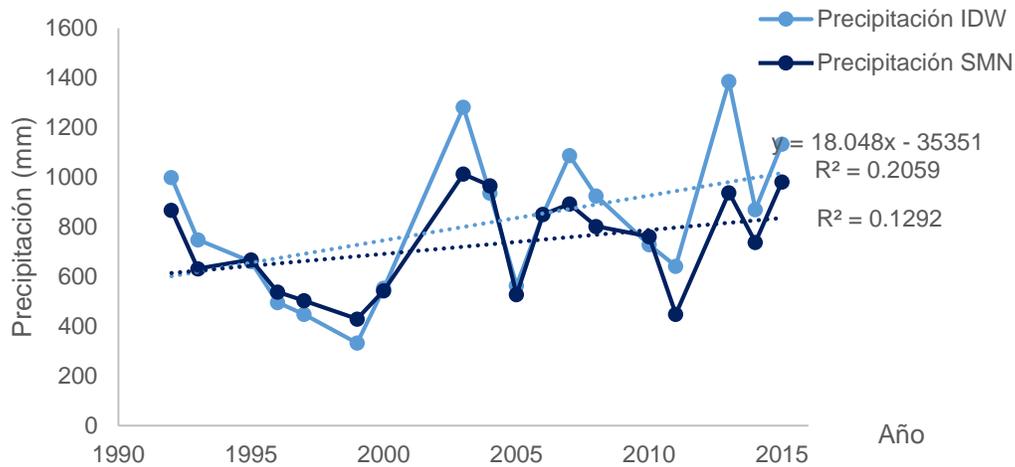


Figura 9. Precipitación anual de la subcuenca para el periodo 1992 – 2015, calculada por interpolación IDW y puntual de las estaciones meteorológicas del SMN (2016).

Cuadro 7. Resultados de la prueba de tendencia Mann-Kendall para las series de precipitación.

Series de Precipitación		Coeficientes de Mann-Kendall		
Datos	Periodo	Z	Sen's Slope	p ( $\alpha = 0.05$ )
Puntuales del SMN	1986 - 2015	1.2132	4.6312	0.2251
Puntuales del SMN	1992 - 2015	0.8331	11.31	0.4047
Interpolación IDW	1992 - 2015	1.4394	23.26	0.1501

Z= estadístico, determina si existe o no pendiente, y su signo (>0, + ; <0, -)

Sen's Slope= prueba no paramétrica para la tasa de cambio o pendiente

p= nivel de significancia estadística

#### 4.1.2 Análisis global de NDVI

La obtención de los valores de NDVI, requirió del preprocesamiento de las 22 escenas satelitales (Cuadro 3), con lo cual además de la corrección y calibración, se mejora la interpretación visual (Figura 10). Una vez realizado el preprocesamiento, se determinó el NDVI por temporada de secas y lluvias, y su anomalía (Figura 11), además del NDVI Compuesto anual resultado de la media del NDVI de secas y lluvias por año (Figura 12), y la anomalía de cada NDVI Compuesto Anual.

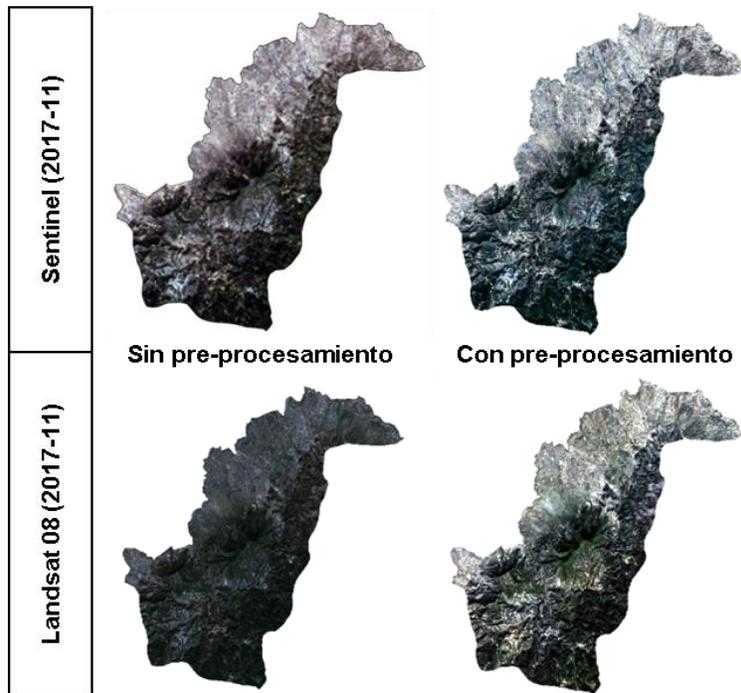


Figura 10. Comparativa entre escenas satelitales de noviembre del 2017, Sentinel 2-A y Landsat 08, al realizar el pre-procesamiento.

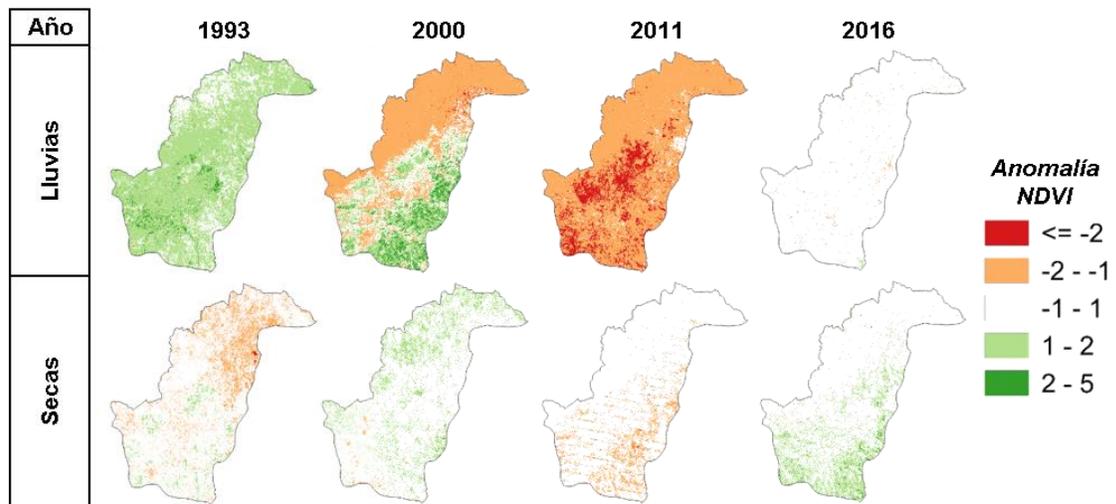


Figura 11. Ejemplo de las Anomalia NDVI para la serie de tiempo 1993 a 2016 por periodo, secas y lluvias.

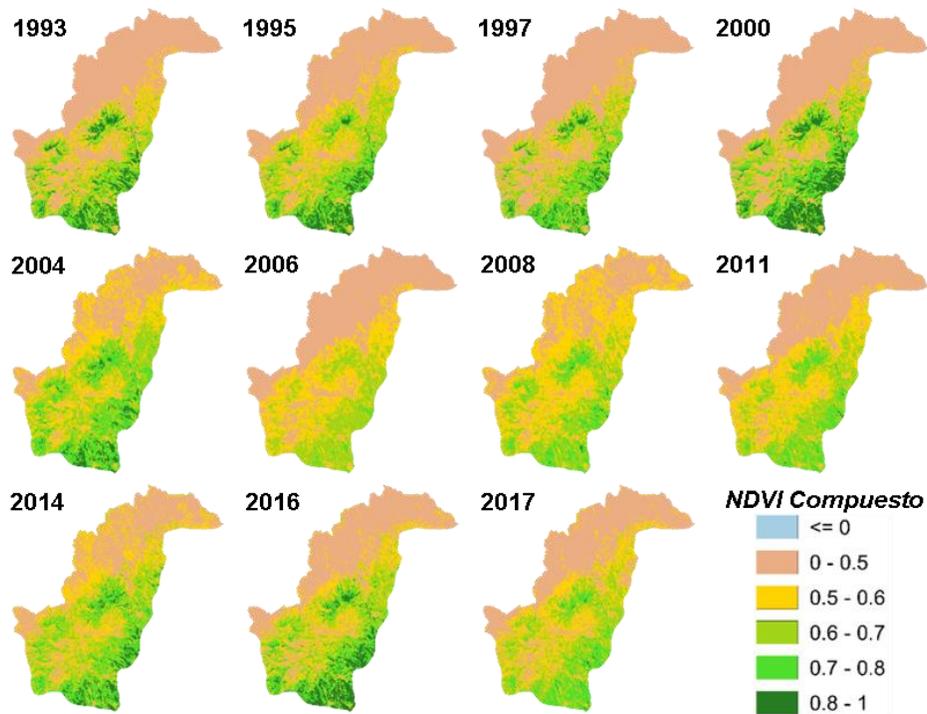


Figura 12. Serie temporal del NDVI Compuesto (media de secas y lluvias por año). Como se explicó anteriormente, para determinar el área forestal de la subcuenca, se utilizó el NDVI Compuesto de las escenas Sentinel 2A (Figura 13), para su incorporación en las categorías por tipo (Cuadro 10) y comparación con cartas de uso del suelo y vegetación (INEGI, 2016).

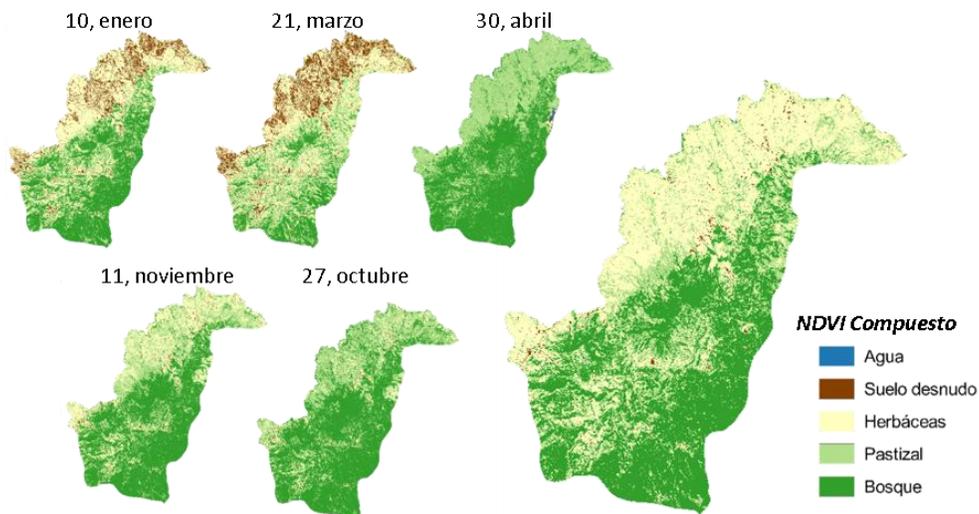


Figura 13. NDVI Compuesto para el año 2017 con escenas Sentinel 2-A, obtenido de la media de cinco fechas intermedias.

