



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**CARRERA DE BIOLOGÍA**

**ÍNDICES DE VEGETACIÓN, FACTORES EDÁFICOS Y CARBONO  
DE LA BIOMASA AÉREA COMO INDICADORES DE LA CALIDAD  
AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS RIBEREÑOS, EN LA CUENCA  
DEL ALTO BALSAS**

**INFORME FINAL DE SERVICIO SOCIAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**B I Ó L O G A**

**P R E S E N T A:  
J A E L P O N C E C A S A Ñ A S**

**DIRECTOR: M. EN C. JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ**

**ASESOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES**

**CÓMITE TUTORAL**

**M. EN C. FAUSTINO LÓPEZ BARRERA**

**M. EN C. ALMA BELLA LÓPEZ LÓPEZ**

**M. EN B. EDUARDO CHIMAL SANCHÉZ**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**PROYECTO PAPIME PE20882**

**OCTUBRE 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Dedicatorias

A **Díos** por darme la fortaleza para terminar mi carrera y por poner en mi camino a personas que siempre me impulsaron a continuar, además de enseñarme a creer que con su ayuda todo es posible.

A mis abuelitos **Irene Ramos Gerónimo y Román Ponce Ramos** que durante el tiempo que pude disfrutar de su presencia y compañía me animaron para no claudicar en mis propósitos.

A mis padres **María Teresa Casañas Aguilar y Ramón Ponce Ramos** por ser mi sostén y soporte en los momentos difíciles de la carrera y de mi vida, por acompañarme en los días alegres e importantes y por ser las personas que hacen que mantenga los pies en la tierra con sus consejos y su guía.

A mi hermano **Esaú Ponce Casañas** por brindarme su apoyo y preocuparse por mis estados anímicos.

A mi tía **Rosa Irene Ponce Ramos** por sus consejos y apoyo cuando me desesperaban los momentos de dificultad tanto material como de ánimo, al igual que a mis primas **Crís, Ruth y Daní** y mi primo **Jesús** porque constantemente me exhortaron a seguir estudiando, diciéndome que, aunque el camino fuera difícil no dejara de andarlo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la oportunidad de vivir una de las mejores etapas de mi vida en esta gran institución.

A mi director M. en C. Juan Manuel Valderrábano por brindarme sus conocimientos académicos, por su infinita paciencia, porque lo puedo considerar un amigo y sobre todo por sus consejos que me han servido de mucho tanto en mi formación académica como en lo personal.

A mi asesor Dr. Gerardo Cruz Flores por sus conocimientos transmitidos y el tiempo invertido en mi formación, por su paciencia, por sus consejos, por la confianza que deposito en mí, por sus pláticas llenas de experiencia y sabiduría y sobre todo por brindarme su amistad.

A mis sinodales, M. en C. Faustino López Barrera, M. en C. Alma López López y M. en B. Eduardo Chimal Sánchez por sus observaciones que ayudaron a enriquecer el contenido de este trabajo.

A mis amigos Aíry, Aydee, Montse y Sandra por ser un gran apoyo durante la carrera, por todos los momentos en los que nos hemos acompañado, por sus palabras que me hicieron ver que tengo potencial y sobre todo por escucharme en momentos difíciles, los llevaré en mi corazón siempre, espero que esta amistad nunca se termine.

A mi amigo Arturo Rodríguez Cadena por todos estos años de una bonita amistad y porque siempre me has ayudado a creer en mí, te agradezco infinitamente el estar para ahí cuando lo he necesitado, tanto en momentos buenos como malos, te amo mucho.

## ÍNDICE

Resumen .....	1
Abstract .....	3
1. Introducción .....	5
2. Marco Teórico .....	8
2.1 Calidad ambiental .....	8
2.3 Índices de vegetación .....	11
2.4 Suelo .....	13
2.5 Sistemas Ribereños .....	17
2.6 Biomasa aérea y Carbono en biomasa aérea .....	18
2.7 La Cuenca como unidad de estudio .....	20
3. Planteamiento y Justificación .....	22
4. Hipótesis .....	23
5. Objetivos .....	23
General .....	23
Particulares .....	24
6. Material y Método .....	25
6.1 Zona de estudio .....	25
6.2 Trabajo de Gabinete .....	29
6.2.1 Obtención de la red hidrológica y delimitación de la cuenca .....	29
6.2.2 Selección de factores edáficos .....	29
6.2.3 Selección de factores ecológicos .....	30
6.2.4 Indicadores biofísicos .....	35
6.2.5 Análisis Estadísticos aplicados .....	37
7. Resultados y discusión .....	39
7.1 Procesamiento en SIG, delimitación de la Cuenca y red de drenaje .....	39
7.2 Descripción general de los sitios de estudio .....	39
7.3 Indicadores edáficos .....	41
7.3.1 Carbono Orgánico del Suelo (COS) .....	44
7.3.2 pH activo del suelo .....	45
7.3.3 Nitrógeno total del suelo (Nt) .....	46

7.4 Indicadores de productividad .....	47
7.4.1 Volumen del fuste .....	49
7.4.2 Carbono en Biomasa Aérea.....	50
7.5 Indicadores biofísicos.....	51
7.6 Relación de variables robustas, índices de vegetación y el indicador de condición de la vegetación.....	55
8. Conclusiones.....	61
<i>Recomendaciones</i> .....	61
Bibliografía .....	62
Anexos .....	79
Anexo 1. Datos reportados por el INFyS de un solo conglomerado (indicadores ecológicos y de productividad).....	79
Anexo 2. Distribución espacial de los valores de NDVI y EVI de los sitios edafológicos (FES Z) y ecológicos de productividad (INFyS) .....	81
Anexo 3. Trabajo de gabinete .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca de estudio dentro del Alto Balsas, México.....	25
Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio en la Subcuenca de estudio.....	40
Figura 3. Gráfica de sedimentación: eigenvalores mayores a 1.....	43
Figura 4. Carbono Orgánico del Suelo con relación a la altitud.....	44
Figura 5. pH activo del suelo con relación a la altitud.....	45
Figura 6. Nitrógeno total del suelo con relación a la altitud.....	46
Figura 7. Gráfica de sedimentación: Vf = valor mayor a 1, CBA = CP incluido...	49
Figura 8. Volumen del fuste con relación a la altitud.....	50
Figura 9. Carbono en Biomasa aérea con relación a la altitud.....	51
Figura 10. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 2010.....	54
Figura 11. Índice de vegetación mejorado (EVI) 2010.....	54
Figura 12. Distribución de los sitios ribereños de acuerdo con su calidad ambiental.....	58

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tesis de ambientes ribereños en el PNIP.....	30
Cuadro 2. Estimadores para el cálculo de biomasa a partir del volumen.....	32
Cuadro 3. Índice de la condición de la vegetación y calidad de sitio.....	34
Cuadro 4. Descripción fisiográfica de los sitios.....	41
Cuadro 5. Indicadores edáficos evaluados en los sistemas ribereños.....	42
Cuadro 6. Eigenvalores y varianza de las propiedades edáficas.....	43
Cuadro 7. Componentes principales de las propiedades edáficas.....	43
Cuadro 8. Indicadores de productividad de la vegetación.....	48
Cuadro 9. Eigenvalores y varianza de las propiedades ecológicas de productividad.....	48
Cuadro 10. Componentes principales de los factores ecológicos de Productividad.....	49
Cuadro 11. Indicadores biofísicos por sitios edáficos y ecológicos.....	52
Cuadro 12. Coeficientes de correlación de NDVI y EVI.....	53
Cuadro 13. Valores de los índices de vegetación, indicadores edáficos, ecológicos y de productividad.....	57



## **Resumen**

La cuenca del Balsas se subdivide en tres regiones (Alto, Medio y Bajo Balsas). El 70.6% de su población se concentra en el Alto Balsas, ocasionando un impacto negativo sobre la calidad de sus recursos hídricos y de sus ecosistemas, entre ellos la vegetación ribereña. Cuando estos ecosistemas son perturbados, los ciclos biogeoquímicos se alteran parcial o totalmente y su calidad se afecta, razón por la cual la calidad de los ecosistemas debe evaluarse mediante el uso de diversos indicadores. El propósito de esta investigación fue establecer la calidad ambiental de los sistemas ribereños en una subcuenca del Alto Balsas mediante índices de vegetación y su relación con parámetros edáficos y de la vegetación, bajo el supuesto de que sitios con valores altos de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y EVI (Índice de Vegetación mejorado) se relacionan positivamente con lugares que contienen más C en biomasa aérea y suelo, lo que indica mejor calidad del ambiente ribereño. Como parte del método, la cuenca de estudio se delimitó con un sistema de información geográfica (SIG) y se procesó un modelo hidrológico (modelo Strahler); posteriormente se buscó información edáfica en tesis realizadas en sistemas ribereños para estructurar una base de datos georreferenciada con datos de conductividad eléctrica, pH activo, densidad aparente, MOS, COS, Nitrógeno total y relación C/N. Los indicadores de productividad (biomasa aérea y su contenido de carbono) se obtuvieron a partir de parámetros dasométricos (altura total, diámetro normal y volumen del fuste) reportados en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de los años 2009 al 2014, además del factor de expansión de biomasa y la densidad de madera reportadas en diversas publicaciones, mientras que el indicador ecológico (Condición de la vegetación) se realizó a partir de características evaluadas en campo como vigor y daño de la vegetación, también reportados por el INFyS. Los indicadores biofísicos (NDVI y EVI) se obtuvieron procesando imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI TIRS, los cuales se integraron dentro de un SIG con los demás indicadores para relacionarlos espacialmente, la cual fue procesada dentro de un modelo de análisis de componentes principales para identificar los

indicadores de calidad ambiental. De los resultados, se encontró que uno de los sitios con menor contenido de carbono orgánico de suelo ( $29.28 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), pH moderadamente ácido (5.31), y más contenido de Carbono en biomasa aérea ( $432.11 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), se relacionó con una condición de la vegetación alta, además de un NDVI (0.6) y EVI (0.3) más altos por lo que se clasificó con calidad ambiental alta, por el contrario, sitios con pH menores a 5.2 tienden a acumular el COS y tener menos carbono en biomasa aérea, por lo que su calidad ambiental disminuye junto con el NDVI y EVI.

## **Abstract**

The Balsas basin is subdivided in three regions (Alto, Medio, and Bajo Balsas) The 70.6% of their population it's mainly from the Alto Balsas, which makes a negative impact on the quality of the water resources and their ecosystems, one of them being the riparian vegetation. When those ecosystems are disturbed, it can partially or fully alter the biochemical cycles, and it affects their quality. Because of this reason, the quality of these ecosystems should be evaluated by using different indicators. The purpose of this investigation was to establish the environmental quality of the riparian systems in a subbasin of the Alto Balsas through vegetation indices and their relationship with edaphic parameters and its vegetation, under the assumption that places with high values of NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) and EVI(Improved Vegetation Index) are related positively with places that contain more C in aerial biomass and soil, which indicates better quality of the riverside environment. As part of the method, the Cuenca was delimited with a geographic information system (SIG) and processed a hydrological model (Strahler model); subsequently, edaphic information was sought in thesis realized in riparian systems to structure a georeferenced database with data about electric conductivity, active pH, apparent density, MOS, COS, total Nitrogen, and C/N relationship. The productivity indicators (aerial biomass and its carbon content) are obtained from dosimetric parameters (Total height, normal diameters and stem volume) reported in the Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) of the years 2009 to 2014. Also, from the biomass expansion factor and the density of reported wood in diverse publications. On the other hand, the ecological indicator (Condition of the vegetation) was made from the characteristics evaluated in the field like the vigor and damage to the vegetation, also reported by the INFyS. The biophysics indicators (NDVI and EVI) were obtained by processing images from the satellite Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI TIRS, which were integrated inside of a SIG with the other indicators to relate them spatially. That was processed inside of an analysis model of the principal components to identify the indicators of environmental quality. From the results it was found that one of the places with the least soil organic carbon (29.28

Mg ha<sup>-1</sup>), pH moderately acid (5.31) and more carbon content in aerial biomass (432.11 Mg ha<sup>-1</sup>), it was related with a condition of high vegetation, a NDVI (0.6) and EVI (0.3) higher. Because of that, it was classified as high environmental quality. On the opposite side, places with pH lower than a 5.2 are likely to accumulate COS and have less carbon in aerial biomass. This results in its environmental quality decreasing together with the NDVI and EVI.

## 1. Introducción

En México se reconocen trece regiones hidrológicamente delimitadas, las cuales están ajustadas para incluir municipios enteros y facilitar el manejo administrativo de los programas. Entre estas cuencas hidrológicas se encuentra la del Balsas, misma que comprende parcial o totalmente ocho entidades federativas y 420 municipios, los cuales ocupan una superficie equivalente al 6% del territorio nacional (CONAGUA, 2018). La cuenca del Balsas se divide en tres subregiones (Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas) que concentran casi 10% de la población de la República Mexicana. Del total de esta población 70.6% se encuentra en la subregión Alto Balsas, lo que ha ocasionado históricamente un impacto negativo sobre la calidad del recurso hídrico y de los ecosistemas que se distribuyen dentro de la cuenca (Handal *et al.*, 2017). Como ejemplo, los principales afluentes de la cuenca del Alto Balsas se han caracterizado por poseer volúmenes altos de contaminación, motivo por el cual el Tribunal Latinoamericano del Agua (2011) conminó a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales a emitir la Declaratoria Oficial (DOF: 06/07/2011), donde se señalan los volúmenes de descargas de aguas residuales en toneladas día<sup>-1</sup> (Declaratoria, 2011). Así mismo el índice global de vulnerabilidad por cambio climático desarrollado por IMTA (2015), señala que esta región presenta un alto grado de vulnerabilidad hídrica.

Además de la problemática del recurso hídrico, Valencia (2015) indicó que existen fuertes procesos de erosión generados por la combinación de fuertes precipitaciones y una severa deforestación, lo que ha generado la alteración de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, ocasionando un menor rendimiento en la producción agrícola y pecuaria, además de la pérdida de la biodiversidad de sus ecosistemas, entre ellos la vegetación ribereña. Por sus atributos ecológicos, los ecosistemas de ribera han sido identificados como elementos valiosos de los sistemas fluviales, dada su estrecha relación con la calidad del agua, que, a su vez,

también dependen del estado de salud de los suelos que se distribuyen en sus márgenes (Magdaleno y Martínez, 2014).

La falta de información y estudios de los ambientes ribereños hace que cada vez sea mayor la presión sobre ellos. Entre las actividades de origen antrópico que más afectan la dinámica de los ambientes de ribera están el cambio de uso de suelo del sector forestal hacia un uso agropecuario o urbano, lo que ha derivado entre otros procesos, la disminución de la calidad del agua y la tasa de secuestro de CO<sub>2</sub>, lo que ha ocasionado a su vez una alteración de la productividad y calidad ambiental de la vegetación presente (Ramírez, 2010).

La vegetación ribereña se relaciona fuertemente con la calidad del suelo, que puede inferirse indirectamente a través del uso de indicadores (Salomé *et al.*, 2016), entre los que destacan la densidad aparente, la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la materia orgánica del suelo, el pH, la conductividad eléctrica, actividad enzimática y el contenido de carbono y nitrógeno en biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo, este último considerado como uno de los indicadores de mayor importancia debido a que se relaciona con las demás propiedades, (Trujillo *et al.*, 2018). Esta vegetación cuando se cumple también funciones ecológicas muy importantes, como el secuestro y almacén de C en forma de CO<sub>2</sub> capturado de la atmósfera mediante la fotosíntesis (Chapin *et al.*, 2011), lo que mantiene en equilibrio los flujos de este compuesto que se desprenden por descomposición de la materia orgánica, quema de combustibles fósiles, incendios, entre otros. Cuando estos ecosistemas son perturbados o destruidos, las reservas de este elemento en sus diferentes compartimentos, entre ellos la biomasa aérea, son alteradas de forma parcial o total; razón por la cual, el C de la biomasa aérea ha sido utilizado recientemente como un buen indicador de la productividad y calidad de los ecosistemas (Birdsey *et al.*, 2013; Bolaños *et al.*, 2017).

Los estratos arbóreos (fuste, ramas y follaje) y herbáceo reúnen la mayor biomasa y, por lo tanto, de C donde su capacidad de almacenamiento y captura dependen de la comunidad vegetal, el clima, la humedad, especie, calidad del sitio y densidad de la madera (Gárete y Blanco, 2013).

Con el avance de la tecnología, la teledetección constituye actualmente una herramienta esencial para el análisis de la dinámica de la vegetación, ya sea en la agricultura, ecología y otras ciencias ambientales. La teledetección pone a disposición datos de observación por satélite de distintas variables de ecosistemas terrestres proporcionados por diferentes sensores, entre los que destacan los índices de vegetación, como el NDVI y el EVI (García, 2015). Estos índices de vegetación son medidas cuantitativas, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal (salud vegetal) (Mayorga *et al.*, 2019) y son ampliamente utilizados y aplicados al estudio de cambios de cobertura y uso de suelo, monitoreo de flujos de elementos, calidad de agua y biomasa aérea a través de la relación entre los valores del índice y parámetros del objeto de estudio (Cortés *et al.*, 2014).

Es por lo anterior que el presente trabajo pretende conocer la calidad ambiental de la vegetación ribereña distribuida dentro de una Cuenca del Alto Balsas mediante el uso de índices de vegetación, indicadores edáficos y ecológicos (carbono en biomasa aérea como indicador de productividad), lo que permitirá conocer e identificar los sistemas ribereños con mayor potencial de captura de carbono y en consecuencia de mejor calidad ambiental.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Calidad ambiental

La calidad ambiental se entiende como las condiciones óptimas que rigen al comportamiento del espacio habitable en términos de confort asociados a lo ecológico, biológico, económico-productivo, sociocultural, tipológico, tecnológico y estético en sus dimensiones espaciales, por lo tanto, es producto de la interacción de estas variables para la conformación de un hábitat saludable, confortable y capaz de satisfacer los requerimientos básicos de sostenibilidad de la vida humana individual y en interacción social dentro del medio urbano (Luengo, 1998). Por otro lado, el Observatorio Ambiental de la Unión Europea (2010) define la calidad ambiental como el conjunto de propiedades, elementos o variables del medio ambiente, que hacen que el sistema ambiental tenga mérito suficiente como para ser conservado. Es decir, las características propias del medio que por la acción de la naturaleza y el hombre preservan sus condiciones en niveles óptimos para la vida armónica de todos los seres vivos, razón por la cual, deben ser considerados por la humanidad como prioridad de conservación.

La evaluación de la calidad ambiental mediante el uso de indicadores permite saber el estado en que se encuentra el ambiente biofísico y los recursos naturales generando información cuantificable que ayudan a explicar el cambio de estas condiciones a través del tiempo (Farrow y Winograd, 2001; citado por Rodríguez *et al.*, 2013).

### 2.2 Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales son fundamentales para evaluar la salud de los ecosistemas y así generar, almacenar y analizar información (Rodríguez *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2017). Un indicador describe situaciones de un espacio en un



momento dado, es decir son indicadores espaciotemporales que proveen, condensan, sistematizan y ordenan información cuantitativa y cualitativa, presentan directrices, estadísticas, categorías clasificatorias y situaciones predictivas que brindan señales de posibles escenarios futuros que pueden ser prácticos y realistas (Bao y Zou, 2018).

Estos a su vez, proporcionan datos y comparaciones útiles para contribuir en la sostenibilidad de los ecosistemas, en la toma de decisiones y formulación de políticas ambientales, por lo que constituyen una herramienta básica de información y seguimiento de los procesos que se originan en el medio natural, social y económico (Wen *et al.*, 2017). Además, proporcionan información de forma sencilla y fácil de entender estadísticamente a través de un modelo o conjunto de supuestos que relacionen el indicador con fenómenos más complejos comunicando información científica y técnica sustentada en la problemática ambiental (Neher *et al.*, 2017). Por lo tanto, los indicadores ambientales enfocados en los recursos naturales miden y evalúan la calidad del ambiente, definen el uso y aprovechamiento de éstos, con la finalidad de disminuir la contaminación o degradación de los ecosistemas, dando seguimiento al impacto ambiental biofísico y socioeconómico, siendo reconocidos como una necesidad fundamental a nivel local, regional, nacional e incluso internacional (Neher *et al.*, 2017).

