

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

ARBÓREA EN SISTEMAS AGROSILVÍCOLAS DE FINCAS EN

ZIHUATEUTLA, PUEBLA, MÉXICO

TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

Presentado por:

JOEL VALDIVIA FAVIÁN

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 004-2020-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de Febrero de 2020, a horas 2:00 p.m. en la Sala de Conferencias de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA EN SISTEMAS AGROSILVÍCOLAS DE FINCAS EN ZIHUATEUTLA, PUEBLA, MÉXICO”

Presentado por el Bachiller, **VALDIVIA FAVIÁN, Joel**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO FORESTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 05 de Marzo de 2020


Ing. RAÚL ARAUJO TORRES
PRESIDENTE


Ing. MSc. WILFREDO TELLO ZEVALLOS
MIEMBRO


Ing. MSc. DAVID P. QUISPE JANAMPA
MIEMBRO




Dr. EDILBERTO CHUQUILIN BUSTAMANTE
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA
ARBÓREA EN SISTEMAS AGROSILVÍCOLAS DE FINCAS EN
ZIHUATEUTLA, PUEBLA, MÉXICO

Autor : Bach. VALDIVIA FAVIAN, Joel.

Asesores : Dr. CHUQUILÍN BUSTAMANTE, Edilberto.
Ing. BRAVO MORALES, Nino.

Programa de investigación : Gestión de bosques y plantaciones forestales.

Línea de investigación : Deforestación y cambio climático.

Eje temático de investigación : Biomasa y captura de carbono.

Lugar de ejecución : Fincas de Zihuateutla, Puebla, México.

Duración del trabajo : Fecha de inicio : 04/02/2019
Término : 31/09/2019

Financiamiento : Monto S/. 7742.9

FEDU : NO
Propio : NO
Otros : SI

DEDICATORIA

Agradecer a Dios por bendecirme la vida,
por guiarme a lo largo de mi existencia ser
el apoyo y fortaleza en aquellos
momentos de dificultad y de debilidad.

A mi querido padre Ewer Valdivia y mi
señora madre Selva Favián, quienes
han sido pilares fundamentales en mi
formación como profesional, por
depositar toda su confianza en mí,
contribuyendo así a lograr mis metas y
objetivos propuestos.

A mis queridas tías: Sonia Favián, Dinora
Valdivia y mi hermano Jhossep por su
cariño y apoyo incondicional en todos
estos años.

A mis abuelos: Zacarías Favián,
Marcela Mays y Nilda del Águila por el
amor incondicional brindado todos
estos años.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal que contribuyó en mi formación profesional.

A mis asesores: Dr. Edilberto Chuquilín Bustamante y el Ing. Nino Bravo Morales por brindarme su apoyo y consejos durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

A los miembros del jurado de la presente tesis: Ing. Raúl Araujo Torres, M.Sc. David Prudencio Quispe Janampa y M.Sc. Wilfredo Tello Zevallos, por sus aportes en la mejora del proyecto e informe de tesis.

Al Ing. Jorge Mattos Olavarría por el patrocinio de la tecnología Field Map y la oportunidad de realizar esta tesis en México.

Al Ing. Goyri, su esposa e hijos por su amistad, consejos y el excelente trato brindado durante mi estadía en México.

A la Lic. Julia Ortega y el Ing. Ruben Tellez por el apoyo brindado durante mi estadía en México, y por darnos todas las facilidades para el trabajo de campo.

A Don Lucio y su familia por habernos acogido haciéndonos parte de su familia.

Al equipo Field Map: Rubí Ríos y Mirza Escalante por el apoyo incondicional para la evaluación y registro de datos de campo de las fincas cafetaleras en México.

A mis amigos, José Luis, Edwins Bens, Jordi Niño, Julio Soldevilla, José Tabaré, Elvis Luque, Jordi Cordova, Will Ramos y demás amistades de la Universidad.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Biomasa y carbono almacenado	4
2.2. Ciclo del carbono.....	5
2.3. Estimación de biomasa aérea	6
2.4. Ecuaciones alométricas.....	7
2.5. Estimación de carbono	7
2.6. Imágenes Sentinel 2.....	8
2.7. Índices de vegetación.....	9
2.7.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	9
2.7.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	10
2.7.3. Índice de Vegetación Mejorado (EVI).....	10
2.7.4. Índice de Vegetación RATIO (RVI).....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Lugar de ejecución	11
3.1.1. Clima	11
3.2. Materiales y equipos.....	12
3.2.1. Equipos	12
3.2.2. Software	12

3.3. Metodología.....	12
3.3.1. Geo-posicionamiento de los árboles y cafetos.....	13
3.3.2. Medición de las variables diámetro y altura	14
3.3.3. Estimación del contenido de biomasa arbórea y carbono	15
3.3.4. Adquisición de imágenes satelitales y determinación de índices de vegetación.....	16
3.3.5. Análisis de datos	19
IV. RESULTADOS	20
4.1. Contenido de biomasa arbórea y carbono en sistemas agrosilvícolas a través de ecuaciones alométricas	20
4.1.1. Biomasa y carbono de las 20 parcelas (10m x10m) evaluadas dentro de los sistemas agrosilvícolas.....	20
4.2. Cálculo de índices de vegetación.....	21
4.2.1. Índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas	22
4.3. Del modelo matemático mediante la correlación entre los índices de vegetación y los datos de biomasa arbórea	23
4.4. Biomasa y carbono estimado a todo el sistema agrosilvícola	28
4.4.1. Biomasa y carbono estimado usando la ecuación de valores NDVI	29
V. DISCUSIÓN	31
5.1. Sobre la biomasa y carbono en fincas agrosilvícolas.....	31

5.2.	Sobre el modelo matemático mediante la correlación entre los índices de vegetación y los datos de biomasa arbórea	33
VI.	CONCLUSIÓN	35
VII.	RECOMENDACIONES	36
VIII.	ABSTRACT	37
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
	ANEXO	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Bandas de SENTINEL 2.	8
2. Características de la imagen SENTINEL 2A.....	17
3. Biomasa y carbono de las 20 parcelas (10m x10m) evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, puebla, México.....	20
4. Índices de vegetación del municipio Zihuateutla, puebla, México.	22
5. Índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, puebla, México.....	22
6. Análisis de correlación de Spearman (ρ) entre la biomasa y los índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, puebla, México.	23
7. Ecuaciones para valores de índices de vegetación	25
8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la ecuación polinómica para valores de NDVI.....	26
9. Estimación de biomasa observada y predicha por la ecuación de valores NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.	27
10. Biomasa y carbono de los sistemas agrosilvícolas usando la ecuación para valores NDVI.....	29
11. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P1).	47
12. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P2).	48
13. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P3).	49
14. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P1).	50
15. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P2).	51

16. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P3).	52
17. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P4).	53
18. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P1).	54
19. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P2).	55
20. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P3).	56
21. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P4).	57
22. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P5).	58
23. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P1).	59
24. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P2).	60
25. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P3).	61
26. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P4).	63
27. Registro de individuos en la parcela El Salto (P1).	64
28. Registro de individuos en la parcela El Salto (P2).	64
29. Registro de individuos en la parcela La laguna (P1).	65
30. Registro de individuos en la parcela La laguna (P2).	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de ubicación de las parcelas de muestreo dentro del municipio de Zihuateutla, Puebla, México.....	11
2. Método de ubicación de los individuos a evaluar (IFER, 2011).....	13
3. Medición de altura del café.	14
4. Biomasa y carbono de las parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México.	21
5. Correlación entre biomasa y el EVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.	24
6. Regresión entre biomasa y el NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.	26
7. Diagrama de cajas de biomasa observada y predicha por la ecuación de valores NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.	28
8. Biomasa y carbono de los sistemas agrosilvícolas usando la ecuación para valores NDVI.....	30
9. Instalación del equipo Field Map.....	68
10. Codificación de árboles.	68
11. Codificación de café.....	69
12. Geo-posicionamiento y estimación de altura de árboles.....	69
13. Geo-posicionamiento de café.....	70
14. Medición de altura de café.	70

RESUMEN

El estudio se realizó con el objetivo de evaluar los índices de vegetación para la estimación de biomasa arbórea en sistemas agrosilvícolas de fincas en Zihuateutla, Puebla, México. El trabajo inicio con la ubicación de 20 parcelas pre-establecidas, las cuales estaban distribuidas en 6 fincas agrosilvícolas, en cada parcela usando la tecnología Field Map se geoposicionaron todos los individuos (café y arboles) obteniendo sus coordenadas, asimismo, se evaluaron sus variables dasométricas, las cuales fueron necesarias para la estimación de biomasa usando ecuaciones alométricas. Por otro lado, usando datos de la imagen satelital Sentinel 2 del mes de febrero de 2019 se generaron cuatro índices de vegetación (NDVI, SAVI, EVI, RVI) que fueron correlacionados con los datos de biomasa obtenidos en campo demostrando que sí existe relación entre las variables índices de vegetación y biomasa, siendo el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) quien presentó mayor correlación de Spearman ($\rho=-0.53$). Posteriormente se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2), todo esto con finalidad de obtener una ecuación que permita estimar biomasa a partir de valores de pixel del índice de vegetación, dando como resultado que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es el que mejor estima los datos de biomasa usando una ecuación polinómica con un $R^2=0.6618$.

Palabras clave: Índices de vegetación, biomasa, agrosilvícolas.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un crecimiento significativo de la población a nivel mundial, y con ello también un incremento en el consumo de todo tipo de recursos, modificando casi por completo la superficie del planeta, y si a eso le sumamos el desarrollo exponencial de la tecnología aplicado al campo automotriz dio como resultado que por primera vez el humano produjera impactos globales sobre el planeta, cambiando drásticamente la vida del mismo. Uno de los impactos de mayor importancia es el cambio climático, producido por un calentamiento inusual de toda la corteza terrestre a causa de los gases de efecto invernadero. Lo más probable es que este impacto se acelere en las próximas décadas; y si no se produce un cambio en el comportamiento de la humanidad, las consecuencias serán catastróficas durante el siglo XXII. Este impacto puede ser mitigado aprendiendo la cultura del reciclaje o aplicando la economía circular. Asimismo, la naturaleza nos brinda una alternativa para combatir el cambio climático, a través de la siembra y mantenimiento de los árboles y bosques, los cuales absorben el dióxido de carbono de la atmósfera y lo almacenan en su estructura en forma de madera.

En los últimos tiempos y con el avance de la tecnología, la teledetección ha sido de suma importancia para la estimación de la biomasa aérea forestal; en este contexto, se pretende en esta investigación estimar la

biomasa aérea y carbono en sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México, con el uso de sensores remotos y datos de campo, lo cual permitirá establecer una línea base en la cuantificación de la biomasa aérea en ecosistemas forestales, los resultados servirán para investigaciones futuras en el monitoreo y estimación de biomasa y carbono a nivel regional.

Existe escasa información sobre la estimación de biomasa arbórea mediante índices de vegetación obtenidos de sensores remotos en la estimación de biomasa arbórea en sistemas agrosilvícolas.

El estudio de investigación aportará información para el conocimiento de la relación que existe entre los índices de vegetación y las variables dasométricas para la estimación de biomasa arbórea y carbono.

Con los resultados del presente trabajo se beneficiarán las entidades públicas y privadas relacionados a la conservación y valoración de servicios ecosistémicos.

En relación al problema se plantea como interrogante ¿Qué índice de vegetación se ajusta mejor a los datos de campo para la estimación de biomasa arbórea en sistemas agrosilvícolas?

Por lo tanto, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Evaluar los índices de vegetación para la estimación de biomasa arbórea en sistemas agrosilvícolas de fincas en Zihuateutla, Puebla, México.

Objetivo específicos

- Estimar el contenido de biomasa arbórea y carbono en sistemas agrosilvícolas a través de ecuaciones alométricas.
- Determinar el modelo matemático mediante la correlación entre los índices de vegetación y los datos de biomasa arbórea.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Biomasa y carbono almacenado

Según NOGUÉS (2010), la biomasa es la materia orgánica originada de un proceso biológico, que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo, la cual por lo general se consume a un ritmo inferior o igual al que se produce. Sin embargo, SCHLEGEL *et al.* (2001) mencionan que es frecuente clasificarla en varios componentes, resaltando los más particulares: fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, madera caída y hojarasca. Así mismo OLIVIER (1981) afirma que la biomasa es el peso de la materia orgánica que se encuentra en la estructura del árbol en un momento dado, y se expresa en peso por unidad de área: g/m²; kg/m²; ton/ha. Comúnmente en las estimaciones de biomasa se separa la biomasa viva de la necromasa (ramas muertas más hojarasca del suelo).

Según BROWN (1997), los estudios de estimación de biomasa tienen como finalidad entender los ciclos de energía y de nutrientes, así como observar el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO₂. Sin embargo, FIGUEROA y REDONDO (2007) indican que los tejidos vegetales suelen contener entre el 45 y el 50% de carbono. Las plantas asimilan más carbono en la fotosíntesis que el que oxidan en la respiración, de esta forma crecen y se convierten en sumideros naturales de CO₂.

CUBERO y ROJAS (1999) Indican en su estudio realizado en plantaciones que la calidad del sitio y la respectiva edad de la planta influyen directamente en el contenido biomasa y carbono. Sin embargo, GOFC (2013) afirma que los factores físicos, climáticos, biológicos y el tipo de cobertura vegetal presente en el área influyen en el contenido de carbono.

2.2. Ciclo del carbono

El carbono es la unidad principal de la vida en el planeta, cumpliendo un ciclo esencial para el desarrollo de todos los organismos. Este elemento se acumula en depósitos como los océanos que almacenan la mayor cantidad (38 000 Gt), seguido por el suelo (15 000 Gt), la atmósfera (750 Gt) y las plantas (560 Gt), y circula activamente entre los mismos (FAO, 2002).

El ciclo del carbono inicia con la fijación del carbono inorgánico disponible en la atmósfera, originado por causas antrópicas, incendios, erupciones volcánicas y respiración de los seres vivos. Durante el proceso es transformado, mediante la fotosíntesis que cumplen las plantas y algunos microorganismos, en carbono orgánico (VALTUEÑA, 2002).

En esta fase, el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno que pasa a estar disponible en la atmósfera. La planta obtiene energía debido al consumo de algunos carbohidratos y mediante las hojas o raíces libera anhídrido carbónico. Simultáneamente, una parte es consumida por animales, que de igual manera liberan CO₂ en sus funciones metabólicas. Finalizando el ciclo, una vez muertas las plantas y los animales, son descompuestos por microorganismos presentes en el suelo, ocasionando que el

carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera, iniciándose nuevamente el ciclo (ORELLANA *et al.*, 2012).

