



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



Instituto de Investigación Sobre
los Recursos Naturales

TESIS

Variación espacio-temporal del índice de área
foliar en un bosque mixto del sur de Morelia
Michoacán

PRESENTA

Biól. Ana Isabel Santiago Bedolla

Como requisito para obtener el grado de:
MAESTRA EN ECOLOGÍA INTEGRATIVA

Director Tesis:
Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez

Morelia Michoacán, agosto 2018

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante el periodo de maestría, así como el otorgamiento de una Beca Mixta para realizar mi estancia de Investigación.

También, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), al Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA) y a la Maestría en Ciencias en Ecología Integrativa (MCEI), por brindarme los espacios y programas educativos para realizar mi proyecto de Maestría.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez por brindarme la confianza para trabajar bajo su asesoría en este proyecto. A mis revisores, Dra. María Luisa España, Dr. Leonel López, Dr. Alberto Gómez-Tagle Rojas y Enrico Yépez, por sus valiosas aportaciones que fortalecieron este proyecto.

Gracias al Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP), por brindarme las instalaciones para realizar mi estancia de investigación. Al mismo tiempo, agradezco mucho al Dr. Gastón Mauro Díaz por compartir conmigo su tiempo durante esta estancia y darme la oportunidad de aprender nuevas técnicas para mejorar mi trabajo. También agradezco al Dr. Patrick Schleppei, por su interés y conocimiento para resolver problemáticas en la metodología.

Agradecer a todas las personas que me brindaron su apoyo durante un largo trabajo de campo: Adrianita, Marisela, Trinity, Teri, Fer, Jonh, Marthita, Rafa, Jorge, Sina y Nairts. A toda la comunidad INIRENA, especialmente a los chiquillos que estuvieron compartiendo conmigo esta experiencia: Queru, Teru, Rich, Fran, Quique, Kassandra, Fanny y Fer. Agradezco a mi familia, especialmente a mis papas por su apoyo y motivación. Finalmente, a todos los que de una u otra manera estuvieron presentes durante esta etapa de mi formación académica y personal, Muchas Gracias.

Índice

1. CAPÍTULO 1.....	1
1.1. Introducción	1
1.2 Disponibilidad de agua en el suelo	2
1.3 Fenología y variables meteorológicas	4
1.4 Estructura y composición de la vegetación	4
2. MARCO TEORICO	6
2.1 ANTECEDENTES	6
2.2 Importancia del Índice de Área Foliar en los ecosistemas	6
2.3 Definición del Índice de Área Foliar	7
2.4 Técnicas para la medición del Índice de Área Foliar	7
Teoría general fotografía hemisférica digital (FHD)	11
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1 Descripción del área de estudio	17
3.2 Vegetación.....	17
3.3 Clima.....	18
3.4 Geología y suelos.....	18
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
4.1 Caracterización de la zona de estudio.....	19
4.2 Diseño experimental	19
4.3 Composición y estructura de vegetación	21
4.4 Fotografías Hemisféricas	21
4.5 Calibración de lente hemisférico.....	22
4.6 Procesamiento de fotografías hemisféricas.....	23
4.7 Registro de cambios en la fenología, medición de biomasa y área foliar	25
4.8 Medición de Humedad edáfica	25
4.9 Información micrometeorológica	26
4.10 Procesamiento estadístico	27
5. CAPITULO 2.....	29
5.1 Caracterización de coberturas vegetales para el área de estudio	29

5.2 Estratificación vertical de la vegetación.....	30
Índices estructurales	32
6. CAPÍTULO 3.....	38
6.1 Evaluación espacial y temporal del índice de área foliar	38
7. CAPÍTULO 4.....	44
7.1 Cuantificación de la humedad edáfica y agua disponible	44
7.2 Disponibilidad de agua en el suelo.....	46
7.3 Variables micrometeorológicas.....	48
8. CAPITULO 5.....	52
8.1 Variables explicativas del Índice de Área Foliar	52
9. CAPITULO 6.....	59
9.1 Variación del Índice de Área Foliar.....	59
9.2 Variación del contenido de agua en el suelo	62
9.3 Variables explicativas de Índice de área foliar	63
10. Modelo Conceptual	67
11. Conclusiones.....	71
Literatura citada	72

}

Índice de Figuras

Figura 1. a) Diagrama que muestra las cantidades relativas de agua disponible y no disponible en los suelos que van desde la arena hasta la arcilla. Las cantidades se expresan como porcentajes del volumen del suelo y como centímetros de agua por centímetro de suelo. (Modificado de Cassel, 1983; Kramer, 2003). b) Distribución de la Materia Orgánica dentro de un suelo Forestal (Ortiz-Villanueva et al., 1984).....	3
Figura 2. La fotografía hemisférica se puede dividir en círculos concéntricos, cada círculo corresponderá a un grado proporcional de arco (θ) proyectado en el hemisferio del cielo. Puntos dentro del hemisferio del cielo (P) se proyectan (P') en una imagen circular de acuerdo con la geometría de la transformación de proyección. (Modificado de Rich, 1990; Frazer et al., 1997).....	12
Figura 3. Comparación de una imagen tomada con fisheye y fotografías de formato full-frame.....	13
Figura 4. Ubicación del área de estudio.....	17
Figura 5. Climograma de la EIEAF, datos obtenidos de la estación climática del sitio para el año 2017.....	18
Figura 6. Distribución de sitios de muestreo dentro del área de estudio EEIAF.....	20
Figura 7. Errores comunes (rojo) en la clasificación de fotografías hemisféricas tomadas bajo condiciones no ideales de luminosidad. a) Clasificación con algoritmo OBIA, b) Clasificación con EnhanceHP.....	24
Figura 8. Coberturas vegetales para la EEIAF, obtenidas a partir de fotografías aéreas.....	29
Figura 9. Comparación entre variables dasométricas para arbustos en la Estación Ecohidrológica Alto Fresno.....	31
Figura 10. Comparación de variables dasométricas para árboles en la Estación Ecohidrológica Alto Fresno.....	32
Figura 11. Mapa tipos de vegetación dentro de la Estación Ecohidrológica Alto Fresno, utilizando fotografías aéreas y datos florísticos y estructurales.....	35
Figura 12. Promedio del Índice de Área Foliar por coberturas, para cada una de las fechas.....	39

Figura 13. Promedio de biomasa y área foliar por coberturas, para cada una de las fechas.....	41
Figura 14. Fenología foliar de las principales especies representativas dentro del área de estudio.....	42
Figura 15. Valores promedios de la variación interanual y espacial de la humedad edáfica para todas las condiciones de vegetación..	45
Figura 16. Variación temporal de la humedad edáfica; representación de PMP, CC Y SAT para cada cobertura vegetal.....	47
Figura 17. Variables micrometeorológicas para el periodo de estudio octubre 2016 - noviembre 2017.....	49
Figura 18. Variables explicativas del IAF para la condición de BP.	53
Figura 19. Variables explicativas del IAF para la condición de BE.	55
Figura 20. Variables explicativas del IAF para la condición de BG.	56
Figura 21. Variación espacial y temporal para dos bosques de coníferas (Figura modificada de Fang <i>et al.</i> (2008)).....	60
Figura 22. Fotografías hemisféricas para fechas representativas con cambios fenológicos.....	61
Figura 23. Morfología raíces para <i>Pinus spp.</i> (Imagen modificada de Brown, (1961)).....	64
Figura 24. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BP.....	67
Figura 25. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BE.....	68
Figura 26. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BG.....	69

Índice de cuadros

Cuadro 1. Descripción, ventajas y desventajas de los métodos directos e indirectos para estimar IAF	10
Cuadro 2. Métodos utilizados por algunos programas para estimar IAF	14
Cuadro 3. Métodos de corrección para fotografías hemisféricas. Algunos métodos presentan ventajas y desventajas que pueden corregirse con la combinación de otro método compatible	15
Cuadro 4. Descripción de los diferentes métodos de clasificación utilizados para las fotografías hemisféricas	23

Índice de Tablas

Tabla 1. Estadística descriptiva para las variables dasométricas de árboles y arbustos en la "Estación Ecohidrológica Alto Fresno". sd= desviación estándar, dap= diámetro altura del pecho, AB=área basal.	30
Tabla 2. Índices de Valor de Importancia de los géneros presentes en la Estación de Investigación Ecohidrológica Alto Fresno.	33
Tabla 3. Características principales de cada tipo de vegetaciones en la EIEAF.	36
Tabla 4. Estadística descriptiva para la variación espacial de IAF, incluyendo todas las fechas.	38
Tabla 5. Valores obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis para determinar diferencia entre el IAF de las coberturas por fecha.	39
Tabla 6. Análisis de Friedman para cada cobertura vegetal en la EIEAF	40
Tabla 7. Estadística descriptiva para la variación espacial biomasa, incluyendo todas las fechas de muestreo.	40

Tabla 8. Valores promedios de humedad edáfica en las diferentes coberturas vegetales (porcentaje de humedad volumétrica)	44
Tabla 9. Valores promedios de disponibilidad de agua por condición vegetal	46
Tabla 10. Valores promedio de humedad edáfica mm para cada capa de suelo dentro de un perfil (1m profundidad)	48
Tabla 11. Variables micrometeorológicas, obtenidas de la estación climática en la EIEAF.....	50
Tabla 12. Correlaciones significativas entre las variables explicativas y el IAF.	52

Resumen

El Índice de Área Foliar (IAF) definido como la mitad del área foliar total (m^2) por unidad de superficie de suelo (m^2), es una de las características más importantes de la estructura del dosel de las plantas. Además, es uno de los índices más estudiados como variable clave del ecosistema y el balance hídrico. Los procesos que crean patrones espaciales y temporales del IAF siguen siendo poco entendidos, especialmente en regiones húmedas. Por eso el objetivo de este trabajo es evaluar la relación entre los principales factores que controlan la variación espacio-temporal del IAF y cómo influye en los patrones de distribución de especies en un bosque mixto con diferentes condiciones de coberturas vegetales. En el sitio de estudio se realizó una caracterización vegetal y se encontró la presencia de cuatro coberturas: Bosque de Pino (BP), Bosque de Encino-Pino (EP), Bosque de Galería (BG) Y bosque de Encino (BE). La evaluación del IAF se realizó mediante el método de fotografías hemisféricas, además se evaluó la humedad edáfica, fenología y variables microambientales. Los resultados indican para el BP las variables determinantes son humedad ambiental y humedad edáfica en la primera capa del suelo (0-5 cm). En el BE la humedad ambiental, la humedad de la capa de 0-35 cm de profundidad y el déficit de vapor hídrico. Mientras que para el BG las variables determinantes son la humedad ambiental, el déficit de vapor hídrico, precipitación y la humedad de la capa superficial del suelo (0-5 cm). Para el caso del EP no se encontró ninguna correlación con las variables evaluadas.

Palabras clave: fotografía hemisférica, dosel, evapotranspiración, humedad relativa y fenología

Abstract

The Leaf Area Index (LAI) defined as half of the total leaf area (m^2) per unit of soil surface area (m^2), is one of the most important characteristics of the structure of the canopy of the plants. In addition, it is one of the most studied indices as a key variable in the ecosystem and the water balance. The processes that create spatial and temporal patterns of the LAI are still poorly understood, especially in humid regions. Therefore, the objective of this work is to evaluate the relationship between the main factors that control the spatio-temporal variation of the LAI and how it influences the distribution patterns of species in a mixed forest with different plant cover conditions. In the study site, a vegetal characterization was carried out and the presence of four coverings was found: Pine Forest (BP), Oak-Pine Forest (EP), Gallery Forest (BG) and Oak Forest (BE). The evaluation of the LAI was carried out using the method of hemispherical photographs, in addition soil moisture, phenology and micro environmental variables were evaluated. The results indicate for the BP the determining variables are environmental moisture and soil moisture in the first layer of the soil (0-5 cm). In the BE the environmental humidity, the humidity of the layer of 0-35 cm depth and the deficit of water vapor. While for the BG the determining variables are the environmental humidity, the deficit of water vapor, precipitation and the humidity of the superficial layer of the soil (0-5 cm). In the case of the EP, no correlation was found with the variables evaluated.

Keywords: hemispheric photography, canopy, evapotranspiration, relative humidity and phenology.

Presentación

Los bosques templados de México son un complejo de tipos de vegetación característicos de regiones montañosas, importantes por sus endemismos (Villareal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005). Son el segundo bioma más extenso del país, ocupando el 21% del territorio (Rzedowski, 1992). Los bosques templados enfrentan un problema ambiental grave (Guzmán-Mendoza, Zavala-Hurtado, Castaño-Meneses, & León-Cortés, 2014), este tipo de biomas son las zonas ecológicas más susceptibles a cambios por actividad antropogénica (Bocco et al., 2001), principalmente por la utilidad práctica y los beneficios que pueden proporcionar a partir de los recursos que poseen, y de los que hacen uso las poblaciones humanas inmersas en estos ambientes, como los recursos maderables aunados a valores económicos, sociales y culturales (González-Espinosa et al., 2007).

Estas modificaciones que afectan de manera grave a los ecosistemas de bosque hace necesario conocer y comprender fenómenos que ocurren en este tipo de ambientes y que proporcionen información rápida acerca del estado de conservación (Mattoni et al., 2000) y los servicios ecosistémicos que proveen. De acuerdo con (Rzedowski, 2015), dentro de esta clasificación de bosques templados encontramos los bosques mixtos, las especies dominantes en este tipo de vegetación pertenecen a los géneros *Pinus* y *Quercus*, (CONABIO, 2018).

De acuerdo con (Cram et al., 2010) dentro de la cuenca de Cuitzeo los bosques mixtos de Pino-Encino ocupan un territorio de 12.97%. El área de estudio de esta investigación se encuentra inmersa dentro de este pequeño pero significativo porcentaje de vegetación. Ya hemos mencionado la importancia de este tipo de vegetación, dentro de la cual se han realizado una gran cantidad de investigaciones que van desde el aspecto geográfico, ecológico, edáfico, hidrológico, socioambiental, diversidad entre otros. Pero

es de gran interés para nosotros comprender y evaluar fenómenos que no han sido explorados en estos ambientes, como es la comprensión de los patrones espacio-temporales del uso de agua por la vegetación y las relaciones suelo-planta-atmósfera, fundamental para el manejo eficaz de cuencas y el avance de los estudios integrados, donde se contemplen distintos componentes tanto del medio biótico como abiótico y su interconectividad a partir de los flujos de masa y energía (McClain *et al.*, 2012; Naithani *et al.*, 2013). Es por eso que en este trabajo se emplea una perspectiva ecohidrológica y se propone evaluar variables relevantes, como la humedad edáfica, el Índice de Área foliar, variables fenológicas y micrometeorológicas para comprender la dinámica y los principales factores que controlan la variación espacio-temporal del IAF y cómo influye en los patrones de distribución de especies en un bosque mixto con diferentes condiciones de coberturas vegetales. Esto con la finalidad de contribuir en el manejo forestal y en la determinación de sitios potenciales para conservación de recursos hídricos, a partir de un modelo conceptual a nivel de microcuenca, pero con potencial de réplica en diferentes ambientes.

