



UAGro

Universidad de Calidad con Inclusión Social

**Universidad Autónoma de
Guerrero**

Centro de Ciencias de Desarrollo Regional

Doctorado en Ciencias Ambientales

TESIS

**Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la
microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México**

PRESENTA:

José Navarro Martínez

Para obtener el grado de:

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Director de Tesis

Ph. D. Miguel Ángel López López

Codirector

Dr. Máximo Reyes Umaña

Asesores

Dr. José Luis Rosas Acevedo

Dra. Ana Laura Juárez López

Dr. Flaviano Godínez Jaimes

Acapulco, Gro., septiembre de 2019.

DEPENDENCIA: Centro de Ciencias de
Desarrollo Regional
No. OFICIO: 527/CCDR/19
ASUNTO: Autorización de impresión
de Tesis Doctoral.

Acapulco, Gro., agosto 28 de 2019.

DRA. MARÍA LAURA SAMPEDRO ROSAS
DIRECTORA DEL CENTRO DE CIENCIAS DE
DESARROLLO REGIONAL
PRESENTE.

Por medio de la presente, le comunicamos que después de haber leído, analizado y revisado el trabajo titulado: **“Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México”** del alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales, **C. José Navarro Martínez**, alumno de la generación (2016-2019), con número de matrícula 16250292, el Comité Tutorial considera que reúne los requisitos de un trabajo de investigación doctoral por lo que damos consentimiento para su impresión, y se fije fecha para ser presentado y defendido ante el sínodo examinador, que como requisito parcial es necesario para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Ambientales.

Sin otro particular, reciba la mejor de nuestras consideraciones.

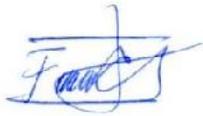
ATENTAMENTE


PhD. Miguel Ángel López López
Director


Dr. Maximino Reyes Umaña
Co-director


Dr. José Luis Rosas Acevedo Rosas
Asesor


Dra. Ana Laura Juárez López
Asesora


Dr. Flaviano Godínez Jaimes
Asesor



Privada de Laurel No. 13
Col. El Roble, C.P. 39640
Tel. (744) 48 90 430, Ext. 4432, 4433 y 4482
Correo electrónico: ccdr@uagro.mx
Acapulco de Juárez, Guerrero, México



DEPENDENCIA: Centro de Ciencias de Desarrollo Regional
No. OFICIO: 548/CCDR/19
ASUNTO: Autorización de examen de grado.

Acapulco, Gro., septiembre 03 de 2019.

DR. CARLOS JESUS SAAVEDRA SANCHEZ
COORDINADOR DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DE LA ZONA SUR UAGro.
PRESENTE.

Por este conducto, le comunico que el **C. José Navarro Martínez**, alumno de la generación (2016-2019), del Doctorado en Ciencias Ambientales, con número de matrícula 16250292, presentará su examen profesional mediante la modalidad de tesis, de acuerdo al Artículo 96 Fracción III Inciso B del reglamento general de estudios de posgrado e investigación, la tesis titulada: **"Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México"**, El cual a juicio de los revisores asignados por esta dirección, ha sido autorizada la impresión y por lo tanto ser sustentada ante un jurado calificador. Una vez cubierto todos los parámetros que se requieren para cumplir con el perfil de egreso y se le acredite como Doctor en Ciencias Ambientales.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Universidad de calidad con inclusión social"



ADMINISTRACIÓN 2017 - 2021



DRA. María Laura Sampeiro Rosas
Director del CCDR



Privada de Laurel No. 13
Col. El Roble, C.P. 39040
Tel. (744) 40 00 430, Ext. 4432, 4433 y 4402
Correo electrónico: ccd@uagro.mx
Acapulco de Juárez, Guerrero, México



Solicitud para tramitar **OBTENCIÓN DE GRADO DE DOCTOR ARTÍCULO 96 FRACCIÓN III INCISO B**
Fecha: 03 DE SEPTIEMBRE DE 2019

M.C. JAIME KAHAN HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.

At'n: M.A. Rubén Darío Hernández González
Jefe del Departamento de Educación Superior y Posgrado
Jefe del Departamento de Administración Escolar Zona Sur
Jefe del Departamento de Administración Escolar Zona Norte

Presentes

Datos del Egresado	Matrícula:	16250292
	Nombre:	José
	Primer Apellido:	Navarro
	Segundo Apellido:	Martínez
	Unidad Académica:	Centro de Ciencias de Desarrollo Regional
	Programa Educativo:	Doctorado en Ciencias Ambientales
	Periodo de Estudios:	2016-2019
	Proyecto de Investigación:	Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la microcuenca del Río Hueyapa, Guerrero, México

Solicito a usted me autorice con fundamento al **Artículo 96 Fracción III inciso b del Reglamento de Posgrado Vigente**, la **Obtención de Grado de Doctor con orientación a la investigación**, que a la letra dice "Elaborar una tesis original con las modalidades específicas en la reglamentación de cada programa de doctorado considerando lo siguiente: "La tesis de los doctorados orientados a la investigación debe ser un trabajo que dé una solución original a un problema de investigación que demuestre el conocimiento profundo sobre el tema y la capacidad de desarrollar investigación independiente". Anexo los siguientes documentos:

1. Oficio de la Dirección de la Unidad Académica donde autoriza la titulación por esta vía.
2. Oficio dictaminado por el Consejo Tutorial de la Coordinación de Posgrado.
3. Original del pago referenciado impreso de la página: **dae.uagro.mx**, en la sección servicios Nivel Superior y boucher del depósito correspondiente por \$ 800**.
4. Presentar tesis empastada,
5. En caso de haber concluido la permanencia, traer la solicitud valorada por el comité tutorial y la Academia, y Aprobada por el consejo **Original y copia en tamaño carta para cotejo y certificación** del siguiente documento:
6. Certificado de Doctorado.

Atentamente

Firma del egresado

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO
UAGro
Coordinación de Administración Escolar / Zona Sur
Administración 2017 - 2021

Firma y sello Educación Superior y Posgrado

03 DE SEPTIEMBRE DE 2019



Calle Nicolás Catalán No. 48, esquina con
Teófilo Olea y Leyva, C.U. Norte, C.P. 39000
Tel. (747) 471 03 10, ext. 3201
E-mail: nivelsuperior@uagro.mx
Chilpancingo de los Brava, Guerrero, México

Rectorado 2017-2021



UAGRO UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

Departamento de Administración Escolar Zona Sur

OFICIO No. 11311/06/09/2019/D.A.E.Z.S.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE EXAMEN
DE GRADO DE DOCTOR.

ACAPULCO, GRO., A 06 DE SEPTIEMBRE DEL 2019.

C. DRA. MARÍA LAURA SAMPEDRO ROSAS
DIRECTORA DEL CENTRO DE CIENCIAS
DE DESARROLLO REGIONAL
DE LA UAGro.
PRESENTE.

CON BASE A LO ESTABLECIDO EN EL ARTÍCULO 96 FRACCIÓN III INCISO b) DEL REGLAMENTO GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN, VIGENTE, SE **AUTORIZA** LA APLICACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO, MEDIANTE LA MODALIDAD DE TESIS TITULADA:

Plan de manejo silvícola para captura de carbono en la microcuenca del Río Hueyapa, Guerrero, México.

AL (LA) C. JOSÉ NAVARRO MARTÍNEZ

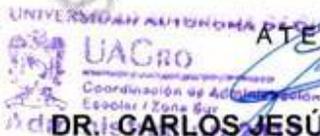
PARA OBTENER EL GRADO DE: DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

HABIENDO CURSADO SUS ESTUDIOS EN EL PERIODO: 2016 - 2019.

EN VIRTUD DE HABER CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS DE REVISIÓN EXIGIDOS POR LA LEY EN ESTOS CASOS.

AGRADECERÉ A USTED, INFORMAR A ESTA COORDINACIÓN EL RESULTADO DEL EXAMEN, A MÁS TARDAR 15 DÍAS HÁBILES DESPUÉS DE EFECTUARLO.

SIN OTRO PARTICULAR, RECIBA UN CORDIAL SALUDO.



ATENTAMENTE.

DR. CARLOS JESÚS SAAVEDRA SÁNCHEZ.
JEFE

C.c.p. Unidad Académica
C.c.p. Interesado(a).
C.c.p. Archivo.
CJSS/mrc.

Administración 2017 - 2021
Niños Héroes No. 133
Col. Progreso C. P. 39350
Tel: (744) 488 59 43, (744) 486 09 19
correo electrónico: admonescolar_zs@uagro.mx
Acapulco de Juárez, Guerrero, México

DEDICATORIA

A **Dios** y a mis padres, *Enedina[†]* y *Eudoxio[†]*, por haberme dado la vida.

A mi adorable esposa *Elizabeth* por su amor, comprensión y apoyo invaluable en mi superación personal, académica y profesional. A mi hija *Diana Jhosely*, a mis hijos *José Fernando* y *Fredy Emiliano*, para quienes anhelo ser su guía por siempre.

A mis suegros, *Sra. Agustina[†]*, a quien no tuve la fortuna de conocerla, pero con la conducta de sus hijas e hijos, constato que fue una excelente madre y ser humano; al *Sr. Eleuterio*, a quien aprecio de todo corazón y que, a falta de mis padres, recibo siempre sus sabios consejos.

A mis hermanas y hermanos de quienes he recibido frases de estímulo; en especial a mi sonriente hermana *Minerva[†]*, que Dios la tenga en su santa gloria.

A las familias: *Plancarte Mondragón*, *Xochitla Carrera*, *Zúñiga Chacón*, *Carbajal López*, *Rivera López**, *López Tapia*, *Bautista Rodríguez*, quienes han marcado y abonado a mi desarrollo humano.

A *Usted*, que le está dedicando tiempo para hojear la materialización de un proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Educación Media Superior Tecnológica Agropecuaria y Ciencias del Mar (antes Dirección General de Educación Tecnológica agropecuaria [DGETA]) y a la Cordinación Sectorial de Desarrollo Académico (COSDAC), por otorgarme la licencia por Beca-Comisión durante periodo 2016-2019.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto de investigación "*Estimación de la captura de carbono en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México*" clave 278639 del Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, convocatoria 2016-1.

A mi comité tutorial de tesis, doctores *Miguel Ángel, Maximino, José Luis, Ana Laura y Flaviano*, quienes, con su experiencia de docentes-investigadores y alta calidad humana, fomentaron en mí el espíritu de superación permanente, orientándome para llevar a feliz término la presente tesis, sin duda alguna, un trabajo perfectible.

Al personal directivo y docente del Centro de Ciencias de Desarrollo Regional (CCDR) de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), por darme la oportunidad de formarme profesionalmente bajo su asesoría. Al personal administrativo y responsables de laboratorios, maestros *Enrique J. Flores Munguía* y *M. Beatríz Rosas Acevedo*, por otorgarme siempre su apoyo en el procesamiento y análisis de muestras.

A las autoridades de la comunidad agraria Dos Caminos y Anexos, por el apoyo irrestricto recibido para el muestreo de árboles y obtención de datos estadísticos del bosque templado de la microcuenca Hueyapa, cuyo análisis y resultados, les serán de utilidad en futuros proyectos de compensación ambiental de este ecosistema.

A los exalumnos de la Universidad Autónoma Chapingo *Alexis Venancio Cleofas* y *Juan Diego Cortés Cortés*, así como a *Fredy, Senaido, Humberto, J. Milton, Agustín, Gustavo, L. Alfredo, M. Antonio* y *Aldair*, quienes conformaron el equipo de trabajo para el inventario forestal y muestreo de árboles para el ajuste de ecuaciones alométricas.

A mis compañeros en esta aventura de formación académica, con quienes me fue grato compartir experiencias de formación profesional.

CONTENIDO

INDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
I. INTRODUCCIÓN	3
II. ANTECEDENTES	6
III. JUSTIFICACIÓN	13
IV. INTERROGANTES CIENTÍFICAS.....	16
V. OBJETIVOS.....	17
5.1. Objetivo general	17
5.2. Objetivos específicos	17
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
6.1. Área de estudio	18
6.2. Metodología	19
6.2.1. Caracterización morfométrica y cambio de uso de suelo y vegetación	19
6.2.2. Ecuaciones de biomasa y volumen para <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>	21
6.2.3. Estimación del reservorio de carbono y Productividad Primaria Neta aérea (PPNa)	26
6.2.4. Inventario de la vegetación arbórea del bosque templado	26
6.2.5. Estimación de volumen y biomasa aérea del estrato arbóreo	29
6.2.6. Estimación de la necromasa de árboles muertos en pie y material leñoso caído	32
6.2.7. Estimación de la biomasa y carbono en la hojarasca y sotobosque	34
6.2.8. Estimación de la biomasa del sistema radicular	34
6.2.9. Estimación del carbono orgánico y fertilidad del suelo forestal	35
6.2.10. Estimación del carbono orgánico en madera de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>	35
6.2.11. Medición y estimación de la caída de hojarasca en los estratos Pino-encino (P-Q) y encino (Q).....	36
6.2.12. Estimación de incrementos del compartimento aéreo del estrato arbóreo	36
6.2.13. Silvicultura para potencializar la captura de carbono	37
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
7.1. Caracterización morfométrica de la microcuenca	39
7.1.1. Área y pendiente	39
7.1.2. Parámetros de drenaje	39

7.1.3.	Curva hipsométrica e integral hipsométrica	43
7.1.4.	Perfil longitudinal y transversal	43
7.1.5.	Índices morfométricos.....	46
7.2.	Cambio de uso de suelo y vegetación.....	49
7.3.	Ajuste de ecuaciones alométricas	57
7.3.1.	Variables dasométricas de árboles muestra para el ajuste de ecuaciones alométricas.	57
7.3.2.	Modelación de la biomasa aérea total en <i>P. oocarpa</i>	58
7.3.3.	Modelación de la biomasa aérea total en <i>Quercus spp.</i>	60
7.3.4.	Modelación de la biomasa aérea total en <i>Q. resinosa</i>	61
7.3.5.	Distribución de la biomasa por componente aéreo en árboles de <i>P. oocarpa</i>	65
7.3.6.	Distribución de la biomasa por componente aéreo en árboles de <i>Quercus spp.</i> y <i>Q. resinosa</i>	67
7.3.7.	Ecuaciones de volumen ajustadas para de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>	68
7.3.8.	Proporción de carbono en madera de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>	71
7.4.	Análisis del inventario forestal maderable	74
7.4.1.	Estimaciones dasométricas en el ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa	74
7.4.2.	Estimaciones de biomasa y carbono aéreo en el ecosistema bosque templado.	78
7.4.3.	Volumen, necromasa y carbono en arbolado muerto en pie	85
7.4.4.	Incremento corriente anual (ICA) en área basal, volumen, biomasa y carbono	87
7.4.5.	Estimación de necromasa y carbono en material leñoso caído (MLC).....	103
7.4.6.	Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque	107
7.4.7.	Biomasa y carbono en el sistema radicular.....	110
7.4.8.	Pérdida de biomasa y carbono por caída de follaje y otros componentes arbóreos. ..	115
7.4.9.	Productividad Primaria Neta aérea (PPNa) en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	120
7.4.10.	Carbono orgánico en el suelo (COS) mineral de la microcuenca del río Hueyapa.	125
7.4.11.	Carbono orgánico total en la vegetación de la microcuenca del río Hueyapa	127
7.4.12.	Análisis de fertilidad de los suelos de la microcuenca del río Hueyapa	132
VIII.	PROPUESTA “SILVICULTURA PARA POTENCIALIZAR LA TASA DE CAPTURA DE CARBONO EN EL BOSQUE TEMPLADO DE LA MICROCUENCA HUEYAPA”	135
8.1.	Conceptualización de los tratamientos silvícolas y complementarios	135
8.2.	Justificación de los tratamientos silvícolas propuestos	136
8.2.1.	Reforestación y siembra directa	136
8.2.2.	Sistemas agroforestales o agrasilvopastoriles	138

8.2.3.	Cortas intermedias (Preclareo y aclareo).....	139
8.2.4.	Podas	142
8.2.5.	Eliminación del sotobosque y necromasa para el establecimiento de la regeneración 143	
8.2.6.	Fertilización	150
8.2.7.	Prevención de incendios, plagas y enfermedades forestales	151
8.2.8.	Construcción y/o rehabilitación de obras de filtración de agua y conservación de suelos con reforestación	156
8.2.9.	Establecimiento de sitios permanentes de investigación silvícola (SPIS).....	158
8.3.	Tratamientos silvícolas propuestos por unidad básica de manejo	159
8.4.	Resultados esperados de la aplicación de tratamientos silvícolas.....	178
8.5.	Beneficios socioeconómicos con la aplicación de los resultados de esta investigación	179
IX.	CONCLUSIONES	183
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	186

INDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Matriz de transición de las clases de cobertura de los años 2000-2017.	21
Cuadro 2. Distribución de la muestra y proporción de árboles derribados por vientos.	22
Cuadro 3. Modelos de regresión lineal para estimar la biomasa aérea de <i>P. oocarpa</i> , <i>Quercus spp.</i> y <i>Q. resinosa</i>	23
Cuadro 4. Modelos de regresión lineal para estimar el volumen de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>	26
Cuadro 5. Simbología de las USM del inventario de la vegetación de bosques.	28
Cuadro 6. Número de corrientes y su bifurcación en la microcuenca del río Hueyapa.	40
Cuadro 7. Fórmulas de cálculo y resultados de parámetros morfométricos de la microcuenca del río Hueyapa.	46
Cuadro 8. Estadísticas dasométricas de árboles muestreados de <i>P. oocarpa</i> y <i>Q. resinosa</i>	57
Cuadro 9. Modelos ajustados para estimar la biomasa aérea total de <i>P. oocarpa</i>	58
Cuadro 10. Modelos elegidos para estimar la biomasa aérea y por componente arbóreo en <i>Quercus spp.</i>	60
Cuadro 11. Modelos ajustados para estimar la biomasa aérea total de <i>Q. resinosa</i>	61
Cuadro 12. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos elegidos para estimación de biomasa aérea.	61
Cuadro 13. Modelos ajustados para la estimación de volúmenes en <i>P. oocarpa</i>	69
Cuadro 14. Parámetros del modelo para estimar $V_{ta_{cc}}$ para <i>P. oocarpa</i> y estadísticos de ajuste	69
Cuadro 15. Modelos ajustados para la estimación de volúmenes para <i>Quercus spp.</i>	70
Cuadro 16. Parámetros del modelo para estimar $V_{ta_{cc}}$ para <i>Quercus spp.</i> y estadísticos de ajuste	71
Cuadro 17. Concentración de carbono en los componentes aéreos.	72
Cuadro 18. Concentración de carbono en las especies del género <i>Quercus spp.</i>	72
Cuadro 19. Variables dasométricas promedio estimadas por rodal.	77
Cuadro 20. Reservorio por estrato y ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	79
Cuadro 21. Reservorio promedio en arbolado muerto en pie por rodal.	86
Cuadro 22. Reservorio de arbolado muerto en pie por estrato y del ecosistema bosque templado.	87
Cuadro 23. ICA promedio por rodal.	89
Cuadro 24. ICA promedio y total por estrato y ecosistema bosque templado.	90
Cuadro 25. ICA promedio por árbol por categoría diamétrica en <i>Pinus oocarpa</i>	92
Cuadro 26. ICA promedio por categoría diamétrica en <i>Quercus spp.</i>	95
Cuadro 27. ICA promedio por árbol y por categoría diamétrica en otras latifoliadas.	100
Cuadro 28. Densidad específica de material leñoso caído con base en el grado de deterioro.	103
Cuadro 29. Reservorio de necromasa y carbono en MLC por rodal en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	105
Cuadro 30. Reservorio de necromasa y carbono en MLC promedio por estrato y del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	106
Cuadro 31. Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque por rodal.	109
Cuadro 32. Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque por estrato arbóreo y ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	110
Cuadro 33. Reservorio de biomasa y carbono del sistema radicular por rodal.	113

Cuadro 34. Biomasa y carbono promedio y total en sistema radicular por estrato y del ecosistema bosque templado.	114
Cuadro 35. Pérdida de biomasa y carbono en la vegetación arbórea.	118
Cuadro 36. Producción de hojarasca y otros componentes arbóreos.	118
Cuadro 37. PPNa por rodal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	121
Cuadro 38. PPNa por estrato y del ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	122
Cuadro 39. Densidad aparente y porcentaje de carbono en suelo por rodal (0-30 cm de profundidad).	126
Cuadro 40. COS por estrato y del ecosistema bosque templado.	127
Cuadro 41. Carbono orgánico total por rodal en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	129
Cuadro 42. Carbono orgánico total promedio por estrato y del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	130
Cuadro 43. Variables indicativas de la fertilidad del suelo mineral de la microcuenca del río Hueyapa.	134
Cuadro 44. Tratamientos silvícolas y complementarios sugeridos por rodal en el bosque templado de la microcuenca Hueyapa.	160
Cuadro 45. Propuesta de tratamientos complementarios en rodales de protección y otros usos.....	174
Cuadro 46. Ingreso económico por la venta de bonos de carbono en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	18
Figura 2. Forma y distribución de las USM para bosques, modificado de CONAFOR-SEMARNAT (2011).	27
Figura 3. Pendientes del territorio de la microcuenca del río Hueyapa.	41
Figura 4. Orden de la red de drenaje de la microcuenca del río Hueyapa.	42
Figura 5. Curva hipsométrica (a) y curva hipsométrica adimensional (b) de la microcuenca del río Hueyapa.	44
Figura 6. Perfil longitudinal (a) y perfil transversal (b) de la microcuenca del río Hueyapa.	45
Figura 7. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa, elaborado con datos de la CONAFOR (2014).	51
Figura 8. Comportamiento en el cambio de uso de suelo y vegetación en la microcuenca del río Hueyapa.	52
Figura 9. Mapa de uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa.	53
Figura 10. Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa 2000-2017.	54
Figura 11. NDVI de la superficie de la microcuenca del río Hueyapa.	56
Figura 12. Tendencia de la biomasa aérea total en función del diámetro normal (a) y altura total en árboles de <i>P. oocarpa</i> (b).	59
Figura 13. Biomasa aérea observada y predicha de <i>P. oocarpa</i> (a), <i>Quercus spp.</i> (b) y <i>Q. resinosa</i> (c).	64
Figura 14. Distribución de la biomasa aérea por componente estructural en <i>P. oocarpa</i>	66
Figura 15. Distribución de la biomasa aérea por componente arbóreo de <i>Quercus spp.</i> (a) y <i>Q.</i> <i>resinosa</i> (b).	67
Figura 16. Uso de suelo y vegetación dentro del bosque templado.	74
Figura 17. Distribución de la vegetación arbórea del bosque templado.	75
Figura 18. Distribución arbórea por categoría diamétrica del bosque templado.	76
Figura 19. Uso de suelo y vegetación en el área del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	80
Figura 20. Distribución de biomasa aérea en el estrato arbóreo de la vegetación de clima templado de la microcuenca del río Hueyapa.	82
Figura 21. Distribución de carbono aéreo en el estrato arbóreo de la vegetación de clima templado de la microcuenca del río Hueyapa.	84
Figura 22. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de <i>Pinus oocarpa</i>	93
Figura 23. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de <i>Pinus</i> <i>oocarpa</i>	94
Figura 24. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de <i>Quercus spp.</i>	97
Figura 25. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de <i>Quercus</i> <i>spp.</i>	98
Figura 26. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de otras latifoliadas.	101

Figura 27. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de otras latifoliadas.....	102
Figura 28. Distribución arbórea por categoría diamétrica en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).	115
Figura 29. Distribución arbórea por grupo de especies y categoría diamétrica en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).....	116
Figura 30. Pérdida mensual de PPNa en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).	117
Figura 31. PPNa en biomasa del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	123
Figura 32. PPNa en carbono del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	124
Figura 33. Distribución del carbono orgánico total por compartimento en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	128
Figura 34. Distribución del carbono orgánico total por compartimento en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	131
Figura 35. Árboles derribados por vientos fuertes al inicio de lluvias del año 2017.....	137
Figura 36. Bosque joven de <i>P. oocarpa</i> con alta densidad en la microcuenca del río Hueyapa.....	141
Figura 37. Brinzales y latizales de <i>P. oocarpa</i> con abundantes ramas bajas.....	143
Figura 38. Distribución del carbono en sotobosques en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	145
Figura 39. Área que requiere manejo del sotobosque para facilitar el establecimiento de la regeneración.	146
Figura 40. Regeneración de <i>P. oocarpa</i> (a) y rebrote de la misma, después de un incendio forestal (b)	147
Figura 41. Distribución de la hojarasca en rodales del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	148
Figura 42. Distribución de MLC en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	149
Figura 43. Rebrotos en la regeneración de <i>P. oocarpa</i> posterior a un incendio forestal.	152
Figura 44. Arbolado muerto en píce afectado por incendios forestales de alta intensidad (a) y plagas forestales (b).	153
Figura 45. Distribución de volumen del arbolado muerto en píce en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.	154
Figura 46. Árboles derribados por viento (a), con presencia de hongos (b) y termitas en el suelo (c).	155
Figura 47. Zanja trinchera para captura de agua en bosque templado de la microcuenca Hueyapa. .	157

RESUMEN

En esta investigación se realizó un diagnóstico de las condiciones que guarda el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México para proponer un plan de manejo silvícola que permita potencializar la tasa de captura de carbono en su biomasa. El análisis morfométrico y cambio de uso de suelo y vegetación se realizó mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando imágenes de satélite manipuladas con ArcGis 10.3 y ENVI 5.3. Presenta una superficie de 74.88 km², forma rectangular oblonga, muy montañosa y fuertemente accidentada, el 25% de su cobertura vegetal ha sido modificada por actividades agropecuarias y de urbanización.

Se ajustaron ecuaciones alométricas para estimar volumen ($\widehat{Vta}_{cc} = e^{-8.62+2.11\log(D)+0.10(H-1)-0.002(H-1)^2}$; $\widehat{Vta}_{cc} = e^{-5.23+0.20D+0.05H-0.002D^2}$) para árboles de *Pinus oocarpa* y *Quercus spp.*, respectivamente; así como para biomasa aérea

$$\widehat{B}_i = 0.10012 * D^{2.4589}, \quad \widehat{B}_i = \sqrt[0.212]{0.212 * \left[-2.3949 + 0.4905 * \left(\frac{(D_i^2 H_i)^{0.217} - 1}{0.217} \right) \right] + 1},$$

$\widehat{B}_i = \sqrt[0.048]{0.048 * \left[-5.7263 + 1.2743 * \left(\frac{(D^2 H)^{0.015} - 1}{0.015} \right) \right] + 1}$ para árboles de *Pinus oocarpa*, *Quercus spp.* y *Q. resinosa*, respectivamente. Aunado a datos del inventario forestal maderable, se estimó el reservorio promedio de carbono orgánico total en 151.58±8.81 Mg ha⁻¹ y PPNa de 7.14±0.45 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

Con base al desarrollo de la masa forestal, sotobosque y densidad de necromasa actuales, se proponen tratamientos silvícolas para potenciar la tasa de captura de carbono en el bosque templado de esta microcuenca.

ABSTRACT

In this research, a diagnosis was made of the conditions kept by the temperate forest of the Hueyapa river microwatershed, Guerrero, Mexico to propose a silvicultural management plan that allows to enhance the carbon capture rate in its biomass. The Morphometric analysis and change of land use and vegetation was carried out using a Geographic Information System (GIS), satellite images manipulated with ArcGis 10.3 and ENVI 5.3. It has an area of 74.88 km², oblong rectangular shape, very hilly and heavily rugged, 25% of its vegetation cover has been modified by agricultural activities and of urbanization.

Allometric equations were adjusted to estimate volumen ($\widehat{Vta}_{cc} = e^{-8.62+2.11\log(D)+0.10(H-1)-0.002(H-1)^2}$; $\widehat{Vta}_{cc} = e^{-5.23+0.20D+0.05H-0.002D^2}$) for *Pinus oocarpa* and *Quercus spp.* trees, respectively and aboveground biomass $\widehat{B}_i = 0.10012 * D^{2.4589}$,

$$\widehat{B}_i = \sqrt[0.212]{0.212 * \left[-2.3949 + 0.4905 * \left(\frac{(D_i^2 H_i)^{0.217} - 1}{0.217} \right) \right] + 1},$$

$$\widehat{B}_i = \sqrt[0.048]{0.048 * \left[-5.7263 + 1.2743 * \left(\frac{(D^2 H)^{0.015} - 1}{0.015} \right) \right] + 1}$$

for *Pinus oocarpa* and *Quercus spp.* and *Q. resinosa* trees, respectively. Coupled with data from the timber forest inventory, the average reservoir of total organic carbon was estimated in 151.58±8.81 mg ha⁻¹ and PPNa of 7.14±0.45 Mg C ha⁻¹ year⁻¹.

Based on the development of the forest mass, understory and necromass density current, silvicultural treatments are proposed to enhance the rate of carbon sequestration in the temperate forest of this microwatershed.

I. INTRODUCCIÓN

La cuenca, es la unidad territorial más adecuada para la gestión económica y social de los recursos hídricos, forestales, faunísticos, suelos, entre otros. El territorio hidrográfico de México se encuentra organizado en 37 Regiones Hidrológicas (RH), subdivididas en 1,471 cuencas hidrográficas.

En el estado de Guerrero se localizan tres RH, Balsas (18), Costa Grande de Guerrero (19) y Costa Chica de Guerrero (20) y 19 cuencas hidrográficas (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática–Instituto Nacional de Ecología–Comisión Nacional del Agua [INEGI-INE-CONAGUA], 2007). Por su mayor extensión territorial destacan las cuencas del río Balsas y río Papagayo.

Las actividades asociadas al desarrollo económico, tecnológico, político y cultural, en las prácticas de consumo actual de la humanidad, están afectando la producción de bienes y servicios de éstas. La quema de combustibles fósiles, la producción de carne y cultivo de granos de forma intensiva, las prácticas agrícolas de tumba-roza-quema y otros cambios de uso de suelo, propician la generación de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007).

Éste fenómeno amenaza el desarrollo y bienestar humano e incide en la pérdida de la biodiversidad, deterioro de los recursos naturales y servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas naturales (Rojo, Jasso & Velásquez, 2003). En el observatorio atmosférico en Mauna Loa, Hawaii, se ha registrado evidencia científica sólida de un incremento rápido, permanente e incontrolado de CO₂ atmosférico, derivado principalmente de la quema de combustibles fósiles; a tal grado que al 10 de julio de 2016, Hoffmann (2016) reportó una concentración mundial de 404.83 ppm de CO₂.

Uno de los más importantes GEI, responsable del cambio climático global es el dióxido de carbono (CO₂). La vegetación forestal es uno de los componentes de la biosfera, capaz de fijar y remover dicho gas de la atmósfera, pero también es la segunda emisora de CO₂ derivado de los incendios forestales, aprovechamientos maderables y cambios

en el uso del suelo (Rojo, Jasso & Velásquez, 2003; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007).

Debido al grave problema ambiental, en 1988 se constituyó el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático y en 1994, entró en vigor la Convención Marco sobre Cambio Climático en el que se establecen los compromisos de los países desarrollados y en vías de desarrollo, frente al problema (Ávalos, 2004).

En 1997, 179 países ratificaron sus compromisos firmando el Protocolo de Kioto, en donde se establecieron las metas de reducción de emisiones por parte de los países industrializados, que mediante mecanismos flexibles se comprometen a mitigar los GEI, financiando en países en vías de desarrollo proyectos de eficiencia energética o de fijación forestal de dióxido de carbono (Guzmán, Laguna & Martínez, 2004). México aspira a reducir en un 50% sus emisiones de GEI en el año 2050 en relación a las emitidas en el año 2000 (Diario Oficial de la Federación [D. O. F.], 2009), reduciendo la brecha entre deforestación y forestación.

Con la finalidad de mantener saludables los servicios que brindan estas unidades ecosistémicas de producción, y/o reducir la vulnerabilidad de las mismas, se hace necesario un diagnóstico real y un plan de acción para el desarrollo de estrategias que permitan el uso racional de sus recursos; así como, diversificar su producción en beneficio de sus dueños o poseedores, buscando fuentes de ingreso económico alternativo, como el Pago por Servicios Ambientales (PSA) generados en la microcuenca, entre los que destacan los servicios de captura de carbono, hídricos y la conservación de la biodiversidad, a través de mecanismos locales de PSA (Comisión Nacional Forestal – Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales [CONAFOR-SEMARNAT], 2012).

La silvicultura contempla el establecimiento, crecimiento, composición y calidad de la vegetación forestal con base en un objetivo de ordenación que describa la meta a lograr. Si la tasa de cambio y el desarrollo natural de la estructura del rodal se adapta al objetivo de la ordenación, entonces se requiere poca actividad silvícola; de lo

contrario, será necesario un tratamiento o una secuencia de tratamientos silvícolas para producir la estructura de rodal que se desea (Daniel, Helms & Baker, 1982).

Existen dos vías principales para desarrollar las existencias maderables de los bosques: cultivar los terrenos con vocación forestal o preferentemente forestal mediante plantaciones comerciales o de protección y reestablecer las funciones productoras de los bosques (Álvarez & Varona, 1988).

Por lo anterior, en esta investigación se describe morfológicamente la microcuenca del río Hueyapa, se presenta un análisis comparativo multitemporal sobre el cambio de uso de suelo y vegetación durante el periodo 2000-2017. Mediante datos del inventario forestal maderable, se estimó el reservorio y potencial de captura de carbono en el bosque templado de la misma.

Considerando que los programas de manejo forestal en el país están elaborados a nivel predial y son con fines de aprovechamiento de recursos forestales maderables y no maderables, aquí se describe una propuesta para un plan de manejo silvicultural, con miras a potencializar la tasa de captura de carbono y lograr la sustentabilidad del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa del estado de Guerrero, México.

II. ANTECEDENTES

Las cuencas son territorios ecosistémicos que otorgan bienes y servicios ambientales, como el suministro de agua, madera y leña, regulación del caudal de ríos, mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, regulación de la erosión del suelo, captura de carbono, refugio y alimento para la fauna, generación de energía eléctrica, pesca y turismo (Balvanera, 2012; Cuevas, Garrido, Pérez, & González, 2010; Garrido, Cuevas, Cotler, González, & Tharme, 2010; Ruiz, García, & Sayer, 2007).

A pesar de que las cuencas hidrográficas llevan a cabo la purificación del aire, agua y regulación térmica, ecoturismo forestal y conservación de la biodiversidad (Wu, Hou, & Yuan, 2010), tratamiento natural de aguas residuales y regulación de riesgos naturales (Guerrero, De Keizer, Córdova, 2006), estos territorios ecosistémicos, son sometidos a fuerte presión antrópica que ocasiona la degradación de sus recursos naturales e incremento de riesgos ante desastres naturales (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2017; López, Castro, Camas, Villar & López, 2013).

Es decir, afecta la calidad de vida de las comunidades que reciben servicios de ellas, lo cual es considerado como un problema ambiental epidémico (Arellano-Aguilar, Ortega & Gesundheit, 2012), que afecta incluso, a las franjas costeras (Escobar, 2002). Debido al crecimiento poblacional e intenso desarrollo industrial y urbano, se han transformado los ecosistemas terrestres renovables, pero finitos (Food and Agriculture Organization [FAO], 2013).

A partir del año 2000, el 77% de los ecosistemas insulares del mundo (bosques, zonas áridas) se convirtieron en áreas de cultivo, potreros, núcleos de población y desarrollo de infraestructura (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013). Así mismo, el 66.0% de las cuencas del territorio mexicano presentan un grado alto de deterioro en su funcionalidad, entre las que se incluyen la cuenca de los ríos Balsas y La Sabana en el estado de Guerrero (Garrido et al., 2010; Torres-Espino, Reyes-Umaña, González-González & Montalvo-Marquez, 2014).

Los estudios del cambio de uso del suelo forestal evalúan la velocidad de la deforestación/reforestación, determinan su extensión geográfica y permiten explicar

las causas sociales y económicas de los cambios a escala global, regional y local (Skole, Chomentowski, Salas, & Nobre, 1994). Por otro lado, las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica la describen física y espacialmente y ofrecen conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio.

Por esta razón, la morfometría de cada cuenca es proporcional a la posibilidad de cosecha hídrica, escorrentía superficial e incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que lo integran (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado & Besteiro, 2013). El análisis de superficies a través de un Modelo Digital de Elevación (MDE) representa una alternativa para determinar los parámetros morfométricos (forma, relieve y red de drenaje) de una cuenca, así como el funcionamiento hidrológico de la misma.

Al mismo tiempo, la pendiente de la cuenca y sus cauces, determinan el riesgo por escorrentía y su concentración en un punto de interés (Bocco, 2004) que deben valorarse en la planificación del territorio y manejo integral del mismo (Cruz, Gaspari, Rodríguez, Carrillo & Téllez, 2015).

Por otro lado, para enfrentar las tareas de mitigación y de adaptación al cambio climático, México propuso procesos productivos más limpios, eficientes y competitivos, seguridad energética, mejoría en la calidad del aire y conservación de los recursos naturales. Con esas acciones, se aspira a reducir en un 50% sus emisiones de GEI en el año 2050 en relación a las emitidas en el año 2000. En la etapa de fortalecimiento, 2013 al 2030, propuso lograr un equilibrio entre degradación/deforestación y restauración/reforestación (Diario Oficial de la Federación [D. O. F.], 2009).

Las masas forestales son sumideros naturales de carbono y participan con el 90% del flujo de carbono entre el suelo y la atmósfera (Ordoñez, 1999). Entre los métodos más utilizados para el cálculo del carbono almacenado en las masas forestales destacan: 1) la estimación de las existencias reales totales ($m^3 ha^{-1}$), multiplicada por la densidad de la madera y su conversión a carbono almacenado por unidad de superficie (IPCC, 2006); 2) el uso de modelos de fijación de carbono como el CO₂FIX (Ordoñez, 1999), el Carbon Budget Model of Canadian Forest Sector (Olguín et al., 2012); el Land Use

and Carbon Sequestration (Faeth, 1995) y 3) ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa y su posterior conversión a carbono. Este último método requiere de medir variables dasométricas provenientes de un proceso destructivo del árbol y la determinación de la biomasa por componente estructural (Figuroa-Navarro, Etchevers-Barra, Velázquez-Martínez & Acosta-Mireles, 2005; Navar, Méndez & Dale, 2002).

Las ecuaciones alométricas son utilizadas como herramientas para calcular volumen o biomasa de los árboles con datos provenientes de inventarios forestales, permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar el reservorio y tasa de captura de carbono y así, valorar el impacto del ecosistema forestal en la mitigación de la emisión de los GEI (Acosta, Vargas, Velázquez & Etchevers, 2002; Méndez-González, Luckie-Navarrete, Capó-Arteaga & Nájera-Luna, 2011; Navar, 2009).

Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendi, y Paz-Pellat (2015) realizaron una recopilación de información publicada en revistas especializadas y tesis, encontrando un total de 478 ecuaciones alométricas (414 arbóreas, 47 arbustivas, 15 bambús y 2 palmas) generadas para ecosistemas boscosos, selvas y matorral desértico de México. Sin embargo, estas aún son insuficientes, debido a que las condiciones edáficas, climáticas y topográficas del sitio, métodos de manejo del bosque, disponibilidad de nutrientes y otros factores, influyen en el desarrollo del árbol, por lo que se requiere ajustar ecuaciones alométricas para áreas geográficas específicas del territorio nacional y para especies y/o grupos de ellas de interés local, que brinden una alternativa como fuente de ingreso económico a los propietarios del recurso forestal, mediante la prestación de un servicio ambiental, como lo es la captura de carbono, principalmente en bosques sin aprovechamiento forestal maderable persistente.

La vida en la tierra es de varias formas, pero todas comparten un elemento en común, el Carbono. El secuestro de carbono es el término utilizado para describir la captura y el almacenamiento a largo plazo del CO₂ de la atmósfera en algún ecosistema natural,

en almacenes de corta duración como las hojas y el humus o de larga duración como la biomasa de la madera o materia orgánica en los suelos (Keenan & Williams, 2018).

Las masas forestales juegan un papel significativo en la fijación y retención del carbono emitido antrópicamente a la atmósfera; por lo que los esfuerzos de los gobiernos deben ir enfocados a la reducción de las emisiones, aunado a una mayor sensibilidad de la población en la reducción de estas emisiones y la práctica de métodos sostenibles de manejo forestal (Rojo, Jasso & Velázquez, 2003).

Con la finalidad de compensar el aumento de las emisiones de CO₂ generadas incluso en otros países, en el Programa Especial de Cambio Climático (Diario Oficial de la Federación [D. O. F.], 2009), México se propuso como objetivos de corto y mediano plazo, establecer programas de protección, conservación y manejo sustentable de los ecosistemas forestales y sus suelos; incrementar el potencial de sumideros de carbono a través de acciones de forestación y reforestación; estabilizar la frontera forestal-agropecuaria y reducir la incidencia de incendios forestales.

Para conocer la tasa de captura de carbono de los bosques es preciso estimar la Productividad Primaria Neta (PPN) definida como la diferencia entre la fotosíntesis total (Producción Primaria Bruta) y la respiración total de la planta en un ecosistema. En campo; sin embargo, es difícil evaluar esta diferencia, por lo que una definición alternativa de la PPN es el total de la nueva materia orgánica producida durante un intervalo de tiempo específico, en una superficie determinada. La Productividad Primaria Neta aérea (PPNa) es la suma de la hojarasca, ramillas finas, corteza, órganos reproductivos y del incremento de la biomasa aérea de las plantas en un periodo determinado (Clark et al., 2001).

Así, la PPN medida en campo comprende: 1) la cantidad de materia orgánica nueva que es retenida por las plantas vivas al final del intervalo y 2) la cantidad, tanto de materia orgánica que se produjo por las plantas, como la que se perdió durante el mismo intervalo. Es decir, incremento de la biomasa aérea, hojarasca y ramas finas; pérdida de la biomasa aérea por los consumidores, incremento neto en biomasa de raíces finas y gruesas, raíces muertas, pérdida de raíces por consumidores, exudados

de raíces, carbohidratos cedidos por las plantas a las micorrizas y nódulos simbióticos (Clark et al., 2001).

La PPN puede visualizarse como un indicador del potencial ecológico de un ecosistema y es un dato básico necesario en la planeación y manejo de los recursos naturales renovables. La PPNa en el planeta es de aproximadamente 70×10^9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y América Latina produce el 19% de ella; para esta región la producción de los bosques tropicales y subtropicales es 10.4×10^9 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que en los pastizales y sabanas tropicales y subtropicales es de 1.3×10^9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Gómez & Gallopín, 1991).

La producción de los ecosistemas forestales depende fuertemente de la disponibilidad y eficiencia en el uso de los nutrientes, disponibilidad de agua, especies forestales, la edad del arbolado, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, manejo forestal, periodos cálidos, entre otros factores (Binkley & Ryan, 1998; Fernández-Martínez et al., 2014).

Para potencializar la tasa de captura de carbono se requiere de la ordenación forestal, considerando no únicamente la producción de madera, sino también el vasto número de servicios ambientales que provee como el agua, peces, animales para la caza, permitir el desarrollo de la ganadería y la agricultura sostenibles y servicios recreativos; de modo que se debe determinar la extensión con la que cada uno de estos usos debe ser simple o múltiple y si algunas combinaciones pueden ser mutuamente excluyentes o compatibles (Daniel et al., 1982).

El manejo forestal en México se inició en 1944 con el Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM), cuyo caso se generalizó en 1964. En 1984 se renombró como Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), basado siempre en un sistema silvícola de selección, derribando árboles maduros o viejos, deformes, plagados o cualquier otra característica no deseable y dejando en pie a los mejores para mejorar la estructura del rodal y garantizar una regeneración natural exitosa (Mendoza y Rodríguez, 1959).

A principios de los años 80 surge el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) cuyo objetivo es el aprovechar al máximo el potencial productivo del suelo para la producción de madera y obtener un rendimiento sostenido en volumen y productos. Este sistema silvícola, propicia el establecimiento de bosques regulares (coetáneos) mediante el método de regeneración de árboles padres, sin dejar de lado la aplicación de cortas sucesivas y matarraza (Rosales et al., 1982).

Alternativamente en el manejo de los bosques de Michoacán se implementó el Sistema Silvícola de Cortas Sucesivas de Protección (SICOSUP) cuyo objetivo es realizar cortas en una masa madura cercana al límite de su explotabilidad o turno, a fin de abrir el dosel, permitir el desarrollo de la copa de los árboles residuales y mejorar las condiciones del suelo, para estimular la reproducción de la masa y establecimiento del renuevo, mediante cortas de regeneración que incluyen: corta preparatoria, de semillación, secundarias y de liberación (Mas, 1985).

Dadas las distintas condiciones de una masa forestal en un mismo predio o incluso rodal, no puede generalizarse la aplicación de un solo método de ordenación. Por lo anterior, principalmente en el estado de Durango, se han implementado otros métodos de manejo forestal como Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI), el Sistema Integral de Manejo de Bosques de la Unidad Santiago (SIMBUS), el Sistema de Manejo Integral Forestal de Tepehuanes (SMIFT) y el llamado Método Mixto (Hernández, Corral, Quiñones, Bacon, & Vargas, 2008), sin que hasta hoy concluyan qué prácticas silvícolas han sido las más apropiadas para lograr la sustentabilidad en el manejo forestal con fines maderables y producción de otros bienes y servicios ecosistémicos.

Los programas de manejo forestal implementados en los bosques templados del estado de Guerrero se han elaborado e implementado bajo los supuestos y principios del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI).

En la microcuenca en estudio, no existe antecedente de aprovechamientos comerciales de productos forestales maderables y/o no maderables en el bosque templado, salvo que, por las observaciones de campo, se aprecian vestigios de aprovechamiento

comercial de resina, sin registro preciso de fechas, áreas y/o volúmenes aprovechados, a decir por los comuneros de Dos Caminos y Anexos, este aprovechamiento se realizó entre los años 60 y 70 del siglo XX.

III. JUSTIFICACIÓN

Ante los escenarios de cambio climático global, y particularmente en México, el conocimiento inicial del grado de alteración eco-hidrológica de los cauces de agua y de los recursos forestales, es indispensable diagnosticar y proponer estrategias de manejo silvícola para la captura de carbono de la microcuenca hidrológica río Hueyapa como unidad natural de producción, a fin de focalizar acciones y esfuerzos encaminados a la conservación y restauración de sus recursos forestales, en beneficio de sus pobladores.

La captura de carbono atmosférico mediante prácticas de manejo forestal sustentable, está en función de la acumulación y almacenamiento del mismo en la biomasa vegetal (aérea y subterránea). Cualquier actividad silvícola bien realizada, tendrá un efecto positivo sobre la capacidad de un área dada para almacenar y capturar carbono, que podría ser considerada potencialmente como una opción para reducir CO₂ de la atmósfera (Pimienta, et al., 2007).

Los bosques del mundo no tienen la capacidad de almacenar todo el carbono que se emite, pero sí tienen el potencial de retenerlo durante décadas. Los suelos forestales contienen cuatro veces más carbono que la vegetación (Valera, 2016); sin embargo, la sobre explotación causa una rápida degradación de la materia orgánica, por lo que también es una fuente principal de emisiones de GEI. Por lo anterior, es preponderante conservar e incrementar la cubierta forestal que lo protege y es parte de su formación, de tal forma que, la implementación de buenas prácticas silvícolas propicie el manejo sustentable de los bosques para garantizar el incremento de la capacidad de almacenamiento de carbono en estos ecosistemas.

La degradación de los suelos se acentúa en presencia de riesgos ambientales, que se consideran producto de la conjunción de un fenómeno natural extremo y acciones antrópicas, relacionados dentro de un espacio y tiempo determinado. Las intensas precipitaciones, alta densidad de drenaje y altas pendientes, en áreas con condiciones de descomposición de rocas originales del sustrato geológico, pueden originar desprendimientos por procesos de erosión superficial o por movimientos de masa. Dichos procesos pueden acelerarse por deforestación de las áreas boscosas, por falta

de implementación de medidas de conservación de suelos y por eventos extremos, tales como lluvias intensas.

Por ello, la disminución de la vegetación en general y ribereña en particular, pone en riesgo la estabilización de los taludes del cauce de agua, que, ante la intensidad de los fenómenos meteorológicos recientes, se han presentado deslaves e incluso inundaciones en al menos una colonia de Tierra Colorada, Juan R. Escudero, Guerrero, establecida al margen del río, lo que justifica la caracterización morfométrica de la microcuenca del río Hueyapa y el cambio de uso de suelo.

Diagnosticar el potencial de captura y tasa de captura de carbono, y proponer buenas prácticas silvícolas para la vegetación forestal de la parte alta y media de la microcuenca del río Hueyapa, es de vital importancia para su conservación e incremento. De esta forma se puede incidir positivamente en la infiltración del agua de lluvia, puesto que el recurso hídrico captado en esta zona del estado de Guerrero, es utilizado para consumo humano y desarrollo de las actividades agropecuarias de las poblaciones de Julián Blanco, Carrizal de la Vía y La Haciendita, pertenecientes al municipio de Chilpancingo de los Bravo; Garrapatas, Potrero Oriental y Tierra Colorada del municipio de Juan R. Escudero, Guerrero, que en su conjunto suman más de 17,000 personas. Además, el río Hueyapa es un afluente de la cuenca río Papagayo que abastece de agua a la ciudad y puerto de Acapulco de Juárez, Guerrero, México.

En el inventario de GEI en el estado de Guerrero, elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Guerrero y la Universidad Autónoma de Guerrero (SEMAREN-UAGro, 2012), en el periodo de 2005 al 2010, calcularon un balance negativo en cuanto a la captura de carbono por los bosques, con un promedio anual estimado de 7,313.85 Gg CO₂. Los autores argumentaron que, para desarrollar los cálculos tomaron datos "*por defecto*", puesto que la información no fue suficiente e incluso inexistente para el estado. Por esta razón, sugieren fomentar estudios de investigación en materia forestal y uso de suelo, preferentemente a escalas regional o local, para asegurar una mayor certidumbre de las estimaciones.

Considerando lo anterior, es claro que un adecuado manejo forestal es crucial para mitigar los efectos del cambio climático. El análisis multitemporal de los recursos forestales proporcionó un diagnóstico sobre la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa. Al mismo tiempo, la parametrización de las variables dasométricas producto del inventario forestal y la aplicación de las ecuaciones alométricas ajustadas para este bosque en particular, permitieron estimar el reservorio y potencial de captura de carbono en vegetación forestal de pino-encino de la microcuenca.

Al mismo tiempo, los resultados del proyecto sientan la línea base sobre información crucial para hacer la propuesta de plan de manejo silvícola que potencialice la captura de carbono en este ecosistema; a la vez que se logran beneficios ecológicos para toda la población y económicos para el núcleo agrario Dos Caminos y Anexos, poseedores de este recurso forestal, por su posible ingreso al Pago por Servicios Ambientales (PSA) en la modalidad de captura de carbono, diversificando así su actividad productiva.

IV. INTERROGANTES CIENTÍFICAS

Los resultados del presente estudio dan respuesta a interrogantes sobre la situación física, uso de suelo y vegetación, reservorio y potencial de captura de carbono que guarda el bosque templado de la microcuenca hidrográfica del río Hueyapa del estado de Guerrero, México:

¿Qué características morfométricas tiene la microcuenca del río Hueyapa?

¿Cuál ha sido la dinámica del cambio de uso de suelo y vegetación del 2000 al 2017?

¿Qué tipos de vegetación forestal y otros usos de suelo existen actualmente en la microcuenca?

¿Cuál es la superficie, qué características dasométricas y ecológicas existen en el área cubierta por el bosque templado de la microcuenca?

¿Cuál es el reservorio y potencial de captura de carbono en el bosque templado de la microcuenca, que repercutan en un beneficio económico para los núcleos agrarios poseedores del recurso forestal?

¿Cuál es la PPNa de la vegetación del bosque templado en la microcuenca?

¿Qué prácticas silvícolas deben implementarse para potencializar la tasa de captura de carbono en el bosque templado de la microcuenca?

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Proponer un plan de manejo silvícola que potencialice la captura de carbono en la biomasa del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, como una alternativa para fortalecer la sostenibilidad ambiental, social y económica del recurso forestal actual y los servicios ecosistémicos a futuro.

5.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar morfométricamente (físico-geográfico) la microcuenca del río Hueyapa.
2. Realizar un análisis multitemporal (2000 – 2017) de la dinámica de cambio en el uso actual del suelo y vegetación en la microcuenca del río Hueyapa.
3. Ajustar ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa aérea y volumen en *Pinus oocarpa*, *Quercus resinosa* y *Quercus spp.*, distribuidos naturalmente en la microcuenca del río Hueyapa
4. Diseñar y realizar el inventario de la vegetación de clima templado de la microcuenca del río Hueyapa.
5. Estimar el reservorio y tasa de captura de carbono en el bosque templado sin manejo en la microcuenca del río Hueyapa.
6. Elaborar un plan de manejo silvícola para potencializar la tasa de captura de carbono en la vegetación del bosque templado de la microcuenca.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

El área de estudio correspondió al bosque templado (pino-encino) de la microcuenca del río Hueyapa, situada entre las coordenadas geográficas 17° 10' 33" y 17° 17' 44" de latitud norte, 99° 26' 27" y 99° 31' 12" de longitud oeste. Pertenece a la subcuenca río Omitlán, cuenca río Papagayo, de la Región Hidrológica No. 20 Costa Chica de Guerrero (CONAGUA, 2008) (Figura 1). Está circunscrita en los municipios de Juan R. Escudero y Chilpancingo de los Bravo en el estado de Guerrero, con una población total que asciende a 17,463 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010).

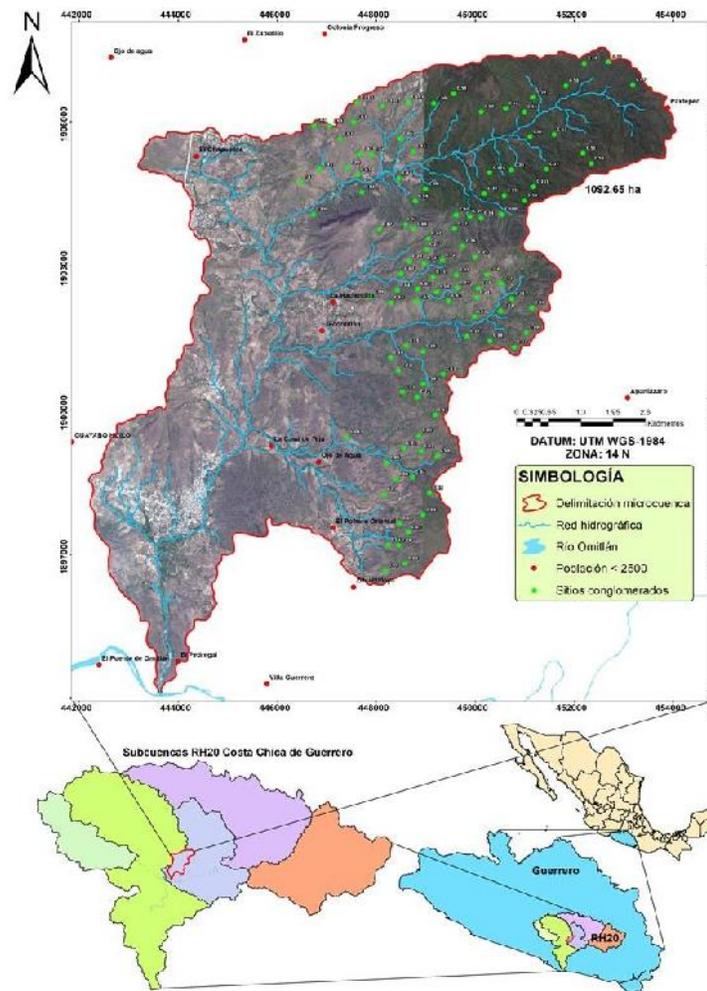


Figura 1. Área de estudio.

Se encuentra circunscrita en los municipios de Juan R. Escudero y Chilpancingo de los Bravo en el estado de Guerrero, con una población total que asciende a 17,463 habitantes de once comunidades, destacando Tierra Colorada con 11, 540, seguida de Julián Blanco (Dos Caminos) y Mohoneras con 1,955 y 1,777, respectivamente.

Se distribuye principalmente en terrenos con abundancia de rocas sedimentarias (caliza) y rocas ígneas intrusivas (granito) formadas en el cretácico inferior. El área de estudio se ubica en la Subprovincia fisiográfica Costas del Sur, la parte norte de la microcuenca perteneciente al municipio de Chilpancingo de los Bravo, está comprendida dentro de la formación Balsas, Agua de Obispo y Alquitrán, constituidas principalmente por rocas volcanoclásticas, derrames piroclásticos y toba volcánica, con conglomerados calizos sedimentados de color rojo (Verduzco y Rodríguez, 1995).

6.2. Metodología

6.2.1. Caracterización morfométrica y cambio de uso de suelo y vegetación

La delimitación de la microcuenca se realizó mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) incorporando información cartográfica y el Modelo Digital de Elevación (MDE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015). El MDE se generó utilizando las curvas de nivel de las cartas topográficas E14C38 y E14C48, ambas a escala 1:50000, manejadas con la herramienta 3D Analyst tool en el software ArcGis 10.3. El mapa de pendientes se generó a partir del MDE y su clasificación se realizó con base en la propuesta de Hernández (1998).

La red hidrológica y los órdenes de las corrientes de agua se realizó con datos de la Red Hidrológica de Cuencas RH20E (cuenca río Papagayo) y RH20Eb (subcuenca río Omitlán), edición 2.0, escala 1:50000 (INEGI, 2010), manipulados con la herramienta Hydrology del módulo Spatial Analyst Tools del software ArcGis 10.3, utilizando la aplicación ArcGIS Pro versión 1.3. El orden de las corrientes fue clasificado mediante la técnica de Strahler (1957).

El cálculo y análisis de los parámetros e índices morfométricos de la microcuenca se sustentó en la metodología de autores como: Aher y Sharma (2014); Cruz, Gaspari,

Rodríguez, Carrillo, y Tellez (2015); Elewa, Ramadan, y Nosair (2016); Fuentes (2004); Kottagoda y Abeysingha (2017); Mahajan y Sivakumar (2018) y Patel, Gajjar, y Srivastava (2013), cuyas formulas y resultados se muestran en el Cuadro 7.

La principal fuente de datos para el análisis del cambio de uso de suelo y vegetación consistió en la generación de un mosaico de imágenes Landsat 7 ETM+ para los años de 2000 – 2010 y Landsat 8 OLI-TIRS para el año 2015, obtenidas por descarga online desde el servidor de Global Visualization Viewer (United States Geological Survey [U.S.G.S.], 2013), a las que se les aplicó corrección atmosférica, radiométrica y geométrica.