2.3. Estimación de biomasa aérea

Para la estimación de biomasa existen los métodos directos y los indirectos. Según (BROWN *et al.*, 1989) indican que para determinar la biomasa de cada componente del árbol es necesario realizar el método directo o también llamado destructivo, por su parte (HUXLEY, 1932) menciona que la biomasa se puede estimar de manera indirecta, para lo cual es necesario contar con modelos alométricos que hayan sido construidos para ese tipo de especies o ecosistemas, dichos modelos alométricos estiman biomasa en base a parámetros como diámetro, altura y densidad.

Según ÁLVAREZ (2008), el cálculo de la biomasa es la fase inicial para evaluar la productividad de los ecosistemas y el aporte de los bosques tropicales en el ciclo global del carbono. Sin embargo, BROWN (1997) indica que existen dos métodos, los cuales se resumen como:

a. Métodos directos: este procedimiento se basa en cortar un árbol y determinar el contenido de biomasa pesando directamente cada uno de sus componentes (raíz, fuste, ramas, hojas) (KLINGE y HERRERA, 1983).

b. Métodos indirectos: se realizan a través de ecuaciones alométricas y modelos matemáticos, para conocer el carbono del bosque sin la necesidad de derribar los árboles, relacionando la biomasa del árbol con sus dimensiones en pie (ACOSTA *et al.*, 2002).

2.4. Ecuaciones alométricas

Para poder estimar la biomasa aérea de las especies es muy valioso el uso de ecuaciones alométricas o también llamado el método indirecto, el inconveniente radica en la existencia de pocas ecuaciones para una especie en particular, esto debido a ciertas complejidades, desde el punto de vista logístico, operativo y de costos. Sin embargo, existen varias ecuaciones genéricas para un determinado ecosistema (ARISTIZÁBAL, 2011).

Un modelo alométrico es una ecuación matemática que relaciona las variables del árbol (diámetro a la altura del pecho, altura total, diámetro de copa, densidad de la madera) con la biomasa del mismo, con la finalidad de saber si presentan relación y el grado de dependencia de la biomasa en función a las variables del árbol, algunos modelos alométricos necesitan solo algunas de esas variables y otras una combinación de ellas (VALLEJO *et al.*, 2008).

2.5. Estimación de carbono

En la mayoría de los estudios sobre almacenamiento de carbono en la biomasa, se asume que el contenido de carbono corresponde aproximadamente al 50% de biomasa de los árboles vivos (YEPES *et al.*, 2011), por lo que se sugiere usar un factor de 0.5 para transformar la biomasa aérea a carbono.

CUBERO y ROJAS (1999) señalan que el carbono aéreo almacenado está íntimamente relacionado con el incremento de la biomasa. Sin embargo, (LAPEYRE *et al.*, 2004) mencionan que los sistemas agroforestales capturan mayor cantidad de carbono en comparación de los sistemas de

monocultivo, esto debido a la presencia de especies forestales, que aparte de dar sombra al cultivo también son una fuente importante de almacenamiento de carbono.

2.6. Imágenes Sentinel 2

El satélite sentinel 2 pertenece a la agencia espacial europea (ESA), presenta dos gemelos Sentinel 2A y sentinel 2B, fueron lanzados el 23 de junio de 2015 y el 7 de marzo de 2017 respectivamente, ambos presentan 13 bandas con distintas resoluciones espaciales (10m, 20m o 60m) (Cuadro 1), cada satélite tiene una resolución temporal de 10 días, pero si ambos se encuentran operativos, la resolución temporal se reduce a 5 días, es decir cada 5 días obtenemos nuevas imágenes satelitales. (ESA, 2015).

Cuadro 1. Bandas de SENTINEL 2.

Bandas Sentinel-2	Longitud de Onda Central (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 – Costero / aerosol	0.443	60
Banda 2 - Azul	0.49	10
Banda 3 - Verde	0.56	10
Banda 4 - Rojo	0.665	10
Banda 5 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	0.705	20
Banda 6 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	0.74	20
Banda 7 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	0.783	20
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	0.842	10
Banda 8A - Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)	0.865	20
Banda 9 - Vapor de Agua	0.945	60
Banda 10 - Cirrus	1.375	60
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	1.61	20
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)	2.19	20

Fuente: Sentinel-2 User Handbook (ESA, 2015).

2.7. Índices de vegetación

BANNARRI *et al.* (1995) mencionan que en el campo de la teledetección se han desarrollado diferentes índices de vegetación para evaluar las características de cubiertas vegetales a través de mediciones espectrales. De igual manera, (SILLEOS *et al.*, 2006) exponen que la vegetación saludable presenta una interacción propia 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 a ello se debe el color característico de la vegetación, al mismo tiempo el infrarrojo cercano es reflejado por las estructuras internas de la hoja; este comportamiento da lugar a utilizar imágenes de satélite para comprender la condición de la vegetación

2.7.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Fue presentado por ROUSE *et al.* (1974) para producir un índice de vegetación (IV) espectral que separa la vegetación verde de su fondo brillante del suelo utilizando datos digitales Landsat MSS. Es el índice de vegetación más usado comúnmente ya que conserva la capacidad de minimizar los efectos de la topografía mientras se produce una escala de medición lineal. Además, la escala de medición tiene la propiedad deseable de rango de -1 a 1, donde 0 representa la aproximación a un valor de no vegetación, y valores negativos representan superficies sin vegetación (SILLEOS *et al.*, 2006).

2.7.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Fue propuesto por HUETE (1988). Este índice de vegetación tiene la finalidad de disminuir el efecto del fondo del suelo al momento de captar la señal de vegetación, para ello la ecuación presenta una constante L, que varía según las características del suelo, asimismo, la constante L se elige en base a la densidad de vegetación presente en el área de estudio. En casos de vegetación muy baja, el uso de un factor L de 1.0 es sugerido, para el intermedio 0.5, y para altas densidades 0.25 (SILLEOS *et al.*, 2006).

2.7.3. Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

Fue desarrollado por el grupo MODIS Land para usar con datos MODIS. Es un NDVI modificado con un factor de ajuste del suelo L y dos coeficientes C1 y C2, que describen el uso de banda azul en corrección de la banda roja para dispersión de aerosol atmosférico. Este IV ha mejorado la sensibilidad a las regiones de alta biomasa e influencia atmosférica reducida (HUETE *et al.*, 1999).

2.7.4. Índice de Vegetación RATIO (RVI)

Este índice fue propuesto por PEARSON y MILLER (1972), Siendo uno de los primeros índices de vegetación de la historia, utiliza una ecuación bastante simple, en la que solo consideran la longitud de onda de la banda roja y de la infrarroja cercana, el cálculo del índice de vegetación Ratio (RVI) consiste en dividir la reflectancia de la banda infrarroja cercana (NIR) entre la reflectancia de la banda roja (Red).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El estudio se realizó en fincas agrosilvícolas de café y especies forestales ubicadas en el municipio de Zihuateutla, Puebla, México (Figura 1)

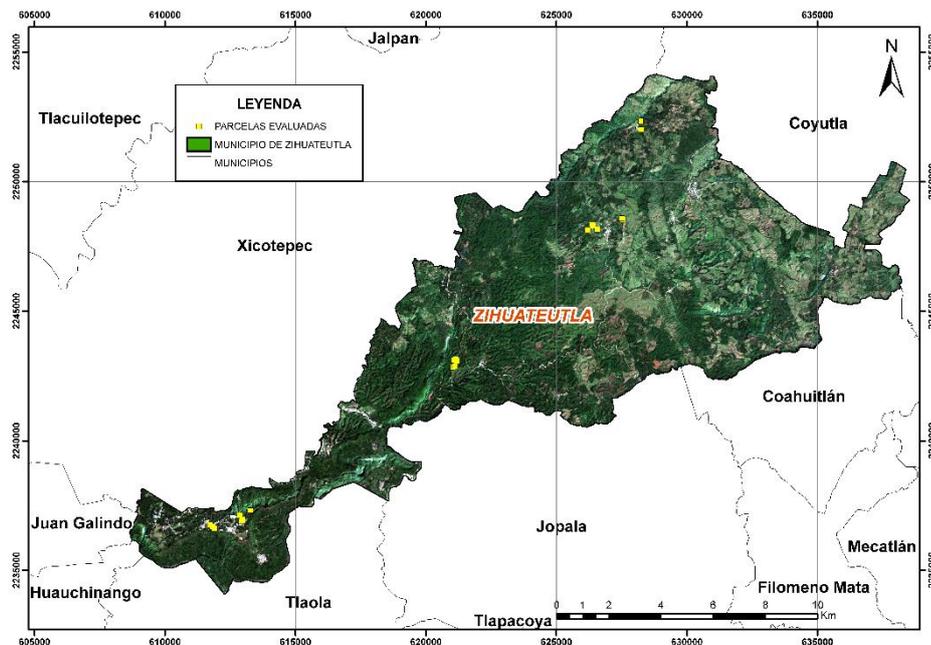


Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas de muestreo dentro del municipio de Zihuateutla, Puebla, México.

3.1.1. Clima

Según INAFED (2018), El municipio de Zihuateutla se encuentra en la clasificación climática de templados de la sierra en transición a los cálidos del declive de golfo, asimismo, al ser una extensión territorial grande presentan

dos tipos de clima uno es el clima semicálido húmedo, con temperaturas que van de -3 a 18°C y precipitación mayor a 40 milímetros, y el otro es el clima cálido húmedo, con la particularidad de que llueve casi todo el año, con precipitación mayor a 60 milímetros, y temperatura media anual de 22°C, sin embargo, su mes más frío presenta una temperatura de 18° C.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Equipos

Handheld Algiz 10x (Tablet con Field Map Data Collector para la colección de datos de campo), TruPulse 360R (Láser rangefinder e inclinómetro compacto, ligero y resistente combinado con brújula electrónica), Filtro foliar (filtro de vegetación), Bastón de medida telescópico (Peso: 2800 g, longitud máxima: 4,6 m, longitud mínima: 1,50 m), reflector circular (tamaño: 9 cm de diámetro), Trípode de carbono con base de nivelación, Soporte para láser rangefinder TruPulse, péndulo, forcípula electrónica, cámara digital, laptop Lenovo (Ideapad z400), brújula SUUNTO.

3.2.2. Software

Field-Map Project Manager (FMPPM), Field-Map Data Collector (FMDC), Microsoft Excel 2013, QGIS 2.18, InfoStat (Versión estudiantil).

3.3. Metodología

El trabajo inicio con la ubicación de las 20 parcelas (10m x10m) pre-establecidas, las cuales estaban distribuidas en 6 fincas agrosilvícolas de café y especie forestales, en cada parcela usando la tecnología Field Map se geo-

posicionaron todos los individuos (café y arboles) obteniendo sus coordenadas (X, Y, Z), asimismo, se evaluó sus variables dasométricas, las cuales fueron necesarias para la estimación de biomasa usando ecuaciones alométricas.

3.3.1. Geo-posicionamiento de los árboles y cafetos

Para el geo-posicionamiento de los árboles y cafetos con la tecnología Field Map se utilizó la metodología llamada “radiación” que permite determinar coordenadas desde un punto fijo. Se estacionó el equipo Field Map debidamente calibrado y nivelado en el centro de cada parcela y desde ahí usando el TruPulse 360R se realizaron disparos laser hacia el reflector que está colocado sobre la superficie del individuo (Figura 2), dicha coordenada (X, Y, Z) se guarda automáticamente en el computador de campo.

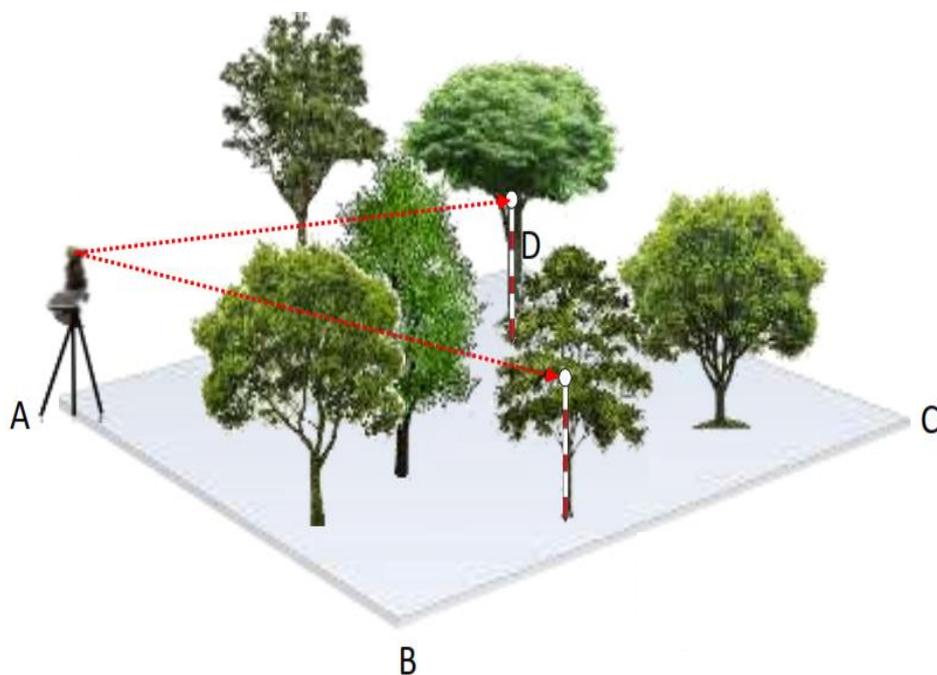


Figura 2. Método de ubicación de los individuos a evaluar (IFER, 2011)

3.3.2. Medición de las variables diámetro y altura

3.3.2.1. Medición de la variable diámetro de especies forestales

a) Diámetro de especies forestales

Antes de realizar la medición del diámetro se limpió con cuidado la corteza del árbol en el sitio donde se tomará la medida, esto con la finalidad de evitar que algún musgo ocasione error en la medida. El diámetro de los árboles se midió con forcípula electrónica, y fue medido con corteza a la altura de 1.30 metros, tomada desde la base del árbol.

3.3.2.2. Medición de la variable altura y diámetro de las especies de café

a) Altura de las especies de café

Las alturas de las plantas de café fueron medidas con wincha, iniciando desde la base de la planta hasta el ápice de la misma obteniendo la altura total, tal como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Medición de altura del café.

b) Diámetro de las especies de café

Para el diámetro de las especies de café se utilizó una forcípula electrónica y se midió el diámetro del tallo principal a 15 cm del suelo, considerándose el tallo principal al de mayor grosor.