Los objetivos para el desarrollo de indicadores ambientales para alcanzar el desarrollo sustentable son: a) proteger la salud humana y el bienestar general de la población, b) garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos ecosistémicos y c) conservar la integridad de los ecosistemas. Estos indicadores pretenden convertirse en una herramienta para mejorar la base de información ambiental y la percepción pública sobre los problemas ambientales, favorecer la integración de los factores ambientales en las políticas económicas y realizar análisis comparativos entre países y regiones (Neher *et al.*, 2017).

La información utilizada para construir indicadores ambientales espaciotemporales generalmente es amplia y diversa, por lo que se requiere un marco conceptual que permita estructurar la información y facilidad de acceso e interpretación (Bao y Zou, 2018).

Existen diversos modelos conceptuales de tipo causa-efecto en cuanto a evaluación ambiental basada en indicadores: los modelos fuerza motriz-estado-respuesta (DSR), fuerza motriz-presión-estado-impacto-respuesta (DPSIR) y presión-estado-respuesta (PER), este último es uno de los más utilizados, debido a su simpleza, facilidad de uso y posibilidad de aplicación a diferentes niveles, escalas y actividades humanas (OECD, 2001). Obedece a una lógica, donde, las actividades humanas ejercen presiones sobre diversos atributos del medio biofísico (estado), alterándolos en mayor o menor medida. La población identifica estas variaciones y puede decidir (objetivos de política) la adopción de medidas (respuestas) que tratarían de corregir o prevenir las tendencias negativas detectadas. Estas medidas se dirigen de manera cautelar contra los mismos mecanismos de presión, o bien, con carácter corrector, directamente sobre los factores afectados del medio (Niemeijer y De Groot, 2008a, 2008b).

Con base en las características de cada modelo conceptual, los indicadores ambientales se pueden clasificar en tres grupos principales: a) indicadores ambientales hídricos, b) edáficos y c) ecológicos, siendo estos unos de los atributos más perturbados por actividades humanas dentro de un ecosistema, pueden ser evaluados por medio de atributos dasométricos y mediante índices de vegetación a través de la percepción remota (teledetección).

## 2.3 Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas biofísicas cuantitativas que estiman el vigor de la vegetación. Usualmente son una combinación o cociente de bandas espectrales que producen la cantidad de verdor de la vegetación dentro de un píxel. El verdor se entiende como el valor que representa la actividad fotosintética de las plantas, lo que permite, estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación (Díaz, 2015). Estos índices, se calculan a partir de la luz reflejada por la vegetación en el intervalo del espectro visible y del infrarrojo cercano (Chuvieco, 1991).

La vegetación saludable interacciona con el espectro electromagnético donde la clorofila de las hojas absorbe una gran cantidad de energía lumínica para el proceso de la fotosíntesis. Las zonas del espectro visible del rojo y el azul son absorbidas y el verde es reflejado por la clorofila, mientras que el infrarrojo cercano es fuertemente reflejado por las estructuras internas de la hoja (Silleos *et al.*, 2006), lo que da lugar al uso estas regiones del espectro electromagnético, expresado en las imágenes de los sensores transportados por satélite, para comprender el comportamiento y condición de la vegetación. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación (Abaurrea, 2013). Entre los índices más empleados se encuentran:

1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI: Este índice ha sido uno de los más utilizados por su facilidad de interpretación para monitorear la dinámica de la vegetación. Fue diseñado para producir un índice espectral que separa la vegetación verde de su fondo brillante del suelo y de otro tipo de coberturas (Silleos *et al.*, 2006), con base en el cálculo de la relación entre la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del rojo (Red), cociente que produce una escala de medición entre -1 y 1, donde los valores cercanos a cero 0 se entienden como superficies con poca vegetación; hacia valores

negativos representan superficies sin ningún tipo de vegetación (nieve, cuerpos de agua o asfalto), y a partir de 0.2 se interpreta como zonas con vegetación, que en tanto sus valores sean más próximos a 1, se entiende como un dosel más saludable pro su mayor actividad fotosintética. Otra razón del mayor uso de este índice se debe a que minimiza los errores causados por la topografía y porque se pueden realizar comparaciones en diferentes épocas para determinar los cambios estacionales de la vegetación en un ecosistema (Meneses, 2012).

2. Índice de Vegetación Mejorado EVI: Este índice es un NDVI modificado con un factor de ajuste del suelo "L" que corresponde a valores de ajuste sobre el dosel de la vegetación y dos coeficientes C1 y C2, que describen el uso de la banda azul en corrección de la banda roja para dispersión de aerosol atmosférico, también corrige las distorsiones de la atmósfera causadas principalmente por nubes que pueden alterar la captura de datos de los sensores, este índice mejora la sensibilidad para detectar regiones de alta biomasa y reduce la influencia de la atmósfera (Huete *et al.*, 1999; Holzman *et al.*, 2013).

Ambos índices permiten identificar regiones donde la vegetación esta saludable o presenta algún tipo de perturbación. Una de las razones por las que la vegetación podría presentar algún grado de estrés que altere su estado de salud, es que el suelo también esté sufriendo perturbaciones en sus propiedades físicas, químicas o biológicas, alteraciones que reducen su fertilidad.

## 2.4 Suelo

La FAO (2015) define al suelo como un recurso no renovable a escala humana, constituido por materiales no consolidados de origen mineral y orgánico sometidos a una continua transformación por factores genéticos y ambientales actuando en el tiempo confiriéndole características físicas, químicas y biológicas específicas para cada región climática.

Dentro de los factores ambientales como el clima y/o la biota, contribuyen en los procesos físicos de alteración de las rocas, lo cual implica la reducción del tamaño de las partículas, sin ninguna alteración en su composición química y son causados por ciclos de hielo-deshielo, lluvia y otros efectos ambientales; mientras que los procesos de intemperismo químico son originados por la separación de las partículas minerales de las rocas que llevan a su alteración o destrucción y la resíntesis a compuestos sólidos estables se deben, principalmente, a la acción del agua, el oxígeno, el dióxido de carbono y los compuestos orgánicos (Budhu, 2007; citado por García *et al.*, 2012). Los cambios biológicos son realizados por la comunidad que habita en el suelo: flora (plantas), macrofauna (invertebrados), mesofauna (artrópodos, anélidos, nemátodos y moluscos), microfauna (protozoos y algunos nemátodos) y microbiota (bacterias, actinomicetos, hongos y algas), responsable esta última del 80-90% de los procesos biológicos del suelo. Estos cambios biológicos son: la biodegradación y el aporte de materia orgánica, la producción de CO<sub>2</sub> en la respiración, la intervención en la movilidad de los ciclos biogeoquímicos de los elementos y los efectos mecánicos de los animales y plantas, así como el fraccionamiento de las rocas por las raíces (García *et al.*, 2012).

El suelo se mantiene en una constante actividad e interacción a partir de condiciones del relieve, climáticas, del agua, aire, fauna y vegetación. Su principal función es sostener la biodiversidad del planeta hospedando a la cuarta parte de

ésta y el desarrollo de la vegetación depende del suelo por la adquisición de agua y nutrientes, razón por la cual su estudio es importante para entender la dinámica del suelo-vegetación (Lal *et al.*, 2012).

La evaluación de la calidad y estado de salud edáfica es un proceso de conocimiento de la dinámica que presentan sus propiedades. Para la evaluar este sistema es necesario disponer de indicadores que permitan determinar su calidad ambiental y que a largo plazo genere un manejo adecuado del mismo. Los indicadores que se utilizan generalmente corresponden con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, mismas que deben cumplir ciertas condiciones, entre las que destacan: a) fáciles de medir, b) que midan los cambios en sus funciones, c) que abarquen sus propiedades físicas, químicas y biológicas, d) que sean accesibles a los evaluadores y aplicables en condiciones de campo y e) que sean sensibles a las variaciones climáticas y de manejo. Asimismo, deben permitir analizar la situación actual del suelo con respecto a la funcionalidad específica que se evalúa, identificar los puntos críticos respecto de su sustentabilidad, prever los impactos de una intervención y minimizarlos, todo ello con el objetivo de ayudar a tomar decisiones adecuadas para cada tipo de suelo (Etchevers *et al.*, 2009).

Entre los indicadores físicos se encuentran la textura, el color, la densidad aparente y real, la conductividad hidráulica, la profundidad, la estructura y la capacidad de retención de agua, las cuales varían de acuerdo con las características predominantes de la zona de estudio.

De las propiedades químicas, que en diversos estudios han demostrado su importancia, son las que inciden en la relación suelo-planta como la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Etchevers *et al.*, 2009), también se encuentran la capacidad de

intercambio catiónico que reducen la presencia de cambios drásticos en el pH y la disminución en la disponibilidad de nutrimentos en el suelo (Navarrete *et al.*, 2011).

En 1994, Doran y Parkin, propusieron como indicadores químicos el contenido de materia orgánica (MO), carbono y nitrógeno orgánico, pH, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total (Nt), fósforo disponible (P) y cationes Ca<sup>++</sup> y K<sup>+</sup> disponibles.

La importancia de las propiedades biológicas del suelo se relaciona con la descomposición de materia orgánica derivada de los residuos vegetales y animales, así como el reciclaje de ésta, debido a que los subproductos influyen directamente en las propiedades físicas y químicas del suelo. Doran y Parkin (1994), seleccionaron como indicadores biológicos al carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, respiración del suelo, riqueza y abundancia de fauna edáfica, entre otros (Navarrete *et al.*, 2011).

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de su calidad y es el principal determinante de la actividad biológica del suelo, es una fuente de nutrimentos y energía que requieren los microorganismos para su desarrollo y metabolismo. Estos microorganismos producen enzimas que degradan moléculas que al descomponerse rompen física y químicamente los detritos, que al fragmentarse se convierten en compuestos orgánicos y por último a nutrientes inorgánicos y CO<sub>2</sub> (Baumann *et al.*, 2013).

El carbono es un elemento fundamental en el control de la tasa de ciclaje del nitrógeno, los suelos en los que el carbono coincide con el ingreso de nitrógeno vía ciclaje, mantienen el nitrógeno dentro del sistema, en cambio, cuando los suelos están saturados de nitrógeno, pero deficientes en carbono, están sujetos a perder nitrógeno hacia el ambiente (Goulding *et al.*, 2001; citado por Cantú y Yáñez, 2017).

El nitrógeno es imprescindible para el crecimiento microbiano y la degradación de la materia orgánica, su alto contenido causa que los microorganismos cuenten con suficiente sustrato para una mayor velocidad de mineralización, debido a que satisfacen los requerimientos de N, siendo un factor no limitante para ellos, pero si su contenido es bajo, la tasa de descomposición de la materia orgánica disminuye drásticamente, y la tasa de mineralización de carbono orgánico dependerá de la adición de fuentes nitrogenadas (Ferrera y Alarcón, 2001).

La biomasa microbiana asimila el nitrógeno en una cantidad determinada que depende de la relación C/N, es decir, la cantidad de N requerida es 20 veces menor que la de C. La relación C/N es un índice de la calidad del sustrato orgánico del suelo que indica la tasa de nitrógeno disponible para las plantas, cuando hay una concentración baja de compuestos de C fácilmente degradables y una cantidad de N mayor, con respecto a la requerida por la biomasa microbiana habrá una mineralización neta de N con liberación de N inorgánico disponible para las plantas (Diacono y Montemurro, 2010; Gamarra *et al.*, 2017).

La importancia de los indicadores cualitativos radica en un enfoque alternativo para obtener indicadores de calidad del suelo, dentro de los cuales pueden considerarse características que revelen posibles cambios, esta evaluación se basa en atributos visuales que reflejen disminuciones en la calidad de los procesos del suelo. Etchevers *et al.*, (2009), proponen como indicadores cualitativos: la cobertura y vigor de la vegetación, formación de costras, la pendiente, los colores oscuros en el suelo, la profundidad del horizonte superficial, la presencia de rocas en la superficie y la cantidad de raíces expuestas. La información que resulte de la evaluación de la calidad del suelo permitirá conocer su dinámica y así dar un diagnóstico de cómo afecta a la salud de la vegetación.



La capa edáfica es un factor determinante para el desarrollo de los sistemas forestales, que, como en el caso de la vegetación de ribera, en muchas ocasiones se ve alterada en diferente grado al modificar su aptitud natural por procesos de cambio de uso del suelo.

## **2.5 Sistemas Ribereños**

Este ecosistema se encuentra junto o directamente influenciado por un cuerpo de agua (río, arroyo o lago). Esta vegetación cubre las zonas de los márgenes de los ríos donde las características del suelo, sobre todo el nivel freático, están influidas por la dinámica fluvial, razón por la cual constituye un componente integral del ecosistema fluvial debido a su gran importancia ecológica al generar un ecotono entre el ecosistema terrestre y acuático (Elosegi y Díez, 2009; Sabater y Elosegi, 2009). Dada su naturaleza lineal, esta vegetación funciona como corredor biológico que reduce el efecto de isla al conectar bosques que en algunos casos se encuentran aislados (Naiman *et al.*, 1993). Estos corredores controlan los flujos de agua, sedimentos y nutrientes del entorno estableciendo gradientes de humedad y temperatura. Por tales características, uno de los indicadores más usados para describir la zona ribereña está en sus comunidades vegetales. Para proteger los recursos ribereños se establecen franjas de amortiguamiento, ubicadas al lado de los cauces.

La vegetación ribereña presenta diversas funciones ecosistémicas que pueden ser divididas en tres categorías interrelacionadas entre sí: ecología, geomorfología e hidrología (Hansen *et al.*, 2010).

- En las funciones ecológicas está el mantenimiento de la calidad de agua y del ciclo de nutrientes, el control de la temperatura del agua y sombreado del cauce, la generación de hábitats terrestres y acuáticos que contribuyen al

aumento de la biodiversidad y conectividad como corredores de dispersión y movimiento.

- Las funciones geomorfológicas se refieren a la estabilidad de las orillas del cauce, regulación de flujos hidrológicos y regulación de las inundaciones (acumulación/transporte de sedimentos).
- Las funciones hidrológicas se relacionan con la hidráulica y la regulación de la descarga que tiene el cauce, la vegetación ribereña facilita la conectividad hidrológica lateral longitudinal, y mantiene las condiciones hidrológicas como la modificación de la capacidad de almacenamiento y recarga del acuífero.

Debido a las alteraciones de origen antropogénico a las que son sometidos estos sistemas, se impactan significativamente la diversidad tanto a nivel de abundancia como en la composición vertical en las zonas de ribera, viéndose simplificados y atenuados los diferentes estratos, además de aumentar la mortalidad de plántulas en aquellos lugares perturbados (Canizales *et al.*, 2010). Este tipo de vegetación al ser un sistema conformado por comunidades forestales es reservorio de nutrimentos esenciales, entre los que se encuentra el carbono, que es almacenado en la biomasa aérea, por lo que es un nutrimento importante en la productividad de los ecosistemas y su entendimiento ayuda a un manejo forestal sustentable y determinación de los almacenes de C forestal. (Cutini *et al.*, 2013).

## **2.6 Biomasa aérea y Carbono en biomasa aérea**

La biomasa se refiere a la cantidad de materia viva de origen vegetal o animal presente en un momento dado en un área específica (García y Martínez, 2014) y se usa para medir la cantidad de nutrientes en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación, permitiendo contrastar distintos tipos de especies o

vegetación similares en diferentes sitios. La estimación de la biomasa es importante para diferentes tipos de estudios, entre ellos, los inventarios de sumideros de CO<sub>2</sub>, y la productividad primaria neta de la vegetación (Anaya *et al.*, 2008).

Este compartimento es fundamental para saber la importancia que tienen los bosques en cuanto a captura de carbono y regulación de los ciclos biogeoquímicos, por lo tanto, al conocer el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea, mediante modelos es posible estimar la cantidad que llega a la atmósfera (Ospina *et al.*, 2013).

Además de los métodos dasométricos para medir la biomasa aérea, también es posible estimarla con técnicas de percepción remota óptica que miden la actividad fotosintética y mediante modelos estadísticos, se establece la relación entre las respuestas espectrales y las mediciones de biomasa de las muestras evaluadas con trabajo de campo, las cuales están contenidas en los registros de inventarios forestales. Así el empleo de la teledetección para evaluar la biomasa aérea es considerado como un método no destructivo (Foody *et al.*, 2003).

El componente aéreo de la vegetación es uno de los principales reservorios de biomasa; su producción y su presencia en sus estructuras son dos características relevantes para su estimación en especies forestales (Pardos, 2010). La capacidad de los bosques para almacenar carbono en biomasa aérea varía por su composición florística, edad y densidad de población en cada estrato de las coberturas vegetales (Laumonier *et al.*, 2010).

En años recientes las herramientas cada vez más utilizadas para estudiar distintas áreas y coberturas son los sistemas de información geográfica (SIG), los cuales fueron desarrollados en la década de 1970 y; permiten el manejo de grandes

volúmenes de datos. Lo que antes sólo se representaba en mapas impresos, se transformó a un formato digital para su análisis electrónico. Entre las capacidades más importantes que se generaron con el desarrollo de estas tecnologías, se encuentra tener datos georreferenciados actualizados e integrar múltiples conjuntos y procesos de información, de manera rápida y eficiente (Gutiérrez, 2015). De este modo los SIG y la teledetección procesada en ellos abren un camino para facilitar el estudio de las amplias áreas en la superficie terrestre, reduciendo el tiempo y el costo que generan los estudios en campo. Una manera más eficaz del estudio de los sistemas es tomando como unidad de estudio la cuenca hidrográfica ya que presenta mayor factibilidad de delimitar el territorio en torno a un eje hídrico común.

## **2.7 La Cuenca como unidad de estudio**

Las cuencas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado punto de salida de la cuenca que puede ser un lago o el mar (SEMARNAT, 2013). Las cuencas hidrográficas son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socioecológicos están íntimamente ligados entre sí, en ellas el manejo se entiende como un proceso de planeación, implementación y evaluación de acciones mediante la participación organizada e informada de la población. En estos territorios existe una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistema acuático y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes).

Las cuencas hidrográficas permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, así como cuantificar e identificar los impactos acumulados de las actividades humanas

o de procesos externos (sedimentos, contaminantes y nutrientes) a lo largo del sistema de corrientes o red hidrográfica, que afectan positiva o negativamente a la calidad y cantidad del agua, a la capacidad de adaptación de los ecosistemas y a la calidad de vida de sus habitantes (SEMARNAT, 2013).

Las cuencas hidrográficas son consideradas como la unidad territorial básica para la planeación y el manejo de los recursos naturales, así como una dimensión espacial y temporal fundamental para la adaptación ante el cambio climático (Biestroek *et al.*, 2009; SEMARNAT, 2013).

### **3. Planteamiento y Justificación**

Por su alta concentración urbana, los ecosistemas naturales de la Cuenca del Alto Balsas han sufrido perturbaciones debido a la demanda de servicios. Entre estas alteraciones se encuentra la pérdida de bosques por la tala inmoderada, causando alteraciones en los regímenes de humedad y temperatura, patrones de lluvias y, por ende, adelgazamiento de las corrientes fluviales, lo cual ha provocado un grave deterioro de los ecosistemas de ribera y, en consecuencia, se han alterado los flujos naturales de nutrientes esenciales como el C, a través de los diferentes compartimentos del ecosistema (suelo, agua y vegetación), lo que ha repercutido en una pérdida de biomasa aérea. La estimación de biomasa y del C en ella es importante ya que representan la productividad y estado de salud de la vegetación presente en un ecosistema. Es por lo anterior que, al estudiar los contenidos de C en el suelo y biomasa aérea en relación con parámetros edáficos y ecológicos de un ambiente de ribera, junto con la aplicación de técnicas de teledetección (NDVI y EVI), el presente trabajo contribuirá en el conocimiento de la dinámica suelo planta, además de identificar sitios con mayor potencial de captura de C y entender espacialmente la calidad ambiental que tienen los ecosistemas ribereños de una Subcuenca localizada en el Alto Balsas, México.

Para llevar a cabo el presente proyecto, se han planteado las siguientes preguntas de investigación:

- 1) ¿Los índices de vegetación tendrán relación con los contenidos de carbono en biomasa aérea y servirá esta relación para ubicar en imágenes de satélite y mapas los sitios con mejor calidad ambiental?
  