Ahora nos centraremos específicamente en el área de estudio, la Estación de Investigación Ecohidrológica Alto Fresno (EIEAF), se ubicada dentro de la cuenca de Cuitzeo, forma parte de la zona de recarga más importante de los mantos freáticos de la ciudad de Morelia (Garduño *et al.* 2014). A partir de la relevancia que tienen este sitio de captación hídrica surge un proyecto a largo plazo para realizar la caracterización detallada del funcionamiento ecohidrológico en una microcuenca de esta estación de investigación. Se cuenta con un sitio instrumentado para el monitoreo constante de procesos hidrológicos, microclimáticas y ecológicos desde el año 2010 y se han realizado una serie de investigaciones en diversos temas, por ejemplo, Rosas-Rangel (2015) evaluó directamente los procesos que intervienen en el ciclo del agua y realizó un balance hídrico; además se han evaluado los procesos de infiltración edáfica y la permeabilidad

del suelo (Gómez-Tagle, 2008; Pujolar *et al.*, 2011; Rodríguez, 2014; Dimitrova, 2015), así como captación hídrica por el dosel (Santiago, 2015) y la composición isotópica de los distintos tipos de agua (Fernández, 2016), además de la variación de temperatura y humedad a distintas alturas dentro del bosque (Ruiz-Leyva, 2015), y partición de la precipitación en sus distintos componentes (Gómez-Tagle *et al.*, 2015).

Además, se han realizado inventarios de vegetación, incluyendo estructura y composición de las especies florísticas para caracterizar el sitio de manera general. Recientemente, se llevan a cabo estudios sobre el efecto de las reforestaciones sobre la erosión de suelo (López-Valencia, en proceso), la variación vertical de la infiltración y permeabilidad del suelo (Alvarado-Huitrón, en proceso) así como el empleo de métodos geofísicos en la caracterización edáfica (Onchi-Ramuco, en proceso).

Este es un proyecto extenso, del cual forma parte la presente investigación, el objetivo es evaluar variables ecológicas de la vegetación, como el Índice de Área Foliar (IAF) y su relación con los procesos hídricos y meteorológicos. A partir de esto generar un modelo conceptual para conocer el funcionamiento suelo-planta-atmósfera dentro del área de investigación. Este trabajo está estructurado en 6 capítulos.

En el primero se abordada de manera breve la importancia del IAF, algunas técnicas para su medición y monitoreo, planteamiento del trabajo, así como la metodología aplicada durante la investigación y la descripción del área de estudio. En el siguiente capítulo se presentan los primeros resultados sobre la caracterización detallada de los ambientes de vegetación, así como una descripción estructural y florística. En el capítulo 3, 4 y 5 se abordarán los resultados sobre la variación temporal y espacial del IAF, fenología, humedad edáfica y variables micrometeorológicas respectivamente. Finalmente, el último capítulo se compone de la discusión general, conclusiones y algunas consideraciones finales.

Capítulo 1

*Introducción, antecedente y planteamiento del
trabajo*

1.

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

El Índice de Área Foliar (IAF) definido como la mitad del área foliar total (m^2) por unidad de superficie de suelo (m^2) (Chen y Black, 1992), es una de las características más importantes de la estructura del dosel de las plantas (Thimonier *et al.*, 2010). Además, es uno de los índices más estudiados como variable clave del ecosistema y el balance hídrico (Feldkirchner y Gower, 2001; Bolstad y Gower, 1990). A pesar del esfuerzo por caracterizar el IAF de manera precisa en diferentes ambientes, no se ha hecho hincapié en comprender los patrones espaciales y temporales del IAF. Enfatizar cuales son las variables que intervienen en la dinámica, para comprender la relación agua-suelo-planta-atmósfera, es fundamental para entender y modelar el ciclo del agua (Naithani *et al.*, 2013). Por lo tanto, los procesos que crean patrones espaciales y temporales del IAF siguen siendo poco entendidos, especialmente en regiones húmedas (Asbjornsen *et al.*, 2011).

La variación temporal del IAF incluye cambios debidos al desarrollo y cambios en la cobertura del dosel (Vose *et al.*, 1994), que pueden estar influidos por aspectos como la fenología, la senescencia de las hojas o acículas. Vose *et al.*, (1994) menciona como la radiación solar, el régimen de agua, y la temperatura son factores dominantes que afectan la variación estacional del IAF.

Además de estos factores podemos mencionar otros como los patrones de movimiento de agua en el suelo (Chapin *et al.*, 2002); también las variables estructurales de la vegetación pueden influir en esta dinámica, por ejemplo, la edad y la competencia de recurso entre individuos.

1.2 Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad de los recursos del suelo, especialmente el agua y nutrientes, son un determinante crítico del IAF, las plantas en ambientes de altos recursos producen una gran cantidad de biomasa foliar, y las hojas producidas en estos ambientes tienen un área foliar mayor (Chapin et al., 2002). Los suelos incluyen constituyentes orgánicos, minerales, gaseosos y acuosos, dispuestos en una forma de estructura vertical. Estas propiedades del suelo, a su vez, modulan la disponibilidad de recursos de agua y nutrientes para el crecimiento de las plantas. En los suelos, el agua se mantiene en los espacios porosos como películas de agua adsorbidas a las partículas del suelo (Chapin et al., 2002); la porosidad del suelo depende de la textura que se define como las cantidades relativas de partículas de arena, limo y arcilla que predomina en la fracción sólida (Kramer, 2003). El suelo puede presentar diferentes condiciones de humedad, cuando el contenido de agua después del drenaje de agua gravitatoria se ha vuelto muy lento y el contenido de agua se ha vuelto relativamente estable se conoce como Capacidad de Campo (CC).

Mientras que el Punto de Marchitez Permanente (PMP), se define como la cantidad de agua por unidad de peso o por unidad de volumen de suelo, expresada en porcentaje, que se sostiene tan fuertemente por la matriz del suelo, que las raíces no pueden absorber el agua y la planta se marchitaría (Kirkham, 2005). Por lo tanto, la diferencia entre PMP Y CC corresponde a la cantidad de agua disponible (AW) para la planta. Estas tres condiciones pueden presentar modificación en los valores debido a las condiciones de textura (Figura 1a). Pero también de la cantidad y tipo de materia orgánica presente en el suelo (Figura 1b).

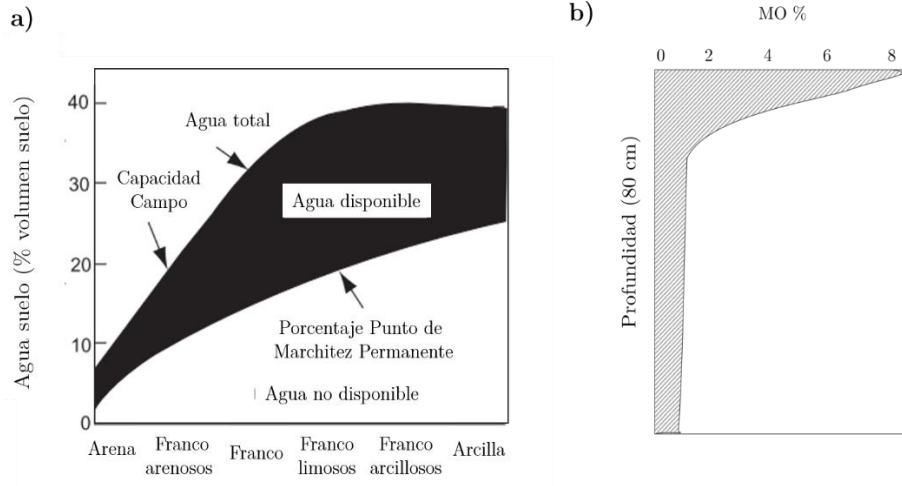


Figura 1. a) Diagrama que muestra las cantidades relativas de agua disponible y no disponible en los suelos que van desde la arena hasta la arcilla. Las cantidades se expresan como porcentajes del volumen del suelo y como centímetros de agua por centímetro de suelo. (Modificado de Cassel, 1983; Kramer, 2003). b) Distribución de la Materia Orgánica dentro de un suelo Forestal (Ortiz-Villanueva et al., 1984).

Por lo tanto, la cantidad de agua disponible para las plantas se encuentra estrechamente relacionada con la dinámica del IAF. El movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera implica procesos complejos e interacciones entre la red de poros del suelo, la interfaz suelo-raíz, la red de transporte del xilema y los estomas foliares (Lin, 2012). Los procesos a pequeña escala de movimiento de agua en un medio poroso se han estudiado bien desde un punto de vista físico o hidrodinámico (Jarvis y McNaughton, 1986; Jury et al., 1991). Sin embargo, sus interfaces dinámicas con los sistemas biológicos siguen siendo poco conocidas (Hopmans y Bristow, 2002).

1.3 Fenología y variables meteorológicas

La fenología se ha definido como el momento de los eventos biológicos y su relación con los cambios climáticos estacionales (Lieth 1974). Los cambios temporales en los factores meteorológicos tales como la incidencia de la luz, la temperatura del aire y la humedad (Baldocchi y Wilson 2001; Ito et al., 2005; Muraoka y Koizumi ,2006) pueden afectar la fenología de la hoja del dosel y la duración de la estación de crecimiento (White et al., 1999; Richardson et al. 2006). Esto caracteriza de manera efectiva el momento de los eventos estacionales en las regiones templadas, donde los patrones de emergencia de hojas y la longevidad de las hojas parecen estar gobernados principalmente por temperaturas que cambian estacionalmente (Kikuzawa, 1995). De acuerdo con esto, generalmente deben considerarse tres puntos en el estudio de la fenología foliar (Harada y Takada 1988, Kikuzawa 1989; Kikuzawa, 1995), 1) longevidad foliar, 2) hábito foliar y 3) el momento de aparición de la hoja, en este trabajo solo nos enfocaremos en el último punto, debido a que se hará uso de observaciones para registrar estos cambios en la fenología foliar. Esta variación estacional de las hojas en las diferentes especies conlleva a una variación temporal del IAF. Por lo tanto, la variación de temporal y espacial de IAF dependerá de la respuesta fenológica que tiene cada una de las especies vegetales.

1.4 Estructura y composición de la vegetación

La distribución de las especies vegetales dentro de los bosques puede ser heterogénea, lo cual indica que a menudo conviven numerosas especies, principalmente arbóreas. Debido a lo anterior, la composición florística, definida como el número de especies presentes en un sitio, contribuiría a generar patrones espaciales del IAF, ya que la aparición y desarrollo de las fases de la vegetación (RPN, 2015) es diferente para cada una de ellas. Por

otra parte, los cambios en la estructura de la vegetación también pueden influir en la función del ecosistema (Law et al., 2003, Takagi et al., 2009) reflejando variaciones en el IAF, es decir la manera en la cual están distribuidas las diferentes especies vegetales y como estas se distribuyen espacialmente. Es por lo anterior que parte del objetivo de este trabajo es realizar una caracterización del sitio de estudio basada en la vegetación, para poder identificar si existe diferenciación en la dinámica del IAF incluyendo ambientes con composición y estructura diferentes.

Pregunta de investigación

¿Qué factores determinan los patrones espaciales y temporales del IAF en un bosque mixto con diferentes condiciones de coberturas vegetales?

Hipótesis

La composición, estructura y fenología de los rodales, así como la variación de humedad edáfica y las variables micrometeorológicas, son los principales factores que controlan los patrones espaciales y temporales de IAF dentro de sitios con diferentes condiciones de cobertura.

Los sitios con menor disponibilidad de humedad edáfica presentan densidades vegetales menores con respecto a sitios donde la disponibilidad hídrica es mayor, esto contribuye a que los cambios en la oscilación temporal del IAF sea menores en sitios donde las plantas no se encuentran bajo estrés hídrico.

Objetivo general

Evaluar la relación entre los principales factores que controlan la variación espacio-temporal del IAF y cómo influye en los patrones de distribución de especies en un bosque mixto con diferentes condiciones de coberturas vegetales.

Objetivos particulares

- Realizar una caracterización del sitio de estudio, evaluando la composición y estructura florística, para describir detalladamente las diferentes coberturas vegetales.
- Medir el Índice de Área Foliar en cada cobertura vegetal, empleando fotografías hemisféricas, así como registrar cambios en la fenología y biomasa empleando trampas de hojarasca.
- Cuantificar las variables de control en las distintas coberturas vegetales; humedad edáfica y las variables micrometeorológica en el sitio de estudio.
- Determinar la relación entre *IAF* y las variables de control, para generar un modelo conceptual de ese proceso.

2. MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

2.2 Importancia del Índice de Área Foliar en los ecosistemas

El *IAF* determina la atenuación de la luz a través de un dosel e influye fuertemente en la capacidad de la vegetación para obtener carbono y transferir agua y energía a la atmósfera (Muraoka *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012). El *IAF* ha sido evaluado desde ambientes boreales (Barr *et al.*, 2004) hasta zonas áridas y semiáridas (Sprintsin *et al.*, 2007), incluyendo bosques tropicales (Jain, *et al.*, 2010), plantaciones forestales (Medhurst y Beadle, 2001), bosques deciduos (Neumann, *et al.*, 1989) y bosques mixtos (Arx *et al.*, 2004). Abordándose desde la perspectiva óptica de los métodos hasta la función ecosistémica del *IAF*. En México existe

una gran extensión boscosa y a pesar de esto hay pocos estudios sobre IAF (Leaf et al., 2011). Ejemplo de ellos son (Leaf et al., 2011) que en 2011 evaluaron el IAF en bosques manejados de *Pinus patula*, mientras (Tagle, et al., 2011) también en 2011 trabajaron con bosques de *Pinus pseudostrobus* y *Quercus sp*, para determinar cómo la apertura del dosel y el índice del área foliar (IAF) se ven afectados por la extracción de leña en bosques mixtos. También se han realizado algunos trabajos en plantaciones, como el realizado por Guevara-Escobar et al. en 2005 donde evalúan la apertura del dosel utilizando fotografías hemisféricas en plantaciones de *Eucalyptus nitens*. (Chazdon & Field, 1987) trabajaron en una reserva natural, evaluando el IAF para describir una técnica computarizada para el análisis de fotografías hemisféricas.

2.3 Definición del Índice de Área Foliar

El IAF es una variable adimensional definida por Watson (1947) como el área total de una cara del tejido fotosintético por unidad de terreno; es aceptable en especies con hoja ancha ya que ambas caras de la hoja tienen la misma superficie. Sin embargo, su medición es difícil en coníferas porque no tienen esta morfología foliar. Por tanto, Bolstad y Gower (1990) propusieron el concepto de área foliar proyectada (AFP), es particularmente útil para describir el área foliar efectiva de los bosques de coníferas, en la cual las hojas son más cilíndricas que planas. (Chapin, Matson, & Mooney, 2002). Actualmente existen técnicas de corrección que se aplican para evitar errores asociados con este tipo de hojas, en algunos métodos que se describirán más adelante.