Con la finalidad de conocer si existía tendencia en el comportamiento de los valores globales de NDVI respecto a la serie temporal 1992 – 2017, y dados los bajos coeficientes de determinación (Figura 14), se realizaron las pruebas de tendencia de Mann-Kendall para los cuatro parámetros de NDVI, Compuesto y tres anomalías, Secas, Lluvias y anomalía del Compuesto. Si bien las pruebas de tendencia mostraron una dirección decreciente a excepción de Anomalía de Secas, todas ellas con pendientes muy bajas y estadísticamente no significativas (Cuadro 8).

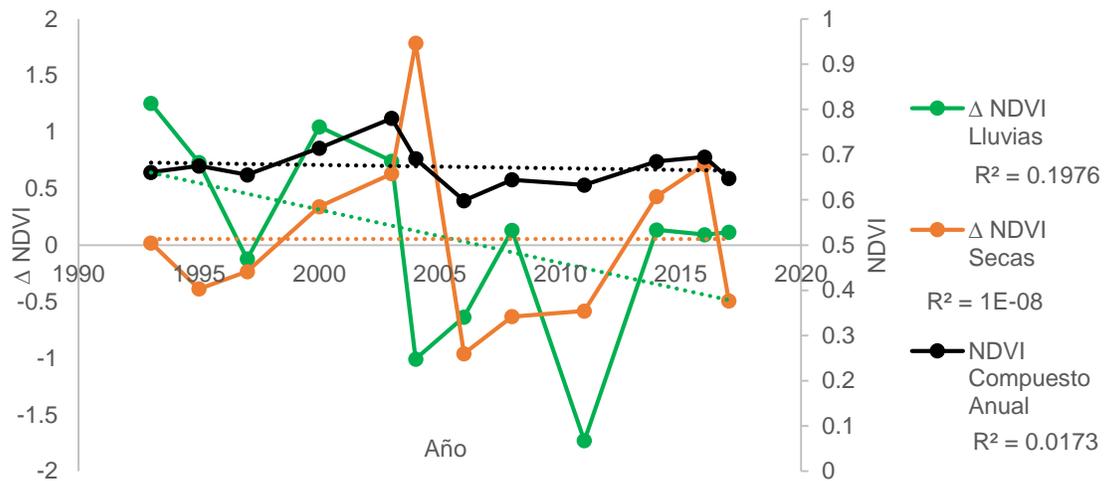


Figura 14. Serie histórica del comportamiento de valores NDVI, compuesto y anomalías ( $\Delta$ ) para los periodos de lluvias y secas.

Cuadro 8. Resultados de la prueba de tendencia Mann-Kendall para los valores globales de NDVI de la serie de tiempo 1992 - 2017

Serie NDVI	Coeficientes de Mann-Kendall		
	Z	Sen's Slope	$p$ ( $\alpha = 0.05$ )
NDVI Compuesto	-0.34286	-0.1843	0.731
Anomalía de NDVI Compuesto	-0.48001	-0.0212	0.631
Anomalía de NDVI Lluvias	-1.44	-0.1059	0.149
Anomalía de NDVI Secas	0.20572	0.0225	0.837

Z= estadístico, determina si existe y su signo (>0, + ; <0, -)

Sen's Slope= prueba no paramétrica para la tasa de cambio o pendiente

$p$ = nivel de significancia estadística

### 4.1.3 Relación global NDVI y precipitación

De forma exclusiva, se estudió la relación del NDVI Compuesto con la precipitación media anual sólo de la superficie forestal (Figura 15), considerando el periodo 1992 – 2015. Si bien se mostró una correlación baja,  $r^2$  de 0.21 y  $p < 0.01$  (Figura 16), el resultado es el esperado, la precipitación y NDVI son factores directamente proporcionales.

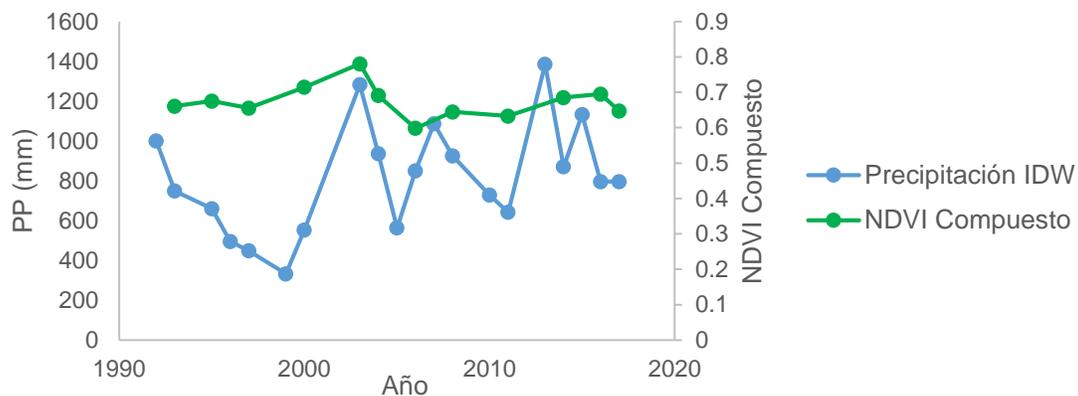


Figura 15. Comportamiento histórico del NDVI Compuesto y la precipitación media anual (PP).

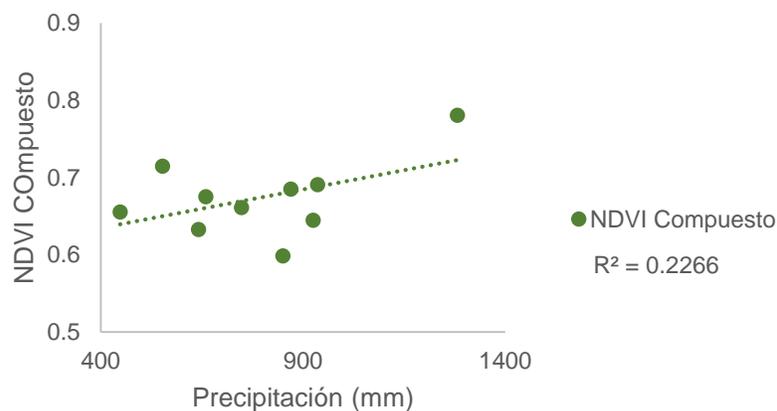


Figura 16. Relación del NDVI compuesto con la precipitación.

El análisis por estación de las anomalías NDVI de lluvias y secas (Figura 17), mostró una relación respecto a la precipitación mensual, positiva para la estación de secas y negativa para la estación de lluvias (Figura 18).

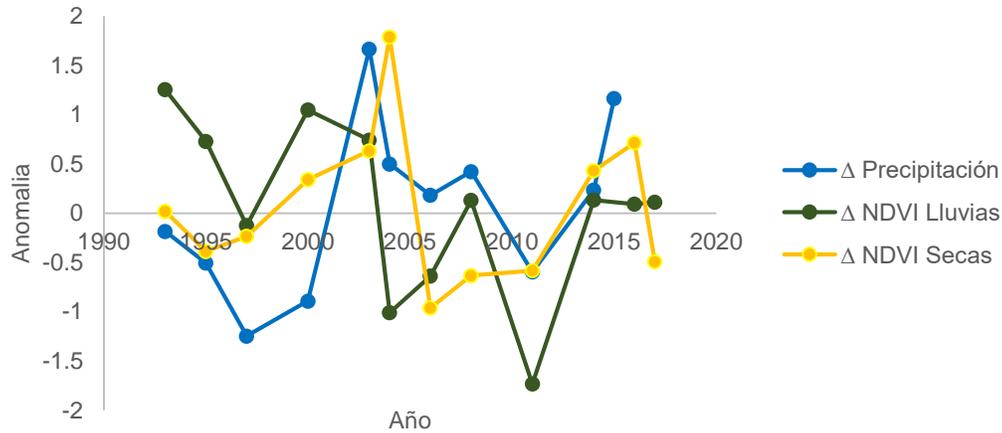


Figura 17. Valores de las anomalías NDVI por estación, secas y lluvias; y de precipitación para todo el periodo de estudio.

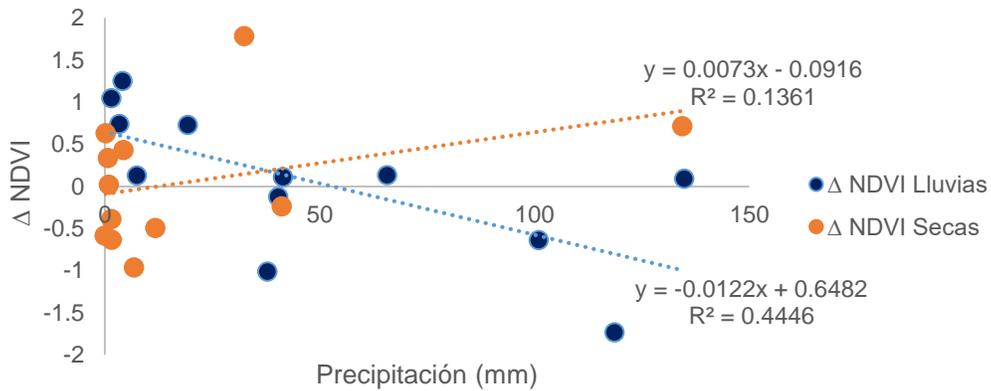


Figura 18. Relación de las Anomalías NDVI, secas y lluvias, con la precipitación mensual.

Los valores de precipitación corresponden al mismo mes y año de cada valor calculado de anomalía NDVI.