El análisis de cambio de uso de suelo y vegetación del año 2017, se realizó mediante imágenes WorldView-2 Bundle y fotografías aéreas obtenidas con el Dron DJI Phantom 4 PRO, que permitió una localización precisa de las clases actuales de uso del terreno. Las imágenes Landsat abarcaron toda el área de estudio, y con ellas se llevó a cabo el procesamiento de los datos matriciales, a partir del cálculo del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés) propuesto por Rouse, Haas, Schell y Deering (1973), utilizando las bandas del infrarojo cercano (NIR) y rojo (RED) del espectro electromagnético.

Previo conocimiento del terreno, se definieron las clases de uso de suelo y, se optó por el método de clasificación paramétrica supervisada, que utiliza el algoritmo de máxima verosimilitud (Chuvienco, 2008). Se eligió un grupo de píxeles homogéneos (4 o mayor) definidos como áreas de entrenamiento, que representan cada clase comparado con los puntos localizados y georreferenciados en campo.

Además, se definieron por digitalización sobre composiciones RGB (Red, Green, Blue), obtenidas por combinación de bandas (5+4+2, 4+5+3, 7+2+1 y 4+5+7) cinco clases de cobertura: vegetación, cultivos, zona urbana, sin vegetación y agua, para obtener las firmas espectrales respectivas, delimitadas automáticamente en imágenes raster. El proceso de las imágenes de satélite se realizó con el software ENVI 5.3.

La evaluación del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo fue a través de un enfoque de comparación post-clasificadorio, el cual, con la matriz de transición (Cuadro

1), explica los cambios ocurridos en el uso de suelo. Las filas y columnas representan los valores ponderados para cada cobertura que se han producido por cambios de uso del suelo, así como las áreas que han permanecido intactas hasta el 2017.

Cuadro 1. Matriz de transición de las clases de cobertura de los años 2000-2017.

		Clases de uso en 2017					
		Vegetación	Cultivo	Urbano	Erosión	Agua	
Clases de uso 2000		10	20	30	40	50	
	Vegetación	1	11	21	31	41	51
	Cultivo	2	12	22	32	42	52
	Urbano	3	13	23	33	43	53
	Erosión	4	14	24	34	44	54
	Agua	5	15	25	35	45	55

6.2.2. Ecuaciones de biomasa y volumen para *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

La muestra representativa de árboles para el ajuste de las ecuaciones alométricas fue de 33 árboles de *P. oocarpa* con diámetros entre 10 y 80 cm; 32 árboles de *Quercus spp.* (*Q. resinosa*, 19; *Q. crispifolia*, 5; *Q. elliptica*, 4; *Q. subspathulata*, 4), con diámetro normal entre 10 y 60 cm. Para los 19 árboles de *Q. resinosa*, con diámetros entre 15 y 60 cm, se ajustó una ecuación de biomasa específica, todos los árboles se obtuvieron del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

El 52% de los árboles de *P. oocarpa*, 53% de *Quercus spp.* y *Q. resinosa*, en la muestra, fueron derribados por vientos fuertes al inicio del periodo de lluvias de 2017 (Cuadro 2). Éstos eran los de mayor dimensión, poseían follaje maduro e íntegro, sanos y sin deformaciones, con la estructura físico-mecánica sin deterioro aparente. El resto, con características apropiadas se derribaron expofeso y todos los productos maderables generados fueron aprovechados por personas de la comunidad agraria Dos Caminos y Anexos.

Cuadro 2. Distribución de la muestra y proporción de árboles derribados por vientos.

	n	Categoría diamétrica (cm)														
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
<i>P. oocarpa</i>	33	1	1	1	2	2	4	4	2	4	2	3	2	2	1	2
DV (<i>P. oocarpa</i>)	17						1	1	1	4	2	2	1	2	1	2
<i>Quercus spp.</i>	32	1	2	1	3	4	8	3	2	2	3	3				
DV (<i>Quercus spp.</i>)	17	1				1	5	3	1	2	3	1				
<i>Q. resinosa</i>	19		2	1	3	1	5	2	1	1	1	2				
DV (<i>Q. resinosa</i>)	10						4	2	1	1	1	1				

DV: derribados por el viento, n: tamaño de muestra

A cada árbol en la muestra se le midió el diámetro normal (D) y altura total (H). En campo se realizó la separación y pesaje de los componentes arbóreos (fuste, ramas y follaje). El peso verde de cada componente se realizó con una báscula colgante marca Torrey, modelo CRS-500 con capacidad máxima de 500 kg y precisión de 0.1 kg. De cada componente del árbol se recolectó y pesó entre 6 y 14 muestras verdes (según tamaño del árbol) que fueron trasladadas al laboratorio de Biomonitorio y Control Biológico del Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, para el secado en estufa a 70°C hasta obtener peso constante (Soriano-Luna et al., 2015). El peso seco (biomasa) de cada muestra se obtuvo mediante la báscula Noval modelo NBE-KF con capacidad de 5000 gramos y precisión de 0.1 g.

El peso seco por componente arbóreo se midió utilizando la metodología establecida por Medrano-Meraz, López-López, De Jong, Ángeles-Pérez, y Cruz-Cobos (2017) (Ecuación 1). La biomasa aérea total (B), fue la suma de la biomasa de todos los componentes arbóreos aéreos. El compartimento fuste para *P. oocarpa* se midió desde la base del árbol hasta el ápice del mismo; para *Quercus spp.* y *Q. resinosa.*, el fuste se identificó siguiendo la rama principal de mayor grosor hasta su ápice.

$$PSCPMTO = \frac{PVCPMTO*(100-CHPROM)}{100} \text{-----(1)}$$

Donde: PSCPMTO es el peso seco por compartimento (kg), PVCPMTO es el peso verde del compartimento (kg) y CHPROM es el contenido de humedad promedio de la muestra (%), la suma del peso seco de cada componente representa el peso seco total o biomasa aérea total.

El ajuste de los modelos de regresión se realizó con el paquete estadístico R (R Core Team, 2016). La variable respuesta fue la biomasa aérea total (B_i) en kg; usando como variables independientes a D o la variable combinada (D^2H). Los modelos de regresión lineal que se ajustaron están expresados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Modelos de regresión lineal para estimar la biomasa aérea de *P. oocarpa*, *Quercus spp.* y *Q. resinosa*.

$$[1] \quad \ln B_i = \beta_0 + \beta_1 \ln D_i + \varepsilon_i$$

$$[2] \quad \ln B_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(D_i^2 * H_i) + \varepsilon_i$$

$$[3] \quad B_i' = \beta_0 + \beta_1 D_i' + \varepsilon_i$$

$$[4] \quad B_i' = \beta_0 + \beta_1 (D_i^2 * H_i)' + \varepsilon_i$$

$$[5] \quad B_i^* = \beta_0 + \beta_1 D_i + \beta_2 H_i + \beta_3 D_i H_i + \beta_4 D_i^2 + \beta_5 H_i^2 + \beta_6 D_i^2 H_i^2 + \varepsilon_i$$

Donde: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$ parámetros del modelo y ε_i error aleatorio. Además $B_i', D_i', H_i', (D_i^2 H_i)'$ son las funciones de la biomasa aérea total, diámetro normal, altura total y variable combinada, determinadas con la transformación Box-Cox de forma conjunta B con D y B con D^2H ; B_i^* : es la función de la biomasa aérea total determinada con la transformación Box-Cox solo para B, \ln : logaritmo natural.

El modelo supone $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$; $i = 1, \dots, n$, es decir, que los errores tienen distribución normal, son independientes y tienen varianza constante. El ajuste del modelo de regresión se realizó con el paquete estadístico R (R Core Team, 2016).

Las transformaciones de las variables B, D , y D^2H usadas en los Modelos [3, 4 y 5] se identificaron con la transformación Box-Cox (Ecuación 2). Las transformaciones son necesarias cuando no se cumple alguno de los supuestos del modelo de regresión (normalidad o de varianza constante de los residuos).

$$y^\lambda = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{si } \lambda \neq 0 \\ \log(\lambda), & \text{si } \lambda = 0 \end{cases} \text{-----}(2)$$

El parámetro λ es el valor que maximiza la verosimilitud de los modelos estimados. La transformación Box-Cox (implementada en la función *powerTransform* del paquete *car* (Fox y Weisberg, 2011), se usó de dos formas: 1) de manera conjunta las variables B_i y D [Modelo 3] y B_i y D^2H [Modelo 4], que una vez transformadas se denotaron por B_i' y D' y B_i' y $(D^2H)'$ respectivamente; 2) sólo la variable dependiente B_i y ésta se denotó por B_i^* [Modelo 5].

El cumplimiento de la distribución normal de los residuos se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk (*shapiro.test*) del paquete *nortest* (Gross y Ligges, 2015) y la homogeneidad de varianza con la prueba de varianza no constante (*ncvTest*) del paquete *car* (Fox y Weisberg, 2011) implementadas en R

Evaluación del modelo

El AIC fue definido por la Ecuación 3.

$$AIC_j = -2\ln[L(\hat{\theta}_j)] + 2p_j \text{-----} (3)$$

Donde: $L(\hat{\theta}_j)$ es la verosimilitud máxima estimada bajo el modelo M_j que tiene un vector de parámetros θ_j de dimensión p_j (Fox, 2016).

La colinealidad fue evaluada con el número de condición escalado de la matriz diseño (Belsley, Kuh, y Welsh, 1980), definido por la Ecuación 4.

$$\eta_x = \sqrt{\lambda^*_1/\lambda^*_{p+1}} \text{-----}(4)$$

Donde: λ^*_1 y λ^*_{p+1} son el máximo y el mínimo de los valores propios de $X^T X$ después de ser escalada. Por su intensidad, la colinealidad se clasifica en nula ($\eta_x < 10$), moderada ($10 \leq \eta_x < 30$) y severa ($\eta_x \geq 30$).

El mejor modelo se identificó como aquel que tiene el menor valor de la raíz de la media de la suma de los cuadrados de los residuos (RMSCR) y la mayor correlación entre los valores de biomasa observada y estimada (r^2), que mide la capacidad predictiva de los modelos ajustados. La RMSCR penaliza la varianza dando más peso a los residuos con mayores valores absolutos, respecto a los residuos con valores

absolutos más pequeños, calculado con la Ecuación 5, citado por Wang et al. (2018) como raíz del cuadrado medio del error.

$$\text{RMSCR} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_i - \hat{B}_i)^2} \text{-----(5)}$$

Donde: n es el número de observaciones de la muestra, B_i es la biomasa aérea total observada y \hat{B}_i es la biomasa aérea total estimada y el residuo es la diferencia, $B_i - \hat{B}_i$. Debido a que se ajustaron modelos tanto con las variables originales como con dos versiones de transformaciones de B_i , para determinar \hat{B}_i se usó la función inversa de la transformación correspondiente para volver a los valores originales.

Modelos para estimación de volumen en *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

En un proceso similar al ajuste del modelo 5 para biomasa aérea, se ajustaron los modelos para estimar el volumen total árbol con corteza (Vta_{cc}) para árboles de *P. oocarpa* y *Quercus spp.* (Cuadro 4). Haciendo variar únicamente a la variable respuesta en el modelo, se hizo lo propio para ajustar un modelo para estimar el volumen con corteza en fuste (Vf_{cc}) y otro para ramas (Vr_{cc}). La transformación Box-Cox se usó en dos formas: 1) se transformó sólo la variable dependiente Vta_{cc} y ésta se denotó por Vta_{cc}' , o 2) se transformaron de manera conjunta las variables Vta_{cc} , D_i , H_i (lineales y cuadráticas y sus interacciones) y estas variables transformadas se representaron por Vta_{cc}' , D_i' , y H_i' .

La elección de las variables independientes, originales o transformadas, en el modelo de regresión lineal que mejor explicaron el volumen total árbol con corteza, se realizó mediante el criterio de información de Akaike (AIC) y/o criterio de información Bayesiana (BIC) implementados con la función *stepAIC* del paquete MASS (Venables & Ripley, 2002).

La evaluación del modelo con mejor ajuste se realizó comparando la RMSCR y R^2_{adj} (Méndez-González et al., 2011) que miden la capacidad predictiva del modelo elegido.

Cuadro 4. Modelos de regresión lineal para estimar el volumen de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

$$[1] \quad Vta_{cc} = \beta_0 + \beta_1 D_i + \beta_2 H_i + \beta_3 D_i H_i + \beta_4 D_i^2 + \beta_5 H_i^2 + \beta_6 D_i^2 H_i^2 + \varepsilon_i$$

$$[2] \quad Vta_{cc}' = \beta_0 + \beta_1 D_i + \beta_2 H_i + \beta_3 D_i H_i + \beta_4 D_i^2 + \beta_5 H_i^2 + \beta_6 D_i^2 H_i^2 + \varepsilon_i$$

$$[3] \quad Vta_{cc}' = \beta_0 + \beta_1 D_i' + \beta_2 H_i' + \beta_3 (D_i H_i)' + \beta_4 (D_i^2)' + \beta_5 (H_i^2)' + \beta_6 (D_i^2 H_i^2)' + \varepsilon_i$$

Donde: Vta_{cc} volumen total árbol con corteza, Vta_{cc}' volumen total árbol con corteza transformado con la función Box-Cox y D_i' , H_i' , $(D_i H_i)'$, $(D_i^2)'$, $(H_i^2)'$, $(D_i^2 H_i^2)'$ variables independientes transformadas con la función Box-Cox.

6.2.3. Estimación del reservorio de carbono y Productividad Primaria Neta aérea (PPNa)

La suma del incremento en biomasa aérea con las masas de hojarasca, ramillas finas y órganos reproductivos en un año, es considerada como la PPNa (Keyes & Greir, 1981; Clark et al., 2001) y en este estudio se determinó con la Ecuación 6.

$$PPNa = \Delta Ba + Pa \quad \text{-----} \quad (6)$$

donde:

$PPNa$ = Productividad primaria neta aérea ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

ΔBa = Incremento anual de biomasa aérea ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

Pa = Pérdida de biomasa aérea debida a caída de hojarasca ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

6.2.4. Inventario de la vegetación arbórea del bosque templado

Se utilizó un diseño de muestreo estratificado aleatorio por conglomerado (Comisión Nacional Forestal – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [CONAFOR-SEMARNAT], 2011). El bosque templado de la microcuenca se dividió en dos estratos 1) bosque de encino y 2) bosque de pino-encino (sin discriminar encino-pino). Cada estrato fue subdividido en rodales (unidad básica de manejo forestal); al interior de cada rodal, se ubicaron aleatoriamente y delimitaron Unidades Primarias de Muestreo (UPM) que contienen cuatro Unidades Secundarias de Muestreo (USM).

La UPM, que corresponde a un conglomerado, es una parcela circular de una hectárea (56.42 metros de radio), en la cual se evaluaron cuatro USM dispuestas

geométricamente en forma de "Y" invertida respecto al Norte (Figura 2 y Cuadro 5). Aunque el marco de muestreo generado por parcelas circulares no cubre toda la superficie que se pretende evaluar, en evaluación forestal esta forma ha sido aceptada, dado que esa insuficiencia no es grave, en cambio el trazo de la parcela tiene ventajas sobre otras formas de sitio (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2003).

La USM 1 constituye el centro de la UPM y las USM 2, 3 y 4 son consideradas periféricas. La separación del centro a cada una de las USM periféricas es de 45.14 m; por otra parte, el azimut para localizar a estas USM periféricas a partir del centro es de 0°, 120° y 240°, respectivamente.

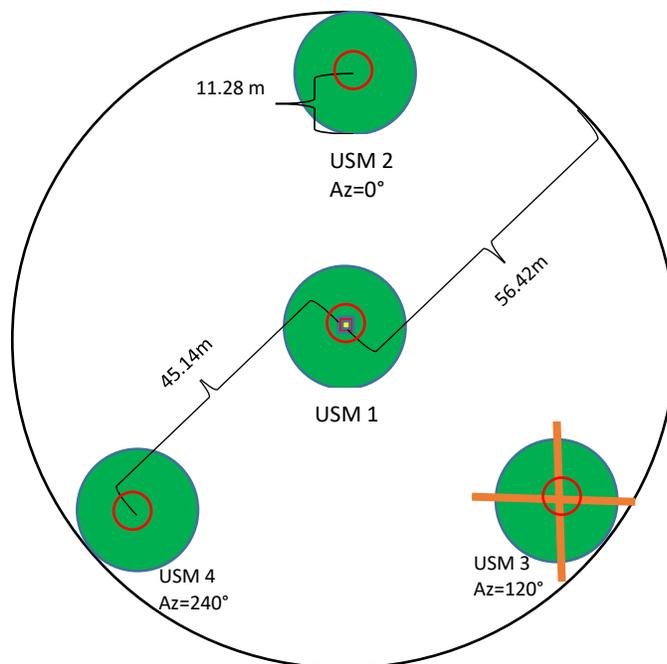
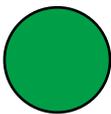


Figura 2. Forma y distribución de las USM para bosques, modificado de CONAFOR-SEMARNAT (2011).

Cuadro 5. Simbología de las USM del inventario de la vegetación de bosques.

USM y sub-sitios	Variables a evaluar en campo
	USM de 400 m ² , para registro de variables dasométricas en árboles con diámetro igual o mayor de 7.5 cm.
	Sub-sitio de 12.56 m ² , para registrar renuevo con diámetro normal menor a 7.5 cm.
	Sub-sitio de 1 m ² (L = 1m), para registro de hierbas, helechos, musgos y líquenes en USM 1
	Sub-sitio de 0.30x0.30x0.30 m muestreo de suelo, raíces finas y gruesas en USM 1
	Transectos de muestreo de 15 m, registro de combustibles forestales en USM 3

En el inventario forestal se recabaron variables cuantitativas (diámetro normal y altura), que permitieron estimar el volumen maderable, área basal, densidad de arbolado, reservorio de biomasa, reservorio y tasa de captura de carbono, edad (coníferas), condición de copa, sotobosque, hojarasca, afectación del arbolado y regeneración. Además, se consideraron variables cualitativas que proporcionan información del sitio de muestreo (USM) como rasgos orográficos, altitud, pendiente, uso de suelo, profundidad del suelo, presencia de erosión, degradación y grado de afectación del mismo.

Tamaño de muestra

La determinación del tamaño de la muestra (Ecuación 7) para el inventario forestal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, se calculó al considerar que la población es estratificada y realizar una asignación proporcional a los estratos (Ecuación 8) propuesta por Scheaffer, Mendenhall, y Ott (1987), con una precisión de 1 Mg ha⁻¹ de biomasa aérea y 95% de confiabilidad.

$$n_h = \frac{\sum_{i=1}^{L'} N_{hh'} \sigma_{hh'}^2}{N_h D + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{L'} N_{hh'} \sigma_{hh'}^2} \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$n_{hh'} = (n_h) \left(\frac{N_{hh'}}{\sum_{i=1}^{L'} N_{hh'}} \right) \quad \text{-----} \quad (8)$$

donde la varianza poblacional $\sigma_{hh'}^2$, se estimó con la varianza muestral $S_{hh'}^2$ con datos de 82 UMP obtenidas en un premuestreo (Ecuación 9).

$$S_{hh'}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} (y_{hh'} - \bar{y}_h n_{hh'})^2}{n_{hh'} - 1} \quad \text{-----} \quad (9)$$

$$y D = \frac{B^2}{4N_{hh'}^2}$$

donde:

n_h = número de Unidades Primarias de Muestreo (UPM) en el estrato (encino-pino, encino)

$n_{hh'}$ = número de UPM en el rodal (por asignación proporcional)

N_h = número de UPM en el estrato (pino-encino, encino)

$N_{hh'}$ = número de UPM en el rodal

$n_{hh'}$ = número de Unidades Secundarias de Muestreo (USM) seleccionadas en el conglomerado (UPM) i , $i=1,2,3, \dots, N$

$y_{hh'}$ = variable de interés (número de árboles, área basal, volumen, biomasa, carbono) de las observaciones en el i -ésimo conglomerado (UPM)

B = error de estimación o precisión (1 Mg ha⁻¹)

D = Límite del error de estimación para estimar un total con un 95% de confianza

6.2.5. Estimación de volumen y biomasa aérea del estrato arbóreo

La estimación de volumen total árbol (V_{ta}) para *P. oocarpa* se realizó mediante la ecuación $\widehat{V_{ta_{cc}}} = e^{-8.62+2.11LN(D)+0.10(H-1)-0.002(H-1)^2}$, mientras que para *Quercus sp.* $\widehat{V_{ta_{cc}}} = e^{-5.23+0.20D+0.05H-0.002D^2}$ ajustadas para la vegetación de la microcuenca. Para las latifoliadas se utilizó la ecuación $\widehat{V_{ta_{cc}}} = 0.06629 + (0.34683 * H * D^2)$ ajustada para el Inventario Estatal Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2014).

La estimación de la biomasa aérea total (\widehat{B}_i) por árbol para *P. oocarpa* se realizó mediante la ecuación $\widehat{B}_i = 0.10012 * D^{2.4589}$, para *Quercus spp.* $\widehat{B}_i =$

$$^{0.212} \sqrt{0.212 * \left[-2.3949 + 0.4905 * \left(\frac{(D_i^2 H_i)^{0.217}}{0.217} - 1 \right) \right] + 1} \quad \text{y} \quad \widehat{B}_i = ^{0.048} \sqrt{0.048 * \left[-5.7263 + 1.2743 * \left(\frac{(D^2 H)^{0.015} - 1}{0.015} \right) \right] + 1}$$

para *Q. resinosa*, modelos ajustados expresado con muestreo destructivo de árboles que se distribuyen naturalmente en terrenos de la microcuenca. La estimación de la biomasa de latifoliadas se realizó mediante la ecuación $Ba\widehat{T}Total = \exp(-3.109407 * (D^2 H)^{0.952688})$ ajustada por Soriano (2014).

La estimación de biomasa y carbono por estrato y total se calculó bajo la metodología propuesta por Velasco, Ramírez, Moreno, & de la Rosa (2003) en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos, basados en Cochran (1993). Los autores sugieren usar estimadores de razón para el total y la media poblacionales con información auxiliar generada por la superficie de estudio.

El estimador general por estrato \widehat{R}_h y su varianza $\widehat{V}(\widehat{R}_h)$, que permite obtener información por hectárea, se calculó mediante las ecuaciones 10 y 12, respectivamente:

$$\widehat{R}_h = \frac{1}{A_h} \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'} * \widehat{R}_{hh'} \quad \text{-----} \quad (10)$$

Donde: $\widehat{R}_{hh'}$ es la estimación promedio por rodal (h') obtenida con la Ecuación 11:

$$\widehat{R}_{hh'} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} y_{hh'i}}{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} a_{hh'i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} \sum_{j=1}^{m_i} y_{hh'ij}}{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} \sum_{j=1}^{m_i} a_{hh'ij}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{t_{hh'ij}} y_{hh'ijk}}{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} \sum_{j=1}^{m_i} a_{hh'ij}} \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$\widehat{V}(\widehat{R}_h) = \frac{1}{A_h^2} \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'}^2 * \widehat{V}(\widehat{R}_{hh'}) \quad \text{-----} \quad (12)$$

$\widehat{V}(\widehat{R}_{hh'})$ se obtiene con la Ecuación 13.

$$\widehat{V}(\widehat{R}_{hh'}) = \frac{(1 - f_{hh'})}{n_{hh'}(n_{hh'} - 1) \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_{hh'}} a_{hh'i}}{n_{hh'}} \right)^2} \left(\sum_{i=1}^{n_{hh'}} y_{hh'i}^2 - 2\widehat{R}_{hh'} \sum_{i=1}^{n_{hh'}} y_{hh'i} a_{hh'i} + \widehat{R}_{hh'}^2 \sum_{i=1}^{n_{hh'}} a_{hh'i}^2 \right) \quad (13)$$

El estimador de razón de la media \hat{R} , proporciona información por hectárea a nivel ecosistema (bosque templado), se estima mediante la Ecuación 14 y su varianza estimada $\hat{V}(\hat{R})$ se obtiene con la Ecuación 15.

$$\hat{R} = \frac{1}{A} \sum_{h=1}^L \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'} * \hat{R}_{hh'} \quad \text{-----} \quad (14)$$

$$\hat{V}(\hat{R}) = \frac{1}{A^2} = \sum_{h=1}^L \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'}^2 * \hat{V}(\hat{R}_{hh'}) \quad \text{-----} \quad (15)$$

La estimación total a nivel de estrato \hat{Y}_h ($h=1$ pino-encino y $h=2$ para encino) se determina con la Ecuación 16 y su varianza $\hat{V}(\hat{Y}_h)$ con la Ecuación 17.

$$\hat{Y}_h = \sum_{h'}^{L'} A_{hh'} * \hat{R}_{hh'} \quad \text{-----} \quad (16)$$

$$\hat{V}(\hat{Y}_h) = \sum_{h'}^{L'} A_{hh'}^2 * \hat{V}(\hat{R}_{hh'}) \quad \text{-----} \quad (17)$$

La estimación global total del ecosistema bosque templado de la microcuenca \hat{Y} se calcula mediante la Ecuación 18 y su varianza estimada $\hat{V}(\hat{Y})$ con la Ecuación 19.

$$\hat{Y} = \sum_{h=1}^L \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'} * \hat{R}_{hh'} \quad \text{-----} \quad (18)$$

$$\hat{V}(\hat{Y}) = \sum_{h=1}^L \sum_{h'=1}^{L'} A_{hh'}^2 * \hat{V}(\hat{R}_{hh'}) \quad \text{-----} \quad (19)$$

Notación general:

A = Área forestal (ha) del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa

A_h = Área forestal (ha) del estrato h (pino-encino, encino) del bosque templado de la microcuenca.

$A_{hh'}$ = Área forestal (ha) del rodal h' del estrato h del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

L = Número de estratos (2)

L' = Número de rodales (16 pino-encino, 17 encino)

$a_{hh'i}$ = Área forestal (ha) muestreada de la UPM_{*i*} del rodal h' del estrato h , la cual se obtiene al sumar las áreas de las USM evaluadas en esa UPM

m_i = Es el número de USM evaluadas en la UPM_{*i*}, en este caso 4

Y = Variable de interés en el bosque templado de la microcuenca (número de árboles, diámetro normal, área basal, volumen, biomasa, carbono)

$y_{hh'i}$ = Valor de la variable de interés de la UPM_{*i*} del rodal h' del estrato h

$n_{hh'}$ = Número de UPM evaluadas en el rodal h' del estrato h

$N_{hh'}$ = Número de UPM de 0.16 ha potenciales en el rodal h' del estrato h

$f_{hh'}$ = Fracción de muestreo en el rodal h' del estrato h

La cuantificación de la incertidumbre de la estimación del reservorio y tasa de captura de biomasa y carbono, así como el resto de las variables de interés, se realizó mediante el error estándar del estimador ($2 \times$ raíz cuadrada de la varianza estimada del estimador) con un nivel de confianza del 95%.

6.2.6. Estimación de la necromasa de árboles muertos en pie y material leñoso caído

En el inventario forestal, se midieron las variables dasométricas del arbolado muerto en pie. La estimación de su volumen, biomasa y carbono, se realizó mediante las fórmulas descritas con anterioridad para arbolado vivo.

En la tercera USM se realizó la medición del material leñoso caído (MLC), trazando una línea de 15 m hacia los cuatro puntos cardinales. Los troncos, ramas y ramillas que cruzaban la línea del transecto de muestreo, se les midió longitud, diámetro, frecuencia y grado de deterioro (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014).

También se realizó una colecta de ejemplares con distintos grados de deterioro de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*, para determinar su densidad específica en el laboratorio de

tecnología de la madera de la División de Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.

Para calcular la carga de biomasa del material leñoso caído (MLC) por cada clase de deterioro y grupo de especies, se utilizó la Ecuación 20 para piezas con diámetro mayor a 7.6 cm y la Ecuación 21 para diámetros menores a 7.6 cm (Van Wagner, 1982).

$$C = \frac{k * GE * (\sum DC * c)}{L} \text{-----} (20)$$

$$C = \frac{k * GE * DCP * f * c}{L} \text{-----}(21)$$

donde:

C = carga de combustible (Mg ha⁻¹)

k = constante equivalente a 1.234, derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para convertir la carga a Mg ha⁻¹

GE = gravedad específica o densidad específica de la madera por grado de deterioro (gr cm⁻³)

DC = diámetro intersectado al cuadrado (cm²)

DCP = diámetro interceptado al cuadrado promedio (cm²)

f = frecuencia de MLC interceptado

c = factor de corrección de la pendiente para cada línea del intersecto de muestreo, calculada con la Ecuación 22.

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\% \text{ pendiente}}{100}\right)^2} \text{-----}(22)$$

La conversión de biomasa a carbono se realizó con los valores del porcentaje de carbono medidos en el laboratorio para la madera de *P. oocarpa* (52%) y *Quercus sp.* (49%) recolectados en los estratos correspondientes al bosque templado de la microcuenca, considerando que no dista de lo reportado por Jain, Graham y Adams (2010) de 49.8% en la madera tirada sobre el suelo en los bosques mixtos de *Pinus ponderosa* C. Larson y *Quercus gambelli* Nutt.

6.2.7. Estimación de la biomasa y carbono en la hojarasca y sotobosque

En el centro de la USM 1, se recolectó un metro cuadrado de hierba, lianas, arbustos y pastos (sotobosque). En este mismo espacio, se recolectó, pesó y midió el grosor de hojarasca. Cada colecta se pesó en fresco, se etiquetó y transportó al laboratorio; su biomasa se determinó después de secar a 60°C hasta lograr peso constante (Galicia, Saynes & Campo, 2015), sin discriminar el tipo de material vegetal, en el laboratorio del Centro de Ciencias de Desarrollo Regional (CCDR) de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro).

El factor de conversión de biomasa a carbono orgánico para hojarasca fue del 32.7% y 44.0% para sotobosque, datos promedio obtenidos por Jain et al. (2010) para estos reservorios en el bosque de *P. ponderosa* y *Q. gambelli*, al norte de Arizona, EEUU.

Estas concentraciones son conservadoras, si se considera que Figueroa-Navarro, Etchevers-Barra, Velázquez-Martínez y Acosta-Mireles (2005) reportan una concentración de 47.0% de carbono en arbustos más hierbas más hojarasca, colectados en la Sierra Norte de Oaxaca, México.

6.2.8. Estimación de la biomasa del sistema radicular

Para estimar la biomasa radicular, se realizó la excavación de un cubo de 0.30x0.30x0.30 m de largo, ancho y profundidad. De este cubo, se extrajo todo el sistema radicular encontrado, separando las raíces finas (<5 mm de diámetro) y raíces gruesas (>5 mm de diámetro), sin discriminar entre vivas y muertas como lo establecen Pérez, Frangi, Goya, Luy, y Arturi (2013).

Las muestras etiquetadas se trasladaron al laboratorio para su secado a 70°C, hasta alcanzar peso seco constante. Con estos valores se estimó la biomasa del sistema radicular del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

La conversión de biomasa a carbono se realizó con base al reporte de Jain et al. (2010) de 48.6% para raíces gruesas y 46.2% para raíces finas, utilizados para estos reservorios en el bosque de *P. ponderosa* y *Q. gambelli* del norte de Arizona, EEUU.

6.2.9. Estimación del carbono orgánico y fertilidad del suelo forestal

El porcentaje de Carbono Orgánico del Suelo (COS) se determinó por el método de Walkley-Black (Allison, 1965; McLeod, 1973) en el laboratorio de nutrición vegetal "Dr. Salvador Alcalde Blanco" del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en muestras compuestas por rodal.

El carbono orgánico del suelo (COS) se estimó bajo la metodología de Paz, Argumedo, Cruz, Etchevers y de Jong (2016) aplicando la Ecuación 23 y la densidad aparente (Da) se estimó mediante el método del cilindro conocido a 30 cm de profundidad aplicando la Ecuación 24 (Andrade & Ibrahim, 2003).

$$COS = (Da)(P) \left(1 - \frac{FG}{100}\right) (COSp)(100) \quad \text{-----} \quad (23)$$

$$Da = \left(\frac{Pss}{Vc}\right) \quad \text{-----} \quad (24)$$

donde *P*: profundidad de muestreo (m), *FG*: porcentaje de fragmentos gruesos (>2 mm), *COSp*: porcentaje de carbono en suelo determinado en el laboratorio y 100 factor de conversión de unidades. *Pss*: peso seco del suelo, *Vc*: volumen del cilindro (cm³).

Así mismo, se determinó el pH, % de Materia Orgánica (Kalra & Maynard, 1991; Walkley & Black, 1934), incluyendo elementos de fertilidad como CIC, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B (Beger & Truog, 1944; Diario Oficial de la Federación [D. O. F.], 2002; González, Almendros, & Álvarez, 2009), integrando muestras compuestas de suelo por rasgos fisiográficos y topográficos de las principales exposiciones de la microcuenca.

6.2.10. Estimación del carbono orgánico en madera de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

En el laboratorio de fertilidad de suelos y química ambiental del COLPOS Campus Montecillo, se procesaron muestras de madera de *P. oocarpa* y cinco especies de *Quercus spp.* para determinar el porcentaje de Carbono Orgánico mediante el método de digestión seca a 900°C en el autodeterminador automático de Carbono, TOC SSM modelo 5050A marca Shimadzu (Monreal et al., 2005).

6.2.11. Medición y estimación de la caída de hojarasca en los estratos Pino-encino (P-Q) y encino (Q)

Considerando que la PPNa es la suma del incremento anual de biomasa aérea, más la pérdida de biomasa aérea debidas a la producción de hojarasca y consumo de herbivoría (Clark et al., 2001); para estimar ésta última parte de la ecuación se colocaron seis trampas (un metro cuadrado cada una) en un rodal de pino-encino y seis en un rodal contiguo de encino, construidas con madera y malla, en donde se recolectó el material caído (hojas, frutos, flores, ramillas, corteza) mensualmente durante un año (febrero de 2017 a enero de 2018).

6.2.12. Estimación de incrementos del compartimento aéreo del estrato arbóreo

El incremento corriente anual (ICA) en área basal, volumen, biomasa y carbono aéreo, se estimó por sitio de muestreo, por estrato y ecosistema. Para ello se realizaron dos mediciones sucesivas con periodo de un año (2017-2018) en 71 UPM de las 105 levantadas en el inventario forestal original, los cálculos y estimaciones se realizaron utilizando la metodología del inventario nacional forestal y de suelos Velasco, Ramírez, Moreno, y de la Rosa (2003).

Para conocer el ICA por categoría diamétrica de la vegetación arbórea del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, utilizando el paquete estadístico R (R Core Team. (2016), se llevó a cabo el análisis mediante el método estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952), puesto que no se cumplieron los supuestos de distribución normal ni la homogeneidad de varianza de los residuales.

La prueba de Kruskal-Wallis es una función de los rangos de las observaciones en la muestra combinada. Los datos consistieron de k muestras aleatorias de diferente tamaño y el modelo básico se expresa con la Ecuación 25:

$$X_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \text{ ----- (25)}$$

donde:

X_{ij} = variable dasométrica de interés (área basal, volumen, biomasa, carbono)

μ = media poblacional de la variable de interés

τ_i = efecto de la *i*-ésima categoría diamétrica

ε_{ij} = error aleatorio

Si $R(X_{ij})$ es el rango asignado a X_{ij} y R_i es la suma de los rangos asignados a la *i*-ésima muestra aleatoria, entonces R_i se calcula con la Ecuación 26.

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_i} R(X_{ij}) \quad \text{-----} \quad (26)$$

el estadístico de prueba se define por la ecuación 27:

$$T_o = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad \text{-----} \quad (27)$$

k = número de muestras aleatorias

n_i = número de observaciones en la *i*-ésima muestra

$N = \sum_{i=1}^k n_i$, número de observaciones de todas las muestras combinadas

R_i = la suma de los rangos en la *i*-ésima muestra

El juego de hipótesis es:

H_0 : el incremento de las categorías diamétricas son iguales

H_1 : al menos un par de categorías diamétricas tiene incremento diferente

La regla de decisión es: Rechazar H_0 a un nivel de significancia α (95%) si:

$$T_o \geq \chi_{\alpha, (k-1)}^2$$

6.2.13. Silvicultura para potencializar la captura de carbono

Los tratamientos silvícolas se proponen aplicar al manejo forestal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México, área geográfica descrita en los capítulos que anteceden a este apartado.

El planteamiento de la aplicación de dichos tratamientos se justifica con base en las condiciones de desarrollo de la masa forestal, características del sotobosque, densidad de la necromasa sobre el piso forestal de cada rodal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa. Además, se considera la información bibliográfica

disponible que expresa los beneficios al bosque por la aplicación de los tratamientos silvícolas y complementarios en ecosistemas similares.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización morfométrica de la microcuenca

7.1.1. Área y pendiente

El área total de la microcuenca del río Hueyapa fue de 74.88 km², perímetro de 52.96 km, presentó una longitud y ancho máximo de 16.22 y 7.89 km, respectivamente, por sus dimensiones es considerada como una microcuenca pequeña (Campos, 1998).

Su altitud varía entre 113 a 1618 msnm, con pendiente promedio de 31.69%. De las 7,488.55 ha, solo el 23% corresponde a terrenos de planos a moderadamente ondulados con uso urbano y cultivos, mientras que el 77% son terrenos ondulados a fuertemente escarpados destinados al uso forestal y agostadero (Figura 3).

7.1.2. Parámetros de drenaje

La corriente principal de la microcuenca desemboca su caudal en el afluente de la subcuenca río Omitlán (RH20Eb) que recorre 21.84 km y representa la longitud del eje del cauce principal, clasificada como un cauce largo (Fuentes, 2004). La longitud directa desde su desembocadura hasta el punto de inicio del cauce principal fue de 14.97 km con pendiente promedio de 5.44%, presentó una cota inicial de 113 y final de 1301 msnm. La pendiente promedio de la red hídrica general fue de 12.81% clasificada como accidentada (Saavedra, 2001). El coeficiente de sinuosidad hidráulica (1.46) es característico de un canal transicional (Shumm, 1963).

Las corrientes de agua presentaron drenaje dendrítico (Federal Interagency Stream Restoration Working Group [FISRWG], 1998), de orden 5 considerado por Fuentes (2004) como alto (Figura 4). Un mayor orden de corrientes de agua, está relacionado en conjunto, con la presencia de controles estructurales del relieve y mayor posibilidad de erosión (Cruz et al., 2015), como se observó con los deslizamientos de tierra en la parte con mayor pendiente y suelos someros de la microcuenca, causados por la tormenta tropical Manuel en el 2013, atenuado por una buena cobertura vegetal en la cabecera de la microcuenca.

Se contabilizaron 165 cauces de primer orden y 72 de segundo orden, distribuidos en su mayoría a una altitud superior a 640 msnm, a menor altitud se distribuyen las

corrientes de mayor orden, con un descenso en el número y longitud de corrientes (Malik & Shukla, 2018). La relación de bifurcación ponderada alta (3.06) (Cuadro 6), indica una configuración geológica homogénea y que el patrón de drenaje no ha sido afectado por alteraciones estructurales (Gebre, Kibru, Tesfaye & Taye, 2015), además el agua se extiende en todos los órdenes de los arroyos, permitiendo mayor oportunidad de cosecha hídrica (Elewa, Ramadan & Nosair, 2016).

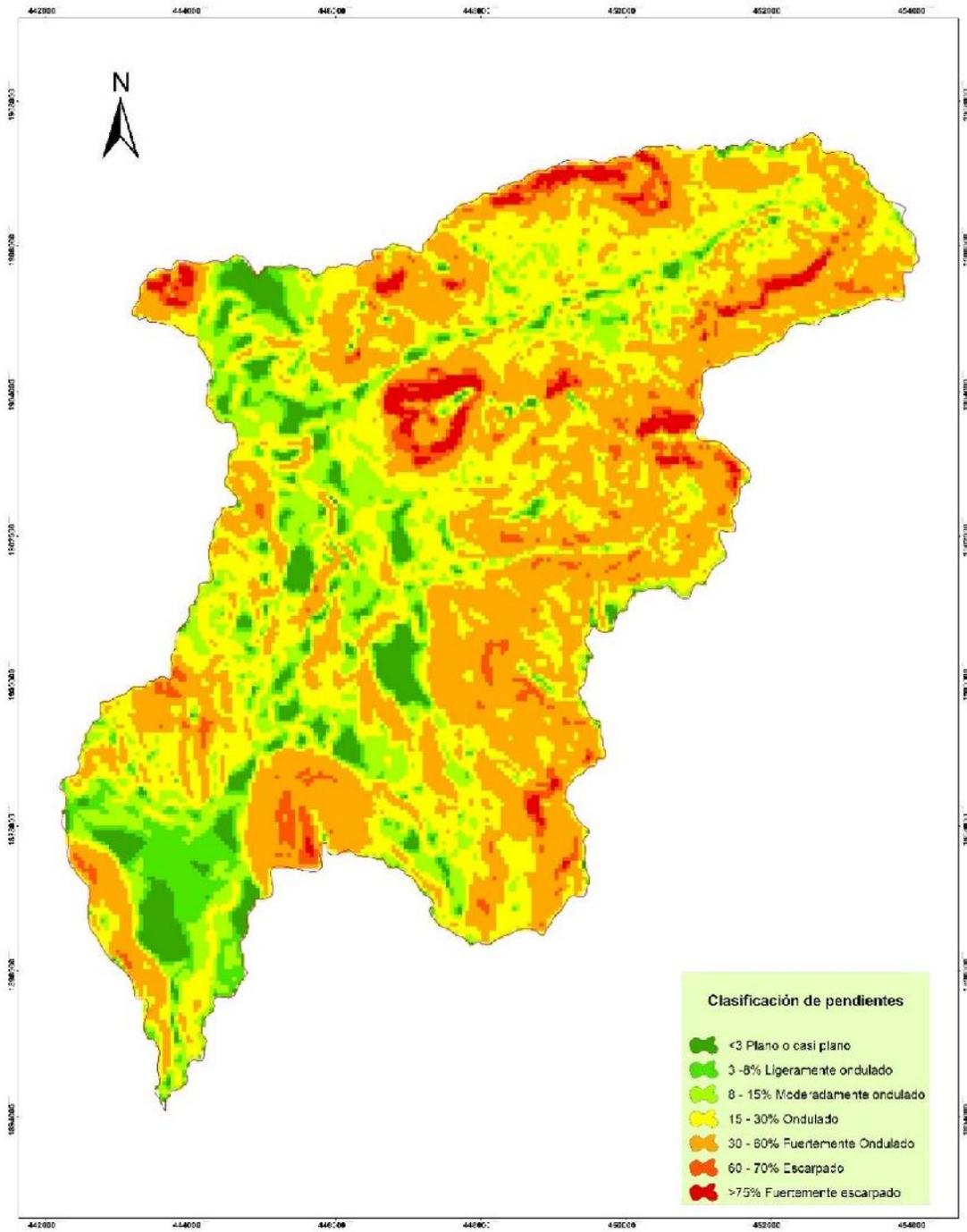
Cuadro 6. Número de corrientes y su bifurcación en la microcuenca del río Hueyapa.

No. de orden	Nu	Lc	Lpc	rb	Nci	(rb*Nci)	
1	165	90.96	0.55				
2	72	30.41	0.42	2.29	237	542.73	Razón de bifurcación media ponderada
3	32	13.29	0.42	2.25	104	234.00	
4	3	1.02	0.34	10.67	35	373.45	
5	1	21.84	21.84	3.00	4	12.00	
Total	273	157.52			380	1 162.18	3.06

Nu: número de corrientes de orden u , Lc: longitud total de corrientes de orden u (km), Lpc: longitud promedio de corrientes de orden u (km), rb: razón de bifurcación, Nci: número de corrientes de orden u involucradas en la razón.

El número total de corrientes (efímeras, intermitentes y perennes) fue de 273 con longitud total acumulada de 157.51 km. La frecuencia de corrientes es de 3.65 cauces/km² y la densidad de drenaje de 2.10 km/km², presenta buen drenaje (Vieceli, et al., 2014), típico de regiones con material subsuperficial permeable; aunque el relieve de esta microcuenca es accidentado, tiene buena cubierta vegetal, que propicia mayor capacidad de infiltración de agua al subsuelo (Mokarram & Sathayamoorthy, 2015).

La longitud del flujo terrestre bajo ($l_o=0.24$), la textura de drenaje moderada ($T_d=5.15$), número de rugosidad alto ($N_r=3.17$) y número de infiltración alto ($I_f=7.67$) son indicadores de un alto relieve, una capacidad de infiltración moderada, aunado a su buena densidad de drenaje, indican baja posibilidad de escurrimiento y alta posibilidad de recarga de aguas subterráneas (Elewa, Ramadan, & Nosair, 2016).



Elaboración propia
con datos de
INEGI (2010)

Sistema de coordenadas
WGS-1984-UTM-Z14N

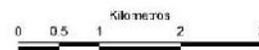


Figura 3. Pendientes del territorio de la microcuenca del río Hueyapa.

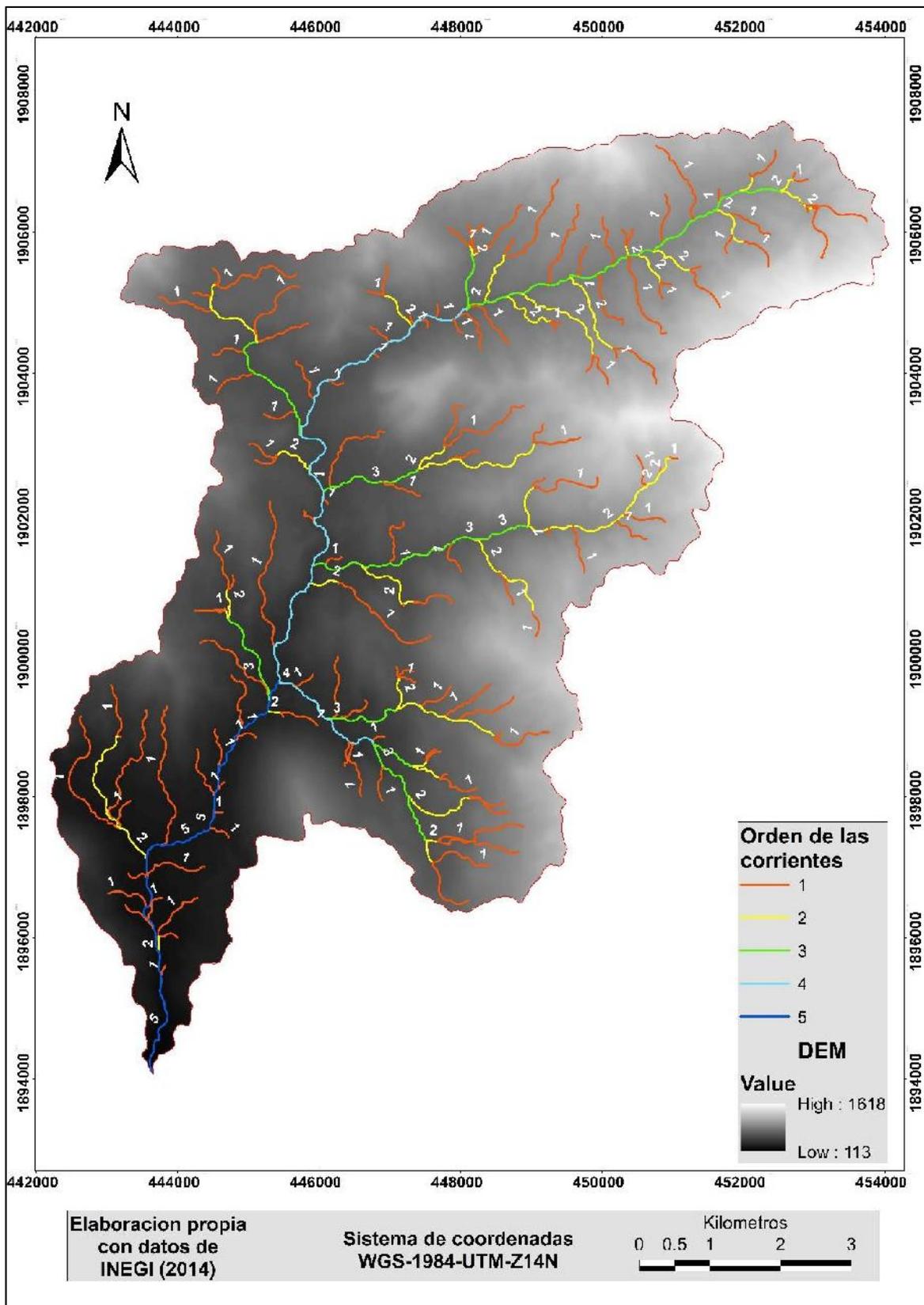


Figura 4. Orden de la red de drenaje de la microcuenca del río Hueyapa.

7.1.3. Curva hipsométrica e integral hipsométrica

Al mismo tiempo, la curva hipsométrica, revela que el 50% de la superficie más baja de la microcuenca está situada a menos de 850 msnm, con pendiente poco pronunciada. El 20% se localiza en una altitud superior a 1200 msnm y el 10% a más de 1300 msnm, observando pendientes muy pronunciadas en la cabecera de la microcuenca (Figura 5a).

Con relación a la curva hipsométrica adimensional (Figura 5b) que expresa el potencial evolutivo de la cuenca, Gaspari et al. (2013) la definen como una cuenca en fase de equilibrio o madurez, concordante con el índice de relación hipsométrica de 1.24.

Así mismo, el valor de la integral hipsométrica ($IH=0.54$) revela que la microcuenca del río Hueyapa está en tránsito entre una cuenca joven a una cuenca en equilibrio, donde el proceso erosivo se está estabilizando (Kottagoda & Abeysingha, 2017).

7.1.4. Perfil longitudinal y transversal

El perfil longitudinal del cauce principal (Figura 6a) es de 21.84 km, partiendo de su desembocadura en el río Omitlán, en donde la parte baja y media del recorrido del cauce presenta un bajo poder erosivo; sin embargo, en el kilómetro 15 se incrementa la pendiente, acentuándose en los dos últimos kilómetros, por lo que en éste tramo del río es más proclive a incrementar su poder erosivo (Gaspari et al., 2013), pero es atenuado por la presencia de abundantes rocas y un talud cubierto de vegetación arbustiva y arbórea ribereña.

En el perfil transversal (Figura 6b) de la parte más ancha de la microcuenca (7.89 km), el cauce principal cruza aproximadamente a la mitad de la microcuenca. Al extremo Oeste existen planicies destinadas a actividades agropecuarias y al Este se extienden pequeños espacios de uso agropecuario, la mayor parte son zonas de uso forestal, y presenta un desnivel altitudinal de aproximadamente 500 metros.

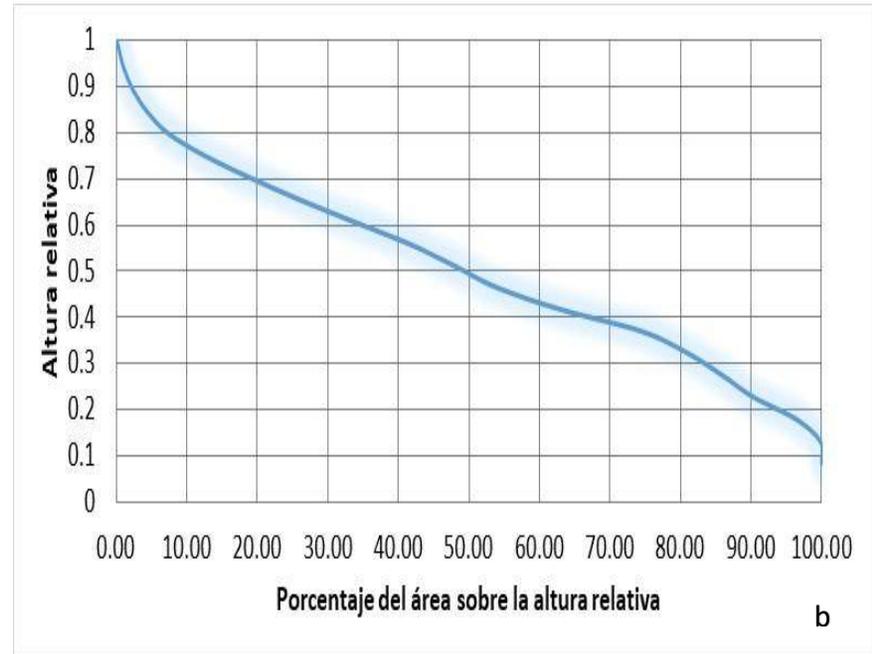
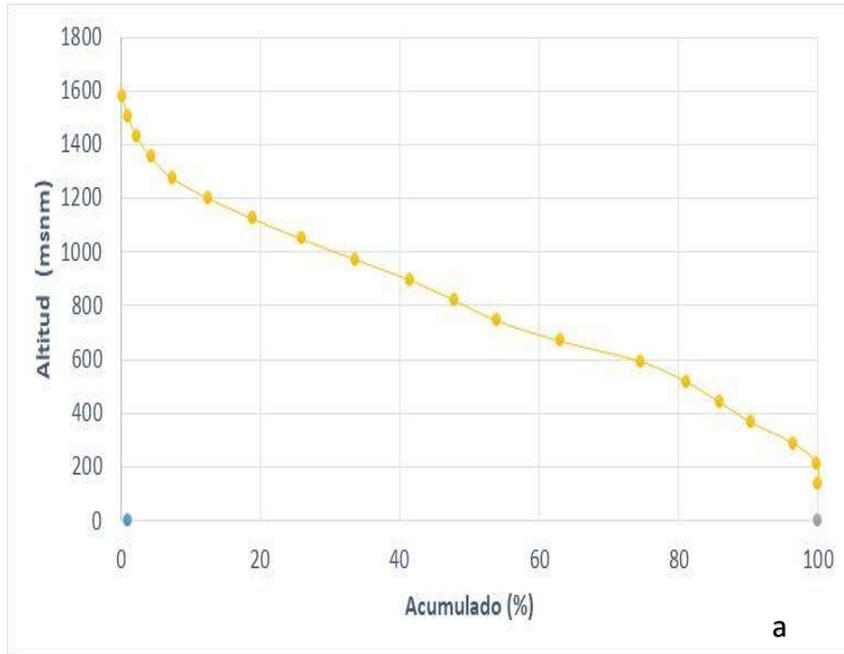


Figura 5. Curva hipsométrica (a) y curva hipsométrica adimensional (b) de la microcuenca del río Hueyapa.

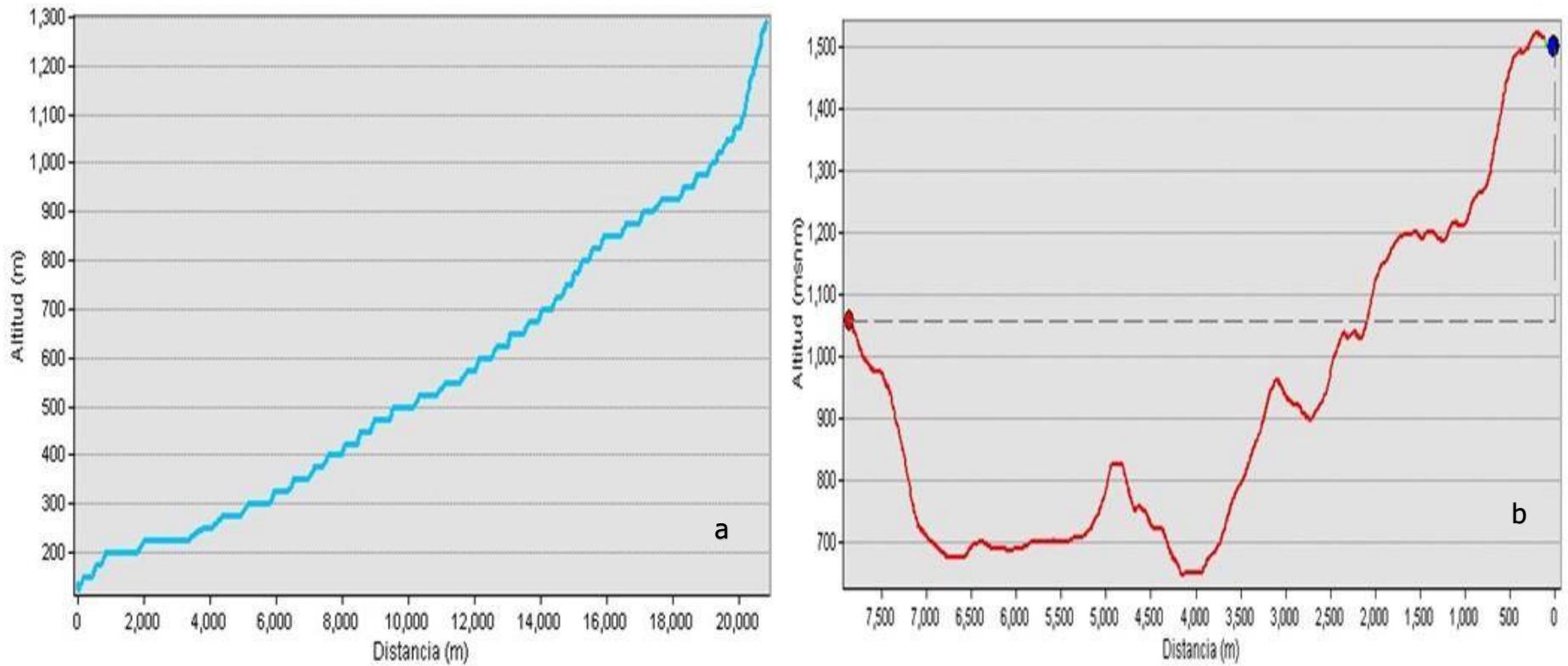


Figura 6. Perfil longitudinal (a) y perfil transversal (b) de la microcuenca del río Hueyapa.

7.1.5. Índices morfométricos

Los parámetros morfométricos, calculados y obtenidos directamente del SIG se resumen en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Fórmulas de cálculo y resultados de parámetros morfométricos de la microcuenca del río Hueyapa.