3.3.3. Estimación del contenido de biomasa arbórea y carbono

3.3.3.1. Biomasa arbórea y carbono de especies forestales

En la estimación de biomasa arbórea se utilizó la ecuación para árboles de sombrero dentro un SAF propuesto por (ARISTIZÁBAL, 2011), el cual considera la variable Diámetro a la Altura del Pecho (dap) de cada árbol.

$$\ln(B_T) = 2.44476 * \ln(dap) - 1.98675 \quad R^2=0.87$$

Donde:

B_T : Biomasa total (Kg)

dap : Diámetro a la altura del pecho (cm)

\ln : Logaritmo natural base e

En la mayoría de los estudios sobre almacenamiento de carbono en la biomasa, se asume que el contenido de carbono corresponde aproximadamente al 50% de biomasa de los árboles vivos (YEPES *et al.*, 2011). Por lo que se optó a usar un factor de 0.5 para transformar la biomasa arbórea (Kg) a carbono (Kg) para después ser transformado a toneladas(t).

3.3.3.2. Biomasa y carbono de especies de café

En la estimación de biomasa para cafetos se utilizó la ecuación alométrica propuesta por (SEGURA *et al.*, 2006), donde se consideran las variables Diámetro a 15 cm del suelo (d15) y altura total(h) de cada cafeto.

$$\text{Log}(BT) = -1.113 + 1.578 * \text{Log}(d15) + 0.581 * \text{Log}(h) \quad R^2=0.94$$

Donde:

BT : Biomasa total (Kg)

d15 : Diámetro a 15cm del suelo (cm)

h : Altura total

Log : Logaritmo base 10

La cantidad de carbono se calculó multiplicando la biomasa por el factor de conversión 0.5 obteniendo carbono en kilogramos, y finalmente se realizó la conversión a toneladas.

3.3.4. Adquisición de imágenes satelitales y determinación de índices de vegetación

3.3.4.1. Adquisición de imágenes satelitales

Se trabajó con una imagen satelital SENTINEL 2 Nivel 2A con fecha 16 de febrero del 2019, proporcionado por la EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) a través del portal COPERNICUS OPEN ACCESS HUB; la cual se descarga por defecto con corrección geométrica, radiométrica y corrección

atmosférica. Asimismo, la imagen tuvo un porcentaje de nubosidad menor al 10%, las características de la imagen se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características de la imagen SENTINEL 2A

PROPIEDADES	IMAGEN FEBRERO 2019
ID de la imagen	S2A_MSIL2A_20190216T170401_N0211_R069_T14QPH_20190216T205252
Formato	GEOTIFF
Nivel de procesamiento	LEVEL 2A
Fecha de captura	16/02/2019
Porcentaje de nubosidad	0.02
Proyección	UTM
Datum	WGS 84
Zona	14 N
Resolución espacial	Resolución 10 m (banda2, banda 3, banda 4, banda 8) Resolución 20 m (banda5, banda 6, banda 7, banda 8A, banda 11, banda 12) Resolución 60 m (banda 1, banda 9, banda 10)

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4.2. Calculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Después de la adquisición de las imágenes satelitales se calculó el NDVI mediante la siguiente formula (HUETE *et al.*,1999).

$$NDVI = \frac{(\rho_{S_{NIR}} - \rho_{S_{RED}})}{(\rho_{S_{NIR}} + \rho_{S_{RED}})}$$

Donde:

$\rho_{S_{NIR}}$: Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

$\rho_{S_{RED}}$: Reflectancia de la banda roja – RED

3.3.4.3. Calculo de Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

Asimismo, para el cálculo de Índice de Vegetación Mejorado (EVI) se usó la siguiente ecuación (HUETE *et al.*,1999).

$$EVI = G * \frac{(\rho S_{NIR} - \rho S_{RED})}{(\rho S_{NIR} + C_1 \rho S_{RED} - C_2 \rho S_{BLUE} + L)}$$

Donde:

ρS_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρS_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED

ρS_{BLUE} : Reflectancia de la banda azul – BLUE

L : Ajuste del fondo del dosel, siendo $L = 1$.

G : Factor de ganancia, siendo $G = 2.5$

C_1 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo $C_1 = 6$

C_2 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo $C_2 = 7.5$

3.3.4.4. Calculo de Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Seguidamente para el cálculo de Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) se utilizó la siguiente ecuación (HUETE,1988).

$$SAVI = \frac{(\rho S_{NIR} - \rho S_{RED})}{(\rho S_{NIR} + \rho S_{RED} + L)} * (1 + L)$$

Donde:

ρS_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρS_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED

L : Si L sería 0, entonces SAVI es igual al NDVI, siendo $L=0.5$.

3.3.4.5. Índice de Vegetación RATIO (RVI)

Para el cálculo del índice de vegetación RATIO se utilizó la siguiente ecuación propuesta por (PEARSON y MILLER, 1972).

$$RVI = \frac{\rho S_{NIR}}{\rho S_{RED}}$$

Donde:

ρS_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρS_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED

3.3.5. Análisis de datos

Se utilizó el software estadístico InfoStat (versión estudiantil) para el análisis de las 20 parcelas evaluadas, debido a que nuestros datos no cumplían con el supuesto de normalidad para usar la correlación de Pearson, se realizó la prueba de correlación de Spearman para determinar si existe relación entre la biomasa y los índices de vegetación.

Asimismo, se realizó las regresiones estadísticas lineales y no lineales entre la variable biomasa y los índices de vegetación con el fin de determinar la ecuación matemática que muestre mejores resultados para la estimación de biomasa.

Después de determinar la mejor ecuación que permita estimar biomasa a partir de Índices de Vegetación se procedió a evaluar la exactitud de la predicción de biomasa aérea mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

IV. RESULTADOS

4.1. Contenido de biomasa arbórea y carbono en sistemas agrosilvícolas a través de ecuaciones alométricas

4.1.1. Biomasa y carbono de las 20 parcelas (10m x10m) evaluadas dentro de los sistemas agrosilvícolas

Usando ecuaciones alométricas se estimó la biomasa y carbono almacenada en las 20 parcelas (Cuadro 3), se evaluó un total de 529 cafés y 70 árboles, la biomasa varió entre 0.16 t y 3.93 t y un promedio de 1.13 t, de igual manera el carbono varió entre 0.08 t y 1.97 t con un promedio de 0.57 t.

Cuadro 3. Biomasa y carbono de las 20 parcelas (10m x10m) evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México.

N°	PARCELA EVALUADA (10m x 10m)	N° DE CAFÉS	N° DE ARBOLES	BIOMASA (Kg)		BIOMASA TOTAL (t)	CARBONO TOTAL (t)
				CAFÉ	ARBOL		
1	Los pinos (P1)	32	3	15.29	2118.41	2.13	1.07
2	Los pinos (P2)	30	3	32.59	3898.10	3.93	1.97
3	Los pinos (P3)	22	3	19.82	2896.77	2.92	1.46
4	Mazacoatlan (P1)	23	2	0.40	1234.33	1.23	0.62
5	Mazacoatlan (P2)	21	2	10.00	512.20	0.52	0.26
6	Mazacoatlan (P3)	28	3	55.61	3413.42	3.47	1.73
7	Mazacoatlan (P4)	33	2	34.85	902.93	0.94	0.47
8	La cumbre (P1)	25	2	15.58	536.35	0.55	0.28
9	La cumbre (P2)	23	3	16.59	819.32	0.84	0.42
10	La cumbre (P3)	29	2	11.87	530.89	0.54	0.27
11	La cumbre (P4)	25	6	6.62	1173.31	1.18	0.59
12	La cumbre (P5)	28	2	10.00	173.04	0.18	0.09
13	Tenanguito (P1)	27	6	21.82	492.36	0.51	0.26
14	Tenanguito (P2)	31	5	28.37	494.23	0.52	0.26
15	Tenanguito (P3)	28	4	5.61	310.47	0.32	0.16
16	Tenanguito (P4)	27	4	17.86	909.96	0.93	0.46
17	El salto (P1)	19	5	9.02	465.65	0.47	0.24
18	El salto (P2)	26	2	20.71	142.03	0.16	0.08
19	La laguna (P1)	29	5	12.87	472.66	0.49	0.24
20	La laguna (P2)	23	6	15.86	829.21	0.85	0.42
TOTAL		529	70	361.34	22325.65	22.69	11.34
VALOR MÍNIMO						0.16	0.08
VALOR MÁXIMO						3.93	1.97
PROMEDIO						1.13	0.57

La parcela que almacenó mayor cantidad de biomasa y carbono fue “Los Pinos (P2)” almacenando 3.93 t de biomasa y 1.97 t de carbono, y la parcela que menor cantidad almacenó fue “El Salto (P2)” con 0.16 t de biomasa y 0.08 t de carbono (Figura 4)

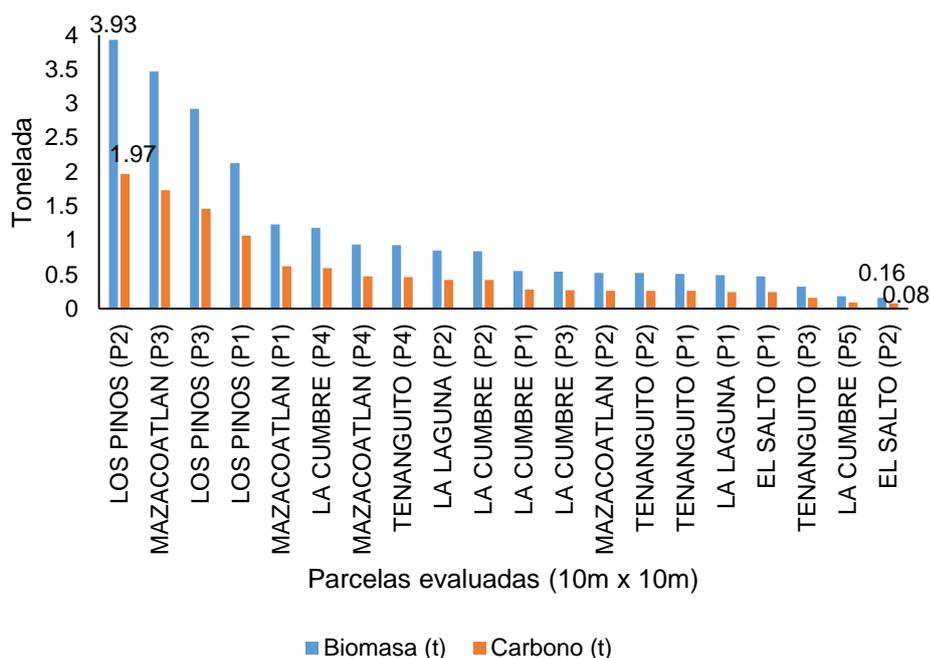
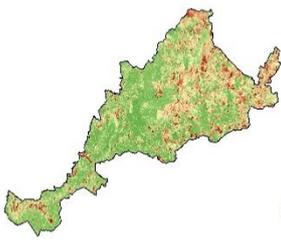
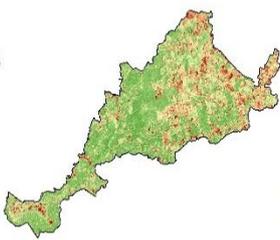
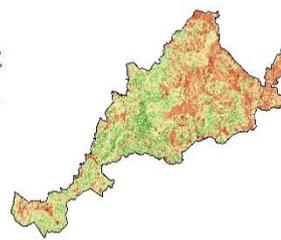


Figura 4. Biomasa y carbono de las parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México.

4.2. Cálculo de índices de vegetación

Se calculó 4 índices de vegetación para todo el municipio de Zihuateutla donde están ubicados los sistemas agrosilvícolas obteniendo los valores mínimos de NDVI, SAVI, EVI y RVI de -0.34, -0.41, -0.09 y 1.03, valores máximos de 0.99, 1.49, 1.97, 28.10, y promedios de 0.76, 1.14, 0.89, 8.61 respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Índices de vegetación del municipio Zihuateutla, Puebla, México.

INDICES DE VEGETACIÓN							
NDVI		SAVI		EVI		RVI	
							
MÍNIMO	-0.34	MÍNIMO	-0.41	MÍNIMO	-0.09	MÍNIMO	1.03
MÁXIMO	0.99	MÁXIMO	1.49	MÁXIMO	1.97	MÁXIMO	28.10
PROMEDIO	0.76	PROMEDIO	1.14	PROMEDIO	0.89	PROMEDIO	8.61

4.2.1. Índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas

Después de calcular los 4 índices de vegetación, se procedió a extraer sus valores para las 20 parcelas evaluadas (Cuadro 5), los valores mínimos de NDVI, SAVI, EVI y RVI fueron de 0.72, 1.08, 0.72 y 6.11, valores máximos de 0.89, 1.33, 1.34 y 17.15, y promedios de 0.82, 1.23, 2.20 y 10.66 respectivamente.

Cuadro 5. Índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México.

N°	PARCELA EVALUADA (10m x 10m)	INDICES DE VEGETACIÓN			
		NDVI	SAVI	EVI	RVI
1	Los pinos (P1)	0.79	1.18	0.91	8.35
2	Los pinos (P2)	0.74	1.11	0.81	6.65
3	Los pinos (P3)	0.72	1.08	0.72	6.11
4	Mazacoatlan (P1)	0.74	1.12	0.80	6.81
5	Mazacoatlan (P2)	0.81	1.21	1.04	9.41
6	Mazacoatlan (P3)	0.75	1.13	0.89	7.11
7	Mazacoatlan (P4)	0.79	1.19	0.93	8.60
8	La cumbre (P1)	0.84	1.26	1.13	11.35
9	La cumbre (P2)	0.87	1.30	1.22	13.87
10	La cumbre (P3)	0.89	1.33	1.34	17.15
11	La cumbre (P4)	0.87	1.31	1.24	14.55

N°	PARCELA EVALUADA (10m x 10m)	INDICES DE VEGETACIÓN			
		NDVI	SAVI	EVI	RVI
12	La cumbre (P5)	0.84	1.26	1.16	11.76
13	Tenanguito (P1)	0.86	1.29	1.20	13.44
14	Tenanguito (P2)	0.84	1.27	1.13	11.84
15	Tenanguito (P3)	0.83	1.24	1.03	10.58
16	Tenanguito (P4)	0.82	1.24	1.05	10.34
17	El salto (P1)	0.85	1.28	1.14	12.42
18	El salto (P2)	0.85	1.27	1.15	12.03
19	La laguna (P1)	0.79	1.18	0.91	8.34
20	La laguna (P2)	0.85	1.28	1.14	12.45
VALOR MÍNIMO		0.72	1.08	0.72	6.11
VALOR MÁXIMO		0.89	1.33	1.34	17.15
PROMEDIO		0.82	1.23	2.20	10.66

4.3. Del modelo matemático mediante la correlación entre los índices de vegetación y los datos de biomasa arbórea

Según el análisis de correlación de Spearman (ρ), el índice de vegetación que presenta mayor relación con la biomasa es el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) con un valor de -0.53 demostrando que presenta correlación negativa y moderada, asimismo, este índice presenta un p-valor= 0.0214 el cual indica que la correlación es significativa (Cuadro 6).