2.4 Técnicas para la medición del Índice de Área

Foliar

Las mediciones de IAF se pueden subdividir en dos grandes categorías: técnicas directas e indirectas, como el método alométrico, la atenuación de radiación solar o las fotografías

hemisféricas (Gower *et al.*, 1999; Breda, 2003; Jonckheere *et al.*, 2004; Garrigues *et al.*, 2008) (Tabla 1). Los métodos directos son los más precisos, pero tienen la desventaja de consumir mucho tiempo y como consecuencia, la implementación a gran escala solo es marginalmente factible (Jonckheere *et al.*, 2004). Estos métodos son lentos y laboriosos, debido a esto no suelen utilizarse en el monitoreo a largo plazo, sin embargo, las técnicas directas de obtención de IAF pueden considerarse importantes como métodos de calibración (Jonckheere *et al.*, 2004). El IAF puede evaluarse directamente utilizando métodos de cosecha como el muestreo destructivo o mediante trampas de hojarasca (Chen, Rich, Gower, Norman, & Plummer, 1997; Jonckheere *et al.*, 2004), mediciones gravimétricas o mediante el uso de instrumentos (Tabla 1).

La medición indirecta del IAF está ligada a una implementación de instrumentos ópticos comerciales, incluido el LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Lincoln, Nebraska EE. UU.), AccuPAR (Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington, EE. UU.), Tracing Radiation y Architecture of Canopies (TRAC, 3rd Wave, Ontario, Canadá), fotografías hemisféricas digitales (DHP), entre otras (Jonckheere *et al.*, 2004) (Tabla 1). Estos métodos indirectos son están relacionados con parámetros importantes para la adecuada estimación de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) del sotobosque y los atributos seleccionados de la estructura del dosel, como la apertura del dosel y el IAF (Frazer, Trofynow, & Lertzman, 1997). Los métodos destructivos proporcionen valores de IAF muy precisos, por el contrario, las mediciones ópticas proporcionan una aproximación del IAF (Garrigues *et al.*, 2008). Las mediciones ópticas no permiten distinguir entre tejido fotosintético y los componentes leñosos (tallos, troncos y ramas). Esto conduce a un sesgo en la estimación del IAF (Chen *et al.*, 1997, Kucharik *et al.*, 1998, Barclay *et al.*, 2000, Stenberg *et al.*, 2003). Por esta razón las estimaciones con métodos ópticos representan el Plant Area Index (PAI). Cada uno de estos métodos puede presentar algunas ventajas o desventajas (Cuadro 1). Dentro

de los métodos más utilizados para estimar IAF, se encuentran el de Fotografía hemisférica. Ya que que los equipos de fotografía hemisférica tienen usos muy diversos, incluso en fotografía artística, su costo es bajo en comparación con instrumentos especializados (Díaz, Lencinas, & del Valle, 1995).

	Método	Descripción	Ventajas	Desventajas	Ejemplo investigaciones realizadas
Métodos directos	Planímetro	Se basa en la correlación entre el área foliar individual y el número de unidades de área cubiertas por esa hoja en un plano horizontal.	Como el área de la hoja se determina a través de medidas de área repetidas en hojas sueltas y acumulación de área, estos métodos se consideran los más exactos.	Los muestreos consumen mucho tiempo y la implementación a gran escala es marginalmente factible	Chadzon <i>et al.</i> 1991
	Trampas hojarasca	Recolección de hojarasca durante el período de caída de la hoja usando colectores hojarasca.			McPherson <i>et al.</i> , 1998
	Método gravimétrico	Correlaciona el peso seco de hojas y área foliar (hoja verde-área a peso seco).			Le Roux <i>et al.</i> , 1999
Métodos indirectos	Método alométrico	Relaciones entre el área foliar y las dimensiones leñosas de la planta	variables determinantes para evaluar IAF (Ejem. DAP o el área de albura)	Método sobreestima IAF comparado con métodos ópticos	Turner <i>et al.</i> , 2000
	AccuPAR	Mide la cantidad de PAR, por medio de una sonda debajo y sobre el dosel	La fracción de claros se puede leer directamente.	Realizar suficientes mediciones para obtener un resultado confiable	Gower <i>et al.</i> , 1999
	LAI-2000 (Plant Canopy)	Mide simultáneamente la radiación difusa mediante un sensor de luz de ojo de pez	Cálculos automáticos, almacena mediciones y resultados	Subestima LAI en doseles discontinuos	Naithani <i>et al.</i> 2013
	Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC)	Utiliza un haz solar como sonda, registrado por medio de tres sensores fotosensibles a la luz directa de alta frecuencia	La tecnología TRAC ha sido validada en varios estudios (Chen <i>et al.</i> , 1997; Kucharik <i>et al.</i> , 1997)	La combinación de TRAC y LAI-2000 permite una evaluación rápida y precisa de un dosel	Welles <i>et al.</i> , 1996
	Fotografía Hemisférica	Estudia los doseles a través de fotografías adquiridas utilizando un lente hemisférico	Captura las diferencias relacionadas con la especie, el sitio y la edad en la arquitectura del dosel	Los errores pueden ocurrir en cualquier etapa de adquisición o análisis de imágenes	Neumann <i>et al.</i> , 1989

Cuadro 1. Descripción, ventajas y desventajas de los métodos directos e indirectos para estimar IAF

En México la aplicación de este método ha sido limitada (Aguirre-Salado *et al.*, 2010), sin embargo, a partir de esas mediciones ha sido posible estimar estructura y transmisión de luz al sotobosque (Rich, 1990; Hu *et al.*, 2009). Por ejemplo, Aguirre-Salado *et al.*, (2010) obtuvieron el IAF mediante la calibración alométrica de mediciones ópticas con fotografías hemisféricas en un bosque manejado de *Pinus patula* en Hidalgo, México. En las siguientes líneas se revisarán con más detalle el método de fotografía hemisférica, debido a que es la técnica que se utiliza para esta investigación y es necesario presentar algunos conceptos básicos sobre el funcionamiento del método.

Teoría general fotografía hemisférica digital (FHD)

Desde principios del siglo XX los lentes hemisféricos comenzaron a utilizarse en ciencia y técnica (Hill, 1924). Actualmente son empleados en áreas diversas, como la climatología, ecología y ciencias forestales (Chapman, 2008; Díaz *et al.*, 1995). La Fotografía Hemisférica Digital (FHD) es un método que utiliza un lente hemisférico, con una apertura angular de 180° para capturar y registrar la posición, el tamaño y la forma de los claros en el dosel de un bosque. Una Fotografía Hemisférica (FH) actúa como un registro permanente y, por lo tanto, es una fuente valiosa de información sobre la posición, el tamaño, la densidad y la distribución de los claros del dosel (Frazer *et al.*, 1997). Para utilizar esta técnica correctamente se requiere de conocimientos particulares de óptica, fotografía y procesamiento digital de imágenes (Díaz *et al.*, 1995). Los elementos de una región en un objeto hemisférica se pueden definir por su distancia angular (α , θ) en el plano horizontal y vertical, respectivamente. Los puntos dentro del hemisferio del cielo (P) se proyectarán (P') en una imagen circular de acuerdo con la geometría de la transformación de proyección. Un punto (P) ubicado dentro de la región de objeto hemisférica se proyectará a otro punto (P') en el plano de la

imagen de una manera predicha por la proyección geométrica utilizada para definir esta transformación (Figura 2). Revisar la nomenclatura de las figuras.

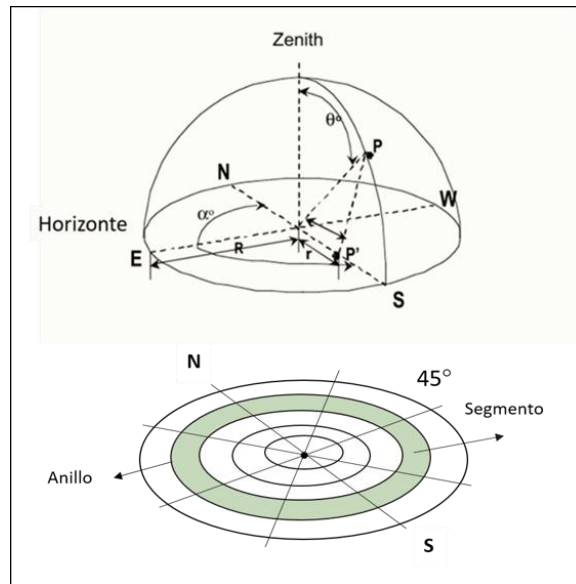


Figura 2. La fotografía hemisférica se puede dividir en círculos concéntricos, cada círculo corresponderá a un grado proporcional de arco (θ) proyectado en el hemisferio del cielo. Puntos dentro del hemisferio del cielo (P) se proyectan (P') en una imagen circular de acuerdo con la geometría de la transformación de proyección. (Modificado de Rich, 1990; Frazer et al., 1997).

Existen diferentes tipos de proyecciones dentro de la FH: polar, ortográfica, proyección de área igual de Lambert y estereográfica (Herbert ,1987). Estas suelen ser las más utilizadas, pero la forma de la lente define el tipo de proyección (Schneider et al., 2009; Díaz et al., 1995) y muchos de ellos no se ajustan exactamente a una proyección polar (distancia angular exactamente proporcional a la distancia radial desde el centro) (Pekin & Macfarlane, 2009). En ocasiones cuando no se genera un ajuste de proyección para el tipo de lente que se está utilizando, puede dar como resultado errores en el cálculo entre las fracciones de claros y el ángulo cenital. Por otra parte, es importante tomar en cuenta el equipo fotográfico que se está utilizando. Mientras que

algunas cámaras compactas toman fotografías circulares (Figura 3), algunas cámaras reflex toman 90° de ángulo cenital solamente en las 4 esquinas de la fotografía, a este tipo de fotograma se le denomina de marco completo o *full-frame* por su nombre en inglés (Díaz *et al.*, 1995)

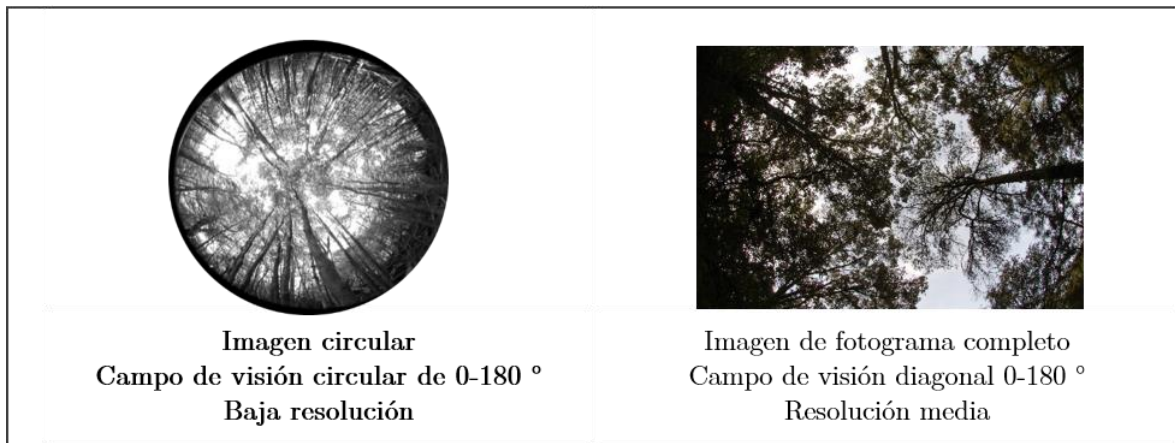


Figura 3. Comparación de una imagen tomada con fisheye y fotografías de formato full-frame.

El método de FHD, así como la mayoría de las estimaciones indirectas de IAF (Frazer *et al.*, 1997), suponen que los elementos del dosel se encuentran distribuidos aleatoriamente. Además, suponen que estos elementos no transmiten la luz y que el tejido foliar es pequeño en relación al campo de visión (Frazer *et al.*, 1997). Tomando en cuentas estos supuestos, la fracción de claros en cualquier ángulo del cenit puede estar matemáticamente relacionada con el IAF (Lang y Yueqin 1986, Norman y Campbell 1989, Neumann *et al.*, 1989, Chason *et al.*, 1991, Chen *et al.*, 1991, Welles y Norman. 1991; Smith 1992; ter Steege 1993; Fassnacht *et al.*, 1994; Frazer *et al.*, 1997).

Para utilizar de manera adecuada este método, es necesario tener en cuenta algunos puntos clave durante la toma de las fotografías. Es recomendable montar la cámara sobre un trípode, nivelarla y orientarla hacia el norte magnético empleando una brújula

(Glatthorn y Beckscha, 2014). Además, es esencial que el registro del cielo sea muy claro y el de la vegetación muy oscuro (Díaz *et al.*, 1995), que el cielo brille homogéneamente, lo cual sucede en días completamente nublados y, en menor medida, en el crepúsculo (Jacobson, 2010; Leblanc *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005). Satisfacer estas condiciones de iluminación es difícil en algunos sitios, pero además existen otros parámetros a tomar en cuenta para obtener buenas imágenes. La configuración de exposición de la cámara influye en la estimación de transmisión de luz (Chen *et al.*, 1991, Englund *et al.*, 2000, Macfarlane *et al.*, 2000 Wagner, 1998).

Cuadro 2. Métodos utilizados por algunos programas para estimar IAF (Fuente: <http://www.schleppi.ch/hemisfer/>).

Método	Descripción
Miller (1967)	Se basa en que el efecto del ángulo de la hoja desaparece cuando se integra en todos los ángulos de visión del hemisferio. Este método es simple, pero está sesgado si no es posible analizar la imagen hasta el horizonte, por ejemplo, si hay montañas alrededor.
Li-Cor LAI-2000	Método estándar utilizado por el Li-Cor LAI-2000 se basa en las ecuaciones de Miller. La diferencia es que los puntos de contacto del anillo más lejano se extrapolan hasta el horizonte. Si el análisis se realiza en todos los ángulos cenitales (θ de 0 a 90 °), ambos métodos son idénticos.
Lang (1987)	Los valores de K casi no se ven afectados por el ángulo de la hoja. Por lo tanto, Lang propuso estimar el valor de K en 1 rad por una regresión lineal, es decir, la misma regresión que utilizó el método LAI-2000 para calcular el ángulo de la hoja. El IAF de Lang es fácil de calcular y bastante confiable
Gonsamo <i>et al.</i> (2018)	Gonsamo <i>et al.</i> utilizó la misma idea que Lang (1987), pero con una regresión robusta basada en desviaciones menos absolutas en lugar de una regresión de mínimos cuadrados. Descubrieron que este método proporciona una de las estimaciones más confiables de IAF, incluso cuando las imágenes hemisféricas no son perfectas
Norman & Campbell (1989)	Propusieron estimar conjuntamente el IAF y el ángulo de la hoja porque ambos parámetros son desconocidos e interdependientes. Este método se basa en el modelo elipsoidal de distribución del ángulo de la hoja. Esto se calcula con un método de mínimos cuadrados, es un método no ponderado, cada anillo recibe el mismo peso en los cálculos.