Parámetro morfométrico	Formula	Valor calculado	Referencia bibliográfica
Frecuencia de corrientes	$F_c = \frac{Ntc}{A}$	3.65	Horton (1945)
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{Ltc}{A}$	2.10	Horton (1945)
Longitud de flujo terrestre	$l_o = \frac{1}{2Dd}$	0.24	Horton (1945)
Número de rugosidad	$Nr = R * Dd$	3.17	Strahler (1956)
Textura de drenaje	$Td = \frac{Ntc}{P}$	5.15	Horton (1945)
Número de infiltración	$If = Dd * Fc$	7.67	Faniran (1968)
Pendiente del cauce principal (%)	$Pcp = \left(\frac{\Delta l}{Lcp}\right) * 100$	5.44	Shumm (1956)
Factor de forma o Índice de Horton	$Ff = \frac{A}{L^2}$	0.28	Horton (1945)
Coefficiente de compacidad o Índice de Gravelius	$Kc = 0.2821 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$	1.73	Horton (1945)
Factor de circularidad de Miller	$Fc = 4 * \pi * \frac{A}{P^2}$	0.34	Miller (1953)
Razón de elongación	$Re = \left(\frac{2}{L}\right) * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$	0.60	Schumm (1956)
Índice de alargamiento	$Ia = \frac{L}{a}$	2.06	Horton (1945)
Coefficiente de masividad	$Km = \frac{Hm}{A}$	12.39	Fuentes (2004)
Relieve (km)	$R = Hmax - h$	1.51	Hadley and Schumm (1961)
Razón de relieve	$Rr = \frac{R}{L}$	0.06	Schumm (1956)
Integral hipsométrica	$IH = \left(\frac{Hm - h}{Hmax - h}\right)$	0.54	Hurtrez and Lucazeau (1999)

donde:

A: área de la microcuenca

P: perímetro de la microcuenca

L: Longitud de la microcuenca
a: ancho de la microcuenca
Hm: elevación media
Hmax: elevación máxima
h: elevación mínima
Ntc: número total de corrientes
Ltc: longitud total de corrientes
Nu: número de corrientes del orden u
 $Nu + 1$: número total de corrientes del próximo orden u más alto
 Δl : desnivel entre el punto más alto y más bajo de la corriente principal
Lcp: longitud de la corriente principal

Factor de forma

La microcuenca del río Hueyapa ($Ff= 0.28$) es ligeramente achatada. Esto significa una reacción moderadamente retardada entre el momento de precipitación y la crecida principal en la desembocadura (Mahajan & Sivakumar, 2018), concordante con el tiempo de concentración de Kirpich de 2.17 horas, clasificado como lento (Fuentes, 2004). Esto permite gestionar exitosamente un posible desalojo en áreas pobladas con riesgo de inundación (Petel, Gajjar, & Srivastava, 2013).

Coefficiente de compacidad

Esquivel-Arriaga et al., (2015) aseveran que una pendiente fuertemente accidentada y coeficiente de masividad muy montañosa, tendría una influencia directa sobre los procesos de escurrimiento e infiltración y el tiempo de duración de los mismos. Por lo tanto, comparado con la cuenca del río Cuale en Jalisco, México con índices similares, Cruz et al. (2015) aseveran que, ante un fenómeno meteorológico inusual, habría un aporte rápido de escurrimiento superficial que induciría a un fuerte impacto en la parte baja de la microcuenca.

Sin embargo, el coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius de 1.73, no representa un peligro latente para sus habitantes, ya que un índice superior a la unidad, permite concentrar moderados volúmenes de agua de escurrimiento en su superficie (Esquivel-

Arriaga, Bueno-Hurtado, Sánchez-Cohen, Velásquez-Valle & Muñoz-Villalobos, 2015). Además, el valor bajo en este índice se relaciona con mayor elongación y menor pérdida de suelo por erosión (Patel, Gajjar & Srivastava, 2013).

Factor de circularidad, razón de elongación e índice de alargamiento

El factor de circularidad está asociado a factores geológicos, pendiente y cobertura vegetal. El F_c (0.34) indica escasa circularidad de la microcuenca y está asociada a una cuenca con alto relieve ($R=1.51$ km), baja tasa de infiltración (Mahajan & Sivakumar, 2018), pendiente pronunciada (31.69%) y un coeficiente de masividad muy montañosa ($Km=12.39$). Sin embargo, la tasa de infiltración puede ser mejorada por la buena cobertura arbórea en la parte alta de la microcuenca. Tanto la Re (0.60) y el Ia (2.06), clasifican a la microcuenca del río Hueyapa como alargada a moderadamente alargada (Patel, Gajjar, & Srivastava, 2013).

Razón de relieve

En la práctica, la Rr está relacionada con la estimación de la pérdida de sedimentos, conforme disminuye éste índice, aumenta la capacidad de infiltración y disminuye la pérdida de sedimentos por erosión. Con una Rr de 0.06 la pérdida de suelo sería aproximadamente de 3.5 acre-pie mi^{-2} año⁻¹ (Schumm, 1956). El valor alto de Rr está asociado con la pendiente pronunciada y montañosa de la microcuenca (Vandana, 2012; Aher & Sharma, 2014).

Sin embargo, la diferencia altitudinal ($R=1.51$ km) de la microcuenca, permite observar variados ecosistemas forestales. En altitudes menores a 650 msnm, existe vegetación de selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia; a los 650 msnm y superior (70%), inicia el bosque de transición entre la selva mediana y el bosque de encino. A partir de los 800 msnm, se extiende el bosque de pino-encino, que representa el 48% de la superficie de la microcuenca y está dominada por *P. oocarpa* Schiede y seis especies del género *Quercus*.

7.2. Cambio de uso de suelo y vegetación

La vegetación arbórea dominante de selva mediana subcaducifolia comprende las especies: *Astronium conzattii* S. F. Blake, *Aspidosperma megalocarpon* Müll. Arg., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Hymenaea courbaril* L., *Brosimum alicastrum* Sw., *Inga sp.*, *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Cordia elaeagnoides* A. DC., *Peltogyne mexicana* Martínez, *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Lysiloma acapulcensis* (Kunth) Benth., *Lysiloma divaricatum* (Jack.) J. F. Macbr., *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Swietenia humillis* Zucc., *Ficus sp.*, *Platimicium yucatanun* Standl, entre otras.

La selva baja caducifolia presenta árboles de *Acacia sp.*, *Amphipterygium adstringens* Schltld., *Jacaratia mexicana* A. DC, *Guazuma ulmifolia* Lam., *Leucaena esculenta* Benth., *Plumeria rubra* L., *Pseudobombax ellipticum* Kunth., *Curatella americana* L., *Birsonimia crassifolia* (L.) Kunth., *Haematoxylum brasiletto* H. Karts., *Annona sp.*, *Bursera sp.*, entre otras. Por otra parte, el bosque de pino-encino está dominado por *P. oocarpa* Schiede y seis especies del género *Quercus* (*Q. resinosa* Liebm., *Q. crispifolia* Trel., *Q. conspersa* Benth., *Q. elliptica* Née, *Q. subspathulata* Trel. y *Quercus planipocula* Trel.).

Respecto al cambio de uso de suelo y tipos de vegetación registrada por la Comisión Nacional Forestal (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014) en el Inventario Nacional Forestal y Suelos para el estado de Guerrero, el 48% de la microcuenca del río Hueyapa está cubierto por coníferas y latifoliadas (pino-encino), 19% de selvas y el 33% es no forestal; ésta última parte con 2,441 ha (Figura 7) utilizadas principalmente para asentamientos humanos y áreas de cultivo agrícola.

De acuerdo al Registro Agrario Nacional, en el 2015 (base de datos en formato SHAPE), el área de uso no forestal ascendió a 2,746.8 ha, registrando una diferencia de 305.8 ha con respecto al estado actual. Es probable que, durante este periodo, se hayan transformado de uso forestal a uso agrícola o urbano (Registro Agrario Nacional [RAN], 2015).

El cambio de uso de suelo durante el periodo (2000-2010) se consideró ecológicamente positivo, ya que existe un incremento de la superficie vegetal (118.64 ha; que representa el 2.19%); debido a diez años sin cultivo, lo que propicio la sucesión de vegetación secundaria. Sin embargo, actualizando el periodo al 2017, se observó una disminución en la superficie forestal de 365.94 ha, que representa una tasa acumulada de pérdida de 6.77% de la cubierta forestal de la microcuenca, superficie que se destinó para la reactivación productiva en la agricultura y una mínima parte (31.22 ha) al crecimiento de los centros de población (Figura 8).

En este sentido, la tasa anual de deforestación en la microcuenca del río Hueyapa equivale al 0.40%, que puede ser considerada como alta comparada con la tasa de deforestación anual de los bosques del mundo entre el periodo 2000-2005 de 0.18% (FAO, 2006) o bien con la tasa de deforestación anual en los bosques de México equivalente a 0.08%, pero similar a la tasa de forestación en selvas del 0.41%, reportada por Rosete-Vergés et al. (2014) entre 1976 y 2007.

Así mismo, Pompa (2008) estimó, a través del análisis del NDVI con imágenes satelitales MODIS, una tasa de deforestación anual para las regiones montañosas prioritarias del noroeste de México en 0.3% entre el periodo 2003-2006, inferior a la tasa de deforestación de ésta microcuenca, que no está sometida a un aprovechamiento forestal comercial. Actualmente, el uso de suelo y vegetación predominante en la microcuenca del río Hueyapa corresponde a terrenos con vegetación arbórea, seguida cultivos agrícolas, uso urbano, tierras erosionadas y cuerpos de aguas en menor proporción (Figuras 8 y 9).

El área erosionada (86.48 ha) se localiza en la parte alta de la microcuenca, con afectaciones ocasionadas por el fenómeno meteorológico tormenta tropical Manuel en septiembre del año 2013, que repercutió en deslaves y derrumbes en el bosque de pino encino en áreas con pendiente fuertemente escarpada y suelos someros.

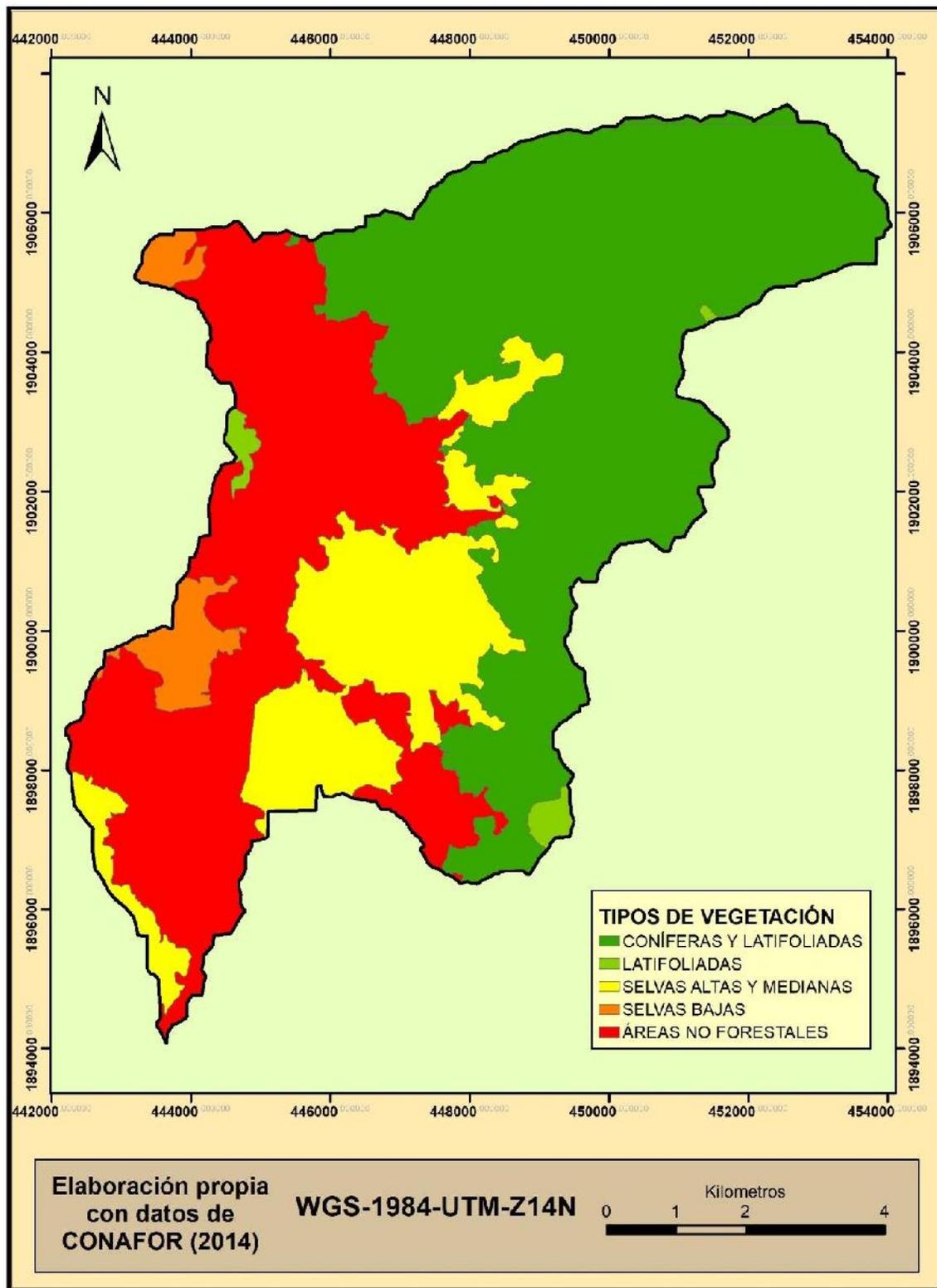


Figura 7. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa, elaborado con datos de la CONAFOR (2014).

El análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y vegetación, ha permitido demostrar que, a lo largo de 17 años, la zona de estudio ha sufrido una disminución de la superficie de vegetación natural en un 25%, debido al incremento en la apertura de nuevas áreas de cultivo y un mínimo incremento de infraestructura de nuevas zonas urbanas. El 75% de su superficie aún se mantiene sin cambio aparente, sobre todo, en las zonas más alejadas a los centros de población (Figura 10), aunado a que los dueños y poseedores del recurso forestal, no han permitido un aprovechamiento industrial maderable, sino únicamente de autoconsumo.

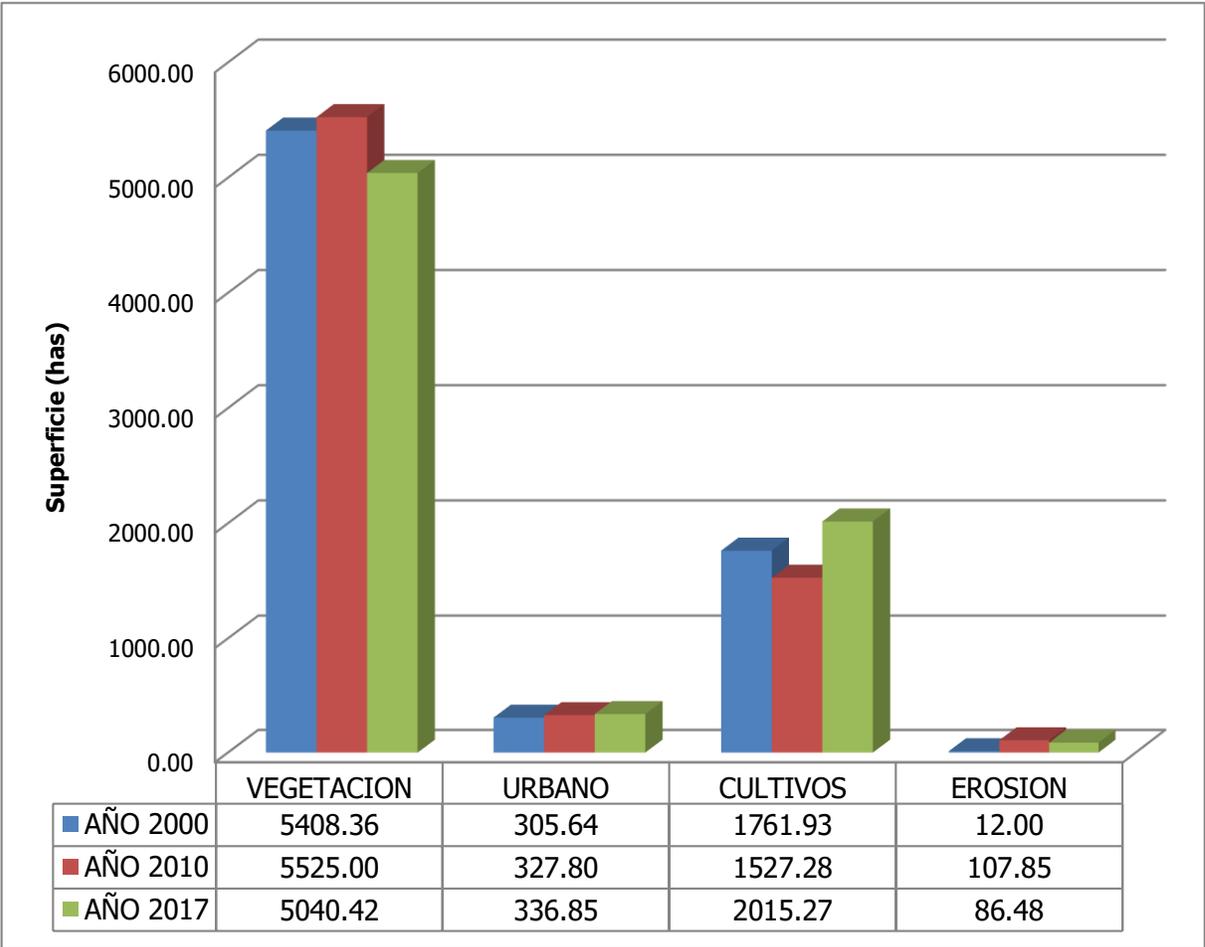


Figura 8. Comportamiento en el cambio de uso de suelo y vegetación en la microcuenca del río Hueyapa.

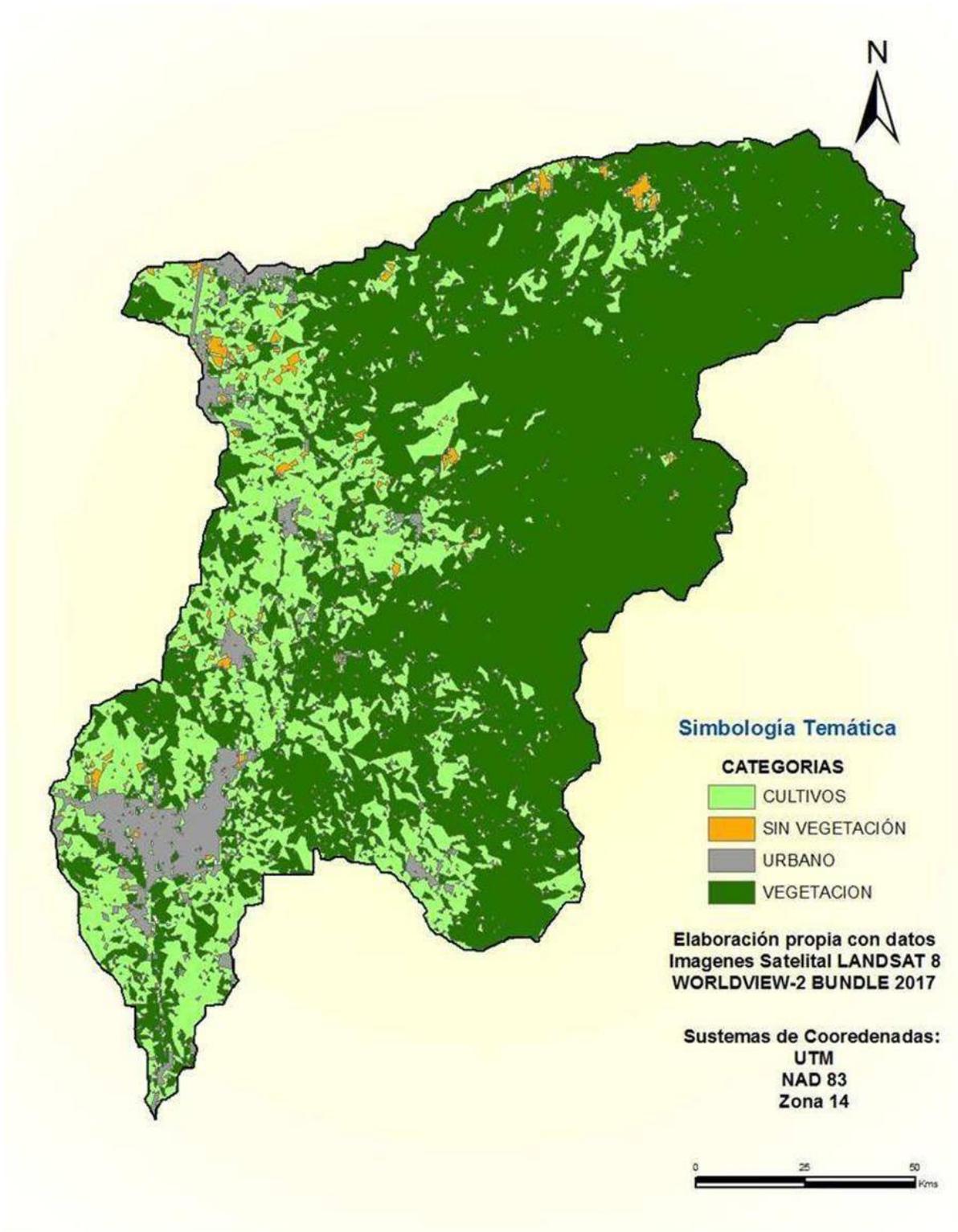


Figura 9. Mapa de uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa.

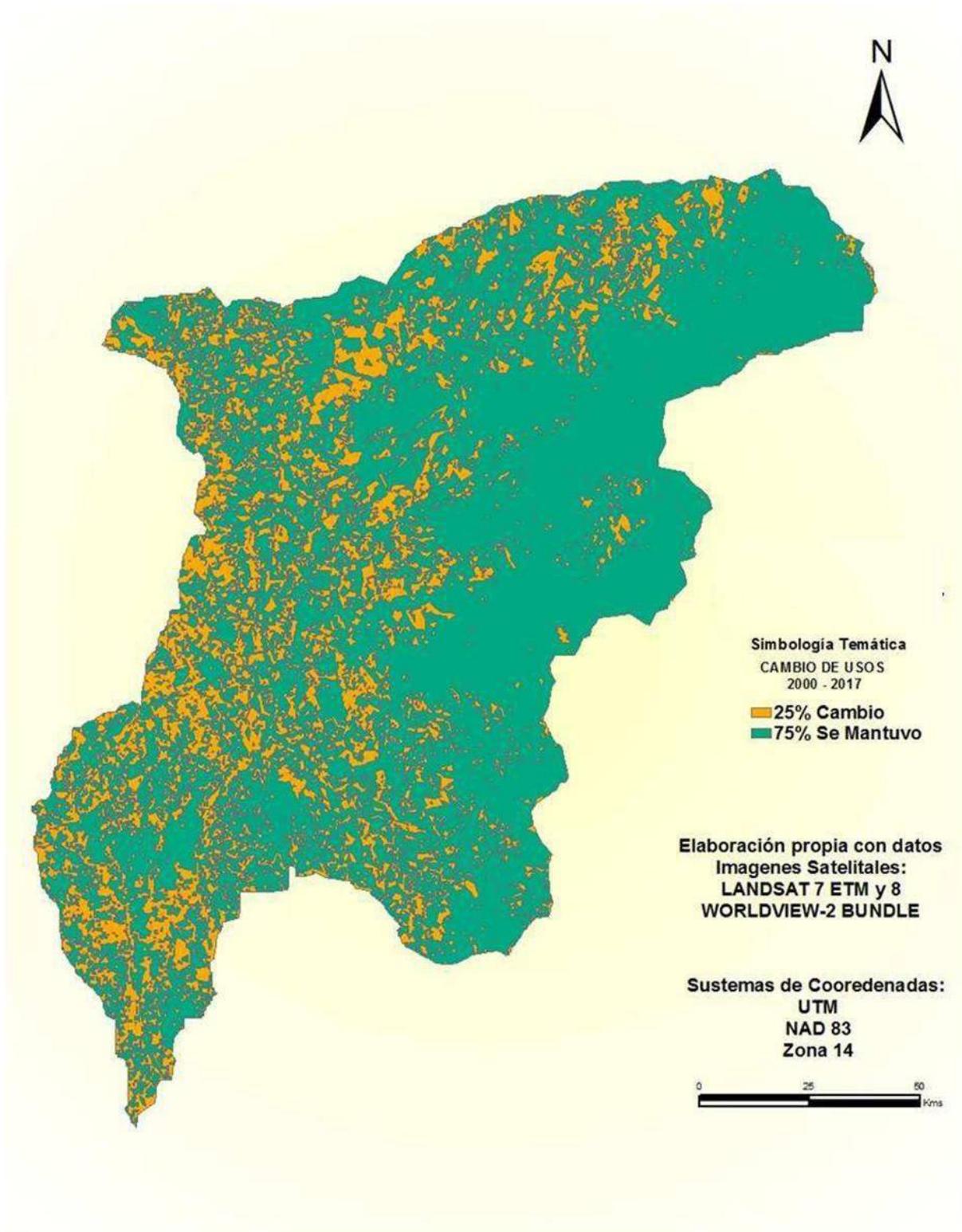


Figura 10. Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río Hueyapa 2000-2017.

Los valores del NDVI calculados para esta zona están por encima de 0.13, esto indica presencia de vegetación en toda el área de estudio, incluso en los centros urbanos. Cuanto más alto es el valor de este índice, la cantidad, condiciones de vigor y salud de la vegetación, son mejores, como se observa en áreas sometidas a una nula o baja presión antrópica (Pompa, 2008), y que en la parte media de la microcuenca se observa presencia de vegetación selvática con un NDVI superior a 0.42; valor que sigue en ascenso, ya que, en la parte alta (cubierta por bosque de pino-encino), el NDVI fluctúa entre 0.71 y 0.87 (Figura 11), y corresponde a zonas alejadas de las poblaciones.

Alatorre, Beguería, y Vicente-Serrano (2010) concluyen que, en áreas con cobertura vegetal los valores de NDVI son superiores a las zonas degradadas, con ligera diferencia entre los meses de marzo y agosto, con valores de 0.56 y 0.63 para bosques y frondosas en el primer mes, comparado con 0.61 y 0.65, para los mismos ecosistemas en el segundo mes; diferencia ocasionada por la escasa cobertura vegetal propia del periodo seco en marzo. En esta investigación se observaron valores similares y ligeramente superiores (0.42-0.71) para zonas selváticas, pero mayores (0.71-0.85) en áreas cubiertas por bosques de pino-encino.

Los valores altos de NDVI en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, probablemente se deben a la alta disponibilidad de agua en el suelo para mantener la vegetación verde durante un periodo hidrológico no favorable (mes de mayo), como lo argumentan Millano y Paredes (2016).

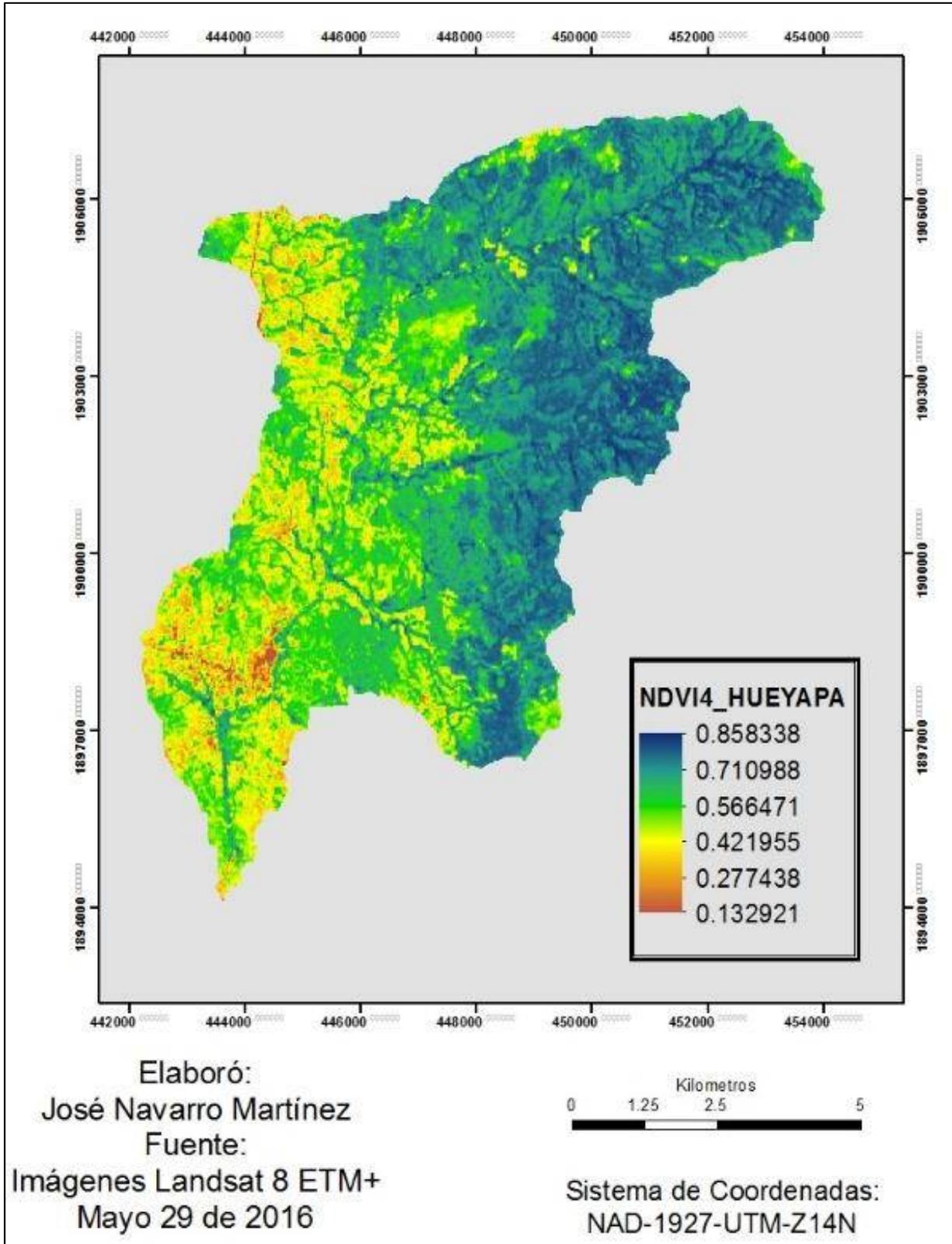


Figura 11. NDVI de la superficie de la microcuenca del río Hueyapa.

7.3. Ajuste de ecuaciones alométricas

7.3.1. Variables dasométricas de árboles muestra para el ajuste de ecuaciones alométricas.

Las principales variables dasométricas medidas para los 33 árboles de *P. oocarpa*, 32 árboles de *Quercus spp.* y los 19 árboles de *Q. resinosa* se registran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Estadísticas dasométricas de árboles muestreados de *P. oocarpa* y *Q. resinosa*

Especie	Variable	Mínimo	Media	Máximo	SD
<i>P. oocarpa</i>	D	12.50	46.79	82.00	17.99
	H	7.15	21.68	29.10	4.60
	B	36.91	1 607.32	5 856.51	1 337.80
<i>Quercus spp.</i>	D	7.60	36.54	61.30	13.31
	H	6.00	15.42	22.80	3.54
	B	14.58	1 000.09	3 037.63	753.20
<i>Q. resinosa</i>	D	14.10	35.25	57.70	13.05
	H	10.40	16.01	22.80	3.43
	B	64.31	997.51	3 037.63	851.79

D: diámetro normal (cm), H: altura total (m), B: Biomasa aérea total (kg), SD: desviación estándar (kg).

En el análisis preliminar de datos tanto para *P. oocarpa*, *Quercus spp.* y *Q. resinosa*, se observa una relación curvilínea bien definida entre la biomasa aérea total y el diámetro normal (Figura 12a), y menos definida entre la biomasa aérea total con la altura total del árbol (Figura 12b). En cambio, con las variables transformadas se observó una tendencia lineal. Un problema que se observó fue la falta de homogeneidad de varianzas, pues a medida que el diámetro (o altura) aumenta existió mayor variabilidad de la biomasa. En el caso de *P. oocarpa* con las variables originales el coeficiente de correlación, entre la biomasa aérea total y el diámetro normal, fue de 0.93, mientras que con la altura total fue de 0.66, para *Quercus spp.* fue de 0.89 y 0.52 y para *Q. resinosa* fue de 0.91 y 0.68, respectivamente.

7.3.2. Modelación de la biomasa aérea total en *P. oocarpa*

Los modelos ajustados para *P. oocarpa* y sus estadísticos de bondad de ajuste se observan en el Cuadro 9, para *Quercus spp.* en el Cuadro 10 y los de *Q. resinosa* en el Cuadro 11; todos cumplieron los supuestos del modelo de regresión.

El Modelo [5] generado para *P. oocarpa* con transformación Box-Cox de B_i^* como $\ln(B_i)$ (Cuadro 9), al igual que para *Quercus spp.* (Cuadro 10) y para *Q. resinosa* con transformación $B_i^* = \left[\frac{B_i^{*-0.05} - 1}{-0.05} \right]$ (Cuadro 11), presentaron los menores valores de RMSCR y de AIC, ambos con excelente capacidad predictiva. Sin embargo, éstos mostraron problemas severos de colinealidad, ($\eta_x=60$ y $\eta_x=279$, respectivamente), por lo que no fueron elegidos como los mejores en cada caso.

Los Modelos [1 y 3] del Cuadro 9, presentaron valores similares de RMSCR (359.0 y 358.9) y capacidad predictiva (0.963 y 0.962); sin embargo, por el principio de parsimonia el Modelo [1] es el mejor para estimar la biomasa aérea en árboles de *P. oocarpa*.

Cuadro 9. Modelos ajustados para estimar la biomasa aérea total de *P. oocarpa*.

Modelo ajustado	r^2	RMSCR	R^2_{adj}	AIC	N	HV	η_x
$\hat{B}_i = 0.10012 * D^{2.4589}$	0.963	359.0	0.977	-18.1	0.59	0.82	17
$\hat{B}_i = 0.03384 * (D^2 * H)^{0.9774}$	0.946	432.2	0.974	-14.7	0.75	0.18	19
$\hat{B}_i = \sqrt[0.134]{0.134 * \left[-3.3657 + 2.3808 * \left(\frac{D^{0.251} - 1}{0.251} \right) \right] + 1}$	0.962	358.9	0.974	42.9	0.89	0.14	12
$\hat{B}_i = \sqrt[0.066]{0.066 * \left[-1.3505 + 0.5251 * \left(\frac{(D^2 H)^{0.104} - 1}{0.104} \right) \right] + 1}$	0.947	423.5	0.971	17.0	0.44	0.06	12
$\hat{B}_i = \exp(1.40 + 0.13D + 0.12H - 0.0003D^2 - 0.002DH)$	0.964	352.8	0.979	-114.0	0.47	0.15	68

r^2 : Coeficiente de correlación de Pearson entre B_i observada y predicha, RMSCR: Raíz de la media de la suma de los cuadrados de los residuos, R^2_{adj} : R^2 ajustada, AIC: criterio de información de Akaike, N: normalidad, HV: homogeneidad de varianza, η_x : colinealidad.

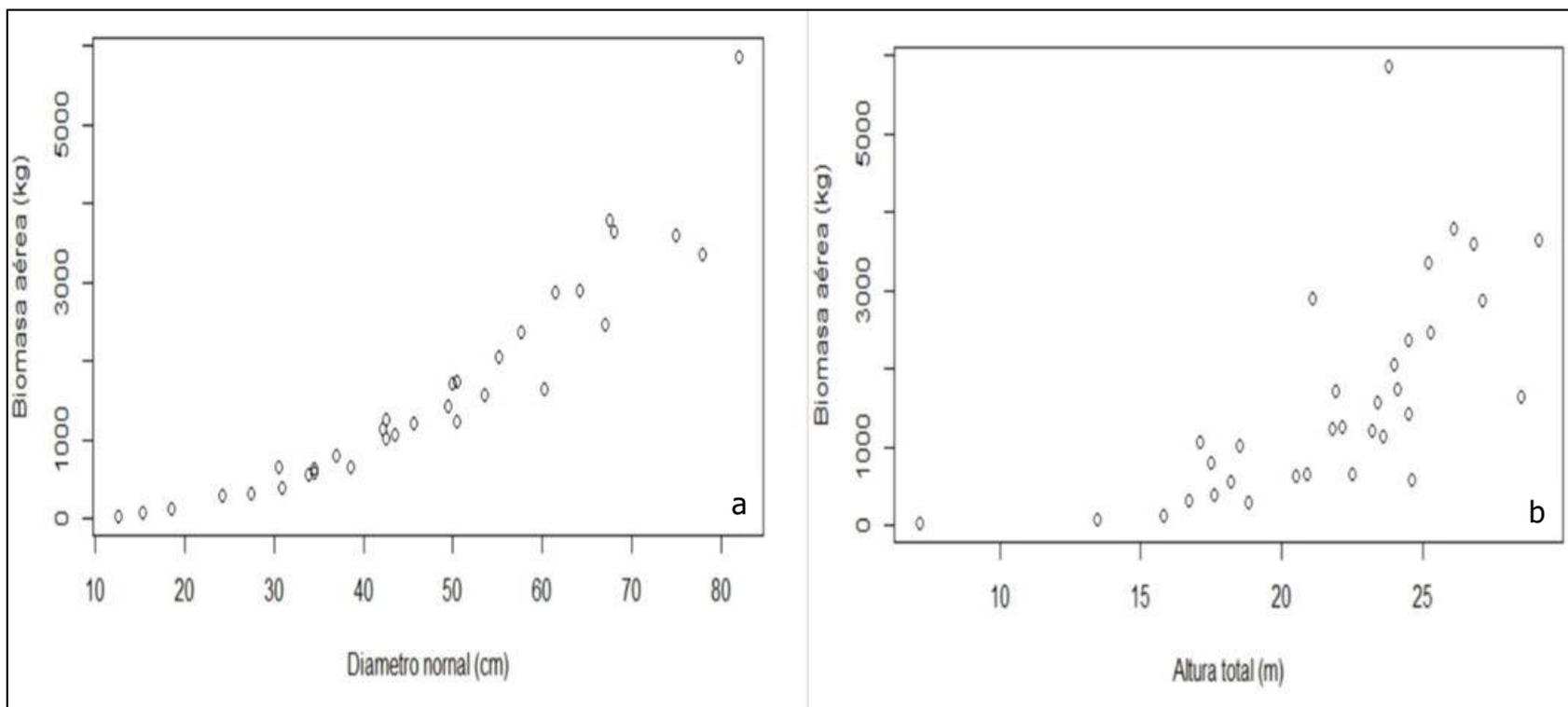


Figura 12. Tendencia de la biomasa aérea total en función del diámetro normal (a) y altura total en árboles de *P. oocarpa* (b).

7.3.3. Modelación de la biomasa aérea total en *Quercus spp.*

Todos los modelos evaluados cumplieron con los supuestos del modelo de regresión lineal (Cuadro 10) y todos los parámetros estimados fueron estadísticamente significativos ($Pr < 0.0001$). El modelo [5] fue el que tuvo los mejores parámetros de ajuste; sin embargo, presentó colinealidad severa ($\eta_x = 149$), por lo que no se eligió como el mejor.

Los modelos ajustados [3] y [4] que usan la transformación Box-Cox tuvieron valores de 304.27 y 258.94 en la RMSCR, menores que los obtenidos con sus modelos potenciales linealizados homólogos (misma variable independiente) [1] (320.98) y [2] (259.91), aunque ambos pares de modelos tuvieron la misma capacidad predictiva (1 y 3, $r^2 = 0.91$; 2 y 4, $r^2 = 0.94$) y colinealidad moderada (Cuadro 10).

El modelo [4], que usó la transformación Box-Cox en la biomasa aérea y la variable independiente combinada $D_i^2 H_i$, explica el 95% de la variación de la biomasa aérea y tuvo el menor valor de la RMSCR (258.94), mayor capacidad predictiva $r^2 = 0.94$ y con nula colinealidad ($\eta_x = 9$). Por consiguiente, se eligió como el mejor para predecir la biomasa aérea en árboles de *Quercus spp.* distribuidos en la microcuenca del río Hueyapa, en el intervalo entre 10 y 60 cm de diámetro normal.

Cuadro 10. Modelos elegidos para estimar la biomasa aérea y por componente arbóreo en *Quercus spp.*

Modelo ajustado final	RMSCR	r^2	R^2_{adj}	N	HV	η_x
$\hat{B}_i = 0.1194 * (D_i)^{2.4549}$	320.98	0.91	0.96	0.34	0.29	16
$\hat{B}_i = 0.0307 * (D_i^2 H_i)^{1.0259}$	259.91	0.94	0.96	0.12	0.74	18
$\hat{B}_i = \sqrt[0.143]{0.143 * \left[-3.5332 + 2.6510 * \left(\frac{D_i^{0.231} - 1}{0.231} \right) \right] + 1}$	304.27	0.91	0.95	0.68	0.05	12
$\hat{B}_i = \sqrt[0.212]{0.212 * \left[-2.3949 + 0.4905 * \left(\frac{(D_i^2 H_i)^{0.217} - 1}{0.217} \right) \right] + 1}$	258.94	0.94	0.95	0.10	0.18	9
$\hat{B}_i = \exp(0.08 + 0.23D + 0.21H - 0.002D^2 - 0.004H^2 - 0.003DH + 0.000002D^2H^2)$	212.02	0.96	0.97	0.23	0.83	149

7.3.4. Modelación de la biomasa aérea total en *Q. resinosa*

El Modelo [4] ajustado para *Q. Resinosa* (Cuadro 11) explica el 97.9% de la variación de B_i' , tuvo un AIC de -1.8 y capacidad predictiva de 0.971, además presentó el más bajo valor de RMSCR (200.6), por ello se eligió como el mejor modelo para estimar la biomasa aérea en árboles de esta especie distribuida en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Cuadro 11. Modelos ajustados para estimar la biomasa aérea total de *Q. resinosa*.

Modelo ajustado	r^2	RMSCR	R^2_{adj}	AIC	N	HV	η_x
$\hat{B}_i = 0.09206 * D^{2.5417}$	0.936	295.9	0.955	1.5	0.40	0.51	17
$\hat{B}_i = 0.01532 * (D^2 * H)^{1.0958}$	0.969	216.9	0.979	-13.3	0.31	0.43	21
$\hat{B}_i = \sqrt[0.054]{0.054 * \left[-3.7182 + 3.0521 * \left(\frac{D^{0.044} - 1}{0.044} \right) \right] + 1}$	0.937	291.0	0.954	14.7	0.28	0.33	16
$\hat{B}_i = \sqrt[0.048]{0.048 * \left[-5.7263 + 1.2743 * \left(\frac{(D^2H)^{0.015} - 1}{0.015} \right) \right] + 1}$	0.971	200.6	0.979	-1.8	0.19	0.42	19
$\hat{B}_i = \left[-\frac{1}{2}(1.21 + 0.02D + 0.05H - 0.0007DH - 0.0002D^2 - 0.0009H^2 + 0.0000002D^2H^2) + 1 \right]^{-2}$	0.976	179.3	0.991	-191.5	0.83	0.81	279

Los parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos elegidos como los mejores para cada especie y del género *Quercus* se registran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos elegidos para estimación de biomasa aérea.

Especie	Variable	Parámetro	Error estándar	Valor de t	Pr(> t)
<i>P. oocarpa</i>	Intercepto	-2.3014	0.2541	-9.056	<0.0001
	Ln <i>D</i>	2.4589	0.0671	36.618	<0.0001
<i>Quercus spp.</i>	Intercepto	-2.3949	0.7490	-3.197	0.0033
	$(D^2H)'$	0.4905	0.0212	23.111	<0.0001
<i>Q. resinosa</i>	Intercepto	-5.7263	0.4615	-12.410	<0.0001
	$(D^2H)'$	1.2743	0.0438	29.100	<0.0001

La corrección de la falta de normalidad y homogeneidad de varianzas de los residuos en los modelos ajustados para la estimación de la biomasa aérea mediante el uso de

transformaciones de tipo Box-Cox, es tan efectiva como el uso del logaritmo para linealizar la función potencial (Hernández-Ramos et al., 2017; Méndez-González et al., 2011) o bien, del método de momentos generalizado (Wang et al., 2018).

El modelo alométrico ajustado por Ayala-López, De Jong, y Ramírez-Maldonado (2001) para estimar la biomasa aérea en *P. oocarpa* en bosques de Chiapas, México, que usa como variables al logaritmo natural tanto para la biomasa aérea como del diámetro normal tuvo una R^2_{adj} de 0.93, valor similar al obtenido por Návar (2009a) para bosques del noreste de México, mientras que el modelo ajustado en este estudio tuvo un R^2_{adj} de 0.977 (Cuadro 9), por lo que presenta una mayor explicación de la varianza de la biomasa aérea de esta especie.

González (2008) ajustó un modelo para estimar la biomasa total en *P. oocarpa* que incluye al diámetro normal y su cuadrado con R^2_{adj} de 0.95, valor superado por el mejor Modelo ajustado [1] en este estudio que incluyó únicamente al diámetro normal como variable independiente (Cuadro 9), que también supera la precisión de la predicción en 3.3% respecto al modelo ajustado por Návar-Cháidez (2010).

Návar (2009) ajustó una ecuación para *Quercus spp.* para los bosques de Cuihuahua, Durango y Sinaloa; con tamaño de muestra de 118 árboles que tuvo una capacidad predictiva de 0.95. Návar-Cháidez (2010) parametrizó para los encinos del noreste de México una ecuación con capacidad predictiva de 0.91.

Aguilar *et al.* (2012) hicieron lo propio para *Quercus spp.* en los bosques de la cuenca de Cuitzeo, Mich., México, con una muestra de 135 árboles y su modelo elegido explica el 95% de la biomasa aérea. En los tres estudios anteriores, los autores utilizaron como variable predictiva al diámetro normal, aunque coinciden que con la inclusión de la altura se obtendría mayor precisión, no obstante que su uso se restringe por la dificultad en la medición precisa de esta variable dasométrica, pero indispensable en los inventarios forestales, fuente de información estadística para la estimación del reservorio de carbono en los bosques.

La transformación Box-Cox usada en el ajuste del modelo elegido [4] para *Q. resinosa* con 19 árboles y el método de momentos generalizado utilizado por Wang et al. (2018)

con 32 árboles de *Q. aliena* Bl. var. *acuteserrata* en bosques de China, tuvieron R^2_{adj} similares de 0.98, con el uso de las mismas variables independientes.

El modelo alométrico función potencial ajustado por Chave et al. (2015) con una base de datos de 1 194 árboles de regiones tropicales, que incluye el logaritmo natural de biomasa aérea y como variables independientes a la densidad básica de la madera y D^2H tuvo un AIC de 3 130, por lo que los modelos ajustados en este estudio, tanto para *P. oocarpa* como para *Q. resinosa*, superan éste valor de bondad de ajuste con un AIC de -18.1 y -1.8, respectivamente.

Gómez-Díaz, Etchevers-Barra, Monterrosos-Rivas, Campo-Álvarez, y Tinoco-Rueda (2011) ajustaron la función potencial para estimar biomasa en *Q. magnoliaefolia* Née distribuida en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México, usando como variable independiente al diámetro normal, obtuvieron un R^2_{adj} de 0.98. Del mismo modo, Ruíz-Aquino et al. (2014) ajustaron la ecuación potencial con la variable combinada como independiente para estimar la biomasa aérea total en árboles de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* en bosques de Oaxaca, México, obteniendo un R^2_{adj} de 0.99 y 0.98 respectivamente, valor similar ($R^2_{adj}=0.977$) al obtenido con el mejor modelo ajustado para *Q. resinosa* en este trabajo (Cuadro 11).

En la mayoría de los artículos publicados no se da evidencia del cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión ajustado (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas), mientras que los modelos con mejor ajuste en este trabajo cumplieron con los tres supuestos, sin necesidad de utilizar la metodología de ecuaciones aparentemente no relacionadas (Hernández-Ramos et al., 2017) ni el método de momentos generalizado (Wang et al., 2018).

A pesar de utilizar una muestra relativamente pequeña en el ajuste de modelos para *Q. resinosa* (n=19), tanto el logaritmo natural como la transformación Box-Cox, mejoran el problema de heterogeneidad de varianzas, tal como lo hace el método de momentos generalizado utilizado por Wang et al. (2018).

La capacidad predictiva de los modelos elegidos para cada especie y del género *Quercus* se aprecian en la figura 13.

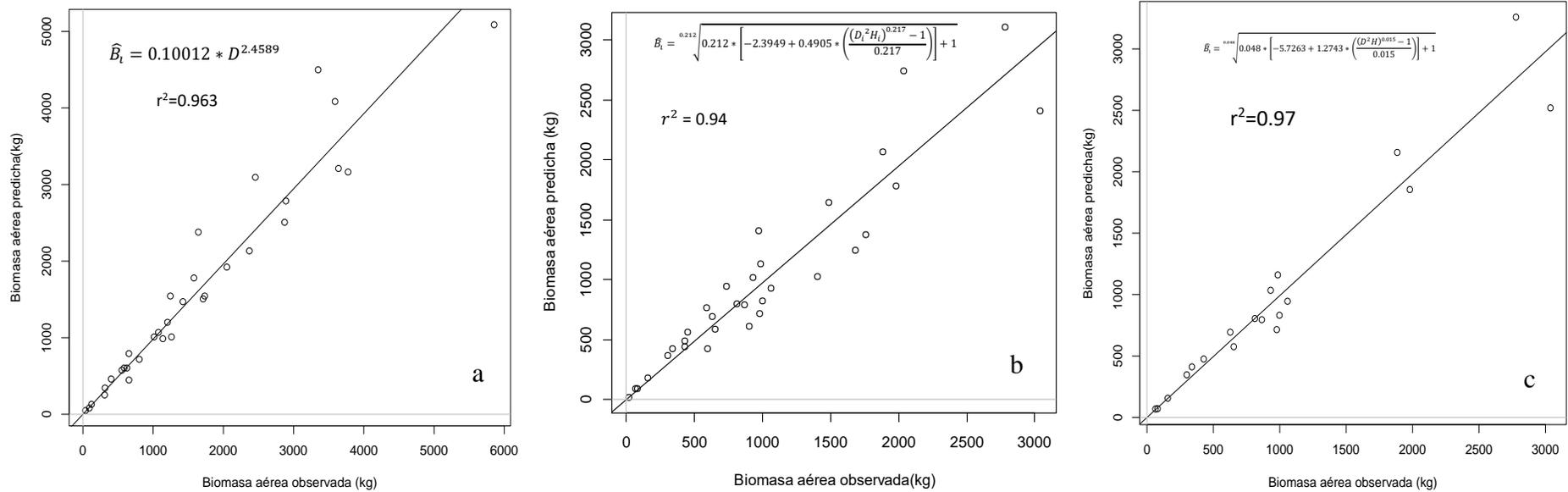


Figura 13. Biomasa aérea observada y predicha de *P. oocarpa* (a), *Quercus spp.* (b) y *Q. resinosa* (c).

7.3.5. Distribución de la biomasa por componente aéreo en árboles de *P. oocarpa*

Los porcentajes promedio de biomasa aérea por componente en árboles de *P. oocarpa* fue de 64.7% para el fuste y 35.3% corresponden a ramas, follaje y conos (Figura 14).

El porcentaje de biomasa en el fuste de *P. oocarpa* fue menor al reportado para los bosques de Honduras por Ramos y Ferreira (2001) de 71.65% para fuste sin corteza y el 28.35% para corteza, ramas y acículas. Para la misma especie, Alberto y Elvir (2008) reportan 71% de la biomasa concentrada en el fuste.

González (2008) determinó los porcentajes de biomasa aérea para regeneración de *P. oocarpa* en bosques naturales en el norte de Chiapas, México de 84.8, 11.2 y 4.0% para fuste, ramas y follaje, respectivamente. La distribución de biomasa en plantaciones de *P. durangensis* y *P. cooperi* en el estado de Durango, México, según Navar, González y Graciano (2001), es de 64.0 y 67.0%, 22.5 y 22.4%, 13.5 y 10.6% en fuste, ramas y follaje, respectivamente.

En una plantación de seis años de edad de *P. greggii*, Pacheco et al. (2007) reportaron una distribución de biomasa de 51.0% en fuste, 25.0% en ramas y 24.0% en follaje. Álvarez, Balboa, Merino, y Rodríguez (2005) registraron porcentajes de biomasa aérea para *P. pinaster* en madera, corteza y copa de 68.0%, 11.0% y 21.0%, respectivamente. Al mismo tiempo, los autores concluyeron que considerando un posible aprovechamiento forestal en los bosques de *P. pinaster*, los restos arbóreos esparcidos en el suelo, a la postre, la reintegración de biomasa al suelo, representaría más del 21.0%; mientras que, en teoría, para este estudio, después de un aprovechamiento comercial de *P. oocarpa* reintegraría al suelo más de 35.0% que representa la biomasa de las ramas y follaje, debido a una gran proporción de biomasa, principalmente en las ramas.

La proporción de biomasa de fustes en el área de estudio es claramente inferior a la reportada para bosques maduros en otros estudios, pero similares a plantaciones jóvenes de *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. greggii*, mientras que la proporción de biomasa de ramas es mayor que la reportada en dichas investigaciones.

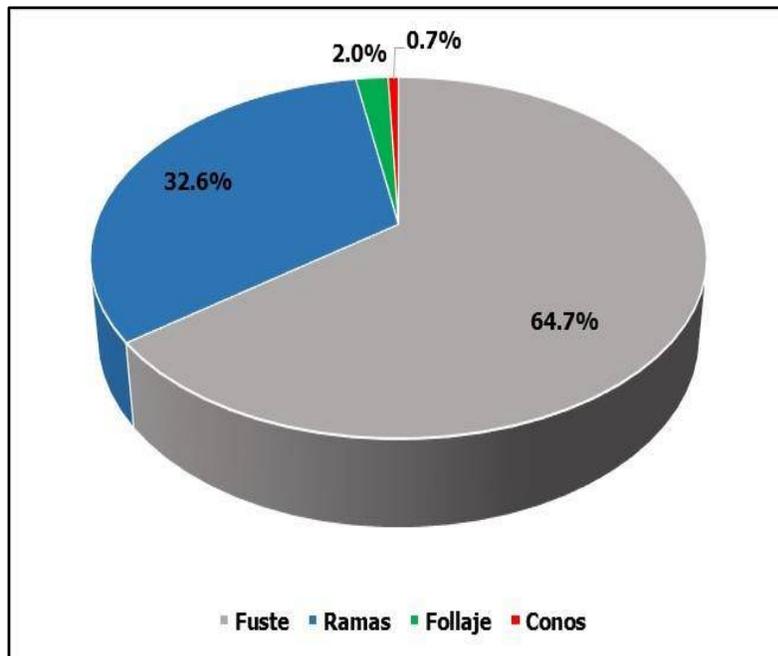


Figura 14. Distribución de la biomasa aérea por componente estructural en *P. oocarpa*.

Las copas extensas frecuentemente se producen cuando la densidad de arbolado es baja y el espacio para el crecimiento de las mismas es amplio. En efecto, Hébert et al. (2016) encontraron que las menores densidades de plantación probadas generaron árboles de *Pinus banksiana* Lamb. con ramas de mayor diámetro y mayor proporción de copa viva. Khan y Chaudhry (2007) en una plantación de *Populus deltoides* encontraron una relación lineal entre el desarrollo de la copa y el espacio disponible de crecimiento, siendo éste mayor en densidades bajas de plantación en un sistema agroforestal.

La competencia por la luz entre árboles vecinos explica la existencia de una mayor variación de la biomasa de ramas y de follaje entre árboles, incluso de la misma especie, como lo establece Navar (2009) quien concluye que los árboles que crecen con una fuerte competencia y logran una posición dominante, registran regularmente biomasa en ramas y follaje bajos comparado con árboles que crecen en espacio abierto que desarrollan copas grandes y acumulan mayor biomasa en éste componente arbóreo que en el fuste.

7.3.6. Distribución de la biomasa por componente aéreo en árboles de *Quercus spp.* y *Q. resinosa*

La biomasa aérea promedio en árboles de *Quercus spp.* está distribuida en 53.9%, 45.3% y 1.8% en fuste, ramas y follaje, respectivamente (Figura 15a). Datos similares se observan en la distribución de la biomasa aérea promedio en árboles de *Q. resinosa*. con 52.1%, 46.4% y 1.5% en fuste, ramas y follaje, respectivamente (Figura 15b).

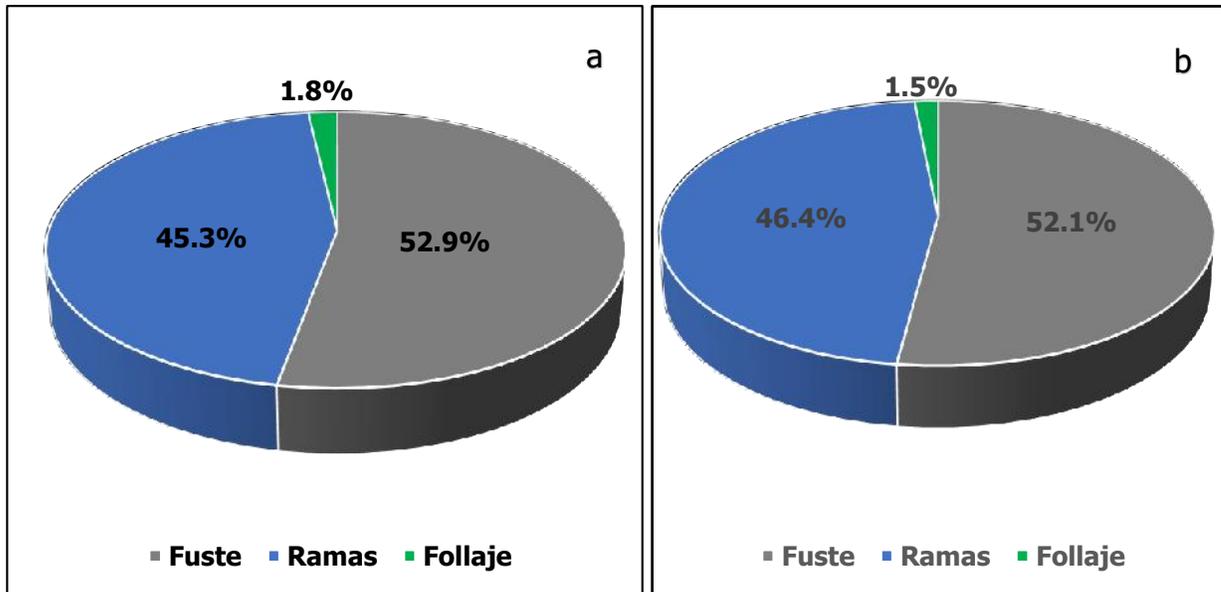


Figura 15. Distribución de la biomasa aérea por componente arbóreo de *Quercus spp.* (a) y *Q. resinosa* (b).

Gómez-Díaz, Etchevers-Barra, Monterrosos-Rivas, Campos-Álvarez, y Tinoco-Rueda (2011) reportan porcentajes de biomasa aérea para *Q. magnoliaefolia* de 62.5% para fuste, 27.8% para ramas y 9.6% para el follaje, que son superiores en 10.4 y 8.1% en fuste y follaje, respectivamente, pero inferior en 18.6% en la biomasa de ramas respecto a los valores encontrados en esta investigación en *Quercus spp.* y *Q. resinosa*.

En un muestreo realizado en bosques de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, Ruiz-Aquino et al. (2014) concluyeron que la biomasa de *Q. laurina* se distribuye en 82.9, 14.9 y 2.2% y en *Q. crassifolia* en 82.3, 16.0 y 1.7% en fuste, ramas y follaje, en el mismo orden; coincidiendo con el presente estudio en el porcentaje de biomasa en follaje, pero es menor casi tres veces la biomasa en ramas, concentrando

la mayor parte en el fuste; caso contrario a lo encontrado en los bosques de *Quercus spp.* y *Q. resinosa* de la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México.