- 2) ¿Existirá relación entre los valores de vigor de la vegetación con los factores edáficos que funcionan como indicadores de la fertilidad del suelo?

- 3) Con los atributos edáficos, espectrales y de la vegetación ¿Se podrá proponer un índice que ayude a identificar los ecosistemas de ribera con mejor calidad ambiental?

Con base en las preguntas de investigación planteadas, se pueden identificar como variables independientes a los índices de vegetación, al contenido de carbono en biomasa aérea y a los factores edáficos y como variable dependiente a la calidad ambiental de los sistemas ribereños.

## **4. Hipótesis**

Si el vigor de la vegetación es un parámetro biofísico del estado de salud de la vegetación, y la biomasa y el C parámetros de la productividad de los ambientes ribereños, que reflejan su calidad, entonces los valores más altos de NDVI y EVI se relacionarán positivamente con los contenidos de C en biomasa aérea y en suelo, los que a su vez corresponderán con sitios de mejor calidad ambiental.

## **5. Objetivos**

### **General**

Obtener los índices de vegetación NDVI y EVI y conocer su relación con parámetros edáficos y de la vegetación para establecer la calidad ambiental de los sistemas ribereños en una subcuenca dentro de la Cuenca del Alto Balsas, México.

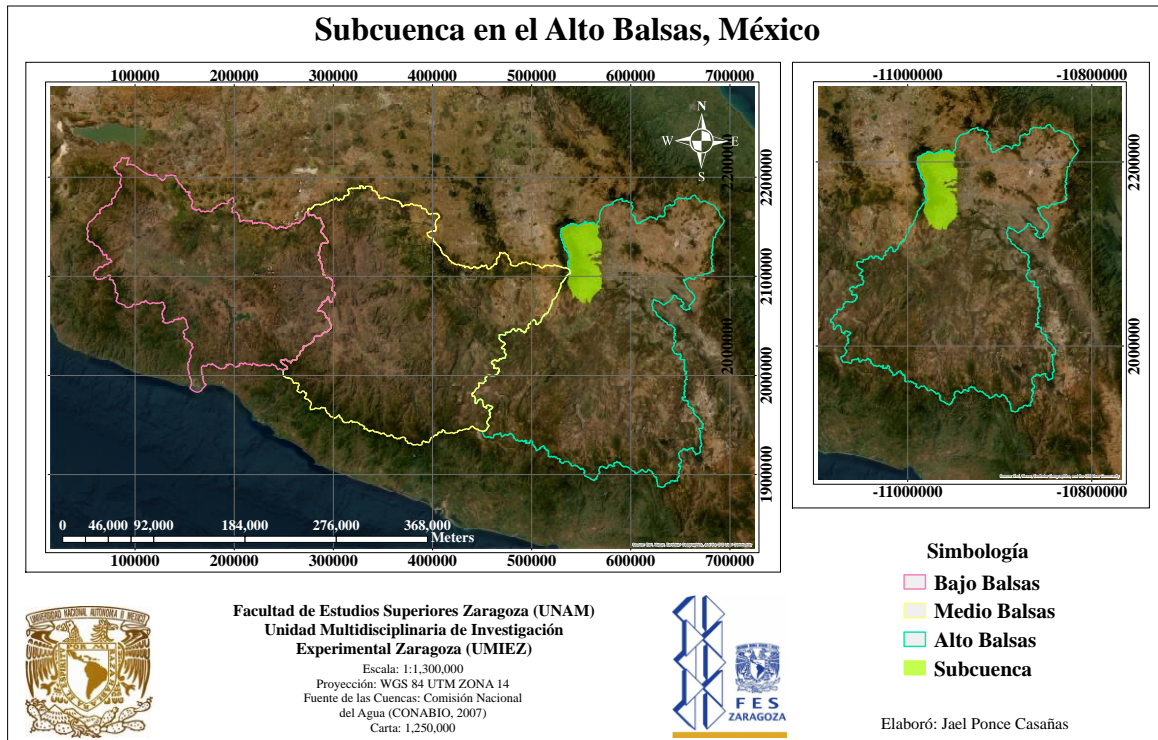
## **Particulares**

1. Obtener, de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos de los años 2009 a 2014 los datos dasométricos y útiles para estimar los contenidos de biomasa aérea y carbono de la biomasa aérea.
2. Estructurar, a partir de bases de datos históricas, información de atributos edáficos de ambientes ribereños (carbono orgánico del suelo, nitrógeno total, densidad aparente, pH activo y conductividad eléctrica) para conocer su relación con la biomasa aérea, carbono de la biomasa aérea e índices de vegetación.
3. Obtener y procesar imágenes Landsat 7 ETM+ de los años 2009, 2010, 2011 y 2013 y Landsat 8 OLI TIRS del año 2014 para obtener los Índices de Vegetación (NDVI y EVI), identificando los valores de los sitios de los atributos edáficos y ecológicos
4. Identificar, de los parámetros edáficos y de la vegetación, las variables robustas que más influyen en la calidad ambiental de los sistemas ribereños.



## 6. Material y Método

### 6.1 Zona de estudio



**Figura 1. Cuenca de estudio dentro del Alto Balsas, México**

El río Balsas es la cuenca hidrológica más importante de la vertiente del Pacífico Mexicano, se divide en tres subregiones hidrológicas principales: a) cuenca de los ríos Atoyac y Mixteco o del Alto Balsas, b) cuenca del río Cutzamala y del Medio Balsas y c) cuenca del Bajo Balsas. La primera subregión, a su vez se subdivide en siete subcuencas: las Cerradas orientales, Alto Atoyac, Bajo Atoyac, Nexapa, Amacuzac, Tlapaneco y Mixteco (CONAGUA, 2010).

La subregión Alto Balsas integra 333 municipios (79% del total regional) de los estados de Tlaxcala (56), Puebla (127), Morelos (33), Oaxaca (78) y Guerrero (23). Dentro de esta cuenca, uno de sus principales afluentes, el río Atoyac, está formado

por varios escurrimientos que provienen de la vertiente sur de la Faja Volcánica Transmexicana y que descienden del volcán Iztaccíhuatl, desde altitudes de 4,000 msnm, entre los estados centrales de México y Puebla. Recibe por su margen izquierda las aguas del río Mixteco y la confluencia de ambos crean el río Balsas. A partir de esta unión, el río Balsas recibe a lo largo de su recorrido los nombres de Poblano, Grande, Mezcala y Balsas (CONAGUA, 2010).

La depresión del río Balsas se encuentra delimitada por dos provincias fisiográficas o morfotectónicas: la Faja Volcánica Transmexicana al norte y La Sierra Madre del Sur al sur; y una subprovincia geológica: la Sierra Norte de Oaxaca al oriente. Un 67.8% de la superficie de la depresión se encuentra dentro de la provincia de la Sierra Madre del Sur y el 32.2% restante se encuentra en el territorio cubierto por la Faja Volcánica Transmexicana. Las formaciones de la Faja volcánica Transmexicana, integradas predominantemente por calizas, esquistos y areniscas del Cretácico inferior, estuvieron sujetas a levantamientos por plegamientos y a grandes fracturas por donde se colaron materiales ígneos, que a fines del Mesozoico y principios del Cenozoico, cubrieron una ancha faja modificando profundamente el relieve. Esta inmensa estructura fisiográfica presenta una gran continuidad orográfica, puertos muy elevados y parteaguas interrumpidos, lo que terminó por convertirla en un límite climático y biogeográfico para la flora y fauna de México. La Cuenca del Alto Balsas cuenta con 24,405 km<sup>2</sup> de territorio de la Faja Volcánica Transmexicana y 21,808 km<sup>2</sup> de la Sierra Madre del Sur (Handal *et al.*, 2017).

De acuerdo con el mapa de suelos dominantes de la República Mexicana, escala 1: 400,000 (1998) del portal de geoinformación 2021 de la CONABIO, los suelos dominantes en la subregión del Alto Balsas son Phaeozems, Cambisols, Andosols, Arenosols, Leptosols y Regosols.

El volumen de precipitación en la subregión del Alto Balsas es de 45,217 mm<sup>3</sup>, con media anual de 897 mm, mínima anual de 499mm y una máxima anual 1,647 mm<sup>3</sup>. Debido a su topografía y ubicación se tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío o en otras palabras cuenta con un clima templado subhúmedo, su temperatura disminuye con la altitud a razón de 0.68°C por cada 100 m, dependiendo de la humedad relativa del aire (Fernández *et al.*, 1998), lo que puede generar cambios dentro de una misma masa forestal a lo largo de su distribución vertical en el terreno. La media es de 18 a 20° C y su evaporación anual es de 1,716 mm<sup>3</sup>, por lo que cuenta con lluvias dominantes en verano y porcentaje de lluvia invernal menor de 5% con oscilación anual en la temperatura media mensual de entre 5 y 7°C.

De acuerdo con la carta de Uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie VI (continuo nacional) de INEGI (2016), en la región del Alto Balsa se reconocen zonas de bosque, entre las que destacan: cultivado, táscate, mesófilo de montaña, pino, pino - encino, encino, encino - pino, oyamel, además de matorrales, zonas de agricultura, palmares inducidos, pastizales y pradera de alta montaña, siendo los bosques de pino y encino endémicos de esta región (Rzedowski, 1986).

Los bosques de encino son comunidades cuya altura va de 2 a 30 m, pueden presentarse como bosques puros, dominados por una o varias especies de *Quercus*, admitiendo árboles diversos de los géneros *Alnus* Mill., *Arbutus* L., *Cercocarpus* Kunth, *Crataegus* L., *Cupressus* L., *Fraxinus* L., entre otros. Este tipo de bosque se distribuye en altitudes que llegan hasta 3,100 m, y prospera en climas Cwa y Cwb. Los bosques de Pino se constituye la mayoría de las veces combinando con el encinar, la mayor parte de las masas forestales ocupan la totalidad de las partes altas de la cordillera Neovolcánica, desarrollándose principalmente entre los 1,500 y 3,000 m, varían de 8 a 35 m de altura y se encuentran en los límites entre 10 y 20°C de temperatura media anual y entre 600 y 1,000 mm de lluvia al año, lo que corresponde al tipo de clima Cw (Fernández *et al.*, 1998).

De acuerdo con Fernández *et al.*, (1998), en esta región también resaltan diversas especies distribuidas en las partes altas de los cerros, como *Bursera áptera* Ramírez, *B. fagoroides* Kunth, *B. lancifolia* Schldl., *B. morelensis* Ramírez, *B. schlechtendalii* Engl., *Actinocheita filicina* (DC.) F.A.Barkley, *Euphorbia fulva* Stapf, *Acacia bilimekii* J.F.Macbr., *A. coulteri* Benth, *A. pennatula* (Schltdl y Cham.) Bebtg, *Conzattia multiflora* (Robinson) Standl., *Croton rzedowskii* Müll, *Pithecellobium acatlense* Benth., *Tecoma stans* (L.) Juss. Ex Kunth, *Wimmeria pubescens* Radlk., con respecto a las partes bajas de los cerros y orillas de los cauces, resaltan especies como *Hauya elegans* DC., *Euphorbia fulva* Stapf, *Cedrela salvadorensis* Standl., *Bursera grandifolia* (Kunth) Engl., *B. vejar-vazquezii* Miranda, *Sideroxylon capiri* (A.DC.) Pittier, *Lasiacis divaricata* (L.) Hitch., *Dorstenia drakena* L., *Euphorbia antisiphylitica* Zucc., *Cyrtocarpa procera* Kunth, *Thevetia thevetioides* (Kunth) K. Schum y *Ceiba parvifolia* Rose.

Para la fauna endémica presente en el área de estudio, la SEMARNAT (2013) reporta en al teporingo (*Romerolagus diazí*), conejo castellano (*Sylvilagus floridanus*), conejo montés (*Sylvilagus cunicularius*), salamandras (*Pseudoeurycea leprosa* y *Chiropterotriton chiroterus*), la rana plegada (*Hyla alicata*), culebra listonada de montaña (*Thamnophis scalaris*), también se encuentran aves como la codorniz coluda (*Dendrortyx macrour*).

## 6.2 Trabajo de Gabinete

En el Anexo 3 se muestra un esquema del trabajo de gabinete sintetizado.

### 6.2.1 Obtención de la red hidrológica y delimitación de la cuenca

De la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se descargaron los modelos de elevación digital (MED) tipo terreno con resolución de 5 m de los años 2010, 2012 y 2013 con claves E14B31, E14B32, E14B42 y E14B52. Estos modelos se desplegaron en un sistema de información geográfica (SIG) y se procesó un modelo hidrológico (Castro, 2017), que incluyó el método Strahler para obtener la red de drenaje, el orden de los escurrimientos y la delimitación de la Cuenca que se tomó como unidad ecológica de estudio (UE).

### 6.2.2 Selección de factores edáficos

Mediante una búsqueda de información en tesis (Cuadro 1) realizadas en sistemas ribereños en el Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, se estructuró una base de datos georreferenciada con factores edáficos que han sido identificados como indicadores de calidad de suelos (conductividad eléctrica, pH activo, densidad aparente, materia orgánica, carbono, nitrógeno total y relación carbono/nitrógeno), contemplando solo los sitios de ribera con parámetros completos y ubicados dentro de la UE. La evaluación de estos parámetros se realizó a una profundidad de 0 a 20 cm de suelo, debido a que a esa profundidad existe la mayor actividad microbiana (Lal *et al.*, 2004) ya que al ser la zona superior, está más influenciada por el viento, la lluvia y cambios de temperatura; por ello los residuos vegetales depositados en la superficie del suelo contribuyen con compuestos orgánicos que son descompuestos por los microorganismos y, mediante la humificación y mineralización los elementos nutritivos, son aprovechados por la biota del suelo (Buckman y Brady, 1991).

**Cuadro 1. Tesis de ambientes ribereños en el PNIP realizadas dentro del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal.**

<b>Autor</b>	<b>Tema</b>	<b>Año</b>
<b>Colli Cortés Paola Magdalena</b>	<i>Actividades Arilsulfatasa y Ureasa en la fertilidad de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia.</i>	2015
<b>Cornejo Mancera Cecilia</b>	<i>Clasificación de recursos hídricos de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	2016
<b>Guerra Hernández Eloísa Adriana</b>	<i>Indicadores Hídrico-Edáficos de calidad para ambientes ribereños de la reserva de la biosfera "Los volcanes".</i>	2020

### 6.2.3 Selección de factores ecológicos

Para analizar la información y estructurar la base de datos con los indicadores ecológicos, se consideró prudente separar los parámetros de acuerdo con los siguientes apartados:

#### 6.2.3.1 Indicadores de productividad

Se descargó la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de los años 2009 a 2014 (SEMARNAT-CONAFOR, 2009-14), que se tomó como base para estimar la biomasa aérea y su contenido de carbono, a partir de los siguientes parámetros dasométricos: altura total, diámetro normal, perímetro y volumen del fuste (ecuación 1), para obtener los datos de biomasa aérea y su contenido de carbono se utilizaron las sumatorias de cada parámetro por conglomerado (A modo de ejemplo se presenta en el Anexo 1 las sumatorias de un solo conglomerado).

$$Vf = \pi \times r^2 \times h \quad (1)$$

Donde:

$V_f$  = volumen del fuste ( $m^3$ )

$\pi = 3.1416$

$r$  = radio del perímetro del árbol (m)

$h$  = altura total del árbol (m)

Obteniendo el volumen del fuste por individuo, se calculó la biomasa seca o biomasa del fuste también por individuo, para ello se necesita saber la densidad básica de la madera (DBM), esta se obtuvo mediante la revisión de literatura. Ordoñez *et al.*, (2015) reporta las densidades promedio ya sea por especie o por tipo de vegetación, así se obtuvieron los valores de las especies reportadas en el inventario.

La biomasa del fuste se calculó a partir de la ecuación 2 (González, 2008; citado por Santiago, 2018).

$$B_f = V_f \times DBM \quad (2)$$

Donde:

$B_f$  = biomasa del fuste (kg)

$V_f$  = volumen del fuste ( $m^3$ )

$DBM$  = densidad de la madera ( $kg\ m^{-3}$ )

En caso de no tener los datos de la densidad básica de la madera, la biomasa seca se puede calcular a partir del método basado en los modelos matemáticos para diferentes tipos de bosques en México (Torres y Guevara, 2002; citado por

Santiago, 2018), a partir del volumen (ecuación 3) y se utilizan los estimadores de acuerdo con el tipo de bosque (Cuadro 2).

$$Bs = (b_0) + [b_1 \times Vf] \quad (3)$$

Donde:

$Bs$  = biomasa seca (kg)

$b_0$  y  $b_1$  = estimadores

$Vf$  = volumen del fuste ( $m^3$ )

**Cuadro 2. Estimadores para el cálculo de la biomasa a partir del volumen**

Tipo de bosque	$b_1$	$b_0$
Coníferas	723.579	-175.492
Latifoliadas	506.523	0.17

Como la biomasa seca solo es la contenida en el fuste, para incorporar los componentes de ramas y follaje y obtener la biomasa total de los árboles por cada sitio se utilizó el factor de expansión de biomasa (FEB) como se muestra en la Ecuación 4 (Alpizar, 1997; citado por Santiago, 2018). Para obtener el valor del FEB se utiliza la sumatoria por conglomerado de la biomasa seca.

$$FEB = e^{[(3.213-0.506) \times (\ln Bs)]} \quad (4)$$

Donde:

$FEB$  = factor de expansión de biomasa

$e$  = exponencial

$\ln$  = logaritmo natural



$B_s$  = Biomasa seca (kg)

La ecuación 4 se aplica si el valor de la biomasa seca es menor a  $190 \text{ Mg ha}^{-1}$  y si es mayor o igual a  $190 \text{ Mg ha}^{-1}$ , el FEB es 1.74.

Para conocer la biomasa total del árbol (sin contemplar el sistema radical) se utilizó la ecuación 5 (Loguercio y Defossé, 2001; citado por Santiago, 2018).

$$B_t = B_f + FEB \quad (5)$$

Donde:

$B_t$  = biomasa total del árbol (kg)

$B_f$  = biomasa del fuste (kg)

$FEB$  = factor de expansión de biomasa

El carbono almacenado se estimó a partir de la biomasa total, multiplicándola por la fracción de carbono 0.5 (Ecuación 6) (IPCC, 1996; citado por Santiago, 2018).

$$CBV = B_t \times fC \quad (6)$$

Donde:

$CBV$  = carbono de biomasa vegetal

$B_t$  = biomasa total del árbol (kg)

$fC$  = fracción de carbono (0.5)

Los datos de productividad obtenidos para cada sitio, junto con la de los registros edáficos se desplegaron en un SIG con el fin de relacionarlos espacialmente y estructurar una sola base de datos de acuerdo con los siguientes criterios en ese orden de jerarquía: a) ubicación en la misma Cuenca, b) distancia entre ellos a no más de 100 m, c) misma altitud o que no tuvieran una diferencia de más de 100 m y d) mismo o similar tipo de vegetación.

### 6.2.3.2 Indicadores ecológicos referidos en la descripción de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS)

A partir de los atributos valorados en campo y descritos por el INFyS (Vigor y Daño) se construyó un solo indicador (Condición de la vegetación), de acuerdo con los criterios descritos en el Cuadro 3, el cual se tomó como base para identificar los sitios con mejor calidad.

**Cuadro 3. Índice de la condición de la vegetación y calidad de sitio construido a partir de la descripción de campo referida en el INFyS.**

Vigor	Daño	Descripción	Condición de la vegetación	Calidad de Sitio
<b>Muy bajo</b>	Muertos y/o tocones	Vigor muy bajo/individuos muertos y tocones	1	Muy baja
<b>Bajo</b>	Actividades humanas	Vigor bajo/daño por actividades humanas	2	Baja
<b>Medio</b>	Plaga (cancros)	Vigor medio/daño muy bajo por plaga	3	Media
<b>Alto</b>	Ausencia de daño	Vigor alto/ausencia de daño	4	Alta

## 6.2.4 Indicadores biofísicos

### 6.2.4.1 Obtención de Índices de Vegetación

De la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) se descargaron imágenes de satélite a las que se les realizó una corrección radiométrica, atmosférica y topográfica (Andino y Ochoa, 2016). Las imágenes elegidas correspondieron a las del sensor Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI TIRS. Tales imágenes se seleccionaron con base en la ubicación de las fechas próximas a las de los muestreos edáficos y ecológicos.