#### 4.1.4 Relación NDVI e índice de área foliar (LAI)

De las 26 fotografías hemisféricas (Anexo 1), seis se descartaron por no ser representativas del sitio de interés, por ejemplo, relictos de baja densidad de árboles y plantaciones de especies exóticas (Figura 19). El índice de área foliar (LAI) de las 20 fotografías restantes, no mostró una relación significativa con la precipitación y el valor de NDVI determinado para el sitio en la fecha de la escena satelital más próxima (Figura 20), con un valor  $p$  de 0.4627 y 0.9209, respectivamente.



Figura 19. Sitios de fotografías hemisféricas excluidos por ser no representativos, relicto de muy baja densidad (A) y plantación de eucalipto (B).

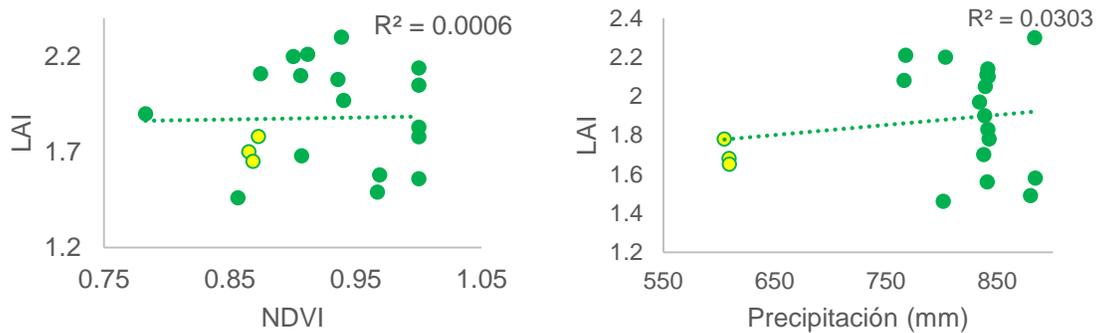


Figura 20. Relación del índice de área foliar (LAI) con el NDVI y la precipitación, valores en amarillo corresponden a los sitios más secos.

#### 4.1.5 Variables geomorfológicas

Resultado del procesamiento del modelo de elevación digital (MED), se obtuvieron cuatro variables relacionadas con la geomorfología de la subcuenca, Altitud, Pendiente, índice topográfico de humead (TWI) y Exposición (Figura 21, Figura 22). Mediante el muestreo de 657 puntos distribuidos aleatoriamente, se analizó la relación de la precipitación media anual de la serie, Anomalía NDVI del año 2017 y el NDVI Compuesto Medio (raster promedio de las 12 escenas de NDVI Compuesto Anual) con las variables geomorfológicas.

Los resultados de los coeficientes de determinación y de los valores de probabilidad estadística  $p$  ( $\alpha=0.05$ ), mostraron que sólo existe correlación entre los valores de NDVI con la altitud, que puede explicarse por la igual relación positiva entre altitud y precipitación, sin embargo, los valores de correlación de NDVI son mayores con la altitud (Cuadro 9).

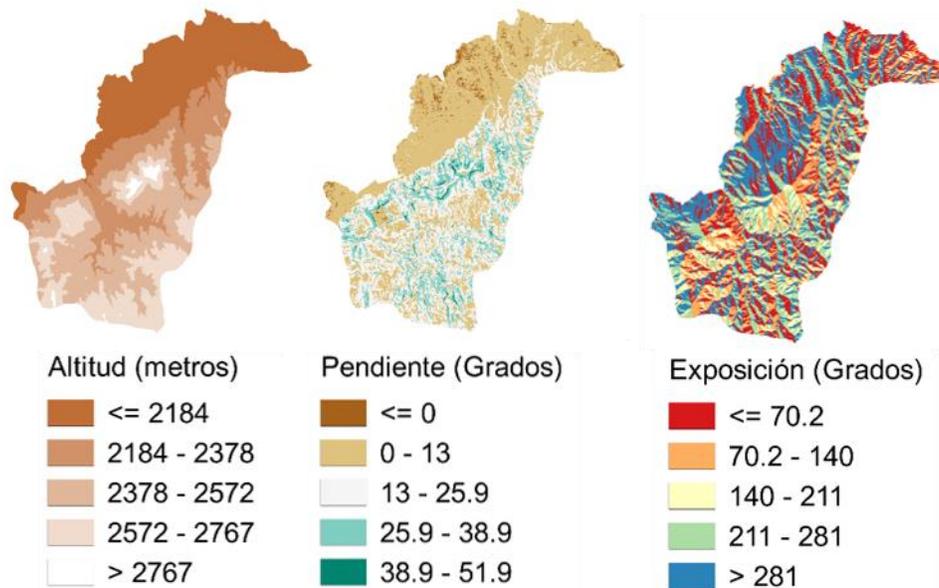


Figura 21. Variables geomorfológicas.

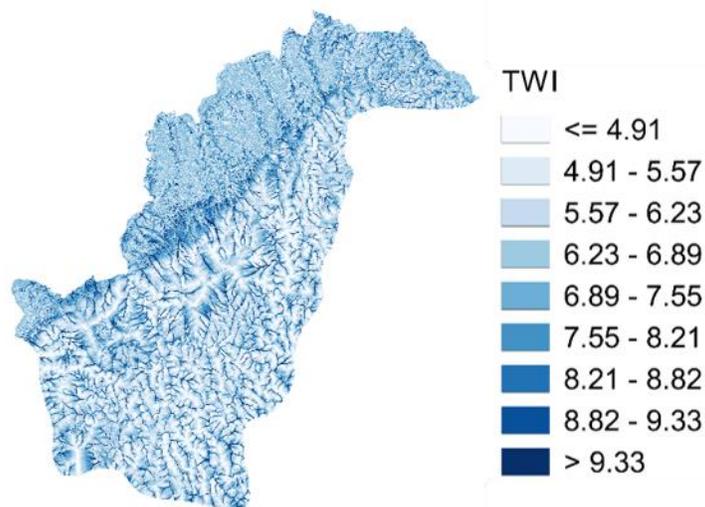


Figura 22. Índice topográfico de humedad (TWI).

Cuadro 9. Correlación entre variables geomorfológicas con Anomalía NDVI del año 2017 y NDVI Compuesto Medio.

Variables	$\Delta$ NDVI 2017		Altitud		NDVI Compuesto Medio	
	$r^2$	$p$	$r^2$	$p$	$r^2$	$P$
Altitud	<b>0.2266</b>	<0.01	-	<0.01	<b>0.5598</b>	<0.01
TWI	0.0299	<0.01	0.0345	<0.01	0.0242	<0.01
Precipitación IDW*	<b>0.1178</b>	<0.01	<b>0.3294</b>	<0.01	<b>0.2293</b>	<0.01
Aspecto	0.0037	0.11	0.0067	0.036	0.0365	<0.01
Pendiente	0.0029	0.16	0.0754	<0.01	0.0497	<0.01

\*valores de precipitación anual obtenidos por interpolación IDW (Inverse distance weighting)

## 4.2 Análisis por categorías

### 4.2.1 Categorías por tipo de capas vectoriales

De la intersección de las capas vectoriales, tipo de suelo, tipo de roca e hidrogeología, y delimitadas por el polígono de superficie forestal (Figura 2), se obtuvieron once categorías o combinaciones (Cuadro 10, Anexo 3). Cabe resaltar que el tipo “L-RT-BM” abarca el 90% de la superficie total del área forestal, por lo que no fue factible la comparación directa entre los valores de NDVI de cada categoría (Figura 23).

Cuadro 10. Polígonos generados de combinar suelo, geología e hidrogeología dentro del área forestal de interés.

Suelo	Geología	Hidrogeología (Permeabilidad)	Código	Área (ha)	Altitud Media
Luvisol	Riolita-Toba ácida	Baja a media	L-RT-BM	8,117.69	2538
Luvisol	Riolita-Toba ácida	Media a alta	L-RT-MA	364.28	2251
Luvisol	Granodiorita	Baja a media	L-G-BM	63.16	2358
Luvisol	Arenisca-Conglomerado	Baja a media	L-AC-BM	62.11	2311
Luvisol	Arenisca-Conglomerado	Media a alta	L-AC-MA	25.17	2170
Regosol	Riolita-Toba ácida	Baja a media	R-RT-BM	200.65	2424
Regosol	Granodiorita	Baja a media	R-G-BM	89.50	2373
Phaeozem	Riolita-Toba ácida	Baja a media	P-TA-BM	5.16	2310
Phaeozem	Riolita-Toba ácida	Media a alta	P-RT-MA	0.46	2141
Phaeozem	Arenisca-Conglomerado	Baja a media	P-AC-BM	25.11	2264
Phaeozem	Arenisca-Conglomerado	Media a alta	P-AC-MA	7.53	2126