En masas adultas de *Eucalyptus globulus* en Galicia, España, Álvarez et al. (2005) registraron porcentajes de biomasa aérea en madera, corteza y copa de 82.0%, 7.0% y 11.0%, respectivamente. Para *Eucalyptus urophylla* en plantaciones forestales comerciales de siete años de edad en Tabasco, México, Hernández-Ramos et al. (2017) estimaron 91.42%, 5.54% y 2.03% en biomasa de fuste, ramas y follaje, respectivamente, en ambos estudios, superan casi al doble la cantidad de biomasa concentrada en el fuste respecto a lo observado en *Quercus spp.* y *Q. resinosa* de este estudio.

7.3.7. Ecuaciones de volumen ajustadas para de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

El modelo que mejor ajusta a los datos para el cálculo de el Volumen total árbol con corteza ($\widehat{V_{ta_{cc}}}$) para *P. oocarpa*, requirió de la transformación Box-Cox, tanto de la variable respuesta como de las variables independientes. Después de realizar selección de variables por los criterios BIC y AIC quedaron integradas al modelo D , $H-1$ y $(H-1)^2$, como se observa en el Cuadro 13.

El modelo ajustado explica el 97.3% de la variación de los datos. Los residuos tienen distribución normal (Shapiro-Wilk $p=0.97$) y se cumple el supuesto de homogeneidad de varianza (ncvTest $p=0.41$). El modelo fue estadísticamente significativo ($p<0.0001$) y al igual que tres de los cuatro parámetros que lo integran (Cuadro 14).

El modelo ajustado para estimar el volumen de fuste con corteza ($\widehat{V_{f_{cc}}}$) para *P. oocarpa*, requirió la transformación Box-Cox de la variable respuesta y las variables independientes para lograr el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión (normalidad, Shapiro-Wilk $p= 0.90$; homogeneidad de varianza, ncvTest $p=0.75$). El criterio AIC seleccionó a todas las variables independientes en el modelo, el cual explica un 98.5% de la variación de los datos.

Para estimar el volumen en ramas con corteza (\widehat{Vr}_{cc}) en árboles de *P. oocarpa*, únicamente fue necesaria la transformación Box-Cox de la variable respuesta para cumplir con los supuestos del modelo de regresión (normalidad, Shapiro-Wilk $p=0.46$; homogeneidad de varianza, $ncvTest$ $p=0.45$). El modelo estimado explica un 86.3% de la variación de los datos.

Cuadro 13. Modelos ajustados para la estimación de volúmenes en *P. oocarpa*.

Modelo ajustado para <i>P. oocarpa</i>	N	HV	R_{adj}^2	RMSCR
$\widehat{Vta}_{cc} = e^{-8.618+2.106\ln(D)+0.098(H-1)-0.002(H-1)^2}$	Si	Si	0.97	0.66
$\widehat{Vf}_{cc} = e^{-13.38+5.20\ln(D)+0.14(H-1)-0.54\ln(D)^2-0.005(H-1)^2+0.0002\ln(D)^2(H-1)^2}$	Si	Si	0.99	0.24
$\widehat{Vr}_{cc} = e^{-7.32+0.14D+0.16H-0.004DH}$	Si	Si	0.86	0.48

El diámetro (D) se expresa en centímetros y la altura total (H) en metros.

Cuadro 14. Parámetros del modelo para estimar Vta_{cc} para *P. oocarpa* y estadísticos de ajuste

Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Valor de t	Pr (> t)
Intercepto	-8.618	0.416	-20.741	<0.0001
$\ln D$	2.106	0.138	15.266	<0.0001
H'	0.098	0.041	2.379	0.0240
H^2	0.002	0.001	-1.831	0.0770

Donde: $\ln D$: logaritmo natural del diámetro normal, H' : altura total transformada ($H-1$), H^2 : altura total transformada al cuadrado $(H-1)^2$.

Respecto a los modelos ajustados para la estimación de volúmenes en *Quercus spp.*, el modelo con mejor ajuste para estimar el volumen total árbol con corteza (\widehat{Vta}_{cc}), requirió de la transformación del tipo Box-Cox a la variable respuesta ($\ln Vta_{cc}$) para cumplir con la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk $p=0.62$) y homogeneidad de varianza ($ncvTest$ $p=0.82$). El modelo estimado explica el 96.6% de la variación de los datos (Cuadro 15) y es estadísticamente significativo al igual que los parámetros que lo estiman (Cuadro 16).

Los datos orinales de volumen del fuste con corteza tienen una correlación de 0.94 y 0.47 con respecto al diámetro normal y la altura total, respectivamente. No existen datos atípicos ni sesgo en la distribución de los datos.

Para lograr el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión fue necesaria realizar la transformación del tipo Box-Cox a la variable respuesta ($Y' = \frac{y^{0.5}-1}{0.5}$) y las variables independientes ($D' = D - 1$ y $H' = H - 1$), seleccionadas mediante el criterio BIC. El modelo ajustado para la estimación del volumen del fuste con corteza ($\widehat{Vf_{cc}}$) explica un 95.0% de la variación en los datos. Los residuos tienen distribución normal (Shapiro-Wilk $p=0.73$) y el supuesto de homogeneidad de varianzas se cumple (ncvTest $p= 0.91$).

Para ajustar la ecuación que mejor estima el volumen de ramas con corteza ($\widehat{Vr_{cc}}$) en árboles de *Quercus sp.*, se transformó la variable respuesta ($Y' = \frac{y^{0.33}-1}{0.33}$) y las variables independientes ($D' = \frac{D^{0.5}-1}{0.5}$ y $H' = H - 1$).

El modelo explica el 86.7% de la variación de los datos. Los residuos tienen distribución normal (Shapiro-Wilk $p=0.12$) y se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (ncvTest $p=0.16$).

Cuadro 15. Modelos ajustados para la estimación de volúmenes para *Quercus spp.*

Modelo ajustado para <i>Quercus spp.</i>	N	HV	R^2_{adj}	RMSCR
$\widehat{Vta_{cc}} = e^{-5.233+0.187D+0.047H-0.002D^2}$	Si	Si	0.97	0.29
$\widehat{Vf_{cc}} = \sqrt{((-1.91 + 0.03(D - 1) + 0.001(H - 1)^2) \times 1/2) + 1}$	Si	Si	0.95	0.09
$\widehat{Vr_{cc}} = \sqrt[0.33]{\left(\left(-3.82 + 0.63 \left(\frac{D^{0.5}-1}{0.5} \right) - 0.24(H-1) - 0.0312 \left(\frac{D^{0.5}-1}{0.5} \right)^2 + 0.02 \left(\frac{D^{0.5}-1}{0.5} \right) (H-1) \right) \times 0.33 \right) + 1}$	Si	Si	0.87	0.27

Cuadro 16. Parámetros del modelo para estimar $V_{ta_{cc}}$ para *Quercus spp.* y estadísticos de ajuste

Variable	Parámetro estimado	Error estándar	Valor de t	Pr (> t)
Intercepto	-5.233	0.2263	-23.122	<0.0001
<i>D</i>	0.187	0.0133	14.096	<0.0001
<i>H</i>	0.047	0.0119	3.965	<0.0001
<i>D</i> ²	-0.002	0.0001	-9.555	<0.0001

7.3.8. Proporción de carbono en madera de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*

El análisis estadístico bajo un diseño completamente aleatorio del porcentaje de carbono en los componentes arbóreos (carbono en fuste, ramas y follaje) de *P. oocarpa* no cumplió con el supuesto de normalidad del modelo (Shapiro-Wilk, $W = 0.85352$, $p = 0.01948$), por lo que se realizó el análisis mediante el método estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis, cuyo resultado fue: se rechaza que las medias de porcentaje de carbono en los componentes arbóreos sean iguales, ($KW=8.95$, $p=0.01$).

Entre los componentes arbóreos de *P. oocarpa*, el mayor porcentaje de carbono promedio está en el follaje (52.2%), sin diferencia estadística significativa con el carbono promedio existente en el fuste (51.4%), siendo las ramas el componente que presentan el menor contenido de carbono (Cuadro 17).

En relación al porcentaje promedio de carbono entre los componentes arbóreos de las cinco especies del género *Quercus* estudiadas en la microcuenca Hueyapa, el mayor porcentaje de carbono se registra en el follaje (49.6%), pero no se rechaza que las medias del porcentaje de carbono total de los tres componentes arbóreos sean iguales ($F=2.6$, $p=0.09$). El modelo estimado cumplió el supuesto de normalidad, independencia e igualdad de varianzas de los errores.

Cuadro 17. Concentración de carbono en los componentes aéreos.

Componente arbóreo	<i>P. oocarpa</i> ¹	<i>Quercus spp.</i> ²
Follaje (%)	52.2 ^a	49.6 ^a
Ramas (%)	50.4 ^b	48.3 ^a
Fuste (%)	51.4 ^a	48.9 ^a

Para una especie o grupo de especies, valores promedio con la misma literal no son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$). ¹Prueba de Kruskal-Wallis, ²Prueba de F

En la concentración de carbono en las especies del género *Quercus* (incluye: follaje, ramas y fuste) se cumplieron los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk $W=0.957$, $p=0.263$) y homogeneidad de varianzas (Levene's Test $F=0.298$, $Pr(>F) = 0.877$), por lo anterior se rechaza que las concentraciones de carbono entre las especies de *Quercus* sean iguales, ($F_{cal}=7.64$, $p=0.0001$).

Con base en la comparación de medias de Tukey (Cuadro 18) respecto a las cinco especies del género *Quercus* registradas en el inventario del bosque templado de la microcuenca, *Quercus elliptica* Néé presenta el mayor contenido promedio de carbono en sus componentes con 50.8% y el menor en *Quercus conspersa* Benth. con 48.2%, sin que entre éste último y las otras tres especies, exista diferencia estadística significativa.

Cuadro 18. Concentración de carbono en las especies del género *Quercus spp.*

Especie	Promedio (%)
<i>Q. elliptica</i> Néé	50.8 ^a
<i>Q. crispifolia</i> Trel.	48.8 ^b
<i>Q. resinosa</i> Liebm.	48.5 ^b
<i>Q. subspahulata</i> Trel.	48.3 ^b
<i>Q. conspersa</i> Benth.	48.2 ^b

Valores promedio con la misma literal no son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$)

La concentración media de carbono en los tres componentes arbóreos de *P. oocarpa* fue de $51.3 \pm 1.94\%$ y para las cinco especies del género *Quercus* fue de $48.9 \pm 2.6\%$, valores utilizados para la conversión de biomasa a carbono en las estimaciones del inventario forestal en esta investigación.

Las concentraciones de carbono determinadas son superiores a las recomendadas por defecto por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2006) de 47% para los bosques del mundo. Otros autores también reportan valores superiores como Jain et al. (2010) quienes sugieren utilizar 49.9% y 49.5% para convertir de biomasa a carbono en copa y fuste, respectivamente, para un bosque mixto de *P. ponderosa* y *Q. gambelli*.

En el estudio de 21 especies de coníferas en bosques de Nuevo León y Coahuila, México; Yerena, Jiménez, Aguirre, Treviño y Alanís (2012) encontraron una variación en el contenido de carbono en la biomasa de fuste entre 45.76% (*Pinus remota*) y un máximo de 51.18% (*Juniperus fláccida*), estimando un promedio de 48.39%, incluso ligeramente inferior al encontrado para fustes de *P. oocarpa* y *Quercus sp.* en esta investigación.

Para el bosque mesófilo de montaña de la Sierra Norte de Oaxaca, México, Figueroa-Navarro, et al. (2005) reportan 51.30% de concentración de carbono en aile (*Alnus sp.*) y 47.26% en encino (*Quercus spp.*), con un promedio general para las especies arbóreas dominantes de este ecosistema de 49.62%. El valor estimado de carbono en la biomasa de *Quercus spp.* por estos investigadores, fue menor al estimado para los encinos del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

7.4. Análisis del inventario forestal maderable

7.4.1. Estimaciones dasométricas en el ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa

En general, el lindero del bosque templado abarca 3,442.634 ha, de las cuales 2,761.915 corresponden al bosque de pino-encino y encino, 306.224 de protección, 51.868 de agricultura, 289.465 de acceso restringido y 33.142 huamilera (vegetación secundaria) (Figuras 16 y 19).

La superficie forestal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa correspondió a 2,761.915 ha, de las cuales 1,601.819 ha están cubiertas por bosque de pino-encino y 1,160.096 ha por bosque de encino. Estos estratos, se subdividieron en 16 y 17 rodales, respectivamente. El tamaño de la muestra del inventario forestal para el ecosistema (bosque templado) fue de 105 UPM, levantando información ecológica y dasométrica en 57 UPM en el estrato de pino-encino y 48 UPM en el estrato de encino.

El bosque templado está compuesto en su mayoría por árboles de seis especies de del género *Quercus*, destacando por orden de abundancia *Q. resinosa* Liebm., *Q. crispifolia* Trel., *Q. subespatulata* Trel., *Q. conspersa* Benth., *Q. elliptica* Née y *Q. planipocula* Trel.; seguido de árboles de *Pinus oocarpa* Schiede y en menor proporción de otras latifoliadas (Figura 17).

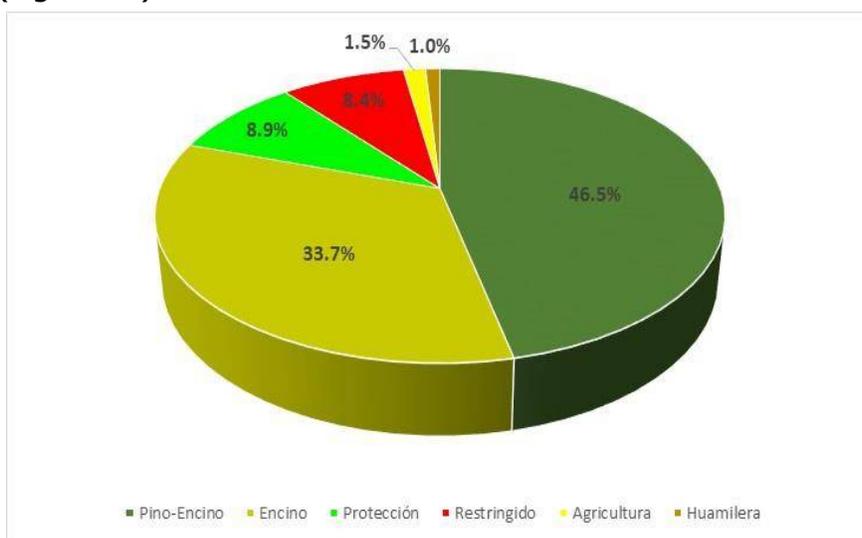


Figura 16. Uso de suelo y vegetación dentro del bosque templado.

El ecosistema de bosque templado es conservado y no existe registro de un aprovechamiento forestal maderable comercial, excepto vestigios de resinación comercial en arbolado adulto en toda la superficie, actividad desarrollada entre los años 1960 y 1970.

Los árboles inventariados presentan diámetro normal hasta de 85 cm, con marcada presencia de árboles jóvenes en los tres grupos de vegetación, que muestran un gráfico de distribución de "J" invertida (Figura 18). Los resultados de las estimaciones promedio de las variables dasométricas por rodal se resumen en el Cuadro 19. Se observa el número de árboles entre 247.9 en el rodal 111 (arbolado adulto) y 853.1 en el rodal 107 (arbolado joven), justificado en la similitud en su área basal de 22.8042 y 22.6813 m² ha⁻¹, respectivamente, ambos en el ecosistema de P-Q.

El área basal promedio por rodal en todo el ecosistema de bosque templado fluctúa entre 16.0525 m² ha⁻¹ del rodal 081 del ecosistema de *Quercus* y 27.0563 m² ha⁻¹ del rodal 052 del ecosistema *Pinus-Quercus*, observando concordancia en el volumen promedio en los mismos rodales, con 97.2700 m³ ha⁻¹ y 276.8922 m³ ha⁻¹ como el más bajo y más alto, respectivamente (Cuadro 19).

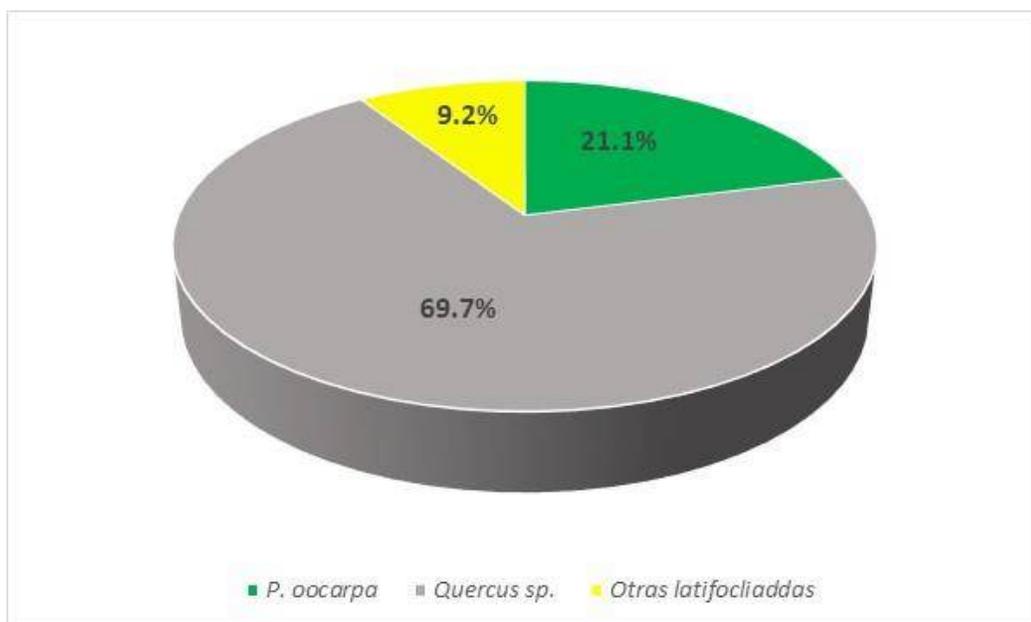


Figura 17. Distribución de la vegetación arbórea del bosque templado.

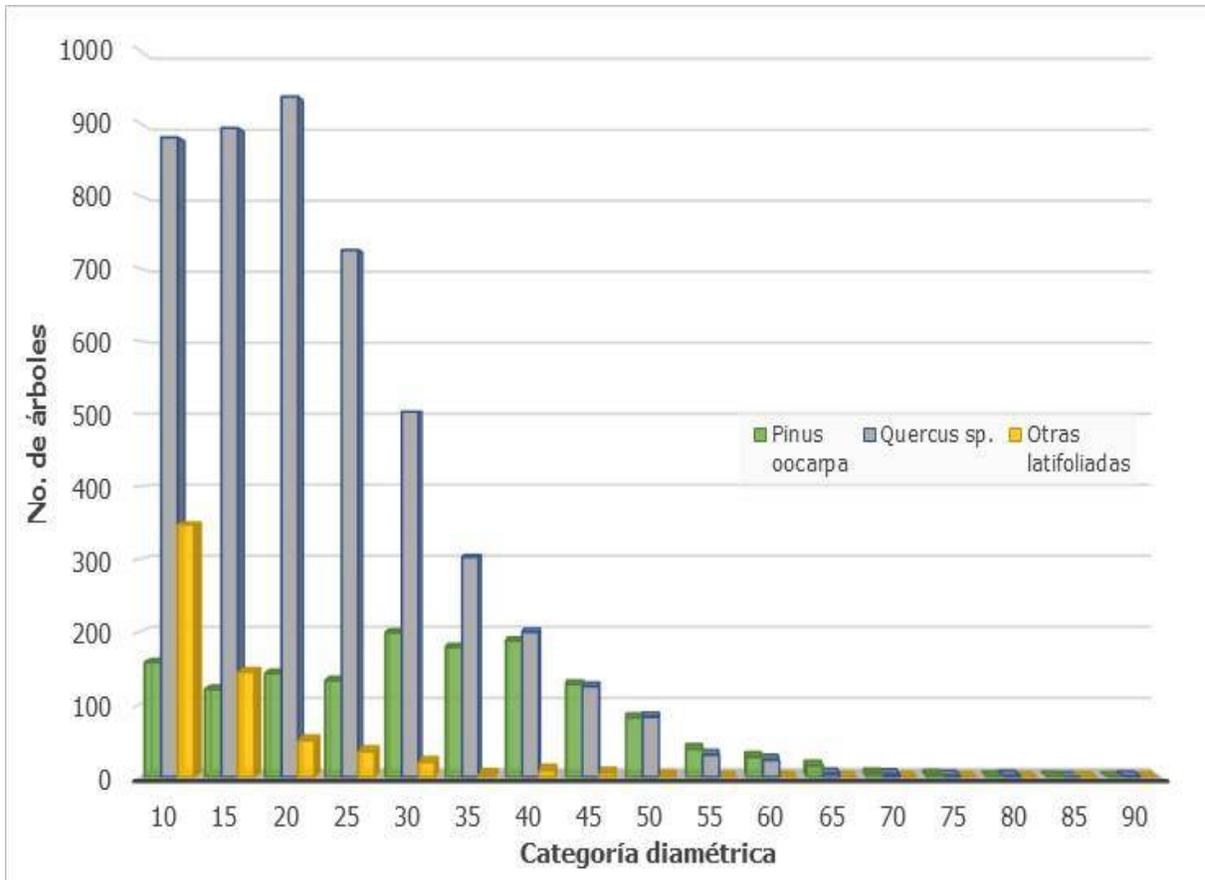


Figura 18. Distribución arbórea por categoría diamétrica del bosque templado.

El reservorio promedio y total por estrato y del ecosistema global bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa se resumen en el Cuadro 20. El número de árboles promedio por hectárea es superior en el estrato de *Q*; sin embargo, sus menores dimensiones dasométricas las pone de manifiesto al presentar menor área basal, volumen y biomasa aérea promedio comparado al estrato de *P-Q*.

El área basal promedio del ecosistema del bosque templado de la microcuenca fue de $22.8823 \pm 0.9156 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, con un volumen promedio de $212.4642 \pm 13.0787 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $150.2517 \pm 10.6619 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa aérea promedio (Cuadro 20).

Cuadro 19. Variables dasométricas promedio estimadas por rodal.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	No. de árboles	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹)	Carbono aéreo (Mg ha ⁻¹)
008	P-Q	60.582	306.3	21.0094	218.7938	102.8587	51.8646
025	P-Q	140.877	312.7	23.1698	246.7323	152.4057	77.1378
027	P-Q	112.400	381.3	22.4750	211.0266	144.9891	72.6459
032	P-Q	177.492	385.9	22.8516	229.7383	155.4957	78.0916
036	P-Q	39.971	422.9	22.8250	209.7292	135.0016	67.2273
043	P-Q	66.200	343.8	23.9438	212.5250	163.4406	80.9765
045	P-Q	115.340	437.5	24.5083	250.6083	185.1848	92.2871
047	P-Q	141.536	328.1	26.6297	265.5375	194.9098	97.1995
052	P-Q	108.526	281.3	27.0563	276.8922	189.5602	95.0124
054	P-Q	100.885	356.3	25.1141	265.3656	174.5984	88.4082
060	P-Q	125.344	421.9	20.2266	197.1078	133.1565	62.5232
062	P-Q	150.712	400.0	18.3547	181.3438	111.5379	56.4699
063	P-Q	88.156	331.3	24.5500	128.5563	161.3868	81.2057
107	P-Q	53.557	853.1	22.6813	210.1719	140.2359	70.2845
108	P-Q	45.055	409.4	24.9219	238.0469	173.3151	85.9959
111	P-Q	75.186	247.9	22.8042	211.6521	163.2799	81.5788
002	Q	84.127	541.7	25.0368	226.9497	169.6503	83.2552
017	Q	180.097	303.1	25.2000	230.7197	173.6149	85.9844
024	Q	56.688	302.1	17.9245	155.1009	105.7261	51.9437
028	Q	57.193	360.9	25.9633	234.7647	180.6922	89.5064
031	Q	53.995	479.2	16.5685	128.3915	81.3133	40.1626
035	Q	54.597	447.9	22.7157	215.1437	151.0308	74.0436
037	Q	92.929	404.7	23.4172	201.6191	148.4149	72.7817
051	Q	88.264	325.0	22.9792	220.3167	158.3182	78.9933
061	Q	127.254	503.1	24.8781	227.2156	172.3896	84.6743
071	Q	74.156	404.2	17.9396	146.3229	98.6455	48.5499
072	Q	67.218	487.5	23.7969	199.8516	135.5422	66.4559
076	Q	65.186	512.5	20.8616	179.2903	122.2138	59.9649
081	Q	49.167	331.3	16.0525	97.2700	82.2508	40.3132
084	Q	19.977	409.4	18.9281	157.3359	112.7072	55.6911
085	Q	19.759	540.6	18.5531	132.7813	81.7919	40.1965
105	Q	43.720	625.0	21.3188	166.8563	105.0104	51.4792
106	Q	26.769	706.3	22.4844	183.6281	135.0607	66.2064

P-Q = estrato de *Pinus* – *Quercus* spp., Q = estrato de *Quercus* spp.

7.4.2. Estimaciones de biomasa y carbono aéreo en el ecosistema bosque templado

El reservorio de biomasa aérea promedio por rodal tiene una variación entre 81.3133 Mg ha⁻¹ y 194.9098 Mg ha⁻¹, y el reservorio de carbono promedio por rodal fluctúa entre 40.1626 Mg ha⁻¹ y 97.1995 Mg ha⁻¹, para los rodales 031 y 047, correspondiente al ecosistema *Q* y *P-Q*, respectivamente (Cuadro 19 y Figura 20).

La biomasa aérea promedio del estrato P-Q (Cuadro 20) de la microcuenca del río Hueyapa (156.2659±15.5485 Mg ha⁻¹) es menor a la estimada por González (2008) en los bosques con dominancia de *Pinus maximinoi* H. E. Moore (161.97 Mg ha⁻¹), pero mayor a la biomasa estimada en bosques con dominancia de *P. oocarpa* (142.23 Mg ha⁻¹), ambos ubicados al norte de Chiapas, México.

El rango de la densidad de biomasa aérea en los bosques templados del mundo varía entre 4.7 y 982.5 Mg ha⁻¹ (Cairns, Brown, Helmer, & Baumgardener, 1997). En un bosque mixto pino-encino al sur de Nuevo León, México, con 275 individuos promedio por hectárea Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) estimaron 93.91 Mg ha⁻¹ de biomasa aérea. Es probable que la baja densidad de arbolado en el ecosistema anterior, comparada con la vegetación del estrato P-Q de ésta microcuenca (376.2 árboles ha⁻¹), explique la menor cantidad de biomasa en ese ecosistema.

De igual manera, Návar-Cháidez (2010) estimó la densidad de biomasa aérea promedio en 74.16±11.89 Mg ha⁻¹ para los bosques templados del estado de Nuevo León, mismos que presentan una densidad de 424±64 árboles por hectárea, pero con diámetros y alturas menores a los promedios del bosque templado de la microcuenca Hueyapa, lo que justifica su menor cantidad de biomasa promedio por hectárea comparada con esta investigación.

Cuadro 20. Reservorio por estrato y ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

	Vegetación	Superficie (ha)	No. árboles	Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹)	Carbono aéreo (Mg ha ⁻¹)
Promedio	P-Q	1,601.819	376.2 ± 35.3	23.2241 ± 1.3013	224.4383 ± 20.0855	156.2659 ± 15.5485	78.0437 ± 5.6950
	Q	1,160.096	427.3 ± 35.2	22.4106 ± 1.2346	195.9389 ± 14.1632	141.9516 ± 13.5461	69.9458 ± 8.0088
	Bosque templado	2,701.915	397.6 ± 25.2	22.8823 ± 0.9156	212.4642 ± 13.0787	150.2517 ± 10.6619	74.6413 ± 6.3442
		Superficie (ha)	No. árboles	Área Basal (m ²)	Volumen (m ³)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)
Total	P-Q	1,601.819	599,594.3 ± 56,357.1	37,019.3 ± 2,074.2	357,754.7 ± 32,016.3	249,087.8 ± 24,784.3	124,401.6 ± 9,077.8
	Q	1,160.096	493,516.1 ± 40,667.2	25,884.2 ± 1,425.9	226,309.4 ± 16,358.5	163,954.1 ± 15,645.71	80,787.4 ± 9,250.2
	Bosque templado	2,701.915	1,093,110.4 ± 69,497.8	62,903.5 ± 2,517.0	584,064.1 ± 35,953.4	413,041.9 ± 29,309.6	205,189.0 ± 12,960.4

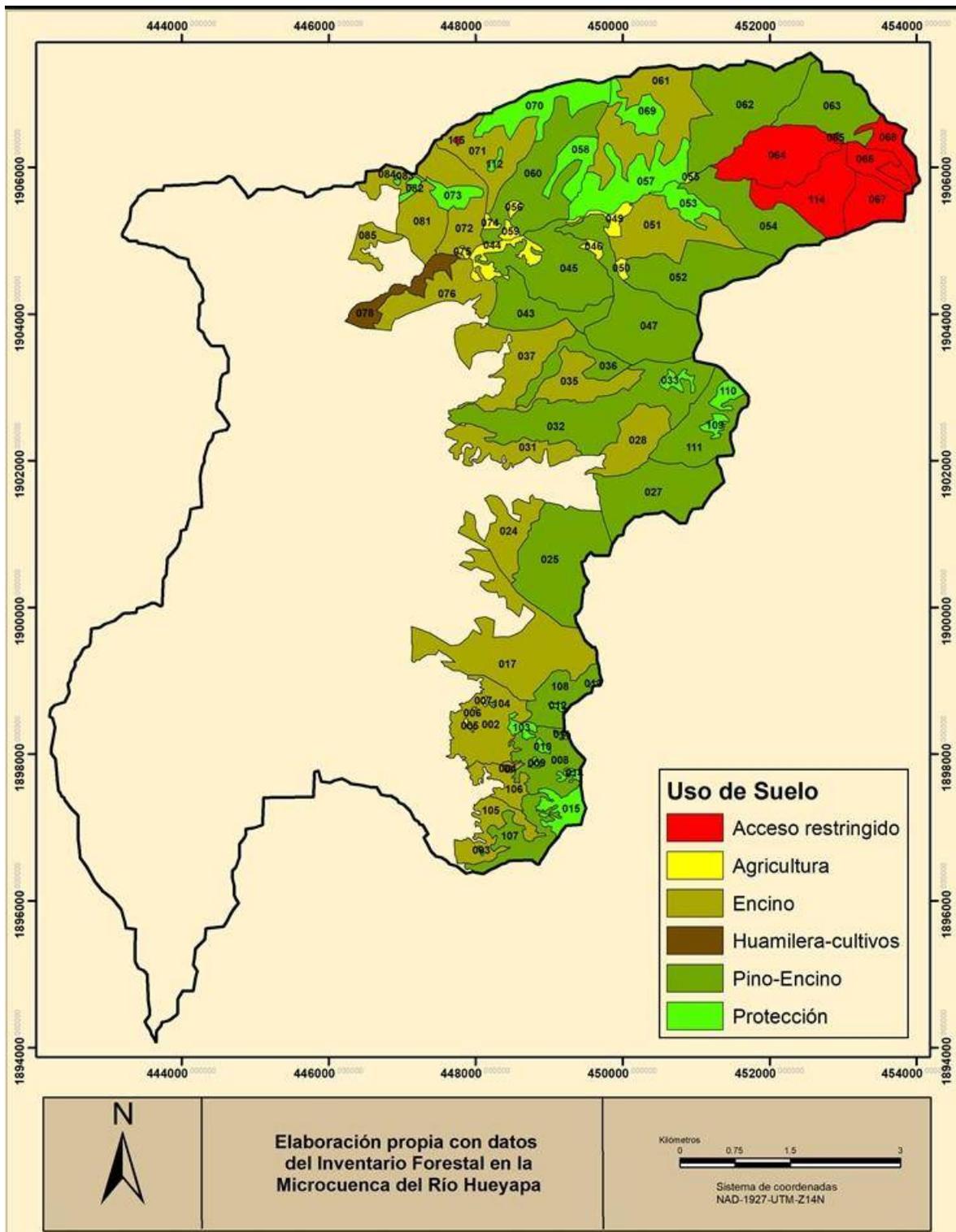


Figura 19. Uso de suelo y vegetación en el área del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

En los bosques de la Sierra Norte de Oaxaca, México, Galicia et al. (2015) estimaron la biomasa aérea total en 347 Mg ha^{-1} para la vertiente húmeda y 225 Mg ha^{-1} para la vertiente seca, superior en 2.3 y 1.5 veces a la estimación realizada para el bosque templado la microcuenca Hueyapa, respectivamente. De igual forma, la biomasa aérea promedio estimada para la microcuenca en estudio es baja comparada con lo reportado por Binkley & Ryan (1998) de 323 Mg ha^{-1} y 216 Mg ha^{-1} para una plantación de 16 años de edad de *Eucalyptus saligna* y *Albizia falcataria*, respectivamente.

En el estero prístino El Sargento en Sonora, México, con dominancia de *Laguncularia racemosa* (L.), Gaertn, Bautista-Olivas et al. (2018) estimaron la biomasa aérea entre 108.1 y 316.0 Mg ha^{-1} , rango en que se ubica la estimación promedio de esta variable para el bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

El estrato de *Pinus-Quercus*, con una superficie de $1,601.819 \text{ ha}$ acumula un reservorio de carbono aéreo de $124,401.6 \pm 9,077.8 \text{ Mg}$; mientras que en $1,160.096 \text{ ha}$ del estrato *Quercus* el reservorio es de $80,787.4 \pm 9,250.2 \text{ Mg}$ y en su conjunto, el ecosistema de bosque templado de esta microcuenca tiene un reservorio de $205,189.0 \pm 12,960.4 \text{ Mg}$ de carbono en la parte aérea (Cuadro 20).

El reservorio promedio de carbono aéreo estimado en el estrato P-Q es de $78.0437 \pm 5.6950 \text{ Mg ha}^{-1}$, $69.9458 \pm 8.0088 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el estrato Q y $74.6413 \pm 4.7146 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el ecosistema en general para árboles con diámetro normal mayor o igual a 7.5 cm , con mayor concentración en los rodales de pino-encino para los rodales con mayor altitud (Cuadro 20 y Figura 21).

Los datos de carbono estimados para el bosque templado de la microcuenca Hueyapa son ligeramente superiores a la densidad total de carbono para los bosques templados continentales del mundo, la cual se estima en $61 \pm 31 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Pan, Birdsey, Phillips & Jackson, 2013). Así mismo, Girardin et al. (2014) estimaron para el bosque mesófilo de montaña en Los Andes peruanos entre 59.5 y 72.9 Mg ha^{-1} de carbono.

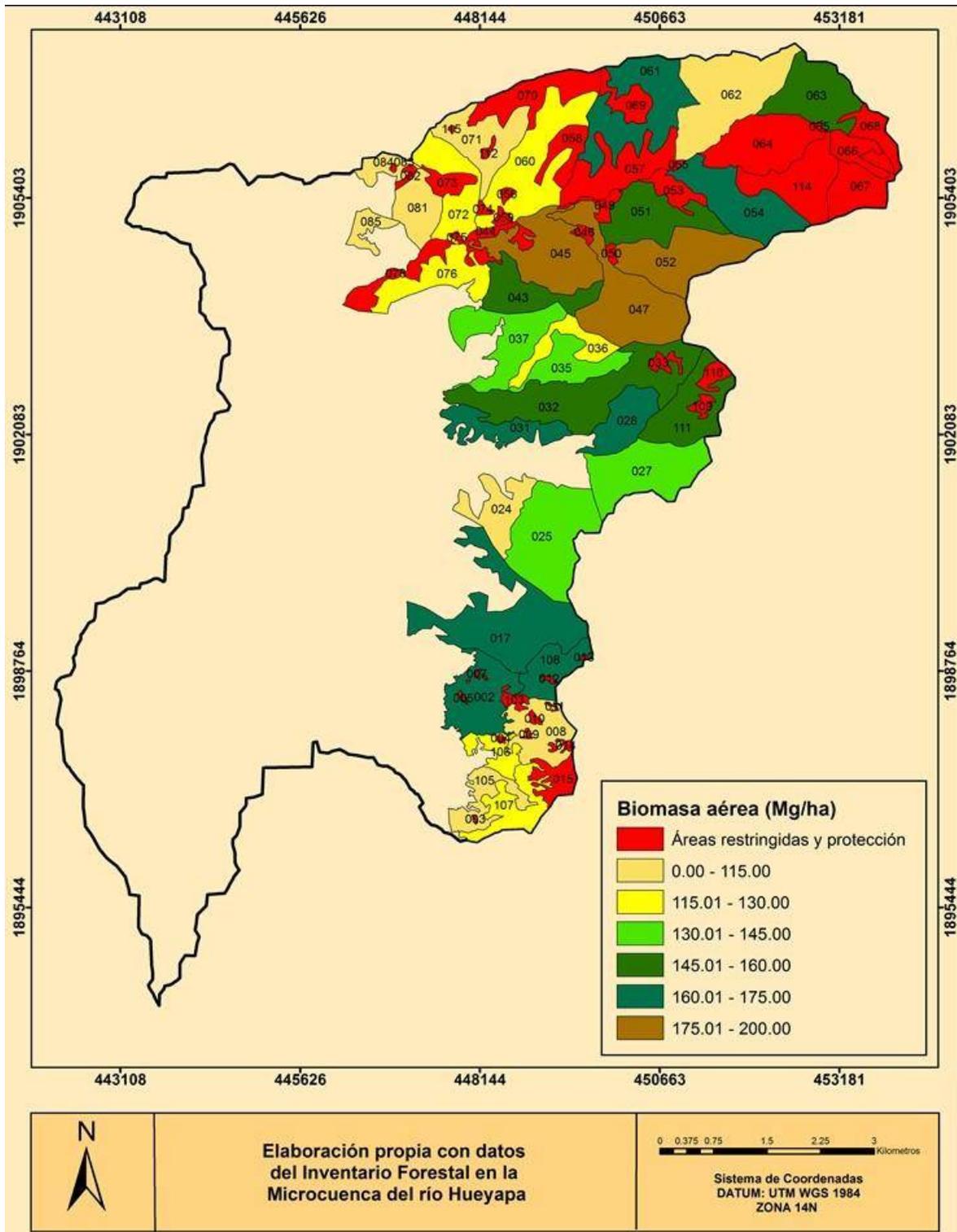


Figura 20. Distribución de biomasa aérea en el estrato arbóreo de la vegetación de clima templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Situación similar se observa en los datos reportados por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) de 45.24 Mg ha⁻¹ de reservorio de carbono aéreo para el bosque mixto de pino-encino (*P. pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus spp.*) al sur de Nuevo León, México.

Gough, Vogel, Harrold, George, y Curtis (2007) estimaron el reservorio de carbono en 8.8. Mg ha⁻¹ en bosques jóvenes (seis años), incrementándose hasta aproximadamente 55 Mg ha⁻¹ en bosques maduros (>60 años) al interior del bosque transicional mixto (incluye *Quercus rubra*) y boreal en Michigan, EEUU; que a pesar de contener 2,133 árboles ha⁻¹ y 26.7 m² ha⁻¹ de área basal, su reservorio de biomasa no fue superior a la estimada para el bosque templado de la microcuenca Hueyapa, con densidad arbórea y área basal menores.

En el bosque de pino-encino de la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí, México, Jiménez et al. (2012) estimaron el contenido de carbono en 152.04 Mg ha⁻¹ y para el bosque de encino 207.97 Mg ha⁻¹, estimaciones muy superiores a las encontradas para el estrato P-Q (78.0437 Mg ha⁻¹) y estrato Q (69.9458 Mg ha⁻¹) de la microcuenca en estudio.

Las selvas tropicales del ejido Noh Bec en Quintana Roo, México tienen un reservorio de carbono estimado en 353.341 Mg ha⁻¹ (Bautista-Hernández & Torres-Pérez, 2003), superior en más de cuatro veces al reservorio aéreo de carbono del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

El carbono promedio estimado del área forestal de la cuenca río Magdalena, D. F., México fue entre 39 y 107 Mg ha⁻¹ *Abies religiosa*-*Pinus hartwegii* en bosques abiertos y cerrados, respectivamente (Galeana-Pizaña, Ordóñez-Díaz, & Corona Romero, 2013). También Bautista-Olivas et al. (2018) estimaron el reservorio de carbono aéreo entre 54.1 y 158.4 Mg ha⁻¹ para el estero El Sargento en Sonora, México, rangos en que se estiman los promedios para los estratos y del ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

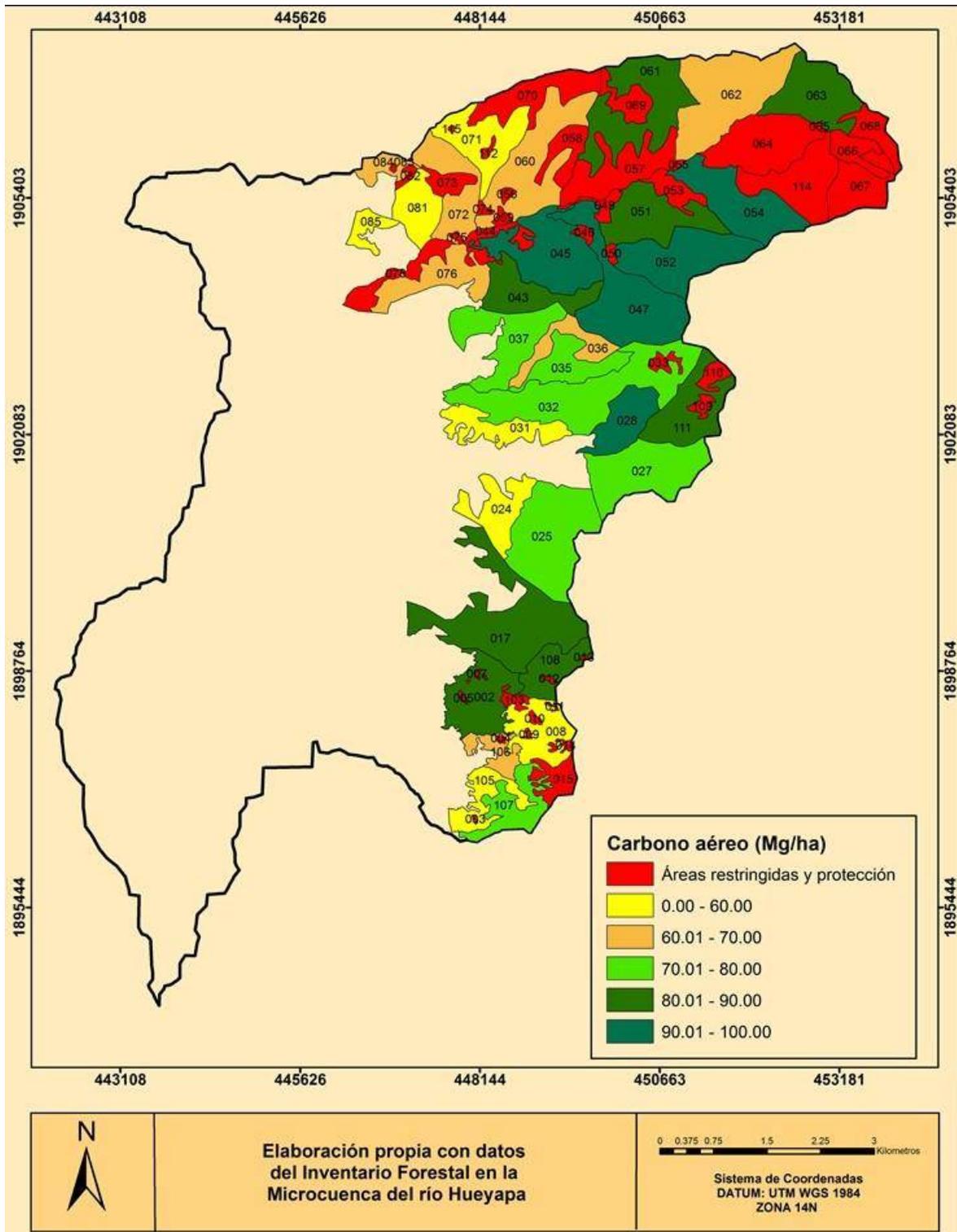


Figura 21. Distribución de carbono aéreo en el estrato arbóreo de la vegetación de clima templado de la microcuenca del río Hueyapa.

7.4.3. Volumen, necromasa y carbono en arbolado muerto en píce

En dos (12.5%) rodales del ecosistema P-Q existe arbolado muerto, así como en cuatro (23.5%) de los rodales del ecosistema Q (Cuadro 21). El volumen, biomasa y carbono en arbolado muerto representa el 0.29%, 0.23% y 0.23% del reservorio vivo, respectivamente.

El volumen ($2.6480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), biomasa ($1.7316 \text{ Mg ha}^{-1}$) y carbono ($0.8903 \text{ Mg ha}^{-1}$) promedio de arbolado muerto en píce del ecosistema de bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa es muy bajo comparado con lo reportado por Navarrete et al. (2011) para los bosques naturales andinos de Antioquía, Colombia de $19.18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, 16.33 Mg ha^{-1} y 8.18 Mg ha^{-1} en volumen, biomasa y carbono, respectivamente.

Aunque la presencia de incendios forestales en la microcuenca ha sido frecuente, la biomasa y carbono estimado en arbolado muerto en píce es bajo comparado con las reportadas por Razo-Zárate, Gordillo-Martínez, Rodríguez-Lagunas, Moycotte-Morales, y Acevedo-Sandoval (2013) en el bosque de oyamel y encinos del Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México, después de ocurrido un incendio forestal estimaron una biomasa de árboles muertos en píce de 41.20 Mg ha^{-1} que representan 18.54 Mg ha^{-1} de carbono.

En promedio, el reservorio de carbono en arbolado muerto en píce es de $1.2009 \pm 0.6939 \text{ Mg ha}^{-1}$ en el ecosistema P-Q y $0.4616 \pm 0.2153 \text{ Mg ha}^{-1}$ Q. Así, el reservorio promedio de carbono en este compartimento en el ecosistema de bosque templado de la microcuenca es de $0.8903 \pm 0.4213 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Cuadro 22), que representa tan solo el 1.04% del reservorio promedio de carbono del arbolado vivo.

Cuadro 21. Reservorio promedio en arbolado muerto en p e por rodal.

Rodal	Vegetaci3n	Superficie (ha)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
008	P-Q	60.582	0.2844	0.0716	0.0358
025	P-Q	140.877	9.9510	1.0662	0.9560
027	P-Q	112.400	4.3047	3.9726	2.0251
032	P-Q	177.492	1.6023	1.1719	0.5953
036	P-Q	39.971	2.8854	1.9869	0.9748
043	P-Q	66.200	0.0000	0.0000	0.0000
045	P-Q	115.340	0.0000	0.0000	0.0000
047	P-Q	141.536	4.5859	3.3895	1.7214
052	P-Q	108.526	6.2047	7.0038	3.5653
054	P-Q	100.885	3.4344	2.5321	1.2767
060	P-Q	125.344	0.1438	0.0883	0.0433
062	P-Q	150.712	3.0318	1.9603	0.9915
063	P-Q	88.156	5.7406	4.5265	2.2180
107	P-Q	53.557	1.2750	0.8441	0.4152
108	P-Q	45.055	11.3875	11.8999	5.8059
111	P-Q	75.186	0.8813	0.5424	0.2674
002	Q	84.127	4.6729	2.8499	1.3967
017	Q	180.097	1.7359	1.1266	0.5522
024	Q	56.688	0.1917	0.1191	0.0584
028	Q	57.193	0.3297	0.2064	0.1011
031	Q	53.995	0.0000	0.0000	0.0000
035	Q	54.597	2.6667	1.7604	0.8626
037	Q	92.929	2.4703	1.7715	0.8685
051	Q	88.264	0.0000	0.0000	0.0000
061	Q	127.254	0.7063	0.3367	0.1657
071	Q	74.156	0.0000	0.0000	0.0000
072	Q	67.218	2.4547	1.6794	0.8229
076	Q	65.186	3.2500	2.0837	1.0210
081	Q	49.167	1.7000	1.0005	0.4931
084	Q	19.977	0.5875	0.3637	0.1782
085	Q	19.759	0.9469	0.5883	0.2882
105	Q	43.720	0.0000	0.0000	0.0000
106	Q	26.769	0.8406	0.4138	0.2034

Cuadro 22. Reservorio de arbolado muerto en pie por estrato y del ecosistema bosque templado.

	Vegetación	Superficie (ha)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Promedio	P-Q	1,601.819	3.4967 ± 1.9524	2.3041 ± 1.3622	1.2009 ± 0.6939
	Q	1,160.096	1.4766 ± 0.6714	0.9415 ± 0.4393	0.4616 ± 0.2153
	Bosque templado	2,701.915	2.6480 ± 1.1971	1.7316 ± 0.8299	0.8903 ± 0.4213
			Volumen (m ³)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)
Total	P-Q	1,601.819	5,573.7 ± 3,112.1	3,672.8 ± 217.1	1,914.3 ± 1,106.2
	Q	1,160.096	1,705.5 ± 1,070.2	1,087.5 ± 700.3	533.1 ± 343.3
	Bosque templado	2,701.915	7,279.3 ± 3,290.9	4,760.3 ± 2,281.5	2,447.4 ± 1,158.2

7.4.4. Incremento corriente anual (ICA) en área basal, volumen, biomasa y carbono

El rodal 063 del estrato P-Q presentó el mayor incremento en área basal (1.1556 m² ha⁻¹ año⁻¹). Todos los rodales del estrato P-Q presentaron un incremento en área basal superior o igual a 0.4231 m² ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 23). El incremento promedio de área basal del estrato P-Q se estimó en 0.6575±0.0896 m² ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 24).

Los ocho rodales con mayor incremento en área basal en el estrato P-Q presentan exposición norte, noreste o noroeste, en donde, en teoría, existe mayor humedad derivado de la menor incidencia de los rayos solares, con excepción del rodal 062 que presenta exposición sur ubicado en la zona de la cañada, cuyo valor de incremento en área basal (0.7338 m² ha⁻¹ año⁻¹) supera el promedio por hectárea.

En el estrato Q el incremento promedio en área basal es de $0.5726 \pm 0.0653 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Cuadro 24) y el 35.3% de los rodales del estrato Q tuvieron incremento superior a $0.6716 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en unidades de manejo (rodales) con exposiciones norte y sus combinaciones. Destaca el rodal 085, que, con exposición sureste, presenta un incremento en área basal de $0.8216 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con presencia de cinco de las seis especies de *Quercus spp.* existentes en la microcuenca en tan solo 19.759 ha de bosque (Cuadro 23).

El incremento promedio en volumen, biomasa y carbono para el ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa es $9.6906 \pm 0.7737 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, $7.8283 \pm 0.7166 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $3.8865 \pm 0.3527 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 24).

El máximo de incremento en volumen en el estrato P-Q se registró en el rodal 063 con $15.0897 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y en el estrato Q en el rodal 072 con $13.5934 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En el estrato P-Q, el máximo incremento en biomasa y carbono se registró en el rodal 063 con 11.1328 y $5.5797 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente y en el estrato Q el máximo registro se localizó en el rodal 028 con $12.7043 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de biomasa y $6.2476 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono (Cuadro 23).

Los incrementos de biomasa estimados para el bosque templado de la microcuenca el río Hueyapa ($7.8283 \pm 0.7166 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) al igual que el incremento en carbono ($3.8865 \pm 0.3527 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), son superiores a las estimaciones de carbono reportados por Girardin et al. (2014) para el bosque mesófilo de montaña en Los Andes peruanos de $1.5 \pm 0.15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $1.20 \pm 0.12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; con una productividad primaria neta global en carbono entre 7.05 ± 0.39 y $8.04 \pm 0.47 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Cuadro 23. ICA promedio por rodal.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Área basal (m ² ha ⁻¹ año ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Carbono aéreo (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
008	P-Q	60.582	0.4650	8.1419	4.3659	2.2002
025	P-Q	140.877	0.4983	7.4054	4.7697	2.3975
027	P-Q	112.400	0.4231	7.8290	6.7558	3.3486
032	P-Q	177.492	0.4848	9.0524	4.7887	2.4036
036	P-Q	39.971	0.4496	8.4819	6.7747	3.3445
043	P-Q	66.200	0.6421	11.6150	9.6389	4.7520
045	P-Q	115.340	0.6421	11.6150	9.6389	4.7520
047	P-Q	141.536	0.8734	13.1041	9.1871	4.5951
052	P-Q	108.526	0.7319	9.1656	6.7270	3.3833
054	P-Q	100.885	0.9209	10.6550	8.3163	4.1985
060	P-Q	125.344	0.5794	9.1042	6.6232	3.5085
062	P-Q	150.712	0.7338	8.6284	6.4952	3.2788
063	P-Q	88.156	1.1556	15.0897	11.1328	5.5797
107	P-Q	53.557	0.6872	12.9266	9.6500	4.7901
108	P-Q	45.055	0.6872	12.9266	9.6500	4.7901
111	P-Q	75.186	0.5009	7.8416	6.0177	3.0021
002	Q	84.127	0.6867	9.5169	8.2057	4.0283
017	Q	180.097	0.6867	9.5169	8.2057	4.0283
024	Q	56.688	0.5153	7.5666	9.3925	4.6064
028	Q	57.193	0.5508	11.0994	12.7043	6.2476
031	Q	53.995	0.4804	6.9725	6.9543	3.4211
035	Q	54.597	0.5328	10.4341	9.7649	4.7899
037	Q	92.929	0.5328	10.4341	9.7649	4.7899
051	Q	88.264	0.7706	9.3828	9.7259	4.7986
061	Q	127.254	0.6716	12.1259	11.9544	5.8604
071	Q	74.156	0.3991	6.2672	4.4934	2.2069
072	Q	67.218	0.6772	13.5934	12.0858	5.9226
076	Q	65.186	0.3991	6.2672	4.4934	2.2069
081	Q	49.167	0.2416	5.1744	3.7057	1.7271
084	Q	19.977	0.2416	5.1744	3.7057	1.7271
085	Q	19.759	0.8216	11.3469	10.2697	5.0424
105	Q	43.720	0.4500	7.4544	7.0370	3.4490
106	Q	26.769	0.4500	7.4544	7.0370	3.4490

Cuadro 24. ICA promedio y total por estrato y ecosistema bosque templado.

	Vegetación	Superficie (ha)	Área Basal (m ² ha ⁻¹ año ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Carbono aéreo (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Promedio	P-Q	1,601.819	0.6575 ± 0.0896	10.0098 ± 1.0073	7.2618 ± 0.9305	3.6435 ± 0.4588
	Q	1,160.096	0.5726 ± 0.0653	9.2499 ± 0.8748	8.6101 ± 0.8132	4.2217 ± 0.3991
	Bosque templado	2,701.915	0.6218 ± 0.0643	9.6906 ± 0.7737	7.8283 ± 0.7166	3.8865 ± 0.3527
		Superficie (ha)	Área Basal (m ² año ⁻¹)	Volumen (m ³ año ⁻¹)	Biomasa (Mg año ⁻¹)	Carbono (Mg año ⁻¹)
Total	P-Q	1,601.819	1,047.9 ± 142.8	15,955.7 ± 1,605.7	11,575.3 ± 1,483.2	5,807.8 ± 731.4
	Q	1,160.096	7661.37 ± 104.1	10,683.7 ± 1,394.6	9,944.7 ± 1,296.3	4,876.1 ± 636.2
	Bosque templado	2,701.915	1,709.4 ± 176.7	26,639.3 ± 2,126.7	21,520.01 ± 1,969.9	10,683.9 ± 969.4

Gough et al. (2007) estimaron el incremento promedio anual en biomasa para los bosques mixtos del lago de Michigan, Michigan, EEUU, en 1.35 Mg ha⁻¹ año⁻¹ a 24 años de edad y desciende a 0.95 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para rodales de más de 50 años, datos claramente inferiores a los estimados en esta investigación.

La tasa de captura de carbono estimada por Jiménez et al. (2012) para los bosques de encino de la reserva forestal "Xilitla", San Luis Potosí, México fue de 3.85 Mg ha⁻¹ año⁻¹, menor a la obtenida para el estrato Q (4.2217±0.3991 Mg ha⁻¹ año⁻¹) de ésta microcuenca.

Sin embargo, Binkley y Ryan (1998) estimaron un incremento en biomasa de 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en plantaciones forestales tropicales de *Eucalyptus saligna* y *Albizia falcataria*. Ares y Fownes (2000) reportaron una tasa de incremento para *E. saligna* entre 15.8 y 23.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y *Toona ciliata* entre 8.0 y 11.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en

todos los casos superiores a los estimados para el bosque templado natural de la microcuenca del río Hueyapa.

En el Cuadro 25 se registran los incrementos promedio anual en diámetro normal, área basal, biomasa y carbono, por categoría diamétrica (CD; en cm) para *P. oocarpa*.

El máximo incremento en diámetro normal en *P. oocarpa* se observó en las CD65 y CD55 con 0.71 y 0.70 cm año⁻¹, sin diferencia estadística significativa entre las CD 40, 45, 50, 65 y 70. La CD con menor incremento anual en diámetro fueron las CD10 y CD15 con 0.35 cm.

El mayor incremento anual en área basal por árbol se estimó para las CD's 65 y 55 cm con 0.0072 y 0.0061 m² año⁻¹; mientras que el menor incremento con 0.0005 m² año⁻¹ se observó en la CD10 (Cuadro 25).

Aunque con mayor variabilidad, el incremento en volumen por árbol tuvo un comportamiento similar al incremento en diámetro; con 0.1070 m³ año⁻¹ la CD65 fue la de mayor incremento anual, sin diferencia estadística significativa con la CD 55 (0.0951 m³ año⁻¹). La de menor incremento anual en área basal fue la CD10 con tan solo 0.0045 m³ año⁻¹.

El mayor incremento anual en biomasa (76.37 kg año⁻¹) y carbono (38.95 kg año⁻¹) por árbol, se obtuvo en la CD65, sin que exista diferencia estadística significativa con la CD 55; el menor incremento en estas variables dasométricas fue para la CD10 con 2.43 y 1.24 kg año⁻¹ por árbol de biomasa y carbono, respectivamente.

En categoría diamétrica de 10 cm, en al menos un árbol existió decremento en diámetro entre uno y dos milímetros en árboles suprimidos, probablemente derivado de una mayor competencia arbórea en edades tempranas de desarrollo. Las CD50 CD55 y CD60 presentaron la mayor variabilidad en incremento diamétrico e incremento en área basal (Figura 22a y 22b). El comportamiento en el incremento anual en biomasa y carbono (Figuras 23a, 23b) fue similar con mayores incrementos

en categorías superiores puesto que un incremento, aunque mínimo en diámetro normal, arroja altos incrementos en biomasa y carbono.