El pretratamiento de las imágenes del sensor Landsat 7 ETM+ inició con la corrección del bandeo que presentan (Gonzaga, 2014). Posteriormente las imágenes de ambos sensores se les realizó una corrección de números digitales (ND) a valores de reflectancia, además de su corrección atmosférica con las herramientas del software QGIS, la cual permite mitigar el efecto de la dispersión de la energía electromagnética ocasionada por partículas y aerosoles suspendidos en la atmósfera, permitiendo de esta manera, restar de la imagen los valores que éstas agregan a los datos de la imagen. El método empleado fue el de substracción de píxeles oscuros, también conocido como Método de Chávez, el cual asume que, si existen áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia, cualquier reflectancia aparente debería ser resultado de la dispersión (scattering) atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen (Chávez, 1988; Hadjimitsis *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2013).

Realizadas las correcciones a valores de reflectancia y atmosférica, se procedió a corregir topográficamente todas las imágenes satelitales Landsat utilizadas. Este proceso es necesario en zonas montañosas y valoraciones en el tiempo, como es el caso de la presente investigación. Esto se debe a que los algoritmos de corrección

topográfica buscan compensar las diferencias en la radiancia que detecta un sensor remoto como consecuencia de la distinta pendiente y orientación de las laderas en las que se ubican las diferentes cubiertas. También, es importante tomar en cuenta esta corrección cuando se comparan datos de diferentes sensores, debido a que cada sensor escanea un punto sobre la superficie terrestre en diferente día y horario (Chuvieco y Hantson, 2010; Sabater *et al.*, 2016). Así, la corrección topográfica se procesó con el SIG SAGA, seleccionando el método de corrección de Minnaert con pendiente, para lo cual se tomó como base en un MED tipo terreno con resolución 15 m obtenido de la página web de INEGI.

De los Índices de Vegetación, éstos se obtuvieron con las herramientas del software SAGA. Para el NDVI, éste se generó con base en el procesamiento de las bandas 3 y 4 para Landsat 7 y las bandas 4 y 5 para Landsat 8, en tanto que, el índice EVI se originó a partir de las bandas 3, 4 y 1 en Landsat 7 y para Landsat 8 las bandas 4, 5 y 2. (Bocco *et al.*, 2013; Lillesand *et al.*, 2015).

Para obtener el valor del NDVI (ecuación 7) y del EVI (ecuación 8), se utiliza el cociente de bandas que se refiere a continuación:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{R}) / (\text{NIR}+\text{R}) \quad (7)$$

$$\text{EVI} = 2.5 * [(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + 6 * \text{R} - 7.5 * \text{B} + 1)] \quad (8)$$

Donde:

IR = Infrarrojo cercano = banda 4 (Landsat 7), banda 5 (Landsat 8)

R = Rojo = banda 3 (Landsat 7), banda 4 (Landsat 8)

B = Azul = banda 1 (Landsat 7), banda 2 (Landsat 8)

## 6.2.5 Análisis Estadísticos aplicados

Para analizar la información obtenida y alcanzar los objetivos planteados, junto con la comprobación de la hipótesis, se contemplaron los siguientes métodos estadísticos:

### 6.2.5.1 Análisis de Componentes Principales (ACP)

Para reducir la dimensionalidad de las variables analizadas en esta investigación se realizó un ACP, ya que éste se reconoce como un método multivariado que permite identificar los parámetros con la mayor variabilidad. El análisis que se procesó fue con base en una matriz de correlaciones, lo que permitió estandarizar las unidades dimensionales. Este modelo estadístico, al reducir la dimensión del análisis y al combinar todas las variables en nuevos índices (variables sintéticas), permite obtener nuevos vectores que sirven para identificar a las variables con la mayor información (más variabilidad). Estos nuevos vectores se denominaron componentes principales (CP) (Balzarini *et al.*, 2011). Así, el primer componente principal (CP1) explicó la mayor parte de la variación total en el conjunto de datos, mientras que el segundo componente (CP2) y los subsiguientes, la variabilidad remanente o no explicada por la CP1 (Córdoba *et al.*, 2012).

Para el caso de la presente investigación, se ejecutó el ACP para los atributos ecológicos y edáficos por separado. En cada caso los CP se identificaron con base en los eigenvalores (autovalores) mayores a 1 y para ubicar e identificar a las variables de mayor peso en cada CP (CP1, CP2... CPn) se localizó al valor absoluto más alto de cada eigenvector (autovector), lo cual permitió ubicar al parámetro edáfico o ecológico correspondiente.

### **6.2.5.2 Análisis de Correlación simple**

Para validar los datos obtenidos de los índices de vegetación (NDVI y EVI) se realizó un análisis de correlación con el objetivo de determinar qué tan intensa es la relación entre dos variables, el valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde  $-1 < r < 1$ , indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables, mientras más cercano a cero sea el coeficiente, este indicará que más débil es la asociación entre ambas variables y si es igual a cero se concluye que no existe relación lineal (Dagnino, 2014). Se realizó el análisis con los índices de vegetación (NDVI y EVI) para verificar cuál de los dos es más adecuado para estudios de vigor de la vegetación o en su defecto si existe una correlación positiva entre ambos.

## 7. Resultados y discusión

Como parte de los resultados, se consideró prudente iniciar este apartado con base en el procesamiento del modelo hidrológico, posteriormente se presentan las características biológicas y fisiográficas de los sitios de estudio, para después dar paso a los resultados de los atributos edáficos y a los ecológicos.

### 7.1 Procesamiento en SIG, delimitación de la Cuenca y red de drenaje

Del trabajo en SIG, se obtuvo la red de drenaje con el orden de los ríos, y con base en ello, se pudo delimitar la cuenca hidrológica junto con sus microcuencas. Con este procesamiento, se pudo ver que la cuenca de estudio se ubica en la vertiente oriental de la Sierra Nevada y tiene una superficie de 238,567 ha. Dentro de esta cuenca, el modelo demostró que existen ríos de primer, segundo y tercer orden. Con el paso anterior, se ubicaron más fácilmente los sitios localizados cerca de un cuerpo de agua y establecer el orden del río correspondiente.

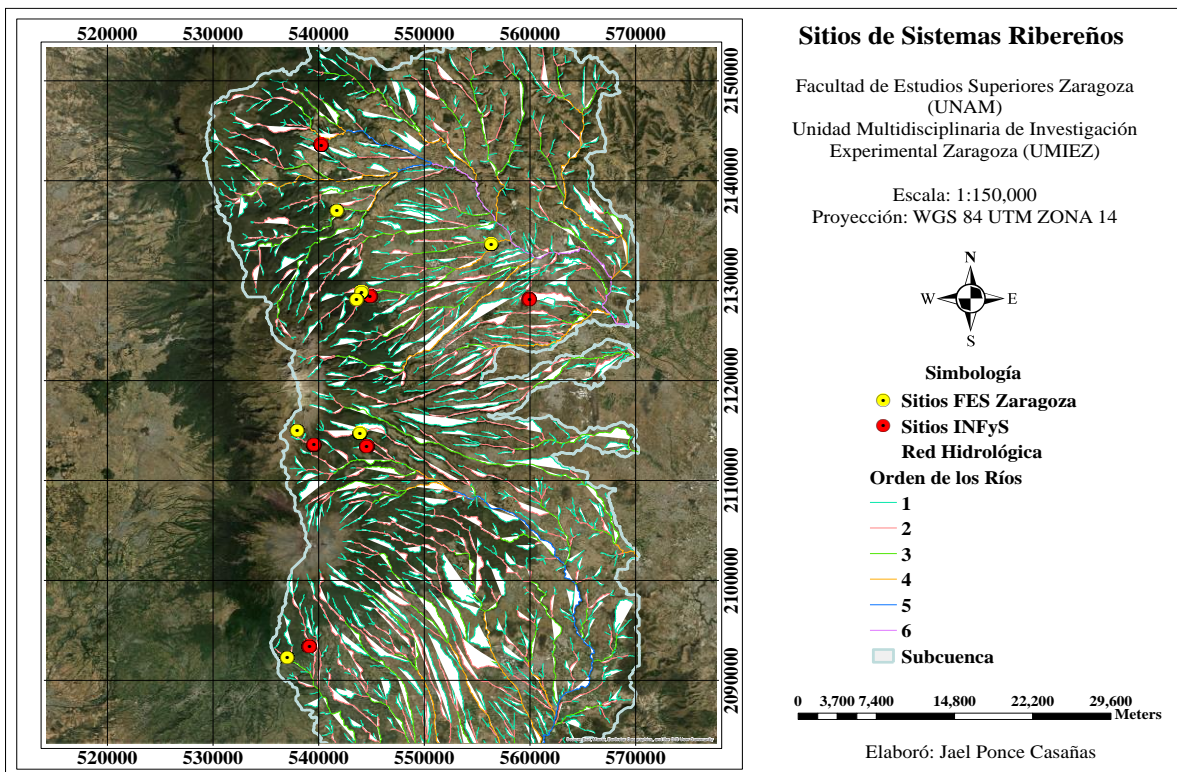
### 7.2 Descripción general de los sitios de estudio

En la Figura 2 se muestra la ubicación de los siete sitios estudiados en sistemas ribereños, registros que pertenecen al Laboratorio de Edafología y Nutrición vegetal de la FES Zaragoza. En esta misma Figura, se observan también los seis sitios (conglomerados) que reporta el INFyS.

De acuerdo con los registros de ambas bases de datos, los Bosques de Pino son dominantes, presentándose en seis de los 13 sitios estudiados y se distribuyen entre los 2700 a 3900 m snm (Cuadro 4). Entre las especies de *Pinus* reportadas están *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. teocote*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae* y *P. leiophylla*.

Con el análisis en SIG, se pudo establecer que, de los trece sitios analizados, doce se ubican a una longitud de entre 9 y 80 m de escurrimientos de orden 1 (Cuadro 4). De acuerdo con el método de Horton-Strahler, este tipo de escurrimientos corresponden con los que nacen en la cabecera de las cuencas (Guerra, 2017).

Según González y García (2006), en las cabeceras de los valles la influencia fluvial es pequeña y se ensancha progresivamente conforme avanza la trayectoria del río, es decir, en valles confinados se estima en 5 m, en valles semiabiertos de 10 a 15 m y en abiertos más de 50 m. De acuerdo con estos mismos autores, el ancho mínimo aceptable para el buen funcionamiento del bosque ripario es de 30 m. Sin embargo, si se requiere mayor oferta de beneficios significativos para la vida silvestre y la biodiversidad, son necesarios desde 100 m (Barton *et al.*, 1985), aunque se dice que en condiciones naturales depende de la geomorfología del canal y del valle que varían en la longitud (Mendoza *et al.*, 2014).



**Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio dentro de una subcuenca localizada en la Cuenca del Alto Balsas. Los números de la Red Hidrológica indican el orden del escurrimiento**



**Cuadro 4. Descripción fisiográfica de los sitios**

Sitios	Coordenadas UTM		Altitud m snm	Año	Tipo de vegetación	Pend. %	Exp.	Dist. Río m	Orden del Río	
	X	Y								
FES Z	Apatlaco	537974	2114968	3903.65	2013	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	34.59	W	59.02	1
INFys	62376	539515	2113530	3770.48	2009	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	54.39	W	38.09	1 y 2
		539556	2113550							
		539562	2113600							
		539594	2113520							
FES Z	San Rafael Tlanalapa	556337	2133659	2281.51	2013	Agricultura de Riego	2.28	S	76.05	1
INFys	61622	559891	2128120	2284.27	2009	Agricultura Temporal	15.5	NE	21.04	1
		559931	2128190							
		559970	2128120							
FES Z	Río Apol	543901	2114758	3160	2013	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	19.63	NE	21.06	5
INFys	62377	544541	2113420	3102	2010	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	26.23	S	22.41	1
		544579	2113440							
		544588	2113480							
		544617	2113410							
FES Z	Zoquititla	544852	2128094	2919.65	2013	Bosque de <i>Pinus</i> ssp - <i>Quercus</i> ssp.	25.28	NE	18.50	1
INFys	61619-1	544852	2128450	2731.27	2011	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	19.65	NE	37.67	1
		544896	2128470							
		544901	2128510							
		544928	2128440							
FES Z	Atzomaco	544060	2128859	2815.96	2013	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	37.85	E	8.50	2
INFys	61619	544852	2128450	2731.27	2011	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	19.65	NE	37.67	1
		544896	2128470							
		544901	2128510							
		544928	2128440							
FES Z	Santa Rita Tlahuapan	551723	2136988	2720	2013	Bosque de <i>Pinus</i> ssp.	4.7	SE	9.89	1
INFys	60860	540220	2143610	2797.27	2011	Bosque de <i>Pinus</i> ssp - <i>Quercus</i> ssp.	12.11	NE	41.96	1 y 4
		540226	2143660							
		540255	2143580							
FES Z	Izoalco	537034	2092290	2723.15	2013	Bosque de <i>Quercus</i> ssp. - <i>Pinus</i> ssp.	56.61	SW	43.55	1
INFys	63365	539081	2093362	2666.61	2014	Bosque de <i>Quercus</i> ssp. - <i>Pinus</i> ssp	21.48	SE	66.47	1
		539125	2093424							
		539125	2093381							
		539160	2093359							

*FES Z = Facultad de Estudios Superiores Zaragoza; INFyS = Inventario Nacional Forestal y de Suelos; Pend = Pendiente; Exp = Exposición; Dist. Río = Distancia al Río; Bosque Mixto = Más de 3 géneros distintos. Nota: En la primera columna se hace referencia al nombre de los sitios según el registro de la FES Zaragoza y su conglomerado equivalente de acuerdo con el INFyS.*

### 7.3 Indicadores edáficos

Para efectos de esta investigación, los parámetros del suelo que se evaluaron para conocer su contribución en la calidad de los sistemas ribereños fueron las que se observan en el Cuadro 5. Estos parámetros edáficos son los que corresponden a los sitios evaluados por la FES Zaragoza.

El sitio denominado San Rafael Tlanalapa es el que tiene los valores máximos en DA y pH activo, mientras que valores mínimos en CE, MOS, COS y Nt. Por su parte

el sitio Zoquititla tuvo los valores máximos en CE, MOS y COS, en tanto que cuenta con los valores mínimos en DA, ambos sitios representan a los de mayor contraste en estos parámetros edáficos.

**Cuadro 5. Indicadores edáficos evaluados en los sistemas ribereños de la Cuenca de estudio y su clasificación de acuerdo con la Norma Oficial MEXICANA (NOM) NOM-021-SEMARNAT-2000.**

Sitio FES Z	DA	pH act	CE	MOS	COS	COS	Nt	C/N
	g cm <sup>-3</sup>		dS m <sup>-1</sup>	prom %	prom %	Mg ha <sup>-1</sup>	%	
San Rafael	1.15	6.09 <sub>N</sub>	0.31	2.24 <sub>MB</sub>	1.21 <sub>MB</sub>	19.36	0.04 <sub>B</sub>	32.4377
Tlanalapa								
Izoalco	1.11	5.31 <sub>MAc</sub>	0.40	3.40 <sub>MB</sub>	1.83 <sub>MB</sub>	29.28	0.17 <sub>B</sub>	10.8422
Santa Rita								
Tlahuapan	0.72	4.47 <sub>FAC</sub>	0.20	6.82 <sub>M</sub>	3.68 <sub>M</sub>	58.88	0.17 <sub>B</sub>	21.6068
Río Apol	0.85	4.73 <sub>FAC</sub>	0.27	7.71 <sub>M</sub>	4.17 <sub>M</sub>	66.72	0.44 <sub>M</sub>	9.3951
Atzomaco	0.90	5.21 <sub>MAc</sub>	0.22	7.95 <sub>M</sub>	4.29 <sub>M</sub>	68.64	0.11 <sub>B</sub>	38.7322
Apatlaco	0.77	4.65 <sub>FAC</sub>	0.25	8.28 <sub>A</sub>	4.47 <sub>A</sub>	71.52	0.34 <sub>M</sub>	13.2631
Zoquititla	0.64	5.23 <sub>MAc</sub>	0.42	15.35 <sub>A</sub>	8.29 <sub>A</sub>	132.64	0.26 <sub>B</sub>	32.0098
<b>Mínimo</b>	<b>0.64</b>	<b>4.47</b>	<b>0.20</b>	<b>2.24</b>	<b>1.21</b>	<b>19.36</b>	<b>0.04</b>	<b>9.3951</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.88</b>	<b>5.09</b>	<b>0.31</b>	<b>7.92</b>	<b>4.27</b>	<b>63.86</b>	<b>0.23</b>	<b>21.83</b>
<b>Máximo</b>	<b>1.15</b>	<b>6.09</b>	<b>0.42</b>	<b>15.35</b>	<b>8.29</b>	<b>132.64</b>	<b>0.44</b>	<b>38.7322</b>
<b>DS</b>	<b>0.17</b>	<b>0.34</b>	<b>0.08</b>	<b>4.14</b>	<b>2.23</b>	<b>33.85</b>	<b>0.11</b>	<b>11.96</b>

DA. = Densidad aparente; CE= Conductividad eléctrica; MOS = Materia orgánica del suelo; COS = Carbono orgánico del suelo; Nt = Nitrógeno total; C/N = Relación carbono/nitrógeno; prom = promedio; DS = Desviación estándar. Datos ordenados ascendentemente de acuerdo con el COS. Los subíndices corresponden a la clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000. N = neutro; MAc = medianamente ácido; FAC = fuertemente ácido; MB = muy bajo; B = bajo; M = medio; A = alto. Todos los sitios según la NOM tienen Efectos despreciables de la salinidad.

Para determinar las propiedades con mayor variabilidad y, por lo tanto, las variables robustas (VR), se realizó un análisis de componentes principales (CP), donde se consideraron solo los eigenvalores con un valor mayor a 1 (Figura 3), en el cuadro 6 se muestran los eigenvalores que representan el 92.64% de la varianza acumulada, teniendo tres componentes principales, donde tan solo el primero representa el 43.06% de la varianza.

Cuadro 6. Eigenvalores y varianza de las propiedades edáficas.

Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	3.01445	43.06	43.06
2	1.99857	28.55	71.62
3	1.47229	21.03	92.65
4	0.491149	7.02	99.66
5	0.0158437	0.23	99.89
6	0.00769336	0.11	100.00
7	2.22769E-8	0.000	100.00

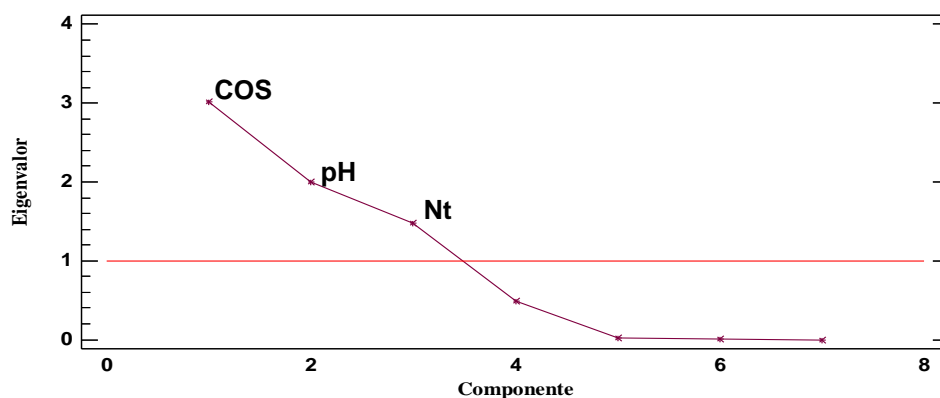


Figura 3. Gráfica de sedimentación: eigenvalores mayores a 1

Los tres CP se identificaron de acuerdo con el valor absoluto más alto, por lo tanto, 0.56 corresponde al COS, 0.66 al pH activo y -0.61 al del Nt (Cuadro 7), denominadas VR.