Cuadro 6. Análisis de correlación de Spearman (ρ) entre la biomasa y los índices de vegetación de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas en Zihuateutla, Puebla, México.

Variable	Índice de vegetación	N° de parcelas	Correlación Spearman (ρ)	p-valor
Biomasa (t)	NDVI	20	-0.49	0.0326
Biomasa (t)	SAVI	20	-0.49	0.0326
Biomasa (t)	EVI	20	-0.53	0.0214
Biomasa (t)	RVI	20	-0.49	0.0326

Se muestra el gráfico de dispersión de la correlación entre el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y la biomasa de las 20 parcelas (Figura 5), donde se muestra una correlación negativa con un valor de -0.53 demostrando una relación inversa, lo cual indica que a menor índice de vegetación es mayor el contenido de biomasa. Asimismo, la dispersión de datos entre estas dos variables no presenta una tendencia lineal, y se ajusta a un modelo polinómico.

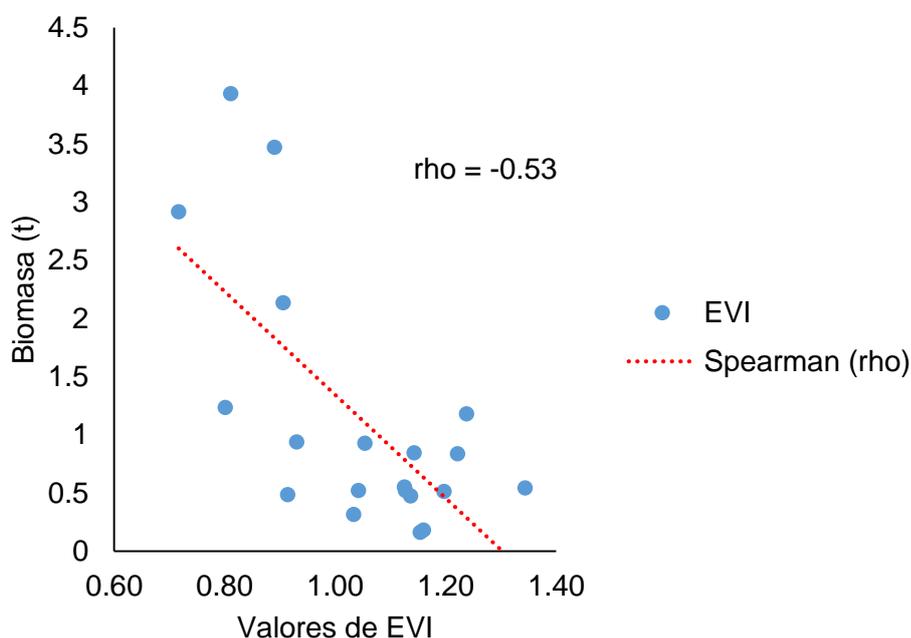


Figura 5. Correlación entre biomasa y el EVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.

Se generaron las ecuaciones matemáticas (modelos) y su respectivo coeficiente de determinación (R^2) para todos los índices de vegetación evaluados, donde se observa que el índice de vegetación NDVI es el que presenta mayor coeficiente de determinación ($R^2=0.6618$) en su ecuación de tipo polinómica y es el que mejor se ajusta a la tendencia (Cuadro 7).

Cuadro 7. Ecuaciones para valores de índices de vegetación

ÍNDICE DE VEGETACIÓN	ECUACIÓN	R ²	TIPO
NDVI	$B = -16.58(\text{NDVI}) + 14.68$	0.5483	Lineal
	$B = -13.44\ln(\text{NDVI}) - 1.6068$	0.5616	Logarítmica
	$B = 169.01(\text{NDVI})^2 - 288.1(\text{NDVI}) + 123.31$	0.6618	Polinómica
	$B = 13559e^{-11.95(\text{NDVI})}$	0.4457	Exponencial
SAVI	$B = -11.054(\text{SAVI}) + 14.68$	0.5483	Lineal
	$B = -13.44\ln(\text{SAVI}) + 3.8436$	0.5616	Logarítmica
	$B = 75.121(\text{SAVI})^2 - 192.08(\text{SAVI}) + 123.32$	0.6616	Polinómica
	$B = 13557e^{-7.967(\text{SAVI})}$	0.4456	Exponencial
EVI	$B = -4.4376(\text{EVI}) + 5.7823$	0.4578	Lineal
	$B = -4.576\ln(\text{EVI}) + 1.2872$	0.4882	Logarítmica
	$B = 11.806(\text{EVI})^2 - 28.547(\text{EVI}) + 17.768$	0.5525	Polinómica
	$B = 24.635e^{-3.297(\text{EVI})}$	0.3953	Exponencial
RVI	$B = -0.2331(\text{RVI}) + 3.6191$	0.3971	Lineal
	$B = -2.656\ln(\text{RVI}) + 7.3163$	0.4872	Logarítmica
	$B = 0.0529(\text{RVI})^2 - 1.3949(\text{RVI}) + 9.5507$	0.6253	Polinómica
	$B = 4.4931e^{-0.164(\text{RVI})}$	0.3086	Exponencial

B= Biomasa (t)

NDVI= Valor de pixel del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

SAVI= Valor de pixel del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.

EVI= Valor de pixel del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

RVI= Valor de pixel del Índice de Vegetación Ratio.

Además, se muestra los Coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la ecuación polinómica para valores de NDVI (Cuadro 8), donde indica que cada coeficiente de regresión (constante, NDVI, $(NDVI)^2$) tiene un p-valor significativo ($p < 0.05$), con lo cual podemos decir que nuestros datos no son producto del azar, sino que responder a un patrón. Asimismo, se muestra la regresión entre la biomasa y los valores de NDVI (Figura 6).

Cuadro 8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la ecuación polinómica para valores de NDVI

Coeficientes de regresión	Estimadores	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
constante	123.31	45.56	27.19	219.43	2.71	0.015
NDVI	-288.1	113.7	-528.04	-48.15	-2.53	0.0214
$(NDVI)^2$	169.01	70.76	19.71	318.31	2.39	0.0288

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

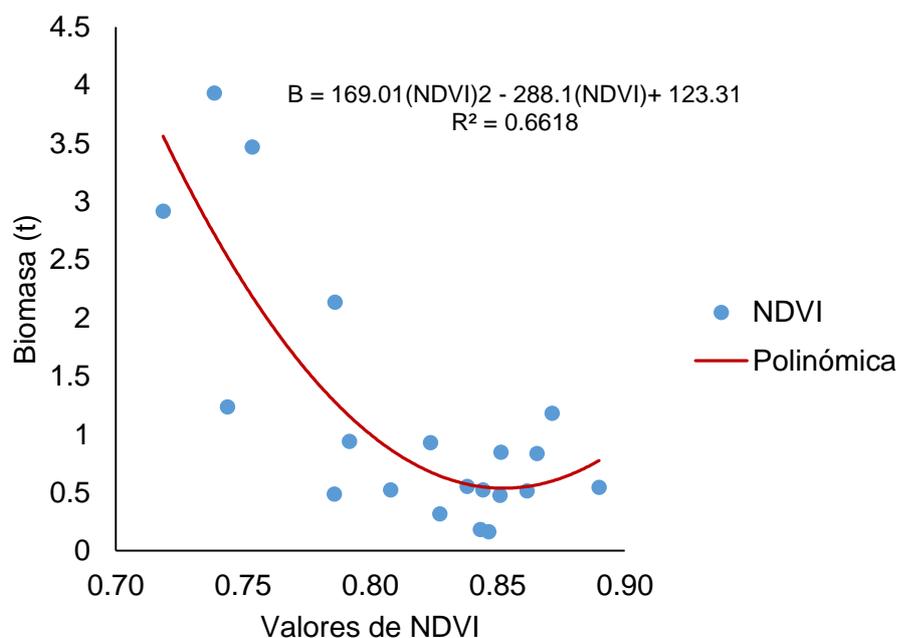


Figura 6. Regresión entre biomasa y el NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.

Asimismo, se detallan los resultados obtenidos con la ecuación elaborada para la estimación de la biomasa usando valores del NDVI, donde se muestra un valor promedio \pm EE de biomasa observada y predicha para las 20 parcelas con valores de 1.13 ± 0.25 t y 1.13 ± 0.20 t respectivamente; Según este resultado se obtiene una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de biomasa de 0.622 t, lo cual indica que existe muy poca variación entre los datos observados y predichos, tal como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Estimación de biomasa observada y predicha por la ecuación de valores NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.

N°	PARCELA EVALUADA (10m x 10m)	BIOMASA TOTAL (t)		RMSE
		OBSERVADA	PREDICHA	
1	Los pinos (P1)	2.13	1.28	
2	Los pinos (P2)	3.93	2.72	
3	Los pinos (P3)	2.92	3.56	
4	Mazacoatlan (P1)	1.23	2.52	
5	Mazacoatlan (P2)	0.52	0.87	
6	Mazacoatlan (P3)	3.47	2.18	
7	Mazacoatlan (P4)	0.94	1.15	
8	La cumbre (P1)	0.55	0.57	
9	La cumbre (P2)	0.84	0.56	
10	La cumbre (P3)	0.54	0.77	
11	La cumbre (P4)	1.18	0.60	
12	La cumbre (P5)	0.18	0.55	
13	Tenanguito (P1)	0.51	0.55	
14	Tenanguito (P2)	0.52	0.54	
15	Tenanguito (P3)	0.32	0.64	
16	Tenanguito (P4)	0.93	0.67	
17	El salto (P1)	0.47	0.53	
18	El salto (P2)	0.16	0.54	
19	La laguna (P1)	0.49	1.28	
20	La laguna (P2)	0.85	0.53	
PROMEDIO \pm EE		1.13 \pm 0.25	1.13 \pm 0.20	0.622

EE: Error estándar.

En el diagrama de cajas se muestra la comparación entre la biomasa observada (BO) y la biomasa predicha (BP) estimada usando la ecuación de valores NDVI, donde se observa que ambos presentan una distribución asimétrica a la derecha, lo cual indica que la minoría de los valores se encuentran en la parte superior de la media, asimismo, se muestra que los valores más altos de biomasa se encuentran hasta el tercer cuartil (Figura 7).

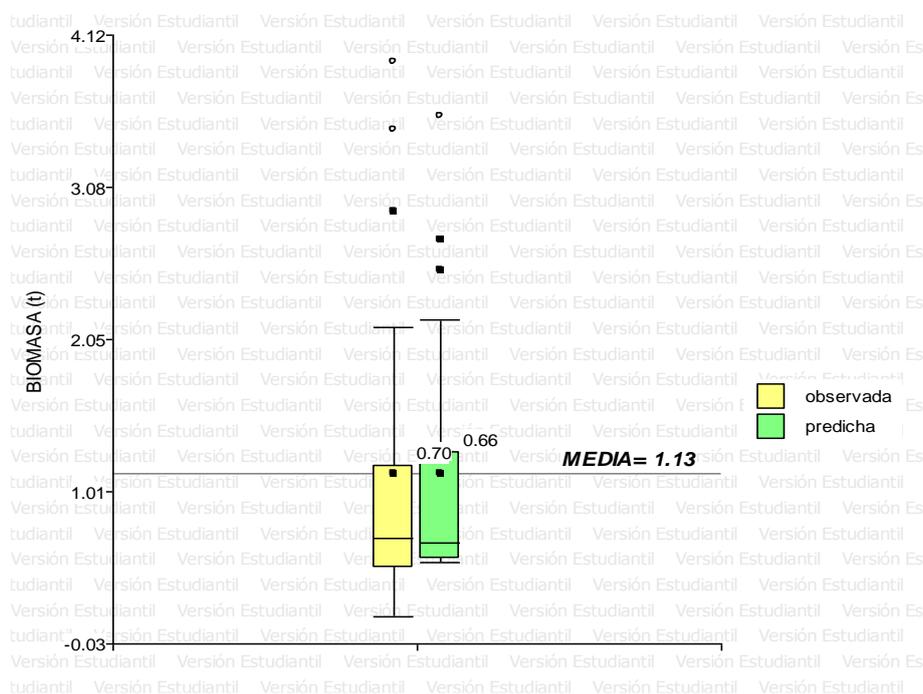


Figura 7. Diagrama de cajas de biomasa observada y predicha por la

ecuación de valores NDVI de las 20 parcelas evaluadas dentro de sistemas agrosilvícolas.

4.4. Biomasa y carbono estimado a todo el sistema agrosilvícola

Después del análisis estadístico se eliminó los índices de vegetación que presentaron menor coeficiente de determinación (R^2); asimismo, se estimó la biomasa y carbono de los sistemas agrosilvícolas usando la ecuación para

valores NDVI debido a que ésta presenta una correlación moderada ($\rho=-0.53$) y un $R^2=0.6618$ en su ecuación de tipo polinómica.

4.4.1. Biomasa y carbono estimado usando la ecuación de valores NDVI

Usando la ecuación de valores NDVI se estimó la biomasa y carbono de los 6 sistemas agrosilvícolas evaluados, la biomasa varió entre 191.26 t y 1143.46 t con un promedio \pm EE de 658.51 ± 163.08 t, de igual manera el carbono varió entre 95.63 t y 571.73 t con un promedio \pm EE de 329.25 ± 81.54 t, tal como se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Biomasa y carbono de los sistemas agrosilvícolas usando la ecuación para valores NDVI.

SISTEMA AGROSILVÍCOLA		BIOMASA		CARBONO	
NOMBRE	AREA (ha)	t /ha	t /finca	t /ha	t /finca
Los pinos	5.5	101.92	560.54	50.96	280.27
Mazacoatlan	10.24	109.01	1116.23	54.50	558.11
La cumbre	16.96	67.42	1143.46	33.71	571.73
Tenanguito	7.39	85.81	634.13	42.90	317.06
El salto	2.6	73.56	191.26	36.78	95.63
La laguna	3.84	79.54	305.43	39.77	152.71
TOTAL		517.26	3951.05	258.62	1975.51
VALOR MÍNIMO		67.42	191.26	33.71	95.63
VALOR MÁXIMO		109.01	1143.46	54.5	571.73
PROMEDIO \pm EE		86.21 ± 6.64	658.51 ± 163.08	43.10 ± 3.32	329.25 ± 81.54

EE: Error estándar.