Cuadro 25. ICA promedio por árbol por categoría diamétrica en *Pinus oocarpa*.

Categoría diamétrica	n	Diámetro Normal (cm árbol ⁻¹)	Área basal (m ² árbol ⁻¹)	Biomasa (kg árbol ⁻¹)	Carbono (kg árbol ⁻¹)
CD10	126	0.35 ^b	0.0005 ^e	2.43 ^g	1.24 ^g
CD15	105	0.35 ^b	0.0008 ^e	4.75 ^f	2.42 ^f
CD20	128	0.46 ^b	0.0015 ^d	9.28 ^e	4.73 ^e
CD25	109	0.45 ^b	0.0018 ^d	12.50 ^{de}	6.38 ^{de}
CD30	174	0.39 ^b	0.0019 ^d	14.41 ^{de}	7.35 ^{de}
CD35	148	0.47 ^b	0.0026 ^d	21.41 ^d	10.92 ^d
CD40	157	0.50 ^{ab}	0.0032 ^d	27.50 ^d	14.02 ^d
CD45	113	0.57 ^a	0.0040 ^c	37.67 ^c	19.21 ^c
CD50	62	0.54 ^{ab}	0.0042 ^{bc}	40.78 ^{bc}	20.80 ^{bc}
CD55	32	0.70 ^a	0.0061 ^{ab}	64.06 ^{ab}	32.67 ^{ab}
CD60	15	0.49 ^b	0.0048 ^d	49.58 ^{cd}	25.29 ^{cd}
CD65	12	0.71 ^a	0.0072 ^a	76.37 ^a	38.95 ^a
CD70	3	0.60 ^{ab}	0.0067 ^{cd}	72.26 ^{cd}	36.85 ^{cd}
Chi		63.08	343.79	415.82	415.82
p		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Dentro de una variable, valores promedio con la misma literal no son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$)

En general para *P. oocarpa*, el máximo incremento en casi todas sus variables dasométricas se registró entre las CD's 55 a la 70, por lo que se puede considerar que en estas categorías diamétricas alcanzaría la máxima productividad y el máximo efecto mitigador del cambio climático por parte del bosque de *P. oocarpa* de la microcuenca en estudio.

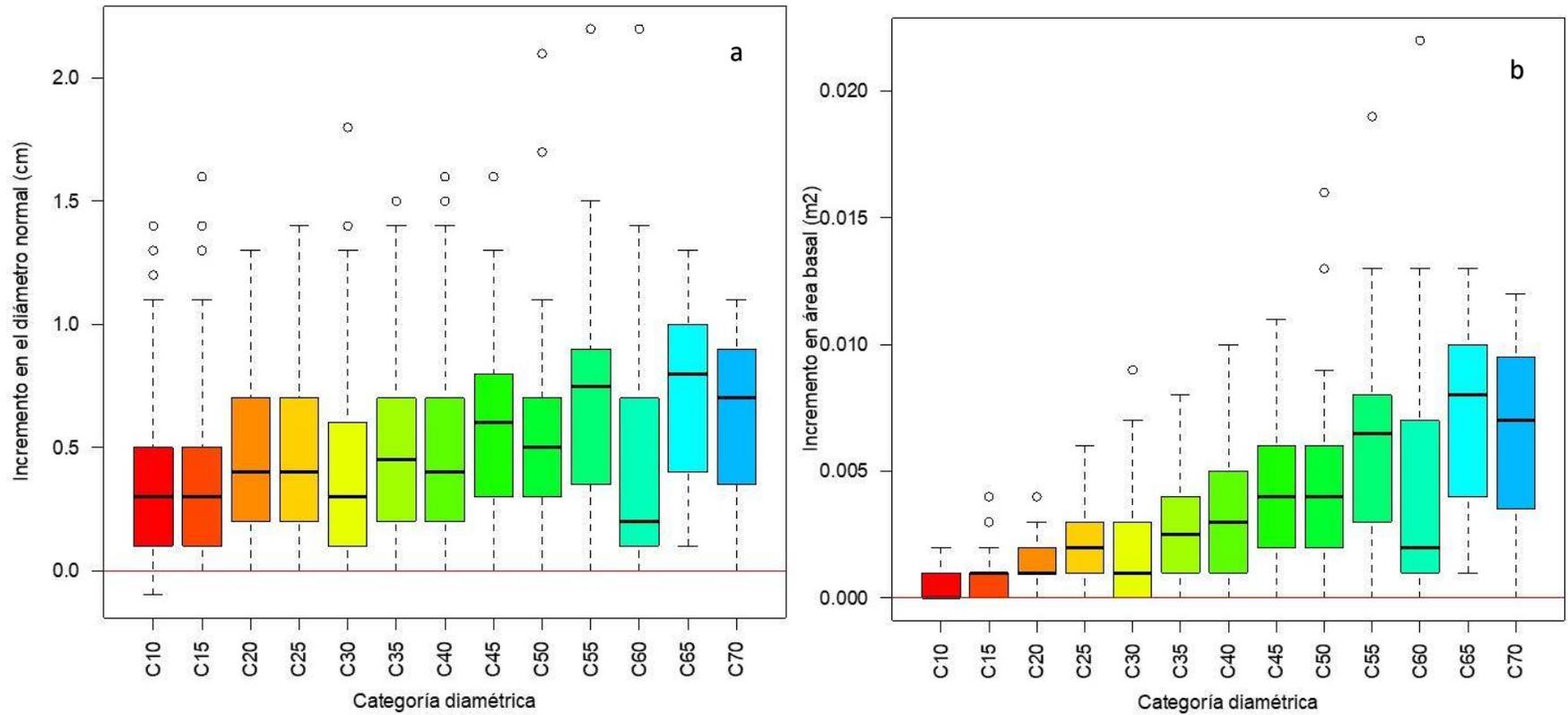


Figura 22. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de *Pinus oocarpa*.

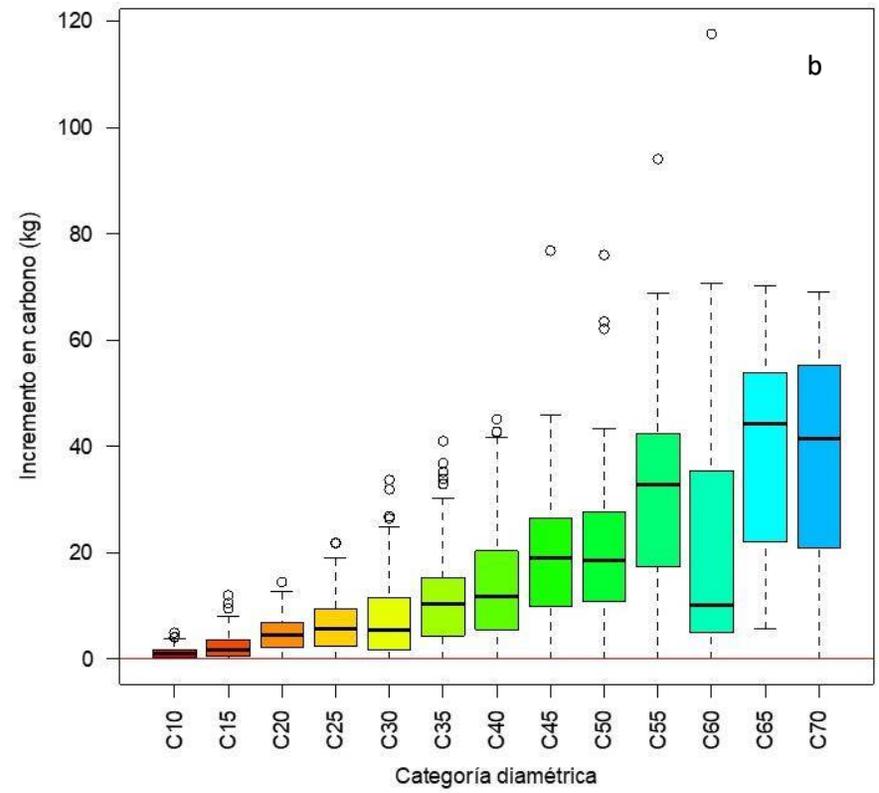
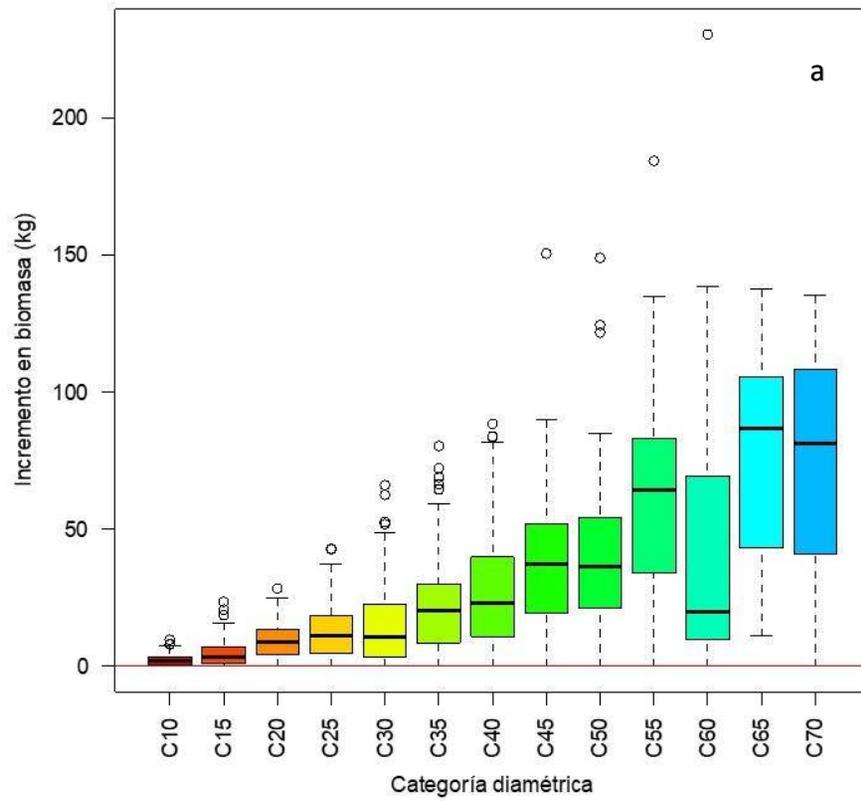


Figura 23. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de *Pinus oocarpa*.

En el Cuadro 26 se observan los incrementos en las variables dasométricas en árboles del género *Quercus*. El máximo incremento en diámetro normal se registró en la CD50 cm con 0.5 cm árbol⁻¹ año⁻¹, sin que exista diferencia estadística significativa entre las CD's de 30, 35, 45, 50 y 65 cm. El máximo incremento en área basal también se registró en la CD50 con 0.0039 m² árbol⁻¹ año⁻¹ y estadísticamente igual con las CD's 50 hasta 65 cm.

Cuadro 26. ICA promedio por categoría diamétrica en *Quercus spp.*

Categoría diamétrica	n	Diámetro Normal (cm árbol ⁻¹)	Área basal (m ² árbol ⁻¹)	Biomasa (kg árbol ⁻¹)	Carbono (kg árbol ⁻¹)
CD10	476	0.27 ^c	0.0004 ^f	3.25 ^f	1.59 ^f
CD15	537	0.28 ^c	0.0007 ^e	7.07 ^e	3.46 ^e
CD20	537	0.35 ^{bc}	0.0011 ^{de}	14.79 ^d	7.25 ^d
CD25	429	0.36 ^{bc}	0.0014 ^{de}	21.79 ^c	10.68 ^c
CD30	279	0.45 ^{ab}	0.0022 ^{cde}	34.09 ^b	16.70 ^b
CD35	176	0.44 ^{ab}	0.0024 ^{cd}	45.39 ^a	22.24 ^a
CD40	104	0.37 ^{bc}	0.0024 ^{cde}	54.83 ^a	26.87 ^a
CD45	62	0.47 ^{ab}	0.0033 ^{bcd}	68.26 ^a	33.45 ^a
CD50	33	0.50 ^a	0.0039 ^a	87.19 ^a	42.73 ^a
CD55	15	0.47 ^{ab}	0.0041 ^{ab}	96.14 ^a	47.11 ^a
CD60	10	0.36 ^{bc}	0.0034 ^{cde}	170.78 ^a	83.68 ^a
CD65	3	0.37 ^{abc}	0.0037 ^{abcd}	158.10 ^a	77.47 ^a
CD70	3	0.33 ^{bc}	0.0037 ^{de}	173.70 ^a	85.11 ^a
Chi		78.16	493.86	1289.47	1289.47
p		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Dentro de una variable, Valores promedio con la misma literal no son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$)

El incremento máximo en biomasa y carbono se presenta en la CD70 con 173.70 y 85.11 kg por árbol anualmente, sin diferencia estadística significativa con las

categorías 35 hasta 70 cm. En todas las variables dasométricas evaluadas (diámetro normal, área basal, biomasa y carbono) el mínimo incremento se registró en las CD's 10 y 15 cm.

En el Figura 23a, al igual que en árboles de *P. oocarpa*, se observa un decremento en diámetro normal en las categorías menores a 30 cm de -0.1 cm, con mayor variabilidad en las CD's 10 y 15 cm con valores de -0.2 cm de diámetro normal por año.

La variabilidad máxima en diámetro normal y área basal se registró en categorías menores a CD45, mientras que en biomasa y carbono en la CD60 (Figuras 24a, 24b, 25a y 25b).

Aguilar, Ghilardi, Vega, Skutsch y Oyama (2012) estimaron el incremento medio anual en biomasa aérea por rebrote entre 4.1 y 4.4 kg árbol⁻¹ año⁻¹; mientras que para *Quercus latea* la estimación fue de 2.2 kg por rebrote por año, en ambos casos en material leñoso disponible para la fabricación de carbón, comparables con árbolitos de *Quercus spp.* de categorías diamétricas menores a 15 cm en éste estudio.

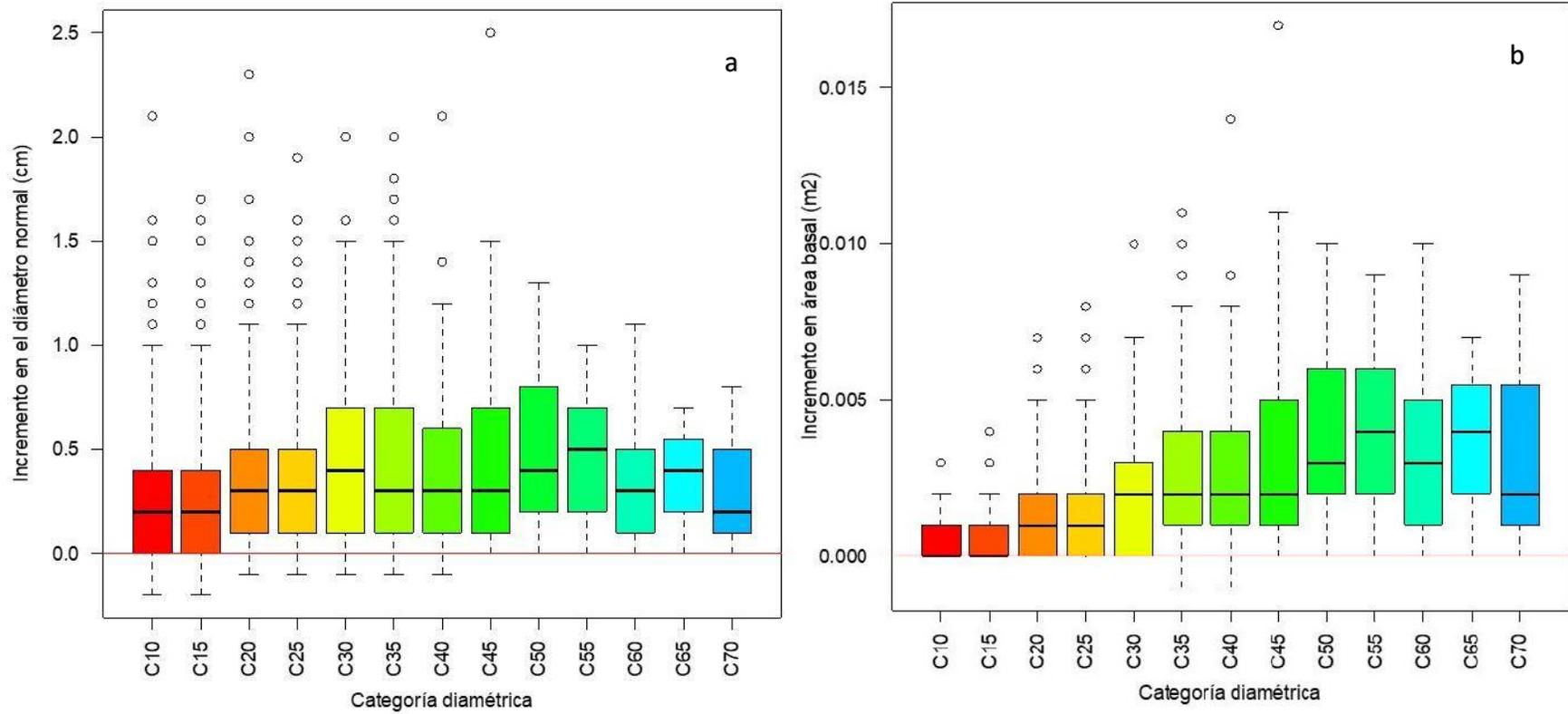


Figura 24. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de *Quercus spp.*

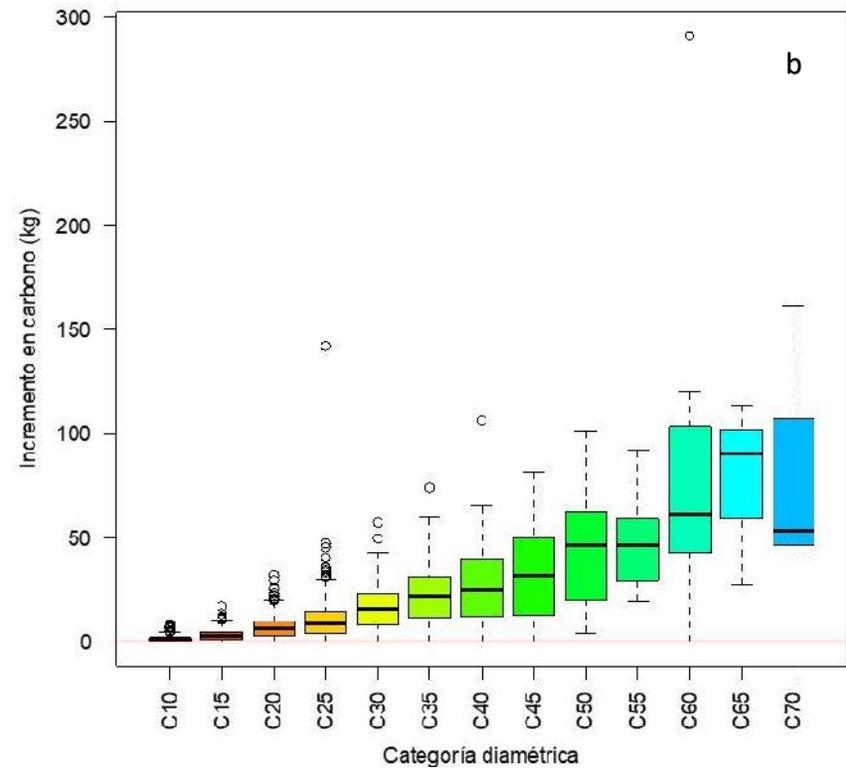
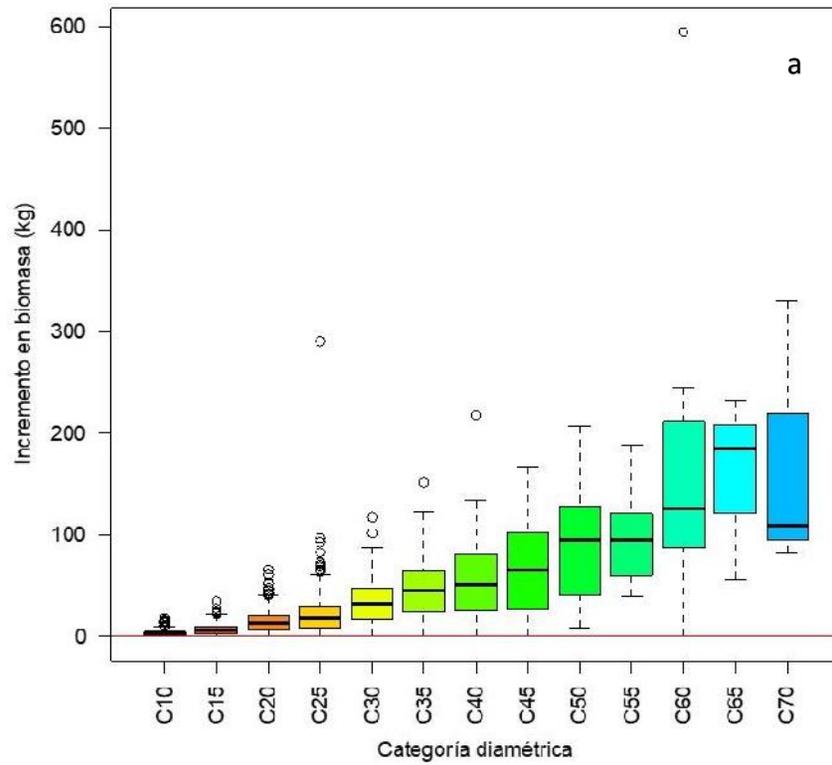


Figura 25. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de *Quercus spp.*

El incremento en diámetro normal, área basal, biomasa y carbono en otras hojosas o latifoliadas distribuidas en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa se registran en el Cuadro 27.

El incremento mínimo en diámetro normal se registró en las CD's 10 a 30 cm con valores de 0.28 a 0.32 cm árbol⁻¹ año⁻¹ y el máximo en la CD45 con 0.84 cm árbol⁻¹ año⁻¹; sin embargo, no existe diferencia estadística significativa ($p \leq 0.15$) entre las medias del incremento en diámetro normal en las diferentes categorías diamétricas.

El incremento más bajo en área basal se registró en la CD10 con 0.0004 m² árbol⁻¹ año⁻¹ y el máximo en la CD45 con 0.0062 m² árbol⁻¹ año⁻¹. Se rechazó que las medias del incremento en área basal en las diferentes categorías diamétricas son iguales ($p < 0.0001$). Se identificaron cuatro grupos estadísticamente diferentes.

Al igual que en las variables dasométricas anteriores los mínimos incrementos en biomasa y carbono se registraron en la CD10 con 2.63 y 1.31 kg por árbol por año, respectivamente. Los máximo incrementos en biomasa y carbono se aprecian en la CD45 con 76.47 kg y 38.23 kg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Se rechazó que las medias del incremento en biomasa y carbono en las diferentes categorías diamétricas sean iguales ($p < 0.0001$).

A diferencia de los árboles de *P. oocarpa* y *Quercus spp.*, en otra latifoliadas no se registraron decrementos en sus variables dasométricas, lo que probablemente se deba a una mayor tolerancia al crecimiento bajo sombra y no existan árboles efectivamente suprimidos (Figuras 26a, 26b, 27a, 27b).

Los incrementos en las categorías diamétricas de 35 y 50 cm no se realizaron debido que presentaron únicamente existió un árbol medido.

Cuadro 27. ICA promedio por árbol y por categoría diamétrica en otras latifoliadas.

Categoría diamétrica	n	Diámetro Normal (cm árbol ⁻¹)	Área basal (m ² árbol ⁻¹)	Biomasa (kg árbol ⁻¹)	Carbono (kg árbol ⁻¹)
CD10	247	0.29	0.0004 ^d	2.63 ^d	1.31 ^d
CD15	101	0.29	0.0007 ^{cd}	5.49 ^c	2.74 ^c
CD20	33	0.32	0.0010 ^{bc}	8.59 ^{bc}	4.29 ^{bc}
CD25	19	0.28	0.0012 ^{bcd}	19.38 ^{ab}	9.68 ^{ab}
CD30	18	0.32	0.0015 ^{ab}	21.07 ^{ab}	10.54 ^{ab}
CD40	6	0.60	0.0038 ^a	25.52 ^a	12.76 ^a
CD45	5	0.84	0.0062 ^a	76.47 ^a	38.23 ^a
Chi		9.48	41.27	116.89	116.89
p		0.15	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Dentro de una variable, valores promedio con la misma literal no son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$).

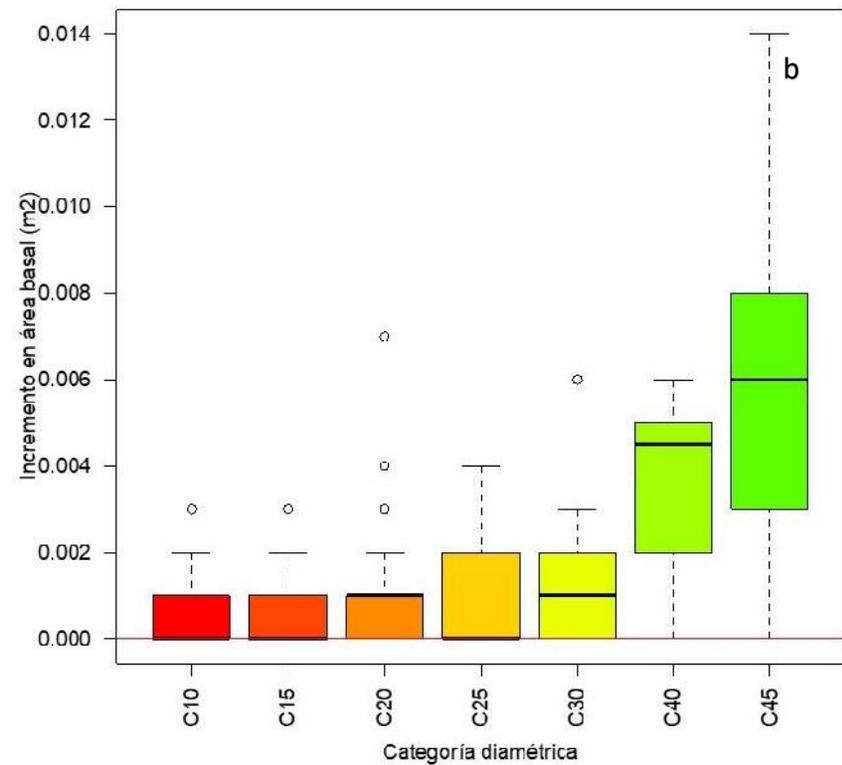
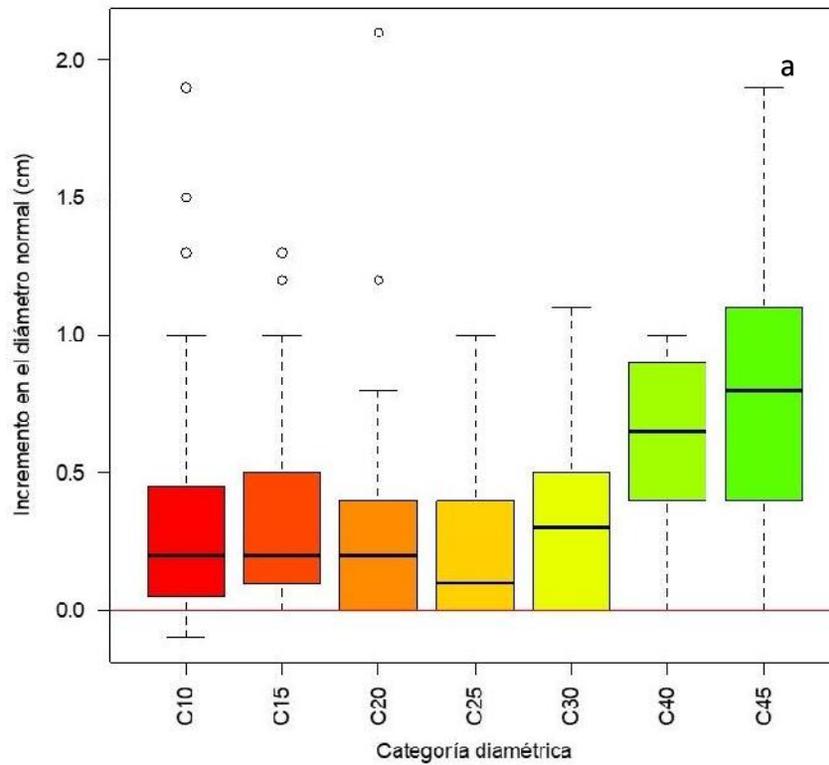


Figura 26. Incremento en diámetro normal (a) y área basal (b), por categoría diamétrica en árboles de otras latifoliadas.

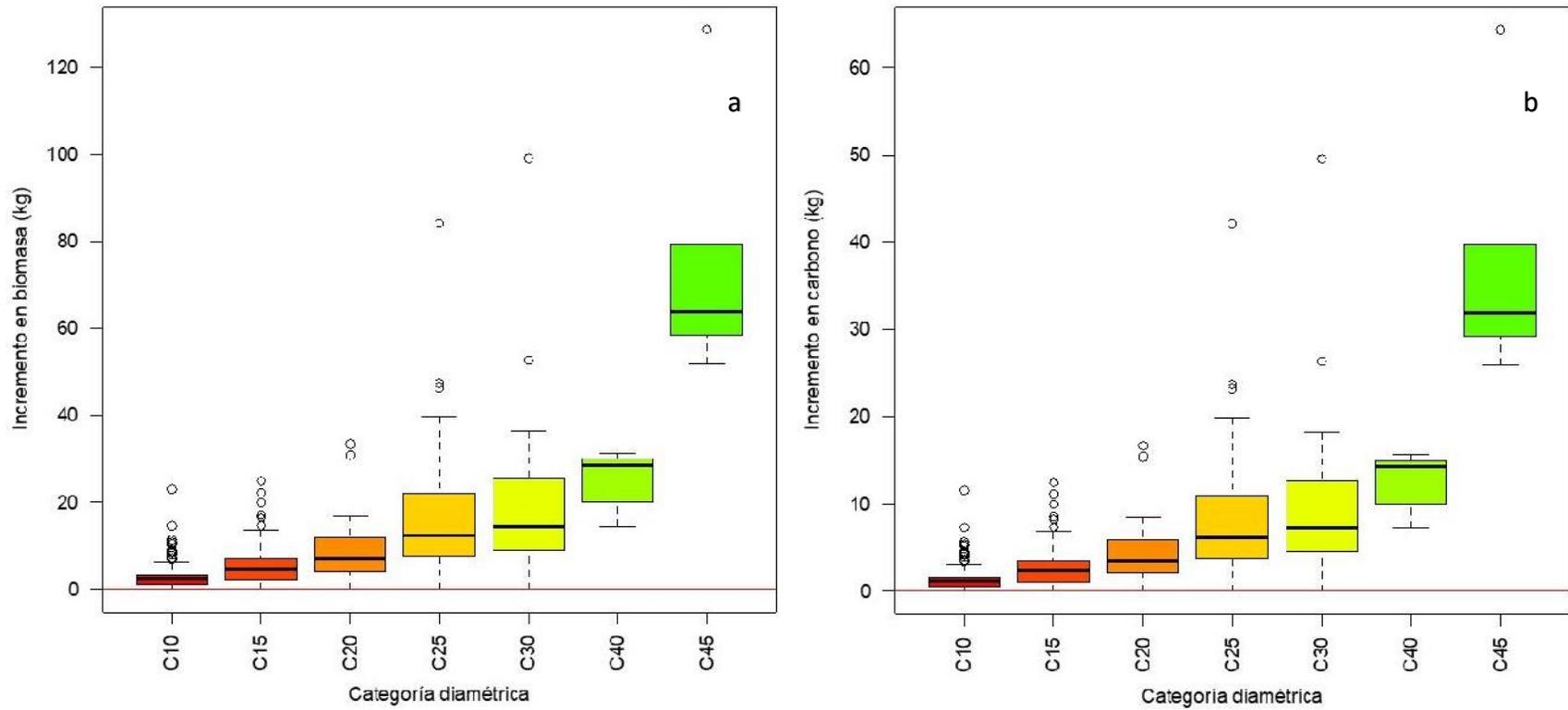


Figura 27. Incremento en biomasa (a) y carbono (b), por categoría diamétrica en árboles de otras latifoliadas.

7.4.5. Estimación de necromasa y carbono en material leñoso caído (MLC)

La densidad específica de la madera de *P. oocarpa* es inferior a la de *Quercus sp.*, independientemente del grado de deterioro como se observa en el Cuadro 28.

Con base a los resultados de la densidad específica de la madera, en sus cuatro grados de deterioro, se calculó y estimó la biomasa y carbono para el MLC fino (≤ 7.5 cm de diámetro) y MLC grueso (> 7.5 cm de diámetro).

Cuadro 28. Densidad específica de material leñoso caído con base en el grado de deterioro.

Grado de deterioro	Densidad específica <i>P. oocarpa</i> (g cm ⁻³)	Densidad específica <i>Quercus spp.</i> (g cm ⁻³)
1 (ramas aún con follaje)	0.43	0.64
2 (ramas sin follaje pero con corteza íntegra)	0.41	0.58
3 (trozos sin corteza y pero madera íntegra)	0.39	0.54
4 (madera con indicios de pudrición)	0.35	0.46

La necromasa en el material leñoso caído fino por rodal varía entre 0.113 Mg ha⁻¹ (rodal 060) y 1.480 Mg ha⁻¹ (rodal 105), el primero en el estrato P-Q y el segundo en el estrato Q. La menor necromasa del material grueso es de 0.118 Mg ha⁻¹ (rodal 060) y la mayor de 7.695 Mg ha⁻¹ (rodal 047), ambos del estrato P-Q (Cuadro 29)

Respecto a la suma de ambos materiales (grueso y fino) por rodal el valor mínimo (0.232 Mg ha⁻¹) y máximo (8.222 Mg ha⁻¹) también corresponden a los rodales 060 y 047, respectivamente (Cuadro 29) y el reservorio total de necromasa y carbono en el compartimento de MLC del ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa es de 6840.11±1,252.59 Mg y 3,431.47±632.11 Mg, respectivamente (Cuadro 30).

En promedio, la biomasa del MLC fino y grueso en el ecosistema bosque templado de la microcuenca Hueyapa fue de $0.54 \pm 0.07 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $2.18 \pm 1.75 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente, son estimaciones muy bajas comparadas con la realizadas por Galicia et al. (2015) quienes estimaron la biomasa en residuos leñosos gruesos en el bosque templado de la Sierra Norte de Oaxaca, México entre 63 a 177 Mg ha^{-1} (79 Mg ha^{-1} en la vertiente seca y 95 Mg ha^{-1} en la vertiente húmeda).

De forma similar Barrios-Calderón et al. (2018) estimaron una acumulación de combustibles muertos en las selvas inundables en la reserva de la Biosfera La Encrucijada en Chiapas, México, en un rango de 63.19 a $151.87 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras que los manglares acumularon entre 88.81 a $152.38 \text{ Mg ha}^{-1}$. La mayor parte de este combustible correspondió material leñoso $>7.50 \text{ cm}$ de diámetro con un rango de 32.49 a $101.69 \text{ Mg ha}^{-1}$ en selvas inundables y 46.58 a 96.78 Mg ha^{-1} en manglares.

Las cantidades bajas de MLC en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa probablemente se deban a que nunca ha existido aprovechamiento forestal maderable comercial, aunado a los indicios de la presencia de incendios forestales de forma regular que reducen el material combustible esparcido en campo demostrado por Bonilla, Rodríguez, Borja, Cíntora, y Santillán (2012) quienes estimaron la carga promedio de combustible leñoso en $7.099 \pm 1.78 \text{ Mg ha}^{-1}$ en áreas a un año después de un incendio y de $31.726 \pm 11.93 \text{ Mg ha}^{-1}$ en áreas no incendiadas.

Cuadro 29. Reservorio de necromasa y carbono en MLC por rodal en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Necromasa (Mg ha ⁻¹)			Carbono (Mg ha ⁻¹)		
			MLC≤7.5 cm	MLC>7.5 cm	Total	MLC≤7.5 cm	MLC>7.5 cm	Total
008	P-Q	60.582	0.875	2.731	3.246	0.446	1.209	1.655
025	P-Q	140.877	0.478	0.988	1.467	0.244	0.504	0.748
027	P-Q	112.400	0.405	1.192	1.598	0.207	0.608	0.815
032	P-Q	177.492	0.352	1.833	2.186	0.180	0.935	1.115
036	P-Q	39.971	0.683	4.603	5.287	0.349	2.348	2.697
043	P-Q	66.200	0.622	0.342	0.965	0.318	0.174	0.492
045	P-Q	115.340	0.328	1.515	1.844	0.168	0.773	0.941
047	P-Q	141.536	0.256	7.695	8.222	0.131	4.062	4.193
052	P-Q	108.526	0.423	3.871	4.294	0.216	1.974	2.190
054	P-Q	100.885	0.756	1.553	2.310	0.386	0.792	1.178
060	P-Q	125.344	0.113	0.118	0.232	0.058	0.060	0.118
062	P-Q	150.712	0.332	4.687	5.019	0.169	2.391	2.560
063	P-Q	88.156	0.399	1.203	1.603	0.204	0.614	0.818
107	P-Q	53.557	0.535	0.884	1.419	0.273	0.451	0.724
108	P-Q	45.055	0.837	0.881	1.718	0.427	0.449	0.876
111	P-Q	75.186	0.264	2.070	2.334	0.135	1.056	1.191
002	Q	84.127	1.056	1.544	2.600	0.518	0.757	1.275
017	Q	180.097	0.691	2.758	3.450	0.339	1.352	1.691
024	Q	56.688	0.115	1.801	1.917	0.057	0.882	0.939
028	Q	57.193	0.333	3.627	3.961	0.164	1.777	1.941
031	Q	53.995	0.296	0.425	0.722	0.145	0.208	0.353
035	Q	54.597	1.005	5.562	6.568	0.493	2.725	3.218
037	Q	92.929	1.145	3.006	4.151	0.561	1.473	2.034
051	Q	88.264	0.352	1.383	1.736	0.173	0.678	0.851
061	Q	127.254	0.475	0.733	1.209	0.233	0.359	0.592
071	Q	74.156	0.416	1.089	1.505	0.204	0.534	0.738
072	Q	67.218	0.490	1.002	1.492	0.240	0.491	0.731
076	Q	65.186	1.359	0.390	1.750	0.666	0.191	0.857
081	Q	49.167	0.672	0.000	0.673	0.330	0.000	0.330
084	Q	19.977	0.297	0.000	0.297	0.146	0.000	0.146
085	Q	19.759	0.300	4.539	4.840	0.147	2.224	2.371
105	Q	43.720	1.480	0.739	2.219	0.725	0.362	1.087
106	Q	26.769	1.368	2.546	3.915	0.671	1.247	1.918

Cuadro 30. Reservorio de necromasa y carbono en MLC promedio por estrato y del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Vegetación	Superficie (ha)	Necromasa			Carbono			
		MLC≤7.5 cm (Mg ha ⁻¹)	MLC>7.5 cm (Mg ha ⁻¹)	MLC total (Mg ha ⁻¹)	MLC≤7.5 cm (Mg ha ⁻¹)	MLC>7.5 cm (Mg ha ⁻¹)	MLC total (Mg ha ⁻¹)	
Promedio	P-Q	1,601.819	0.42 ± 0.08	2.43 ± 1.67	2.50± 0.67	0.22 ± 0.04	1.24 ± 0.85	1.28 ± 0.34
	Q	1,160.096	0.69 ± 0.13	1.82 ± 2.62*	2.47 ± 0.56	0.34 ± 0.06	0.89 ± 1.84*	1.21 ± 0.28
	Bosque templado	2,701.915	0.54 ± 0.07	2.18 ± 1.75	2.49± 0.45	0.27 ± 0.03	1.09 ± 0.86	1.25 ± 0.23
Total			MLC<7.5 cm (Mg)	MLC>7.5 cm (Mg)	MLC total (Mg)	MLC<7.5 cm (Mg)	MLC>7.5 cm (Mg)	MLC total (Mg)
	P-Q	1,601.819	675.6 ± 121.9	3,876.7 ± 2,670.3	3,990.8 ± 1,069.0	344.6 ± 62.2	1,977.1 ± 1,361.9	2,035.3 ± 545.2
	Q	1,160.096	804.0 ± 150.7	2,106.7 ± 3,994.5	2,849.3 ± 652.9	394.0 ± 73.9	1,032.3 ± 1,957.3	1,396.2 ± 319.9
Bosque templado	2,701.915	1479.6 ±193.9	5,983.4 ± 4,804.8	6,840.1 ± 1,252.6	738.5 ± 96.6	3,009.4 ± 2,384.5	3,431.5 ± 632.1	

7.4.6. Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque

El reservorio promedio y total de la masa y carbono en los compartimentos de hojarasca (La necromasa producto de la caída de hojas, ramillas, órganos reproductivos y corteza tanto de hierbas, arbustos y árboles) y sotobosque (arbustos, hierbas, lianas, pastos y regeneración) se registran en el Cuadro 31.

La necromasa en la hojarasca esparcida sobre el piso forestal en los rodales del bosque templado de la microcuenca fluctúa entre 6.997 Mg ha^{-1} (rodal 024) y $29.707 \text{ Mg ha}^{-1}$ (rodal 107), el mínimo en el estrato Q y el máximo en el estrato P-Q; que representan 2.288 Mg ha^{-1} y 9.714 Mg ha^{-1} de carbono, respectivamente (Cuadro 31).

La necromasa y su proporción en carbono en los estratos P-Q y Q son muy similares, registrando un promedio de $13.82 \pm 1.35 \text{ Mg ha}^{-1}$ de necromasa y $4.52 \pm 0.44 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono para el ecosistema bosque templado de la microcuenca Hueyapa (Cuadro 32).

Gough et al. (2007) estimaron el reservorio de carbono en hojas y desperdicios finos de madera en 1.6 Mg ha^{-1} y en los desperdicios de madera gruesa en 8.8 Mg ha^{-1} en arbolado joven y 0.8 Mg ha^{-1} en bosques latifolios mixtos mayores a 50 años de edad; estimaciones bajas comparadas al del presente estudio.

La estimación de la necromasa total en mantillo realizada por Galicia et al. (2015) para el bosque templado de la Sierra Norte de Oaxaca, México varió entre 8.7 y 17.9 Mg ha^{-1} , en el mismo ecosistema, en su vertiente su vertiente seca la estimación fue de 10.6 Mg ha^{-1} y de 17.0 Mg ha^{-1} en su vertiente húmeda, rangos en los que se ubican las estimaciones de hojarasca en el bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

La mayor concentración promedio de biomasa y carbono en el sotobosque, se registró en el rodal 045 del estrato P-Q con 3.681 Mg ha^{-1} y 1.620 Mg ha^{-1} ; mientras que el menor reservorio fue para el rodal 085 del estrato Q con 0.323 Mg ha^{-1} y 0.142 Mg ha^{-1} de biomasa y carbono, respectivamente (Cuadro 31).

El estrato de sotobosque posee un reservorio de biomasa promedio mayor en el estrato P-Q ($1.61 \pm 0.19 \text{ Mg ha}^{-1}$) que en el estrato Q ($1.05 \pm 0.22 \text{ Mg ha}^{-1}$). La estimación promedio de biomasa de sotobosque para el ecosistema del bosque templado es de $1.38 \pm 0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Cuadro 32), que en este caso particular puede considerarse como productividad primaria anual, ya que, a excepción de la regeneración y algunos arbustos, las formas de vida preponderantes son las anuales.

La biomasa promedio de sotobosque en el ecosistema de bosque templado es superior a lo estimado por Jain et al. (2010) con un reservorio de biomasa promedio en sotobosque de 0.40 Mg ha^{-1} en bosque mixtos de pino-encino en el Bosque Nacional Coconino en Estados Unidos de América.

La estimación promedio de carbono por hectárea en sotobosque en el bosque templado de la microcuenca Hueyapa es de $0.61 \pm 0.06 \text{ Mg ha}^{-1}$, similar al de un bosque joven y abierto reportada por Gough et al. (2007), quienes estimaron un promedio de carbono en sotobosque en 0.60 Mg ha^{-1} en bosques de seis años y 0.16 Mg ha^{-1} en bosques maduros, disminución probablemente debida al cierre de copas.

En un ecosistema de pastizal con diez años de abandono, con crecimiento a cielo abierto y presencia de la especie invasora huizache (*Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn.), Yerena et al. (2014) estimaron un reservorio de carbono promedio de $4.13 \pm 0.54 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor muy alto comparado con el sotobosque de esta investigación.

Cuadro 31. Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque por rodal.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Hojarasca (Mg ha ⁻¹)		Sotobosque (Mg ha ⁻¹)	
			Necromasa	Carbono	Biomasa	Carbono
008	P-Q	60.582	14.082	4.605	0.380	0.167
025	P-Q	140.877	17.513	5.727	1.764	0.776
027	P-Q	112.400	11.566	3.782	1.325	0.583
032	P-Q	177.492	12.274	4.014	2.412	1.061
036	P-Q	39.971	24.247	7.929	0.755	0.332
043	P-Q	66.200	14.342	4.690	2.218	0.976
045	P-Q	115.340	14.367	4.698	3.681	1.620
047	P-Q	141.536	16.027	5.241	1.788	0.787
052	P-Q	108.526	13.972	4.569	2.272	0.999
054	P-Q	100.885	10.864	3.553	2.303	1.013
060	P-Q	125.344	11.025	3.605	0.832	0.366
062	P-Q	150.712	7.232	2.365	0.413	0.182
063	P-Q	88.156	9.268	3.031	0.987	0.434
107	P-Q	53.557	29.707	9.714	0.510	0.224
108	P-Q	45.055	18.166	5.940	0.926	0.407
111	P-Q	75.186	13.193	4.314	1.009	0.444
002	Q	84.127	11.983	3.918	0.337	0.148
017	Q	180.097	14.853	4.857	0.502	0.221
024	Q	56.688	6.997	2.288	1.559	0.686
028	Q	57.193	9.735	3.183	2.191	0.964
031	Q	53.995	20.907	6.836	1.068	0.470
035	Q	54.597	18.799	6.147	0.705	0.310
037	Q	92.929	11.926	3.900	0.724	0.318
051	Q	88.264	6.998	2.288	2.083	0.917
061	Q	127.254	10.118	3.309	0.885	0.389
071	Q	74.156	17.604	5.757	0.955	0.420
072	Q	67.218	11.558	3.780	1.039	0.457
076	Q	65.186	22.022	7.201	2.831	1.246
081	Q	49.167	20.229	6.615	0.877	0.386
084	Q	19.977	16.213	5.302	1.380	0.607
085	Q	19.759	17.434	5.701	0.323	0.142
105	Q	43.720	21.880	7.155	0.403	0.177
106	Q	26.769	11.227	3.671	0.370	0.163

Cuadro 32. Reservorio de biomasa y carbono en hojarasca y sotobosque por estrato arbóreo y ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Vegetación	Superficie (ha)	Hojarasca		Sotobosque	
		Necromasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
P-Q	1,601.819	13.69 ± 1.41	4.48 ± 0.46	1.61 ± 0.19	0.71 ± 0.08
Promedio Q	1,160.096	13.99 ± 2.56	4.58 ± 0.84	1.05 ± 0.22	0.46 ± 0.10
Bosque templado	2,701.915	13.82 ± 1.35	4.52 ± 0.44	1.38 ± 0.14	0.61 ± 0.06
		Necromasa (Mg)	Carbono (Mg)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)
P-Q	1,601.819	21,824.2 ± 2252.0	7,136.5 ± 736.4	2,569.0 ± 302.5	1,130.3 ± 133.1
Total Q	1,160.096	1,6163.8 ± 2958.6	5,285.6 ± 967.5	1,215.0 ± 253.3	534.6 ± 111.5
Bosque templado	2,701.915	3,7987.97 ±3718.2	12,422.1 ±1215.9	3,784.0 ± 394.6	1,665.0 ± 173.6

7.4.7. Biomasa y carbono en el sistema radicular

La biomasa promedio en raíz fina (≤ 5 mm) por rodal fluctúa desde 2.311 Mg ha⁻¹ en el rodal 062 del estrato P-Q hasta 8.082 Mg ha⁻¹ en el rodal 071 del estrato Q. Respecto a la biomasa de la raíz gruesa (> 5 mm) el menor valor se registró en el rodal 105 con 2.250 Mg ha⁻¹ y el mayor en 31.745 Mg ha⁻¹ en el rodal 081, ambos en el estrato Q (Cuadro 33).

El reservorio promedio de biomasa en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa se estimó en 4.60 ± 0.39 Mg ha⁻¹ en raíces finas y 12.55 ± 2.68 Mg ha⁻¹ en raíces gruesas; que equivalen a 2.30 ± 0.20 y 6.31 ± 1.35 Mg ha⁻¹ de carbono, respectivamente (Cuadro 34); reservorios de carbono similares a los estimados por Gough et al. (2007) para raíces finas (< 2 mm) en 5.7 Mg ha⁻¹, sin variación debido

a la edad, y el reservorio de carbono en raíces gruesas (>2 mm) de 2.3 Mg ha⁻¹ y 15.5 Mg ha⁻¹ en bosques de seis y mayores a 60 años de edad, respectivamente.

En plantaciones de abeto chino (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) en la provincia de Hunan, China, Pei, Lei, Xiang, Uoyang, y Xu, (2018), estimaron el reservorio de carbono en raíces del componente arbóreo a una profundidad de 60 cm en 2.43, 2.61 y 2.33 Mg ha⁻¹ a la edad de siete, diecisiete y veintisiete años de edad, respectivamente; que sumadas al reservorio de raíces del sotobosque de 2.04±0.18 Mg ha⁻¹; representaría aproximadamente la mitad del reservorio de carbono del sistema radicular (fina + gruesa) en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa (8.62±1.48 Mg ha⁻¹), considerando que aquí no se discriminó entre raíces de la vegetación arbórea y herbácea.

En bosques de la provincia de Jiangsu al suroeste de China Cao, Coops, Innes, Dai, y She (2014) estimaron el promedio de biomasa radicular a nivel rodal en 21.6, 29.25 y 25.16 Mg ha⁻¹, para el bosque de coníferas, de latifoliadas y bosque mixto, respectivamente. Datos relativamente altos comparados con la biomasa radicular estimada para el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa de 17.17±2.93 Mg ha⁻¹, mientras que la estimación realizada por Galica, Saynes, y Campo (2015) tan solo fluctuó entre 2.2 y 9.8 Mg ha⁻¹ en el bosque sin aprovechamiento en la Sierra Norte de Oaxaca, México; las tres estimaciones se realizaron para los primeros 30 cm de profundidad.

La densidad de biomasa radicular en los bosques templados del mundo fluctúa alrededor de 1,2 ± 206,3 Mg ha⁻¹, y la relación entre la biomasa del sistema radicular y la biomasa aérea es de 0.05 ± 0.70 Mg ha⁻¹. Ésta última variable tiende mayormente entre 0.20 y 0.30, con un promedio de 0.26 (Cairns et al., 1997). Ésta relación, en el caso de la vegetación arbustiva espinosa tamaulipeca al noreste de México es de 0.402 (Navar, Méndez, & Dale, 2002).

La relación entre la biomasa aérea promedio (170.90 Mg ha⁻¹) y la biomasa radicular promedio (17.15 Mg ha⁻¹) estimadas en la vegetación del bosque templado de la microcuenca Hueyapa fue de 0.10; mientras que Ranger y Gelhaye (2001) estimaron

una relación entre la biomasa aérea y la biomasa subterránea de 0.21 en una plantación de *Pseudotsuga menziesii* Mirb. de 47 años de edad con densidad de 350 árboles por hectárea, pero con un área basal de $46 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ que duplica al área basal ($22.88 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) de la vegetación del bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

Por otro lado, la relación entre la biomasa de la raíz fina y raíz gruesa fue de 0.37, mientras que Cairns et al. (1997) estimaron esta relación en 0.23, independientemente de la latitud, textura del suelo o tipo de arbolado, a profundidades incluso mayores a 100 cm, lo que implica obtener mayor cantidad de biomasa de raíces gruesas en comparación a las finas.

Cuadro 33. Reservorio de biomasa y carbono del sistema radicular por rodal.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)			Carbono (Mg ha ⁻¹)		
			Raíz≤5 mm	Raíz>5 mm	Raíz total	Raíz≤5 mm	Raíz>5 mm	Raíz total
008	P-Q	60.582	6.756	14.022	20.778	3.121	6.815	9.936
025	P-Q	140.877	5.176	10.002	15.178	2.391	4.861	7.252
027	P-Q	112.400	5.737	12.586	18.323	2.650	6.117	8.767
032	P-Q	177.492	3.486	7.120	10.606	1.611	3.460	5.071
036	P-Q	39.971	3.744	9.474	13.218	1.730	4.604	6.334
043	P-Q	66.200	6.262	14.700	20.962	2.893	7.144	10.037
045	P-Q	115.340	2.885	30.744	33.630	1.333	14.942	16.275
047	P-Q	141.536	3.670	14.953	18.622	1.695	7.267	8.962
052	P-Q	108.526	5.258	16.045	21.303	2.429	7.798	10.227
054	P-Q	100.885	3.389	3.542	6.930	1.566	1.721	3.287
060	P-Q	125.344	5.011	12.200	17.211	2.315	5.929	8.244
062	P-Q	150.712	2.311	18.681	20.992	1.068	9.079	10.147
063	P-Q	88.156	4.845	27.728	32.573	2.238	13.476	15.714
107	P-Q	53.557	4.756	8.767	13.522	2.197	4.261	6.458
108	P-Q	45.055	2.956	22.595	25.551	1.366	10.981	12.347
111	P-Q	75.186	3.333	4.941	8.274	1.540	2.401	3.941
002	Q	84.127	5.652	18.333	23.985	2.611	8.910	11.521
017	Q	180.097	5.194	9.439	14.633	2.400	4.587	6.987
024	Q	56.688	4.211	2.807	7.018	1.945	1.364	3.310
028	Q	57.193	4.242	7.689	11.930	1.960	3.737	5.696
031	Q	53.995	6.333	24.585	30.918	2.926	11.948	14.874
035	Q	54.597	4.219	2.474	6.693	1.949	1.203	3.152
037	Q	92.929	4.414	11.944	16.358	2.039	5.805	7.844
051	Q	88.264	2.870	2.556	5.426	1.326	1.242	2.568
061	Q	127.254	4.189	4.917	9.106	1.935	2.389	4.325
071	Q	74.156	8.082	21.259	29.341	3.734	10.332	14.066
072	Q	67.218	5.022	6.670	11.692	2.320	3.241	5.562
076	Q	65.186	5.950	12.139	18.089	2.749	5.899	8.648
081	Q	49.167	7.912	31.745	39.656	3.655	15.428	19.083
084	Q	19.977	7.361	3.350	10.711	3.401	1.628	5.029
085	Q	19.759	5.567	4.589	10.156	2.572	2.230	4.802
105	Q	43.720	5.123	2.250	7.373	2.367	1.094	3.460
106	Q	26.769	2.900	2.584	5.484	1.340	1.256	2.595

Cuadro 34. Biomasa y carbono promedio y total en sistema radicular por estrato y del ecosistema bosque templado.

Vegetación	Superficie (ha)	Biomasa			Carbono			
		Raíz≤5mm (Mg ha ⁻¹)	Raíz>5mm (Mg ha ⁻¹)	Raíz total (Mg ha ⁻¹)	Raíz≤5mm (Mg ha ⁻¹)	Raíz>5mm (Mg ha ⁻¹)	Raíz total (Mg ha ⁻¹)	
Promedio	P-Q	1,601.819	4.23 ± 0.52	14.18 ± 4.05	18.41 ± 4.37	2.16 ± 0.26	7.23 ± 2.07	9.39 ± 2.23
	Q	1,160.096	5.11 ± 0.60	10.31 ± 3.05	15.42 ± 3.49	2.50 ± 0.29	5.05 ± 1.50	7.55 ± 1.71
	Bosque templado	2,701.915	4.60 ± 0.39	12.55 ± 2.68	17.15 ± 2.93	2.30 ± 0.20	6.31 ± 1.35	8.62 ± 1.48
Total	P-Q	1,601.819	6,739.2 ± 824.8	2,2601.0 ± 6461.6	29,340.2 ± 6,,969.6	3,437.0 ± 420.6	11,526.5 ± 3,295.4	14,963.5 ± 3,554.5
	Q	1,160.096	5,902.0 ± 690.3	11,903.1 ± 3,525.7	17805.0 ± 4034.6	2,892.0 ± 338.3	5,832.5 ± 1727.6	8,724.5 ± 1,976.9
	Bosque templado	2,701.915	12,641.2 ± 1,075.5	34,504.1 ± 7,360.8	47145.2 ± 8053.1	6,329.0 ± 539.8	17,359.0 ± 3,720.8	23,688.0 ± 4,067.3

7.4.8. Pérdida de biomasa y carbono por caída de follaje y otros componentes arbóreos

El follaje, ramillas, corteza y órganos reproductivos perdidos por la vegetación arbórea en la vegetación del ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa fue recolectado y estimado únicamente en el rodal 032 del estrato P-Q y 031 del estrato Q, considerados como de productividad promedio del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

El rodal del estrato P-Q tuvo una densidad de 338 árboles por hectárea y 23.34 m² de área basal por hectárea; mientras que el rodal del estrato Q contiene 479 árboles por hectárea y 16.71 m² de área basal por hectárea, con promedio para ambos rodales de 408 árboles y 20.03 m² de área basal por hectárea, aproximadamente similares e incluso menores a los parámetros estimados para el bosque templado de la microcuenca, por ello se consideró como muestras representativas de éste ecosistema para estimar, conservadoramente, la PPNa perdida del estrato arbóreo.