Cuadro 7. Componentes principales de las propiedades edáficas.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Densidad	-0.4830	0.3335	-0.1255
pH activo	-0.0636	0.6602	-0.1366
CE	0.0360	0.4450	-0.5242
MOS	0.5637	0.1191	-0.0894
COS	0.5638	0.1184	-0.0899
Nt	0.1850	-0.3068	-0.6150
C/N	0.3021	0.3637	0.5443

### 7.3.1 Carbono Orgánico del Suelo (COS)

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), el porcentaje de COS se encontró entre 1.21 y 8.29 lo cual indica que se tienen suelos con clases que van de muy bajo (<2.32) a muy alto (6.38 – 9.28) para suelos volcánicos.

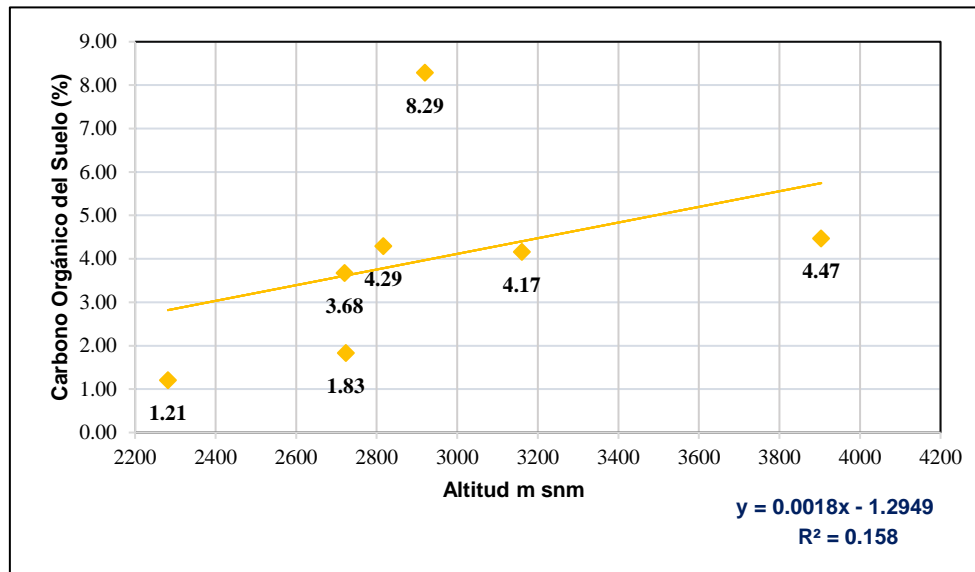


Figura 4. Carbono Orgánico del Suelo con relación a la altitud. La línea amarilla representa la tendencia.

Se encontró que la tendencia del contenido de COS aumentó con la altitud (Figura 4), de acuerdo con el tipo de vegetación presente en el área de estudio, el promedio más bajo de COS se ubicó en agricultura de riego y se puede atribuir al cambio de uso de suelo que altera la tasa de acumulación de la MOS y en consecuencia su tasa de descomposición, la cual varía con las cantidades aportadas por los residuos vegetales y con las pérdidas resultantes por la erosión y oxidación por los microorganismos (Damacena *et al.*, 2009). Asimismo, el mayor contenido de COS se encontró a una altitud de 2919 msnm en bosques *Pinus* sp. – *Quercus* sp., lo que indica que la vegetación está aportando gran cantidad de Carbono al suelo. Es por lo anterior, que el contenido de COS en suelos bajo vegetación nativa es estable (Bortolon *et al.*, 2009).

Según investigaciones de Rojas *et al.*, (2017) el porcentaje promedio de contenido de COS por tipo de vegetación y uso de suelo en México en Bosque de *Pinus sp.*, es de 4.62; para Bosque de *Pinus sp.*– *Quercus sp.* de 2.88; en Bosques de *Quercus sp.* – *Pinus sp.* de 1.86 y en Agricultura de 2.52. Como se puede observar estos valores son congruentes con los encontrados en este estudio.

### 7.3.2 pH activo del suelo

Para este parámetro edáfico, se encontró una relación inversa con el gradiente altitudinal (Figura 5), lo cual indica que suelos con mayor altitud, su pH se acidifica. Asimismo, se pudo observar que, por tipo de uso de suelo, el valor más alto (suelo menos ácido) corresponde a sitios con agricultura de riego y el más bajo a suelos con presencia de bosques de *Pinus sp.*

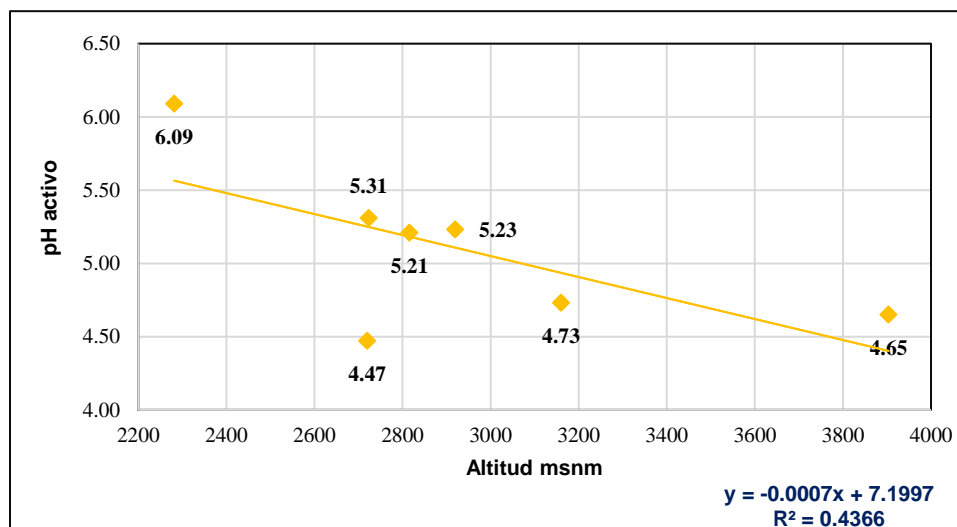


Figura 5. pH activo del suelo con relación a la altitud.

De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los suelos característicos de zonas de origen volcánico, (Cambisols, Andosols, Regosols, Leptosols, Litosols y Phaeozems) son por naturaleza ácidos (SEMARNAT, 2002; CONANP, 2012). Este comportamiento

se pudo observar en los valores de los sitios estudiados, dado que se establecieron entre 4.47 y 6.09 unidades, datos que también son congruentes con Suastegui (2009), quien reportó para la parte oriental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl valores de pH del suelo de 5.1 a 6.1, lo que indica que en general los suelos presentes en el área son de tendencia ácida.

### 7.3.3 Nitrógeno total del suelo (Nt)

Al igual que el COS, se encontró que el Nt tiende a aumentar con la altitud (Figura 6). El análisis por tipo de vegetación demostró que el contenido promedio más bajo de Nt se encontró en sitios con agricultura de riego, en tanto que su mayor cantidad se localizó en suelos bajo bosques de *Pinus* sp.

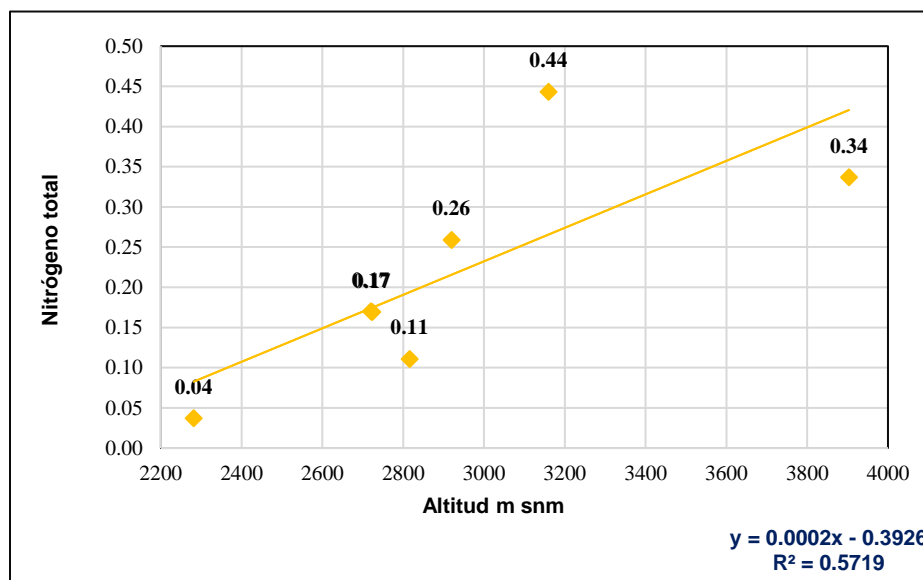


Figura 6. Nitrógeno total del suelo con relación a la altitud.

Moreno *et al.*, (2017) reportaron que el contenido de Nt en suelos ribereños oscila entre 0.03 y 0.32 % que se relaciona con la vegetación más conservada. Este comportamiento se atribuye al hecho de que la MOS está influenciada

principalmente por el estado de conservación de la vegetación, al acumularse mayor cantidad de residuos vegetales de árboles el contenido de MOS aumenta, lo cual influye en el incremento de contenido de Nt (Murray *et al.*, 2011). Aunque para suelos volcánicos un porcentaje menor de 0.30 es considerado bajo y valores de 0.30 a 0.80 % es un contenido medio, el sitio que presentó un mayor contenido de Nt se estableció en la escala de contenido medio de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

En sitios con alta cobertura vegetal, como es el caso del sitio denominado Río Apol, el mayor contenido de Nt provoca un incremento de las comunidades microbianas, lo que deriva en un reciclaje de nitrógeno más eficiente que el de los microorganismos de los espacios abiertos (Ewing *et al.*, 2007), tal y como se presentó en el sitio nombrado como San Rafael Tlanalapa, lugar donde se tuvo la menor cobertura vegetal y en consecuencia menor porcentaje de Nt, condiciones que son consecuencia de su uso agrícola lo cual favorece la salida del N del sistema edáfico (Cruz *et al.*, 2012).

#### **7.4 Indicadores de productividad**

Los parámetros de productividad de la vegetación que se utilizaron para obtener la biomasa aérea (BA) y su contenido de carbono (CBA), se muestran en el cuadro 8. Como ya fue mencionado, por su importancia en la dinámica de los ecosistemas, estos, parámetros son reconocidos como indicadores ecológicos y de productividad.

**Cuadro 8. Indicadores de productividad de la vegetación reportados por el Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) 2009-2014**

Sitio INFyS	Vf	Bt	CB
	m <sup>3</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	
61622	4.71	128.14	64.07
62376	33.68	404.18	202.09
60860	38.44	559.18	279.59
62377	45.00	567.23	283.61
61619	57.92	849.48	424.74
61619_1	57.92	849.48	424.74
63365	59.88	864.23	432.11
<b>Mínimo</b>	<b>4.71</b>	<b>128.14</b>	<b>64.07</b>
<b>Promedio</b>	<b>42.51</b>	<b>729.23</b>	<b>364.61</b>
<b>Máximo</b>	<b>59.88</b>	<b>864.23</b>	<b>432.11</b>
<b>DS</b>	<b>12.74</b>	<b>4.31</b>	<b>98.39</b>

Vf = Volumen del fuste; Bt = Biomasa total y CB = Carbono en Biomasa; DS = Desviación estándar. Datos ordenados de forma ascendente de acuerdo con el Volumen del fuste.

Similar a lo realizado en los indicadores edáficos, se procesó un ACP, el cual produjo un solo CP que tuvo un valor mayor a la unidad (Figura 7), con una varianza acumulada de 87.54%, no obstante, se decidió incluir al segundo CP con el propósito de reducir el porcentaje de aleatoriedad. Al adicionar este CP al primero, se acumula 93.61% de la varianza (Cuadro 9). Ambos CP sirvieron para identificar las variables robustas por factores de productividad de la vegetación. En el cuadro 10 se identificó el CP, con base en el valor absoluto más alto. En este sentido, para el CP1 se identificó al Vf (0.3509) y al CBA para el CP2 (0.3503).

**Cuadro 9. Eigenvalores y varianza de las propiedades ecológicas de productividad**

Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	7.87891	87.543	87.543
2	0.546058	6.067	93.611
3	0.360386	4.004	97.615
4	0.195953	2.177	99.792
5	0.0166666	0.185	99.978
6	0.00202316	0.022	100.000
7	1.60928E-10	0.000	100.000
8	1.61166E-15	0.000	100.000
9	0.0	0.000	100.000



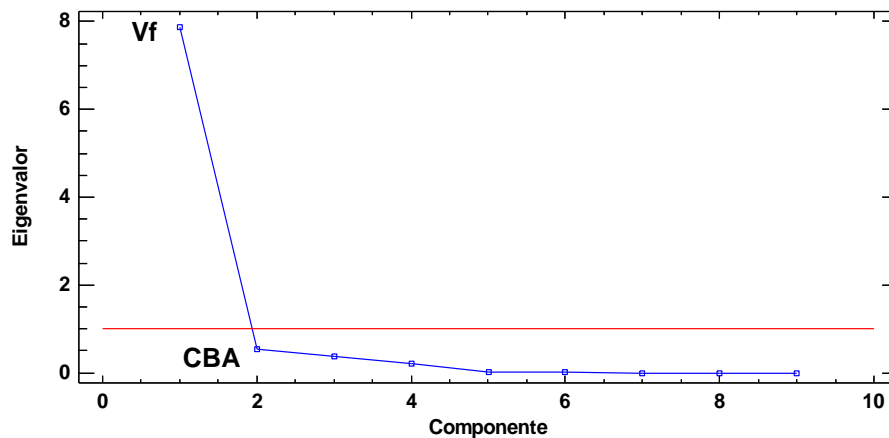


Figura 7. Grafica de sedimentación: Vf = valor mayor a 1, CBA = CP incluido

Cuadro 10. Componentes principales de los factores ecológicos de productividad

	Componente 1
Altura total	0.339155
Diámetro normal	0.339923
Área basal	0.317401
Volumen del fuste	0.350927
Densidad Básica de la Madera	0.333849
Biomasa del fuste	0.349458
Factor de Expansión de Biomasa	0.257785
Biomasa total	0.35036
Carbono de la Biomasa aérea	0.35036

#### 7.4.1 Volumen del fuste

Los conglomerados que presentaron un mayor volumen de fuste fueron el 63365 y el 61619, el primero presentando un mayor número de individuos vivos inventariados (96) y 10 individuos muertos que aportan materia orgánica al suelo. El segundo conglomerado presentó 73 individuos inventariados vivos y 8 muertos. Estos conglomerados tienen vegetación de bosque de *Pinus* sp y bosque de *Quercus* sp – *Pinus* sp, que se ubican entre los 2600 y 2800 m snm. Por otro lado, el conglomerado con menor volumen de fuste fue el 61622 el cual presentó 14

individuos inventariados que pertenecen a agricultura de temporal y se ubica por debajo de los 2300 m snm (Figura 8).

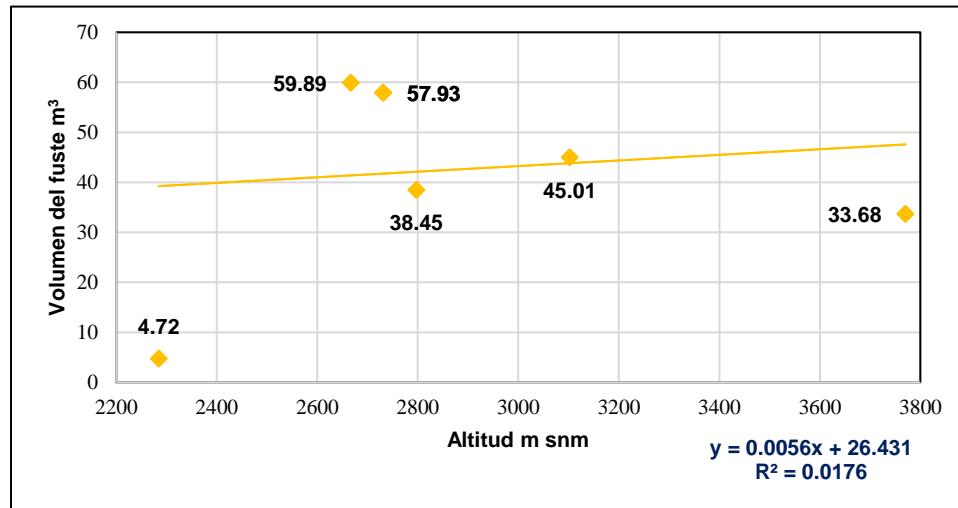


Figura 8. Volumen del fuste con relación a la altitud.

#### 7.4.2 Carbono en Biomasa Aérea

Los resultados del análisis del volumen del fuste demostraron nuevamente que, el mayor contenido de Biomasa aérea se encontró en los conglomerados 63365 y 61619, en tanto que la menor cantidad de este parámetro en el conglomerado 61622 (Figura 9).

El alto contenido de C en la biomasa de la vegetación de los conglomerados antes mencionados puede atribuirse a las condiciones climáticas y en función de la distancia a la que estos conglomerados se encuentran de los afluentes. Estas condiciones proporcionan un porcentaje de humedad adecuado, haciendo que las condiciones de suelo se mantengan favorables en cuanto a estructura y disponibilidad de nutrimentos para el soporte de una mayor productividad primaria de la vegetación, brindando a la zona ribereña una gran densidad arbórea, en comparación con los contenidos de carbono en los sitios de menores altitudes.

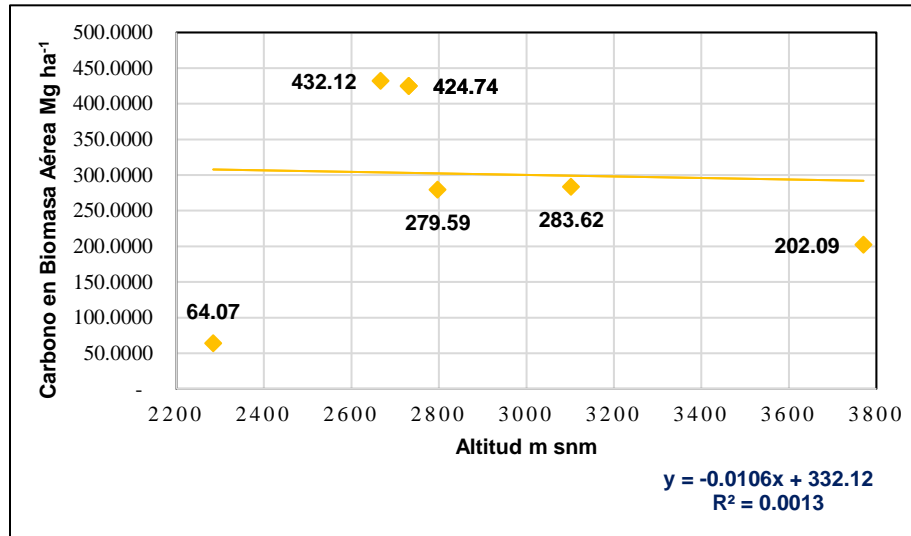


Figura 9. Carbono en Biomasa aérea con relación a la altitud

Con el análisis por grupo taxonómico, se observó que en las especies de las familias Pinaceae y Fagaceae se registraron las alturas y diámetros más altos, con lo que aportaron los valores más altos de Volumen y Carbono en Biomasa aérea, con presencia de individuos clasificados como árboles maduros, viejos (supermaduros) y en su mayoría jóvenes, en los conglomerados donde se presentan.

## 7.5 Indicadores biofísicos

Los indicadores biofísicos (NDVI y EVI) obtenidos a partir del análisis espectral de la vegetación se muestran en el Cuadro 11. En este Cuadro se pueden apreciar los valores de NDVI y EVI para los conglomerados que el INFyS refiere y también para los de su equivalente a los sitios en los que se realizó el estudio edáfico por parte del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal de la FES Zaragoza. La distribución espacial de cada sitio y su valor correspondiente se puede observar en el anexo 2.