Categorías determinadas de las capas vectoriales de CONABIO, 2017

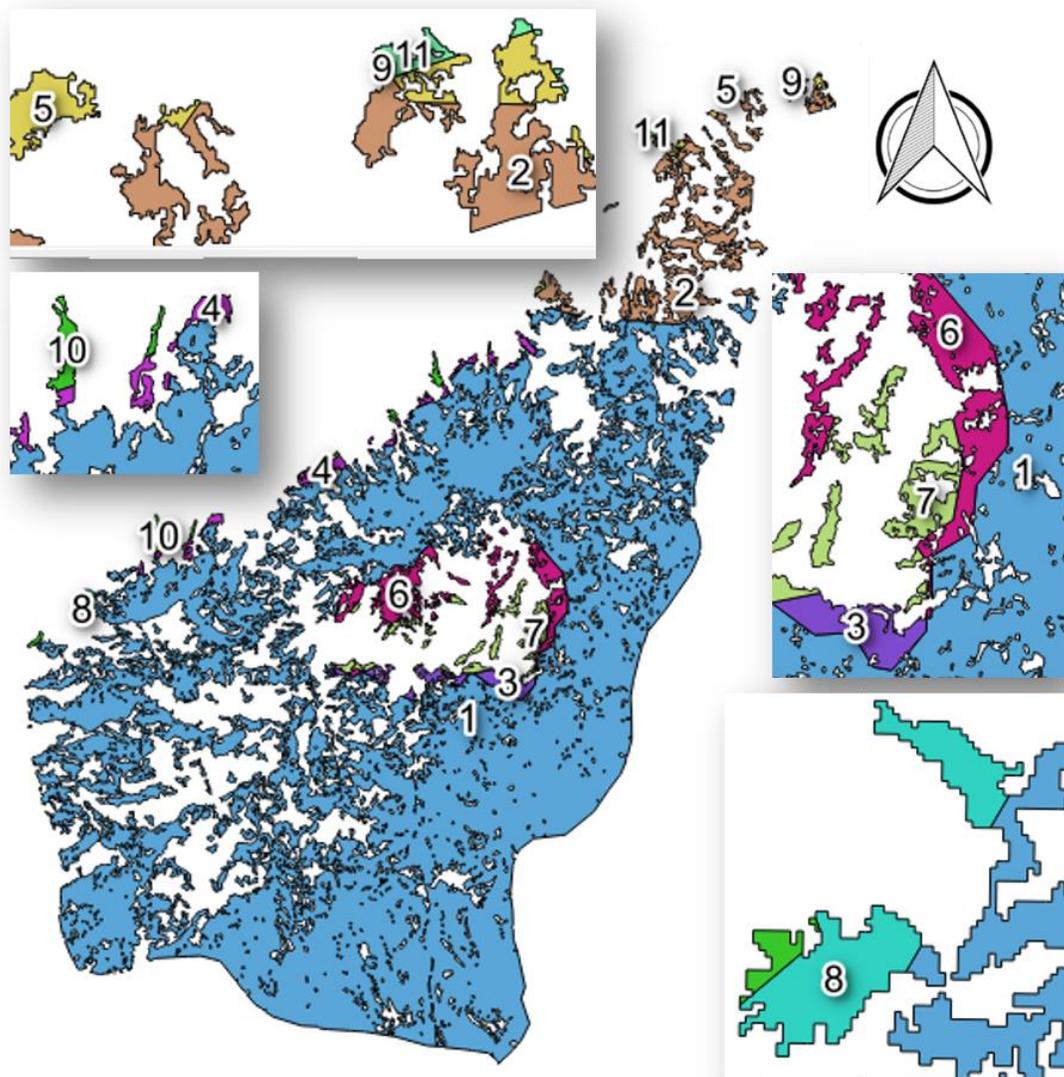


Figura 23. Distribución de las categorías por tipo en el área forestal de la subcuenca.

#### 4.2.2 Relación de las categorías por tipo, NDVI y precipitación

Se analizó la correlación entre valores de precipitación anual y NDVI compuesto, así como de sus anomalías, para cada combinación de tipo (Cuadro 11) con datos raster de 1992 a 2015. En su mayoría los coeficientes  $r^2$  fueron bajos, pero estadísticamente significativos, resaltando que las zonas Tipos 1 y 3 corresponden a las regiones con menor relación entre NDVI-precipitación caso contrario de los Tipos 4 y 10.

*Cuadro 11. Coeficiente de determinación  $r^2$  de las estadísticas zonales por categoría, NDVI y Precipitación anual, para la serie de tiempo 1992 - 2015*

Superficie (Ha)	Tipo	Código	NDVIC/PP			$\Delta$ NDVI/ $\Delta$ PP		
			Ecuación	$R^2$	$p$	Ecuación	$R^2$	$P$
8117.69	1	L-RT-BM	0.00008x+0.6162	0.189	0.17	0.2611x+0.1043	0.09	0.34
364.28	2	L-RT-MA	0.0001x+0.4748	0.354	<b>0.04</b>	0.471x+0.0319	0.30	<b>0.07</b>
63.16	3	L-G-BM	0.00009x+0.5638	0.261	0.10	0.3382x+0.0729	0.13	0.27
62.11	4	L-AC-BM	0.0002x+0.4247	0.625	<b>&lt;0.01</b>	0.6701x+0.0616	0.54	<b>&lt;0.01</b>
25.17	5	L-AC-MA	0.0002x+0.4097	0.461	<b>0.01</b>	0.6425x+0.0116	0.46	<b>0.02</b>
200.65	6	R-RT-BM	0.0001x+0.5238	0.410	<b>0.02</b>	0.518x+0.1136	0.31	0.07
89.5	7	R-G-BM	0.0001x+0.4949	0.410	<b>0.03</b>	0.443x+0.0801	0.29	0.08
5.16	8	P-RT-BM	0.0001x+0.4352	0.446	<b>0.02</b>	0.5332x+0.0032	0.46	<b>0.02</b>
0.46	9	P-RT-MA	0.0002x+0.2872	0.533	<b>0.01</b>	0.6077x+0.0379	0.45	<b>0.02</b>
25.11	10	P-AC-BM	0.0002x+0.3746	0.708	<b>&lt;0.01</b>	0.7993x+0.0323	0.61	<b>&lt;0.01</b>
7.53	11	P-AC-MA	0.0002x+0.3989	0.455	<b>0.01</b>	0.5921x+0.0073	0.45	<b>0.02</b>

Se resaltan las correlaciones estadísticamente significativas

#### 4.2.3 Relación de las categorías por tipo, y variables geomorfológicas

En cuanto a la evaluación de las correlaciones de NDVI y variables geomorfológicas por tipo de combinación (Cuadro 12), se observan las mismas agrupaciones de dependencia mostradas en el análisis global (Cuadro 9), Altitud y Precipitación. No obstante, la zona Tipo 9, tiene la mayor relación con el Aspecto de la ladera.

Cuadro 12. Coeficientes determinación de la relación NDVI Medio Compuesto y Anomalía NDVI del 2017, por tipo de combinación, con las variables geomorfológicas.

Sitio	NDVI	Precipitación	Aspecto	Pendiente	TWI	Altitud	Valor P <sup>†</sup>
Tipo1	Compuesto	0.0816	0.0016	0.0005	0.0123	<b>0.3791</b>	<0.01
	Δ 2017	0.0542	0.0080	0.0294	0.0218	<b>0.0639</b>	<0.01
Tipo2	Compuesto	0.0243	0.0023	0.0006	0.0633	<b>0.1144</b>	0.661
	Δ 2017	<b>0.2134</b>	0.1047	0.0005	0.0023	0.0225	<0.01
Tipo3	Compuesto	0.2263	0.0564	0.0043	0.0049	<b>0.2548</b>	<0.01
	Δ 2017	<b>0.0267</b>	0.0021	0.0097	0.0011	0.0005	0.257
Tipo4	Compuesto	<b>0.1132</b>	0.0048	0.1255	0.0629	0.1981	0.016
	Δ 2017	0.0027	0.0185	0.0046	0.0090	<b>0.0535</b>	0.106
Tipo5	Compuesto	0.1024	<b>0.1589</b>	0.0904	0.0001	0.0000	<0.01
	Δ 2017	<b>0.0398</b>	0.0014	0.0386	0.0001	0.0049	0.164
Tipo6	Compuesto	0.0285	0.0038	0.0202	0.0003	<b>0.1001</b>	0.025
	Δ 2017	<b>0.0372</b>	0.0353	0.0095	0.0026	0.0064	0.179
Tipo7	Compuesto	0.0005	0.0051	<b>0.1251</b>	0.0257	0.0188	0.018
	Δ 2017	0.0234	<b>0.0568</b>	0.0205	0.0555	0.0229	0.095
Tipo8	Compuesto	<b>0.1595</b>	0.0358	0.0323	0.0068	0.0914	<0.01
	Δ 2017	0.0036	0.0077	0.0697	0.0874	<b>0.1605</b>	<0.01
Tipo9	Compuesto	0.0888	<b>0.6053</b>	0.0245	0.4637	0.0015	0.0394
	Δ 2017	<b>0.9034</b>	0.0005	0.0098	0.0027	0.5516	<0.01
Tipo10	Compuesto	0.0906	0.0107	0.0146	0.0071	<b>0.1150</b>	0.016
	Δ 2017	<b>0.2921</b>	0.0488	0.0362	0.0073	0.0133	<0.01
Tipo11	Compuesto	0.0491	<b>0.1248</b>	0.0130	0.0182	0.0723	0.011
	Δ 2017	0.0426	0.0535	0.0015	0.0000	<b>0.0691</b>	0.065

† Valores de  $p$  sólo de las relaciones marcadas en negritas.  
Los valores de  $r^2$  significativos aparecen en fondo verde.

## 5. Discusión

### 5.1 Relación multitemporal NDVI y precipitación

El reporte Mexicano de Cambio Climático (Quintanar *et al.*, 2005) señala un incremento de la precipitación para varias regiones de México (centro, sur y noreste), esto concuerda con el análisis multitemporal realizado para los valores de precipitación en el área forestal de la subcuenca (Figura 3), que mostraron una tendencia positiva, tanto en el análisis de regresión como en las pruebas no paramétricas (Figura 9, Cuadro 7), sin embargo, los coeficientes de correlación fueron bajos, explicado por el número de registros y estaciones disponibles. Cabe destacar que el mismo reporte de cambio climático, señala la marcada heterogeneidad espacial del cambio climático global, además de los múltiples problemas de la modelación dados por la calidad, consistencia y número de registros disponibles.

En cuanto al proceso de interpolación, la comparación de la precipitación obtenida mediante interpolación IDW arrojó una tasa de incremento de la precipitación ligeramente mayor en comparación con los valores obtenidos puntualmente de cada estación (Figura 9), por lo que es factible realizar este tipo de interpolación cuando las características fisiográficas son muy complejas y los puntos de muestreo se encuentren irregularmente dispersos (Li & Heap, 201; Keblouti *et al.*, 2012; Kravchenko, 2003).

Respecto al análisis multitemporal de NDVI (1992 – 2017), en su componente estacional, anomalía y compuesto; las tendencias fueron negativas, pero pendientes muy bajas, coeficientes de determinación bajos y estadísticamente no representativos (Cuadro 8). No obstante, desde el análisis espaciotemporal de la anomalía (Figura 11), puede observarse como los primeros años predominaban anomalías positivas (verde) seguidas de algunos eventos decrecientes (marrón y rojo) y en los últimos años, sobre todo la anomalía del año 2017, predominan valores cercanos a cero (blanco); lo que se interpreta como un descenso en el NDVI, seguido de una recuperación hasta alcanzar la media de NDVI evaluado en periodo

1992 - 2017; la misma conducta se observa en las gráficas de la serie de tiempo NDVI anomalía y compuesto (Figura 14).