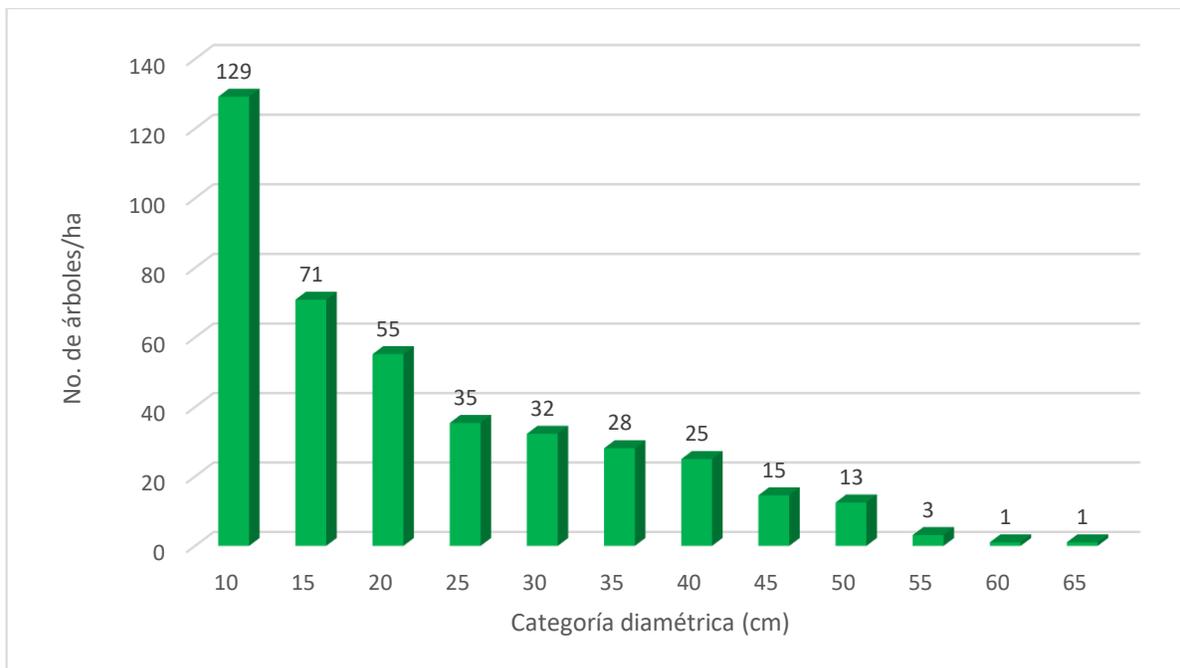


Figura 28. Distribución arbórea por categoría diamétrica en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).

Más del 50% de la vegetación arbórea de los rodales representativos pertenecen a las categorías diamétricas iguales y menores a 20 cm, un bosque relativamente joven, como todo el ecosistema del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa (Figura 28).

La distribución arbórea por categoría diamétrica es similar a todo el ecosistema del bosque templado, con mayor presencia de árboles jóvenes de *Quercus sp.*, la presencia de árboles de otras latifoliadas es mayor en categorías diamétricas menores o iguales a 15 cm y muy escasa en categorías superiores.

La densidad arbórea en la vegetación de *P. oocarpa* es menor a 10 árboles por hectárea en categorías iguales o menores a 25 cm, incrementado paulatinamente con un máximo de 21 árboles por hectárea en la categoría diamétrica de 40 cm, a partir de la cual desciende la densidad arbórea hacia categorías superiores (Figura 29).

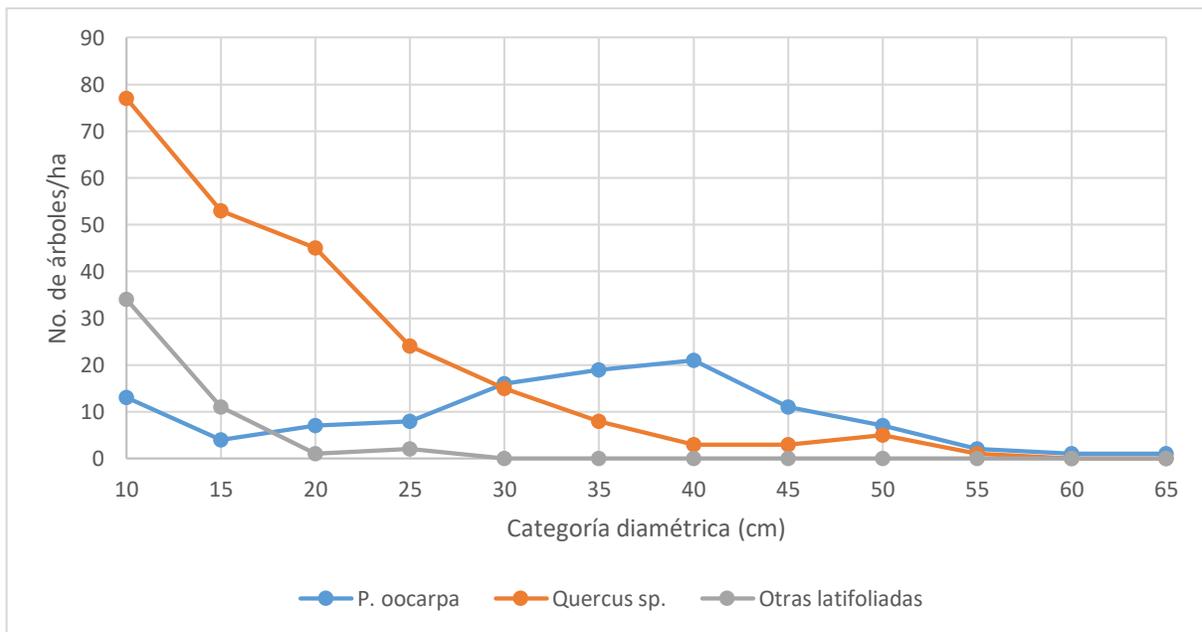


Figura 29. Distribución arbórea por grupo de especies y categoría diamétrica en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).

Los periodos de pérdidas de follaje están correlacionados a la precipitación (Vendrami, Jurinitz, Castanho, Lorenzo, & Oliveira, 2012). Los valores máximos de caída de follaje y otras estructuras vegetales se presentó entre los meses de octubre a mayo, que coincide con la temporada de secas en la región, con un promedio de $0.72 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con máxima caída en marzo con una producción de 1.22 Mg ha^{-1} valor similar al reportado por Lopez-Escobar et al. (2018) en el mismo mes para bosques de *Pinus montezumae* Lamb (1.3 Mg ha^{-1}) en Tlaxcala, México; contrario a la temporada con mayor precipitación (junio-septiembre), periodo en que inicia el crecimiento y madurez del follaje y el desarrollo de órganos reproductivos con una caída promedio de $0.29 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Figura 30).

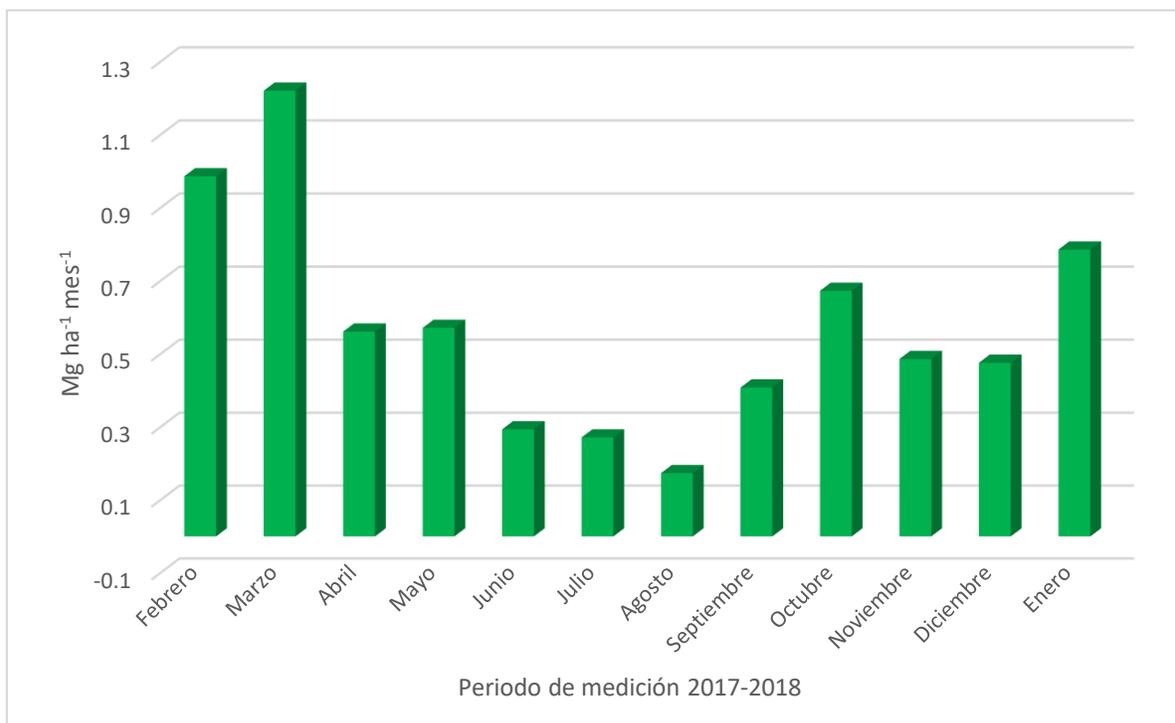


Figura 30. Pérdida mensual de PPNa en los rodales 032 (P-Q) y 031 (Q).

El promedio de biomasa de follaje, ramillas, corteza y órganos reproductivos en la vegetación de los estratos Q fue superior a la registrada en el estrato P-Q, con un promedio para el ecosistema de bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa de $6.91 \pm 1.01 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Cuadro 35), valores que casi duplican lo reportado por Vendrami et al. (2012) para los bosques mixtos de transición en las planicies costeras

del Atlántico y los bosques mesófilos semidecíduos de Sau Paulo, Brazil, cuyas estimaciones promedio fluctúan entre 3.231 y 4.052 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Con base en el reporte del laboratorio, el 52% del follaje de *P. oocarpa* y 49% del follaje de *Quercus spp.*, corresponde a carbono; por lo anterior, el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa produce pérdidas de 3.48±0.51 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de carbono por caída de hojarasca.

Cuadro 35. Pérdida de biomasa y carbono en la vegetación arbórea.

	Vegetación	Superficie (ha)	Biomasa (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
	P-Q	1,601.819	6.27 ± 1.49	3.26 ± 0.77
Promedio	Q	1,160.096	7.55 ± 1.16	3.70 ± 0.57
	Bosque templado	2,701.915	6.91 ± 1.01	3.48 ± 0.51

La producción de hojarasca juega un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico de la materia orgánica y los nutrientes minerales en los ecosistemas forestales. La productividad promedio de hojarasca del ecosistema bosque templado lo aporta principalmente *P. oocarpa* (2.51 Mg ha⁻¹ año⁻¹), *Quercus spp.* (2.35 Mg ha⁻¹ año⁻¹), seguido de ramillas y corteza de diversas especies (1.37 Mg ha⁻¹ año⁻¹) y en menor cantidad los órganos reproductivos (Cuadro 36).

Cuadro 36. Producción de hojarasca y otros componentes arbóreos.

Componente	Biomasa (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Follaje de <i>P. oocarpa</i>	2.51	1.31
Follaje de <i>Quercus spp.</i>	2.35	1.15
Follaje de otras latifoliadas	0.14	0.07
Ramillas y corteza	1.37	0.67
Órganos reproductivos <i>P. oocarpa</i>	0.49	0.25
Órganos reproductivos <i>Quercus spp.</i>	0.05	0.02

En la vegetación arbórea mixta con presencia de encinos sobre las planicies inundables del río Apalachicola en Florida, EEUU, Elder y Cairns (1982) estimaron una producción de 8.134 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca y otros órganos vegetales, de la cual 4.834 Mg ha⁻¹ año⁻¹ correspondieron a material foliar y el resto a material no foliar; dicha producción foliar coincide con la obtenida en la vegetación arbórea de la microcuenca del río Hueyapa (4.86 Mg ha⁻¹ año⁻¹).

Quinto, Ramos, y Abadía (2007) estimaron la necromasa de la hojarasca caída para el bosque pluvial tropical de Colombia en 7.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a 3.6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de carbono, similar al carbono de la biomasa de la hojarasca de la microcuenca del río Hueyapa.

Martínez (2013) estimó la producción anual de hojarasca foliar en una pradera de gramíneas en 0.77 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en praderas mixtas de árboles maderables y arbustos fluctuaron en un rango de 2.88 y 3.15 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el bosque seco tropical de Colombia, ligeramente superiores a la producción de follaje en *P. oocarpa* (2.51 Mg ha⁻¹ año⁻¹) y *Quercus spp.* (2.35 Mg ha⁻¹ año⁻¹).

Así mismo, la producción de hojarasca en un bosque natural de *Podocarpus falcatus* fue de 4.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en dos plantaciones de *Cupressus sp.* fue de 2.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y la hojarasca caída en el bosque natural fue de más alta calidad y riqueza que en las plantaciones (Ashagrie & Zech, 2013); estimaciones inferiores al bosque templado en estudio.

Ramírez-Correa, Zapata-Duque, León-Peláez, y González-Hernández (2007) estimaron la caída de hojarasca para *Pinus patula* en 8.36 Mg ha⁻¹ año⁻¹, roble 7.88 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y ciprés en 3.73 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Igualmente, López et al. (2015) estimaron la producción promedio anual de hojarasca en el matorral espinoso tamaulipeco entre 4.08 y 7.03 Mg ha⁻¹, rangos en que se sitúa la producción de este compartimento en la vegetación arbórea del bosque templado de la microcuenca en estudio.

La biomasa del piso forestal estimada por Lopez-Escobar et al. (2018) para bosques de *Pinus montezumae* Lamb en Tlaxcala, México fue 21.8 Mg ha⁻¹ y la producción de hojarasca en este ecosistema fue de 6.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, dato idéntico al promedio anual estimado por hectárea (6.27 Mg) para el estrato P-Q del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

7.4.9. Productividad Primaria Neta aérea (PPNa) en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Clark et al. (2001), estiman la PPNa en biomasa de los bosques entre 1.7-11.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ como límites inferiores y 3.1-21.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ como límites superiores, rango en el que se estimó la PPNa de los estratos arbóreos de la microcuenca del río Hueyapa, con un valor mínimo de 10.636 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el rodal 008 del estrato P-Q y un máximo de 20.254 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el rodal 028 del estrato Q (Cuadro 37).

La PPNa promedio en biomasa del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa se estimó en 14.809 ± 0.917 Mg ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a 7.418±0.454 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en carbono (Cuadro 38). La estimación de la PPNa obtenida por Keyes & Greir (1981) para los bosques de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) estuvo entre 7.3 y 13.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, rango menor a lo estimado para la vegetación en estudio.

La PPNa en biomasa del estrato Q fue superior al del estrato P-Q en 6.60% (Cuadro 38), similar a lo sucedido en la producción de follaje y otros órganos vegetales en donde la productividad fue superior en el estrato Q en 9.26% respecto al estrato P-Q.

En plantaciones mixtas de *Eucalyptus saligna* (Sm.) y *Albizia falcataria* (L.), Binkley, Dunkin, DeBell y Ryan (1992) estimaron la PPNa hasta de 52 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con un promedio de 39 Mg ha⁻¹ año⁻¹, superior a 20.254 Mg ha⁻¹ año⁻¹ del rodal 028 del estrato Q, que presentó la mayor PPNa del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Cuadro 37. PPNa por rodal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	PPNa en Biomasa (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	PPNa en carbono (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
008	P-Q	60.582	10.636	5.460
025	P-Q	140.877	11.040	5.657
027	P-Q	112.400	13.026	6.609
032	P-Q	177.492	11.059	5.664
036	P-Q	39.971	13.045	6.604
043	P-Q	66.200	15.909	8.012
045	P-Q	115.340	15.909	8.012
047	P-Q	141.536	15.457	7.855
052	P-Q	108.526	12.997	6.643
054	P-Q	100.885	14.586	7.458
060	P-Q	125.344	12.893	6.768
062	P-Q	150.712	12.765	6.539
063	P-Q	88.156	17.403	8.839
107	P-Q	53.557	15.920	8.050
108	P-Q	45.055	15.920	8.050
111	P-Q	75.186	12.288	6.262
002	Q	84.127	15.756	7.728
017	Q	180.097	15.756	7.728
024	Q	56.688	16.942	8.306
028	Q	57.193	20.254	9.948
031	Q	53.995	14.504	7.121
035	Q	54.597	17.315	8.489
037	Q	92.929	17.315	8.489
051	Q	88.264	17.276	9.560
061	Q	127.254	19.504	5.907
071	Q	74.156	12.043	9.623
072	Q	67.218	19.636	9.623
076	Q	65.186	12.043	5.907
081	Q	49.167	11.256	5.427
084	Q	19.977	11.256	5.427
085	Q	19.759	17.819	8.742
105	Q	43.720	14.587	7.149
106	Q	26.769	14.587	7.149

Cuadro 38. PPNa por estrato y del ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Vegetación	Superficie	PPNa en biomasa (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	PPNa en carbono (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
P-Q	1,601.819	13.8033 ± 1.0229	7.0301 ± 0.5024
Promedio	Q	1,160.096	15.7558 ± 1.3785
Bosque templado	2,701.915	14.8092 ± 0.9174	7.4183 ± 0.4539

La temperatura (y la altitud) tienen influencia sobre la PPNa de los bosques, Raich, Russel, y Vitousek (1997) demostraron que por cada 1°C que incremente la temperatura media anual en rodales de *Metrosideros polymorpha* en Mauna Loa, Hawaii, EEUU, la productividad incrementa en 0.54 Mg ha⁻¹ año⁻¹; situación concordante en la vegetación en estudio, puesto que la mayor PPNa (en biomasa y carbono aéreos) se observa en zonas de menor altitud y menor impacto antropogénico del estrato Q (Figuras 31 y 32).

Por el contrario, Gómez y Gallopín (1991) argumentan que la evapotranspiración y la precipitación son estadísticamente significativas para predecir la PPNa, más no la temperatura; así, en los bosques tropicales y subtropicales con precipitación menor a 1000 mm anuales, la PPNa es de 4.93 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y en precipitaciones superiores, de 13.09 Mg ha⁻¹ año⁻¹, productividad que es superada en el 63.63% de los rodales del bosque en estudio, cuya precipitación fluctúa entre 1300 y 2000 mm anuales.

La PPN en bosques del mundo se estimó por Fernández-Martínez, Vicca, Janssens, Campioli y Peñuelas (2015) en 1.15, 1.25, 0.60 y 1.80 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de carbono en ramas, tallos, raíces gruesas y raíces finas, respectivamente; que, en suma, es menor al promedio estimado para el ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa (7.418±0.454 Mg ha⁻¹ año⁻¹).

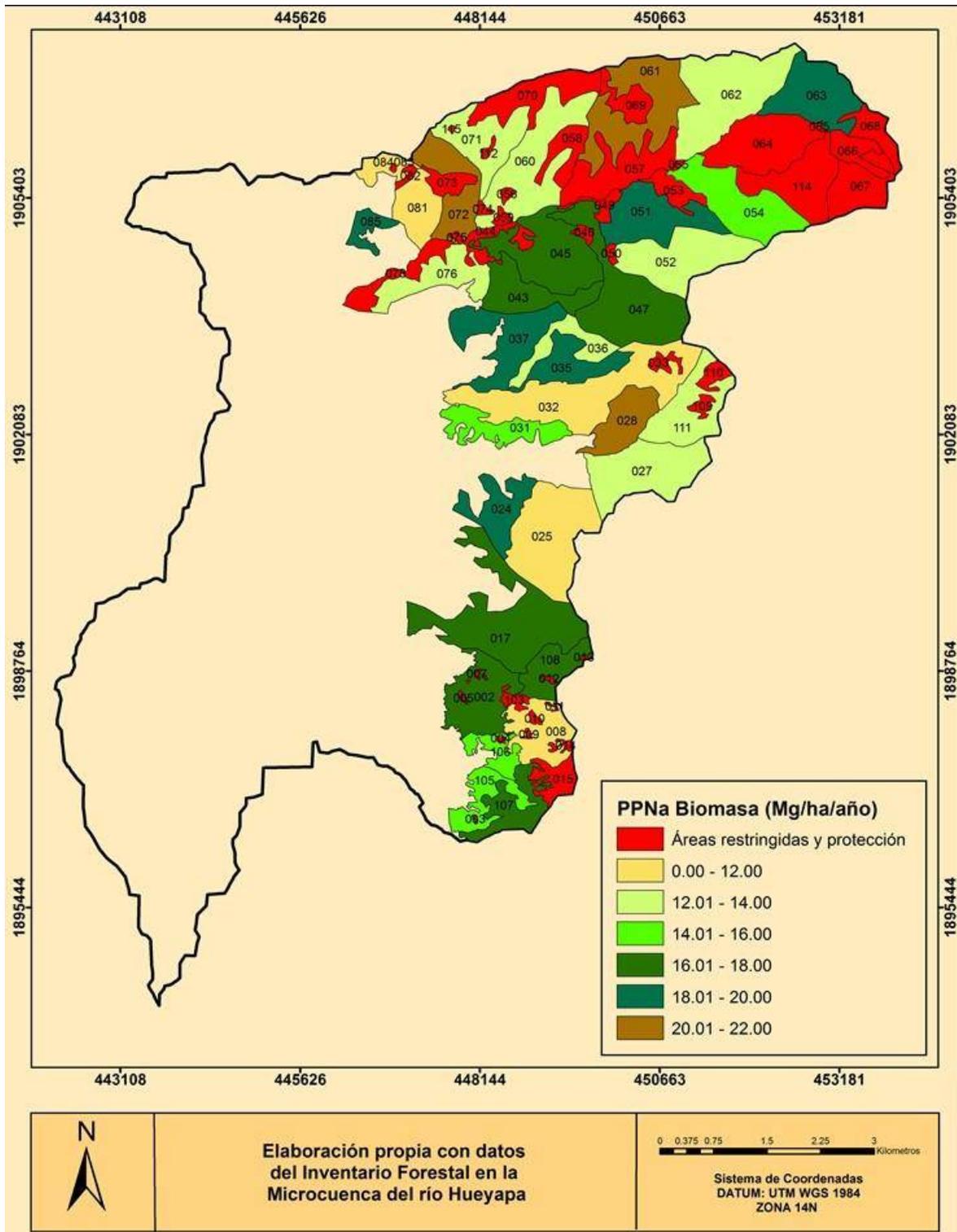


Figura 31. PPNa en biomasa del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

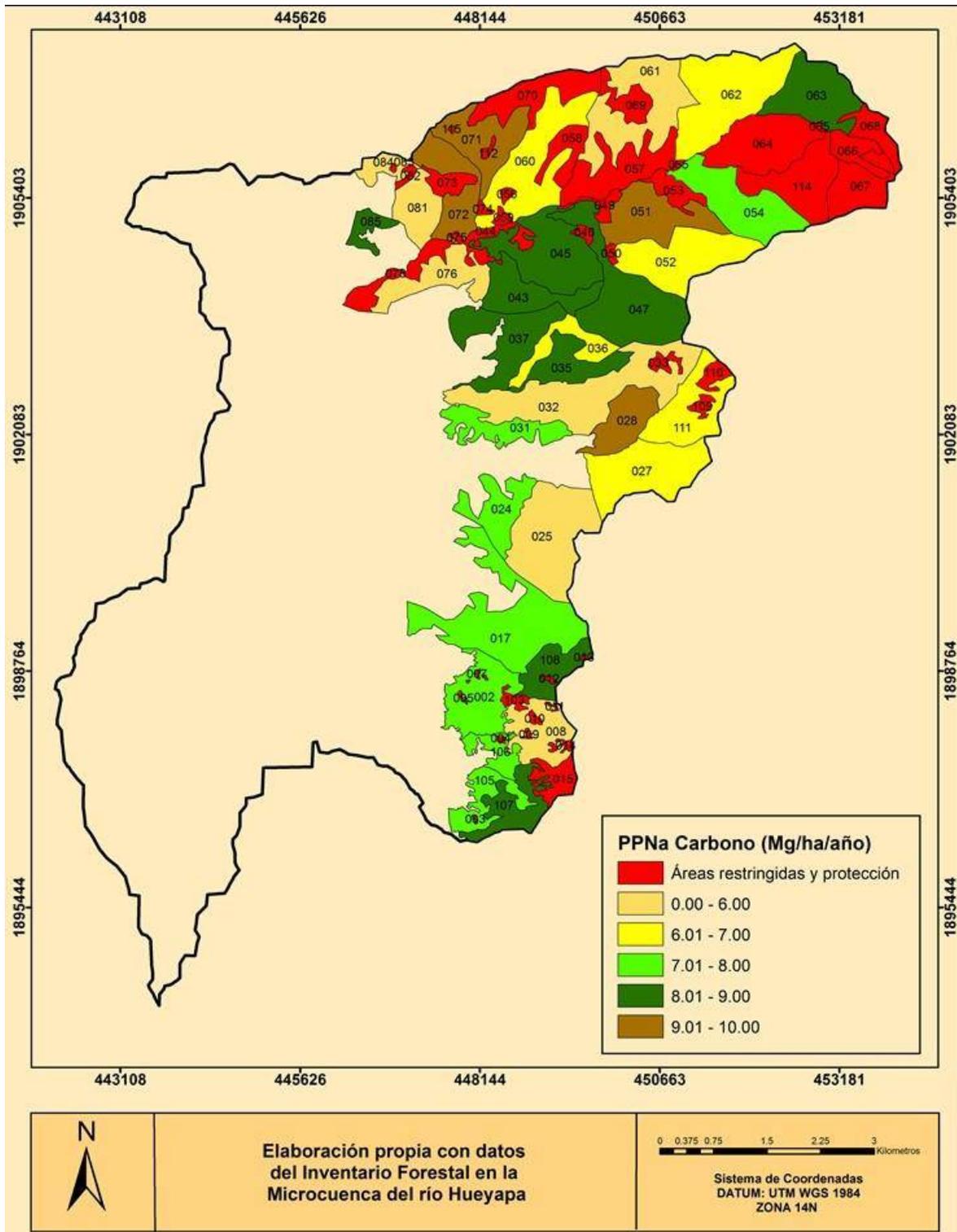


Figura 32. PPNa en carbono del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

En plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake de siete años de edad en Huimanguillo, Tabasco, México, Hernández-Ramos et al. (2017) estimaron la PPNa promedio en $26.26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalente a $13.13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono, superior en 30.32% al estimado para la vegetación arbórea del bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

7.4.10. Carbono orgánico en el suelo (COS) mineral de la microcuenca del río Hueyapa

El reservorio de COS en los rodales del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, en los primeros 30 cm de profundidad, fluctúa entre 32.71 y 96.68 Mg ha^{-1} , en los rodales 045 y 107, respectivamente, ambos en el estrato P-Q (Cuadro 39). Cabe aclarar que los suelos fueron relativamente profundos, arcillosos y un porcentaje de fracción gruesa que no sobrepasó el 10% del volumen del cilindro, por lo que no fue necesaria la aplicación de corrección por fracción gruesa.

El COS promedio estimado para los estratos P-Q y Q son similares, según Coûteaux, Bottner, & Berg (1995), depende de la cantidad y tipo de producción vegetal y del proceso de mineralización de los residuos vegetales. La estimación para el ecosistema total de la microcuenca fue de $65.52 \pm 1.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Cuadro 40), dato superior al estimado por Gough et al. (2007) en 35 Mg ha^{-1} para los bosques aledaños al lago Michigan, Michigan, EEUU.

El COS almacenado en el suelo en plantaciones forestales de pinos y otras latifoliadas en el Reino Unido se estimó entre 65 a 96 Mg ha^{-1} , (Dewar, 1992). Así mismo Valera et al. (2015) estimaron el carbono orgánico contenido en los suelos volcánicos del estado de Puebla, México entre 59.3 y 66.11 Mg ha^{-1} , rango en el que se encuentra el COS promedio en la microcuenca Hueyapa.

Por otro lado, González y Candás (2004), en bosques de *Q. rotundifolia* Lam., estimaron el COS entre 50 y 60 Mg ha^{-1} , rango menor al estimado para el estrato Q ($64.88 \pm 2.07 \text{ Mg ha}^{-1}$). El COS estimado para el ecosistema bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa es concordante al rango reportado por Paz, et al. (2016) entre 55-65 Mg ha^{-1} , a 30 cm de profundidad.

Cuadro 39. Densidad aparente y porcentaje de carbono en suelo por rodal (0-30 cm de profundidad).

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Densidad aparente (gr cm ⁻³)	Concentración de COS (%)	COS del rodal (Mg ha ⁻¹)*
008	P-Q	60.582	1.20	1.595	48.57
025	P-Q	140.877	1.19	2.175	77.43
027	P-Q	112.400	1.09	2.682	79.66
032	P-Q	177.492	1.15	1.812	63.19
036	P-Q	39.971	1.15	1.595	55.19
043	P-Q	66.200	1.16	2.827	81.42
045	P-Q	115.340	1.26	0.870	32.71
047	P-Q	141.536	1.24	1.957	72.51
052	P-Q	108.526	1.22	1.812	66.32
054	P-Q	100.885	1.19	1.957	71.54
060	P-Q	125.344	1.20	1.885	67.86
062	P-Q	150.712	1.24	1.087	40.27
063	P-Q	88.156	1.18	2.175	77.32
107	P-Q	53.557	1.14	2.827	96.68
108	P-Q	45.055	1.27	2.609	84.14
111	P-Q	75.186	1.15	2.030	69.83
002	Q	84.127	1.20	2.175	76.13
017	Q	180.097	1.20	2.392	83.24
024	Q	56.688	1.17	1.087	38.37
028	Q	57.193	1.12	2.102	70.94
031	Q	53.995	1.29	1.740	67.16
035	Q	54.597	1.18	1.522	53.73
037	Q	92.929	1.21	1.957	69.28
051	Q	88.264	1.17	2.175	49.37
061	Q	127.254	1.20	1.812	64.96
071	Q	74.156	1.11	1.812	64.96
072	Q	67.218	1.14	1.667	60.16
076	Q	65.186	1.18	1.087	57.26
081	Q	49.167	1.17	1.885	38.32
084	Q	19.977	1.20	2.102	66.16
085	Q	19.759	1.11	1.914	75.36
105	Q	43.720	1.12	2.175	64.02
106	Q	26.769	1.13	2.247	73.08

* a una profundidad de 0.30 m

Cuadro 40. COS por estrato y del ecosistema bosque templado.

	Vegetación	Superficie (ha)	COS (Mg ha ⁻¹)*
Promedio	P-Q	1,601.819	65.98 ± 0.90
	Q	1,160.096	64.88 ± 2.07
	Bosque templado	2,701.915	65.52 ± 1.01
			COS (Mg)*
Total	P-Q	1,601.819	105,164.7 ± 1,435.0
	Q	1,160.096	74,937.9 ± 2,388.7
	Bosque templado	2,701.915	18,0102.6 ± 2,786.6

* a una profundidad de 0.30 m

7.4.11. Carbono orgánico total en la vegetación de la microcuenca del río Hueyapa

En los terrenos forestales existen principalmente cinco depósitos de carbono: compartimento aéreo, subterráneo (raíz), madera muerta (arbolado muerto en pie y MLC), hojarasca y materia orgánica del suelo (COS), conocida en su conjunto como Captura Unitaria de Carbon (Ordoñez, 2008), que, para el área en estudio, se incluyó también al sotobosque.

El carbono orgánico total a nivel rodal se estimó entre 97.59 Mg ha⁻¹ en el estrato Q y 195.51 Mg ha⁻¹ en el estrato P-Q (Cuadro 41), ubicados en exposición norte de la "cañada de La Haciendita" (rodal 024) y en exposición suroeste en las faldas del cerro de El Potrero Oriental (rodal 108), respectivamente. Los rodales 081, 024 y 062 de menor reservorio promedio, disponen de la menor cantidad de carbono en el suelo (COS). Dos de los rodales con menor reservorio de carbono promedio corresponden al estrato Q y dos de mayor reservorio pertenecen al estrato P-Q (Figura 34).

El reservorio promedio de carbono orgánico total del estrato P-Q fue 6.90% superior al del estrato Q, estimando un promedio para el ecosistema de bosque templado de 151.580±8.809 Mg ha⁻¹ (Cuadro 42).

La biomasa está íntimamente ligada al reservorio de carbono orgánico, en bosques de la provincia de Jiangsu al suroeste de China. Cao, Coops, Innes, Dai y She (2014) estimaron el promedio de biomasa total en bosque mixto en $116.37 \text{ Mg ha}^{-1}$; que equivaldría aproximadamente a $58.185 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono orgánico total; es decir, 2.6 veces menos que el promedio del bosque templado de la microcuenca Hueyapa. En los bosques estudiados por Galicia et al. (2015) la contribución de la biomasa total o carbono total en bosques bajo aprovechamiento fue de 74, 4, 17 y 5 % del compartimento aéreo, subterráneo, residuos leñosos gruesos y el mantillo, respectivamente, mientras que para el bosque en estudio el 46.56% correspondió al carbono aéreo, 43.12% al COS y con menor aportación el sotobosque con solo el 0.37% del carbono orgánico total del ecosistema (Figura 33).

El reservorio de carbono orgánico total en plantaciones forestales en el Reino Unido, Dewar (1992) lo estimó en 93 Mg ha^{-1} para latifoliadas y hasta 254 Mg ha^{-1} en pinos, rango en que se estimó el promedio de carbono orgánico total almacenado en el bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

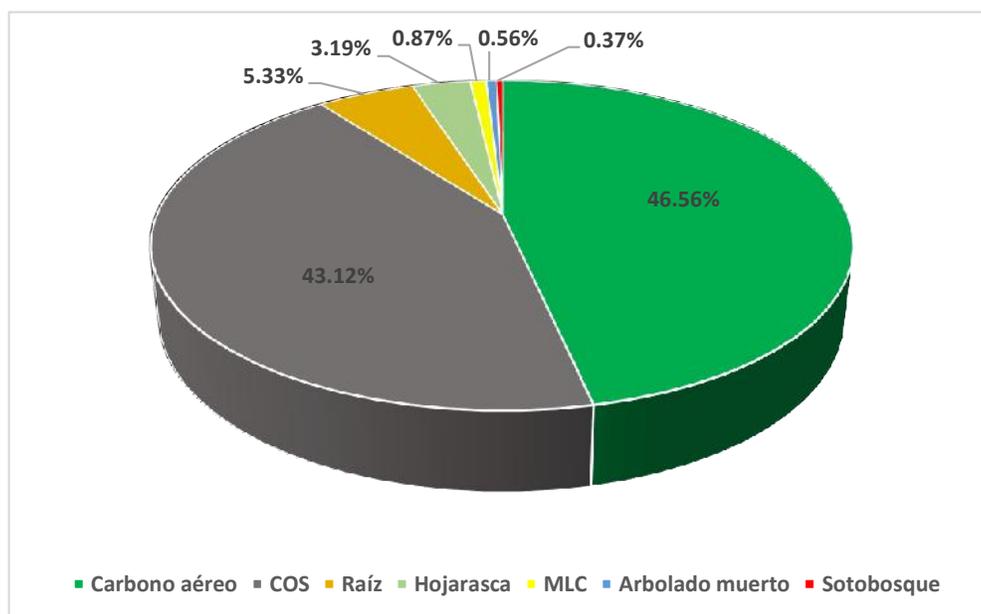


Figura 33. Distribución del carbono orgánico total por compartimento en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Cuadro 41. Carbono orgánico total por rodal en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Carbono orgánico total (Mg ha ⁻¹)*
008	P-Q	60.582	116.83
025	P-Q	140.877	170.03
027	P-Q	112.400	168.28
032	P-Q	177.492	153.14
036	P-Q	39.971	140.68
043	P-Q	66.200	178.59
045	P-Q	115.340	148.53
047	P-Q	141.536	190.61
052	P-Q	108.526	182.88
054	P-Q	100.885	170.26
060	P-Q	125.344	142.76
062	P-Q	150.712	112.98
063	P-Q	88.156	180.74
107	P-Q	53.557	184.50
108	P-Q	45.055	195.51
111	P-Q	75.186	161.57
002	Q	84.127	177.64
017	Q	180.097	183.53
024	Q	56.688	97.59
028	Q	57.193	172.33
031	Q	53.995	129.85
035	Q	54.597	141.46
037	Q	92.929	157.03
051	Q	88.264	134.99
061	Q	127.254	158.41
071	Q	74.156	134.49
072	Q	67.218	137.97
076	Q	65.186	136.20
081	Q	49.167	105.54
084	Q	19.977	133.11
085	Q	19.759	128.86
105	Q	43.720	127.38
106	Q	26.769	147.84

* a 0.30 m de profundidad

Weng, Luo, Gao y Oren (2011) argumentan que existen dos grupos de almacenes de carbono en el bosque, un grupo de residencia corta (follaje y raíces finas) cuyo almacén de carbono se estabiliza a los 20 años de edad y otro de residencia prolongada (compartimento leñoso y COS) que continúa incrementándose y en promedio, a los 60 años de edad, el reservorio total de carbono puede ser de 400 Mg ha⁻¹, edad promedio de los bosques del estrato P-Q, cuyo reservorio de carbono promedio es 2.6 veces menor.

Cuadro 42. Carbono orgánico total promedio por estrato y del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

	Vegetación	Superficie	Carbono orgánico total (Mg ha⁻¹)*
	P-Q	1,601.819	162.37 ± 12.14
Promedio	Q	1,160.096	141.43 ± 10.96
	Bosque templado	2,701.915	151.58 ± 8.81

* a 0.30 m de profundidad

Los bosques del pacífico noroeste en los Estados Unidos de América, presentan el mayor reservorio de carbono orgánico total en el mundo. Luyssaert et al. (2008) estimaron una acumulación entre 500 y 700 Mg ha⁻¹, en bosques que contienen entre 1,400 y 1,800 m³ ha⁻¹ de madera, superior al promedio del bosque templado de la microcuenca hasta en 4.5 veces. Sin embargo, no es comparable con los 1,023 Mg ha⁻¹ de carbono promedio estimado para los ecosistemas de manglar, considerados como los de mayor riqueza en reservorio de carbono (Donato et al., 2011), hasta en 6.7 veces superior al reservorio promedio del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

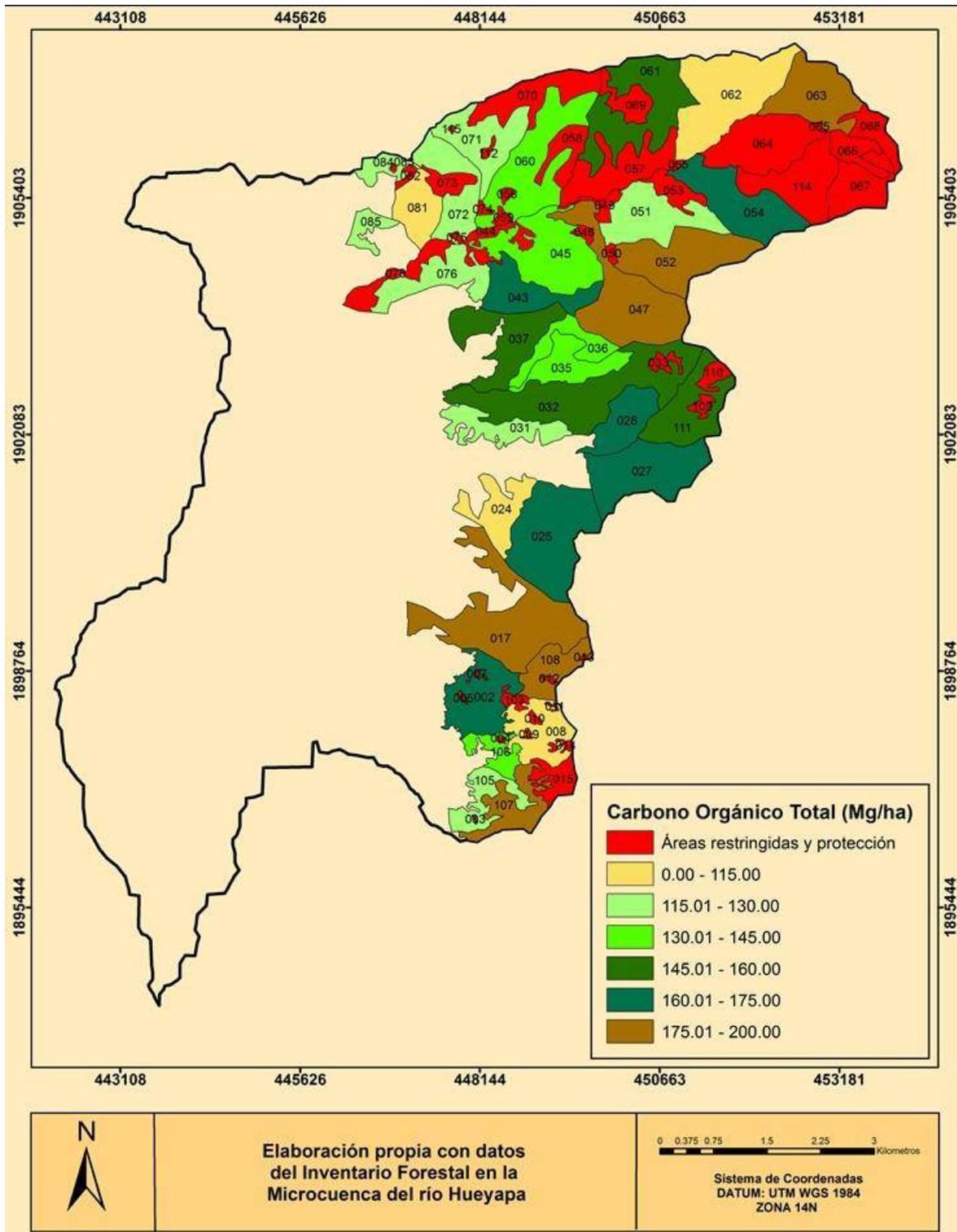


Figura 34. Distribución del carbono orgánico total por compartimento en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

7.4.12. Análisis de fertilidad de los suelos de la microcuenca del río Hueyapa

El análisis químico y fertilidad de los suelos de la microcuenca del río Hueyapa se resume en el Cuadro 43. En general, los estratos P-Q son suelos rojizos con alto contenido de arcilla y en los estratos Q, predominan suelos con textura areno-limosa.

La productividad de los ecosistemas forestales está influenciada por las condiciones climáticas, edáficas y la estructura de las masas forestales, que regulan el ciclo y reservorio de nutrientes (Legout et al., 2014). La disponibilidad de estos depende del pH, que en los suelos minerales de la microcuenca del río Hueyapa se ubica entre 4.110 y 4.490 (moderadamente ácidos), escala en que se encuentran la mayoría de los suelos forestales de bosques templados-fríos, debido a la liberación de ácidos orgánico por la descomposición de la hojarasca y lixiviación de las bases del suelo mineral superficial (Pritchett, 1991).

El pH ácido favorece la disponibilidad de fósforo soluble; sin embargo, dificulta el establecimiento de la mayoría de los cultivos agrícolas, excepto para unos pocos como mandioca y caña de azúcar (Moran et al., 2000), pero favorece el desarrollo de las especies forestales de clima templado frío, como en la microcuenca Hueyapa.

Nueve de las diez zonas muestreadas coinciden con valores de fósforo Bray en suelos procedentes de material parental de basalto (7.749 – 23.248 ppm) y uno con 92.991 ppm, coincidente con suelos de material parental de arenisca (Pritchett, 1991).

La concentración mínima de fósforo (7.749 ppm) en los suelos minerales fue en el estrato P-Q con exposición sur en la cañada de Dos Caminos y la máxima (92.991 ppm) en el estrato P-Q con exposición norte en la cañada de La Haciendita, zona que coincide con el mayor reservorio de carbono orgánico total. Ésta cantidad de fósforo es alta comparada con 1 ppm en los suelos forestales de la amazonia (Legout et al., 2014), que probablemente se deba a la presencia periódica de incendios en la microcuenca como lo expresan Capulín, Mohedano y Razo (2007), quienes argumentan que después de un incendio éste elemento incrementa en la capa superficial del suelo.

Aunque no siempre existe una correlación positiva entre la disponibilidad de nutrientes y las concentraciones de fósforo en los suelos forestales, ya que el componente biológico (actividad microbiana) juega un papel importante en esta disposición (Legout et al., 2014). Sin embargo, al disminuir el pH incrementa la disponibilidad de micronutrientes como el boro, manganeso, cobre y hierro (Pritchett, 1991), que, a excepción del boro, disponible solo en dos áreas de la microcuenca (0.003 y 0.037 ppm), los otros tres elementos tienen excelentes concentraciones en toda la superficie.

Los 6.91 Mg ha⁻¹ promedio de hojarasca y otros componentes que la vegetación arbórea deposita anualmente sobre el suelo forestal, aportan porcentajes de materia orgánica entre 2.369% en el estrato Q y 7.481% en el estrato P-Q, ambos con exposición norte en la cañada de Dos Caminos. Puesto que la materia orgánica contiene, convencionalmente, 58% de carbono orgánico (Pribyl, 2010), éste último se encuentra entre 1.374 y 4.338%, rango reportado para los suelos minerales en los rodales de la microcuenca en estudio (Cuadro 39).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) influyen en la producción, ya que proporciona reserva, disponibilidad e intercambio de nutrientes, para el crecimiento vegetal y actividad microbiana (Thiers, Reyes, Gerding, & Schlatter, 2014). En los suelos de la microcuenca Hueyapa la CIC fluctúa entre 3.300 en exposición sur de La Haciendita con suelos claros, con textura areno-limo-arcilloso y 7.500 exposición norte de la cañada de Dos Caminos, con suelos rojos de alto contenido de arcilla, partículas que, a diferencia del limo y arena, participan activamente en intercambios químicos y agua.

Cuadro 43. Variables indicativas de la fertilidad del suelo mineral de la microcuenca del río Hueyapa.

Exposiciones dominantes y estrato	pH	M. O. (%)	N (%)	P (ppm)	CIC (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)
El Potrero Oriental Encino	4.36	4.239	0.062	20.826	4.60	0.130	2.80	1.50	17.072	0.544	0.394	7.424	0.037
El Potrero Oriental P-Q	4.14	4.364	0.118	12.593	4.20	0.143	2.40	0.60	12.990	0.159	0.324	3.339	nd
La Cañada Exp. Norte Q	4.12	2.369	0.081	10.655	7.50	0.186	4.50	3.20	26.216	0.305	0.956	17.499	nd
La Cañada Exp. Norte P-Q	4.11	7.481	0.067	9.687	5.90	0.211	2.25	1.55	13.700	0.263	0.243	3.889	nd
La Cañada Exp. Sur Q	4.49	4.114	0.113	20.342	4.90	0.198	3.90	2.20	18.827	0.128	0.603	9.027	nd
La Cañada Exp. Sur P-Q	4.27	3.366	0.048	7.749	6.00	0.205	3.10	2.30	4.798	0.161	0.287	4.143	Nd
La Haciendita Exp. Norte Q	4.31	3.117	0.090	23.248	5.10	0.248	1.70	2.60	9.976	0.378	0.241	3.500	0.003
La Haciendita Exp. Norte P-Q	4.25	3.242	0.091	92.991	4.80	0.155	1.90	2.40	5.028	0.102	0.145	1.814	Nd
La Haciendita Exp. Sur Q	4.44	4.114	0.099	8.718	3.30	0.242	2.65	3.25	12.335	0.652	0.385	10.512	Nd
La Haciendita Exp. Sur P-Q	4.36	3.616	0.071	14.530	5.10	0.192	1.90	2.40	4.834	0.164	0.088	1.946	Nd

VIII. PROPUESTA "SILVICULTURA PARA POTENCIALIZAR LA TASA DE CAPTURA DE CARBONO EN EL BOSQUE TEMPLADO DE LA MICROCUENCA HUEYAPA"

8.1. Conceptualización de los tratamientos silvícolas y complementarios

Los tratamientos silvícolas inician desde el aseguramiento del germoplasma y la preparación del sitio para garantizar el establecimiento de la regeneración. Una vez establecida ésta, inician los tratamientos silvícolas intermedios y complementarios que proporcionen espacio de crecimiento, y contribuyan a la composición y estructura del rodal en desarrollo, para cumplir sostenidamente con los fines ecológicos, productivos y económicos de las masas forestales.

Los tratamientos silvícolas son actividades que incluyen la remoción de arbolado, las cuales tienen como finalidad mejorar y conducir el desarrollo (según su objetivo: producción, aprovechamiento, conservación, restauración o protección) de una unidad mínima de manejo (rodal o subrodal) hasta su madurez, así como crear las condiciones para el establecimiento de la nueva masa forestal (DOF, 2008).

La elección, frecuencia e intensidad de tratamientos silvícolas y complementarios están determinados por una evaluación de los aspectos ecológicos, objetivos de la ordenación y la composición del rodal, considerando, además, las restricciones sociales. Como parte integral del plan de ordenamiento forestal, entre los tratamientos silvícolas (intermedios y complementarios) destacan: cortas de regeneración, liberación con preaclareo, aclareo, poda, eliminación de hierbas y arbustos, mejoramiento del sitio mediante fertilización, control de la necromasa mediante quemas prescritas, ubicación, control y combate de plagas y enfermedades, entre otros (Daniel et al., 1982).

Los tratamientos silvícolas y complementarios sugeridos para el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa están apegados a la norma oficial mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006 que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas (D. O. F., 2008).

Si bien es cierto que los sistemas silvícolas son esquemas de cosecha y manejo a largo plazo diseñados para optimizar el crecimiento, regeneración y manejo de determinados productos forestales (Young, 1991), el plan de manejo silvícola aquí propuesto no es con fines de aprovechamiento forestal; sino de protección, conservación y restauración forestal, con la finalidad de potencializar la tasa de captura de carbono y mantener la producción sostenida de bienes y demás servicios ecosistémicos del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Una alternativa de restauración de áreas abandonadas por actividades agropecuarias son los sistemas agroforestales que implican la asociación de plantas leñosas (árboles maderables) con cultivos agrícolas o frutícolas; mientras que los sistemas agrosilvopastoriles son asociaciones de árboles forestales con cultivos agrícolas y pastizales, usados de forma permanente o intermitente (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [CATIE], 1986).

8.2. Justificación de los tratamientos silvícolas propuestos

Cuando el método de regeneración por árboles semilleros del MDS, no garantice el establecimiento de la regeneración, es necesaria la preparación del sitio, sobre todo en lugares susceptibles a la invasión de especies arbustivas (Young, 1991), herbáceas, pastos o con hojarasca abundante; por lo que una corta "selectiva" de protección del MMOBI resulta más adecuada, ya que deja en pie suficiente cantidad de árboles para proporcionar sombra parcial y protección al renuevo; situación que debe aprovecharse en rodales con bosque maduro y baja densidad en la microcuenca.

8.2.1. Reforestación y siembra directa

En la actualidad es importante aumentar la superficie forestal mediante el cultivo, a partir de terrenos que la ganadería y la agricultura van cediendo a la silvicultura, porque dejan de ser rentables a las primeras actividades económicas. Además, se debe definir un régimen de manejo más conveniente para cada rodal con especies (nativas o introducidas) de mayor valor económico, sin alterar el equilibrio ecológico.

Por otro lado, los rodales afectados por la caída de árboles por el viento, pero sobre todo en rodales con afectación de derrumbes a causa de la tormenta tropical Manuel

en el 2013, requieren atención inmediata en el establecimiento de la regeneración y realización de obras de conservación de suelos (Figura 35).

El volumen del rodal está influenciado por la densidad arbórea, diámetro promedio, área basal y altura, por lo que, si se quiere mejorar la producción en volumen, la manipulación silvícola debe ser capaz de modificar uno o más de estos factores para favorecer el crecimiento extra (Daniel et al., 1982), que repercutirá, sin duda alguna, en la acumulación de más biomasa y, por ende, mayor acumulación de carbono orgánico promedio por unidad de superficie.



Figura 35. Árboles derribados por vientos fuertes al inicio de lluvias del año 2017.

La restauración forestal mediante siembra directa de semillas es más económica que la reforestación (Mata et al., 2010). Además, realizar la restauración de ecosistemas mediante reforestación y/o siembra directa de semillas con especies nativas incrementa el éxito del establecimiento e incremento de sus variables dasométricas recuperando la función y estructura del ecosistema degradado (Ventura-Ríos, Plascencia-Escalante, Hernández, Ángeles-Pérez, & Aldrete, 2017).

Por lo anterior, se sugiere la siembra directa de semillas en claros del bosque con germoplasma de especies forestales prioritarias como *P. oocarpa*, *Q. resinosa*, *Q. crispifolia*, *Q. conspersa*, *Q. elliptica*, *Q. subspathulata*; con especial atención en el rescate de *Quercus planipocula* que únicamente se identificó un relicto de menos de dos hectáreas en la convergencia de los rodales 027 y 111 del estrato P-Q, ubicados en el fondo de la cañada de La Haciendita.

La reforestación y/o siembra directa con leguminosa arbóreas propicia la fijación de nitrógeno de forma biológica (Méndez & Bilbao, 2015), mayor reclutamiento y liberación de nutrientes. Montero-Solís et al. (2017) evaluaron el efecto de la fertilización y la combinación de *Gliricidia sepium* (especie fijadora de nitrógeno) sobre la incidencia de *Hypsipyla grandella* en plantaciones de *Cedrela odorata*. Los autores concluyeron que el intercalado de *G. sepium* incrementó la disponibilidad de potasio y magnesio, mejoró el estatus nutrimental de *C. odorata* y minimizó la incidencia de la plaga durante el primer año de crecimiento.

Bajo esta premisa, se sugiere realizar el enriquecimiento del suelo con especies fijadoras de nitrógeno y, pioneras en su establecimiento en claros del bosque, entre las que destacan como prioritarias *Lysiloma acapulcensis*, *Lysiloma divaricata*, *Leucaena esculenta*, *Gliricidia sepium*, *Acacia sp.*, con inclusión de *Guazuma ulmifolia* que se distribuyen naturalmente en la microcuenca.

8.2.2. Sistemas agroforestales o agrasilvopastoriles

Los sistemas agroforestales pueden establecerse en áreas descubiertas de vegetación, áreas abandonadas por la agricultura (huamiles) y aledañas a los cuerpos de agua dentro del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

En general, la aplicación de estos sistemas productivos puede consolidar o aumentar la productividad de las tierras con usos pecuarios y terrenos abandonados por actividades agrícolas con baja productividad o por lo menos, evitar que continúe la degradación del suelo o merma de la productividad en el transcurso de los años (Musálem-Santiago, 2002).

Las franjas protectoras de vegetación ribereña deberán tener como mínimo 20 metros, contados a partir de las orillas de los cauces y otros cuerpos de agua permanentes; para los cuerpos de agua temporales debe ser de 10 metros (DOF, 2008). En las riberas de las corrientes permanentes e intermitentes del río Hueyapa, se observan áreas desprovistas de vegetación arbórea, por lo que las autoridades agrarias deben consensar entre los dueños de éstos terrenos en realizar reforestaciones con fines de protección o establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles.

Con el proyecto Sembrando Vida del Gobierno Federal 2018-2024 se ha anunciado la reforestación de un millón de hectáreas de árboles forestales y frutales, con la inclusión de cultivos agrícolas. Para Guerrero, entrará en vigor en el año 2020, con el que se podrán financiar proyectos de esta naturaleza con dueños de los terrenos en la rivera de las corrientes de agua del río Hueyapa.

8.2.3. Cortas intermedias (preclareo y aclareo)

Para el control de la densidad de las masas forestales en edades tempranas, antes de que surjan serias situaciones de competencia (cierre de copa) entre árboles jóvenes, las cortas intermedias son indispensables para evitar riesgos de estancamiento en el desarrollo de la vegetación arbórea y su aplicación depende de factores topográficos, de mercado, estéticos (sociales), disponibilidad de presupuesto y mano de obra, entre otros.

Los preclareos, se realizan antes de los diez años de desarrollo de la masa forestal, cuando la densidad y distribución del renuevo hace necesario eliminar la competencia y seleccionar los mejores sujetos para mejorar la calidad del bosque, aprovechando la corta de liberación o simplemente cuando la condición general de la regeneración es abundante (Rosales et al., 1982).

Posteriormente, se realizan cortas periódicas al bosque (aclareos), entre su establecimiento y corta final, con el fin de dar espaciamento a los árboles para su óptimo desarrollo (D. O. F., 2008). La competencia entre árboles produce disminución del vigor de los mismos, aumentando la susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades. Pérez-Camacho, López-López, Equihua-Martínez, Cetina-Alcalá, y Méndez-Montiel (2013) concluyeron que, a mayor densidad de arbolado en términos de área basal por hectárea, incrementa la vulnerabilidad al ataque severo de *Dendroctonus adjunctus* en bosques naturales de *Pinus hartwegii* L.

Los aclareos ligeros en *Pinus sylvestris* L. aceleran el crecimiento en diámetro con tamaños menores o iguales al promedio; el incremento en volumen y área basal decrecen conforme aumenta la intensidad de aclareos; sin embargo, no realizar aclareos significa menor producción de madera comercial (Del Río, Camala, Cañellas, Roig, & Montero, 2008; Varmola, Salminen, & Timonen, 2004).

La densidad de la regeneración está influenciada positivamente por los aclareos. Bailey y Tappeiner (1998) demostraron que en rodales aclareados dicha densidad fue de 1,433 brinzales ha⁻¹, mientras que en los no aclareados fue de tan solo 233 brinzales ha⁻¹, manteniendo esta similitud en el arbolado de mayor edad. El crecimiento de copa fue superior en rodales aclareados (66%) que en los no aclareados (44%) en bosques naturales de Douglas-fir en el oeste de Oregon, EEUU.

Algunas especies como *Pinus contorta* Dougl. (ex LOUD.), *Pinus ponderosa* Dougl. (ex Laws.), y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, no sucumben a la competencia interespecífica, propiciando a menudo rodales estancados con miles de árboles por hectárea (Graham, Harvey, Jain, & Tonn, 1999), situaciones observables en algunos rodales de la microcuenca (Figura 36), en cuyos casos son indispensables los aclareos preferentemente de árboles suprimidos.

Posterior al aclareo, mejora el crecimiento arbóreo en plantaciones de *Pinus koraiensis* e incrementa el número de plántulas de regeneración de especies maderables y el sotobosque (Kang, Shibuya, & Shin, 2014).



Figura 36. Bosque joven de *P. oocarpa* con alta densidad en la microcuenca del río Hueyapa.

En los bosques de *Quercus petraea* Matt. en el sureste de la República Checa, Fedorová, Kadavý, Adamec, Kneifl y Knott (2016) concluyeron que en los rodales no clareados el incremento diamétrico fue de 4.13 ± 0.50 mm año⁻¹, mientras que en los clareados fue de 6.56 ± 0.98 mm año⁻¹, significando un impacto positivo del 59%, sin mostrar incremento en altura.

Clark, Sessions, Krankina, y Maness (2011) no encontraron evidencia contundente del efecto de los aclareos sobre la captura de carbono en los bosques, aunque tienen un gran efecto en la estructura y complejidad del dosel (Wilkinson, Crow, Eaton & Morinson, 2016) que abona al incremento de biomasa y carbono.

Al respecto, López-López, y Flores-Nieves (2016) concluyeron que, cuanto mayor es la densidad de arbolado (≥ 1200 árboles ha⁻¹), más eficiente es el uso de los recursos del sitio, pero menores son las dimensiones de los árboles individuales de *Pinus patula* Schl. et Cham. Más aún, si el objetivo del manejo forestal es secuestrar el carbono

atmosférico por períodos largos de tiempo, esto sólo se puede lograr mediante la utilización de la madera en la fabricación de bienes de larga duración (muebles, casas, etc.). Para ello, se requiere de productos forestales de largas dimensiones que, según el mencionado estudio, se obtienen más eficientemente en masas arbóreas de baja densidad en las que cada árbol individual utiliza mayor cantidad de los recursos disponibles en el sitio.