Cuadro 11. Indicadores biofísicos por sitios edáficos y ecológicos

Sitios edáficos	NDVI	EVI	Sitios ecológicos	NDVI	EVI
Izoalco	0.4903 <sub>M</sub>	0.1438 <sub>M</sub>	<b>63365</b>	0.8298 <sub>MA</sub>	0.4098 <sub>MA</sub>
Atzomaco	0.6527 <sub>A</sub>	0.2009 <sub>A</sub>	<b>61619</b>	0.4912 <sub>M</sub>	0.1526 <sub>M</sub>
Zoquititla	0.6898 <sub>MA</sub>	0.2158 <sub>MA</sub>	<b>61619_1</b>	0.4912 <sub>M</sub>	0.1526 <sub>M</sub>
Río Apol	0.6181 <sub>A</sub>	0.2147 <sub>A</sub>	<b>62377</b>	0.5644 <sub>A</sub>	0.1851 <sub>A</sub>
Santa Rita Tlahuapan	0.5906 <sub>A</sub>	0.1958 <sub>A</sub>	<b>60860</b>	0.4373 <sub>M</sub>	0.1361 <sub>M</sub>
Apatlaco	0.3497 <sub>B</sub>	0.0996 <sub>B</sub>	<b>62376</b>	0.4096 <sub>M</sub>	0.0919 <sub>M</sub>
San Rafael Tlanalapa	0.3453 <sub>B</sub>	0.1135 <sub>B</sub>	<b>61622</b>	0.2352 <sub>MB</sub>	0.0712 <sub>MB</sub>

MB = Muy Bajo; B = Bajo; M = Medio; A = Alto; MA = Muy Alto

Con el estudio del Cuadro anterior, se encontró que, aunque el EVI tiene valores más bajos que el NDVI, en ambos índices existe la misma tendencia y proporción en cada sitio estudiado. Este comportamiento se ha observado en diversos estudios donde se reporta que el NDVI se satura en áreas altamente vegetadas, razón por la que fue desarrollado posteriormente el EVI, variante mejorada con mayor sensibilidad bajo estas condiciones que incorpora la banda del azul para corregir los efectos del suelo (Matsushita *et al.*, 2007), por lo que tiende a presentar valores relativamente bajos en todos los biomas (Jiang *et al.*, 2008). Asimismo, García y Mas (2011) mencionan que este índice optimizado a partir del NDVI aumenta la sensibilidad en las regiones de alta biomasa y mejora el monitoreo de la vegetación mediante la disociación de la señal del fondo del dosel al reducir la influencia atmosférica. Con lo anterior y lo observado en este análisis, se tienen bases para asegurar que ambos índices son complementarios y sirven para corroborar la información de coberturas vegetales en las que se presenten valores de vigor de la vegetación parecidos como por ejemplo de zonas de bosque respecto de coberturas con cultivos bien irrigados que tienen alta actividad fotosintética.

Para corroborar la tendencia entre los índices, se realizó un análisis estadístico que mostro una correlación positiva y significativa ( $p < 0.05$ ) entre el NDVI y el EVI de los sitios edáficos con respecto a los ecológicos (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Coeficientes de correlación de NDVI y EVI**

	NDVI_ed	NDVI_ec
EVI_ed	0.9761	0.2485
EVI_ec	0.1801	0.9550

*ed = edáfico ec = ecológico*

Como ya se mencionó, la correlación significativa entre de los índices se debe a que, en estudios de vegetación se complementan entre sí y mejoran la detección de sus cambios (Huete *et al.*, 1997; citado por Melendres, 2018). Algunas de las evidencias que demuestran que estos índices se complementan es que mientras el NDVI es sensible a la clorofila, el EVI tiene mayor correlación linear con el índice de área foliar, arquitectura y tipo de cubierta, fisiología de la planta y es menos propenso a la saturación en los bosques templados y tropicales, además de ser mínimamente sensible a la contaminación residual de los aerosoles (Silva, 2014). Por otra parte, en cuanto al efecto topográfico el EVI presenta el ajuste L lo que lo hace más sensible a estas condiciones a diferencia del NDVI que tiende a eliminar o debilitar estos efectos (Huete *et al.*, 2002; citado por Cogliati, 2017).

A manera de ejemplo, en las Figuras 10 y 11 se observa que en el mapa del NDVI existe una mayor área de color verde intenso debido a su pérdida de sensibilidad a los cambios de la vegetación en las zonas de mayor biomasa, en cambio en el mapa de índice EVI, se nota una región verde más clara y debido a que mantiene una sensibilidad más consistente a estos cambios y presenta una distribución uniforme del verdor de la vegetación.

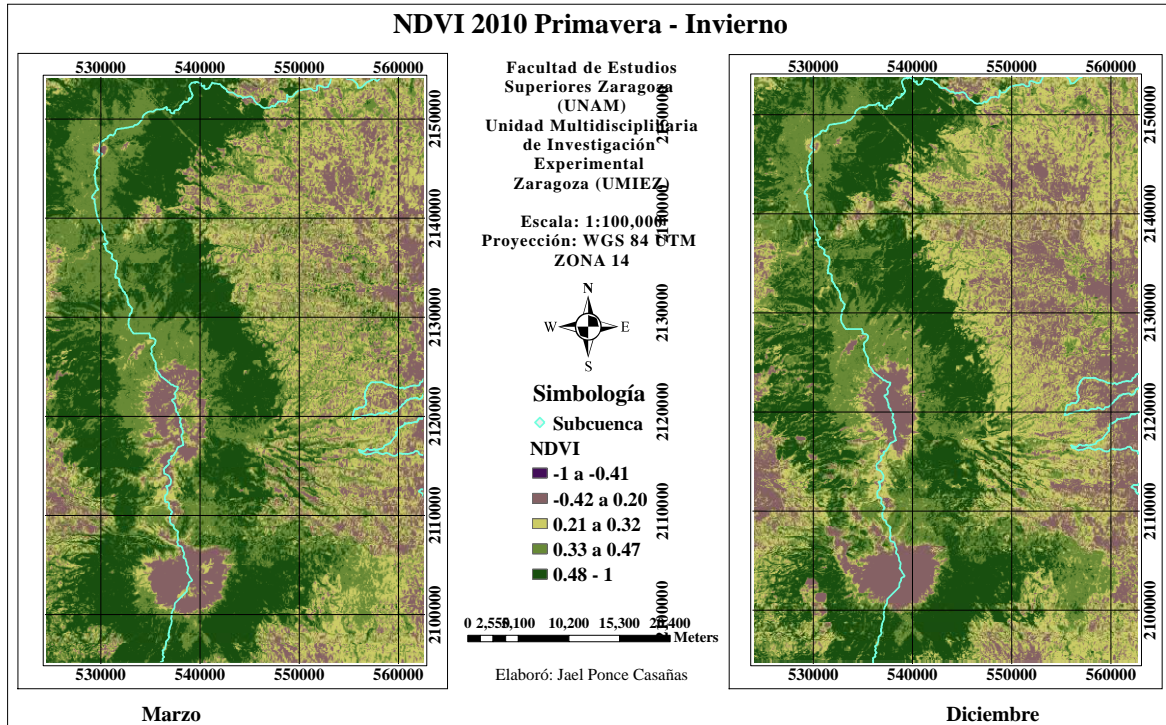


Figura 10. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 2010, temporada primavera e invierno.

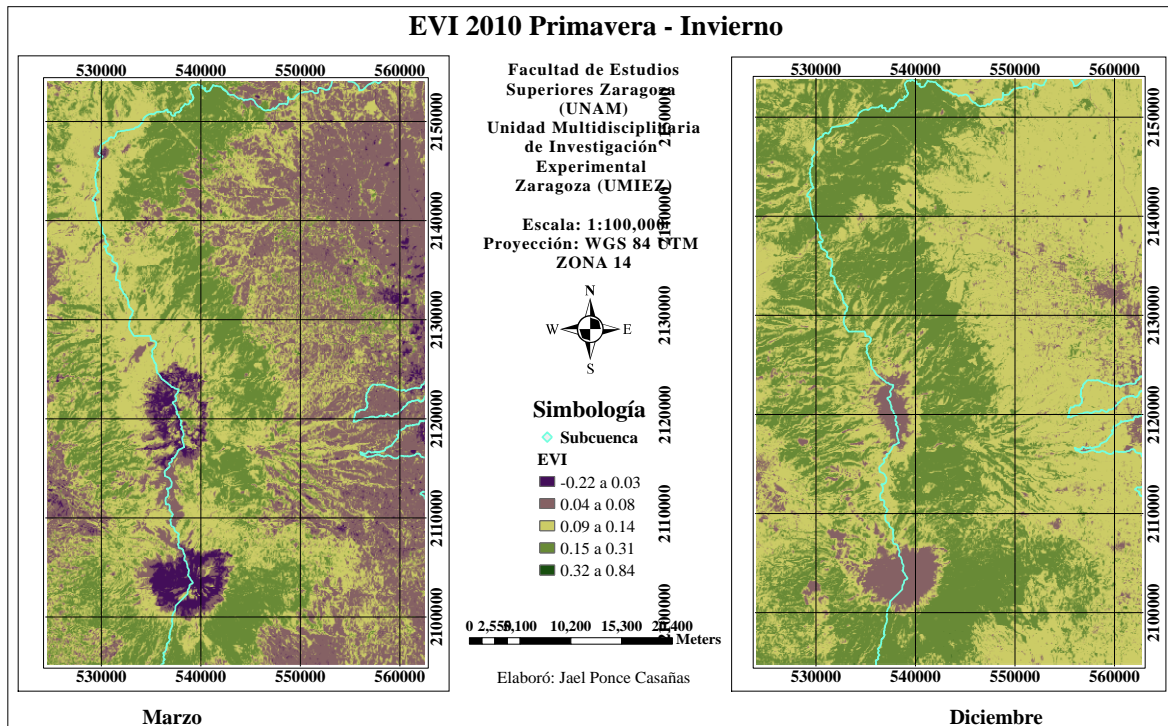


Figura 11. Índice de vegetación mejorado (EVI) 2010, temporada primavera e invierno.



De la comparación entre índices, para el NDVI se obtuvieron valores de entre 0.2352 a 0.8298, los valores más cercanos a 1 significan píxeles con mayor verdor debido a una mayor actividad fotosintética de las plantas y una menor presencia de plantas senescentes o marchitas; según Neigh *et al.*, (2008) el rango común para la vegetación se encuentra entre 0.2 y 0.8 por lo que los valores negativos corresponden al agua y al suelo desnudo o concreto. Para el EVI sus valores oscilaron entre 0.0712 y 0.4098 (Paredes, 2018).

## **7.6 Relación de variables robustas, índices de vegetación y el indicador de condición de la vegetación**

Se obtuvo un promedio de los datos de NDVI y EVI de los sitios que reporta el INFyS y el estudio de los parámetros edáficos, los cuales se relacionaron espacialmente y después este promedio fue analizado junto con las VR identificadas con el ACP, así como también con el indicador de condición de la vegetación (Cuadro 13). La distribución espacial por calidad ambiental se puede observar en la figura 12.

Como puede verse en el Cuadro 13, el sitio clasificado con la calidad ambiental alta es el que tiene mayor contenido de CBA y el segundo con menos COS. Es importante destacar que, en todos los sitios estudiados, existe un menor contenido de COS en comparación con su cantidad de CBA. De acuerdo con el análisis del INFyS para el conglomerado mencionado, hay un mayor número de árboles inventariados, lo que también explica su valor más alto de volumen del fuste, la mayoría de estos árboles son juveniles (Anexo 1), mientras que el sitio denominado Apatlaco-62376 que, también presenta en su mayoría árboles jóvenes es uno de los sitios con menos densidad de árboles inventariados, lo que explica su bajo contenido de CBA y un valor bajo de volumen de fuste para el sitio. Según Sun *et al.*, (2015), al existir una mayor cantidad de árboles jóvenes, estos tienen una alta capacidad de almacenar carbono en su estructura y representan un gran reservorio de este nutriente. Por su edad, esta comunidad de árboles jóvenes demanda

elevadas cantidades de este elemento, el cual puede ser tomado también del suelo en forma de azúcares y almidón, por lo que se atribuye que disminuya el COS en sitios con estas características. Otro factor al que se le atribuye que exista un menor contenido de COS es al tipo de vegetación, dado que están presentes especies de latifoliadas que aportan hojarasca de mayor tasa de reciclamiento de nutrientes respecto de bosques de *Pinus* (Anexo 1)

Por lo general la captura de carbono ocurre durante el desarrollo de los árboles, y se detiene cuando llegan a un punto de saturación a partir del cual la captura de carbono disminuye. Un árbol maduro no tiene la misma capacidad de capturar carbono que uno más joven ya que sus funciones disminuyen y con ello la demanda de este nutriente (Rovelo, 2010).

El comportamiento del COS está estrechamente relacionado con el contenido de Nt, por lo que cuando el suministro de carbono coincide con el ingreso de nitrógeno, este se mantiene dentro del sistema, en cambio cuando los suelos están saturados de nitrógeno y son deficientes de carbono, es más probable la pérdida de nitrógeno hacia el ambiente en su forma elemental gaseosa N<sub>2</sub> (Zhao *et al.*, 2014).

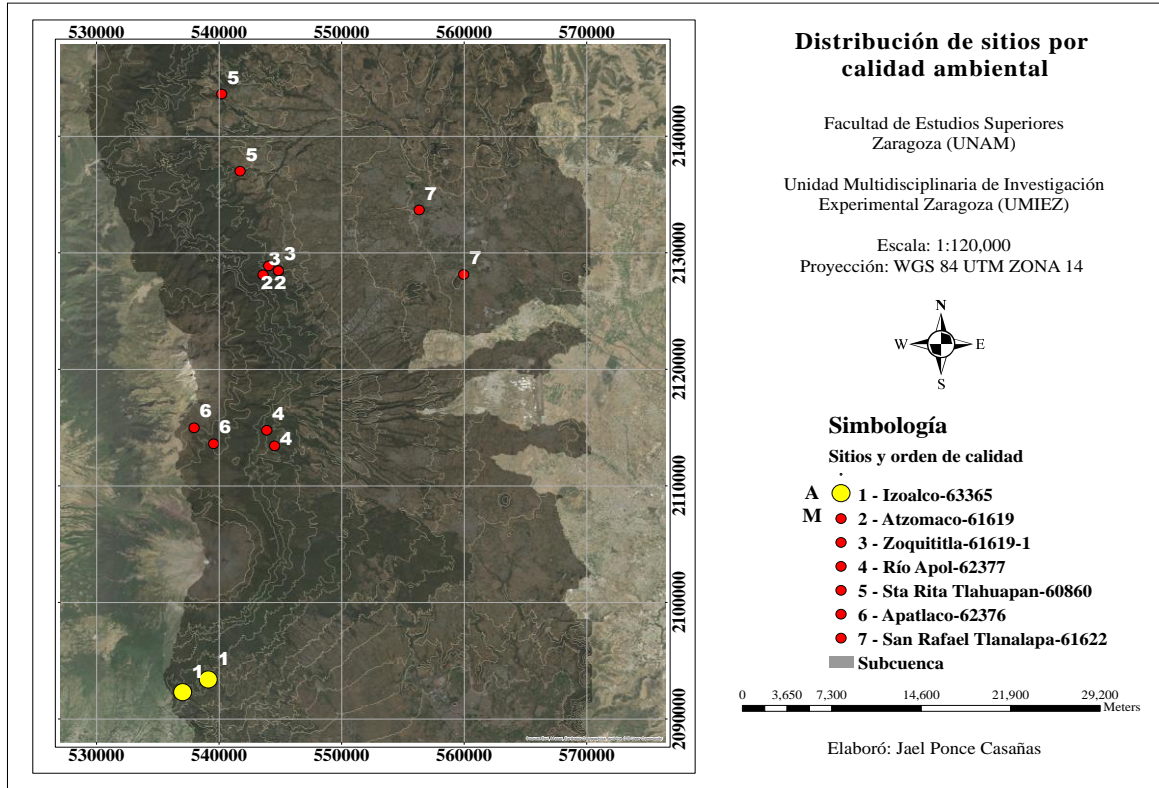
En el Cuadro 13 se observa una relación entre el COS y el Nt. Se puede observar que, similar al comportamiento visto en el sitio de calidad ambiental alta, estas variables tuvieron un contenido de COS y Nt muy bajo y bajo respectivamente, y a medida que el COS aumenta, también lo hace el Nt. Por lo general el nitrógeno es asimilado en una cantidad determinada por la biomasa microbiana, lo cual depende de la relación C/N. Específicamente, la cantidad de N requerida por los microorganismos es 20 veces menor que la de C (Diacono y Montemurro, 2010).



Cuadro 13. Valores de los índices de vegetación, indicadores edáficos, ecológicos y de productividad.

No. sitio	Sitio	pH	Nt	COS	CBA	Vf	NDVI	EVI	Cond Veg	Ladera	Pendiente	Dist. Río	Calidad del sitio
1	Izoalco – 63365	5.31 <sub>MAC</sub>	0.17 <sub>B</sub>	29.28 <sub>MB</sub>	432.11	59.88	0.6600 <sub>MA</sub>	0.2768	V <sub>A</sub> / SD	Solana	38.54	55.01	Alta
2	Atzomaco – 61619	5.21 <sub>MAC</sub>	0.11 <sub>B</sub>	68.64 <sub>M</sub>	424.74	57.92	0.5719 <sub>A</sub>	0.1767	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Umbría	28.75	23.08	Media
3	Zoquititla – 61619_1	5.23 <sub>MAC</sub>	0.26 <sub>B</sub>	132.64 <sub>A</sub>	424.74	57.92	0.5905 <sub>A</sub>	0.1842	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Umbría	22.46	28.08	Media
4	Rio Apol – 62377	4.73 <sub>FAC</sub>	0.44 <sub>M</sub>	66.72 <sub>M</sub>	283.61	45.00	0.5912 <sub>A</sub>	0.1999	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Umbría	22.93	21.73	Media
5	Santa Rita Tlahuapan – 60860	4.47 <sub>FAC</sub>	0.17 <sub>B</sub>	58.88 <sub>M</sub>	279.59	38.44	0.5139 <sub>M</sub>	0.1659	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Solana	8.40	11	Media
6	Apatlaco – 62376	4.65 <sub>FAC</sub>	0.34 <sub>M</sub>	71.52 <sub>A</sub>	202.09	33.68	0.3796 <sub>M</sub>	0.0957	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Solana	44.49	48.53	Media
7	San Rafael Tlanalapa – 61622	6.09 <sub>N</sub>	0.04 <sub>B</sub>	19.36 <sub>MB</sub>	64.07	4.71	0.2902 <sub>B</sub>	0.0923	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	Umbría	8.89	48.54	Media

Cond Veg = Condición de la vegetación; V<sub>A</sub> = Vigor Alto; V<sub>M</sub> = Vigor Medio; SD = Sin Daño; D<sub>MBP</sub> = Daño Muy Bajo de plaga; Los subíndices corresponden a la clasificación de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000; MB = Muy bajo; B = Bajo; M = Medio; A = Alto; N = neutro; MAC = medianamente ácido; FAC = fuertemente ácido. Datos ordenados descendientemente de acuerdo con el CBA



**Figura 12. Distribución de los sitios ribereños de acuerdo con su calidad ambiental. A = Alto; M = Medio. El círculo grande (amarillo) es el sitio que corresponde a la calidad más alta; los círculos chicos (rojos) corresponden a sitios con calidad media.**

Otro factor importante que se desprende del análisis del Cuadro 13, es el tipo de ladera y su efecto en la vegetación. En general los ríos en zonas montañosas se ubican en dos laderas opuestas, que se exponen a diferente cantidad de luz solar, debido a esto presentan elementos climáticos y vegetación particulares, relacionados con la orientación y a la morfología del sitio (López, 2014). Estas laderas son contrastantes hacia el norte (umbría) y hacia el sur (solana), la primera se caracteriza por recibir menor radiación solar y presenta mayor humedad y temperatura baja, por lo tanto, su clima tiende a ser húmedo y frío, lo que causa el establecimiento de una población vegetal distinta de la ladera solana que recibe mayor radiación solar y generalmente propicia la instauración de poblaciones de pastos (Reyes *et al*, 2011).

En el caso del sitio con mayor calidad, pero con exposición solana, se puede atribuir a que dada su altitud (2666.61 a 2723.15 m), la influencia de la ladera se compensa con el efecto de sombra que genera el relieve a menores altitudes respecto de las cumbres donde existe más incidencia solar, lo que deriva en un mejor estado de conservación, una estructura arbórea dominante sobre especies vegetales más afines a sitios soleados. Esta sombra puede ocasionar ambientes climáticos variados, pero a su vez mantener la humedad del sitio (Salinas, 2015).