Se observa que el sistema agrosilvícola que almacenó mayor cantidad de biomasa y carbono fue finca La Cumbre con 1143.46 t de biomasa y 571.73 t de carbono (Figura 8).

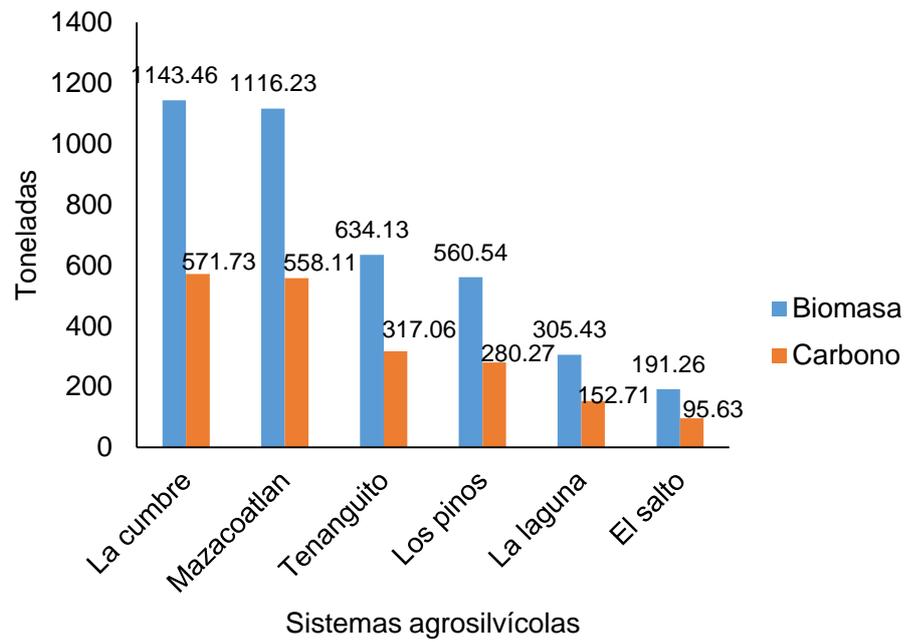


Figura 8. Biomasa y carbono de los sistemas agrosilvícolas usando la ecuación para valores NDVI.

V. DISCUSIÓN

5.1. Sobre la biomasa y carbono en fincas agrosilvícolas

En esta investigación se determinó que la biomasa y carbono almacenado presentó valores promedio de 86.21 ± 6.64 t/ha y 43.10 ± 3.32 t/ha respectivamente, valores que están por debajo de lo mencionado por MENA *et al.* (2011) quienes indican que los sistemas agroforestales (SAF) con café almacenan un promedio de carbono total de 121,1 t/ha.

ESPINOZA *et al.* (2012) indican en su estudio realizado en el estado de Veracruz, México, que los sistemas agroforestales con base en café capturan en promedio $110 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$, al ser sistemas perennes y con un manejo adecuado; Asimismo, YOUNG (1997), menciona que la producción de biomasa aérea en diferentes sistemas agroforestales (SAF) y regiones ecológicas varía de $2.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $48 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ por año, dependiendo del número de componentes, estratos, arreglos espaciales y temporales.

Por su parte, el CATIE (2008), reporta que los sistemas agroforestales pueden fijar y almacenar entre 12 y 228 t/ha de Carbono, incluyendo el carbono orgánico del suelo, lo cual representa entre el 20 y 46% del carbono secuestrado en bosques primarios, lo cual concuerda con los datos obtenidos.

ÁVILA *et al.* (2001) realizaron evaluaciones sobre almacenamiento de carbono en cuatro SAF en Costa Rica. Reportaron que el sistema que almacenó más carbono fue café – *Erythrina poeppigiana*, de 10 años (195 Mg C·ha⁻¹); seguido de café-*Eucalyptus deglupta*, de ocho años (169 Mg C·ha⁻¹) cuyos valores están por encima del estimado en la investigación. Sin embargo, nuestros valores estimados están acorde con lo mencionado por DE JONG *et al.* (1997) quienes estimaron que el potencial de captura de carbono de sistemas agroforestales, en zonas subtropicales y tropicales, puede oscilar de 40 a 80 y de 60 a 140 Mg C·ha⁻¹, respectivamente.

Asimismo, CALLO-CONCHA (2001), en un estudio realizado en la Amazonia peruana, reportó que los sistemas como huerto casero, café bajo sombra y silvopastura almacenaron 196, 193 y 120 Mg C·ha⁻¹, respectivamente. Por su parte, MASUHARA *et al.* (2015) realizó un estudio en el Campo Experimental del Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) de la Universidad Autónoma de Chapingo ubicado en Huatusco, Veracruz, donde determinó el carbono almacenado en los estratos aéreos de diferentes sistemas de uso de la tierra, indicando que el sistema policultivo tradicional de café con árboles de uso múltiple almacenó 188 Mg C·ha⁻¹ y en el sistema especializado de monocultivo de café con árboles de Inga como sombra almacenó 133 Mg C·ha⁻¹.

5.2. Sobre el modelo matemático mediante la correlación entre los índices de vegetación y los datos de biomasa arbórea

En el presente trabajo el índice de vegetación que representó mejor los datos de biomasa fue el NDVI, lo cual es compatible con los resultados obtenidos por PEREA (2018), que al comparar los índices de vegetación NDVI, EVI y SAVI con las estimaciones de biomasa aérea de los bosques del Santuario de fauna y flora de Iguaque en Colombia obteniendo los mejores resultados con el NDVI con un modelo matemático de tipo exponencial con R^2 de 0.82 valor que está por encima del estimado en este trabajo.

Por su parte DEVAGIRI *et al.* (2013) comparó las estimaciones de biomasa aérea de ocho tipos de bosques y relacionarlos con el NDVI de imágenes MODIS al suroeste del estado de Karantaka en la India obteniendo los mejores ajustes estadísticos para modelos tipo exponencial y potencial con R^2 de 0,8074 y 0,8056 respectivamente cuyos valores están por encima del estimado. Asimismo, STEININGER (2000) utilizó imágenes LANDSAT TM y modelos no lineales para la estimación de biomasa aérea en bosques tropicales secundarios de Brasil y Bolivia con un R^2 de 0.714.

Sin embargo, los resultados no están acorde con lo mencionado por DAS y SINGH (2012) quienes compararon la biomasa aérea de diferentes coberturas vegetales con los índices de vegetación RVI, NDVI, RDVI, OSAVI, MSR y MSAVI ubicados en el distrito de Sindhurg en la India, dando como resultado que el índice RVI tiene mejor correlación con la biomasa.

El modelo matemático de la presente investigación presentó una Raíz del Error Cuadrático Medio (RSME) para el índice NDVI de 0.622 t, cuyos valores están por debajo de los mencionados por LABRECQUE *et al.* (2006) quienes determinaron valores de RMSE de 59, 59 y 58 (Mg ha^{-1}) para bosques de coníferas, caducifolios y mixtos, respectivamente, para mapear biomasa forestal en una región piloto situada al oeste de Canadá, a través de imágenes Landsat TM.

Los datos de biomasa observados presentan una correlación negativa con los índices de vegetación, de acuerdo con MARTINEZ *et al.* (2016) en su investigación realizada en bosques del municipio Pueblo nuevo, Durango, México, usando imágenes Landsat TM comparó varios índices de vegetación con datos de campo indicando que las variables forestales biomasa y carbono mostraron una correlación negativa con los datos espectrales, siendo el índice de vegetación NDVI43 la correlación más alta, con un valor de -0.62 para biomasa, en concordancia con AGUIRRE *et al.* (2009) quienes compararon imágenes satelitales SPOT 5 HRG con datos de campo en bosques manejados de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, México, revelando que el carbono mostró una correlación negativa con los índices de vegetación sensibles a la humedad siendo el NDVI43 quien mostró la correlación más alta con -0.80.

Por su parte Chuvieco (1996), citado por SORIA Y GRANADOS (2005), mencionan que cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, su reflectancia será inferior en el infrarrojo cercano y rojo, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor en relación con una vegetación sana de gran vigor

VI. CONCLUSIÓN

1. La biomasa y carbono total de las seis fincas agrosilvícolas evaluadas fue 3951.05 t y 1975.51 t respectivamente, con un promedio de 86.21 ± 6.64 t/ha de biomasa y 43.10 ± 3.32 t/ha de carbono, siendo finca La Cumbre la que mayor biomasa y carbono almacenó, seguido por la finca Mazacoatlan, en tercer lugar, se encuentra finca Tenanguito, seguido por finca Los Pinos, en quinto lugar, se encuentra finca La laguna, y en último lugar la finca El Salto.
2. De los cuatro índices de vegetación evaluados el que presentó mayor correlación de Spearman con la biomasa fue el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) con $\rho = -0.53$.

Al realizar el análisis de regresión y determinar el coeficiente de determinación (R^2) se observa que el índice que obtuvo mayor valor y el que mejor representa los datos de campo relacionado con las imágenes satelitales fue el NDVI, en tal sentido se menciona que el uso de índices de vegetación derivados de las imágenes del satélite SENTINEL 2 y la correlación con la biomasa aérea estimada usando ecuaciones alométricas, permitió la construcción de un modelo matemático de tipo polinómico con un R^2 de 0,6618 el cual obtuvo un RMSE de 0.622 t bajo el índice NDVI del mes de febrero de todo el municipio de Zihuateutla cuyos valores máximos y mínimos fluctúan en 0.93 y 0.02 respectivamente.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios sobre la relación entre la biomasa y los índices de vegetación en diferentes estaciones del año considerando más factores ambientales como la precipitación, temperatura, humedad relativa, entre otros, con el objetivo de comparar el comportamiento espacio-temporal de la biomasa y los índices de vegetación.
2. Considerar el uso de imágenes de mejor resolución, con la finalidad de obtener píxeles puros de árboles, cafetos u otro componente vegetal, para una mejor diferenciación de coberturas y para una correcta toma de decisiones.
3. Iniciar estudios de estimación de biomasa usando otro tipo de sensores como imágenes Radar y datos Lidar, debido a que estos sensores no son afectados por las nubes, y presentan mayor precisión.
4. Replicar este trabajo en el ámbito local para poder estimar biomasa aérea en bosques tropicales a partir de imágenes satelitales.

VIII. ABSTRACT

The study was carried out with the objective of evaluating the vegetation indices for the estimation of tree biomass in agroforestry systems of farms in Zihuateutla, Puebla, México. The work started by locating twenty pre-established plots, which were distributed on six agroforestry farms, on each plot, using field map technology all of the specimens were geolocated (coffee and trees), obtaining their coordinates; at the same time, their dasometric variables were evaluated, which were necessary for the estimation of the biomass using allometric equations. On the other hand, using data from the Sentinel 2 satellite, from the month of February 2019, four vegetation indices were generated (NDVI, SAVI, EVI, RVI), which were correlated with the biomass data that was obtained in the field, demonstrating that a relationship does exist between the variables “vegetation indices” and “biomass,” with the enhanced vegetation index (EVI) being that which presented the greatest Spearman correlation ($\rho=-0.53$). Subsequently the coefficient of determination (R^2) was obtained, all of this was done with the purpose of obtaining an equation that allows for the estimation of the biomass starting with the pixel values from the vegetation index, giving the result that the normalized difference vegetation index (NDVI) is that which best estimates the biomass data using a polynomial equation with an $R^2=0.6618$.

Keywords: vegetation indices, biomass, agroforestry systems.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, M; VARGAS, J; VELÁSQUEZ, A; ETCHEVERS, J. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca-México. *Agrociencia* 36(6): 725–736.
- AGUIRRE, C; VALDEZ, J; ÁNGELES, G; DE LOS SANTOS, H; HAAPANEN, R; AGUIRRE, A. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de *Pinus patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43(2): 209 - 220.
- ÁLVAREZ, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 89p.
- ARISTIZÁBAL, J. 2011. Desarrollo de biomasa aérea en sombríos de café (Coffea arabica L.) mediante datos simulados (en línea). *Revista Actualidad & Div. Científica* 14(1): 49 - 56. Consultado 25 may. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v14n1/v14n1a07.pdf>.
- ÁVILA, G; JIMÉNEZ, F; BEER, J; GÓMEZ, M; IBRAHIM, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* 8(30): 32 - 35.

- BANNARRI, A; MORIN, D; BONN, F; HUETE, A. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13: 95–120.
- BRAVO, N. 2017. Teoría- Teledetección espacial Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y Modis. 1 ed. Tingo Maria, Perú. 105 p.
- BROWN, S; Gillespe, J; Lugo, A. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For.Sci.* 35(4): 881-902.
- BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: A primer. 1 ed. Illinois, USA, FAO. 55 p.
- CALLO-CONCHA, D. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos Ecológicos de la Amazonia del Perú. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México. Universidad Autónoma Chapingo.
- CUBERO, J; ROJAS, S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de Gmelina arborea, Tectona grandis y Bombacopsis quinata en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lic. Ciencias Forestales. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional. 93 p.
- DAS, S; SINGH, T. 2012. Correlation analysis between biomass and spectral vegetation indices of forest ecosystem. *International Journal of Engineering Research & Technology* 1(5): 1–13.
- DE JONG, B; TIPPER, R; TAYLOR, R. 1997. A Framework for monitoring and evaluation of carbon mitigation by farm forestry projects: example of a

demonstration project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2(1): 231-246.

DEVAGIRI, G; MONEY, S; SINGH, S; DADHAWAL, V; PATIL, P. 2013. Assessment of above ground biomass and carbon pool in different vegetation types of south western part of Karnataka , India using spectral modeling. *Tropical Ecology*, 54(2): 149–165.

ESA (European Space Agency, Francia). 2015. *Sentinel-2 User Handbook* (en línea). París, Francia. 64 p. Consultado 15 de Feb. 2020. Disponible en https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

ESPINOZA, W; KRISHNAMURTHY, L; VÁZQUEZ, A; TORRES, A. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1):57-70.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italia). 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra: Informe sobre recursos mundiales de suelos* (en línea). Roma, Italia. 61 p. Consultado 16 May. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>.

FIGUEROA, M; REDONDO, S. 2007. *Los sumideros naturales de CO₂: Una estrategia sostenible entre el cambio climático y el protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial*. 1 ed. Sevilla, España. Muñoz Moya Editores Extremeños. 221 p.

- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica). 2008. Captura de carbono en fincas indígenas. *Agroforestería en la Américas* 46: 26-45.
- GOFC (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics, The Netherlands). 2013. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and deforestation (en línea). The Netherlands. 265 p. Consultado 11 May. 2019. Disponible en www.gofcgold.wur.nl/redd/sourcebook/GOFC-GOLD_Sourcebook.pdf.
- SORIA, J; GRANADOS, R. 2005. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum* 12 (2): 167-174.
- HUETE, A. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sensing of Environment 25(3): 295-309.
- HUETE, A; JUSTICE, C; VAN LEEUWEN, W.1999. MODIS Vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document, NASA Goddard Space Flight Center (en línea). USA. 120 p. Consultado 11 Jul. 2019. Disponible en http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
- HUXLEY, J. 1932. Problems of Relative Growth. New York, USA, The Dial Press. 276 p.
- IFER (Institute of Forest Ecosystems Research, República Checa). 2011. Lithuanian National Forest Inventory and FieldMap, Lituania, 28 p.

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, México). 2018. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Estado de Puebla, Zihuateutla (en línea). Puebla, México. Consultado 20 Sep. 2019. Disponible en <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21213a.html>.

KLINGE, H., HERRERA, R. 1983. Phytomass structure of natural plant communities on spodosols in Southern Venezuela: The tall Amazon Caatinga Forest. *Vegetatio* 53(2): 65-84.

LABRECQUE, S; FOURNIER, R; LUTHER, J; PIERCEY, D. 2006. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management* 226:129-144.

LAPEYRE, T.; ALEGRE, J.; ARÉVALO, L. 2004. Determinación de las Reservas de Carbono de la Biomasa Aérea, en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en San Martín, Perú. *Revista Ecología Aplicada* 3 (1): 35-44.

MARTÍNEZ, R; AGUIRRE, O; VARGAS, B; JIMÉNEZ, J; TREVIÑO, E; YERENA, J. 2016. Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales* 7 (35): 91-105

MASUHARA, A; VALDÉS, E; PÉREZ, J; GUTIÉRREZ, D; CUTBERTO, J; SALCEDO, E; DE JESÚS JUÁREZ, M; MERINO, A. 2015. Carbono

almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 4(1): 66-93.

MENA, V; ANDRADE, H; NAVARRO, C. 2011. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios e un gradiente altitudinales en Costa Rica. *Agroforesteria Neotropical*. 12 p.

NOGUÉS, F. 2010. *Energía de la biomasa*. 1 ed. Zaragoza, España. *Prensas Universitarias de Zaragoza*. 545 p.

OLIVIER, S., 1981. *Ecología y subdesarrollo en América Latina*. 1 ed. México D.F., México, Siglo Veintiuno. 225 p.

ORELLANA, G; SANDOVAL, M; LINARES, G; GARCÍA, N; TAMARIZ, J. 2012. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *ACI* 3(1): 123-135.

PEARSON, L; MILLER, L. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grassland, Colorado: 8th international symposium on remote sensing of environment.

PEREA, M. 2018. *Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora "Iguaque"*. Tesis Msc en Sistemas de Información Geográfica. UNIGIS. Ibagué, Colombia. 85 p.

- ROUSE, J; HAAS, R; DEERING, D; SCHELL, J; HARLAN, J. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD., 371p.
- SCHLEGEL, B; GAYOSO, J; GUERRA, J. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 15 p.
- SEGURA, M; KANNINEN, M; SUAREZ, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforest Syst* 68:143–150.
- SILLEOS, N; ALEXANDRIDIS, T; GITAS, I; PERAKIS, K. 2006. Vegetation Indices, Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto International* 21(4): 21-28.
- STEININGER, M. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass : data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(7), 1139–1157.
- VALLEJO, A; HERNÁNDEZ, P; JONG, B; MARTÍNEZ, C; RODRÍGUEZ, P. 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía: Preguntas frecuentes sobre la estimación de carbono para proyectos forestales MDL. 3 ed. Salinas, Z; Hernández, P (eds.). Turrialba, Costa Rica. CATIE. 220 p. (Serie técnica). Manual técnico n° 83.
- VALTUEÑA, J. 2002. Enciclopedia de la ecología y la salud. 1 ed. Madrid, España. Safeliz S.L. 416 p.

YEPES, A; NAVARRETE, D; DUQUE, A; PHILLIPS, J; CABRERA, K; ÁLVAREZ, E; GARCÍA, M; ORDOÑEZ, M. 2011. Protocolo para la estimación nacional y sub-nacional de biomasa - carbono en Colombia. Bogotá D.C., Colombia. Scripto. 162 p.

YOUNG, A. (1997). Agroforestry for soil management. 2da ed. UK. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF).

ANEXO

Anexo A. Datos registrados durante la investigación

Cuadro 11. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	611732	2236760	3.50	1.85	Arábica
2	Café	611730	2236760	2.80	1.60	Arábica
3	Café	611730	2236758	2.90	1.53	Arábica
4	Café	611731	2236758	3.50	1.99	Arábica
5	Café	611733	2236758	2.70	1.77	Arábica
6	Café	611734	2236759	3.30	1.92	Arábica
7	Café	611736	2236759	2.90	1.94	Arábica
8	Café	611737	2236759	1.90	1.54	Arábica
9	Café	611739	2236758	1.30	1.12	Arábica
10	Café	611739	2236757	2.40	1.68	Arábica
11	Café	611737	2236757	1.40	0.67	Arábica
12	Café	611735	2236757	1.60	1.37	Arábica
13	Café	611734	2236757	2.80	1.83	Arábica
14	Café	611732	2236757	3.20	1.90	Arábica
15	Café	611731	2236754	3.10	1.85	Arábica
16	Café	611733	2236754	3.90	1.48	Arábica
17	Café	611734	2236754	1.90	0.90	Arábica
18	Café	611736	2236755	1.80	1.15	Arábica
19	Café	611738	2236755	2.70	1.65	Arábica
20	Café	611739	2236755	3.30	1.55	Arábica
21	Café	611739	2236753	3.00	1.36	Arábica
22	Café	611737	2236753	3.20	1.58	Arábica
23	Café	611736	2236753	2.40	1.63	Arábica
24	Café	611734	2236753	1.90	1.18	Arábica
25	Café	611733	2236752	2.90	1.78	Arábica
26	Café	611731	2236752	2.60	1.68	Arábica
27	Café	611730	2236750	3.00	1.52	Arábica
28	Café	611732	2236751	2.60	1.30	Arábica
29	Café	611734	2236751	2.00	1.28	Arábica

Continúa Cuadro 11. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
30	Café	611736	2236751	2.40	1.77	Arábica
31	Café	611737	2236751	2.50	1.87	Arábica
32	Café	611738	2236751	2.40	1.43	Arábica
33	Árbol	611731	2236756	19.40	13.21	Grevillea
34	Árbol	611738	2236753	41.00	14.61	Aillite
35	Árbol	611739	2236750	33.30	15.76	Tezmol

Cuadro 12. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	611810	2236698	2.30	1.22	Arábica
2	Café	611812	2236699	6.00	1.36	Arábica
3	Café	611813	2236700	4.90	1.49	Arábica
4	Café	611816	2236700	7.00	1.62	Arábica
5	Café	611814	2236699	5.90	1.48	Arábica
6	Café	611813	2236698	2.30	1.56	Arábica
7	Café	611812	2236697	6.90	1.50	Arábica
8	Café	611811	2236696	2.10	0.84	Arábica
9	Café	611811	2236694	2.50	1.55	Arábica
10	Café	611813	2236695	2.40	1.02	Arábica
11	Café	611815	2236696	2.40	1.51	Arábica
12	Café	611816	2236698	3.00	0.76	Arábica
13	Café	611817	2236698	3.40	1.68	Arábica
14	Café	611818	2236699	1.40	0.74	Arábica
15	Café	611820	2236698	7.10	1.51	Arábica
16	Café	611818	2236697	1.90	1.37	Arábica
17	Café	611817	2236696	2.70	1.51	Arábica
18	Café	611815	2236695	1.00	0.62	Arábica
19	Café	611814	2236694	6.30	1.46	Arábica

Continúa Cuadro 12. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
20	Café	611813	2236693	2.90	1.61	Arábica
21	Café	611811	2236692	7.90	1.49	Arábica
22	Café	611811	2236690	2.70	1.50	Arábica
23	Café	611813	2236690	6.80	1.38	Arábica
24	Café	611815	2236692	6.60	1.32	Arábica
25	Café	611816	2236693	6.60	1.42	Arábica
26	Café	611818	2236694	6.80	1.33	Arábica
27	Café	611818	2236695	2.80	1.53	Arábica
28	Café	611819	2236692	7.50	1.71	Arábica
29	Café	611818	2236691	5.90	1.51	Arábica
30	Café	611816	2236690	2.50	1.62	Arábica
31	Árbol	611813	2236697	38.00	16.88	Encino
32	Árbol	611814	2236700	40.00	14.06	Encino
33	Árbol	611816	2236693	48.00	18.42	Ocote

Cuadro 13. Registro de individuos en la parcela Los Pinos (P3).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	611899	2236630	4.50	1.98	Arábica
2	Café	611897	2236630	3.10	1.81	Arábica
3	Café	611896	2236629	3.60	1.89	Arábica
4	Café	611894	2236628	1.90	1.29	Arábica
5	Café	611890	2236627	4.10	2.06	Arábica
6	Café	611890	2236625	4.00	1.24	Arábica
7	Café	611891	2236626	3.30	1.91	Arábica
8	Café	611894	2236627	4.40	1.50	Arábica
9	Café	611895	2236627	4.30	1.66	Arábica
10	Café	611899	2236629	3.60	1.66	Arábica
11	Café	611899	2236626	3.90	1.38	Arábica

Continúa Cuadro 13. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
12	Café	611898	2236625	3.60	1.55	Arábica
13	Café	611895	2236625	3.70	1.55	Arábica
14	Café	611891	2236621	3.30	0.82	Arábica
15	Café	611894	2236622	4.10	1.69	Arábica
16	Café	611895	2236623	3.10	1.28	Arábica
17	Café	611896	2236623	4.50	1.69	Arábica
18	Café	611898	2236624	4.80	1.73	Arábica
19	Café	611897	2236622	4.30	1.62	Arábica
20	Café	611896	2236621	3.80	2.30	Arábica
21	Café	611895	2236621	4.10	1.74	Arábica
22	Café	611893	2236620	5.80	1.77	Arábica
23	Árbol	611895	2236624	47.90	15.75	Tezmol
24	Árbol	611893	2236627	24.90	13.56	Encino
25	Árbol	611893	2236628	34.40	16.81	Encino

Cuadro 14. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	612921	2236909	0.50	0.15	Arábica
2	Café	612923	2236909	0.80	0.80	Arábica
3	Café	612925	2236910	0.30	0.16	Arábica
4	Café	612929	2236908	0.40	0.20	Arábica
5	Café	612927	2236908	0.70	0.29	Arábica
6	Café	612925	2236908	0.80	0.25	Arábica
7	Café	612923	2236907	0.80	0.26	Arábica
8	Café	612921	2236907	0.80	0.24	Arábica
9	Café	612922	2236905	0.60	0.25	Arábica
10	Café	612924	2236906	0.60	0.23	Arábica
11	Café	612926	2236906	0.50	0.27	Arábica
12	Café	612928	2236906	0.60	0.24	Arábica

Continúa Cuadro 14. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
13	Café	612928	2236904	1.00	0.23	Arábica
14	Café	612926	2236904	0.70	0.27	Arábica
15	Café	612924	2236904	0.50	0.22	Arábica
16	Café	612922	2236903	0.60	0.20	Arábica
17	Café	612921	2236901	0.60	0.27	Arábica
18	Café	612923	2236902	0.70	0.25	Arábica
19	Café	612927	2236902	0.50	0.22	Arábica
20	Café	612930	2236902	0.30	0.22	Arábica
21	Café	612930	2236900	0.50	0.24	Arábica
22	Café	612925	2236901	0.50	0.27	Arábica
23	Café	612923	2236900	0.80	0.27	Arábica
24	Árbol	612926	2236903	30.50	12.16	Macadamia
25	Árbol	612925	2236900	31.90	17.30	Grevillea

Cuadro 15. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	612970	2236955	0.60	0.30	Arábica
2	Café	612971	2236957	0.80	0.34	Arábica
3	Café	612972	2236958	0.30	0.28	Arábica
4	Café	612972	2236960	6.10	1.55	Arábica
5	Café	612976	2236960	0.90	0.28	Arábica
6	Café	612975	2236959	0.50	0.30	Arábica
7	Café	612975	2236957	3.80	1.95	Arábica
8	Café	612974	2236956	0.60	0.31	Arábica
9	Café	612973	2236954	0.60	0.35	Arábica
10	Café	612973	2236953	0.50	0.38	Arábica
11	Café	612971	2236951	1.00	0.27	Arábica
12	Café	612975	2236950	0.60	0.27	Arábica
13	Café	612976	2236952	0.50	0.28	Arábica

Continúa Cuadro 15. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
14	Café	612976	2236954	0.80	0.26	Arábica
15	Café	612977	2236955	0.60	0.27	Arábica
16	Café	612978	2236957	0.70	0.26	Arábica
17	Café	612979	2236958	8.00	1.83	Arábica
18	Café	612979	2236959	0.40	0.28	Arábica
19	Café	612979	2236953	0.60	0.32	Arábica
20	Café	612978	2236952	7.00	2.14	Arábica
21	Café	612978	2236950	5.00	2.20	Arábica
22	Árbol	612974	2236960	27.80	11.94	Macadamia
23	Árbol	612973	2236950	10.90	6.40	Naranja

Cuadro 16. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P3).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	612867	2237129	4.30	2.52	Arábica
2	Café	612869	2237126	6.90	1.80	Arábica
3	Café	612868	2237128	5.80	2.15	Arábica
4	Café	612870	2237121	7.80	2.34	Arábica
5	Café	612869	2237122	6.00	1.76	Arábica
6	Café	612868	2237124	6.30	1.50	Arábica
7	Café	612867	2237125	4.90	1.80	Arábica
8	Café	612866	2237127	5.70	1.85	Arábica
9	Café	612865	2237129	6.30	1.85	Arábica
10	Café	612863	2237130	6.40	1.71	Arábica
11	Café	612864	2237128	7.70	1.72	Arábica
12	Café	612864	2237127	6.40	1.96	Arábica
13	Café	612865	2237125	6.60	1.81	Arábica
14	Café	612866	2237124	6.00	2.15	Arábica
15	Café	612867	2237122	5.40	1.75	Arábica
16	Café	612868	2237120	5.90	1.97	Arábica