Esta caída del NDVI, principalmente en el año 2003, pudo haber sido ocasionada por una fuerte lluvia atípica que se presentó en ese año (Higuera, 2003; Martín, Martínez & Chávez, 2003), provocada por la interacción meteorológica de una línea de vaguada con el paso consecutivo de seis ondas tropicales y dos ciclones, entre los días 5 a 18 de septiembre; fenómeno extraordinario evaluado con un periodo de retorno de 50 años (Matías *et al.*, 2007). Solo para la estación meteorológica 11141, se registró una precipitación mensual de 399.3 mm y máxima diaria de 111.8 mm, en comparación con la media mensual de 127.8 mm (SMN, 2016). Precisamente Cavazos & Turrent (2008) determinaron que el aumento en la precipitación de la región centro de México, se debe principalmente a los eventos de lluvia ciclónica. De este modo y como se ha documentado eventos atípicos de precipitación y viento, pueden dañar las estructuras vegetativas (Evertham & Brokaw, 1996; Kupfer *et al.*, 2008) y con ello reducir los valores de NDVI (Vogelmann, 1990).

Aparte de una tendencia temporal negativa del NDVI, en relación con el incremento de la precipitación (Figura 16), menguada por el evento atípico antes descrito. El análisis de anomalías del NDVI arrojó que el estado actual de la vegetación forestal se encuentra en la media del rango de valores que se observó en el periodo considerado en este estudio, e incluso con recuperación respecto a los años más secos (Figura 15). Sin embargo, no se logró identificar patrones espaciales de mortandad forestal, que puede explicarse con ayuda de la teoría de la “Transición Forestal”.

La teoría postulada por Mather (1992) llamada “Transición forestal”, y actualmente documentada en el sureste de México (García *et al.*, 2009; Vaca *et al.*, 2012), trata de explicar los patrones de recuperación o regeneración de los bosques a nivel global, fenómeno asociado a procesos sociales, políticos y económicos como la implantación de políticas e incentivos a la conservación, el abandono de tierras de cultivo, intensificación de sistemas productivos y la globalización (Kull, 2017). Es

necesario contemplar la dinámica socioeconómica de las comunidades en la Sierra de Santa Rosa, a fin de poder evaluar aspectos tales como, una disminución en la extracción de carbón, la extensión de plantaciones forestales de especies nativas y exóticas (Figura 19A), e incluso si las tasas de migración han incrementado.

En otro aspecto, la relación del índice área foliar (LAI) con los valores de NDVI y precipitación no arrojó coeficientes de correlación significativos (Figura 20), por lo que no fue posible realizar el ajuste a los valores de NDVI y la modelación espacial del mismo LAI. Esto se puede atribuir a un bajo esfuerzo de muestreo (espacial y temporal), ya que no se logró representar todas las condiciones de la región, así como a la diversidad de encinos que se presentan en la subcuenca, entre ellas especies caducifolias (Martínez *et al.*, 2009). Destacan los valores de LAI obtenidos de las regiones más secas que se mantuvieron apenas por debajo del promedio, atribuible a características adaptativas y funcionales de las especies presentes.

## **5.2 Relaciones multitemporal y espacial NDVI por tipo de superficie**

Se abordaron dos grupos de características biofísicas de la subcuenca, en formato vectorial, por un lado se agruparon los suelos dominantes, tipo de roca y permeabilidad hidrogeológica (Figura 2), y por otro en formato raster la altitud, pendiente, exposición, índice topográfico de humedad (TWI) (Figura 21, Figura 22).

De forma global, para la relación de la Altitud con la Anomalía de NDVI del año 2017 y NDVI Compuesto Medio, se observaron que están relacionados (Cuadro 9). Así como, también la relación precipitación y altitud. Además del efecto de la precipitación en el NDVI, se debe observar una conducta social, en la que las regiones de más difícil acceso y lejanas reciben menor presión antrópica de aprovechamiento (Kull, 2017).

De manera particular; sólo la combinación de suelo Luvisol, con roca de tipo Riolita-Toba ácida y permeabilidad baja a media (L-RT-BM) cubrió más del 90 % del área forestal total, limitando los análisis comparativos entre sitios (Cuadro 10). Sin embargo, de forma multitemporal, se logró detectar que los sitios Tipo 1 y 3

corresponden a las regiones con menor relación con el NDVI, caso contrario de los Tipo 4 y 10. En este sentido es precisamente la zona de Tipo 1, que abarca más del 90 % de la superficie (Figura 23), que no muestra relación a la precipitación por lo que como ya se ha documentado, deben existir ya sea controles microclimáticos y/o de cobertura que limitan la correlación NDVI-precipitación (Alemu *et al.*, 2015).

Así, después de la zona Tipo 1, la zona Tipo 3 es la de mayor superficie dentro de la región de mayor precipitación. En el caso de las zonas Tipo 4 y 10, son las únicas que presentan dos factores potencialmente limitantes al retención del agua en subsuelo, roca Arenisca-conglomerado y una hidrogeología de permeabilidad baja a media (Anexo 3).

En cuanto a los sitios que se agruparon por la relación del NDVI Compuesto y Anomalía del año 2017 con la altitud y la precipitación media anual (Cuadro 12), destaca el caso particular de la zona Tipo 9, que muestra una relación positiva (0.5) (Cuadro 11). Esto contrasta con el análisis espacial (Cuadro 12) dónde el NDVI Compuesto tiene una mayor correlación con el Aspecto de la ladera ( $r^2$  0.6053,  $p = 0.03$ ), si bien es la zona de menor superficie y también se encuentra en la región más árida, además de la disposición de la ladera con orientación Noreste, podría ser también la zona más ventosa, por lo que la disponibilidad de agua sí es limitante.

### 5.3 Perspectivas

El estudio realizado en la Sierra de Santa Rosa, una región altamente diversa fisiográficamente, se enfrentó con el reto de exhibir una alta geodiversidad, es decir, muestrear grandes diferencias en las extensiones de la combinación de capas vectoriales, lo que dificultó examinar a fondo el control de estas categorías y su relación con la productividad de diferentes rodales de bosque. Se recomienda que estudios posteriores se realicen solo para una combinación, explorando así sus variantes geomorfológicas internas, así como el microclima.

Con el fenómeno extraordinario de precipitación observado para el año 2003, y los resultados de la exposición de la ladera de la combinación Tipo 9, se recomienda implementar modelación climática e índices de sequía que permitan explorar otras relaciones NDVI - Observaciones Sinópticas.

Peñuela y Carrillo (2012) generaron un mapa de permeabilidad de la roca a través de sus coeficientes de conductividad hidráulica (Anexo 4), por la escala de sus resultados, fue una variable no considerada en el presente estudio. Sin embargo, de forma cualitativa puede apreciarse que existe una correlación de ésta permeabilidad con la distribución del NDVI, por lo tanto, se recomienda generar y contrastar dicha variable.

Las características de las comunidades vegetales de la zona, descritas por Martínez *et al.*, (2009) en donde lograron identificar ensambles relacionados con la Altitud, brinda la oportunidad de hacer más preciso el estudio, si con la implementación de firmas espectrales se agrupan espacialmente los valores de NDVI por ensamble de especies de encino y vigor.

A través de las visitas de campo, se logró identificar que la presencia de *Tillandsia* en la vegetación arbórea, tiene un rango altitudinal entre los 2200 y 2400 msnm; es necesario realizar más estudios de la biología de la *Tillandsia* para esclarecer las causas de su presencia/ausencia fuera del rango.

### 5.3 Estudios futuros

La metodología empleada en este estudio y los resultados obtenidos, permiten el planteamiento a futuro de los siguientes estudios:

- a) Índice de área foliar (LAI). Dado que el esfuerzo de muestreo no permitió determinar la relación NDVI-LAI, se plantea realizar un mayor esfuerzo de muestreo, que contraste las dos temporadas, lluvias y secas, y más de un año de muestreos. Así mismo, es necesario realizar el ajuste a los valores obtenidos mediante la cosecha y medición del área foliar directamente.
- b) Sitios de muestreo. La metodología planteada para determinar los sitios de muestreo, identificó en campo los sitios afectados por el aprovechamiento de carbón; éstos sitios no fueron muestreados por el evidente daño al bosque generado por el uso del mismo, y no por el proceso de mortandad forestal. Se plantea identificar y excluir estas áreas del polígono de superficie forestal usado en las estadísticas zonales, para mejorar el rango valores de NDVI objetivo.
- c) Escenas satelitales. La búsqueda de las escenas satelitales sólo de los sensores LandSat, impidió la obtención de todas fechas para cada año, por la disponibilidad o alta nubosidad en las escenas. Para mejorar los rangos de fechas y la inclusión de más años en el estudio, se plantea la inclusión de más sensores, por ejemplo, Spot, esto requerirá de incluir herramientas de homogenización entre los histogramas y espectros.
- d) Estacionalidad. Sólo se realizó el análisis de estacionalidad para los valores NDVI (secas y lluvias), por lo que se plantea realizar del mismo modo el análisis para la precipitación y utilizar la correspondiente adaptación de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall.
- e) Análisis por componentes principales. Dada la relación significativa altitud-NDVI y exposición-NDVI, se plantea realizar un análisis de componentes principales para todas las fuentes de datos raster.

## 6. Conclusión

El análisis multitemporal de precipitación, con los criterios de selección de las estaciones y mediante la interpolación IDW arrojó resultados significativos, pero con bajos niveles de correlación. Se sugiere la incorporación de métodos de procesamiento para los valores de precipitación que eliminen la variabilidad, así como eliminar o ponderar los valores de años atípicos.

En cuanto al análisis multitemporal del NDVI, este método no permitió detectar los patrones de mortandad o decaimiento forestal para su posterior asociación a las características biofísicas de cada zona. Sin embargo, se detectó un evento extraordinario de precipitación que posiblemente afectó a los valores de NDVI y su posterior regeneración hasta alcanzar su valor medio. Se sugiere la incorporación de más variables meteorológicas, insolación ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), eventos extraordinarios y vientos dominantes.

Dadas las características de la subcuenca, una sola categoría obtenida de la combinación Suelo, Roca e Hidrogeología abarcó más del 90 % de la superficie, e impidió la comparación numérica entre las 11 zonas. No obstante, y a pesar de los bajos coeficientes de correlación, se logró identificar un tipo de roca (Arenisca-Conglomerado) y de hidrogeología (permeabilidad baja a media) que aparentemente imponen las condiciones más limitantes para el NDVI. En cuanto a las variables geomorfológicas la mayor relación correspondió a la Altitud.