En los sitios que presentan una calidad media establecidos en ladera umbría, Lekuona (2017) demostró que la biomasa aérea era superior en las laderas expuestas al norte. En México, las laderas expuestas al norte son más húmedas y por lo general presentan vegetación con mayor biomasa aérea que las de exposición sur que son más secas. En algunos sitios esto es muy notorio, al grado que determina diferencias de composición florística en laderas que se encuentran una frente a otra.

En la misma idea de los resultados del COS, la altitud es otro factor físico que determina el contenido de este compartimento. Como se ha visto a lo largo de estos resultados, en sitios con mayor altitud, la vegetación dominante son los bosques de Pinus y gramíneas, cuya hojarasca que cubre el suelo posee una composición química que influye en la tasa de descomposición y liberación de nutrimentos dada su naturaleza ácida, si a esto se agrega la disminución de la temperatura, entonces la actividad microbiana se abate junto con la mineralización de la MOS (Figuroa *et al.*, 2005).

Una capa de mantillo ácido (como el de las coníferas, pH ácido menor a 6) tardará más tiempo en ser descompuesta que una capa de mantillo con un pH relativamente más alto (pH mayor a 6), como la proveniente de bosques de latifoliadas (Figuroa *et al.*, 2005)

Respecto de la acidez del suelo, los sitios clasificados con mayor calidad ambiental presentaron un pH moderadamente ácido que de acuerdo con la literatura es un pH aceptable para este tipo de vegetación. Los sitios en donde se establecen especies de coníferas tienden a ser más ácidos que aquellos que presentan árboles de madera dura, debido a que las coníferas tienen menor contenido de bases (Colli, 2015).

En cuanto a la influencia de la zona ribereña, el sitio con mayor calidad es el que se encuentra más alejado del cauce con una distancia entre 43.55 – 66.47 m, esto puede explicarse a que en algunos casos la vegetación que esta entre los 10 m de distancia al río está deteriorada, la Ley de Aguas Nacionales determina que la amplitud óptima para la vegetación ribereña son de máximo 10 m, aunque para diversos autores debe ser una delimitación apegada a las condiciones naturales de inundación del cauce con frecuencia de una vez cada ocho años, de acuerdo con la variabilidad del flujo, donde se incluya el manejo de reforestación y mantenimiento de especies vegetales nativas de la región.

Asimismo, con los índices espectrales estudiados, se pudo observar que los valores de los índices de vegetación (NDVI y EVI) se relacionaron positivamente el indicador de condición de la vegetación, ya que el sitio con mejor calidad ambiental fue el que obtuvo los valores más altos de ambos índices y el que, de acuerdo con lo reportado por el INFyS es el sitio donde no se presentó ningún tipo de perturbación.

## **8. Conclusiones**

Se encontró entre los parámetros biofísicos, que los valores más altos de NDVI y EVI (Vigor alto) se correspondieron positivamente con sitios clasificados con una condición de la vegetación de media a alta; así como también con mayores contenidos de Carbono en biomasa aérea.

Los sitios con valores altos de NDVI y EVI se relacionaron con suelos medianamente ácidos, más bajos contenidos de COS (NOM-021-SEMARNAT-2000) y ubicados a menor altitud.

Como resultado de los ACP, el Volumen del fuste y contenido de carbono en biomasa aérea (entre los parámetros de vegetación), se identificaron como indicadores de productividad; en tanto que el pH activo, COS y Nt (parámetros edáficos) se establecieron como indicadores de calidad

Con los resultados de este trabajo, se pudo establecer un índice con los atributos edáficos, espectrales y de la vegetación que ayuda a identificar los ecosistemas de ribera con mejor calidad ambiental.

La teledetección, los sistemas de información geográfica y el análisis estadístico multivariado, son herramientas eficientes y alto potencial para evaluar la relación existente entre parámetros edáficos, de productividad y ecológicos que permiten, con un mayor número de sitios estudiados y la propuesta de un modelo estadístico, establecer la calidad de ambientes ribereños en regiones no visitadas de características similares a la de los sitios estudiados.

## ***Recomendaciones***

Utilizar la densidad arbórea para un mejor análisis y comparación de datos respecto al índice de condición de la vegetación.

## Bibliografía

Abaurrea, M. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

Alpizar, W. (1997). *Proceso metodológico para la cuantificación de carbono de la biomasa en pie de bosque natural y sus estimaciones de no emisiones y fijación*. Costa Rica: Oficina Costarricense de Implementación Conjunta.

Anaya, A., Chuvieco, E. y Palacios, A. (2008). *Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS*. Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. 2008. 30: 5-22

Andino, E. y Ochoa, L. (2016). *Cálculo de reflectancia de imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE*. Revista ciencias espaciales, volumen 9, Numero 1 Primavera.

Asner, G., Tasar, E., Sousan, S. y Knapp, D. (2013). *CLASlite Forest monitoring technology. Version 3.1 Use Guide*. Standford: Carnegie Institution for Science.

Balzarini, M., Teich, I., Bruno, C. y Peña, A. (2011). *Making genetic biodiversity measurable: a review of statistical multivariate methods to study variability at gene level*. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 43(1): 261-275.

Bao, C. and Zou, J. (2018). *Analysis of spatiotemporal changes of the human-water relationship using water resources constraint intensity index in Northwest China*. Ecol. Indic. 84(1):119-129

Barton, R., Taylor, D. y Biette, M. (1985). *Dimensions of riparian buffer strips required to maintain trout habita in southern Ontario streams*. North Am. J. Fish. Manage. 5, 364-378

Baumann, M., Dignac, M., Rumpel, C., Bardoux, G., Sarr, A., Steffens, M. and Maron, P. (2013). *Soil microbial diversity affects soil organic matter decomposition in a silty grassland soil*. Biogeochemistry 114:201-212.

Biestroek R., Swart R. y Van der Knapp W. (2009). *“The mitigation-adaptation dichotomy and the role of spatial planning”*. Habitat international 33: 230-237 pp.

Birdsey, R., Angeles P., Kurz, A., Lister, A., Olguien, M., Pan, Y., Wayson, C., Wilson, B. y Johnson, K. (2013). *Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+*. Carbon Management. 4, (5)

Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., & Willington, E. (2013). Simple models to estimate soybean and corn percent ground cover with vegetation indices from modis. *Revista de Teledetección*, 39, 83-91.dag

Bolaños, Y., Bolaños, M., Paz, F. y Ponce, J. (2017). *Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México*. Terra Latinoamericana, 35(1), 73-86.

Bortolon, E., Mielniczuk, J., Tornquist, G., Lopes, F. y Fernandes, F. (2009). *Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo Century*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33(6), 1635–1646.

Botero, C. (2002). *Propuesta de un modelo para medir la calidad ambiental en playas turísticas “meritoria”*. (Tesis licenciatura). Universidad de la Salle, Dirección General Marítima Bogotá D.C.

Budhu, M. (2007). *Formación y Propiedades del suelo*. Costa Rica: suelos del trópico.

Buckman, O. y Brady, C. (1991). *Naturaleza y Propiedades de los Suelo, texto de edafología para enseñanza*. Editorial LIMUSA. México. 590 pp.

Canizales, P., Alanís, G., Favela, S., Torres, M., Alanís, E., Jiménez, J. y Padilla, H. (2010). *Efecto de la actividad turística en la diversidad y estructura del bosque de galería en el noreste de México*. Ciencia UANL 13(1): 55-63.

Cantú, I. y Yáñez, M. (2017). *Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(45). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Mexico.

Castro, B. (2017). *Obtención de una cuenca hidrográfica mediante el uso de un software comercial "ArcGIS" y el uso de un software libre "SAGA". Caso de estudio municipio de Portesito, Antioquia*. Programa de especialización en Geomática. Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada.

Chávez, P. (1988). *An improved dark – object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote sensing of Environment.

Chapin, S., Manson, P. y Mooney, H. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science and Business Media Inc. New York, NY, USA

Chuvienco, E. (1991). *Fundamentos de la teledetección espacial*. Estudios Geográficos, 52(203), 371.



Chuvienco, E., y Hantson, S. (2010). *Plan Nacional de Teledetección de Media Resolución Procesamiento estándar de imágenes Landsat Documento técnico de algoritmos a aplicar*. Universidad de Alalá. España.

Cogliati, M. (2017). *Estudio preliminar de las áreas de vegetación nativa en el norte de la provincia de Neuquén a través de la aplicación de teledetección*. In IX Congreso Argentino de Tecnología Espacial (pp. 1-8).

Colli, M. (2015). *Actividades Arilsulfatasa y ureasa en la fertilidad de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México.

CONAGUA. (2010). *Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas, 2010*.

CONAGUA. (2018). *Situación de los recursos hídricos*. Edición 2018.

CONANP. (2012). *Plan de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México

Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., y Costa, L. (2012). *Análisis de componentes principales con datos georreferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión*. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo, 44(1), 27-39.

Cornejo, C. (2016). *Clasificación de recursos hídricos de la subcuenca de San Martín Texmelucan*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México.

Cortés, L., Hernández, J., Valencia, D., y Corvalán, P. (2014). *Estimation of AboveGround Forest Biomass Using Landsat ETM+, Aster GDEM and Lidar*. Forest Research Open Access, 3(2), 1–7

Cruz, E., Cruz, R., Aguilera, G., Norman, M., Velázquez, A., Nava, G., Dendooven, L. y Reyes. R. (2012). *Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo*. Terra Latinoamericana 30:189-197.

Cutini, A., Chianucci, F. y Manetti, M. (2013). *Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (Pinus pinea L.) in Italian coastal stands*. IForest 6: 331-337.

Dagnino, J. (2014). *Coefficiente de correlación lineal de Pearson*. Chil Anest, 43(1), 150-153.

Damacena, E., Gigante, C., Anghinoni, I., de Faccio, C., Andrigueti, M., y Cao, E. (2009). *Estoque de carbono orgánico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavourapecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33(6), 1829–1836.

Declaratoria Oficial de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes. 2011. DOF: 06/07/2011

Diacono, M. and Montemurro, F. (2010). *Long-term effects of organic amendments on soil fertility*. A review. Agronomy for Sustainable Development 30:401-422.

Díaz, J. (2015). *Estudio de Índices de Vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Universidad Complutense de Madrid.

Doran, J. y Parkin, T. (1994). *Defining and assessing soil quality*. In: Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicek D. C. y Stewart B. A. (eds). 1994. Defining and Assessing

Soil Quality for Sustainable Environment. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA.

Elosegi, A. y Díez, J. (2009). *La vegetación terrestre asociada al río: el bosque de ribera*. En S. Sabater y A. Elosegi (Eds.), *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (pp 311-321). BBVA

Etchevers J., Hidalgo C., Vergara M., Bautista M. y Padilla J. (2009). *Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura*. En: López-Blanco J. y Rodríguez-Gamiño M. de L. 2009. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de Investigación, No. 3. 196 p

Ewing, A., Southard, J., Macalady, L., Hartshorn, S., y Johnson, J. (2007). *Soil microbial fingerprints, carbon, and nitrogen in a Mojave Desert creosote Bush ecosystem*. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 469–475.

FAO. (2015). *Estado mundial del recurso suelo (EMRS)*. Resumen técnico. Roma.

Farrow, A. and Winograd, M. (2001), *Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America*, *Agric., Ecos. and Environment*, no. 85, pp. 249-268.

Fernández, R., Rodríguez, C., Arreguín, M. y Rodríguez, A. (1998). *Listado florístico de la cuenca del río Balsas, México*. *Polibotánica* no. 9, pp. 1-151.

Ferrera, R. y Alarcón, A. (2001). *La microbiología del suelo en la agricultura sostenible*. *Ciencia ergo sum* 8:175-183.

Figuroa, C., Etchevers, J., Velázquez, A. y Acosta, M. (2005). *Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra de Norte de Oaxaca*. TERRA Latinoamericana 23(1), 57-64

Foody, M., Boyd, S. and Cutler, E., (2003). *Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions*. Remote Sensing of Environment, 85(4): 463-474

Gamarra, C., Díaz, M., Vera, M., del Pilar, M. y Cabrera, A. (2017). *Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(46). Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. Campus de San Lorenzo. Paraguay.

García, T. y Mas, F. (2011). *Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63 (1), 83-94.

García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). *Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso*. Pastos y Forrajes, 35(2) 125-138 p

García, J. & Martínez, M. (2014). *Biomasa y Biotecnología*. Departamento de Biología Medioambiental. Centro de investigaciones biológicas del consejo superior de investigaciones científicas. Madrid-España.

García, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. 78(1).

Gárete, M., y Blanco, A. (2013). *Importancia de la caracterización de la biomasa de raíces en la simulación de ecosistemas forestales*. Ecosistemas 22: 66-73.

Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM + y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.

González, M. y García, D. (2006). *Attributes for assessing the environmental quality of riparian zones*. *Limnetica* 25, 389-402.

González, M. (2008). *Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natral de Pinus maximinoi H. E. Moree, Pinus ocarpa var., ochoterenai Mtz., y Quercus sp.* En el norte del estado de Chiapas, México. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 22-23 p.

Goulding, K., Murphy, D., Macdonald, A., Stockdale, E., Gaunt, J., Blake, L., Ayaga, G. and Brookes, P. (2001). *The role of soil organic matter and manures in sustainable nutrient cycling*. In: Rees, R. M., B. C. Ball, C. D. Campbell and C. A. Watson C. (eds.). *Sustainable management of soil organic matter*. CAB International. Edinburgh, UK. pp. 221-342.

Guerra, E. (2017). *Geomorfología y clasificación de arroyos y ríos. Ecosistemas ribereños de montaña; descripción y estudio*. Capítulo IV. UNAM, FES Zaragoza. 53-71 p

Guerra, E. (2020). *Indicadores hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la reserva de la biosfera "los volcanes"*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de maestría y doctorado en Geografía

Gutiérrez, J. (2015). *Monitorización de emisiones de CO<sub>2</sub> en análogos naturales de almacenamiento geológicos a través de la vegetación mediante técnicas de teledetección multiespectral*. Universidad de Madrid. ETSIA.

Hadjimitsis, D., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toullos, L. y Clayton, C. (2010). *Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices*. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1):89–95.

Handal, A., Pérez, G., Morán, L. y García, W. (2017). *Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas*. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, 3(9), 10-23

Hansen, B., Reich, P., Lake, S. and Cavagnaro, R. (2010). *Minimum width requirements for riparian zones to protect flowing waters and to conserve biodiversity: a review and recommendations with application to the State of Victoria*. Report to the Office of Water, Victorian Department of Sustainability and Environment.

Holzman, M., Rivas, R., Piccolo, M. (2013). *Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperatura and vegetation index*. *Intern Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28:181–192.

Huete, A., Liu, Q., Batchily, V. y Van Leeuwen, W. (1997). *Una comparación de índices de vegetación sobre un conjunto global de imágenes TM para EOS-MODIS*. *Teledetección del medio ambiente*, 59 (3), 440-451.

Huete, A., Justice, C. y Van Leeuwen, W. (1999). *Índice de vegetación MODIS (MOD13)*. *Documento de bases teóricas del algoritmo*, 3 (213), 295-309.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, P., Gao, X. y Ferreira, G. (2002). *Descripción general del desempeño radiométrico y biofísico de los índices de vegetación MODIS. Teledetección del medio ambiente*, 83 (1-2), 195-213.

IMTA. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. ISBN 978-607-9368-09-8.

INEGI. (2016). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. *Carta de Uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie VI* (continuo nacional)

IPCC. (1996). *Chapter 5: Land Use Change and Forestry. Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Revised Version, vol. 3, 57 p, Londres, Reino Unido.

Jiang, Z., Huete, R., Didan, K. y Miura, T. (2008). *Desarrollo de un índice de vegetación mejorado de dos bandas sin banda azul. Teledetección del Medio Ambiente*, 112 (10), 3833-3845.

Lal, R., Jacinthe, A., Owen, B. y Hothem, L. (2004). *Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics*. Soil and Tillage Research. USA.

Lal, R., Safriel, U. y Boer, B. (2012). *Zero net land degradation: A new sustainable development goal for Rio+20*. (A report prepared for the secretariat of the United Nations Convention to Combat Desertification).

Laumonier, Y., Edin, A., Kanninen, M. y Munandar, W. (2010). *Landscapescale variation in the structure and biomass of the hill dipterocarp forest of Sumatra: implications for carbon stock assessments*. *Forest Ecology and Management* 259:505–513.

Lekuona, I., Lamelas, T. y Montealegre, A. (2017). *Cartografía de la biomasa aérea total en masas de Pinus radiata a partir de datos públicos LIDAR-PNOA e inventario forestal nacional* (No. ART-2017-105144).

Lillensad, T., Kiefer, R. y Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretación*. 7th ed., USA: WILEY.

Loguercio, A. y Defossé, G. (2001). *Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la Lengua Nothofagus pumilio (Poepp. Et Enndl.) Krasser, en el sol del Chubut, Argentina*. Chile: Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 11 y 16 p.

Luengo, G. (1998). *Elementos para la definición y evaluación de la calidad ambiental urbana. Una propuesta teórico-metodológica. ponencia presentada en el IV Seminario Latinoamericano de Calidad de Vida Urbana*, 8-11.

Luo, J., Huai, X. y Gao, M. (2017). *Indicators for environmental dispersion in a two-layer wetland flow with effect of wind*. Ecol. Indic. 78(1):421-436.

Magdaleno, F., & Martinez, R. (2014). *Evaluating the quality of riparian forest vegetation: the Riparian Forest Evaluation (RFV) index*. Forest Systems, 23(2), 259-272.

Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y. y Qiu, G. (2007). *Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High Density Cypress Forest*. Sensors (Basel). Nov; 7(11): 2636–2651

Mayorga, E., Renaudeau, D., Ramirez, B., Ross, J. y Baumgard, L. (2019). *Heat stress adaptations in pigs*. Revista Animal Frontiers. 9(1): 54-61.



Melendres, M. (2018). *Análisis de series de tiempo de los Índices de Vegetación EVI y NDVI a partir de datos imágenes del sensor MODIS-TERRA (250 m) y el seguimiento de la producción y rendimientos de los cultivos agrícolas en la cuenca Chancay Lambayeque (2001 – 2014)*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Ingeniería Agrónoma. Lambayeque, Perú.

Mendoza, M. (2014). *Vegetación ribereña: indicador de la salud del río de la reserva de la biosfera de la barranca de Metztlán*. (Tesis de doctorado). Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Meneses, C. (2012). *El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque*. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales Unasyva 62(238): 39-46.

Moreno, V., Castillo, O., Gama, L., Zavala, J. y Ortiz, M. (2017). *Relación de vegetación ribereña y propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpa, Tabasco, México*. Revista madera y bosques, 23(1)91-109

Murray, R., Bojórquez, J., Hernández, A., Orozco, M., García, J., Gómez, R. y Aguirre, J. (2011). *Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México*. CONACYT.

Naiman, R., Décamps, H., Pollock, M. (1993). *The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity*. Ecological Applications 3(2): 209-212.

Navarrete, A., Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. (2011). *Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo*. ContactoS 80, 29-37.

Neher, A., Williams, M. and Lovell, T. (2017). *Environmental indicators reflective of road design in a forested landscape*. Ecosphere. 8(3):1-17.

Neigh, S., Tucker, J. y Townshend, R. (2008). *Dinámica de la vegetación de América del Norte observada con datos satelitales de resolución múltiple*. Teledetección del Medio Ambiente, 112 (4), 1749-1772.

Niemeijer, D. and De Groot, R. (2008a). *A Conceptual Framework for Selecting Environmental Indicator Sets*. Ecol. Ind., 8, 14-25.

Niemeijer, D. and De Groot, R. (2008b). *Framing Environmental Indicators: Moving from Causal Chains to Causal Networks*. Environ Dev. Sustain., 10, 89-106

OBSERVATORIO AMBIENTAL DE LA UNIÓN EUROPEA (2010). *Concepto de Calidad Ambiental*.

OECD. (2001). *Environmental Indicators: Towards Sustainable Development* (155 pp.). Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.

Ordóñez, D., Galicia, N., Venegas, M., Hernández, T., Ordóñez, D. y Dávalos, S. (2015). *Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación*. Madera y Bosques 21(núm. especial):77-126.