Weighted Ellipsoidal Method (WEM) (Thimonier et al, 2010)	Mismo enfoque que el algoritmo de Norman & Campbell con las siguientes excepciones: (1) minimiza los errores en los valores K en lugar de en la transmisión de luz y (2) los anillos se ponderan según su área, más precisamente para el área que tendrían en una proyección azimutal equidistante (es decir, con una geometría de lente lineal).
------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Se han realizado varios trabajos para tratar de determinar la exposición adecuada en los diferentes ambientes donde se utiliza la FH, por ejemplo, Beckschafer et al., (2013), Zhang et al., (2005) y Glatthorn Beckschafer (2014) demuestran cómo esta es una de las principales fuentes de error en la técnica de FH (Wagner, 1998, 2001).

Es importante mencionar que mediante la fotografía hemisférica se obtiene un registro detallado de la distribución espacial, tamaño y forma de los claros del dosel en función del ángulo cenital (Díaz et al., 1995). Anteriormente se mencionaron los supuestos que se utilizan en la fotografía hemisférica, en ocasiones como en el caso de las coníferas esto no se cumple. Debido a las diferencias en los arreglos de las hojas y estructura leñosa que presentan las especies se pueden obtener resultados diferentes dependiendo del software que se utilice.

Cuadro 3. Métodos de corrección para fotografías hemisféricas. Algunos métodos presentan ventajas y desventajas que pueden corregirse con la combinación de otro método compatible. (Fuente: <http://www.schleppi.ch/hemisfer/>).

Método de corrección	Descripción
Non-linearity correction (Schleppi et al., 2007)	Corrige el cálculo del factor K dentro de los anillos grandes. Si se establece una pendiente en el suelo, se puede combinar con el <i>Canopy clumping</i>
Canopy clumping (Chen & Cihlar, 1995)	Se puede combinar con el anterior para separar huecos del cielo entre grandes y pequeños. Estima el índice de aglomeración y valor corregido de IAFe.
Slope correction (Walter & Torquebiau, 2000)	Divide las imágenes en anillos cenitales y en sectores azimutales. Un promedio entre los sectores se toma como el LAI de la imagen. No se puede

	combinar con las otras correcciones.
Clumping correction (Lang & Xiang, 1986)	También divide las imágenes tanto en anillos cenitales y sectores azimutales. Asume que el IAF del dosel agrupado se estima mejor si se puede considerar que el follaje se distribuye al azar dentro de los grupos. No se puede combinar con las otras correcciones

Para ello existen métodos de corrección durante el proceso de estimación. Además, cuando se utiliza software, se debe definir la resolución de ángulo cenital y azimutal (Figura 1), lo que determina el número de segmentos de cielo (Díaz *et al.*, 1995), en teoría, cuanto mayor sea el número de segmentos mayor será la precisión de las estimaciones. Es importante elegir el método adecuado para estimar el IAF de acuerdo a las características de las imágenes hemisféricas adquiridas. Además, tomar en cuenta algunos factores de corrección (Cuadro 3) para evitar errores en el cálculo de IAF.

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El sitio de estudio es la Estación de Investigación Ecohidrológica Alto Fresno (EIEAF) ($19^{\circ} 33' 00''$ N, $101^{\circ} 14' 24''$ W) a una altitud de 2,160 msnm, en el sur de la cuenca del Lago de Cuitzeo y aproximadamente a 18 km al SSO de la ciudad de Morelia, Michoacán (Figura 4). La cuenca se localiza en la región número 12 conocida como el sistema Lerma-Chapala-Santiago, un componente de la Región Hidrológica es la cuenca del Lago de Cuitzeo (Medina y Cabrera, 2011).

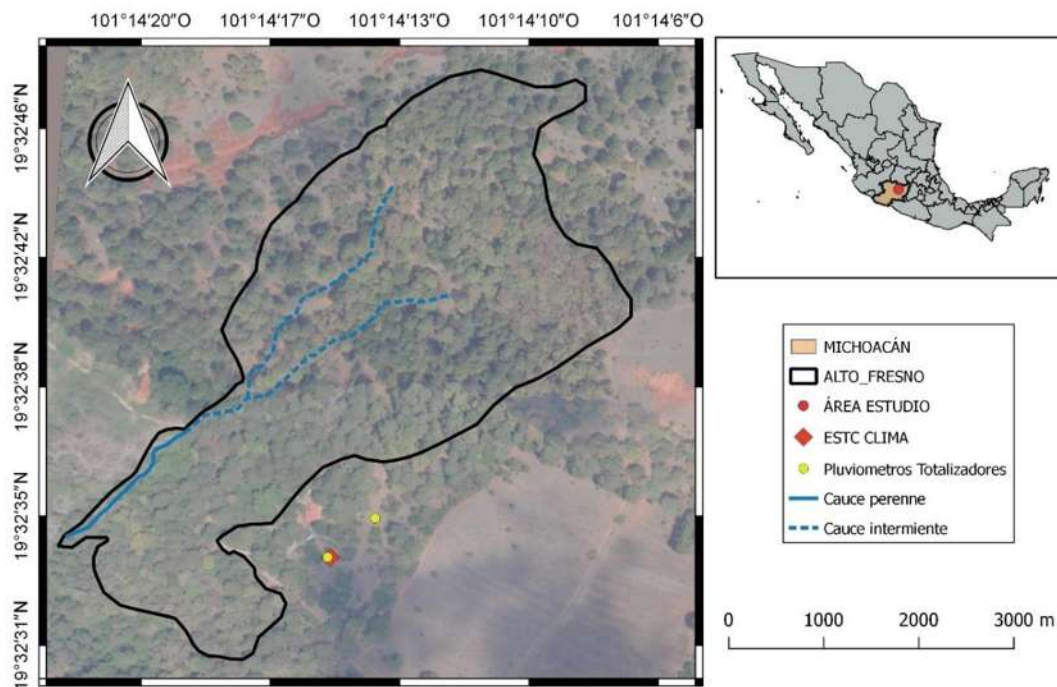


Figura 4. Ubicación del área de estudio.

3.2 Vegetación

La comunidad vegetal es un bosque secundario de pino-encino de aproximadamente 45 años, con dominancia de género *Pinus*. Las principales especies del estrato arbóreo son: *Pinus devoniana*

Lindl., *P. douglasiana* Martínez, *P. leoiphylla* Schiede, además de encinos *Quercus castanea* Neé, *Q. obtusata* Bonpl.

3.3 Clima

El clima es templado subhúmedo con la mayor concentración de precipitación (> 95%) en verano (junio - octubre) (García, 2004; Gómez-Tagle, 2008). Temperaturas promedio anuales de 16,9° y precipitaciones anuales de 1115 mm, para el periodo 1951- 2010 (SMN, 2011a, 2011b; Gómez-Tagle, 2008).

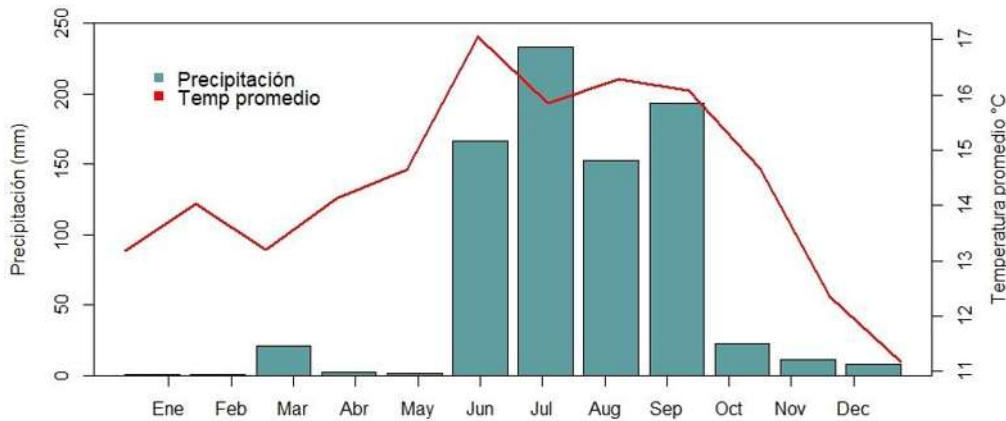


Figura 5. Climograma de la EIEAF, datos obtenidos de la estación climática del sitio para el año 2017.

3.4 Geología y suelos

La geología es ígnea extrusiva básica (INEGI, 1978; Gómez-Tagle, 2008) con presencia de ignimbrita, de la Cantera de Morelia (Bigioggero et al., 2004; Gómez- Tagle, 2008). La geoforma corresponde a un lomerío suavizado por ceniza volcánica. Los suelos en el área son de origen volcánico y poligenéticos. El suelo dominante corresponde a un cambisol háplico seguido de regosol háplico (Onchi-Ramuco, 2018).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización de la zona de estudio

Se realizó una caracterización del sitio de estudio, para identificar las diferentes coberturas que se presentan dentro del bosque mixto. Las unidades de vegetación se delimitaron utilizando fotografías aéreas escala 1:5,000 obtenidas mediante un vuelo realizado en abril de 2015 por parte del equipo de trabajo en la zona de estudio, fueron ortorrectificadas empleando el SIG GRASS (Ramírez-Mejía *et al.*, 2018). La metodología consistió en identificar las diferentes coberturas vegetales a partir de especies dominantes, densidad arbórea, tono, textura y contraste en las fotografías. La información interpretada en las fotografías fue corroborada realizando observaciones de campo en puntos de control establecidos para las diferentes coberturas. Utilizando estas unidades vegetales diferenciadas a partir de las imágenes se generaron datos de la composición y estructura para cada unidad de muestreo (UM). Para realizar una nueva clasificación con base en los tipos de vegetación que contempla la leyenda de la cartografía de cobertura y uso del suelo del INEGI 2016.

4.2 Diseño experimental

Como parte de la iniciativa de investigación Ecohidrológica a largo plazo en la EIEAF se colocaron 33 tubos de acceso para medición de humedad edáfica entre 2012 y 2013, de manera estratégica para abarcar la cuenca 1 del área de estudio (11.9 has). Cabe mencionar que los sitios de medición de humedad fueron elegidos con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE) escala 1:50,000 y posteriormente fueron rectificadas con el MDE LIDAR INEGI de tipo terreno a una escala 1: 10,000 con resolución de 5 m por pixel. Esto ocasionó diferencias de superficie y cambios entre la delimitación realizada en escala 1:50,000 y la delimitación 1: 10,000 por lo tanto la distribución final de los tubos de acceso no es uniforme (Rosas-Rangel, 2015) (Figura 6).

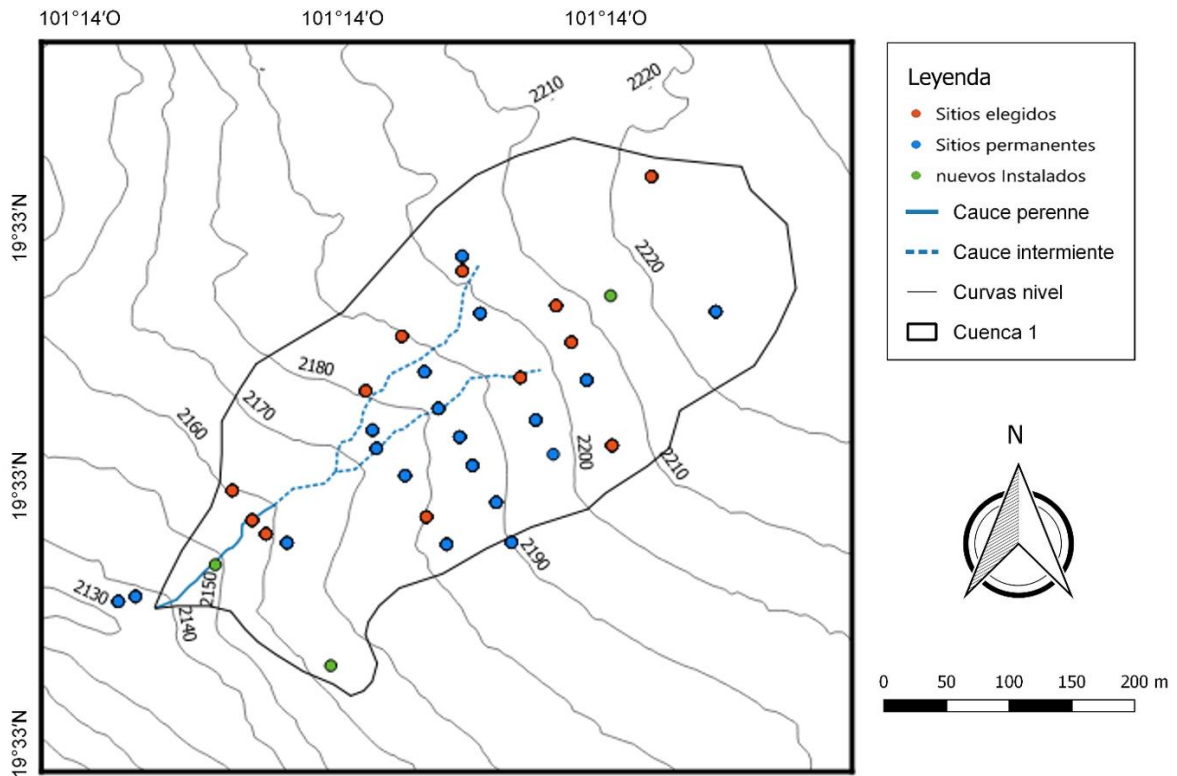


Figura 6. Distribución de sitios de muestreo dentro del área de estudio EEIAF.

De los 33 tubos instalados, se descartaron algunos que, por diversas causas, no eran funcionales al momento del estudio. Además, se instalaron tubos en áreas donde no estaban instalados y que se consideraron relevantes para realizar el muestreo (Figura 5). El criterio principal para la elección de los tubos fue, que estuvieran distribuidos dentro de las diferentes coberturas vegetales dentro de la cuenca. Cada uno de estos tubos de acceso para medición de humedad edáfica se tomó como centro para determinar parcelas circulares con un radio de 10 metro (314.15 m^2). Cada parcela representa una unidad muestral, para cada unidad se evaluó, IAF, humedad edáfica, composición y estructura florística.