En conclusión, las relaciones biofísicas que condicionan la respuesta fotosintética evaluada a través del NDVI y a nivel de paisaje, demuestran ser un complejo más allá de las particularidades *in situ*. Si bien, los resultados obtenidos permiten inferir qué zonas geológicas y qué características geomorfológicas son más determinantes en la condición de los bosques, factores externos propios de los cambios ambientales globales, como el cambio climático y la dinámica del uso del suelo, son determinantes para comprender el proceso de mortandad o recuperación de los bosques.

## 7. Referencias

- Alemu, H., Kaptué, A. T., Senay, G. B., Wimberly, M. C., & Henebry, G. M. (2015). Evapotranspiration in the Nile Basin: Identifying dynamics and drivers, 2002-2011. *Water (Switzerland)*, 7(9), 4914–4931. <https://doi.org/10.3390/w7094914>
- Allen C. D, y Breshears D. D. (1998). Drought-induced shift of a forest woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 95: 14839–14842
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259 (4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Aranda Gómez, J. José, Arandan G., J., & Nieto S, A. (1989). Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central: Universidad Nacional Autónoma de México. *Revista*, 8, 33-46.
- Ariza, A. (2013). Descripción y corrección de productos LandSat 8, Versión 1.0. Instituto Geográfico Agustín CODAZZI, Centro de Investigación y desarrollo. Bogotá Colombia.
- Baguskas, S. A., Peterson, S. H., Bookhagen, B., & Still, C. J. (2014). Evaluating spatial patterns of drought-induced tree mortality in a coastal California pine forest. *Forest Ecology and Management*, 315, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.020>
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979) A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable

- de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.  
<http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Breshears, D. D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(42), 15144 LP-15148.  
<http://www.pnas.org/content/102/42/15144.abstract>
- Cavazos, T., Turrent, C. and Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L21703, doi:10.1029/2008GL035832
- Céspedes F., Silvia E. y Moreno S., Enrique. (2010). Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. *Investigación ambiental 2 (2)*: 5-13
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chapin F. S., Matson P. A., Vitousek P. M. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Second edition. Springer. 537 pp
- Chavez Jr, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3):459– 479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Chuvienco, Emilio. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. 2° Ed. Rialps. Madrid, España.
- CLICOM. (2018). Base de datos climatológica nacional. Recuperado en mayo de 2018, de Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>

- CONABIO. (2017). Portal de geoinformación, Sistema nacional de información sobre biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., o'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., y Van den Belt M (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature. Vol 387, 253-260 p. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Galván Y. 2008. Transiciones forestales en países en desarrollo: Un análisis crítico para México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- ESA. (2014). What is remote sensing?. European Space Agency [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_EN/SEMF9R3Z2OF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMF9R3Z2OF_0.html)
- ESA (2017). SANP, module Sen2Cor. European Space Agency. <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
- ESA (2018). Copernicus Open Access Hub. European Space Agency. <https://scihub.copernicus.eu/>
- Everham, E. M., & Brokaw, N. V. L. (1996). Forest Damage and Recovery from Catastrophic Wind. Botanical Review, 62(2), 113–185. <https://doi.org/10.1007/BF02857920>
- Fernández Eguiarte, A., Romero Centeno, R., & Zavala Hidalgo, J. (2016). Metodologías empleadas en el Atlas Climático Digital de México para la generación de mapas de alta resolución. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 39(1), 165-173.
- Frazer, G.W., Canham, C.D., and Lertzman, K.P. 1999. Gap Light Analyser (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user's manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.

- García-Barrios, L., Galván-Miyoshi, Y. M., Valsieso-Pérez, I. A., Masera, O. R., Bocco, G., & Vandermeer, J. (2009). Neotropical Forest Conservation, Agricultural Intensification, and Rural Out-migration: The Mexican Experience. *BioScience*, 59(10), 863–873. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.10.8>
- Guajardo Panes, R. A., Granados Ramírez, G. R., Sánchez Cohen, I., Díaz Padill, G., & Barbosa Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, VIII (5), 157-177. doi:DOI: 10.24850/j-tyca-2017-05-11
- Gustafson, E. J., & Sturtevant, B. R. (2013). Modeling Forest Mortality Caused by Drought Stress: Implications for Climate Change. *Ecosystems*, 16(1), 60–74. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9596-1>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Higuera, Cecilia. (14 de septiembre del 2003). Guanajuato, el estado más afectado por las lluvias. *CRONICA*. México. <http://www.cronica.com.mx/notas/2003/84752.html>
- Huete, A., Miura, T., Yoshioka, H., Ratana, P., & Broich, M. (2014). Indices of Vegetation Activity. *Remote Sensing/Photogrammetry*. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25047-7_1)
- INEGI (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000, 000. Unidades climáticas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI (2013). Continuo Mexicano de Elevación (CEM), Versión 3.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/index.jsp>

- INEGI. (2016). Conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación, Escala 1:250 000., Serie VI., Capa Unión. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.  
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- INEGI. (2018). Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, SIATL v. 3.2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. México.  
[http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl)
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Keblouti, M., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba- Algeria - Comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia*, 18, 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.058>
- Kopecký, M & Čížková, Š. (2010). Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter?. *Applied Vegetation Science*, 13: 450-459.  
[Doi:10.1111/j.1654-109x.2010.01083.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-109x.2010.01083.x)
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1564.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1564>
- Kull, C. A. (2017). Forest transitions: A new conceptual scheme. *Geographica Helvetica*, 72(4), 465–474. <https://doi.org/10.5194/gh-72-465-2017>
- Kupfer, J. A., Myers, A. T., McLane, S. E., & Melton, G. N. (2008). Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by Hurricane Katrina. *Ecosystems*, 11(1), 45–60. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9106-z>
- Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3–4), 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>

- López-Loera, H., & Tristán-González, M. (2013). Geología y magnetometría aérea del graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: Implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 137–156.
- Macomber, S. A., & Woodcock, C. E. 1994. Mapping and Monitoring Conifer Mortality Using Remote Sensing in the Lake Tahoe Basin. *Remote Sensing of Environment*, 266 (October 1993), 255–266.  
[https://doi.org/Doi10.1016/0034-4257\(94\)90075-2](https://doi.org/Doi10.1016/0034-4257(94)90075-2)
- Martin, D., Martínez, E. & Chávez M. (14 de septiembre del 2003). \$20 millones para 12 municipios de Guanajuato afectados por lluvias. *La Jornada*. México.  
<https://www.jornada.com.mx/2003/09/14/030n1est.php?printver=1&fly>
- Martínez Cruz, Juan & Téllez V. Oswaldo. (2004). Listado florístico de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Boletín de la sociedad Botánica de México*, 74:31-49. DOI:10.17129/botsci.1685
- Martínez C., Juan, Téllez V., O. y Ibarra M., G. (2009). Estructura de encinares de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80: 145-156, 2009.
- Mather, A.S. (1992) *The Forest Transition*. *Area*, 24, 367-379.  
<http://www.jstor.org/stable/20003181>
- Matías Ramírez, Lucía G., Oropeza O., O., Lugo H., J., Cortéz V., M. & Jaúregui O., E. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geograficas*, (64), 7–25.
- MatLab. (2015). *MatLab Statistics Software*. Release: 8.5. The MathWorks, Inc. Natick, Massachusetts, United States. <https://www.mathworks.com>
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystem and Human Well-being: scenarios: finding of the Scenarios*. Island Press, Washington

- Mcdowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Sperry, J. (2008) Mechanisms of Plant Survival and Mortality during Drought: Why Do Some Plants Survive while Others Succumb to Drought?. *New Phytologist* 78(4),719–739. <http://www.jstor.org/stable/30149305>
- Nieto S., Ángel F., García D., Juan y Aguirre M., A. (1992). Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la sierra de Guanajuato. *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, V. 10 N. 1, p 1-5.
- Norman, S. P., Koch, F. H., & Hargrove, W. W (2016) Review of broad-scale drought monitoring of forests: Toward an integrated data mining approach. *Forest Ecology and Management*, 380, 346–358. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.027>
- Ortiz, V., B. y Ortiz A., C. 1990. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Séptima edición. Chapingo, México.
- Osman, K. T. (2013) *Forest Soils, properties and management*. Springer. 217p
- Peñuela Arévalo, Liliana A., y Carrillo R., J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones geográficas*, (81),18-32. ISSN 0188-4611
- Phlert, Thorsten. (2018). Trend: Non-Parametric Trend Test and Change-Point Detection. Package for R statistical software. <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/index.html>
- Quintanar I., Ignacio A., Keton A., D & Lizárraga C., C. (2005). Observaciones atmosféricas en superficie y altura. In: Gay y García, C. & Rueda A., J. (Ed.) *Reporte Mexicano de Cambio Climático, Grupo I: Bases científicas modelos y modelación*. (pp. 23 - 34). Universidad Nacional Autónoma de México. México. ISB:978-607-02-7522-7

- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., & Hoshizaki, T. (1986). Remote Detection of Forest Damage. *BioScience*, 36(7), 439–445. <https://doi.org/10.2307/1310339>
- RStudio Team. (2018). RStudio: integrated development for R. V:1.1.463. RStudio, Inc. Boston, MA. <https://www.rstudio.com>.
- Sen, K. P. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall ' s Tau  
Pranab Kumar Sen. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SMN. (2016). Normales Climatológicas por Estado. Recuperado el 2018, de Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>
- Sofue, Y., Hoshino, B., Nduati, E., Kondoh, A., Kai, K., Purevsuren, T., & Baba, K. (2017). Remote sensing methodology for detection of environmental regime shifts in semi-arid region. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 5113–5116). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128153>
- Tucker, Compton J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Volume 8, Issue 2, 1979, 127-150, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- QGIS. (2018). Geographic Information System. Release: 2.18 y 3.4. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- U.S. Geological Survey. (2017). Landsat collection 1 level 1 product definition. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Sioux Falls, South Dakota [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1656\\_Landsat\\_Level-1\\_Product\\_Collection\\_Definition.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1656_Landsat_Level-1_Product_Collection_Definition.pdf)
- U.S. Geological Survey. (2018). Earthexplorer. <http://earthexplorer.usgs.gov/>