Continúa Cuadro 16. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
17	Café	612865	2237121	6.90	1.45	Arábica
18	Café	612865	2237122	4.80	1.80	Arábica
19	Café	612864	2237124	7.00	1.41	Arábica
20	Café	612863	2237125	6.50	3.19	Arábica
21	Café	612862	2237127	6.70	1.49	Arábica
22	Café	612861	2237128	5.40	1.52	Arábica
23	Café	612861	2237126	6.40	1.62	Arábica
24	Café	612862	2237124	7.20	1.88	Arábica
25	Café	612863	2237123	7.30	1.72	Arábica
26	Café	612863	2237121	6.80	1.46	Arábica
27	Café	612861	2237122	5.90	1.48	Arábica
28	Café	612861	2237123	6.30	1.60	Arábica
29	Árbol	612868	2237126	43.60	12.12	Chalahuite
30	Árbol	612867	2237126	27.80	13.69	Chalahuite
31	Árbol	612868	2237125	45.50	14.00	Chalahuite

Cuadro 17. Registro de individuos en la parcela Mazacoatlan (P4).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	613290	2237320	6.10	1.48	Arábica
2	Café	613290	2237315	5.20	1.83	Arábica
3	Café	613289	2237315	6.30	1.05	Arábica
4	Café	613289	2237317	3.10	1.75	Arábica
5	Café	613288	2237318	3.60	1.96	Arábica
6	Café	613286	2237320	3.50	0.35	Arábica
7	Café	613285	2237319	6.20	1.92	Arábica
8	Café	613286	2237317	1.50	1.10	Arábica
9	Café	613286	2237317	7.40	1.25	Arábica
10	Café	613288	2237316	6.00	1.63	Arábica
11	Café	613288	2237314	2.80	1.80	Arábica

Continúa Cuadro 17. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
12	Café	613290	2237312	2.70	1.60	Arábica
13	Café	613288	2237310	1.20	2.12	Arábica
14	Café	613288	2237311	2.70	1.82	Arábica
15	Café	613287	2237312	3.00	1.55	Arábica
16	Café	613286	2237314	1.50	1.65	Arábica
17	Café	613285	2237315	4.80	1.70	Arábica
18	Café	613284	2237317	3.40	1.54	Arábica
19	Café	613283	2237318	5.70	1.66	Arábica
20	Café	613283	2237319	4.50	1.38	Arábica
21	Café	613280	2237320	4.80	1.72	Arábica
22	Café	613282	2237317	6.20	1.18	Arábica
23	Café	613282	2237316	5.80	1.85	Arábica
24	Café	613284	2237314	3.20	1.25	Arábica
25	Café	613285	2237312	4.70	1.06	Arábica
26	Café	613283	2237311	4.10	2.30	Arábica
27	Café	613282	2237312	5.60	1.28	Arábica
28	Café	613282	2237313	1.40	1.55	Arábica
29	Café	613281	2237315	6.50	1.55	Arábica
30	Café	613280	2237316	6.80	1.26	Arábica
31	Café	613280	2237313	4.30	2.18	Arábica
32	Café	613280	2237312	4.60	1.30	Arábica
33	Café	613281	2237311	4.00	1.50	Arábica
34	Árbol	613289	2237316	24.80	16.91	Grevillea
35	Árbol	613283	2237315	29.80	19.96	Grevillea

Cuadro 18. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	621037	2242860	3.40	2.00	Arábica
2	Café	621039	2242858	3.60	2.55	Arábica

Continúa Cuadro 18. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
3	Café	621039	2242856	2.30	1.20	Arábica
4	Café	621037	2242856	3.20	1.80	Arábica
5	Café	621036	2242858	3.70	1.90	Arábica
6	Café	621034	2242860	1.90	1.20	Arábica
7	Café	621032	2242858	3.80	2.00	Arábica
8	Café	621034	2242857	3.80	1.70	Arábica
9	Café	621036	2242856	3.30	1.45	Arábica
10	Café	621038	2242855	3.30	1.43	Arábica
11	Café	621039	2242853	4.10	2.08	Arábica
12	Café	621039	2242850	4.50	1.90	Arábica
13	Café	621037	2242852	3.90	1.60	Arábica
14	Café	621036	2242854	2.40	1.80	Arábica
15	Café	621034	2242855	2.10	0.98	Arábica
16	Café	621033	2242856	1.30	1.12	Arábica
17	Café	621032	2242857	4.70	1.90	Arábica
18	Café	621031	2242855	1.70	0.80	Arábica
19	Café	621033	2242854	3.40	1.70	Arábica
20	Café	621034	2242853	3.20	1.60	Arábica
21	Café	621036	2242851	2.00	1.10	Arábica
22	Café	621033	2242851	2.40	1.18	Arábica
23	Café	621031	2242853	2.60	1.10	Arábica
24	Café	621031	2242854	0.20	0.84	Arábica
25	Café	621031	2242850	4.10	1.42	Arábica
26	Árbol	621039	2242859	27.90	11.33	Chalahuite
27	Árbol	621035	2242860	12.60	8.79	Nigua de zorra

Cuadro 19. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	621105	2242880	4.00	1.90	Arábica
2	Café	621106	2242879	3.50	2.24	Arábica
3	Café	621108	2242878	3.70	2.19	Arábica
4	Café	621110	2242875	4.10	1.20	Arábica
5	Café	621106	2242877	2.50	1.80	Arábica

Continúa Cuadro 19. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
6	Café	621105	2242878	3.70	2.10	Arábica
7	Café	621102	2242879	4.10	2.49	Arábica
8	Café	621101	2242879	4.10	1.14	Arábica
9	Café	621102	2242878	3.50	2.10	Arábica
10	Café	621103	2242876	2.80	1.75	Arábica
11	Café	621105	2242875	4.20	1.82	Arábica
12	Café	621107	2242875	4.10	1.77	Arábica
13	Café	621109	2242873	3.60	2.07	Arábica
14	Café	621109	2242870	3.00	2.07	Arábica
15	Café	621107	2242872	1.90	1.32	Arábica
16	Café	621105	2242873	0.90	1.20	Arábica
17	Café	621104	2242874	4.00	2.21	Arábica
18	Café	621102	2242876	3.70	1.92	Arábica
19	Café	621102	2242874	2.00	2.10	Arábica
20	Café	621103	2242873	2.10	1.80	Arábica
21	Café	621104	2242872	2.50	1.20	Arábica
22	Café	621105	2242870	3.60	2.30	Arábica
23	Café	621103	2242871	1.80	1.69	Arábica
24	Árbol	621108	2242871	27.50	12.49	Hormiguillo
25	Árbol	621105	2242872	20.00	12.17	Chalahuite
26	Árbol	621102	2242877	17.90	9.10	Chalahuite

Cuadro 20. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P3).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	621178	2243080	3.00	1.50	Arábica
2	Café	621179	2243077	2.10	1.32	Arábica
3	Café	621179	2243076	1.00	0.65	Arábica
4	Café	621180	2243075	2.30	1.13	Arábica
5	Café	621180	2243074	1.40	1.46	Arábica
6	Café	621180	2243070	1.80	1.47	Arábica
7	Café	621179	2243072	1.90	1.42	Arábica
8	Café	621178	2243074	1.00	0.82	Arábica
9	Café	621178	2243076	3.70	1.89	Arábica
10	Café	621177	2243078	3.60	1.50	Arábica

Continúa Cuadro 20. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
11	Café	621175	2243079	1.20	1.00	Arábica
12	Café	621175	2243077	1.90	1.12	Arábica
13	Café	621176	2243074	3.30	1.70	Arábica
14	Café	621176	2243072	0.90	0.74	Arábica
15	Café	621177	2243071	1.90	1.50	Arábica
16	Café	621174	2243071	3.10	1.47	Arábica
17	Café	621174	2243072	1.50	1.61	Arábica
18	Café	621174	2243073	3.30	1.93	Arábica
19	Café	621174	2243075	3.30	1.70	Arábica
20	Café	621173	2243077	0.10	0.90	Arábica
21	Café	621173	2243079	2.50	1.70	Arábica
22	Café	621172	2243079	2.30	1.44	Arábica
23	Café	621172	2243075	3.60	1.91	Arábica
24	Café	621172	2243073	0.70	0.53	Arábica
25	Café	621171	2243072	5.50	2.83	Arábica
26	Café	621170	2243074	0.70	0.50	Arábica
27	Café	621171	2243076	2.60	2.40	Arábica
28	Café	621170	2243077	1.40	1.40	Arábica
29	Café	621171	2243078	1.70	1.60	Arábica
30	Árbol	621170	2243076	25.90	13.26	NN
31	Árbol	621173	2243077	17.00	10.21	Chalahuite

Cuadro 21. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P4).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	621089	2243119	3.00	1.43	Arábica
2	Café	621089	2243116	2.20	1.52	Arábica
3	Café	621088	2243117	2.70	1.23	Arábica
4	Café	621086	2243119	2.10	1.07	Arábica
5	Café	621084	2243120	2.10	1.12	Arábica
6	Café	621082	2243120	2.50	1.30	Arábica
7	Café	621082	2243118	2.10	1.00	Arábica
8	Café	621084	2243117	0.50	0.57	Arábica
9	Café	621085	2243117	2.80	1.25	Arábica
10	Café	621087	2243115	0.70	0.75	Arábica

Continúa Cuadro 21. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
11	Café	621088	2243114	2.90	1.44	Arábica
12	Café	621090	2243113	2.40	1.34	Arábica
13	Café	621089	2243111	0.70	0.63	Arábica
14	Café	621088	2243113	1.10	0.96	Arábica
15	Café	621086	2243114	2.20	1.13	Arábica
16	Café	621082	2243116	1.90	1.36	Arábica
17	Café	621081	2243114	2.20	1.10	Arábica
18	Café	621082	2243114	1.90	1.27	Arábica
19	Café	621084	2243113	0.90	0.70	Arábica
20	Café	621086	2243112	2.40	1.23	Arábica
21	Café	621087	2243111	2.30	1.34	Arábica
22	Café	621084	2243111	0.80	0.73	Arábica
23	Café	621083	2243112	0.80	0.68	Arábica
24	Café	621081	2243112	3.10	1.40	Arábica
25	Café	621082	2243110	2.10	0.79	Arábica
26	Árbol	621089	2243117	20.90	10.12	Toshcata
27	Árbol	621090	2243112	15.00	8.53	Jonote
28	Árbol	621088	2243112	22.60	11.31	Toshcata
29	Árbol	621087	2243111	13.80	9.44	Chalahuite
30	Árbol	621084	2243116	21.70	12.27	Árbol de cera
31	Árbol	621085	2243117	20.50	9.09	Toshcata

Cuadro 22. Registro de individuos en la parcela La Cumbre (P5).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	621159	2243151	3.90	2.06	Arábica
2	Café	621158	2243150	2.00	1.22	Arábica
3	Café	621159	2243152	4.10	1.76	Arábica
4	Café	621158	2243152	0.90	0.67	Arábica
5	Café	621156	2243151	1.10	0.75	Arábica
6	Café	621153	2243150	0.90	0.45	Arábica
7	Café	621154	2243151	0.70	0.37	Arábica
8	Café	621156	2243152	2.20	1.22	Arábica
9	Café	621157	2243154	0.70	0.34	Arábica
10	Café	621159	2243155	4.00	2.13	Arábica

Continúa Cuadro 22. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
11	Café	621159	2243156	2.50	1.83	Arábica
12	Café	621159	2243158	1.00	0.57	Arábica
13	Café	621157	2243160	1.10	0.89	Arábica
14	Café	621157	2243157	2.70	1.24	Arábica
15	Café	621157	2243155	3.30	1.47	Arábica
16	Café	621152	2243152	2.60	1.40	Arábica
17	Café	621153	2243153	2.80	1.54	Arábica
18	Café	621155	2243155	4.20	1.79	Arábica
19	Café	621155	2243157	1.20	0.93	Arábica
20	Café	621155	2243159	0.90	0.66	Arábica
21	Café	621153	2243160	0.80	0.76	Arábica
22	Café	621154	2243157	0.70	0.54	Arábica
23	Café	621152	2243154	2.80	1.53	Arábica
24	Café	621151	2243153	1.10	0.98	Arábica
25	Café	621150	2243156	0.80	0.63	Arábica
26	Café	621151	2243157	2.10	1.15	Arábica
27	Café	621152	2243158	3.40	1.82	Arábica
28	Café	621151	2243159	3.10	1.83	Arábica
29	Árbol	621159	2243158	16.40	11.04	Chalahuite
30	Árbol	621158	2243158	10.70	9.21	Chalahuite

Cuadro 23. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	626209	2248148	3.50	1.85	Arábica
2	Café	626207	2248148	3.80	1.92	Arábica
3	Café	626205	2248149	4.50	1.95	Arábica
4	Café	626203	2248149	5.00	1.90	Arábica
5	Café	626204	2248147	4.30	1.88	Arábica
6	Café	626202	2248148	4.00	1.85	Arábica
7	Café	626206	2248147	2.80	1.65	Arábica
8	Café	626208	2248147	3.30	1.60	Arábica
9	Café	626210	2248146	1.90	1.00	Arábica
10	Café	626209	2248145	2.90	2.00	Arábica
11	Café	626207	2248145	3.70	1.90	Arábica

Continúa Cuadro 23. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
12	Café	626204	2248146	3.40	2.00	Arábica
13	Café	626203	2248146	5.80	1.70	Arábica
14	Café	626200	2248146	4.90	1.70	Arábica
15	Café	626202	2248144	3.50	1.00	Arábica
16	Café	626201	2248144	4.50	1.30	Arábica
17	Café	626203	2248143	4.00	1.60	Arábica
18	Café	626206	2248143	2.10	1.06	Arábica
19	Café	626207	2248143	2.60	2.00	Arábica
20	Café	626208	2248143	3.70	2.00	Arábica
21	Café	626210	2248140	3.80	2.30	Arábica
22	Café	626207	2248141	2.80	1.60	Arábica
23	Café	626206	2248141	4.20	2.15	Arábica
24	Café	626204	2248141	2.20	1.50	Arábica
25	Café	626202	2248142	3.10	1.45	Arábica
26	Café	626200	2248142	4.10	1.35	Arábica
27	Café	626201	2248140	1.50	0.80	Arábica
28	Árbol	626210	2248142	16.00	8.10	Chalahuite
29	Árbol	626210	2248142	15.00	9.40	Chalahuite
30	Árbol	626207	2248140	11.80	5.37	Chalahuite
31	Árbol	626200	2248140	15.20	5.90	Mandarina
32	Árbol	626210	2248142	11.00	8.39	Chalahuite
33	Árbol	626200	2248142	11.80	4.66	Mandarina