4.3 Composición y estructura de vegetación

Para evaluar la composición y estructura del área de estudio se utilizaron las 15 unidades de muestreo con un área de 314.15 m². En cada una de estas se midió el diámetro altura del pecho (DAP, 1.30 m), cobertura del dosel y altura para los individuos arbóreos. Para los individuos del estrato arbustivo se midieron la altura, diámetro basal y cobertura. Además, se realizó la identificación taxonómica a nivel de género para ambos estratos, a partir del registro botánico existente para la Estación Ecohidrológica Alto Fresno. De acuerdo con su forma de crecimiento (Moreno, 1984), se consideró como árboles a todos aquellos individuos perennes, con un tallo lignificado (el cual se ramifica por arriba de la base) y que, generalmente, miden más de 3 m de altura; mientras que los arbustos son aquellos organismos vegetales perennes, con tallo lignificado (el cual se ramifica desde la base), usualmente menores de 3 m de altura (Fortanelli-Martínez et al., 2014). Con los datos obtenidos se determinó el índice de valor de Importancia de las especies, el cual Jerarquiza la dominancia de cada especie en rodales mezclados (Curtis y McIntosh, 1951), utilizando la cobertura de copa y el área basal.

4.4 Fotografías Hemisféricas

La estimación de *IAF* se realizó con la toma de fotografías hemisféricas en cada una de las unidades de muestreo en intervalos mensuales (mayo 2016 - noviembre 2017). En cada UM se tomaron 5 fotografías con base en los puntos cardinales incluyendo el centro y a una distancia de 10 m para permitir la correspondencia entre las imágenes hemisféricas y la información de estructura recabada en el sitio circular de 314.15 m² de superficie. Para ello se utilizó una cámara Nikon D50s con un objetivo Nikkor de 16 mm (*full-frame*) con apertura angular diagonal mayor de 180° y exposición automática. Las imágenes se tomaron empleando un trípode, con la cámara nivelada y orientada siempre hacia el norte. Se realizó por la mañana a partir de las 7:00 am para

evitar el brillo solar directo. Cabe mencionar que las condiciones de cielo que requiere la toma de fotografía hemisférica son más difíciles de satisfacer en algunos lugares que en otros (Díaz et al., 2014). En este trabajo no se logró obtener imágenes perfectas debido a que en algunas fechas la presencia de nubes o cielo homogéneo es un fenómeno que no se presenta. Por lo tanto, algunas imágenes presentan efectos de *blooming* y viñeteo causadas por la presencia de luz solar directa. Con el objetivo de reducir los errores en la extracción de datos de GF y los parámetros estructurales, se emplearon algoritmos de clasificación y cálculo de parámetros adecuados para estas imágenes. Estos métodos se describen más adelante.

4.5 Calibración de lente hemisférico

El centro óptico fue medido realizando un pequeño orificio en la tapa del objetivo y luego girando un círculo completo, mientras la cámara registraba una exposición automática. Usando Adobe PhotoShop 7.0, se ajustó un círculo a la imagen y se calculó la ubicación de su centro de acuerdo al método propuesto por Pekin y Macfarlane (2009). De esta manera se encontró el centro óptico de la cámara Nikon D50 ($X = 1503$, $Y = 998$) para imágenes con una resolución de 3008 X 2000 pixeles.

La calibración del lente *AF Fisheye Nikkor 10.5 mm* se realizó ajustando una regresión polinomial de tercer orden propuesta por Pekin y Macfarlane (2009), que consiste en fijar la relación entre distancia angular (θ) en grados desde el centro de la lente para una cámara Nikon D80. La ecuación original expresada en grados es $d = 29.9 \theta + 0.00836 \theta^2 - 0.000500 \theta^3$. Utilizando esta ecuación se realizó un método de normalización a partir del radio de las fotografías ($r=1501$ pxs) obtenidas de imágenes de nuestra cámara Nikon D50. La ecuación final que describe la proyección de la lente Nikkor + Nikon D50 para realizar el análisis de imágenes es $d = 0.715 \theta + 0.0116 \theta^2 - 0.03928 \theta^3$.

4.6 Procesamiento de fotografías hemisféricas

Se clasificaron automáticamente 1309 imágenes full-frame. Debido a que las condiciones en las cuales se tomaron las fotografías no son las condiciones ideales que se reportan en la literatura, se realizó la revisión de métodos que contribuyan a reducir posibles errores en la clasificación. En el cuadro 4 se enlistan los tres métodos utilizados.

Cuadro 4. Descripción de los diferentes métodos de clasificación utilizados para las fotografías hemisféricas

Método	No. imágenes	Descripción
OBIA	87	Subdisciplina del análisis de imágenes relacionado con el reconocimiento automático de objetos (Díaz y Lencinas, 2015; Nayegandhi y Brock, 2009)
EnhacedHP	1114	Combina el método Ridler y Calvard (1978) con una clasificación difusa basada en píxeles y atributos de color de tono, claridad y croma, trabajando de manera más eficiente donde las diferencias entre el cielo y los píxeles de vegetación son menos evidentes (Bianchi <i>et al.</i> , 2017)
Ridler y Calvard (1978)	10	Se elige automáticamente un umbral óptimo como resultado de un proceso iterativo (Ridler y Calvard, 1978), es algo más robusto si las imágenes se tomaron bajo un cielo desfavorable con nubosidad irregular.

El número total de imágenes se procesó con EnhanceHP (enhanceHemiphoto). Posteriormente se identificaron las imágenes que presentaban errores en la binarización utilizando este método. Estas imágenes con presencia de errores fueron reprocesadas con el método de OBIA (object-based image analysis) o bien se utilizó el de Ridler y Calvard (1978). Los errores más comunes que se presentaron en la clasificación de imágenes, fue la presencia de figuras geométricas, que no pertenecen a la estructura del dosel. Ejemplo de esto se muestra en la figura 7. Por lo tanto, fue necesario optar por otro método de clasificación para evitar el mayor error en el procesamiento de imágenes.

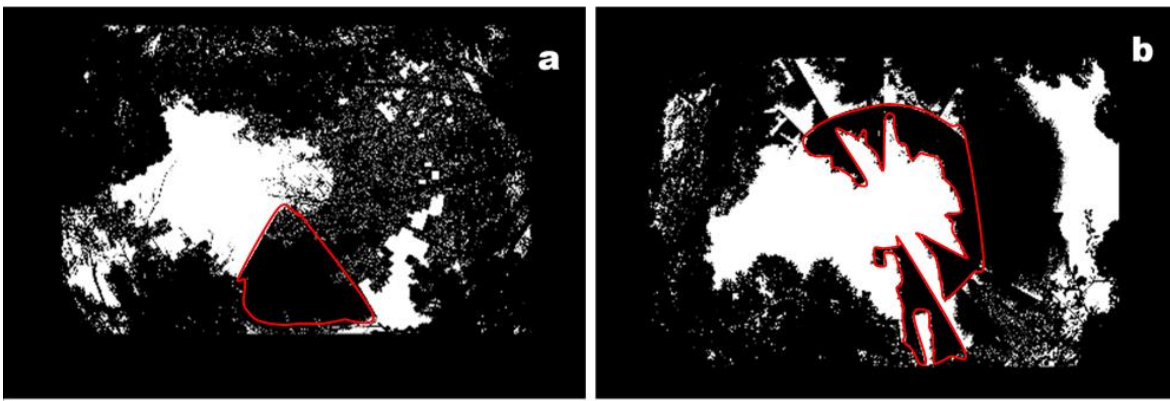


Figura 7. Errores comunes (rojo) en la clasificación de fotografías hemisféricas tomadas bajo condiciones no ideales de luminosidad. a) Clasificación con algoritmo OBIA, b) Clasificación con EnhanceHP.

Utilizando la ecuación de calibración normalizada y las imágenes clasificadas con los distintos métodos, se calcularon los valores de IAF utilizando el software Hemisfer (<http://www.schleppi.ch/hemisfer/>) para las 1309 fotografías. El método aplicado para el cálculo de IAF fue el propuesto por Gonsamo (2018) con una corrección (*cumpling correction*) de Lang y Xiang (1986),

4.7 Registro de cambios en la fenología, medición de biomasa y área foliar

La fenología de las hojas en las diferentes especies se registró de manera visual, tomando notas para algunas de las fechas en las cuales se observaron cambios relevantes. Para cuantificar la biomasa y el área foliar de manera directa se instalaron aleatoriamente 3 colectores de hojarasca en cada UM. Cada colector se ubicó en alguno de los puntos donde se tomaron las fotografías (N, S, E, W, C). Los colectores se construyeron con tubo de PVC y malla plástica con un área de 1 × 1 m. La colecta de hojarasca se realizó de manera mensual (diciembre 2016 - noviembre 2017) para los 45 colectores, se obtuvieron 504 muestras durante todo el periodo de colecta. Las muestras se secaron en una estufa de secado a 45°C hasta alcanzar peso constante y se cuantificó la biomasa seca de los diferentes componentes pesándolos en una balanza electrónica de precisión *Rhino* BAPRE-3 (resolución 0.2 g). Posteriormente se tomaron alícuotas y realizaron mediciones pareadas de peso y superficie de área foliar empleando un método de escaneo para hojas anchas utilizado por García et al. (2001).

4.8 Medición de Humedad edáfica

La humedad edáfica se midió mensualmente (octubre 2016 -noviembre 2017) en cada uno de los 15 tubos de acceso utilizando una sonda de funcionamiento Frequency Domain Range (Modelo PR-2, Delta-T, Inc.) para medir la humedad porcentual a diferentes profundidades (10, 20, 30, 40, 60 y 100 cm) y también una sonda MLX (Delta-T, Inc.) para medir la humedad superficial (0-5 cm). Esto, para analizar la variación temporal del contenido de agua del suelo en superficie y profundidad.

Realizando una barrenación a un metro de profundidad junto a cada tubo de acceso, durante dos temporadas (secas y lluvia). Se colecto una muestra de suelo para cada profundidad (10, 20, 30, 40, 60 y 100 cm) para ambas temporadas, esto con el fin de

determinar la humedad gravimétrica, color y textura para realizar la calibración de acuerdo con la metodología indicada por el fabricante de la sonda PR2 (Delta-T, Inc) (Figura 2). Los valores de humedad calibrados se calcularon para cada tubo, en las diferentes profundidades y en cada una de las fechas (ANEXO 1).

Utilizando los datos de textura, color, densidad y materia orgánica de cada profundidad para todos los tubos, se realizó estimó el punto de marchitez permanente (PMP), la capacidad de campo (CC) y el contenido de agua en saturación (SAT), y se obtuvo en la humedad aprovechable (AW). Estos cálculos fueron realizados utilizando el software Soil Water Characteristics v.6.02.74 (USDA, 2018). Además, se generaron promedios ponderados para obtener el total de agua en los diferentes perfiles y obtener una representación de humedad edáfica para cada una de las condiciones de cobertura vegetal. Finalmente, se realizó una división del perfil de suelo (1m), para determinar 3 capas de profundidad (0-30 cm, 30-60 cm y 60-100), de acuerdo con las distintas capas descritas por Onchi-Ramuco (2018) y con diferenciación de procesos pedogenéticos. Esto con el fin de determinar si existe una diferenciación en la cantidad de humedad edáfica con respecto a la profundidad y si tiene alguna influencia dentro del proceso suelo-planta.

4.9 Información micrometeorológica

Con el fin de contar con información de referencia de las variables hidrometeorológicas que influyen tanto en el contenido de humedad como en el área foliar de la vegetación, en el sitio se instaló una estación meteorológica automática Davis, Vantage PRO II con pluviómetro de balancín calibrado siguiendo el método de Calder y Kidd (1978) y resolución de 0,2 mm (Gómez-Tagle *et al.*, 2015). Se programó para llevar a cabo el registro de datos cada 10 minutos. Dentro de los datos que registra la estación se encuentran: temperatura, evapotranspiración, humedad relativa,

presión barométrica, velocidad y dirección del viento, lamina de precipitación y radiación solar. Además, se instalaron dos pluviómetros manuales con diámetro de 34 cm (907,9 cm²) y 0,05 mm de resolución. La estación y los pluviómetros se ubicaron en un área despejada a una distancia aproximada entre 60 y 250 m de la zona instrumentada y entre 30 y 60 m uno de otro (figura 3, 4) siguiendo los criterios de Carlyle-Moses (2004) a una altura de 1,5 m sobre el nivel del suelo (Gómez-Tagle et al., 2015).

4.10 Procesamiento estadístico

1. *Composición y estructura de vegetación.* Se realizaron comparaciones estadísticas empleando análisis de varianza (ANOVA) no paramétricos de Kruskal-Wallis con un ajuste de Bonferroni, para las variables descriptoras de la composición vegetal. Determinando si existe diferencia entre la composición de la vegetación para las diferentes coberturas. Todos los análisis estadísticos en este trabajo se realizaron utilizando el software R v. 3.5.0 (R Core Team, 2018).

Índice de área foliar, Biomasa y área foliar. Empleando un análisis Friedman, que consiste en un ANOVA no paramétrico de medidas repetidas, se comparó la diferencia entre los valores de IAF, biomasa y área foliar para las diferentes fechas. Además, se realizó un test de Kruskal-Wallis para determinar la diferencia entre estas variables, pero comparando entre las distintas coberturas para cada una de las fechas.

Finalmente, se estableció una matriz de correlaciones entre las variables obtenidas de las mediciones que consideraron explicativas para la variación del IAF: humedad total, porcentaje de agua en los diferentes horizontes y variables micrometeorológicas.

Capítulo 2
Caracterización del sitio de estudio

5.1 Caracterización de coberturas vegetales para el área de estudio

Se detectaron cuatro unidades de vegetación, cada una presentan características vegetales específicas y se determinaron como: Bosque Encino Pino (EP), Bosque de Pino (BP), Bosque Encino (BE) y Bosque de Galería (BG) esto con base en la densidad arbórea, tono, textura y contraste en las fotografías (Figura 8), además de las características de composición y estructura vegetal.