- Vaca, R. A., Golicher, D. J., Cayuela, L., Hewson, J., & Steininger, M. (2012). Evidence of Incipient Forest Transition in Southern Mexico. *PLOS ONE*, 7(8), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042309>
- Van Gunst, K. J., Weisberg, P. J., Yang, J., & Fan, Y. (2016). Do denser forests have greater risk of tree mortality: A remote sensing analysis of density-dependent forest mortality. *Forest Ecology and Management*, 359, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.032>
- Vogelmann, J. E. (1990). Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the north-eastern United States. *International Journal of Remote Sensing*, 11(12), 2281–2297. <https://doi.org/10.1080/01431169008955175>
- Wilks, D. S., (2006). *Statistical methods in the atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, Vol. 91. Elsevier, USA. ISBN: 9780080456225
- Zhang, Q., Yu, H., Sun, P., Singh, V. P., & Shi, P. (2019). Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in China. *Global and Planetary Change*, 172, 298-306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.10.017>
- Zhao, M., & Running, S. W. (2010). Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science*, 329(5994), 940–943. <https://doi.org/10.1126/science.1192666>

## 8. Anexos

### Anexo 1. Datos de los sitios de muestreo y verificación.

Sitio	Fecha	Cobertura	Coordenada		Altitud	LAI*	
			Latitud Norte	Longitud Oeste		4 anillo	5 anillos
1	27/06/2018	Forestal	21°11'50.30"	101°16'20.20"	2335	1.9	1.6
2	27/06/2018	Forestal	21°11'50.60"	101°16'18.00"	2350	2.05	1.59
3	27/06/2018	Forestal	21°11'48.00"	101°16'17.70"	2370	1.56	1.38
4	27/06/2018	Claro	21°11'48.40"	101°16'18.40"	2351	ND	ND
5	27/06/2018	Forestal	21°11'45.80"	101°16'17.60"	2346	1.83	1.51
6	27/06/2018	Forestal	21°11'39.50"	101°16'19.70"	2324	1.78	1.63
7	27/06/2018	Forestal	21°11'37.20"	101°16'22.30"	2337	2.1	1.74
8	27/06/2018	Forestal	21°11'35.50"	101°16'23.80"	2364	2.14	1.7
9	27/06/2018	Forestal	21°12'00.40"	101°16'23.50"	2309	1.97	1.68
10	10/07/2018	Casa	21°12'36.00"	101°16'50.90"	2559	ND	ND
11	10/07/2018	Forestal	21°12'50.40"	101°17'31.30"	2743	0.08	0.1
12	10/07/2018	Forestal	21°12'50.80"	101°17'35.00"	2742	ND	ND
13	10/07/2018	Rendija	21°12'48.90"	101°17'25.10"	2737	ND	ND
14	10/07/2018	Forestal	21°12'52.70"	101°17'27.10"	2743	0.63	0.55
15	10/07/2018	Forestal	21°13'04.20"	101°17'34.90"	2739	1.56	1.41
16	10/07/2018	Forestal	21°13'04.20"	101°17'33.20"	2740	1.76	1.47
17	10/07/2018	Forestal	21°13'20.70"	101°17'37.10"	2743	ND	ND
18	10/07/2018	Forestal	21°13'21.10"	101°17'47.30"	2740	ND	ND
19	10/07/2018	Forestal	21°12'49.20"	101°17'06.10"	2603	1.46	1.26
20	10/07/2018	Forestal	21°11'44.40"	101°16'26.50"	2343	1.7	1.43
21	21/08/2018	Forestal	21°12'28.60"	101°15'17.20"	2377	2.11	1.81
22	21/08/2018	Forestal	21°12'53.00"	101°15'27.10"	2278	1.52	1.43
23	21/08/2018	Matorral	21°12'54.40"	101°14'58.80"	2304	ND	ND
24	21/08/2018	Pastizal	21°12'53.40"	101°15'02.60"	2283	ND	ND
25	21/08/2018	Claro	21°12'48.10"	101°13'37.50"	2391	ND	ND
26	21/08/2018	Forestal	21°13'04.10"	101°13'25.70"	2409	2.2	1.9
27	11/09/2018	Casa	21°14'45.52"	101°17'7.260"	2170	ND	ND
28	11/09/2018	Casa	21°11'49.80"	101°14'56.10"	2543	ND	ND
29	11/09/2018	Claro	21°11'16.00"	101°14'49.50"	2603	ND	ND
30	11/09/2018	Forestal	21°11'20.50"	101°14'37.10"	2637	1.49	1.5
31	11/09/2018	Forestal	21°11'08.52"	101°14'30.41"	2644	1.58	1.44
32	11/09/2018	Forestal	21°11'05.88"	101°14'52.68"	2577	2.3	1.89
33	13/09/2018	Matorral	21°14'49.60"	101°16'44.60"	2175	ND	ND
34	13/09/2018	Matorral	21°14'50.70"	101°16'22.80"	2221	ND	ND
35	13/09/2018	Potrero	21°15'00.90"	101°16'05.60"	2260	ND	ND

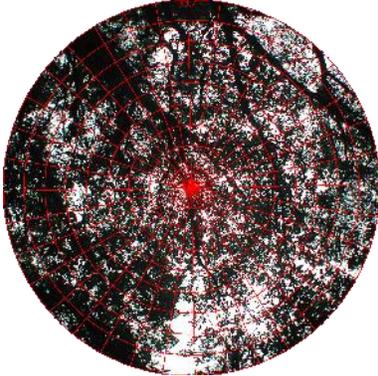
Sitio	Fecha	Cobertura	Coordenada		Altitud	LAI*	
			Latitud Norte	Longitud Oeste		4 anillo	5 anillos
36	13/09/2018	Forestal	21°14'46.82"	101°15'22.96"	2435	2.21	1.84
37	13/09/2018	Forestal	21°14'51.60"	101°15'31.80"	2383	2.08	1.75
38	13/09/2018	Forestal	21°14'59.56"	101°15'45.21"	2331	ND	ND
39	13/09/2018	Forestal	21°15'04.40"	101°15'57.50"	2288	0.9	0.69
40	11/10/2018	Casa	21°21'39.65"	101°09'21.54"	2018	ND	ND
41	11/10/2018	Matorral	21°19'54.94"	101°09'39.88"	2096	ND	ND
42	11/10/2018	Matorral	21°19'14.26"	101°10'04.80"	2178	ND	ND
43	11/10/2018	Forestal	21°19'00.84"	101°10'07.52"	2242	1.68	1.38
44	11/10/2018	Casa	21°18'37.11"	101°10'09.01"	2268	ND	ND
45	11/10/2018	Forestal	21°18'37.11"	101°10'11.28"	2265	1.78	1.58
46	11/10/2018	Forestal	21°18'36.28"	101°10'19.51"	2279	ND	ND
47	11/10/2018	Forestal	21°18'38.16"	101°10'23.95"	2281	1.65	1.53

\*LAI = índice de área foliar

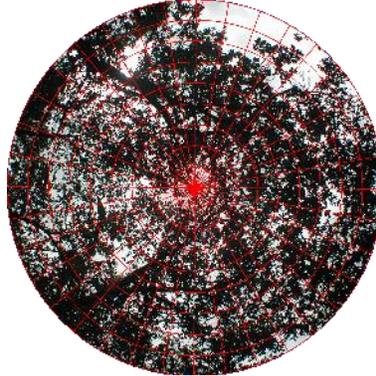
Valores ND no contaron con fotografía hemisférica