8.2.4. Podas

La poda (inducida) consiste en la eliminación de ramas verdes en los verticilos bajos a edades tempranas, aunque en especies no tolerantes, éstas mueren cuando los árboles crecen con densidades altas, regularmente no caen del tronco del árbol sin dejar huella; pero, sobre todo, pueden dar como resultado una pérdida de acumulación de biomasa por el retraso en su desarrollo.

La acumulación de biomasa en el componente de ramas en árboles de *Pinus oocarpa* fue de 32.6%, mientras que en *Quercus spp.* fue de 46.4%, valores altos comparados con otras investigaciones; si bien es cierto, que, si la meta es la acumulación de biomasa y carbono en cualquier compartimento del árbol, no importa la ramificación. Sin embargo, si a futuro cambia el objetivo de producción, no se dispondrá de madera en rollo de buena calidad para la industria de aserrío, ya que los nudos grandes, producto de la ramificación excesiva, demerita la calidad y precio de la madera.

La poda de ramas vigorosas demerita el crecimiento del árbol, aunque a largo plazo mejora la calidad de la madera. En bosques con fines de conservación, como es el caso del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, se realizará la poda exclusivamente sobre ramas débiles y muertas, a edades tempranas del árbol (brinjal – latizal). Las ramas débiles se localizan en la parte baja del árbol, son incapaces de producir sus propios fotosintatos o producen muy pocos (Daubenmire, 1990), por lo que importan carbohidratos desde otras ramas, disminuyendo la productividad total del árbol.

Principalmente en los estratos de pino-encino se observa regeneración que requiere poda de manera urgente (Figura 37) para mejorar la calidad de la madera a largo plazo e incrementar su desarrollo a corto plazo.



Figura 37. Brinzales y latizales de *P. oocarpa* con abundantes ramas bajas.

8.2.5. Eliminación del sotobosque y necromasa para el establecimiento de la regeneración

Los bosques irregulares conservan o mejoran los elementos de estructura compleja que pueden fomentar la regeneración abundante de árboles de sucesión tardía, por lo que requieren de limpieza para establecer la regeneración de especies deseables (Gottesman & Keeton, 2017).

El fuego prescrito controla el desarrollo de las especies dominantes y expone el suelo mineral, lo cual permite el establecimiento y enriquecimiento de nuevas especies de flora, reduce el riesgo de incendios catastróficos e incrementa el establecimiento de la regeneración de especies pioneras (Parro, Köster, Jogiste, & Vodde, 2009) y deseables como el pino y el encino en la microcuenca.

Busse, Simon, y Riegel (2000) argumentan que la eliminación del sotobosque mediante la quema prescrita de baja intensidad (reducción del 24% del horizonte orgánico) afecta las variables dasométricas de los árboles; sin embargo, se recuperan en los

próximos dos años. Estos autores no encontraron evidencia que sugiera que ésta actividad silvícola afecte la productividad del bosque; por el contrario, incrementa la diversidad del sotobosque y la exposición del suelo mineral facilita el establecimiento de la regeneración.

Sin duda el fuego mal usado puede dañar a las especies susceptibles. Proença, Pereira, y Vicente (2010) evaluaron la resistencia y resiliencia al fuego en bosques mixtos de *Quercus robur-Ilex aquifolium* y plantaciones con *Pinus pinaster-Pinus sylvestris*. Concluyeron que, en áreas no quemadas, en ambos ecosistemas, existió mayor diversidad de sotobosque, sin diferencia en cuanto al establecimiento de la regeneración, pero mayor lentitud para el restablecimiento del sotobosque en las plantaciones de pinos.

El manejo del sotobosque para el establecimiento de la regeneración en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa se realizará en rodales que superan un Mg ha^{-1} promedio de carbono (Figura 38 y 39).

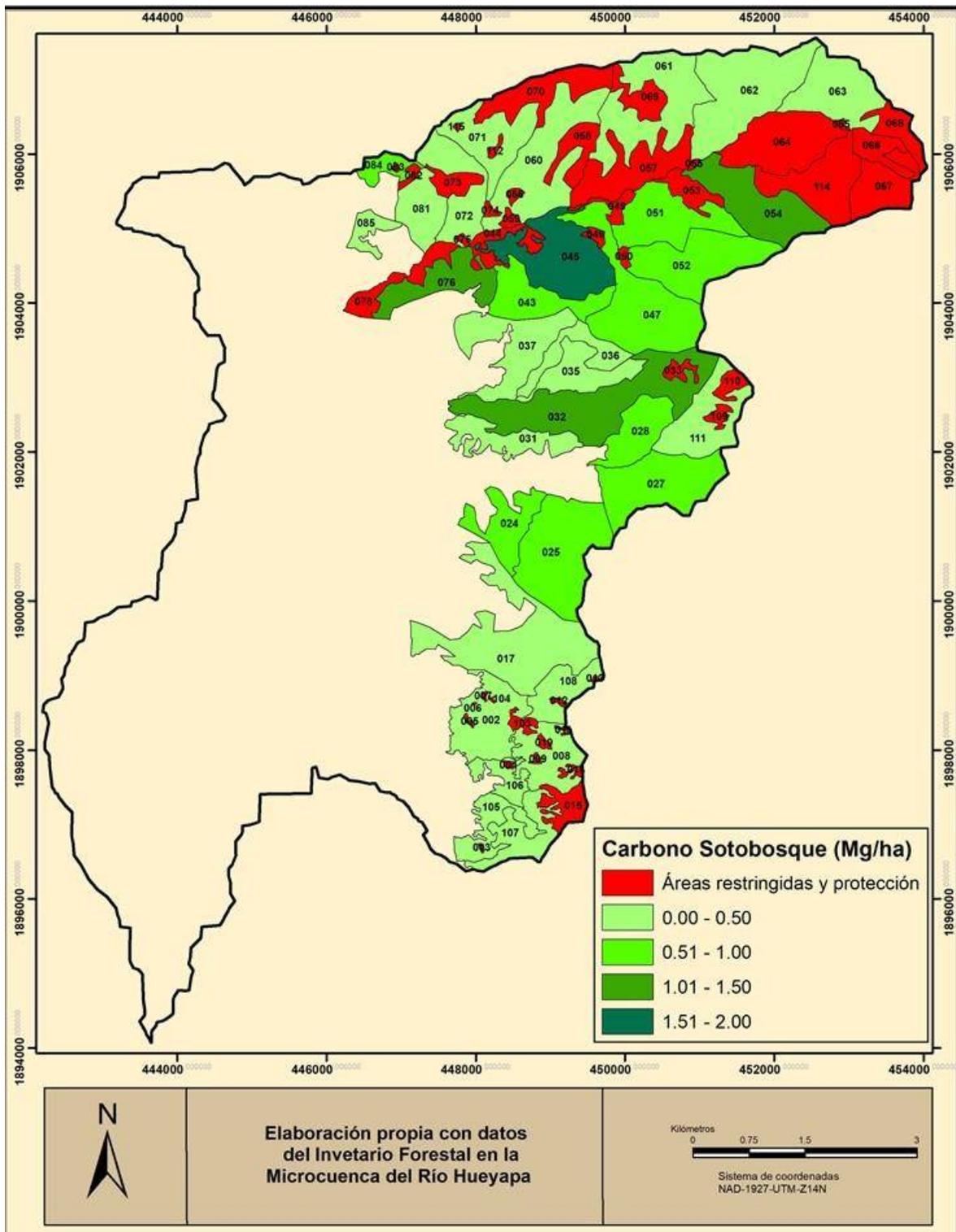


Figura 38. Distribución del carbono en sotobosques en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.



Figura 39. Área que requiere manejo del sotobosque para facilitar el establecimiento de la regeneración.

La supresión total de incendios propicia la proliferación de material leñoso caído, combustible latente para el desarrollo de incendios de gran severidad. Para bosques dominados por *Pinus sp.*, Sáenz-Ceja, y Pérez-Salicrup (2018) sugieren mantener una estructura de edades multietáneas e inducir fuegos superficiales, frecuentes y de baja intensidad como herramienta de manejo forestal para prevenir eventos catastróficos y la alteración de la regeneración arbórea.

Sin embargo, aunque se desarrolla exitosamente en bosques mezclados, *P. oocarpa* es una especie intolerante (Instituto Nacional de Bosques, 2017) por lo que se propone inducir su regeneración en claros, generando pequeños subrodales coetáneos, de modo que en un rodal existan manchones de edades multietáneas.

Las coníferas han generado mecanismos para asegurar su permanencia y regeneración entre los que destacan corteza gruesa, estado cespitoso, frutos serótinicos, capacidad de rebrote (Rodríguez, 1996; Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). Acción última que se observa en áreas frecuentemente incendiadas en la microcuenca, con la contundente capacidad de rebrote en la regeneración de *P. oocarpa*.

Juárez-Martínez y Rodríguez-Trejo (2003) evaluaron el efecto de tres intensidades de incendios forestales sobre la dinámica de la regeneración natural de *Pinus oocarpa* var. *ochoteranae* en Sola de Vega, Oaxaca, México. Los autores concluyeron que en las áreas afectadas con alta intensidad existió mayor densidad de regeneración (12,550

árboles por hectárea) que en áreas no incendiadas (10 árboles por hectárea) a cuatro años del incendio.

En bosques de encino-pino de las mesetas de Cumberland, Kentucky, EEUU, el fuego redujo la acumulación, composición y riqueza de la hojarasca, pero benefició por igual la regeneración de especies tolerantes e intolerantes, y después de dos temporadas, la regeneración de *Quercus*, *Liriodendros* y *Acer* ocurrió exitosamente (Kuddes-Fischer & Arthur, 2002). Situación que impera con la regeneración de *P. oocarpa* y su capacidad de rebrote, en áreas incendiadas y dosel abierto, en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa (Figura 40).



Figura 40. Regeneración de *P. oocarpa* (a) y rebrote de la misma, después de un incendio forestal (b)

El fuego actúa favorablemente en el crecimiento en diámetro de los árboles individuales. Rodríguez-Trejo (2002) evaluó el incremento en diámetro en *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh concluyendo que éste fue de 0.30 cm en áreas sin aplicación de quemas y 0.48 cm en áreas con quema prescrita.

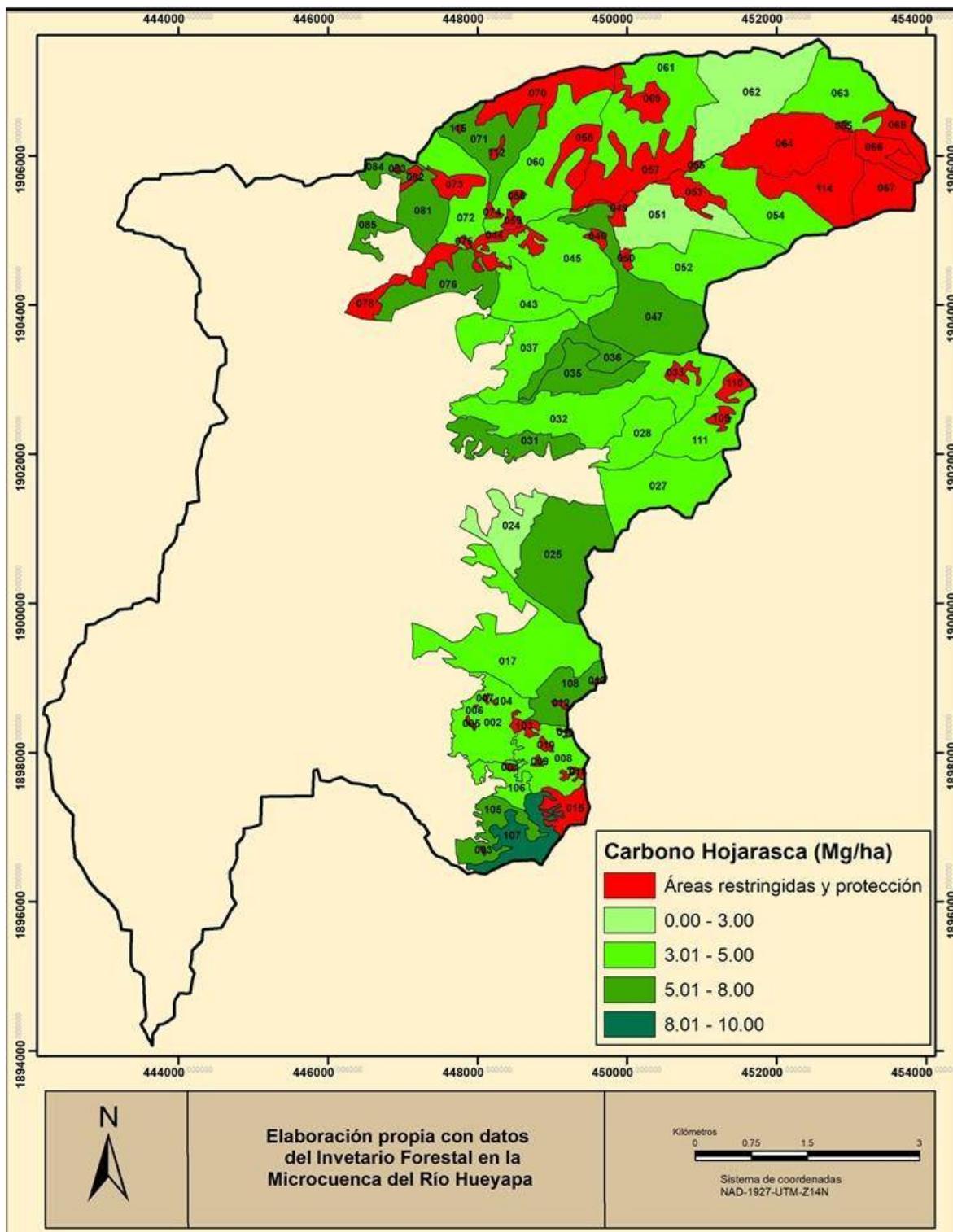


Figura 41. Distribución de la hojarasca en rodales del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

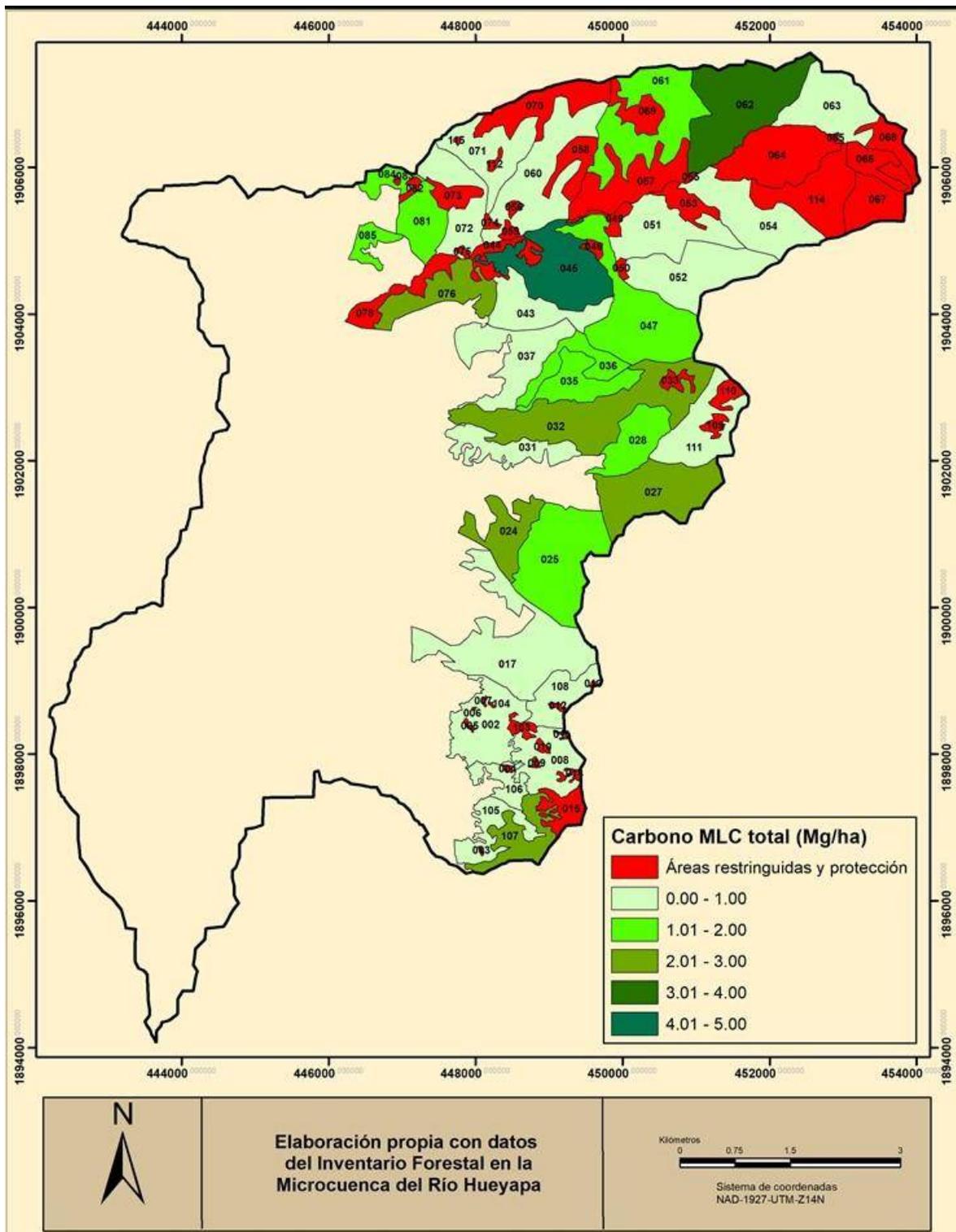


Figura 42. Distribución de MLC en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Considerando las condiciones topográficas, cobertura de sotobosque, la cantidad de hojarasca y cantidad de MLC en algunos rodales, es conveniente realizar rastreos con herramientas manuales para propiciar la germinación de la semilla y establecimiento de la regeneración, como lo demostraron Zhu et al. (2008) en la regeneración exitosa de *Larix olgensis* en los bosques de China, con la preparación del micrositio mediante la remoción de hojarasca y sotobosque. Estos tratamientos complementarios deben implementarse en rodales que superen los 5 Mg ha⁻¹ de carbono en hojarasca (Figura 41) y 3 Mg ha⁻¹ de carbono en MLC (Figura 42).

8.2.6. Fertilización

La forma más común y práctica para elevar la productividad del sitio es mediante fertilización química, con la que se aumenta el contenido de nutrientes al incorporar fuentes rápidamente disponibles de macro y micro elementos que propicien el rápido establecimiento de los bosques, mayor producción de biomasa, reparación, protección e incremento de la cubierta vegetal en suelos desnudos, degradados o afectados por incendios intensos (Daniel et al., 1982). No se requerirán cantidades abundantes de estos productos, puesto que no habrá cosecha forestal que impacte significativamente sobre el balance de nutrientes en el ecosistema, por ello se propone utilizarlo únicamente en sitios con regeneración establecida.

Calixto, López, Equihua, Lira, y Cetina (2015) no encontraron diferencia estadística significativa en tratamientos con suministro artificial de macronutrientes (N, P, K) respecto al ataque de *Hypsipyla grandella* Zeller sobre árboles de *C. odorata* L. Sin embargo, a ocho meses del experimento, paulatinamente se redujo la incidencia de ataque en los brotes, principalmente con la aplicación de potasio. Respecto al análisis foliar existió un incremento en la concentración de nutrimentos, con tratamientos inherentes al elemento analizado. La falta de diferencia estadística probablemente se debió a la heterogeneidad de la plantación y al periodo de aplicación. En el caso de la microcuenca Hueyapa, se sugiere la aplicación de fertilizantes sobre la regeneración de especies prioritarias en la microcuenca al inicio y durante el periodo de lluvias.

La competencia entre árboles, pendiente pronunciada, erosión permanente y áreas con alta pedregosidad, bajos valores de CIC disminuyen la disponibilidad y riqueza nutrimental del sitio y, predispone a los árboles al ataque de descortezadores. Pérez-Camacho et al. (2013) encontraron que el número de árboles atacados por *D. adjunctus* se incrementó en sitios de *P. hartwegii* cuando las concentraciones de nitrógeno y potasio en el suelo fueron altas y la disponibilidad de fósforo fue baja, por lo que los nutrimentos y las dosis de aplicación deben ser apropiadas para que impacten positivamente sobre la mejora del vigor de los árboles.

Respecto a la aplicación de fertilizantes inorgánicos en árboles plantados de *C. odorata*, Montero-Solís et al. (2017) concluyeron que si bien la aplicación de nitrógeno no mejoró el crecimiento ni tuvo incidencia sobre la severidad en el ataque de *H. grandella*, el fósforo sí promovió el crecimiento en altura.

Por lo anterior, se sugiere el ensayo de tratamientos con fertilizantes inorgánicos en rodales con regeneración natural abundante en manchones, con énfasis en áreas con pendiente pronunciada y con menores valores de CIC con la finalidad de fortalecer el estatus nutrimental y reducir la vulnerabilidad al ataque de plagas en general.

8.2.7. Prevención de incendios, plagas y enfermedades forestales

Los incendios forestales han estado presentes por siempre provocando cambios en la estructura y diversidad de los ecosistemas forestales. Se han realizado esfuerzos loables en prácticas de prevención de incendios forestales en México (Rodríguez, 1994; Rodríguez, 1996; Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010a). A pesar de ello, la incidencia se ha agudizado a partir de 1998 contribuyendo de forma directa en la deforestación, cambio estructural y composición del bosque, principalmente en rodales jóvenes (González, Schwendenmann, Jiménez, & Himmelsbacha, 2007).

Se ha demostrado que el fuego superficial y de baja severidad es benéfico para el repoblamiento de los ecosistemas forestales de *P. oocarpa* (Juárez-Martínez & Rodríguez-Trejo, 2003). Así mismo, Sánchez, Gallegos, González, Castañeda, y Cabrera (2014) concluyeron que la regeneración de *P. oocarpa* se ha adaptado a quemas

frecuentes, mediante la modificación de la estructura radicular y capacidad de rebrote, como estrategia de resiliencia; sin embargo, no mostró avances en su desarrollo.

En el bosque de pino-encino de la microcuenca del río Hueyapa se observan brinzales de *P. oocarpa* con abundante ramificación (rebrotos) y poco desarrollo a causa de incendios forestales intensos y frecuentes (Figura 43). Esto conduce a establecer medidas de prevención de incendios forestales mediante la apertura de brechas cortafuego en la periferia de claros con regeneración, así como la aplicación de poda en rebrotos para propiciar el desarrollo de un solo individuo.



Figura 43. Rebrotos en la regeneración de *P. oocarpa* posterior a un incendio forestal.

El aclareo y poda de ramas bajas disminuyen el riesgo de incendio debido a que reduce la densidad de copas y, por tanto, la producción de combustibles finos (hojarasca) capaces de facilitar incendios forestales. Por otro lado, el aclareo incrementa la incidencia de radiación solar a la superficie del suelo, con lo que aumenta la temperatura del mismo y del ocochal, aumentando también la actividad microbiológica y la tasa de descomposición de la materia orgánica, disminuyendo el riesgo de incendios forestales.

Los comuneros de Dos Caminos y Anexos, junto a su prestador de servicios técnicos forestales, quienes han abierto aproximadamente tres kilómetros de guardarraya en el

parteaguas de la microcuenca, pero esta acción no ha sido suficiente. Es prioritario realizar actividades de limpieza (mantenimiento) constante de la guardarraya, ya que el reservorio de necromasa en hojarasca y otros componentes arbóreos es en promedio de $6.91 \pm 1.01 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Así mismo, la necromasa total promedio del bosque templado de la microcuenca es de 18.96 Mg ha^{-1} , y tan solo en necromasa de árboles muertos en pie (Figuras 44a y 44b), existen rodales con volumen superior a $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 45), por ello se propone realizar el manejo de los residuos dispersos sobre el piso forestal acomodados en camellones y aplicar quemas prescritas para reducir el riesgo de incendios forestales.



Figura 44. Arbolado muerto en pie afectado por incendios forestales de alta intensidad (a) y plagas forestales (b).

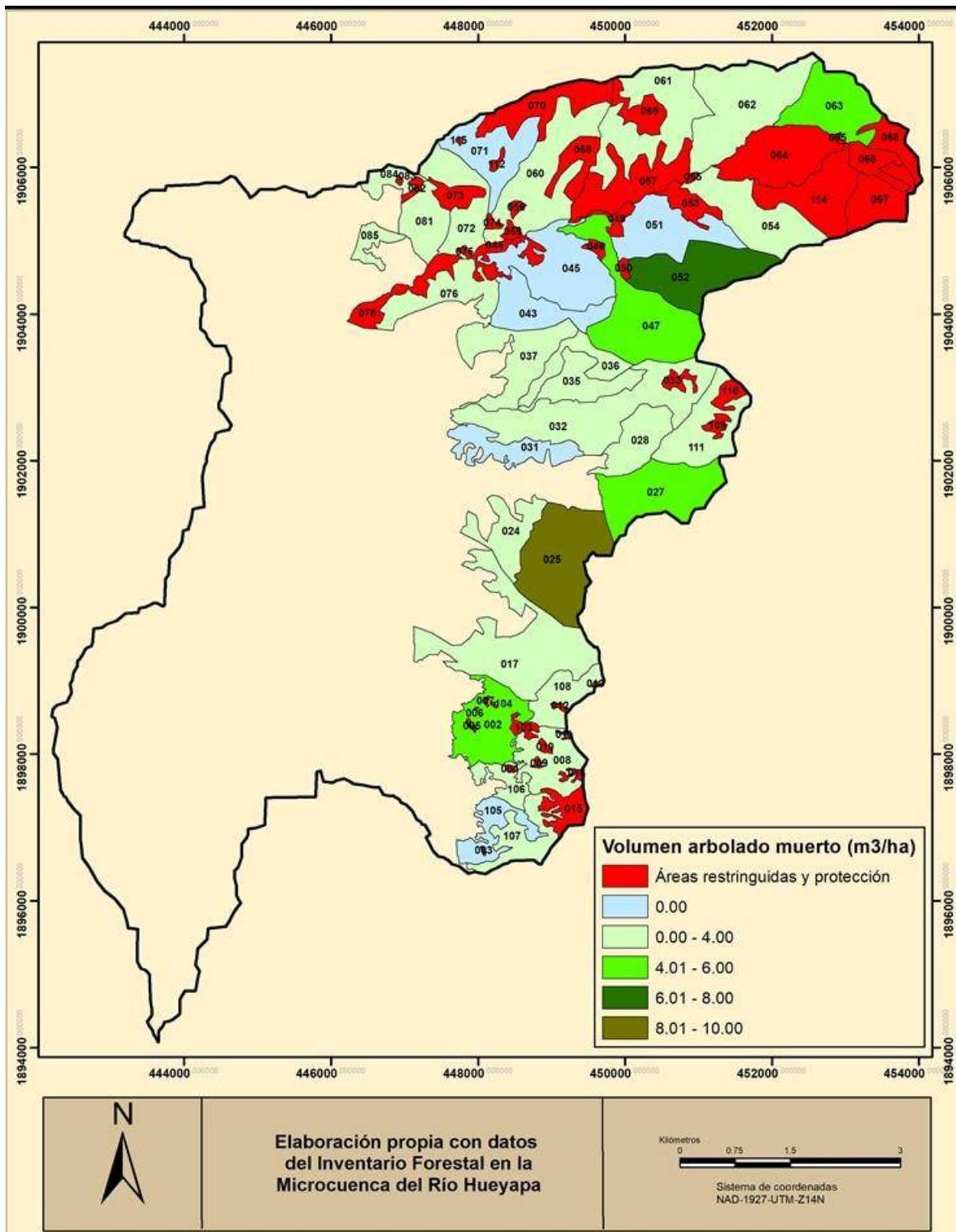


Figura 45. Distribución de volumen del arbolado muerto en pie en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

En baja intensidad el fuego facilita el ciclo de algunos nutrientes y los deja disponibles para la vegetación forestal. Aunque parte del nitrógeno se pierde por la acción del fuego, en la superficie del suelo favorece el desarrollo de bacterias y otros organismos fijadores de nitrógeno, al mismo tiempo que ayuda a controlar algunos patógenos (Flores & Benavides, 2009). Por ello es conveniente programar quemas prescritas, como medida de prevención, que al mismo tiempo mejorarán las condiciones de fertilidad del sitio para el establecimiento de la regeneración, también reducirán la vulnerabilidad del sitio a un incendio forestal catastrófico.

Por otro lado, se detectó la presencia de al menos una especie de descortezador del género *Dendroctonus sp.* sobre fustes de árboles de *P. oocarpa* derribados por el viento, en algunos árboles, se observó la presencia de raíces afectadas por hongos y termitas subterráneas (Figura 46). El estrato de encino no está exento de problemas fitosanitarios, se observaron árboles secos en pie con probable ataque masivo del pseudohongo *Phytophthora cinnamomi* Rands., que ataca al cambium en árboles del género *Quercus* (Alvarado-Rosales, Saavedra-Romero & Almaraz-Sánchez, 2008).

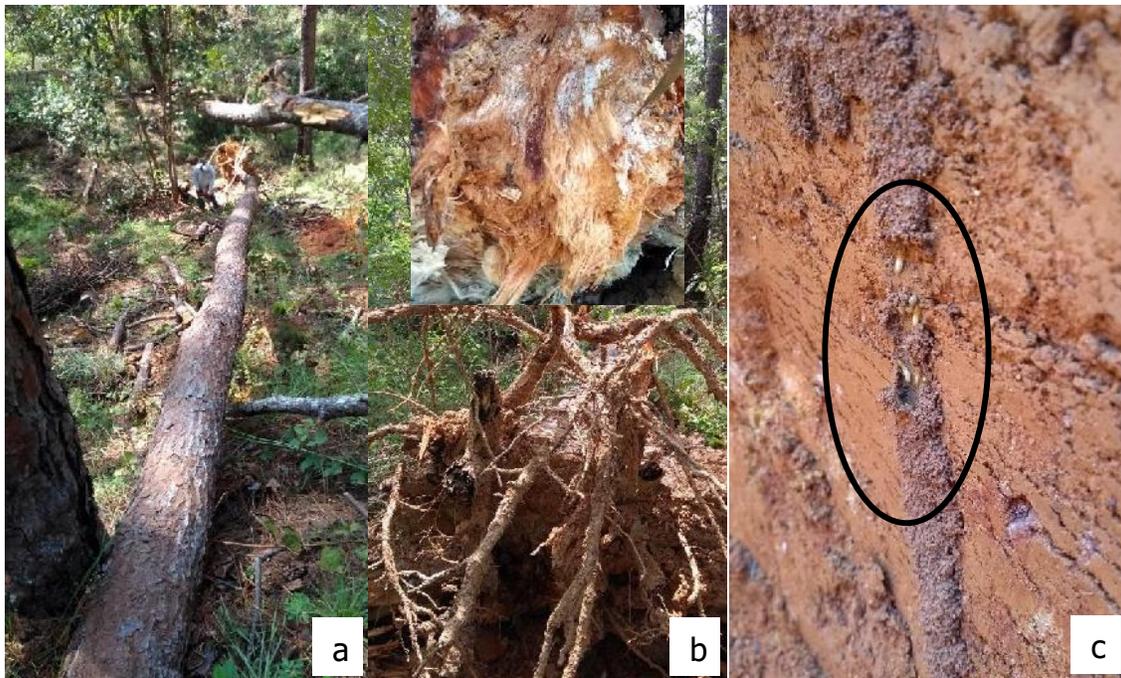


Figura 46. Árboles derribados por viento (a), con presencia de hongos (b) y termitas en el suelo (c).

Lo anterior, conduce a realizar un diagnóstico de las causas que originan la caída prematura de árboles principalmente durante el inicio de la temporada de lluvias, aunado a la presencia de vientos fuertes. Al mismo tiempo, se deben realizar recorridos de campo para diagnosticar áreas con presencia de plagas y enfermedades en rodales de pino-encino y realizar la evaluación de la enfermedad que afecta a la población de encino.

Además del diagnóstico y los reportes respectivos ante autoridades de la Comisión Nacional Forestal para el tratamiento de los problemas fitosanitarios respectivos, también deben programarse tratamientos silvícolas complementarios para mejorar la condición nutrimental de la vegetación a través de la aplicación de fertilizantes artificiales con el fin de disminuir la susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades, como lo han demostrado Pérez-Camacho et al. (2013); Calixto, López, Equihua, Lira, y Cetina (2015) y Montero-Solís et al. (2017).

8.2.8. Construcción y/o rehabilitación de obras de filtración de agua y conservación de suelos con reforestación

Entre los años 2017 y 2018 la comunidad agraria Dos Caminos y Anexos gestionó y desarrolló un proyecto, principalmente dentro del el rodal 032, con la finalidad de incrementar la capacidad de captura y filtración de agua por el bosque templado de la microcuenca. Estas obras consistieron en el trazo y apertura, en curvas de nivel, de zanjas trinchera de 0.40 x 0.40 x 2.00 m de ancho, profundidad y largo, respectivamente (CONAFOR, 2007) con un tabique divisor de dos metros, acompañado de reforestación sobre los bordos y terraza individual (Figura 47).

Además de incrementar la densidad del arbolado mediante la reforestación, las zanjas trinchera dosifican el flujo de agua capturada en el tiempo y propician el flujo lateral del vital líquido hacia los árboles aledaños. A pesar de la protección mediante cercado con alambre de púas, el ganado irrumpe constantemente la zona del proyecto afectando la reforestación y la estabilidad del talud de la zanja, lo que ocasiona azolve prematuro. Por lo anterior es conveniente realizar trabajos de rehabilitación y

replantación prioritariamente con especies nativas de *P. oocarpa*, *Quercus sp.* y especies fijadoras de nitrógeno.



Figura 47. Zanja trinchera para captura de agua en bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

Los rodales con presencia de suelo desnudo y/o afectado por la tormenta tropical Manuel en el 2013, deben ser prioritarias para realizar obras de conservación de suelos como presas de piedra acomodada, troncos acomodados y geocostales (CONAFOR, 2010c).

Con la finalidad de disminuir el material leñoso caído esparcido sobre el piso forestal, es preferible construir presas de morillo y ramas, en forma de barrera en sentido transversal a la corriente del flujo de agua de lluvia. Estas obras propician la reducción de combustibles que proveen condiciones para incendios forestales intensos o bien focos de infestación por plagas, también sirven para controlar la erosión hídrica.

En rodales con erosión laminar se propone implementar terrazas de muro vivo con especies fijadoras de nitrógeno (*G. sepium*, *Acacia sp.*, *Lysiloma sp.*, *Leucaena sp.*), arbustos con facilidad de reproducción asexual (*Bursera sp.*) y especies forrajeras (*G. ulmifolia*) nativas.

8.2.9. Establecimiento de sitios permanentes de investigación silvícola (SPIS)

El creciente interés por conocer el efecto de la aplicación de sistemas de manejo forestal sobre la composición, estructura y dinámica de las masas forestales, prioriza el establecimiento de sitios experimentales permanentes al interior de los bosques naturales (Herring & Pollack, 1985).

Los SPIS son parcelas establecidas bajo un diseño experimental para evaluar periódicamente las variables dasométricas (dendrométricos y epidométricos) de los árboles, sanidad, vigor; así como, factores climáticos, orográficos, edáficos y bióticos del sitio forestal, para poder dirigir y transformar a la masa forestal en un sistema altamente productivo a través del tiempo y el espacio, por medio del manejo integrado de los recursos forestales (Manzanilla, 1993).

En México, el primer Sitio Permanente de Experimentación Silvícola (SPES) se estableció en Madera, Chihuahua en 1950 y hasta 1968, se habían establecido siete sitios de esta naturaleza, todos con la finalidad de conocer el efecto de los tratamientos silvícolas sobre el establecimiento de la regeneración y el desarrollo de la masa forestal residual a distintas intensidades de corta (Mas & Pahua, 1990).

Adams, Loughry, y Plaugher (2004) hacen un recuento de setenta y siete bosques experimentales administrados por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América con una gama amplia de experimentos desarrollados en bosques naturales y plantaciones forestales, con estudios ecológicos integrales que tratan de explicar la variación de la estructura e incrementos de la masa forestal, protección y conservación de la fauna silvestre, entre otros experimentos, que integran y conservan bases de datos con registros de largo plazo.

Ante los eminentes problemas ambientales actuales es preponderante contar con una línea base de monitoreo de los impactos potenciales del cambio climático en los ecosistemas forestales. Acosta, Carrillo, Delgado, y Velasco (2014) establecieron y caracterizaron nueve Parcelas Permanentes de Muestreo (PPM) en el Parque Nacional Izta-Popo, México, que han revelado información dasométrica en área basal, volumen, biomasa y carbono; establecimiento de la regeneración e incidencia de plagas sobre los bosques naturales de *Pinus hartwegii*, aseverando que en el mediano plazo podría incrementarse debido a su madurez y falta de manejo forestal.

Con el presente estudio se generó (Capítulo III) la línea base sobre información dasométrica, biomasa y carbono en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa. Para generar conocimientos sobre la estructura e incremento de árboles y masas forestales, asegurar su conservación y permanencia, evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas y complementarios propuestos en este plan de manejo, se propone establecer un SPIS en cada estrato arbóreo de la microcuenca del río Hueyapa, en áreas con el menor riesgo de incendios, sobrepastoreo, explotación clandestina y en general, el de menor impacto posible sobre el cambio de uso de suelo.

El establecimiento y monitoreo de los SPIS a establecerse en la microcuenca en estudio se basarán en la metodología histórica inicial publicada por Mas y Pahuja (1990) y Manzanilla (1993). Así como en la metodología reciente en México generado por Corral-Rivas et al. (2009) sobre la guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango, México; Gómez et al. (2013) guía para el establecimiento de sitios permanentes de investigación en incendios forestales y en la guía para el establecimiento, seguimiento y evaluación de sitios permanentes de monitoreo en paisajes productivos forestales propuesta por Corral-Rivas, Vargas-Larreta, Wehenkel, Aguirre-Calderón, y Crecente-Campo (2013).

8.3. Tratamientos silvícolas propuestos por unidad básica de manejo

En este apartado se proponen los tratamientos silvícolas y complementarios por cada rodal con potencial productivo (Cuadros 41), rodales con usos agropecuario y de protección (Cuadro 42), excepto para los catalogados como de acceso restringido.

Cuadro 44. Tratamientos silvícolas y complementarios sugeridos por rodal en el bosque templado de la microcuenca Hueyapa.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	Tratamientos sugeridos	Justificación
008	P-Q	60.582	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros ✓ Rehabilitación de guardarraya en el parteaguas principal de la microcuenca ✓ Apertura de guardarrayas en manchones con reforestación ✓ Aclareo y poda en regeneración afectada por incendios forestales ✓ Manejo de arbolado muerto en curvas de nivel para conservación de suelos 	Rodal ubicado en el parteaguas de la microcuenca, con baja densidad de arbolado, arbolado muerto y regeneración afectado por incendios forestales intensos. Área con potencial para incrementar la tasa de captura de carbono
025	P-Q	140.877	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros dejados por árboles muertos en píce ✓ Aplicación de quemas prescritas para reducir la hojarasca y sotobosque para propiciar el establecimiento de la regeneración ✓ Preaclareo, aclareo y poda en regeneración establecida y afectada por incendio forestal ✓ Apertura de guardarraya para protección de la regeneración 	Rodal con alta densidad de hojarasca y sotobosques, con presencia de regeneración en manchones, pero con indicios sobre presencia de insectos descortezadores de pino.

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fertilización en área con regeneración y espacios con presencia de insectos plaga en arbolado adulto 	
027	P-Q	112.400	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Manejo de material leñoso caído para obras de conservación de suelos ✓ Reforestación y/o siembra en claros por arboles muerto en pie. ✓ Suelos con excelente profundidad, pendiente moderada, excelente CIC, con presencia alta de fósforo, nula perturbación antropogénica, por lo que es rodal candidato para establecer un SPIS ✓ Aplicar fertilización en etapa experimental y enriquecimiento con especies fijadoras de nitrógeno. ✓ Poda, preaclareos y aclareos ✓ Establecimiento de sistema agroforestal en límite de corriente de agua 	<p>Presencia de abundante MLC y escasa regeneración.</p> <p>En su parte baja es limitado por corriente de agua permanente y vegetación arbustiva de baja productividad forestal.</p> <p>Densidad arbórea por arriba del promedio con presencia de arbolado de categorías diamétricas bajas.</p> <p>Indicio de arbolado atacado por plaga en el pasado.</p>
032	P-Q	177.492	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diagnosticar posibles causas del derribo de arbolado adulto por vientos ✓ Preaclareos en regeneración de encinos con distribución en manchones ✓ Rehabilitación de zanjas trinchera ✓ Establecer regeneración de <i>P. oocarpa</i> en claros y protección contra pastoreo 	<p>Rodal impactado por actividades antropogénicas por su cercanía al poblado La Haciendita, presenta obras de cosecha de agua, diversidad de orquídeas silvestres y abundante caída de árboles por viento al inicio del periodo de lluvias.</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecer sitios experimentales con fertilización inorgánica y plantación de especies fijadoras de nitrógeno ✓ Quemadas prescritas para reducir la hojarasca y MLC sobre el piso y propiciar la regeneración natural ✓ Programa de rescate y protección de orquídeas silvestres 	<p>Presenta muy escasa reforestación de <i>P. oocarpa</i>.</p> <p>Abundante biomasa de árboles muertos en pie, MLC y sotobosque</p>
036	P-Q	39.971	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de regeneración en claros bajo árboles muertos, siembra directa de semilla de árboles prioritarios y protección contra pastoreo ✓ Diagnosticar causas de caída de árboles ✓ Establecer experimentos de fertilización inorgánica y fajas de árboles y arbustos fijadores de N ✓ Realizar quemadas prescritas para reducir capa de hojarasca en micrositios ✓ Realizar obras de conservación de suelo con fajas de protección y acomodo de ramas. 	<p>Alta densidad de árboles muertos</p> <p>Impactado por actividades antropogénicas</p> <p>Caída de árboles de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus sp.</i> por viento</p> <p>Baja presencia de N, P, Fe, Cu, Mn, Ca.</p> <p>Presencia de erosión laminar con exposición del suelo mineral</p> <p>Es un rodal con alto potencial en reservorio de biomasa aérea en arbolado adulto.</p>
043	P-Q	66.200	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quemadas prescritas para reducir la densidad de sotobosques ✓ Establecer reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus sp.</i> en áreas despejadas de sotobosque 	<p>Alta densidad de sotobosque en micrositios, diversidad de fauna silvestre mayor y escasa reforestación.</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conservar nichos para la protección y conservación de fauna silvestre mayor 	
045	P-Q	115.340	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quemas prescritas para reducir la densidad de sotobosque y establecimiento inmediato de regeneración (reforestación y/o siembra directa) ✓ Obras de conservación de suelos de piedras acomodadas y acomodo de MLC en curvas de nivel ✓ Establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles 	<p>Abundante MLC, sotobosque y baja densidad de arbolado.</p> <p>Tiene lindero con la corriente principal permanente de la microcuenca</p>
047	P-Q	141.536	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de reforestación y/o siembra directa con semilla de especies prioritarias con protección contra pastoreo ✓ Quemas prescritas para disminuir hojarasca y sotobosque ✓ Establecer sistemas agrosilvopastoriles ✓ Realizar obras de conservación de suelos con fajas de especies fijadoras de N y piedra acomodada. ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas de la microcuenca 	<p>Baja densidad de arbolado</p> <p>Presencia de actividades agropecuarias</p> <p>Comparte lindero con la corriente principal permanente de la microcuenca</p> <p>Alta biomasa de hojarasca en piso forestal por presencia de sotobosque</p>
052	P-Q	108.526	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con especies nativas 	<p>Muy escasa regeneración de especies prioritarias y abundante sotobosque</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación en claros dejados por árboles muertos ✓ Disminución de sotobosque mediante quemas prescritas (parte baja) ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas de la microcuenca ✓ Obras de conservación de suelos con barreras de MLC. ✓ Conservar troncos de árboles muertos para protección de aves canoras 	Baja densidad de arbolado y presencia de árboles muertos
054	P-Q	100.885	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rehabilitación de guardarraya ✓ Establecer sistemas agrosilvopastoriles cercanos a la corriente de agua ✓ Reforestación y/o siembra directa en manchones de áreas abandonadas por agricultura migratoria y espacios de árboles muertos en pie ✓ Reducción de sotobosque mediante quemas prescritas y herramientas manuales 	Buena densidad de arbolado joven Comparte espacio con corriente principal permanente y parteaguas Regular regeneración de <i>P. oocarpa</i> con distribución regular
060	P-Q	125.344	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con especies prioritarias. ✓ Protección de la regeneración contra pastoreo ✓ Diagnóstico de plagas forestales y realizar prácticas de fertilización inorgánica 	Presencia de actividades agropecuarias Presencia de regeneración de otras hojosas, pero no de especies prioritarias Aprovechamiento de leña Indicios de plagas forestales

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecer obras de conservación de suelos con barreras vivas de especies fijadoras de N ✓ Plantaciones con Acacias como especies fijadoras de N y con potencial dendroenergético 	
062	P-Q	150.712	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Manejo de MLC acomodado en corrientes de agua en zona afectada por la tormenta tropical Manuel en 2013 y otros eventos meteorológicos anteriores ✓ Reforestación y/o siembra directa con especies prioritarias y aplicación de fertilizantes inorgánicos ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas de la microcuenca ✓ Preclareos y podas en regeneración ✓ Apertura de guardarrayas en áreas con regeneración 	<p>Abundante MLC y alta presencia de árboles muertos en pie</p> <p>Incendios frecuentes y presencia de insectos plaga</p> <p>Regeneración de <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus sp.</i></p>
063	P-Q	88.156	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros y bajo árboles muertos en pie ✓ Protección de la reforestación y aplicación de fertilizantes inorgánicos ✓ Realizar obras de conservación de suelos ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas de la microcuenca 	<p>Baja densidad de arbolado vivo</p> <p>Alta densidad de arbolado muerto en pie</p> <p>Presencia de pastoreo y nula regeneración natural</p> <p>Alta PPNa y buen reservorio de carbono total</p>

107	P-Q	53.557	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aclareo y poda del bosque por alta densidad de arbolado joven de <i>P. oocarpa</i> ✓ Remoción de hojarasca mediante quemas prescritas y con herramientas manuales para exponer el suelo mineral. ✓ Siembra directa de semillas con especies prioritarias ✓ Manejo de MLC en la construcción de barreras para reducir la erosión ✓ Protección de la regeneración contra pastoreo ✓ Aplicación de fertilizantes inorgánicos ✓ Siembra de semilla con especies dendroenergéticas (Acacias) 	<p>Abundante biomasa de hojarasca y MLC</p> <p>Excelente reservorio de carbono total</p> <p>Máximo número de árboles por hectárea (joven)</p> <p>Presencia de ganado mayor</p> <p>Extracción de leña</p> <p>Excelente regeneración de otras hojasas pero poca de <i>P. oocarpa</i></p>
108	P-Q	45.055	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación con especies prioritarias con protección ✓ Remoción de hojarasca con herramientas manuales para exposición del suelo mineral ✓ Aplicación de fertilizantes inorgánicos ✓ Establecimiento de obras de conservación de suelos con barreras vivas. ✓ Rehabilitación de brecha cortafuego en parteaguas de la microcuenca 	<p>Abundante biomasa de hojarasca</p> <p>Presencia de plaga por descortezadores</p> <p>Escasa regeneración</p> <p>Pastoreo</p> <p>Erosión de suelo</p>

111	P-Q	75.186	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con especies prioritarias (<i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>) ✓ Proyecto de rescate de <i>Q. planipocula</i> (recolección de semilla y vivero) ✓ Establecer área de conservación de flora y fauna silvestre. 	<p>Relicto de <i>Q. Planipocula</i> en dos hectáreas</p> <p>Abundante fauna silvestre</p> <p>Baja densidad de arbolado y presencia de plaga de descortezador</p> <p>Buena PPNa y buen reservorio de carbono total</p> <p>Escasa regeneración de <i>P. oocarpa</i></p>
002	Q	84.127	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Poda de ramas bajas (vivas y muertas) ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros dejados por árboles muertos y otros claros, con árboles de <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> ✓ Propiciar la regeneración natural de <i>Lysiloma sp.</i> 	<p>Existen árboles muertos en pie</p> <p>Rodal denso en categoría diamétricas bajas</p> <p>Escasa regeneración</p> <p>Alto impacto antropogénico</p>
017	Q	180.097	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros del bosque con árboles de <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> ✓ Realizar obras de conservación de suelos con piedra acomodada ✓ Establecimiento de sistemas agroforestales ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas principal 	<p>Existen árboles muertos en pie</p> <p>Baja densidad arbóreo y escasa regeneración de especies prioritarias</p> <p>Alto impacto antropogénico</p>
024	Q	56.688	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>Quercus spp.</i> 	<p>Bajo incremento en biomasa</p> <p>Baja densidad de arbolado</p> <p>Alto impacto antropogénico</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plantación de especies dendroenergéticas ✓ Poda en ramas con muérdago y quema de desperdicio ✓ Obras de conservación de suelos con barreras vivas de leguminosas fijadoras de N ✓ Conservación de palma de Zoyamiche (<i>Cryosophila sp.</i>) 	Existencia de muérdago
028	Q	57.193	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación con árboles de <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> ✓ Reducción de sotobosque mediante quemas prescritas para exponer el suelo mineral y propiciar el establecimiento de la regeneración natural. ✓ Poda de ramas infestadas de muérdago, quema de desperdicio y aplicación de fertilizantes inorgánicos ✓ Diagnóstico sobre causas del derribo de árboles por el viento ✓ Protección de árboles muertos para conservación de iguana negra (<i>Ctenosaura pectinata</i>) ✓ Es un ecosistema con la más alta concentración de P (92.991 ppm), con excelente presencia de macro y microelementos. Por ello lo convierte en 	<p>Alto volumen de biomasa en sotobosque</p> <p>Escasa regeneración de especies prioritarias</p> <p>Árboles derribados por viento</p> <p>Existencia de muérdago en <i>Quercus sp.</i></p> <p>Presencia de fauna mayor y menor</p> <p>Escaso impacto antropogénico y excelentes condiciones de fertilidad</p>

			rodal candidato al establecimiento de un SPIS en el estrato de <i>Quercus spp.</i>	
031	Q	53.995	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/siembra directa con <i>Quercus spp.</i> ✓ Quema prescrita para control de hojarasca ✓ Conservación de palma de Zoyamiche (<i>Cryosophila sp.</i>) ✓ Diagnóstico sobre causas del derribo de árboles por el viento ✓ Enriquecimiento con árboles de especies fijadoras de N y con potencial dendroenergético ✓ Protección de árboles muertos para conservación de iguana negra (<i>Ctenosaura pectinata</i>) 	<p>Alta biomasa de hojarasca Alto impacto antropogénico en extracción de leña Nula regeneración Existencia de zoyamiche</p>
035	Q	54.597	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quemias prescritas para el manejo de hojarasca y facilitar la regeneración ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> ✓ Plantación con especies dendroenergéticas ✓ Poda de ramas y quema de desperdicios con muérdago ✓ Fertilización para disminuir la incidencia de muérdago 	<p>Presencia moderada de muérdago Escasa regeneración Abundante hojarasca Presencia de árboles muertos en pie Áreas con lianas abundantes como escondite de fauna silvestre mayor Impacto antropogénico (extracción de leña y pastoreo)</p>

			✓ Protección de hábitat de la fauna silvestre	
037	Q	92.929	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> ✓ Plantación con especies dendroenergéticas ✓ Obras de conservación de suelos con barrera vivas (fijadoras de N) y troncos con ramas acomodadas 	<p>Escasa regeneración Presencia de árboles muertos Impacto antropogénico (pastoreo y extracción de leña) Erosión laminar</p>
051	Q	88.264	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles ✓ Reforestación y siembra directa con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> ✓ Quema prescrita para reducir el sotobosque ✓ Cercado con alambre de púas en áreas a reforestar ✓ Poda de ramas de <i>Quercus spp.</i> y quema de residuos ✓ Protección de árboles con termiteros que son nidos de aves canoras 	<p>Área con pendiente moderada Colinda con corriente permanente del río principal Abundante sotobosque Impacto antropogénico (pastoreo) No existe regeneración de especies prioritarias Presencia de muérdago</p>
061	Q	127.254	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rehabilitación de guardarraya en parteaguas principal ✓ Reforestación y/o siembra directa en claros con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> ✓ Plantación con especies dendroenergéticas 	<p>Nula regeneración Impacto antropogénico (pastoreo y extracción de leña) Presencia de muérdago</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Control de erosión con ramas acomodadas sobre camino de herradura ✓ Poda de ramas de <i>Quercus spp.</i> y quema de residuos 	
071	Q	74.156	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plantación con especies dendroenergéticas y fijadoras de N ✓ Protección de áreas con zoyamiche (<i>Cryosophila sp.</i>) ✓ Protección de regeneración contra pastoreo ✓ Apertura de guardarraya en parteaguas principal de la microcuenca 	<p>Impacto antropogénico (agricultura de temporal, pastoreo y extracción de leña)</p> <p>Está entre los rodales con menor reservorio de carbono</p>
072	Q	67.218	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> ✓ Reforestación y/o siembra con especies arbóreas dendroenergéticas y fijadoras de N ✓ Protección de áreas con zoyamiche (<i>Cryosophila sp.</i>) ✓ Apertura de brecha cortafuego en parteaguas de la microcuenca 	<p>Árboles muertos en pie</p> <p>Escasa regeneración</p> <p>Impacto antropogénico (pastoreo y leña)</p>
076	Q	65.186	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> ✓ Uso de quemas prescritas para control de MLC, hojarasca y sotobosque y facilitar el establecimiento de la regeneración 	<p>Presencia considerable de árboles muertos, MLC, hojarasca y sotobosque.</p> <p>Está entre los rodales con menor densidad de árboles y menor reservorio de carbono</p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Propiciar la regeneración natural con <i>Lysiloma sp.</i>, <i>Gliricidia sepium</i>, <i>Guacima ulmifolia</i> y <i>Acacia sp.</i> 	Muy escasa regeneración
081	Q	49.167	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de reforestación y/o siembra directa con <i>Quercus sp.</i>, <i>Lysiloma sp.</i>, <i>Acacia sp.</i> ✓ Manejo de residuos forestales mediante quemas prescritas y herramientas manuales para facilitar el establecimiento de la regeneración 	<p>Muy baja densidad de arbolado vivo</p> <p>Presencia abundante de hojarasca y árboles muertos en pie</p> <p>Escasa regeneración</p> <p>Impacto antropogénico (leña y pastoreo)</p>
084	Q	19.977	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apertura de brecha cortafuego en el parteaguas de la microcuenca ✓ Protección especial a la biodiversidad de <i>Quercus spp.</i>, ya que aquí se distribuyen cinco de las seis especies de <i>Quercus</i> de la microcuenca ✓ Propiciar la regeneración de <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> mediante la remoción parcial con herramienta manual de la hojarasca. 	<p>Buena biomasa de hojarasca</p> <p>Poca regeneración de <i>Quercus sp.</i> y escasa regeneración de <i>P. oocarpa</i></p>
085	Q	19.759	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>Quercus sp.</i> ✓ Propiciar la regeneración de <i>Lysiloma sp.</i>, <i>Acacia sp.</i>, <i>G. sepium</i>, <i>Leucaena sp.</i> como especies fijadoras de N; <i>Guacima sp.</i>, <i>Byrsonimia sp.</i> dendroenergéticas. 	<p>Alto impacto antropogénico (extracción de leña y pastoreo)</p> <p>Presencia de muérdago en <i>Quercus sp.</i></p> <p>Escasa regeneración de <i>Quercus sp.</i></p>

			<ul style="list-style-type: none"> ✓ Poda de ramas en <i>Quercus sp.</i> y quema de residuos ✓ Aplicación de fertilizantes inorgánicos para disminuir la incidencia del muérdago 	
105	Q	43.720	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fertilización en espacios con regeneración y protección contra el ganado ✓ Poda de ramas con muérdago y quema de residuos. ✓ Fertilización de árboles con mayor incidencia de muérdago ✓ Establecer plantación con especies dendroenergéticas 	<p>Alto impacto antropogénico (extracción de leña y pastoreo) por su cercanía con la población de El Potrero Oriental</p> <p>Afectación de muérdago a <i>Quercus sp.</i></p> <p>Entre los rodales con menor reservorio de carbono</p>
106	Q	26.769	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de plantaciones con especies fijadoras de N y potencial dendroenergético ✓ Poda, aclareo y fertilización de latizales de <i>Quercus spp.</i> ✓ Reforestación y/o siembra directa con <i>Quercus spp.</i> y <i>P. oocarpa</i> 	<p>Alto impacto antropogénico (extracción de leña, agricultura de temporal, pastoreo), por su cercanía con la población de El Potrero Oriental</p> <p>Buena densidad de arbolado joven</p>

Cuadro 45. Propuesta de tratamientos complementarios en rodales de protección y otros usos.