Ospina, R., Ardila, A., Martínez, D. y Rengifo, E. (2013). *Biomasa aérea y contenido de carbono del saladillo (Caraipa llanorum) en Puerto Carreño, Vichada, Colombia*. Colombia Forestal, 16(2): 158-170

Pardos, A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Madrid, España: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).

Paredes, E. (2018). *Uso de índices de vegetación del sensor Modis-Terra en la estimación de biomasa aérea de pajonales altoandinos.*

Ramírez, C. (2010). *Efectos de la desaparición de la selva sobre ambientes acuáticos.* En S. Chediack (Comp.). *Monitoreo de biodiversidad y recursos naturales ¿para qué?* Serie Diálogos/Número 3, Colección Corredor Biológico Mesoamericano, México D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 87 pp

Reyes, F., Lillo, A., Ojeda, N., Reyes, M., & Alvear, M. (2011). *Efecto de la exposición y la toposecuencia sobre actividades biológicas del suelo en bosque relicto del centro-sur de Chile. Bosque (Valdivia), 32(3), 255-265.*

Rodríguez, M., López, J. y Vela, G. (2013). *Indicadores ambientales biofísicos a escala detallada para la planeación territorial en Milpa Alta, Centro de México.* Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, 80, 2013, 00.21-35.

Rojas, F., Santoyo, G., González, E., Velázquez, A. y Pulido, J. (2017). *La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México.* Programa Mexicano del Carbono. Elementos para Políticas Públicas 1(2)

Rovelo, D. (2010). *Estimación de captura de carbono en bosques de Abies religiosa del municipio de Amecameca, Estado de México.* (Tesis de licenciatura). México, D.F. UNAM.

Rzedowski, J. (1986). *Las plantas calcícolas (incluyendo una gipsófito) del Valle de México y sus ligas con la erosión edáfica.* Biotropica, 12-15

Salomé, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Marsden, C. y Le Cadre, E. (2016). *The soil quality concept as a framework to assess management practices*

*invulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards*. Ecological Indicators, 61, 456-465

Sabater, S. y Elosegui, A. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA.

Sabater, N., Ruiz, A., Delegido, J., Fernández, R., Latorre, P., Pla, F., González, M., Álvarez, J., Sola, I., Villa, G., Tejeiro, J., De Miguel, E., Jiménez, M., Molina, S. y Moreno, J. (2016). *Desarrollo de productos avanzados para la misión SEDSAT/Ingenio*. Revista de teledetección.

Santiago, I. (2018). *Contenidos de carbono orgánico y su compartimentación en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos de Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México

Salinas, M. (2015). *Conocimiento, manejo y conservación de la diversidad florística de la Sierra Madre Oriental, México*. (Tesis doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales.

SEMARNAT. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021- RECNAT-2000*. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México.

SEMARNAT. (2002). *Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reporte 2000. D. F., México.

SEMARNAT-CONAFOR. (2009-14). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014*. (INEGI). <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/390>

SEMARNAT. (2013). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Visión 10-20-40 Gobierno de la República. 60 pp. Disponible en: [www.encc.gob.mx](http://www.encc.gob.mx)

Silleos, N., Alexandridis, T., Gitas, I., y Perakis, K. (2006). *Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years*. Geocarto International.

Silva, A. (2014). *Analysis of vegetation dynamics using time-series vegetation index data from Earth Observation Satellites*. (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Brasil

Suastegui, E., (2009). *Contribución de la actividad de la ureasa a la liberación de nitrógeno en suelo de uso Agrícola y forestal*. FES Zaragoza, UNAM, México. D. F.

Sun, J., Guan, D., Wu, J., Jing, Y., Yuan, F., Wang, A. y Jin, C. (2015). *Day and night respiration of three tree species in a temperate forest of northeastern China*. iForest – Biogeosciences and Forestry, 8, 25-32. doi: 10.3832/ifer0982- 007

Torres, J. y Guevara, S. (2002). *El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico*. Gaceta ecológica, (6), 40-45.

Trujillo, J., Mahecha, J. y Torres, M. (2018). *El recurso suelo: un análisis de sus funciones, capacidad de uso e indicadores de calidad*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, RIAA: 9(2). Universidad de los Llanos, Campus Barcelona Villavicencio, Colombia.

Valencia, J. (2015). *Desarrollo de la región hidrológica del balsas mediante la modificación de su veda*. Tecnología y ciencias del agua, 6(1):81-97

Wen, Z., Wu, S., Chen, J. and Lu, M. (2017). *NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China*. *Sci. Total, Environ.* 574(1):947-959.

Zhao, J., Wang, F., Li, J., Zou, B., Wang, X., Li, Z. y Fu, S. (2014). Efectos de las adiciones experimentales de nitrógeno y/o fósforo en las comunidades de nematodos del suelo en un bosque tropical secundario. *Biología y Bioquímica del suelo*, 75, 1-10.

## Anexos

## Anexo 1. Datos reportados por el INFyS de un solo conglomerado (indicadores ecológicos y de productividad).

Conglomerado	Género	Condición de la vegetación	Altura total	Altura sum	Diámetro Normal	Diámetro N sum	Área basal	Área basal sum	Volumen fuste	Volumen fuste sum	DBM	DBM	DBM sum	Biomasa fuste	Biomasa fuste	Biomasa fuste sum	FEB	Biomasa Total	Carbono en biomasa
			m			m <sup>2</sup>		m <sup>3</sup>		g cm <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>		kg	Mg ha <sup>-1</sup>					
60860	<i>Arbutus xalapensis</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	5.1	342.6	0.163	7.181	0.0209	2.141302779	0.1064	38.44902061	0.75	750	14370	79.82	1.9954	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	3.4	342.6	0.138	7.181	0.015	2.141302779	0.0509	38.44902061	0.52	520	14370	26.44	0.6611	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Arbutus xalapensis</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	5.3	342.6	0.078	7.181	0.0048	2.141302779	0.0253	38.44902061	0.75	750	14370	18.99	0.4748	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																	
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	20.5	342.6	0.51	7.181	0.2043	2.141302779	4.1878	38.44902061	0.52	520	14370	2177.65	54.4412	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	22.1	342.6	0.617	7.181	0.299	2.141302779	6.6077	38.44902061	0.52	520	14370	3436.02	85.9005	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	16.3	342.6	0.367	7.181	0.1058	2.141302779	1.7243	38.44902061	0.52	520	14370	896.63	22.4157	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	17	342.6	0.205	7.181	0.033	2.141302779	0.5611	38.44902061	0.52	520	14370	291.78	7.2944	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																	
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	23	342.6	0.262	7.181	0.0539	2.141302779	1.24	38.44902061	0.52	520	14370	644.8	16.1199	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	21.2	342.6	0.297	7.181	0.0693	2.141302779	1.4687	38.44902061	0.52	520	14370	763.73	19.0933	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	18.2	342.6	0.555	7.181	0.2419	2.141302779	4.403	38.44902061	0.52	520	14370	2289.55	57.2388	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	18.6	342.6	0.357	7.181	0.1001	2.141302779	1.8618	38.44902061	0.52	520	14370	968.15	24.2037	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	9.8	342.6	0.156	7.181	0.0191	2.141302779	0.1873	38.44902061	0.52	520	14370	97.4	2.4351	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	17.2	342.6	0.25	7.181	0.0491	2.141302779	0.8443	38.44902061	0.52	520	14370	439.04	10.9759	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Arbutus xalapensis</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	6	342.6	0.175	7.181	0.0241	2.141302779	0.1443	38.44902061	0.75	750	14370	108.24	2.7059	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	5.1	342.6	0.177	7.181	0.0246	2.141302779	0.1255	38.44902061	0.52	520	14370	65.25	1.6314	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	22.7	342.6	0.245	7.181	0.0471	2.141302779	1.0702	38.44902061	0.52	520	14370	556.48	13.9121	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	11.6	342.6	0.146	7.181	0.0167	2.141302779	0.1942	38.44902061	0.52	520	14370	100.99	2.5246	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																	
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																	
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	15.3	342.6	0.387	7.181	0.1176	2.141302779	1.7997	38.44902061	0.52	520	14370	935.85	23.3963	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> /D <sub>MBP</sub>	10.3	342.6	0.172	7.181	0.0232	2.141302779	0.2393	38.44902061	0.52	520	14370	124.45	3.1112	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>s</sub> /act-hum	7.6	342.6	0.143	7.181	0.0161	2.141302779	0.1221	38.44902061	0.52	520	14370	63.47	1.5868	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937

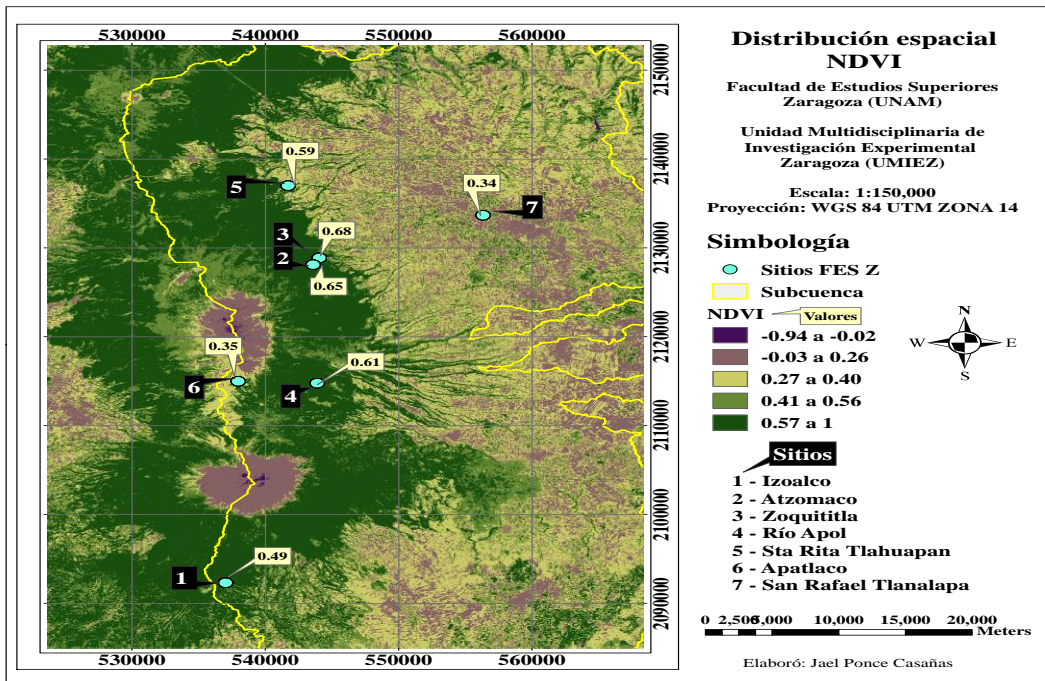
## Continuación Anexo 1

Conglomerado	Género	Condición de la vegetación	Altura total	Altura sum	Diámetro Normal	Diámetro N sum	Área basal	Área basal sum	Volumen fuste	Volumen fuste sum	DBM	DBM	DBM sum	Biomasa fuste	Biomasa fuste	Biomasa fuste sum	FEB	Biomasa Total	Carbono en biomasa	
			m				m <sup>2</sup>		m <sup>3</sup>		g cm <sup>-3</sup>		kg m <sup>-3</sup>		kg		Mg ha <sup>-1</sup>			
60860	<i>Pinus teocote</i>	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	19.5	342.6	0.489	7.181	0.1878	2.141302779	3.6622	38.44902061	0.52	520	14370	1904.34	47.6086	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937	
60860	<i>Arbutus xalapensis</i>	V <sub>o</sub> /act-hum	4.3	342.6	0.075	7.181	0.0044	2.141302779	0.019	38.44902061	0.75	750	14370	14.25	0.3562	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937	
60860	<i>Arbutus xalapensis</i>	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	7.1	342.6	0.177	7.181	0.0246	2.141302779	0.1747	38.44902061	0.75	750	14370	131.03	3.2756	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937	
60860	<i>Quercus crassipes</i>	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	18.6	342.6	0.425	7.181	0.1419	2.141302779	2.6386	38.44902061	0.63	630	14370	1662.35	41.5586	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937	
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																		
60860	<i>Quercus crassipes</i>	V <sub>M</sub> / D <sub>MBP</sub>	16.8	342.6	0.615	7.181	0.2971	2.141302779	4.9906	38.44902061	0.63	630	14370	3144.05	78.6013	523.5187164	35.6686	559.1873	279.5937	
60860	<i>Pinus</i>	V <sub>MB</sub> /m																		

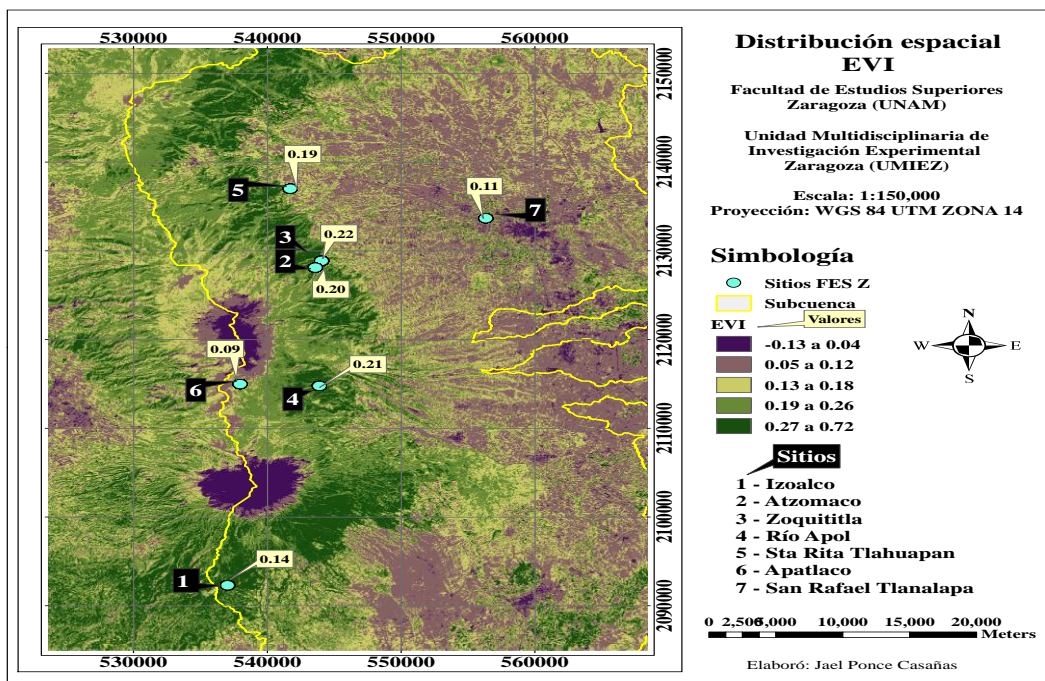
V<sub>M</sub> = Vigor medio; V<sub>B</sub> = Vigor bajo; V<sub>MB</sub> = Vigor muy bajo; D<sub>MBP</sub> = Daño muy bajo de plaga; act-hum = actividades humanas; m = muertos



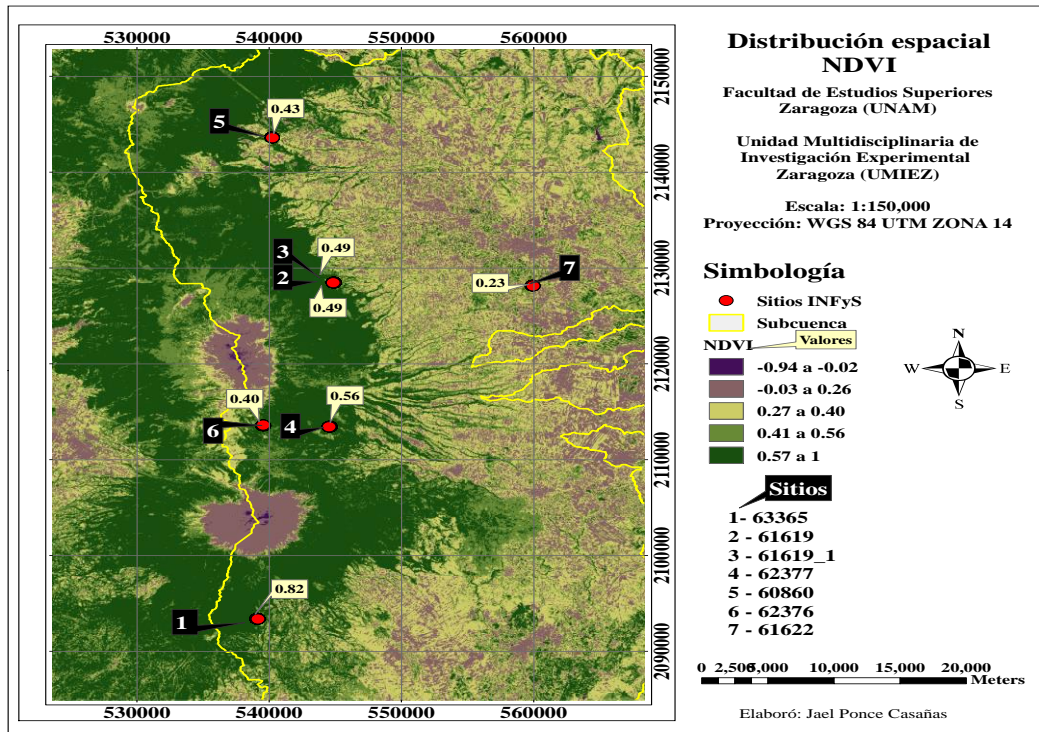
Anexo 2. Distribución espacial de los valores de NDVI y EVI de los sitios edafológicos (FES Z) y ecológicos de productividad (INFyS).



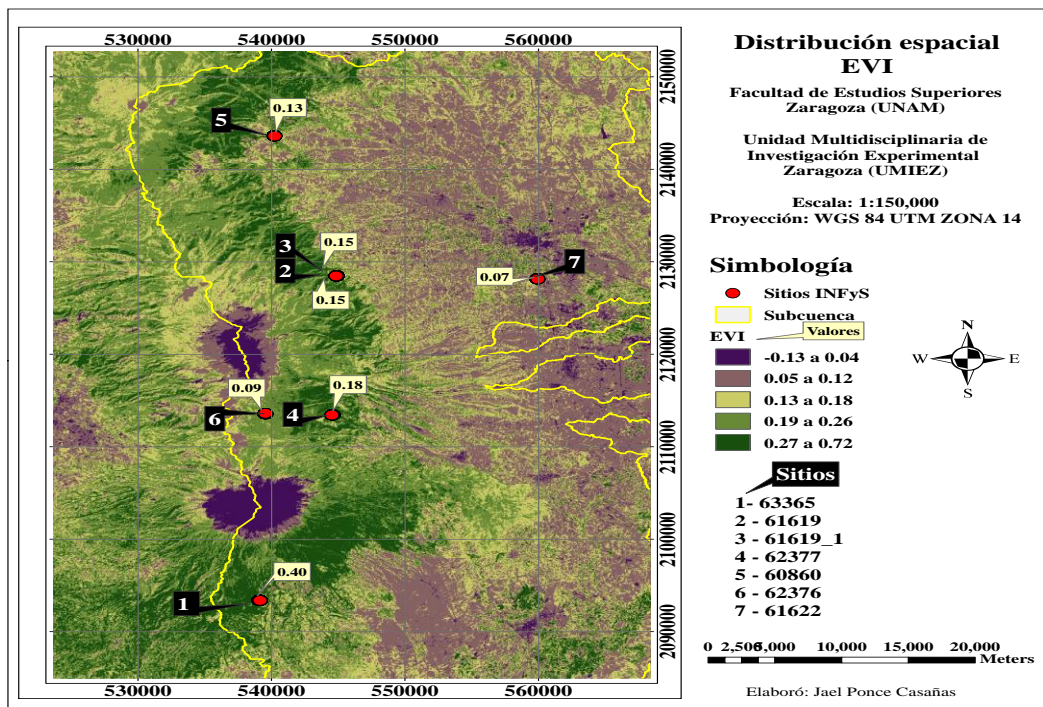
Valores de NDVI edáficos de los sitios de la FES Zaragoza



Valores de EVI edáficos de los sitios de la FES Zaragoza



Valores de NDVI ecológicos de los sitios del INFyS



Valores de EVI ecológicos de los sitios del INFyS



Anexo 3. Trabajo de gabinete