*Anexo 2. Fotografías hemisféricas por sitio, y visualización de anillos.*

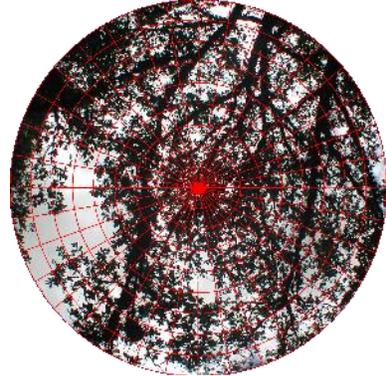
Sitio 1



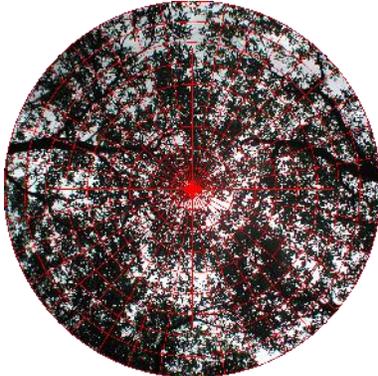
Sitio 2



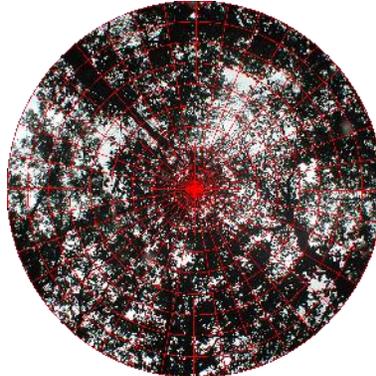
Sitio 3



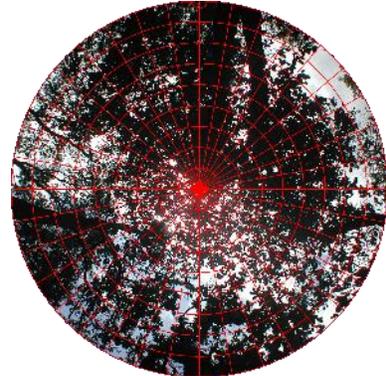
Sitio 5



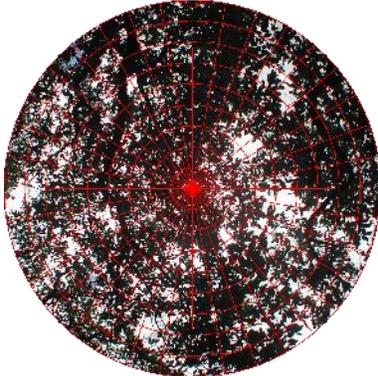
Sitio 6



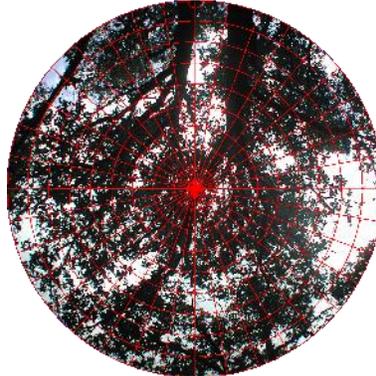
Sitio 7



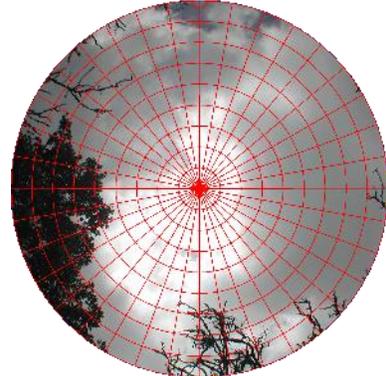
Sitio 8



Sitio 9



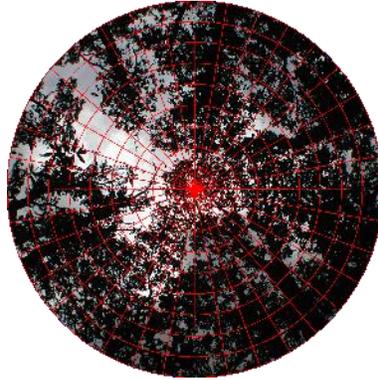
Sitio 11



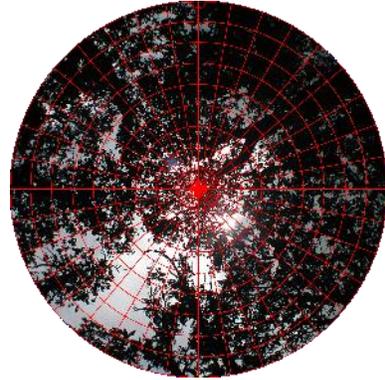
Sitio 14



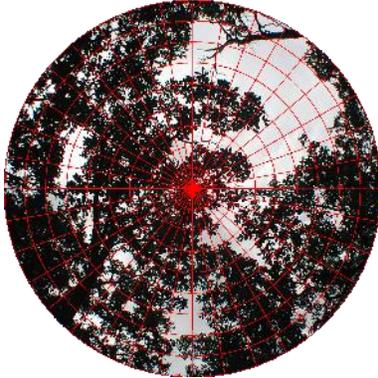
Sitio 15



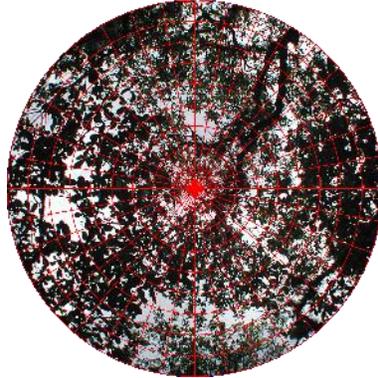
Sitio 16



Sitio 19



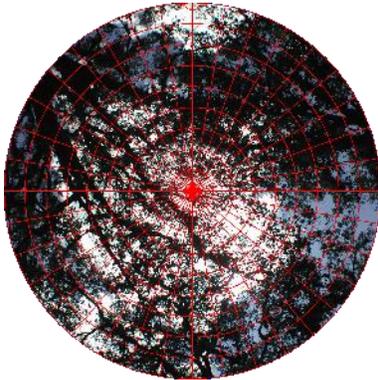
Sitio 20



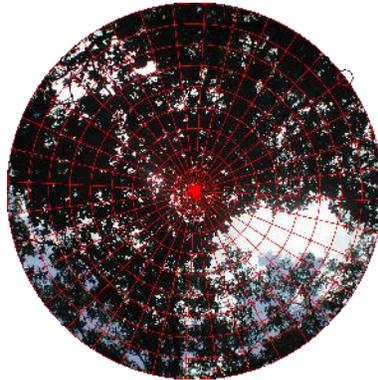
Sitio 21



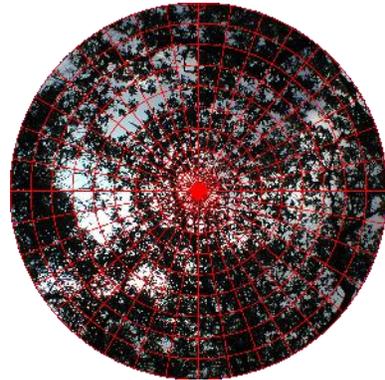
Sitio 22



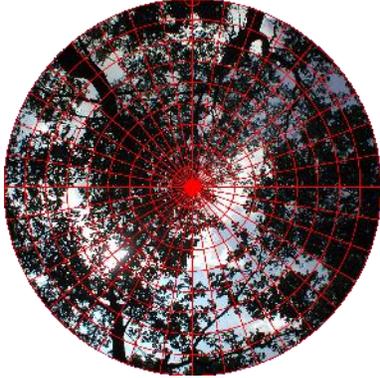
Sitio 26



Sitio 30



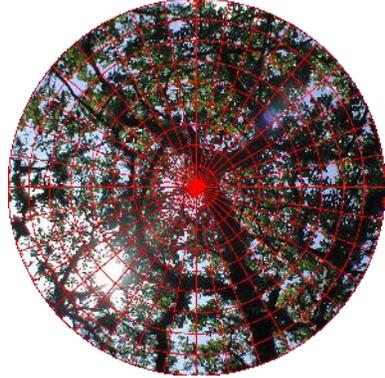
Sitio 31



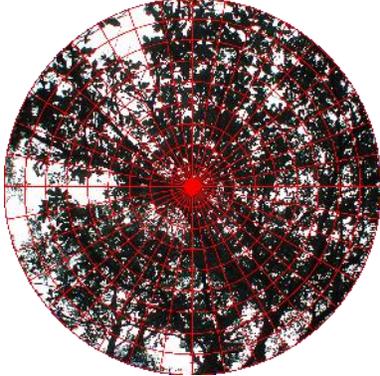
Sitio 32



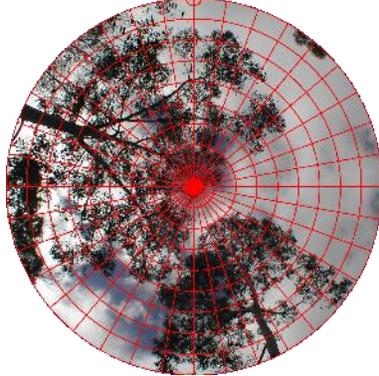
Sitio 36



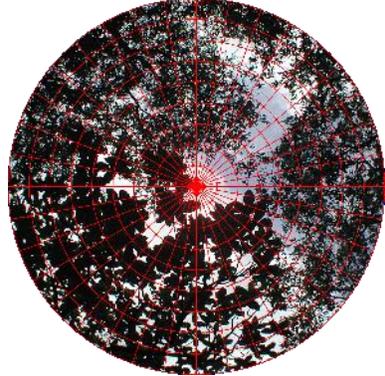
Sitio 37



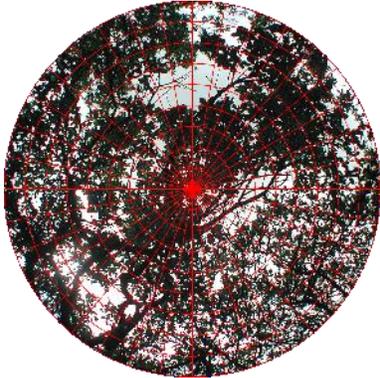
Sitio 39



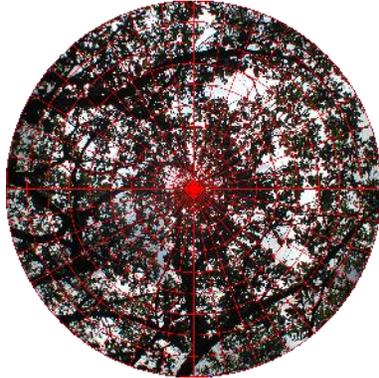
Sitio 43



Sitio 45



Sitio 47



Anexo 3. Valor medio de las estadísticas de zona, para cada combinación por tipo.

Código	Tipo	Área (ha)	NDVI Compuesto	Precipitación Anual Media IDW (mm)	Anomalía NDVI del año 2017	Anomalía NDVI Media del periodo	Aspecto Medio (°)	Pendiente Media (°)	TWI Medio
L-RT-BM	1	8117.69	0.673	811.71	-0.346	0.089	181.79	20.36	6.07
L-RT-MA	2	364.28	0.548	643.14	0.499	0.103	184.23	19.47	5.93
L-G-BM	3	63.16	0.631	840.66	0.085	0.092	173.1	19.96	5.7
L-AC-BM	4	62.11	0.549	757.22	0.342	0.098	223.84	20.14	6.49
L-AC-MA	5	25.17	0.499	640.24	0.522	0.1	197.76	14.35	6.18
R-RT-BM	6	200.65	0.613	802.22	-0.139	0.102	189.19	17.96	6.46
R-G-BM	7	89.5	0.575	819.78	-0.021	0.094	233.76	16.34	6.11
P-RT-BM	8	5.16	0.524	771.34	0.845	0.092	312.41	24.79	6.29
P-RT-MA	9	0.46	0.419	638.36	-0.066	0.077	275.72	14.94	7.1
P-AC-BM	10	25.11	0.535	760.91	0.468	0.089	260.78	10.77	8.03
P-AC-MA	11	7.53	0.496	640.77	0.685	0.103	170.57	13.59	6.21

Se entiende como valores medios, al promedio del valor de todos los pixeles comprendidos dentro de cada polígono (combinación por tipo).

Interpretación de los códigos de cada combinación por tipo									
Suelo dominante	Tipo de roca	Hidrología (permeabilidad)	Código	Tipo	Suelo dominante	Tipo de roca	Hidrología (permeabilidad)	Código	Tipo
Luvisol	Riolita-Toba ácida	Baja a media	L-RT-BM	1	Regosol	Granodiorita	Baja a media	R-G-BM	7
Luvisol	Riolita-Toba ácida	Media a alta	L-RT-MA	2	Phaeozem	Riolita-Toba ácida	Baja a media	P-RT-BM	8
Luvisol	Granodiorita	Baja a media	L-G-BM	3	Phaeozem	Riolita-Toba ácida	Media a media	P-RT-MA	9
Luvisol	Arenisca-Conglomerado	Baja a media	L-AC-BM	4	Phaeozem	Arenisca-Conglomerado	Baja a media	P-AC-BM	10
Luvisol	Arenisca-Conglomerado	Media a alta	L-AC-MA	5	Phaeozem	Arenisca-Conglomerado	Media a media	P-AC-BM	11
Regosol	Riolita-Toba ácida	Baja a media	R-RT-BM	6					

Anexo 4. Mapa de permeabilidad hidráulica de la roca, de la subcuenca (rojo) adaptado de Peñuela y Carrillo, (2013) en contraste con el NDVI Compuesto del año 2017.