Rodal	Uso actual	Superficie (ha)	Tratamiento complementario propuesto
003	Agricultura de temporal	0.488	Establecimiento de sistemas agroforestales
004	Agricultura de temporal	1.112	Establecimiento de sistemas agroforestales
005	Agricultura de temporal	0.896	Establecimiento de sistemas agroforestales
006	Roquerío y pastizal	0.188	Sin tratamiento
007	Roquerío y pastizal	0.616	Sin tratamiento
009	Agricultura de temporal	1.112	Sistemas agroforestales
010	Roquerío y vegetación baja densidad	2.251	Obras de conservación de suelos con reforestación en áreas con vegetación de baja densidad
011	Roquerío y vegetación baja densidad	0.770	Obras de conservación de suelos con reforestación en áreas con vegetación de baja densidad
012	Roquerío y pastizal	1.392	Sin tratamiento
013	Roquerío y pastizal	0.550	Sin tratamiento
014	Pastizal y vegetación arbustiva	3.307	Obras de conservación de suelos (zanja trinchera) con reforestación <i>P. oocarpa</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i> , <i>Byrsonima sp.</i> , etc. (Históricamente sin vegetación arbórea, únicamente pastos y arbustos)

015	Pastizal y vegetación arbustiva	26.094	Obras de conservación de suelos (zanja trinchera) con reforestación <i>P. oocarpa</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i> , <i>Byrsonima sp.</i> , etc. (Históricamente sin vegetación arbórea, únicamente pastos y arbustos)
033	Vegetación baja densidad	7.950	Reforestación de enriquecimiento con <i>Quercus spp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i>
044	Agricultura y ganadería	22.576	Reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus sp.</i> y establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles
046	Agricultura y ganadería	4.590	Establecimiento de sistemas agroforestales
049	Agricultura y ganadería	10.953	Reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> y establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles
050	Agricultura y ganadería	3.384	Reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i> y establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles
053	Agricultura y ganadería	22.769	Establecimiento de sistemas agroforestales
055	Agricultura	1.372	Establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles
056	Agricultura	3.041	Establecimiento de sistemas agroforestales
057	<i>Quercus sp.</i> baja densidad	77.382	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de <i>Quercus spp.</i>
058	<i>Quercus sp.</i> baja densidad	29.183	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de <i>Quercus spp.</i>
059	Agricultura	4.462	Establecimiento de sistemas agrosilvopastoriles

064	Acceso restringido	97.231	Sin tratamiento
065	Acceso restringido	1.477	Sin tratamiento
066	Acceso restringido	25.785	Sin tratamiento
067	Acceso restringido	55.240	Sin tratamiento
068	Acceso restringido	27.243	Sin tratamiento
069	Roquerío y ganadería	26.484	Establecimiento de sistema silvopastoril
070	<i>Quercus sp.</i> baja densidad y deslave tormenta tropical Manuel 2013	62.441	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de enriquecimiento con <i>P. oocarpa</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i>
073	<i>Quercus sp.</i> baja densidad	17.870	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de <i>Quercus spp.</i>
074	Agricultura y ganadería	2.882	Establecimiento de sistema silvopastoril
075	Agricultura y ganadería	1.821	Establecimiento de sistema agrosilvopastoril
078	Agricultura y ganadería	33.142	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de enriquecimiento con <i>Quercus spp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i> ; especies fijadoras de N y con potencial dendroenergético. Es factible introducir áreas con sistema agrosilvopastoril
082	Agricultura y <i>Quercus sp.</i> baja densidad	4.150	Reforestación con <i>Quercus spp.</i> y manejo de sotobosque

083	<i>Quercus sp.</i> baja densidad	0.858	Construcción de obras de conservación de suelos con reforestación de <i>Quercus spp.</i>
103	Agricultura y Roquerío	6.934	Protección y reforestación con <i>Quercus spp.</i> , <i>Lysiloma sp.</i> , <i>Gliricidia sepium</i> , <i>Leucaena sp.</i> , <i>Gacima ulmifolia</i> ; especies fijadoras de N y con potencial dendroenergético
104	Pastizal y vegetación arbustiva	0.357	Establecimiento de sistema agroforestal
109	Roquerío y pastizal	6.702	Protección y pequeñas áreas disponibles para reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>
110	Roquerío y vegetación baja densidad	10.908	Protección y pequeñas áreas disponibles para reforestación con <i>P. oocarpa</i> y <i>Quercus spp.</i>
112	Agricultura	2.757	Establecimiento de sistema agroforestal (árboles con potencial dendroenergético)
114	Acceso restringido	82.487	Sin tratamiento
115	Agricultura	0.721	Establecimiento de sistema agroforestal (árboles con potencial dendroenergético)

8.4. Resultados esperados de la aplicación de tratamientos silvícolas

La respuesta positiva de los bosques a la aplicación de las prácticas silviculturales depende del tiempo y forma de su aplicación, condiciones de precipitación del año próximo inmediato a la aplicación del tratamiento; pero además de los impactos antropogénicos posteriores a la aplicación del tratamiento.

Por lo anterior, la concientización de los dueños y/o poseedores del recurso forestal del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa tendrá un papel preponderante para la gestión, ejecución y cuidados posteriores a la aplicación de los tratamientos silvícolas en sus 2,761.915 ha.

En general, los ecosistemas de *Quercus spp.* son los más impactados antropogénicamente por la extracción de leña, agricultura de temporal y pastoreo. El impacto hacia la potencialización de la captura de carbono será mayúsculo si las 31.748 ha con uso agrícola y 97.414 ha con uso agropecuario actual se convierten a uso silvopastoril, agroforestal o agrosilvopastoril, según su vocación.

La construcción de obras de conservación de suelos con zanjas trinchera y reforestación en el "cerro del macho" con 29.410 ha, que históricamente solo ha estado cubierto por vegetación herbácea y arbustiva (rodales 014 y 015), será un incremento sustancial al bosque del estrato P-Q (Cuadro 42) que repercutirá en la captura futura de carbono.

Los tratamientos silvícolas y complementarios sugeridos por rodal tienen la finalidad de conservar el bosque adulto, proteger y propiciar el incremento del arbolado joven y fomentar el establecimiento de la regeneración natural.

La propuesta de enriquecimiento de las masas forestales con especies fijadoras de N y con potencial dendroenergético son con la finalidad de reducir el impacto antropogénico extractivo de especies arbóreas prioritarias (*P. oocarpa* y *Quercus spp.*) y reducir la incidencia de plagas y enfermedades.

La propuesta de establecimiento de SPIS generará conocimiento básico sobre las condiciones dasométricas y ecológicas del bosque templado de la microcuenca del río

Hueyapa y sobre el desarrollo de la masa forestal y el sitio, después de la aplicación de tratamientos silvícolas y complementarios.

8.5. Beneficios socioeconómicos con la aplicación de los resultados de esta investigación

La superficie del bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa pertenece al núcleo agrario Dos Caminos y Anexos con un total de 1,099 comuneros, quienes resultan ser los beneficiarios directos; sin embargo, en la microcuenca se distribuyen seis poblaciones con más de 374 personas y cuatro rancherías con menos de 20 habitantes; que en conjunto suman 17, 463 habitantes quienes se benefician directa o indirectamente de los bienes y servicios ecosistémicos del bosque templado de ésta microcuenca.

Durante la realización del proyecto "Estimación de la captura de carbono en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa, Guerrero, México" clave 278639 del Fondo Sectorial de Investigación Ambiental CONACYT-SEMARNAT 2016-1, se contrataron comuneros para realizar actividades de muestreo destructivo de árboles de donde se obtuvieron los datos estadísticos de biomasa aérea para ajustar las ecuaciones alométricas respectivas; así como, levantar datos del inventario forestal maderable y su remediación, conjuntando un total de 621 jornales que representaron una derrama económica directa de \$138, 700.00

Por otro lado, los resultados de esta investigación se alinean al Fondo Cooperativo del Carbono Forestal, con los acuerdos de Cancún 2010, a los compromisos firmados por México en la Cumbre del Clima de París en el 2015, para lo cual éste país cuenta con el Programa Especial de Cambio Climático y la Estrategia Nacional de Cambio Climático y, de manera específica en materia forestal, la Estrategia Nacional para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal (ENAREDD+) (CONAFOR, 2017); así como, a las acciones de evaluación de los acervos y fijación de carbono que se sustentan en la vigente Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (DOF, 2018), a las Reglas de Operación del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2019 (CONAFOR, 2019) y al Programa Sembrando Vida (DOF, 2019).

Los incentivos económicos de ENAREDD+, con un enfoque de territorio como un paisaje integrado (cuenca), están orientados a promover la conservación, manejo, restauración y uso sustentable de los recursos forestales, como un impulso adicional al manejo activo de los bosques, centrado en el Desarrollo Rural Sustentable, a la valoración y compensación económica de los bienes y servicios ambientales de los bosques (CONAFOR, 2017). En tal sentido la comunidad agraria Dos Caminos y Anexos pueden ingresar al Pago por Servicios Ambientales hidrológicos (en función hasta el 2020 y posteriormente solo podrá continuar mediante fondos concurrentes), o captura de carbono, puesto que se ubican en zonas prioritarias de la CONAFOR.

La captura de carbono por la biomasa forestal es un mecanismo para la mitigación del calentamiento global. Los resultados de la tasa de captura de carbono en la biomasa aérea por el bosque templado de la microcuenca y la aplicación de los tratamientos silvícolas y complementarios contribuirán a disminuir la deforestación y degradación forestal, con ello, podrán generar ingresos económicos por la venta de bonos de carbono en el mercado voluntario a empresas, organizaciones o individuos que deseen adquirir certificados de carbono en los que se avala su contribución directa en la mitigación del calentamiento global.

Bono de carbono, es el nombre genérico con el que se denominan a una serie de instrumentos económicos y de mercado, creados para reducir las emisiones de GEI. Un bono de carbono equivale a un megagramo de bióxido de carbono equivalente (MgCO_2eq) y su precio está definido por la ley de la oferta y la demanda (López-Toache, Romero-Amado, Toache-Bertolini & García-Sánchez, 2016).

Diez comunidades de la Región Norte de Oaxaca comercializaron en el mercado voluntario de carbono, entre el 2008 y 2010, 56,065 MgCO_2eq a un precio por bono de carbono de US\$ 1.47 año^{-1} (\$19.91 por dólar, 23 de agosto de 2019) (Charchalac, 2012). Con este dato de experiencia nacional y con base en la tasa de captura de carbono estimada en esta investigación, en el cuadro 46 se estima el ingreso económico por rodal y total por año, considerando el factor de conversión de carbono a dióxido de carbono equivalente de 3.67 (Tubiello et al., 2015).

Cuadro 46. Ingreso económico por la venta de bonos de carbono en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Rodal	Vegetación	Superficie (ha)	CO ₂ eq (Mg ha ⁻¹ Año ⁻¹)	CO ₂ eq por rodal (Mg Año ⁻¹)	Monto por rodal (\$)
008	P-Q	60.58	8.07	489.18	14,317.28
025	P-Q	140.88	8.80	1,239.55	36,278.84
027	P-Q	112.40	12.29	1,381.32	40,428.18
032	P-Q	177.49	8.82	1,565.69	45,824.28
036	P-Q	39.97	12.27	490.62	14,359.22
043	P-Q	66.20	17.44	1,154.52	33,790.07
045	P-Q	115.34	17.44	2,011.51	58,872.30
047	P-Q	141.54	16.86	2,386.87	69,858.06
052	P-Q	108.53	12.42	1,347.54	39,439.28
054	P-Q	100.89	15.41	1,554.49	45,496.23
060	P-Q	125.34	12.88	1,613.95	47,236.72
062	P-Q	150.71	12.03	1,813.55	53,078.35
063	P-Q	88.16	20.48	1,805.21	52,834.47
107	P-Q	53.56	17.58	941.51	27,555.96
108	P-Q	45.06	17.58	792.05	23,181.54
111	P-Q	75.19	11.02	828.38	24,244.70
002	Q	84.13	14.78	1,243.72	36,400.88
017	Q	180.10	14.78	2,662.53	77,926.10
024	Q	56.69	16.91	958.34	28,048.36
028	Q	57.19	22.93	1,311.36	38,380.51
031	Q	54.00	12.56	677.93	19,841.48
035	Q	54.60	17.58	959.76	28,089.88
037	Q	92.93	17.58	1,633.59	47,811.50
051	Q	88.26	17.61	1,554.41	45,493.86

061	Q	127.25	21.51	2,736.94	80,103.84
071	Q	74.16	8.10	600.61	17,578.57
072	Q	67.22	21.74	1,461.05	42,761.47
076	Q	65.19	8.10	527.96	15,452.25
081	Q	49.17	6.34	311.64	9,121.07
084	Q	19.98	6.34	126.62	3,705.97
085	Q	19.76	18.51	365.65	10,701.80
105	Q	43.72	12.66	553.40	16,196.75
106	Q	26.77	12.66	338.84	9,916.99
		TOTAL	39,440.30	1'154,326.78*	

Dónde: CO₂eq, bióxido de carbono equivalente; *costo del proyecto a un precio de \$29.27 CO₂eq⁻¹

El ingreso económico a la comunidad agraria por la venta de bonos de carbono (\$417.94 ha⁻¹ año⁻¹), supera la cantidad percibida en la actualidad por la venta de servicios ambientales hidrológicos (PSAH) que la CONAFOR le otorga a razón de \$267.40 ha⁻¹ año⁻¹.

IX. CONCLUSIONES

La microcuenca del río Hueyapa es mediana (74.88 km²), muy montañosa y fuertemente accidentada, moderadamente alargada y con un tiempo de concentración de desalojo lento, observa una etapa evolutiva en equilibrio, con red hídrica detrítica de orden cinco. Además, tiene una cobertura vegetal actual de selva baja, mediana y bosque de pino-encino, en una superficie total de 5,040.42 ha.

Es un área con cubierta vegetal ligeramente conservada en la parte alta de la microcuenca (pino-encino) e impactada antropogénicamente en su parte media (encino) y baja (selva), que durante el periodo de estudio (2000-2017) se observó cambios en el uso de suelo y vegetación en un 25% de la superficie total.

A partir de estos datos espacio-temporales de uso del suelo y vegetación, se generó un punto de partida para futuras investigaciones que permitirán monitorear diferentes alternativas de manejo de uso de suelo. Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados para elaborar el Plan de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET).

Las ecuaciones alométricas ajustadas permitieron realizar estimaciones de biomasa aérea total, específicas para *P. oocarpa*, *Quercus spp.* y *Q. resinosa* que se distribuyen en el bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa.

Tanto para *P. oocarpa* como en las especies de *Quercus*, el follaje presentó las mayores concentraciones de carbono en relación a los demás componentes arbóreos y, entre los encinos, *Q. elliptica* presentó la mayor concentración de carbono orgánico con 50.8% de su biomasa.

El 80.2% de la superficie de bosque templado de la microcuenca del río Hueyapa está cubierta con vegetación arbórea (estratos P-Q y Q), resaltando un 8.4% de superficie arbolada con "acceso restringido" para el inventario forestal.

Las cantidades de peso y/o volumen de necromasa son menores a los ecosistemas sujetos a aprovechamiento forestal comercial, propiciado también por la presencia periódica de incendios forestales y colecta permanente de leña en la zona.

La pérdida de biomasa debida a la caída de hojarasca y otros órganos vegetales fue mayor en el estrato Q, probablemente por la estructura foliar de los encinos y su fenología (latifolios). Aunque la densidad arbórea es superior en el estrato Q, los valores promedio de las variables evaluadas son superiores en el estrato P-Q, ya que posee árboles en las categorías diamétricas superiores. La PPNa es mayor en el estrato Q en dos $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que en el P-Q.

El suelo forestal de la microcuenca Hueyapa es homogéneo y el reservorio promedio de COS a 0.30 m de profundidad es similar en todo el suelo mineral del bosque templado.

El 95.4% del reservorio de carbono orgánico en el bosque templado de la microcuenca está contenido en la biomasa aérea y en el suelo (COS + raíz).

El reservorio promedio de carbono orgánico total a 0.30 m de profundidad es superior en el estrato P-Q en más de $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respecto al estrato Q y $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respecto al ecosistema global.

En general, los suelos del ecosistema de bosque templado de la microcuenca son fértiles, presentan densidad aparente que permite la infiltración del agua de lluvia. El pH moderadamente ácido por la acumulación y descomposición de la hojarasca, que junto a los valores CIC, promueven el buen intercambio de nutrientes, reflejado en una alta PPNa y excelente reservorio promedio de carbono por unidad de superficie.

Los tratamientos silvícolas intermedios y complementarios propuestos, se enfocan a la conservación, protección y restauración forestal que propiciaran la regeneración, espacio de crecimiento y desarrollo del bosque establecido, enriquecimiento de la masa forestal, monitoreo y tratamiento a plagas y enfermedades, conservación de suelo, agua, flora y fauna locales.

Los rodales 027 y 028, con menor impacto antropogénico, se proponen para establecer sitios permanentes de investigación silvícola a fin generar conocimiento sobre la estructura y desarrollo de la masa forestal del bosque templado y proponer un área de conservación de flora y fauna en la microcuenca del río Hueyapa.

Dado que la PPNa, y en particular el incremento en biomasa aérea es relativamente elevada, es conveniente realizar un análisis económico entre la posibilidad de realizar el aprovechamiento forestal maderable con fines comerciales contra el desarrollo del proyecto de venta de servicios ambientales modalidad captura de carbono, de donde la comunidad agraria podría obtener \$417.94 ha⁻¹ año⁻¹.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. M., Carrillo, A. F., Delgado, D., & Velasco, E. (2014). Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 6-29.
- Acosta, M. M., Vargas, H. J., Velázquez, M. A., & Etchevers B. J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6):725-736. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/302/30236610.pdf>
- Adams, M. B., Loughry, L., & Plaughter, L. (2004). Experimental forest and ranges of the USDA Forest Service. Gen., Tech. Rep. NE-321. Newtown Square, PA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. Northeastern Research Station. 178 p.
- Aguilar, R., Ghilardi, A., Vega, E., Skutsch, M., & Oyama, K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass and Bioenergy* 36, 192-207. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.10.029
- Aguirre-Calderón, O. A., & Jiménez-Pérez, J. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Mex. Cienc. For.*, 2(6), 74-84.
- Aher, P. D., & Sharma, H. C. (2014). Morphometric characterization of Gagar watershed in Kumaonregionofutt Arakhand for management planning: A GIS approach. *Agric. Sci. Digest*, 34(3): 163-170. doi:10.5958/0976-0547.2014.00995.1
- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo en el Pirineo Central. *Revista de Ecología de Montaña*, 165, 7-27. doi:10.3989/Pirineos.2010
- Alberto, D. M. & Elvir, J. A. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. INIA. *Investigaciones Agrarias: Sistemas y Recursos Forestales* 17(1): 67-78. Obtenido de http://www.inia.es/gcontrec/pub/067-078-Acumulacion_1208252685250.pdf

- Allison, L. E. (1965). Organic carbon. In C. A. Black, D. D. Evans, J. L. Whit, L. E. Ensminger, F. E., & F. E. Clark (Eds.), *Methods of soil analysis* (pp. 1372-1378). Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy.
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L. de L., & Almaraz-Sánchez, A. (2008). Primer reporte de *Phytophthora cinnamomi* Rands asociado al encino (*Quercus spp.*) en Tecoaapa, Guerrero, México. *Agrociencia* 42, 565-572.
- Álvarez, G. J. G., Balboa, M. M. A., Merino, A. & Rodríguez, S. R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais*, 1(1),21-30. Obtenido de file:///C:/Users/proyecto/Downloads/Dialnet-EstimacionDeLaBiomasaArboreaDeEucalyptusGlobulusYP-3178817%20(1).pdf
- Álvarez, O. P. A., & Varona, T. J. C. (1988). *Silvicultura*. La Habana, Cuba: Ed. Pueblo y Educación. 354 p.
- Andrade, H., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforestería en la Américas*, 10(39-40): 1009-116.
- Arellano-Aguilar, O., Ortega, E. L. & Gesundheit, M. P. (2012). Estudio de la contaminación en la cuenca del río Santiago y salud pública en la región. México, D. F. 20 p. Recuperado de: http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/9/informe_toxicos_rio_santiago.pdf
- Ares, A. & Fownes, J. H. (2000). Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 139, 227-236.
- Ashagrie, Y., & Zech, W. (2013). Litter production and nutrient cycling in two plantations and a *Podocarpus falcatus* dominated natural forest ecosystems in south-eastern highlands of Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 8(38), 4810-4818. doi:10.5897/AJAR10.914
- Ávalos, G. M. (2004). Panel Intergubernamental sobre cambio climático, PICC. In J. Martínez & a. Fernández (Eds.), *Cambio climático: Una visión desde México* (pp. 125-141). México, D. F.: INE-SEMARNAT

- Bailey, J. D., & Tappeiner, J. C. 1998. Effects of thinning on structural development in 40-100-year-old Douglas-fir stands in western Oregon. *Forest Ecology and Management*, 108, 99-113.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Revista Ecosistemas* 21 (1-2), 136-147. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=709>
- Barrios-Calderón, R. J., Infante-Mata, D., Flores-Garnica, J. G., Tovilla-Hermández, C., Grimaldi-Calderón, S. J., & García Alfaro, J. R. (2018). Woody fuel load in coastal wetlands of the La Encrucijada Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 339-357. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.12.068
- Bautista-Hernández, J., & Torres-Pérez, J. A. (2003). Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noc Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 69-75.
- Bautista-Olivas, A. L., Mendoza-Cariño, M., Rodríguez, J. C., Colado-Amador, C. E., Robles-Zazueta, C. A., & Meling-López, A. E. (2018). Above-ground biomass and carbon sequestration in mangroves in the arid area of the northwest of Mexico: Bahía del Tóbari and Estero El Sargento, Sonora. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 387-403. doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.02.020
- Berger, K. C., & Truog, E. (1944). Boron test and determination for soil and plants. *Soil Science*, 57(1), 25-36. doi: 10.1097/00010694-194401000-0000
- Binkley, D. & Ryan, M. G. (1998). Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. *Forest Ecology and Management*, 112, 79-85. Obtenido de http://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/ryan-lab/pubs/Binkley_and_Ryan_1998_FEM.pdf
- Binkley, D., Dunkin, K. A., DeBell, D., & Ryan, M. G. (1992). Production and nutrient cycling in mixed plantations of Eucalyptus and Alibizia in Hawwaii. *Forest Science*, 38(2), 393-408. doi: 10.1093/forestscience/38.2.393

- Bocco, G. (2004). Cartografía y Sistemas de Información Geográfica en el manejo integrado de cuencas. In H. Cotler (Ed.), El manejo integral de las cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental (pp. 41-47). México, D. F. INE-SEMARNAT. Obtenido de <https://www.colsan.edu.mx/investigacion/aguaysociedad/proyectogro2/Biblioteca/Bibliografia/M%F3dulo%204/Manejo%20integral%20de%20cuencas-pdf-INE.pdf>
- Bonilla, P. E., Rodríguez, T. D. A., Borja, de la R. A., Cíntora, G. C., & Santillán, P. J. 2012. Dinámica de combustibles en rodales de encino-pino de Chignahuapan, Puebla. *Rev. Mex. Cien. For.*, 4(19), 20-33.
- Busse, M. D., Simon, S. A., & Riegel, G. M. 2000. Tree-growth and understory responses to low-severity prescribed burning in thinned *Pinus ponderosa* forests of central Oregon. *Forest Science*, 46(2), 258-268.
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11.
- Calixto, C. G., López, M. A., Equihua, A., Lira, D. E., & Cetina, V. M. (2015). Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutricional. *Bosques*, 36(2), 265-273, doi: 10.4067/S0717-92002015000200012
- Campos, A. (1998). Proceso del ciclo hidrológico (3a Ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. S.L.P., México. Obtenido de nive.uaslp.mx/jspui/bitstream/i/3331/1/EDBPCH99801.pdf
- Capulín, G. J., Mohedano, C. L., & Razo, Z. R. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 79-87.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). (1986). Sistemas Agroforestales. Principios y Aplicaciones en los Trópicos. San José, Costa Rica. 818 p.

- Chuvieco, S. E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. (3a Ed.). Barcelona. España: Editorial Ariel S. A.
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications*, 11(2), 356-370. doi: 10.2307/3060894
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., Ni, J., ...Holland, E. A. (2001). Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11(2), 371–384.
- Clark, J., Sessions, J., Krankina, O., & Maness, Th. (2011). Impacts of thinning on carbon stores in the PNW: A plot level analysis. Final Report. College of Forestry. Oregon State University. USA.
- Cochran, W. G. (1993). *Técnicas de muestreo* (1a ed.). México: Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V. 513 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2008). Programa Nacional Hídrico 2007-2012. Distrito Federal. México: Autor. Obtenido de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/ Documentos/ PNH_05-08.pdf
- CONAGUA. (2017). Estadísticas del agua en México. Edición 2017. Ciudad de México. México: Autor. Obtenido de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Comisión Nacional Forestal - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (CONAFOR-SEMARNAT). (2011). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Manual y procedimiento para el inventario de campo. Re-muestreo 2011. Zapopan, Jalisco, México: Autor
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010a). *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*. Jalisco, México: Autor.
- CONAFOR (2010b). Norma Oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007. Jalisco, México: Autor.

- CONAFOR (2010c). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas* (3a. ed.). Jalisco, México: Autor.
- CONAFOR. (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos. Guerrero 2013. Jalisco, México: Autor
- CONAFOR. 2017. Estrategia Nacional REDD+ México 2017-2030. Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Zapopan, Jalisco, México.
- CONAFOR. 2019. Reglas de operación del Programa de Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2019. Ciudad de México. México.
- CONAGUA. (2017). Estadísticas del agua en México. Edición 2017. Ciudad de México. México: Autor. Obtenido de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Corral-Rivas, J. J., Vargas, L. B., Wehenkel, Ch., Aguirre, C. O. A., Álvarez, G., G., & Rojo, A. A. (2009). *Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango*. Durango, México: CONAFOR-CONACYT
- Corral-Rivas, J. J., Vargas-Larreta, B., Wehenkel, Ch., Aguirre-Calderón, O. A., & Crecente-Campo, F. (2013). Guía para el establecimiento, seguimiento y evaluación de sitios permanentes de monitoreo en paisajes productivos forestales (1ª. ed.). México: CONACYT-CONAFOR.
- Coûteaux, M.-M., Botttner, P., & Berg, B. (1995). Litter decomposition, climate and litter quality. *Tree*, *10*(2), 63-66.
- Cruz, R. B., Gaspari, F. J., Rodríguez, V. A. M., Carrillo, G. F. M., & Téllez, L. J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, *23*(64), 26-34. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, D. J. L., & González, D. I. (2010). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. In A. H. Cotler (Ed.), *Las cuencas*

- hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización (pp. 50-58). México, D. F. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/639/estado.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, D. F.
- DOF. (2008). norma oficial mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006 que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Ciudad de México, México.
- DOF. (2009). Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Poder Ejecutivo Federal, Estados Unidos Mexicanos. México, D. F. 118 p.
- DOF. 2018. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ciudad de México, México.
- DOF. 2019. Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos de Operación del Programa Sembrando Vida. Secretaría del Bienestar. Ciudad de México, México.
- Daniel, P. W., Helms, V. E, & Baker, F. J. (1982). *Principios de silvicultura* (1ª. ed.). México: Ed. Mc Graw-Hill. 482 p.
- Daubenmire, R. F. (1990). *Ecología vegetal. Tratado de autoecología de plantas* (3ª. ed.). México, D. F.: NORIEGA-LIMUSA.
- Del Río, M., Camala, R., Cañellas, I., Roig, S., & Montero, G. (2008). Thinning intensity and growth response in SW-European scots pine stands. *Ann. For. Sci.* 65(3), 308. doi: 10.1051/forest:2008009
- Dewar, R. C. 1992. Carbon sequestration in the trees, products and soil of forest plantation: An analysis using UK example. *Tree Physiology*, 11, 49-71. doi: 10.1093/treephys/11.1.49
- Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Rodríguez-Laguna, R. & Díaz-Balderas, J. A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie*

- Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1), 59-64. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/629/62916073006.pdf>
- Donato, D. C., Boone, Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. doi: 10.1038/NGEO1123
- Elder, J. F., & Cairns, D. J. (1982). Production and decomposition of forest litter fall on the Apalachicola river flood plain, Florida. U. S. Geological Survey Water-Supply paper 2196. 49 p.
- Elewa, H. H., Ramadan, E. M. & Nosair, A. M. (2016). Spatial-based hydro-morphometric watershed modeling for the assessment of flooding potentialities. *Environ Earth Sci.*, 75(10): 927. doi:10.1007/s12665-016-5692-4
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. CEPAL. *Serie Recurso Naturales e Infraestructura* 50. Santiago de Chile, Chile. 68 p. Obtenido de <https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/LCL1799S.PDF>
- Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado, P., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A. & Muñoz-Villalobos, J. A. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. *AGROFAZ*, 15(2), 151-161. Obtenido de http://www.agrofaz.mx/wp-content/uploads/articulos/2015152VII_4.pdf
- Faeth, P. (1995). Estimation of carbon sequestration of forestry using the LUCS model. World Resources Institute, Washington. U. S. A.
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity: A provisional new drainage factor. *Australian Journal of Science* 31(9):328-330
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). (1998). Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practices. USADA-Natural Resources Conservation Service. U.S.A: Autor Obtenido de http://www.usda.gov/stream_restoration
- Fedorová, B., Kadavý, J., Adamec, Z., Kneifl, M., & Knott, R. (2016). Response of diameter and height increment to thinning in oak-hornbeam copice in the

- southeastern part of the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 62(5), 229-235. doi: 10.17221/13/2016-JFS
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Campioli, M., & Peñuelas, J. (2015). Nutrient availability and climate as the main determinants of the ratio of biomass to NPP in woody and non-woody forest compartments. *Trees*, 30(3), 775-783. doi: 10.1007/s00468-015-1319-8
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Luysaert, S., Campioli, M., Sardans, J., ...Peñuelas, J. (2014). Spatial variability and controls over biomass stocks, carbon fluxes, and resource-use efficiencies across forest ecosystems. *Trees*, 28(2), 597-611. doi:10.1007/s00468-013-0975-9
- Figuroa-Navarro, C., Etchevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Acosta-Mireles, M. (2005). Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación en la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 23(1): 57-64. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57323108.pdf>
- Flores, G. J. G., & Benavides, S. J de D. 2009. Quemadas controladas como herramienta alternativa en el manejo forestal integral. In: J. J. G. Garnica (Coor.), Impacto ambiental de incendios forestales (pp. 317-325). México: Mundi-Prensa.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2006). Global forest resources assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry papers 147. Rome, Italy.
- FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe sobre temas hídricos. Núm. 38. Italia, Roma. 78 p. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/018/i3015s/i3015s.pdf>
- Fox, J. & S. Weisberg. (2011). An {R} Companion to Applied Regression, Second Edition. Thousand Oaks CA: Sage. Obtenido de URL: <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>.
- Fuentes, J. A. J. de J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. INE. México, D. F. 47 p. Obtenido de <https://www.yumpu.com/user/ine.gob.mx>

- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., & Corona-Romero, N. 2013. Estimación del contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y bosques*, 19(1), 53-69.
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 473-484. doi:10.171129/botsoci.66
- Garrido, A., Cuevas, M. L., Cotler, H., González, D. I., & Tharme, R. (2010). El estado de alteración ecohidrológica de los ríos de México. In A. H. Cotler (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización* (pp. 108-111). México, D. F. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/639/alteracion.pdf>
- Gaspari, F. J., Rodríguez, V. A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I. & Besteiro, S. I. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. EDULPE. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. 188 p. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/153563964.pdf>
- Gebre, T., Kibru, T., Tesfaye, S., & Taye, G. (2015). Analysis of watershed attributes for water resources management using GIS: The case of Chelekot micro-watershed, Tigray, Ethiopia. *Journal of Geographic Information System*, 7, 177-190. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2015.72015>
- Girardin, C. A. J., Silva, E. J. E., Doughty, Ch. E., Huaraca, H. W., Metcalfe, D. B., Durand-Baca, L., ...Malhi, Y. (2014). Productivity and carbon allocation in a tropical montane cloud forest in the Peruvian Andes. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 107-123. doi: 10.1080/17550874.2013.820222
- Gómez, I. A. & Gallopín, G. C. (1991). Estimación de la productividad primaria neta de ecosistemas terrestres del mundo en relación a factores ambientales. *Ecología Austral*, 1, 24-40. Obtenido de http://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/ecocomunidades/Gallopín_PPN.pdf

- Gómez, M. L. P., Flores, G. J. G., Centeno, E. L. R., Guerra, de la C. V., Xelhuantzin, C. J., Chávez, D. A. A., & Cerano, P. J. (2013). Sitios permanentes de investigación en incendios forestales (guía técnica para evaluación y monitoreo). Jalisco, México: INIFAP-SAGARPA.
- Gómez-Díaz, J. D., Etchevers-Barra, J. D., Monterrosos-Rivas, A. I., Campo-Álvarez, J., & Tinoco-Rueda, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo. serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.11.117
- González, D., Almendros, P., & Álvarez, J. M. (2009). Métodos de análisis de elementos en suelos: disponibilidad y fraccionamiento. *An. Quím.*, 105(3), 205-212.
- González, de M. A. I. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y la red de drenaje del Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.* 38, 311-329. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/28078894>
- González, P. J., & Candás, V. Ma. A. (2004). Materia orgánica de suelos bajo encinas. Mineralización de carbono y nitrógeno. *Inves Agrar: Sist Recur For*, 13(4), 75-83.
- González, T. M. A., Schwendenmann, L., Jiménez, P. J., & Himmelsbach, W. (2007). Reconstrucción del historial de incendios y estructura forestal de bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre oriental. *Madera y Bosques*, 13(2), 51-63.
- González, Z. M. (2008). Estimación de la biomasa aérea y captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus sp.* en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Posgrado. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 97 p.
- Gottesman, A. J., & Keeton, W. S. 2017. Regeneration responses to management for old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. *Forests*, 8(2), 45. doi:10.3390/f8020045
- Gough, C. M., Vogel, C. S., Harrold, K. H., Goerge, K., & Curtis, P. S. (2007). The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest.

Global change Biology, 13(9), 1935-1949. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01406.x

Graham, R. T., Harvey, A. E., Jain, T. B., & Tonn, J. R. (1999). The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in western forests. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-463. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 27 p.

Guerrero, E., De Keizer, O., & Córdoba, R. (2006). La aplicación del enfoque ecosistémico en la gestión de los recursos hídricos. UICN-PNUMA. Quito, Ecuador. 78 pp. Obtenido de <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2006-003.pdf>

Guzmán, A., Laguna, I. & Martínez, J. (2004). Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. In J. Martínez & A. Fernández (Eds.), *Cambio climático: Una visión desde México* (pp. 177-187). México, D. F.: INE-SEMARNAT

Hadley, R. F. & Schumm, S. A. (1961). Sediment sources and drainage watershed characteristics in upper Cheyene river watershed. *USGS Water-Supply Paper* 153-B, vol. 7. pp. 137-198

Hébert, F., Krause, C., Plourde, P., Achim, A., Prigent, G., & Ménétrier, J. (2016). Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the boreal forest of Quebec. *Forests* 2016(7),1-16.

Hernández, D. J. C., Corral, R. J. J., Quiñones, Ch. A., Bacon, S. J. R. & Vargas, L. B. (2008). Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques*, 14(3),25-41.

Hernández, G. (1998). Metodología para la elaboración de mapas de pendientes. *Revista Geográfica de América Central* No. 36. pp. 69-79

Hernández-Ramos, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., Hernández-Ramos, J., Peduzzi, A., ...Carrero, O. (2017). Productividad

- primaria neta aérea en plantaciones comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México. *Agrociencia* 51, 343-358.
- Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles Pérez, G., Hernández Ramos, A., ...Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8),921-938. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/ nov-dic/art-8.pdf>
- Herring, L. J., & Pollack, J. C. (1985). Experimental design protocol for forest vegetation management research: Level a trials-first approximation. International Reports of the Ministry of Forest. Reseach Report RR84013-HQ
- Hoffmann, D. (2016). La "curva de Keeling" y el número más importante para nuestro mundo: 400 ppm. Obtenido de http://bluemoon.ucsd.edu/co2_400/mlo_one_week.png
- Hoffmann, D. (2016). La "curva de Keeling" y el número más importante para nuestro mundo: 400 ppm. Obtenido de http://bluemoon.ucsd.edu/co2_400/mlo_one_week.png
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology. *Bull Geol Soc Am* 56(3):275-370. doi:10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
- Hurtrez, J. E., Sol, C.& Lucazeau, F. (1999). Effect of drainage area on hypsometry from ananalysis of small-scale drainage basins in the Siwalikhills (central Nepal). *Earth Surf Process Landform* 24(9): 799-808. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199908\)24:9<799::AID-ESP12>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<799::AID-ESP12>3.0.CO;2-4)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Documento técnico descriptivo de la Red Hidrográfica escala 1:50000 edición 2.0. Aguascalientes, México: Autor Obtenido de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf

INEGI. (2015). Carta de Uso de Suelo y Vegetación. E14-8 Chilpancingo. Serie III. Esc. 1:250 000. México: Autor. Obtenido de https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-250-000-serie-10/resource/5d14bac6-d0f0-4d5c-94d9-f20c607835b3?inner_span=True

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática–Instituto Nacional de Ecología–Comisión Nacional del Agua (INEGI-INE-CONAGUA). (2007). Documento técnico del mapa de la delimitación de las cuencas hidrográficas de México a escala 1:250000. México, D. F. 34 p. Obtenido de www.cnf.gob.mx:8090/snif/seif_chihuahua/component/phocadownload/category/1-cartografia?download=47:documento-tecnico-descriptivo Documento técnico del mapa de la delimitación de las cuencas hidrográficas de México a escala 1:250000

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa K., Ngara T., & Tanabe K. (Eds). Publicado por: IGES, Japón.

IPCC. (2007). Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. In Pachuri, R. K. & Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Ginebra, Suiza. 104 p.

Jain, T. B., Graham, R. T., & Adams, D. (2010). Carbon concentrations and carbon pool distributions in dry, moist, and cold mid-aged forests of the Rocky Mountains. In: B. T. Jain, T. R. Graham, J. Sandquist (Eds.), Integrated management of carbon sequestration and biomass utilization opportunities in a changing climate: Proceedings of the 2009 National Silviculture Workshop (pp. 39-59). Fort Collins, CO, USA: USDA Forest Service Proceeding RMRS-P-61.

Jiménez, A. I. F., Ordoñez, D. J. A. B., Torres, O. J. F., Caballero, G. E., Flores, R. A., Balam, de la V. Ma.,...Sepúlveda, J. V. (2012). Estimación del contenido y

- captura potencial de carbon en la Sierra Madre Oriental. In P. F. Paz, & R. M. Cuevas (Eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbon y sus interacciones en México. Síntesis 2012*, (pp. 180-186). Texcoco, Edo. de México, México: Serie Síntesis Nacionales PMC-UAEM-INE.
- Juárez-Martínez, A., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2003). Efecto de los incendios forestales en la regeneración de *Pinus oocarpa* var. *ochoteranae*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9(12), 125-130.
- Kalra, Y. P., & Maynard, D. G. (1991). Methods manual for forest soil and plant analysis. Edmonton, Alberta, Canada: Forest Canadian, Northwest Region, Northern Forestry Center. 116 p.
- Kang, J.-S., Shibuya, M., & Shin, Ch.-S. (2014). The effect of forest-thinning Works on tree growth and forest environment. *Forest Science and Technology*, 10(1), 33-39. doi:10-1080/21580103.2013.821958
- Keenan, T. F., & Williams, C. A. 2018. The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environmental and Resources*, 43, 219-243. Obtenido de <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Keyes, M. R., & Grier, Ch. C. (1981). Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research*, 11(3), 599-605. doi:10.1139/x81-082
- Khan, G. S. & Chaudhry, A. K. (2007). Effect of spacing and plant density on the growth of poplar (*Populus deltoides*) trees under agro-forestry system. *Pak. J. Agri. Sci.*, 44(2): 321-327. Obtenido de file:///C:/Users/proyecto/Downloads/EFFECT_OF_SPACING_AND_PLANT_DENSITY_ON_THE_GROWTH_%20(1).pdf
- Kottagoda, S. D. & Abeysingha, N. S. (2017). Morphometric analysis of watersheds in Kelaniriverbasin for soil and water conservation. *J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka* 45(3): 273-285. doi:http://dx.doi.org/10.4038/jnsfsr.v45i3.8192
- Legout, A., Hansson, K., Van Der Heijden, G., Laclau, J. P., Augusto, L., & Ranger, J. (2014). Chemical fertility of forest soil: Basic concepts. *Rev. For. Fr.*, 66, 21-31.

- López, B. W., Castro, M. I., Camas, G. R., Villar, S. B., & López, M. J. (2013). El manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. *Folleto Técnico* Núm. 19. INIFAP. Chiapas. México. 25 p. Obtenido de http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4028/CIRPAS_010208110500047589ok.pdf?sequence=1
- López, H. J. M., González, R. H., Ramírez, L. R. G., del Valle, A. J. I., Cantú, S. I., Pando, M. M., ...Gómez, M. M. V. (2015). Producción de hojarasca y depósito potencial de nutrientes de las hojas en el Matorral Espinoso Tamaulipeco *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30), 74-89.
- Lopez-Escobar, N. F., Gómez-Guerrero, A., Velázquez-Martínez, A., Fierros González, A. M., Castruita-Esparza, L. U., & Vera-Castillo, J. A. G. (2018). Reservoirs and nutrient dynamics in two stands of *Pinus montezumae* Lamb. in Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(1), 115-129. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.09.055
- López-López, M. A., & Flores-Nieves, P. (2016). Captura de carbono en un bosque de *Pinus patula*, en relación con la densidad de arbolado y fertilización química. In Paz, P., Rut, T. A., & Velázquez, R. A. (Eds.), PMC. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México (pp. 716-723). Síntesis 2016. Serie Síntesis Nacionales. Texcoco, Estado de México, México.
- López-Toache, V.; Romero-Amado, J.; Toache-Berttolini, G. & García-Sánchez, S. 2016. Bonos de carbono: financiarización del medioambiente en México. *Estudios Sociales* 25(47):191-215 (Consultado en <http://www.redalic.org/articulo.oa?id=41744004008>).
- Luyssaert, S., Detlef, S. E., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., ...Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 11, 213-215. doi: 10.1038/nature07276
- Mahajan, S. & Sivakumar, R. (2018). Evaluation of physical and morphometric parameters for water resource management in Gad Watershed, Western Ghats,

- India: An integrate geoinformatics approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(15): 556. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7730-x>
- Malik, M. S. & Shukla, J. P. (2018). A GIS-based morphometric analysis of Kandaihimmat watershed, Hoshagabad distric, M. P. India. *Indian Journal of Marine Sciences* 47(10): 1980-1985. [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/45165/1/IJMS%2047 %2810%29% 201980-1985.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/45165/1/IJMS%2047%201980-1985.pdf)
- Manzanilla, H. (1993). *Los sitios permanentes de investigación silvícola un sistema integrado para iniciarse en el cultivo de los ecosistemas forestales* (2ª ed.). México, D. F.: INIFAP
- Martínez, A. J. del C. (2013). Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de estratos múltiples y su efecto sobre propiedades bioorgánicas del suelo en el valle medio del Río Sinú. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 161 p.
- Mas, P. J. (1985). El manejo de bosques de pino y encino mediante el sistema silvícola de cortas sucesivas de protección (SICOSUP). Simposio sobre silvicultura y manejo de bosques en México. Cd. Guzmán, Jal., México. 168 p.
- Mas, P. J., & Pahua, G. A. (1990). *El SPES La Nieve a 27 años de su establecimiento*. Michoacán, México: INIFAP-SARH.
- Mata, B. J. M., Treviño, G. E. J., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O., Alanís, R. E., & Salinas, C. W. E. (2010). Evaluación de la siembra directa con especies de pino en la restauración de un ecosistema semiárido-templado. *Ciencia UANL*, 13(1), 72-77.
- McLeod, S. (1973). Studies on wet oxidation procedures for the determination of organic carbon in soil. CSIRO Division of Soil, Notes on Soil Techniques. pp. 73-79.
- Medrano-Meraz, F., López-López, M. A., De Jong, B. H. J.; Ángeles-Pérez, G. & Cruz-Cobos, F. (2017). Ecuaciones alométricas preliminares para la estimación de biomasa subterránea en *Pinus patula*. In Paz, P., Rut, T. A., & Velázquez, R. A. (Eds.), PMC. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus

- interacciones en México (pp. 431-437). Síntesis 2016. Serie Síntesis Nacionales. Texcoco, Estado de México, México.
- Méndez, C., & Bilbao, B. (2015). Fijación simbiótica de nitrógeno en *Dimorphandra macrostachya* de los bosques del altiplano de la Guayana Venezolana. *Bosques*, *36*(2), 331-335. doi:10.4067/S0717-92002015000200018
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A. & Nájera-Luna, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incremento en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl y *P. pseudostrobus* Lindl. en Guanajuato, México. *Agrociencia* *45*(4):479-491. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n4/v45n4a7.pdf>
- Mendoza, M. R. y Rodríguez, C. R. (1959). *Método Mexicano de Ordenación de Montes. Crítica de los conceptos edad, turno y diámetro mínimo de corta*. Uruapan, Mich., México. 81 p.
- Millano, J. L., & Paredes, F. J. (2016). Variabilidad de la vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica. *Novum Scientiarum*, *2*(4), 33-44.
- Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Project NR 389-042, Technical Report 3 Columbia University, Department of Geology, ONR, Geography Branch, New York.
- Mokarram, M., & Sathyamoorthy, D. (2015). Morphometric analysis of hydrological behavior of north Fars watershed, Iran. *European Journal of Geography*, *6*(4), 88-106. <http://www.eurogeographyjournal.eu/articles/EJG070604MOKARRAM%20pdf.pdf>
- Monreal, C. M., Etchevers, J. D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R. M.,...Velázquez, A. (2005). A method for measuring above- and below-ground C

- stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(special issue), 523-530. doi: 10.4141/s04-086
- Montero-Solís, F. M., López-López, M. A., Jiménez-Casas, M., Cetina-Alcalá, V. M., Platas-Rosado, D., & López-Collado, C. J. (2017). *Gliricidia sepium* and fertilization effect growth, nutrient status, and incidence of *Hypsipyla grandella* in a *Cedrela odorata* plantation. *Agroforestry Systems*. doi: 10.1007/s10457-017-0175-5
- Moran, E. F., Brondizio, E. S., Tucker, J. M., da Silva-Forsberg, M. C., McCracken, S., & Falesi, I. (2000). Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazonia. *Forest Ecology and Management* 139, 93-108.
- Musálem-Santiago, M. Á. 2002. Sistemas agrosilvopastoriles: Una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(2), 91-100.
- Navar, J. J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of Northwestern México. *Forest Ecology and Management* 257(2),427-434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Navar, J., González, N., & Graciano, J. (2001). Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional de medición y monitoreo de la captura de Carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. Obtenido de https://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/31_Navar.pdf
- Navar, J., Méndez, E., & Dale, V. (2002). Estimating stand biomass in the Tamaulipas thornscrub of northeastern México. *Annals of Forest Science*. 59(8): 813-821. doi:10.1051/forest:2002079
- Navar, J., Méndez, E., & Dale, V. 2002. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Annals of Forest Science*, 59(8), 813-821. doi: 10.1051/forest:2002079

- Návar-Cháidez, J. de J. (2010). Los bosques templados del estado de Nuevo León: El manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques*, 16(1), 51-59.
- Navarrete, D. A., Duque, A. J., Yepes, A. P., Phillips, J. F., Cabrera, K. R., López, E. W.,...Ordoñez, M. F. (2011). Madera muerta: Un reservorio de carbono en bosques naturales de Colombia. Validación metodológica para su medición en el marco de proyectos REDD+. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá, Col. 29 p.
- Olguín, M., Kurz, W., De Jong, B., Paz, F., Ángeles, G. & Zermeño, R. (2012). Hacia el uso del modelo CBM-CFS3 a escala nacional en México: proyecto piloto Chiapas. In Paz, F. & R. Cuevas (Eds.), Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México (pp.108-115). Síntesis 2011. Serie Síntesis Nacionales. PMC-AUEM-INE. Texcoco, Estado de México. México.
- Ordoñez, D. J. A. B. (1999). Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. México, D. F. 74 p. Obtenido de file:///C:/Users/proyecto/Downloads/NSJP1999.pdf
- Ordoñez, D. J. A. B. (2008). Emisiones y captura de carbono derivados de la dinámica de cambio de uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha. Tesis de Doctorado. Instituto de Ecología, UNAM: México, D. F. 140 p
- Pacheco, E. F. C., Aldrete, A., Gómez, G. A., Fierros, G. A. M., Cetina A. V. M. & Vaquera, H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3), 251-254. Obtenido de <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution and biomass of the world's forest. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 593-622. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914

- Parro, K., Köster, K., Jogiste, K., & Vodde, F. (2009). Vegetation dynamics in a fire damage forest area: The response of major ground vegetation species. *Baltic Forestry*, 15(2), 206-215.
- Patel, D. P., Gajjar, Ch. A. & Srivastava, P. K. (2013). Prioritization of Malesari mini-watersheds through morphometric analysis: A remote sensing and GIS perspective. *Environ Earth Science* 69(8):2643-2656. doi:10.1007/s12665-012-2086-0
- Paz, P. F., Argumedo, E. J., Cruz, G. O., Etchevers, D. J., & de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbon orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3): 289-310.
- Pei, Y., Lei, P., Xiang, W., Ouyang, Sh., & Xu, Y. (2018). Effect of stand age on fine root biomass, production and morphology in chinese fir plantation in subtropical China. *Sustainability*, 10(7), 2280. doi: 10.3390/su10072280
- Pérez, C., Frangi, J., Goya, J., Luy, A., & Arturi, M. (2013). Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de Eucalyptus grandis de diferente edad en la Mesopotamia Argentina. *Bosques*, 34(3), 303-310. doi:10.4067/S0717-92002013000300006
- Pérez-Camacho, M., López-López, M. A., Equihua-Martínez, A., Cetina-Alcala, V. M., & Méndez-Montiel, J. T. (2013). Relationship between site factors and bark beetle attack on pine trees. *Journal of Biological Sciences*, 13(7), 621-627. doi:10.3923/jbs.2013.621.627
- Pompa, M. (2008). Análisis de la deforestación en ecosistemas montañosos del noroeste de México. *Revista de investigación y difusión científica agropecuaria*, 12(2), 35-44.
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3-4), 75-83. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.02.003
- Pritchett, W. L. (1991). *Suelos forestales* (1ª. ed.). México: LIMUSA.

- Proença, V., Pereira, H. M., & Vicente, L. (2010). Resistance to wildfire and early regeneration in natural broadleaved forest and pine plantation. *Acta Oecologica*, *36*(6), 626–633. doi: 10.1016/j.actao.2010.09.008
- Quinto, M. H., Ramos, P. Y. A., & Abadía, B. D. 2007. Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un bosque tropical en Solero, Chocó, Colombia. *Biodiversidad Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó D.L.C.*, *26*, 28-41.
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Obtenido de URL <https://www.R-project.org/>.
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Obtenido de URL <https://www.R-project.org/>
- Raich, J. W., Russel, A. E., & Vitousek, P. M. (1997). Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawai'i. *Ecology*, *78*(3), 707-721.
- Ramírez-Correa, J. A., Zapata-Duque, C. M., León-Peláez, J. D., & González-Hernández, M. I. (2007). Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia*, *32* (5), 303-311.
- Ramos, V. S. & Ferreira, O. W. (2001). Determinación de la cantidad y composición química de la biomasa aérea y subterránea del *Pinus oocarpa*. *Tatascán* *13*(2):3-17. Obtenido de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11580e/A11580e.pdf>
- Ranger, J., & Gelhaye, D. 2001. Belowground biomass and nutrient content in a 47-year-old Douglas-fir plantation. *Annals of forest Science*, *54*(4), 423-430. doi: 10.1051/forest:2001135
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional "El Chico" Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, *19*(2), 73-86.

- Registro Agrario Nacional (RAN). (2015). Datos geográficos de la tierra de uso común, por estado-Formato SHAPE. Consultado 10-12-2016 en [https://datos.gob.mx/busca/ organization/ran](https://datos.gob.mx/busca/organization/ran)
- Rodríguez-Trejo, D. A. 2002. Efecto del fuego en el crecimiento en diámetro de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 71-74.
- Rodríguez, T. D. A. (1994). *La lucha contra el fuego. Guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales* (1a. ed.). México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Rodríguez, T. D. A. (1996). *Incendios forestales* (1ª. ed.). México: Universidad Autónoma Chapingo, Mundi-Prensa. 630 p.
- Rodríguez, T. D. A. (1996). *Incendios forestales*. México: Universidad Autónoma Chapingo – Mundi-Prensa.
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23–37. doi: 10.1071/WF02040
- Rojas-García, F.; De Jong, B. H. J.; Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forest. *Annals of Forest Science*. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Rojo, M. G., Jasso, M. J., & Velásquez, M. A. (2003). Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 57-67. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/629/62990106.pdf>
- Rojo, M. G., Jasso, M. J., & Velásquez, M. A. (2003). Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 57-67. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/629/62990106.pdf>

- Rosales, S. P. H., Olayo, G. M. A., Morales, F. J. A., Álvarez, R. R., Martínez, H. I. & Castro, Z. S. (1982). *El Método de "Desarrollo Silvícola" una alternativa en la silvicultura y ordenación de bosques*. Tesis de ingeniería. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. México. 406 p.
- Rosete-Vergés, F., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Maderas y bosque*, 20(1), 21-35.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Remote Sensing Center, Texas A&M University. Maryland, Texas, USA. Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740004927.pdf>
- Ruiz, P. M., García F. C., & Sayer, J. A. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Revista Ecosistemas*, 16(3), 81-90. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54016309>
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A. & Fuentes-López, M. E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques* 20(2):33-48. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61732072003.pdf>
- Saavedra, J. (2001). Planificación ambiental de los recursos forestales en la Región de la Araucanía, Chile. Definición de la Unidades Homogéneas de Gestión. Tesis doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Esp. 342 p. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=9458>
- Scheaffer, R. L., Mendenhall, W., & Ott, L. (1987). *Elementos de muestreo*. México, D. F.: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Jalisco, México: Autor. Obtenido de

http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf

- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy, New Jersey. *Bull Geol Soc Am* 67(5):597-646. [https://dx.doi.org/10.1130/0016-7605\(1956\)67\[597:eodsas\]2.0.co;2](https://dx.doi.org/10.1130/0016-7605(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2)
- Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers in the Great Plains. *Bulletin of the Geological Society of America*. 74(9), 1089-1100. Obtenido de [http://sci-hub.tw/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[1089:SOAROT\]2.0.CO;2](http://sci-hub.tw/10.1130/0016-7606(1963)74[1089:SOAROT]2.0.CO;2)
- Skole, D., Chomentowski, W., Salas, W. & Nobre, A. (1994). Physical and Human Dimensions of Deforestation in Amazonia. *Biosciencie*, 44(4), 314-322. doi: 10.2307/1312381
- Soriano, L. M. de los Á. (2014). Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México.
- Strahler, A. N. (1956). Quatitative slope analysis. *Bull Geol Soc Am* 67(5):275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[271:QSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[271:QSA]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysics Union*, 38(6):913-920
- Thiers, O., Reyes, J., Gerding, V., & Schalatter, J. E. (2014). Suelos en ecosistemas forestales. In: C. Donoso, M. E. González, A. Lara (Eds). *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile* (pp. 133-178). Valdivia, Chile: Ediciones UACH.
- Torres-Espino, G., Reyes-Umaña, M., González-González, J., & Montalvo-Marquez, C. (2014). Deterioro ambiental y problemática actual de la cenca río La Sabana Laguna de Tres Palos. *Foro de Estudios sobre Guerrero* 1(2):463-468. Obtenido de www.fesgro.mx/journal/articulos/Medio_Ambiente_Rec_Nat_T2_34.pdf
- Tubiello, F. N., Córdor-Golec, R. D., Salvatore, M., Piersante, A., Federic, S., Ferrara, A. ... Prospero, P. (2015). Estimaciones de emisiones de gases de efecto

- invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo. Roma, Ita.: FAO.
- United States Geological Survey (U.S.G.S.). (2013). Landsat ver. 8 product. U. S. Department of the Interior. Consultado 12-01-2017 en <http://Landsat.usgs.gov>
- Valera, P. M. A., Ríos, P. A., Coyotl, T. A., Linares, F. G., Tenorio, A. M. G., & Sampedro, R. M. L. (2015). El suelo como almacén de carbon: Criterios para calidad de carbon secuestrado en suelos. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 6(11), 44-55.
- Van Wagner, C. E. 1982. Practical aspect of the line intersect method. Information Report PI-X-12. Petawawa National Forestry Institute. Canadian Forest Service. Chalk River, Ontario, Canada. pp. 11 Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/d0c8/e7db86cc44274e08a1760e7d91dea684d5fe.pdf>
- Vandana, M. (2013). Morphometric analysis and watershed prioritisation: A case study of Kabani river basin, Wayanad district, Kerala, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 42(2):211-222. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/16941>
- Varmola, M., Salminen, H. & Timonen, M. 2004. Thinning response and growth trends of seeded Scots pine stands at the arctic timberline. *Silva Fennica*, 38(1), 71–83.
- Velasco, B. E., Ramírez, M. H., Moreno, S. F., & de la Rosa, V. A. (2003). Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Rev. Ciencias Forestales en México*, 28(94), 23-43.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002). Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Vendrami, J. L., Jurinitz, C. F., Castanho, C. T., Lorenzo, L., & Oliveira, A. A. Litterfall and leaf decomposition in forest fragments under different successional phases on the Atlantic Plateau of the state of Sao Paulo, Brazil. *Biota Neotrop.*, 12(3),

136-143. Obtenido de <http://www.biotaneotropica.org.br/v12n3/en/abstract?article+bn03312032012>

Ventura-Ríos, A., Plascencia-Escalante, F. O., Hernández, R. P., Ángeles-Pérez, G., & Aldrete, A. 2017. ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino? Una experiencia en el centro de México. *Bosque*, 38(1), 55-66. doi:10.4067/S0717-92002017000100007

Verduzco, C., & Rodríguez, L. C. (1995). Estudios florísticos en Guerrero. El Rincón de la Vía. México, D. F.: Facultad de Ciencias-UNAM.

Vieceli, N., Bortolin, T. A., Mendes, L. A., Bacarin, G., Cemin, G. & Schneider, V. E. (2014). Morphometric evaluation of watersheds in Caxias do Sul City, Brazil, using SRTM (DEM) data and GIS. *EnvironEarthSci*, 73(9): 5677-5685. doi:10.1007/s12665-014-3823-3

Viramontes-Olivas, O. A., Escoboza-García, L. F., Pinedo-Álvarez, C., Pinedo-Álvarez, A., Reyes-Gómez, V. M., Román-Calleros, J. A., & Pérez-Márquez, A. (2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Tecnociencia Chihuahua*, 1(3), 21-31. Obtenido de <http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v1n3/data/5-morfometria-de-la-cuenca.pdf>

Walkley, A. & Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic soil titration method. *Soil Sci.* 37, 29-38.

Weng, E., Luo, Y., Gao, Ch., & Oren, R. (2011). Uncertainty analysis of forest carbon sink forecast with varying measurement errors: A data assimilation approach. *Journal of Plant Ecology*, 4(3), 178-191. doi: 10.1093/jpe/rtr018

Wilkinson, M., Crow, P., Eaton, E. L., & Morison, J. I. L. (2016). Effects of management thinning on CO₂ exchange by a plantation oak Woodland in south-eastern England. *Biogeosciences*, 13(8), 2367-2378. doi: 10.5194/bg-13-2367-2016

- Wu, S., Hou, Y., & Yuan, G. (2010). Valoración de los bienes y servicios ecosistémicos y del capital forestal natural de la municipalidad de Beijing (China). *Unasylva* 234/235, 61, 28-36. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/012/i1507s/i1507s07.pdf>
- Yerena, Y. J. I., Jiménez P. J., Alanís, R. E., Aguirre, C. O., González, T. M., & Treviño, G. E. (2014). DINÁMICA DE LA CAPTURA DE CARBONO EN PASTIZALES ABANDONADOS DEL NORESTE DE MÉXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(1), 113-121.
- Yerena, Y. J. I., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J., & Alanís, R. E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 49-56.
- Young, R. A. 1991. *Introducción a las ciencias forestales* (1ª. Ed). México, D. F.: NORIEGA-LIMUSA.
- Zhu, J. J., Liu, Z. G., Wang, H. X., Yan, Q. L., Fang, H. Y., Hu, L. L., & Yu, L. Z. (2008). Effects of site preparation on emergence and early establishment of *Larix olgensis* in ontane regions of northeastern China. *New Forests*, 36(3), 247-260. doi:10.1007/s11056-008-9097-4