Cuadro 24. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	626368	2248359	3.10	1.83	Arábica
2	Café	626365	2248360	4.40	3.20	Arábica
3	Café	626367	2248358	3.50	2.56	Arábica
4	Café	626369	2248357	4.00	1.70	Arábica
5	Café	626368	2248356	4.00	2.90	Arábica
6	Café	626367	2248356	1.50	1.07	Arábica
7	Café	626366	2248357	5.20	1.50	Arábica
8	Café	626364	2248358	3.20	1.80	Arábica
9	Café	626362	2248359	1.70	2.10	Arábica

Continúa Cuadro 24. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
10	Café	626360	2248358	3.20	2.30	Arábica
11	Café	626363	2248357	3.30	2.45	Arábica
12	Café	626365	2248356	4.20	2.45	Arábica
13	Café	626367	2248354	4.20	2.54	Arábica
14	Café	626369	2248354	3.70	1.75	Arábica
15	Café	626369	2248351	2.30	1.46	Arábica
16	Café	626367	2248353	3.20	1.52	Arábica
17	Café	626367	2248353	2.30	2.18	Arábica
18	Café	626366	2248353	2.70	1.90	Arábica
19	Café	626364	2248355	2.90	2.70	Arábica
20	Café	626362	2248356	1.50	2.18	Arábica
21	Café	626360	2248357	4.10	2.30	Arábica
22	Café	626360	2248355	4.90	2.30	Arábica
23	Café	626362	2248354	3.30	2.42	Arábica
24	Café	626365	2248353	2.50	2.03	Arábica
25	Café	626367	2248351	3.90	2.40	Arábica
26	Café	626368	2248351	2.20	1.40	Arábica
27	Café	626365	2248350	4.50	2.60	Arábica
28	Café	626364	2248351	3.80	2.30	Arábica
29	Café	626362	2248353	5.20	2.57	Arábica
30	Café	626361	2248352	3.90	2.68	Arábica
31	Café	626362	2248350	5.00	2.65	Arábica
32	Árbol	626368	2248354	22.20	15.08	Cedro rojo
33	Árbol	626369	2248356	12.90	9.30	Chalahuite
34	Árbol	626364	2248359	11.80	8.56	Chalahuite
35	Árbol	626365	2248359	11.00	9.23	Chalahuite
36	Árbol	626361	2248356	11.10	9.47	Cedro rojo

Cuadro 25. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P3).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	626391	2248300	1.20	0.50	Arábica
2	Café	626390	2248299	2.30	2.10	Arábica
3	Café	626391	2248296	2.10	1.83	Arábica
4	Café	626392	2248298	2.10	1.30	Arábica

Continúa Cuadro 25. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
5	Café	626394	2248298	1.50	1.55	Arábica
6	Café	626395	2248300	1.90	2.10	Arábica
7	Café	626396	2248297	2.30	1.20	Arábica
8	Café	626395	2248297	1.90	1.30	Arábica
9	Café	626394	2248295	1.20	1.40	Arábica
10	Café	626392	2248295	1.30	0.90	Arábica
11	Café	626391	2248293	1.30	0.84	Arábica
12	Café	626392	2248291	1.50	1.00	Arábica
13	Café	626393	2248292	1.60	1.20	Arábica
14	Café	626394	2248292	1.60	1.10	Arábica
15	Café	626395	2248294	1.30	0.91	Arábica
16	Café	626396	2248294	1.50	1.22	Arábica
17	Café	626397	2248295	2.00	1.33	Arábica
18	Café	626397	2248296	1.70	1.10	Arábica
19	Café	626399	2248296	1.20	0.85	Arábica
20	Café	626399	2248297	1.20	0.80	Arábica
21	Café	626400	2248294	1.80	1.00	Arábica
22	Café	626399	2248293	1.30	0.60	Arábica
23	Café	626399	2248293	1.90	1.23	Arábica
24	Café	626398	2248292	1.70	1.14	Arábica
25	Café	626396	2248291	1.90	1.37	Arábica
26	Café	626394	2248290	2.20	1.50	Arábica
27	Café	626399	2248290	1.40	0.76	Arábica
28	Café	626400	2248291	1.80	1.10	Arábica
29	Árbol	626398	2248298	11.70	10.20	Mamey
30	Árbol	626399	2248291	12.30	9.67	Cedro rojo
31	Árbol	626391	2248298	14.40	10.56	Cedro rojo
32	Árbol	626392	2248300	14.70	9.48	Chalahuite

Cuadro 26. Registro de individuos en la parcela Tenanguito (P4).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	626561	2248178	2.10	1.77	Arábica
2	Café	626562	2248179	2.70	2.10	Arábica
3	Café	626563	2248180	2.60	0.93	Arábica
4	Café	626567	2248179	3.60	2.05	Arábica
5	Café	626565	2248178	1.50	0.80	Arábica
6	Café	626564	2248178	2.10	1.90	Arábica
7	Café	626563	2248177	3.50	1.90	Arábica
8	Café	626562	2248176	2.10	1.37	Arábica
9	Café	626560	2248175	4.50	1.87	Arábica
10	Café	626561	2248171	3.20	1.90	Arábica
11	Café	626562	2248173	3.10	2.00	Arábica
12	Café	626562	2248173	3.10	1.65	Arábica
13	Café	626564	2248174	4.00	2.10	Arábica
14	Café	626565	2248175	2.50	2.20	Arábica
15	Café	626565	2248176	3.20	2.10	Arábica
16	Café	626566	2248177	3.70	2.40	Arábica
17	Café	626568	2248177	1.50	1.00	Arábica
18	Café	626569	2248178	2.20	1.45	Arábica
19	Café	626569	2248179	1.60	0.80	Arábica
20	Café	626569	2248176	4.80	0.76	Arábica
21	Café	626567	2248175	4.30	2.25	Arábica
22	Café	626567	2248173	3.20	1.70	Arábica
23	Café	626565	2248172	3.10	2.25	Arábica
24	Café	626563	2248170	3.60	1.85	Arábica
25	Café	626568	2248171	3.10	2.00	Arábica
26	Café	626569	2248172	3.90	1.70	Arábica
27	Café	626570	2248173	4.10	2.32	Arábica
28	Árbol	626568	2248179	20.30	14.05	cedro rojo
29	Árbol	626564	2248177	11.10	7.74	cedro rojo
30	Árbol	626569	2248171	15.00	6.03	cojondgato
31	Árbol	626561	2248172	29.60	13.81	caoba

Cuadro 27. Registro de individuos en la parcela El Salto (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	627545	2248540	2.90	1.52	Arábica
2	Café	627540	2248538	2.90	1.62	Arábica
3	Café	627543	2248539	3.40	1.83	Arábica
4	Café	627546	2248539	3.30	1.80	Arábica
5	Café	627549	2248539	2.90	1.67	Arábica
6	Café	627548	2248537	2.80	1.46	Arábica
7	Café	627545	2248537	1.30	0.73	Arábica
8	Café	627543	2248537	3.40	1.56	Arábica
9	Café	627542	2248536	1.90	1.17	Arábica
10	Café	627545	2248536	2.10	0.90	Arábica
11	Café	627547	2248535	2.20	1.42	Arábica
12	Café	627550	2248535	2.50	1.18	Arábica
13	Café	627549	2248533	2.80	1.34	Arábica
14	Café	627547	2248534	2.50	1.17	Arábica
15	Café	627544	2248534	3.00	1.24	Arábica
16	Café	627541	2248533	2.50	1.00	Arábica
17	Café	627544	2248532	2.90	1.50	Arábica
18	Café	627548	2248531	3.30	1.56	Arábica
19	Café	627543	2248530	3.30	1.60	Arábica
20	Árbol	627545	2248540	11.50	8.69	Caoba
21	Árbol	627546	2248534	14.30	7.97	Tezmozol
22	Árbol	627543	2248534	21.00	10.00	Caoba
23	Árbol	627541	2248532	10.70	7.00	Caoba
24	Árbol	627541	2248535	10.30	8.00	Caoba

Cuadro 28. Registro de individuos en la parcela El Salto (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	627502	2248589	3.30	2.00	Arábica
2	Café	627501	2248587	3.20	2.00	Arábica
3	Café	627501	2248587	3.30	2.13	Arábica
4	Café	627501	2248586	4.30	2.30	Arábica
5	Café	627500	2248582	3.60	1.90	Arábica
6	Café	627501	2248583	4.30	1.70	Arábica
7	Café	627502	2248585	4.20	2.10	Arábica

Continúa Cuadro 28. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
8	Café	627503	2248586	3.90	2.55	Arábica
9	Café	627506	2248589	3.50	1.80	Arábica
10	Café	627504	2248587	4.00	2.50	Arábica
11	Café	627509	2248590	2.60	1.96	Arábica
12	Café	627508	2248588	3.40	2.44	Arábica
13	Café	627506	2248587	2.90	2.10	Arábica
14	Café	627506	2248586	2.50	2.37	Arábica
15	Café	627505	2248585	2.60	2.06	Arábica
16	Café	627504	2248583	2.90	1.74	Arábica
17	Café	627503	2248582	3.40	1.61	Arábica
18	Café	627503	2248581	3.70	2.10	Arábica
19	Café	627506	2248581	2.80	1.80	Arábica
20	Café	627507	2248583	3.50	2.00	Arábica
21	Café	627507	2248584	3.90	2.00	Arábica
22	Café	627508	2248585	3.40	1.80	Arábica
23	Café	627510	2248587	3.50	2.28	Arábica
24	Café	627510	2248583	3.20	2.20	Arábica
25	Café	627509	2248582	2.70	2.10	Arábica
26	Café	627508	2248581	2.30	1.70	Arábica
27	Árbol	627509	2248586	10.10	5.84	Chalahuite
28	Árbol	627503	2248588	15.00	14.56	Chalahuite

Cuadro 29. Registro de individuos en la parcela La laguna (P1).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	628251	2252020	2.50	1.39	Arábica
2	Café	628250	2252016	2.30	1.27	Arábica
3	Café	628251	2252017	2.40	1.25	Arábica
4	Café	628253	2252018	2.50	1.17	Arábica
5	Café	628254	2252019	2.00	1.40	Arábica
6	Café	628255	2252019	2.80	1.75	Arábica
7	Café	628260	2252014	2.40	1.27	Arábica
8	Café	628259	2252013	2.30	1.10	Arábica
9	Café	628258	2252012	2.50	1.05	Arábica
10	Café	628256	2252011	2.50	1.70	Arábica

Continúa Cuadro 29. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
11	Café	628255	2252011	3.10	1.93	Arábica
12	Café	628254	2252010	3.20	2.02	Arábica
13	Café	628259	2252019	2.70	2.06	Arábica
14	Café	628258	2252019	2.80	1.70	Arábica
15	Café	628257	2252018	2.60	1.73	Arábica
16	Café	628255	2252017	2.40	0.96	Arábica
17	Café	628254	2252016	1.20	0.70	Arábica
18	Café	628253	2252015	2.50	1.30	Arábica
19	Café	628259	2252010	3.10	1.47	Arábica
20	Café	628252	2252014	2.20	1.18	Arábica
21	Café	628250	2252013	2.90	1.52	Arábica
22	Café	628251	2252011	2.90	0.90	Arábica
23	Café	628252	2252011	3.20	1.52	Arábica
24	Café	628253	2252012	2.90	1.70	Arábica
25	Café	628255	2252013	3.00	1.15	Arábica
26	Café	628256	2252014	2.90	1.55	Arábica
27	Café	628258	2252015	2.90	1.43	Arábica
28	Café	628259	2252015	3.10	1.55	Arábica
29	Café	628260	2252016	2.40	1.35	Arábica
30	Árbol	628258	2252020	14.30	8.70	Chalahuite
31	Árbol	628258	2252020	12.70	4.66	Chalahuite
32	Árbol	628257	2252015	15.20	10.43	Cedro rojo
33	Árbol	628254	2252013	16.70	13.12	Cedro rojo
34	Árbol	628254	2252015	13.00	7.90	Chalahuite

Cuadro 30. Registro de individuos en la parcela La laguna (P2).

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
1	Café	628239	2252350	0.90	0.60	Arábica
2	Café	628239	2252345	2.90	3.00	Arábica
3	Café	628239	2252346	4.00	3.00	Arábica
4	Café	628238	2252347	3.40	2.50	Arábica
5	Café	628237	2252348	3.10	3.00	Arábica
6	Café	628233	2252349	2.60	2.50	Arábica
7	Café	628234	2252348	3.10	2.50	Arábica

Continúa Cuadro 30. ...

N°	TIPO DE COBERTURA	COORDENADAS UTM		DIÁMETRO (cm)	ALTURA (m)	NOMBRE
		ESTE	NORTE			
8	Café	628235	2252347	3.00	2.50	Arábica
9	Café	628236	2252346	2.20	2.60	Arábica
10	Café	628236	2252345	0.80	0.50	Arábica
11	Café	628237	2252344	3.30	3.00	Arábica
12	Café	628239	2252342	2.40	2.20	Arábica
13	Café	628240	2252341	3.50	3.00	Arábica
14	Café	628237	2252341	2.70	2.50	Arábica
15	Café	628235	2252343	3.20	2.56	Arábica
16	Café	628234	2252345	2.80	2.50	Arábica
17	Café	628233	2252346	3.80	2.50	Arábica
18	Café	628232	2252347	1.50	1.30	Arábica
19	Café	628231	2252348	2.20	2.00	Arábica
20	Café	628230	2252350	3.70	3.00	Arábica
21	Café	628230	2252345	2.60	2.46	Arábica
22	Café	628231	2252344	2.50	2.00	Arábica
23	Café	628231	2252340	3.30	2.30	Arábica
24	Árbol	628239	2252343	12.00	8.00	Toshcata
25	Árbol	628238	2252344	17.80	8.50	Chalahuite
26	Árbol	628231	2252343	17.00	5.44	Chalahuite
27	Árbol	628232	2252345	25.50	10.39	Chalahuite
28	Árbol	628232	2252348	11.60	7.36	Cedro rojo
29	Árbol	628232	2252350	10.40	7.38	Nancy

Anexo B. Panel fotográfico registrado durante la investigación



Figura 9. Instalación del equipo Field Map.



Figura 10. Codificación de árboles.



Figura 11. Codificación de café.



Figura 12. Geo-posicionamiento y estimación de altura de árboles.



Figura 13. Geo-posicionamiento de café.



Figura 14. Medición de altura de café.