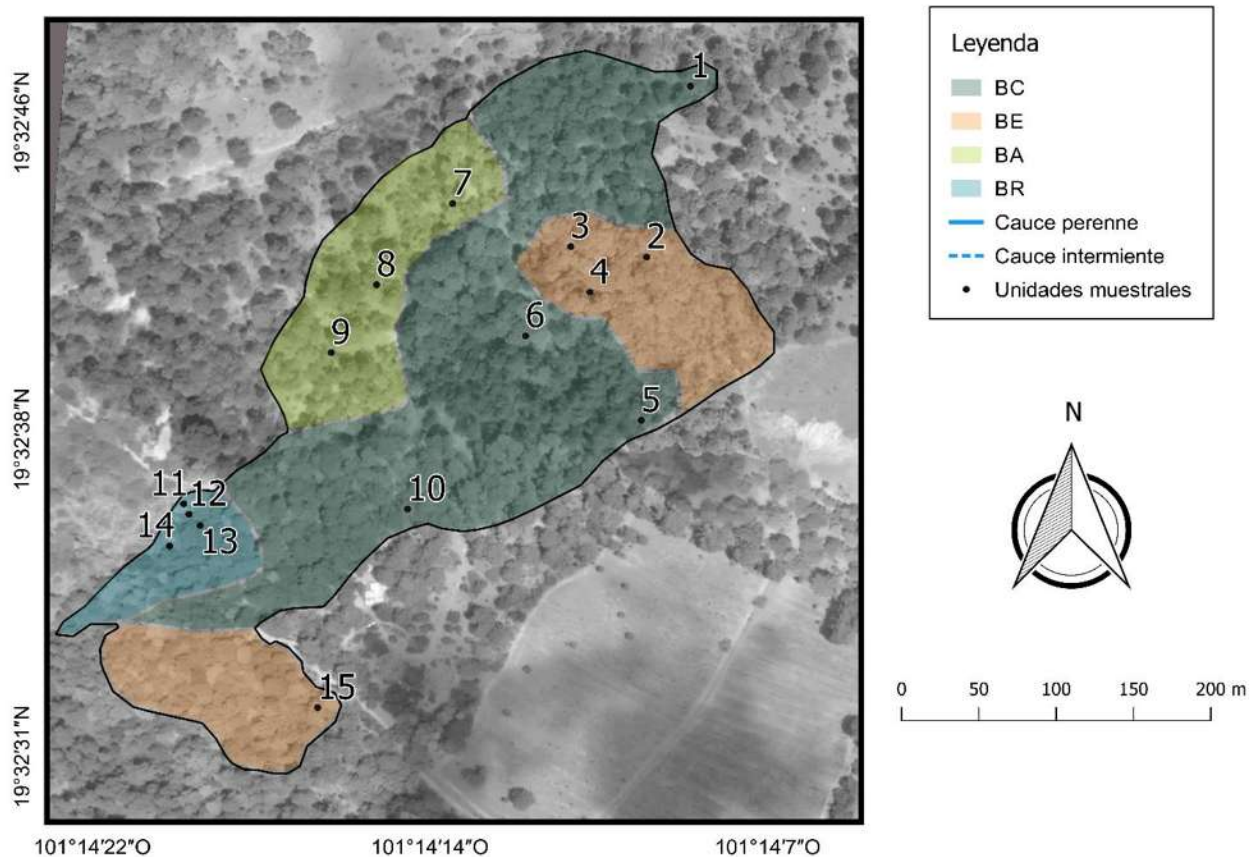


Figura 8. Coberturas vegetales para la EEIAF, obtenidas a partir de fotografías aéreas.

5.2 Estratificación vertical de la vegetación

Para la caracterización de cada cobertura se obtuvieron las mediciones dasométricas de altura, DAP, cobertura y área basal incluyendo árboles y arbustos. En general, la altura de ambos componentes alcanzó un promedio de 9.28 ± 5.6 m, con máximas de 30.3 m y 4 m para los arboles más pequeños. Para el estrato arbustivo las alturas se encontraron entre 1.20 y 3.9 m, con un promedio de 2.54 ± 0.73 m. Mientras que la cobertura de copa promedio fue de 21.8 ± 40.66 m² y el área basal 3.6 ± 10.1 m². Además, se describe el promedio de estas variables para cada condición (Tabla 1). Para el componente arbóreo de las cuatro condiciones vegetación la altura promedio mayor es para el sitio de BE. Mientras que el valor promedio máximo de DAP es para los sitios de EP, así como la cobertura y área basal para BP y EP respectivamente. Para el componente arbustivo el BP es el que presenta una mayor altura y DAP promedio, mientras que el valor mayor de cobertura es para BG y el área basal para el EP.

Tabla 1. Estadística descriptiva para las variables dasométricas de árboles y arbustos en la "Estación Ecohidrológica Alto Fresno". sd= desviación estándar, dap= diámetro altura del pecho, AB=área basal.

Estrato	CondVeg	n	altura (m)	sd	DAP (cm)	sd	Cobertura (m ²)	sd	AB (m ²)	sd
Arbóreo	EP	27	10.2	5.1	25.9	21.8	38.1	45.8	8.9	14.2
	BP	51	9.1	6.2	18.1	20.1	42.1	65.6	5.67	12.06
	BE	75	10.3	5.8	17.5	18.4	25.9	37.7	5.05	11.23
	BG	32	7.3	4.3	15.7	17.8	27	45.5	4.39	13.11
Arbustivo	EP	33	2.5	0.6	6.5	6.2	5.9	13.2	5.33	11.46
	BP	65	2.8	0.7	6.6	6.4	4.5	3.5	3.58	9.59
	BE	133	2.4	0.8	4.2	4.1	4.6	5.3	3.45	9.43
	BG	75	2.7	0.7	3.9	3.1	7.5	10.9	3.25	11.32

La prueba de Kruskal-Wallis (cita) evidenció la existencia de diferencias estadísticas significativas entre las condiciones de vegetación en cuanto a altura, dap y área basal, pero no así para

la cobertura (Figura 9). Para el caso del componente arbustivo se determinó lo mismo, no existe diferencia estadísticamente significativa entre la cobertura de copa de los diferentes sitios (Figura 10).

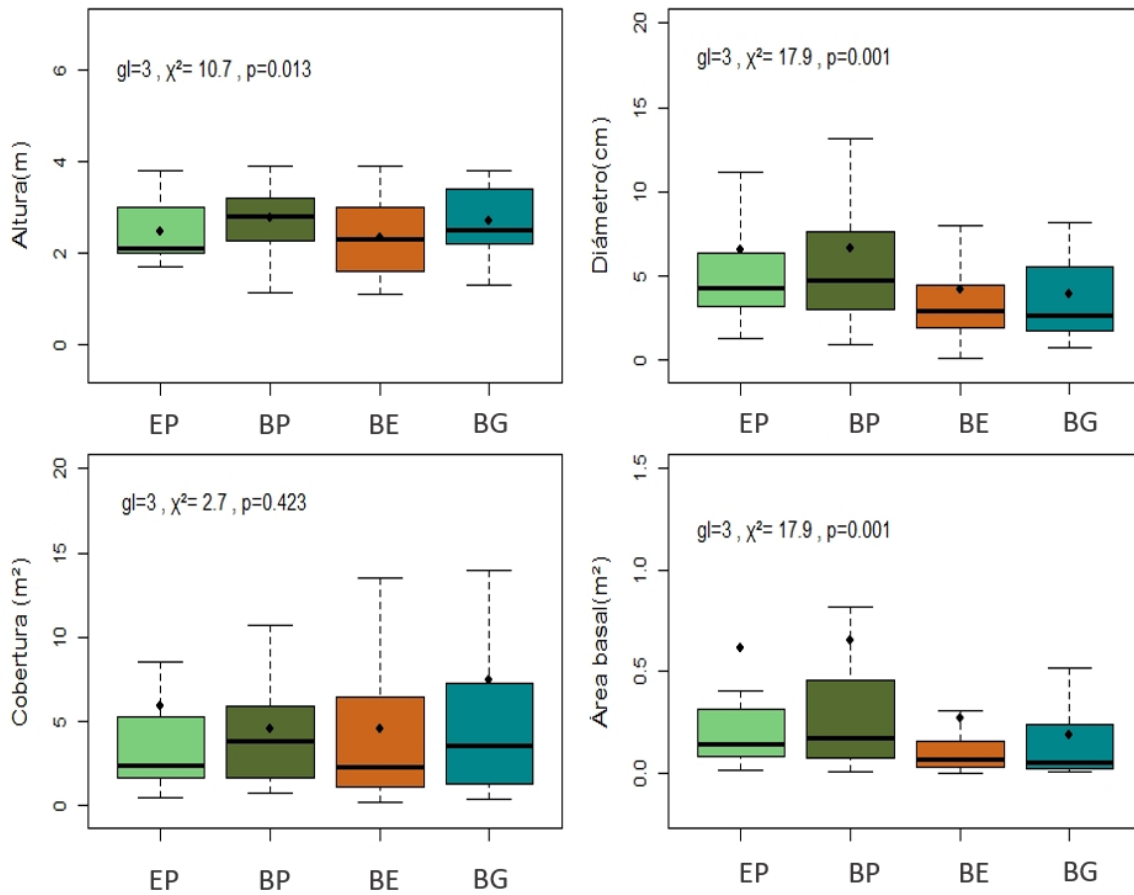


Figura 9. Comparación entre variables dasométricas para arbustos en la Estación Ecohidrológica Alto Fresno.

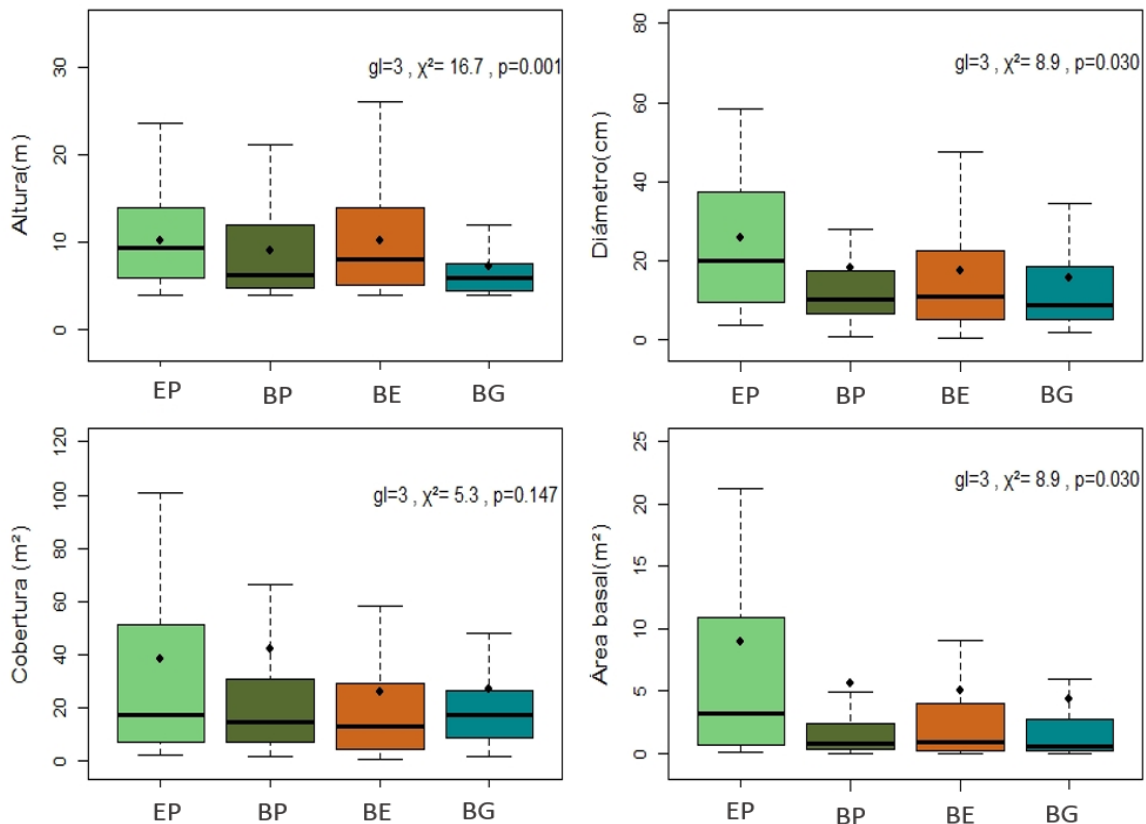


Figura 10. Comparación de variables dasométricas para árboles en la Estación Ecohidrológica Alto Fresno.

Índices estructurales

En general, las especies con valores más altos de IVI presentes en las cuatro condiciones vegetales fueron, *Quercus spp.*, *Pinus spp.* y *Fraxinus spp.* Las condiciones vegetales EP y BE comparten *Quercus spp.* como especies con mayor IVI. Otras especies de importancia estructural fueron *Crataegus spp* y *Baccharis spp.* presentes en todas las CondVeg, formando parte del estrato arbustivo. Existen algunas especies que, aunque no presenten IVI con valores altos, son representativas de diferentes tipos de vegetación, es por esto que se enlistan el total de especies encontradas para las cuatro condiciones vegetales (Tabla 2).

Tabla 2. Índices de Valor de Importancia de los géneros presentes en la Estación de Investigación Ecohidrológica Alto Fresno.

		Ab	Ab%	Fr	Fr%	DC	DC%	DA	Da%	400%	100%
BA	<i>Quercus</i> <i>spp.</i>	14	24.6	2	15.4	742.9	52.9	154	49.8	143	35.7
	<i>Crataegus</i> <i>spp.</i>	27	47.4	3	23.1	276.7	19.7	28.2	9.1	99.3	24.8
	<i>Pinus</i> <i>spp.</i>	7	12.3	3	23.1	339.8	24.2	120.6	39	98.6	24.6
	<i>Baccharis</i> <i>spp.</i>	5	8.8	2	15.4	15	1.1	3.8	1.2	26.4	6.6
	<i>Arbutus</i> <i>spp.</i>	3	5.3	2	15.4	21.8	1.6	2.3	0.8	23	5.7
	<i>Fraxinus</i> <i>spp.</i>	1	1.8	1	7.7	7.4	0.5	0.4	0.1	10.1	2.5
	Total	57	100	13	100	1403.7	100	309.2	100	400	100
BC	<i>Pinus</i> <i>spp.</i>	25	23.4	4	20	1441.9	60.5	284.8	71.9	176	43.9
	<i>Crataegus</i> <i>spp.</i>	40	37.4	4	20	437.6	18.4	50	12.6	88.4	22.1
	<i>Baccharis</i> <i>spp.</i>	20	18.7	3	15	103.3	4.3	22.7	5.7	43.8	10.9
	<i>Fraxinus</i> <i>spp.</i>	4	3.7	3	15	48.4	2	1.3	0.3	21.1	5.3
	<i>Cornus</i> <i>spp.</i>	8	7.5	1	5	76.4	3.2	4.3	1.1	16.8	4.2
	<i>Quercus</i> <i>spp.</i>	2	1.9	1	5	101.8	4.3	15.3	3.9	15	3.8
	<i>Arbutus</i> <i>spp.</i>	2	1.9	1	5	105.9	4.4	14	3.5	14.9	3.7
	<i>Stirax</i> <i>spp.</i>	2	1.9	2	10	6.9	0.3	0.3	0.1	12.2	3.1
	<i>Acacia</i> <i>spp.</i>	4	3.7	1	5	60.3	2.5	3.3	0.8	12.1	3
	Total	107	100	20	100	2382.5	100	396	100	400	100
EN	<i>Quercus</i> <i>spp.</i>	69	36.5	4	18.2	2329.7	67.7	469.9	68.2	191	47.7
	<i>Crataegus</i> <i>spp.</i>	68	36	4	18.2	478.9	13.9	110	16	84.1	21
	<i>Pinus</i> <i>spp.</i>	10	5.3	3	13.6	280.7	8.2	79.9	11.6	38.7	9.7
	<i>Stirax</i> <i>spp.</i>	14	7.4	3	13.6	138.1	4	12.4	1.8	26.9	6.7
	<i>Capulín</i> <i>spp.</i>	7	3.7	3	13.6	59.7	1.7	2.6	0.4	19.5	4.9
	<i>Baccharis</i> <i>spp.</i>	14	7.4	2	9.1	56.9	1.7	5.3	0.8	18.9	4.7
	<i>Cornus</i> <i>spp.</i>	3	1.6	1	4.5	90	2.6	6.7	1	9.7	2.4
	<i>Arbutus</i> <i>spp.</i>	2	1.1	1	4.5	6.1	0.2	1.6	0.2	6	1.5
	<i>Fraxinus</i> <i>spp.</i>	2	1.1	1	4.5	1.6	0	0.1	0	5.7	1.4
	Total	189	100	22	100	3441.6	100	688.5	100	400	100
RI	<i>Fraxinus</i> <i>spp.</i>	16	15.7	4	22.2	722.1	32.3	157.5	47	117	29.3
	<i>Cornus</i> <i>spp.</i>	37	36.3	4	22.2	534.2	23.9	49.8	14.9	97.3	24.3
	<i>Crataegus</i> <i>spp.</i>	29	28.4	3	16.7	471.6	21.1	71.7	21.4	87.6	21.9
	<i>Pinus</i> <i>spp.</i>	7	6.9	3	16.7	374.7	16.8	47.6	14.2	54.5	13.6
	<i>Baccharis</i> <i>spp.</i>	11	10.8	3	16.7	95.3	4.3	3.2	1	32.7	8.2

<i>Manzana spp.</i>	2	2	1	5.6	35.1	1.6	5	1.5	10.6	2.6
Total	102	100	18	100	2232.9	100	334.8	100	400	100

Ab= Abundancia, Ab%=Abundancia relativa, Fr=Frecuencia absoluta, Fr%=Frecuencia relativa, DC=Dominancia Cobertura, DC%=Dominancia Cobertura relativa, DA=Dominancia Área Basal, DA%=Dominancia Área Basal

La información ecológica, florística y fisonómica son las principales características utilizadas para agrupar diferentes coberturas vegetales de acuerdo al sistema de clasificación de vegetación del INEGI 2016. Este sistema está basado en los trabajos de Faustino Miranda y E. Hernández (1963) y Jerzy Rzedowski (1978, 2005). Con base en lo anterior se clasificaron las coberturas vegetales (Tabla 3). Los sitios de EP están conformados por especies de *Quercus spp.* (IVI 37.7%), y en proporción menor de *Pinus spp.* (IVI 24.6%)., pueden ser sitios desde abiertos a muy densos (INEGI, 2014). El tamaño de los arboles varia dentro del rango reportado (4-30 m) para los bosques con esta composición, de acuerdo con estas características esta cobertura pertenece a un bosque de Encino-Pino. Mientras los sitios de BP pertenecen a un bosque de Pino, donde las especies dominantes pertenecen al género *Pinus spp.* (IVI 43.9%), presentando también alturas promedio similares a las reportadas para estos bosques (10-30 m). Para la zona de BE la dominancia de las especies de *Quercus spp* (IVI 47.7%), son muy evidentes, estos sitios pertenecen a un bosque de Encino; el tamaño varía desde los 4 hasta los 30 m de altura desde abiertos a muy densos. En general, este tipo de comunidad se encuentra muy relacionada con los de pino, formando una serie de mosaicos complejos. Se encuentra muy relacionado con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos con especies de ambos géneros (INEGI, 2014).

Por último, los sitios de BG pertenecen a Bosques de galería, son comunidades arbóreas caracterizadas por forma franjas angostas de

vegetación en los márgenes de los ríos o arroyos. El estrato arbóreo dominante de estos bosques presenta alturas variables, desde los 4 hasta más de 30 metros, con especies perennifolias, subcaducifolias o hasta caducifolias, algunas especies características son *Fraxinnus sp.* (IVI 29.3%) (Figura 11). Dentro del área de estudio el Bosque de Pino representa la mayor proporción con 5 has, mientras el Bosque de Galería tiene solamente 0.54 has de área total (Tabla 3).

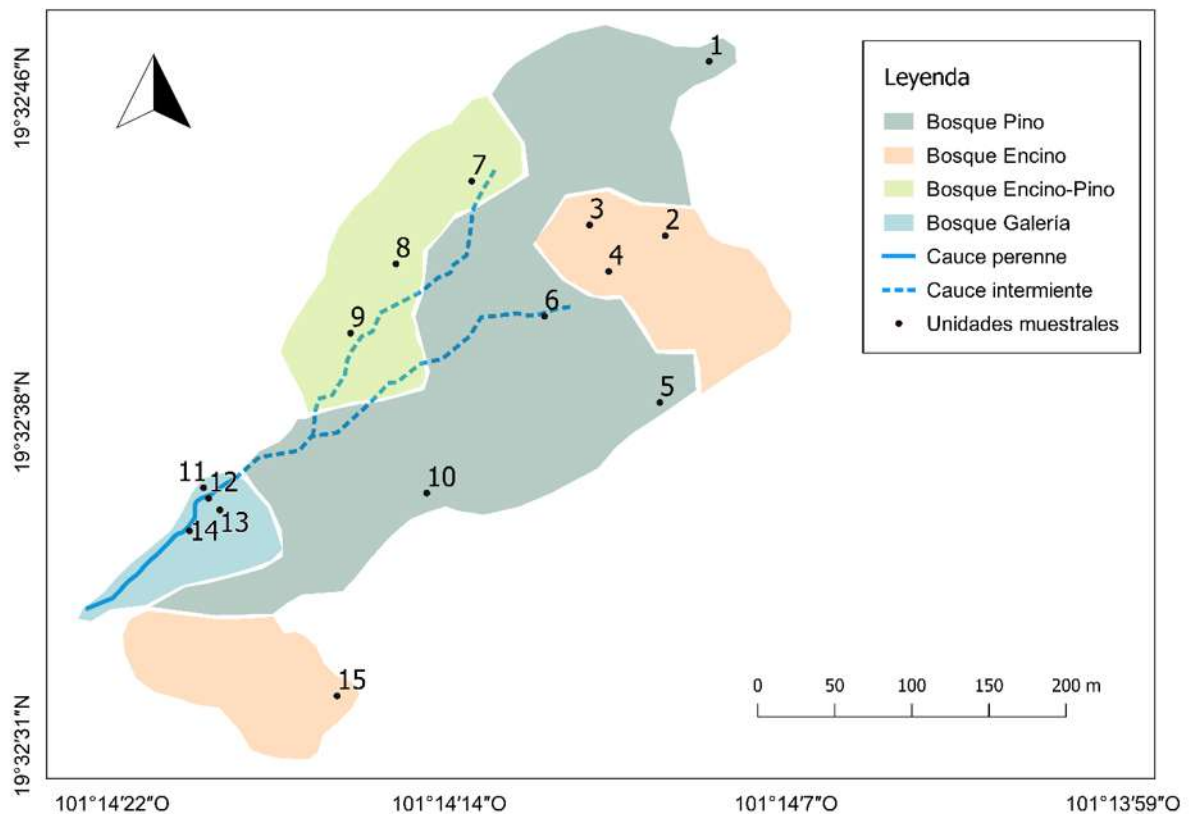


Figura 11. Mapa tipos de vegetación dentro de la Estación Ecohidrológica Alto Fresno, utilizando fotografías aéreas y datos florísticos y estructurales.

Tabla 3. Características principales de cada tipo de vegetaciones en la EIEAF.

Tipo de Vegetación	Géneros representativos	Densidad (arb / ha)	Suelo	Área (has)
Bosque de encino-pino (EP)	<i>Quercus</i> y <i>Pinus spp.</i>	347	Cambisol Háptico	1.44
Bosque de Pino (BP)	<i>Pinus spp.</i>	513	Cambisol Háptico	5.0
Bosque de galería (BG)	<i>Fraxinus spp</i>	592	Cambisol Háptico Regosol Háptico	0.54
Bosque encino (BE)	<i>Quercus spp.</i>	1051	Cambisol Háptico	2.1

Capítulo 3

*Resultados; evaluación espacial y temporal del
IAF, fenología, humedad edáfica y variables
microclimáticas*

6.

CAPÍTULO 3

6.1 Evaluación espacial y temporal del índice de área foliar

Durante el periodo de muestreo para el IAF (10/2016 - 11/2017) se encontró una variación espacial, es decir, el IAF se comporta de manera diferente en cada una de las coberturas vegetales. Los valores mayores promedios se presentan para el BG 2.83 ± 0.89 , mientras los valores menores son para el bosque EP 1.66 ± 0.68 (Tabla 4). Además, esta tendencia en las diferentes coberturas se mantiene durante el periodo de estudio (Figura 10). Los valores de IAF promedio se encuentran distribuidos de la siguiente manera, donde el BG > BE > BP > EP.

Tabla 4. Estadística descriptiva para la variación espacial de IAF, incluyendo todas las fechas.

cobertura vegetal	promedio	min	máx.
BE	2.27 ± 0.80	0.75	6.73
BG	2.83 ± 0.89	0.69	5.62
BP	2.15 ± 0.85	0.29	5.95
EP	1.66 ± 0.68	0.10	3.7

En general existe una diferenciación entre el IAF para las diferentes fechas, en promedio el mes que presentan valores mayores es noviembre 2017, mientras el valor mínimo es para el mes de marzo 2017. El IAF promedio incluyendo todos los meses de muestreo y coberturas es de 0.52 ± 0.29 (Figura 12).

Por otra parte, de manera general se encontró una variación temporal en los valores de IAF, a partir de un análisis de Friedman se determinó que existe diferencia significativa para los valores de IAF entre las diferentes fechas ($\chi^2 = 552.27$, $gl = 13$, $p = 0.0001$) (Figura 12).

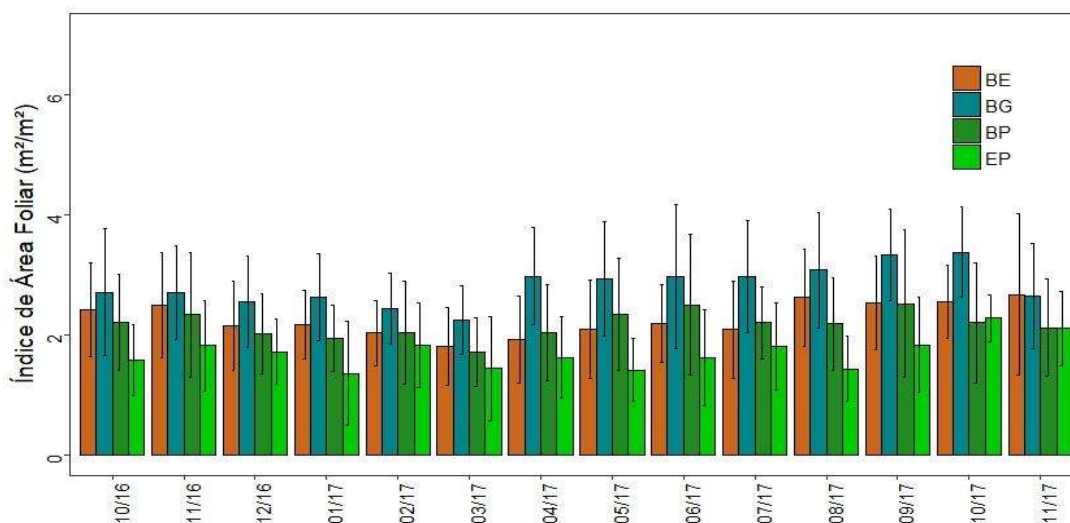


Figura 12. Promedio del Índice de Área Foliar por coberturas, para cada una de las fechas.

Posteriormente se analizó si existe diferencia entre las condiciones para cada una de las fechas. Se determinó que la diferencia entre los valores de IAF se cumple para todas las fechas, excepto para el mes de noviembre 2016 y 2017, en el cual no se presenta diferencia estadísticamente significativa (Tabla 5).

Tabla 5. Valores obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis para determinar diferencia entre el IAF de las coberturas por fecha.

Fecha	X ²	gl	<p
10/2016	23.0	1	0.001
11/2016	12.4	1	0.1531
12/2016	26.2	1	0.001
01/2017	21.5	1	0.001
02/2017	22.2	1	0.001
03/2017	10.6	1	0.001
04/2017	21.4	1	0.001
05/2017	12.6	1	0.001
06/2017	14.7	1	0.001
07/2017	21.3	1	0.001
08/2017	24.0	1	0.001
09/2017	17.2	1	0.001
10/2017	14.5	1	0.001
11/2017	12.4	1	0.128

También se realizó un test de Friedman para determinar si existe variación temporal en cada condición vegetal, se encontró que efectivamente las coberturas vegetales presentan diferencia significativa entre fechas. Lo cual corrobora la variación temporal de LAI en el sitio de estudio.

Tabla 6. Análisis de Friedman para cada cobertura vegetal en la EIEAF

cobertura vegetal	X ²	g1	p<
EP	55.93	13	0.0001
BP	104.82	13	0.0001
BG	149.57	13	0.0001
BE	104.51	13	0.0001

Se encontró una correlación negativa entre el IAF y la Biomasa ($r = -0.31$, $t = -4.34$, $g. l = 176$, $p < 0.001$), es decir que cuando los valores de IAF aumentan la biomasa disminuye. Tomando en cuenta que si el dosel pierde hojas se registrara una mayor cantidad de biomasa en los colectores de hojarasca y una mayor apertura en el dosel. El test de Friedman indicó que también para esta variable se determinó una variación temporal y espacial para las diferentes coberturas (Tabla 7).

Tabla 7. Estadística descriptiva para la variación espacial biomasa, incluyendo todas las fechas de muestreo.

cobertura vegetal	Promedio (gr)	min	máx.
BE	67.4 ± 52.3	17.6	251.8
BG	43.3 ± 34.4	0.1	203.47
BP	64.2 ± 26.4	23.2	150.13
Los EP	43.5 ± 27.4	11.3	142.27

meses donde se reporta mayor cantidad de biomasa colectada fueron enero, febrero y marzo 2017, contrario a los meses de junio y julio 2017 que presentan cantidades menores de biomasa con respecto a todas las fechas (Figura 13). Además, la dinámica de la biomasa y el área foliar para cada condición es diferente, más

adelante exploraremos las causas de esta variación entre condiciones. La biomasa y el área foliar presentaron una correlación significativa ($r=0.40$, $t = 5.8$, $g.l = 177$, $p < 0.001$) ya que esta última deriva de la biomasa seca. Además, estas variables nos muestran como la fenología foliar se está comportando de manera diferente temporal y espacialmente. En la Figura 13, podemos observar la fenología foliar de las principales especies del sitio de estudio.

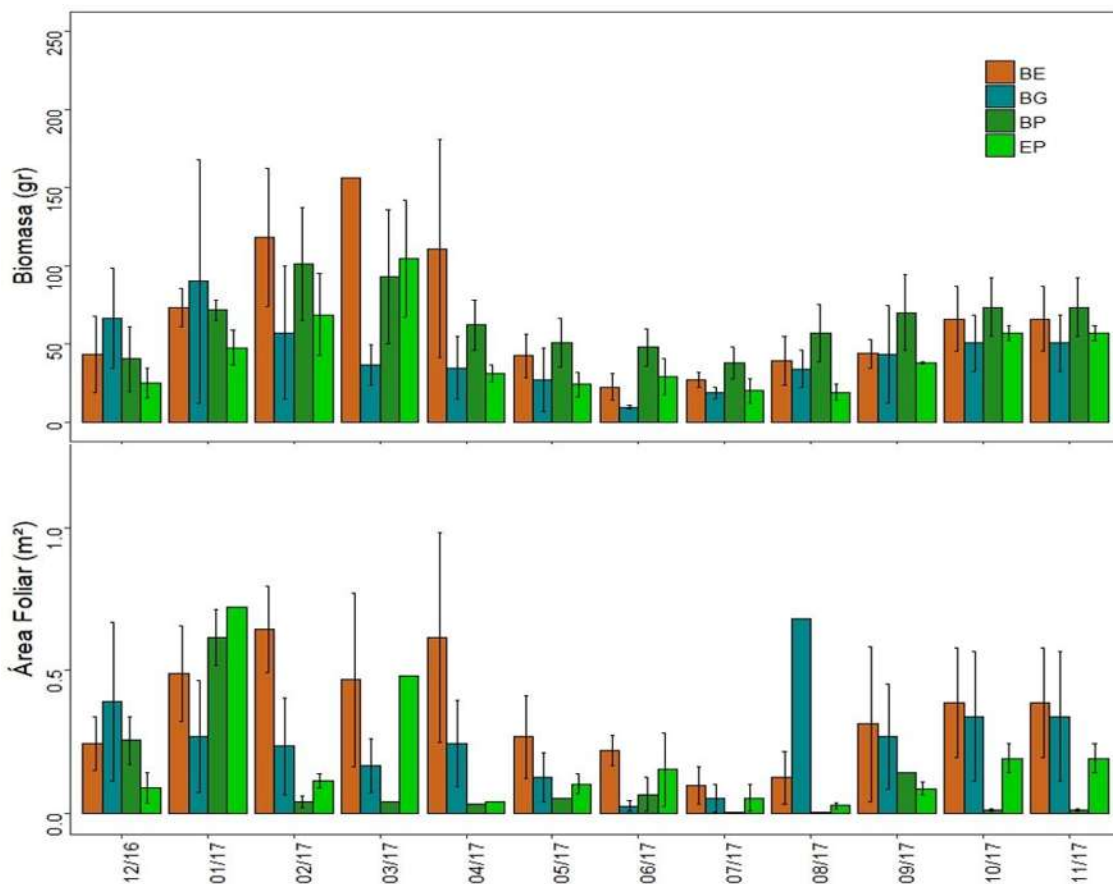


Figura 13. Promedio de biomasa y área foliar por coberturas, para cada una de las fechas.

Además, establecer una relación entre la cantidad de biomasa registrada en los colectores y la fenología foliar. Las presencias de algunas especies características en las diferentes coberturas

están determinando la pérdida de área foliar por lo tanto el IAF se ve afectado. Para el caso del BG las especies que están aportando mayor biomasa son *Fraxinus sp.* y *Stirax spp.* que presentan una alta defoliación durante los meses de diciembre y enero, provocando un aumento en la biomasa que se ve disminuida durante los meses de marzo y abril que comienza la aparición de las primeras hojas para ambas especies.

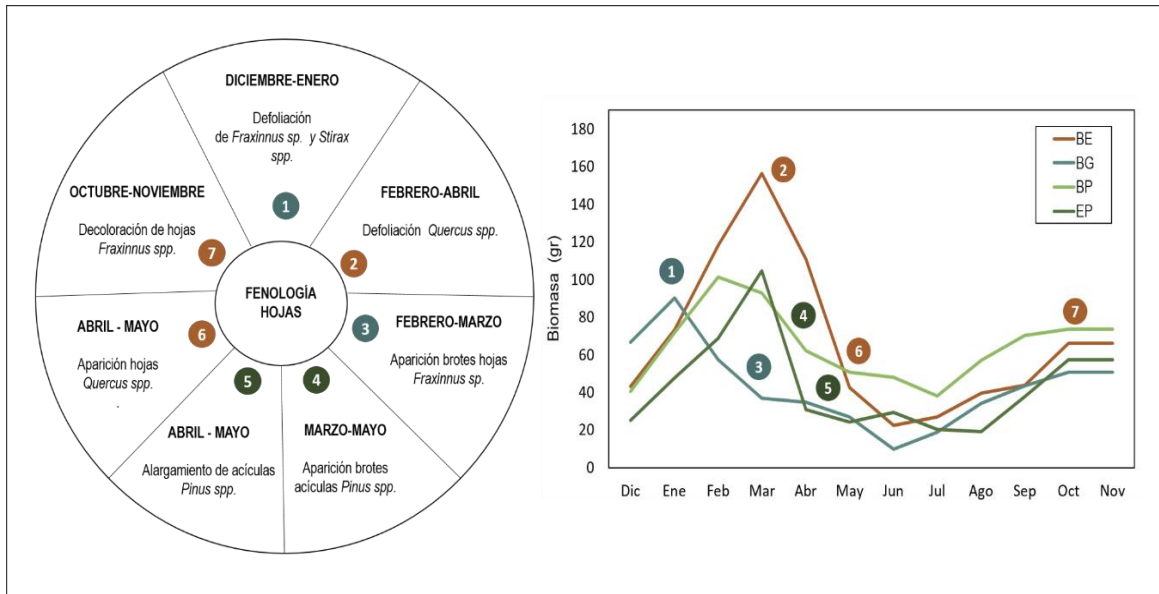


Figura 14. Fenología foliar de las principales especies representativas dentro del área de estudio.

Para el caso del BE la mayor cantidad de biomasa se registra durante los meses de febrero y abril, relacionándolo con la defoliación de los *Quercus spp.* que son las especies dominantes del sitio (Figura 14). Aunque la oscilación entre valores de biomasa es menor para el BP y EP, también presentan una dinámica diferente. En el EP se registran valores mayores entre febrero marzo, esto relacionado con la dominancia de *Quercus spp.* y *Pinus spp.* que se presentan en esta condición vegetal. Mientras que para el sitio de BP la mayor cantidad de biomasa se registra durante febrero, pero posteriormente se tiene el alargamiento de acículas en *Pinus spp.* durante los meses de marzo abril, esto compensa la pérdida de biomasa y por lo tanto un aumento en el IAF.

Capítulo 4

*Resultados: Variación de la humedad edáfica y
variables microclimáticas*

7.1 Cuantificación de la humedad edáfica y agua disponible

La medición de la humedad edáfica muestra una variación interanual, pero además una variación espacial para las distintas condiciones vegetales. En la tabla 8, podemos observar como los valores promedios para cada condición difieren y como el aumento de estos valores de humedad se encuentran asociados a los meses finales de la temporada lluviosa donde el suelo alcanza valores promedios de hasta 52.6 %.

Tabla 8. Valores promedios de humedad edáfica en las diferentes coberturas vegetales (porcentaje de humedad volumétrica).

Fecha	EP	BP	BE	BG
23/10/2016	41.4 ± 2.3	40.7 ± 1.4	37.9 ± 6.4	36.3 ± 5.0
26/11/2016	37.8 ± 0.8	38.1 ± 2.6	35.7 ± 5.9	34.6 ± 4.6
21/12/2016	36.7 ± 1.0	35.4 ± 3.6	32.7 ± 5.2	33.7 ± 4.4
26/01/2017	36.2 ± 1.4	32.8 ± 2.5	30.1 ± 5.0	33.4 ± 5.2
26/02/2017	36.6 ± 1.2	32.5 ± 1.9	29.1 ± 5.0	30.5 ± 4.6
26/03/2017	34.4 ± 2.3	26.9 ± 2.8	31.4 ± 5.5	31.5 ± 5.0
21/04/2017	38.1 ± 1.0	30.5 ± 3.0	29.7 ± 6.0	37.5 ± 5.6
21/05/2017	33.1 ± 0.8	25.5 ± 0.4	28.3 ± 7.8	41.7 ± 12.6
25/06/2017	39.4 ± 2.6	36.7 ± 2.9	35.2 ± 6.4	43.7 ± 6.7
25/07/2017	52.6 ± 3.9	45.2 ± 2.8	42.1 ± 7.5	44.1 ± 6.3
25/08/2017	50.4 ± 0.7	45.1 ± 3.3	42.9 ± 9.0	39.2 ± 4.5
25/09/2017	50.5 ± 4.6	45.7 ± 2.5	43.2 ± 7.7	39.2 ± 4.6
25/10/2017	37.7 ± 0.9	36.0 ± 1.9	32.4 ± 6.4	34.6 ± 4.4
25/11/2017	37.7 ± 0.9	35.3 ± 2.1	32.3 ± 6.4	36.8 ± 4.8

Los resultados indican que los valores más altos de humedad edáfica se presentan en la condición de EP, mientras los valores más bajos son para el BE. Este resultado suele ser inesperado ya que se esperaría que el BG por tener cercanía al arroyo presentaría mayores niveles de humedad edáfica. En la Figura 15

podemos observar la distribución de la humedad edáfica de manera espacial, contrastándola con los valores de precipitación mensual.

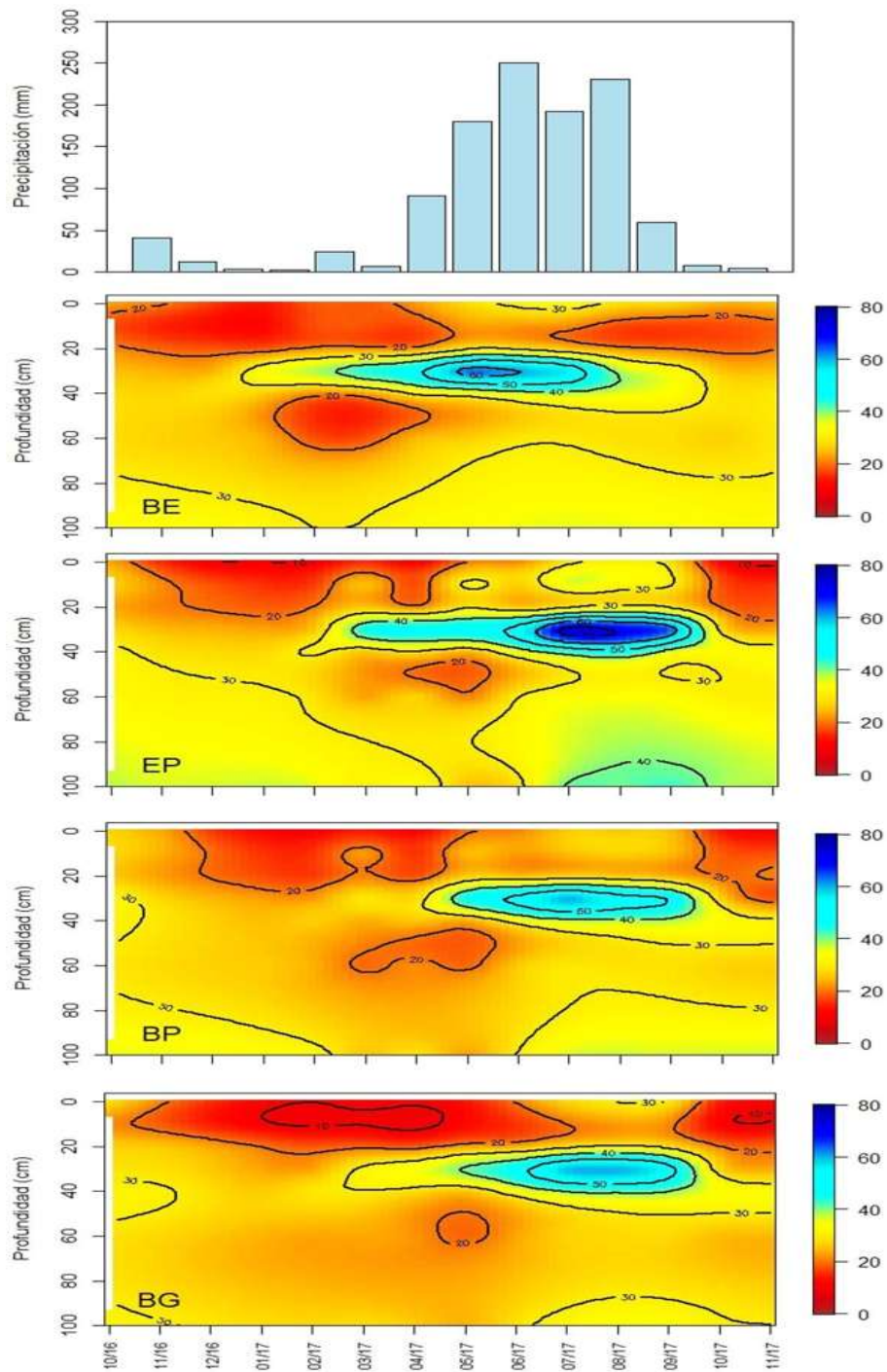


Figura 15. Valores promedio de la variación interanual y espacial de la humedad edáfica para todas las condiciones de vegetación.

La grafica mencionada anteriormente nos muestra los valores promedios de humedad edáfica para cada condición vegetal, en cada una de las fechas de medición. Se representa claramente la correlación que existe entre la humedad y los valores de precipitación mensual. El BE presenta una correlación marginalmente significativa ($r= 0.26$, $p= 0.05$), en este sitio la mayor cantidad de humedad se encuentra presente a partir de los 20-40 cm de profundidad. Mientras que el sitio de BP presenta una correlación significativa entre la precipitación y la cantidad de humedad edáfica ($r= 0.31$, $p< 0.001$), con una distribución vertical de la humedad similar al BE, pero con valores menores. Tanto el BA ($r= 0.51$, $p< 0.001$), así como el BG ($r= 0.52$, $p< 0.001$) presentan una fuerte correlación entre la precipitación y la distribución de la humedad edáfica en el perfil. Pero a diferencia del BG, el sitio de BA contiene una mayor cantidad de humedad edáfica en la profundidad de 70-100 cm. Estas diferencias tan marcadas pueden estar asociadas a la distribución de las capas dentro del perfil de suelo. En el ANEXO se presenta la información para cada perfil edáfico asociado a cada sitio de medición de humedad edáfica.

7.2 Disponibilidad de agua en el suelo

También se obtuvieron los valores promedios de PMP, CC, SAT Y AW para cada condición vegetal. En la Tabla 9, se observa como el valor más bajo de PMP es para el BP, mientras el más alto es para el suelo del BG. Los valores máximos de SAT los presentan el BE y EP. Los promedios de CC son muy similares en todas las condiciones. Así mismo, el BP presenta la mayor cantidad de AW promedio.

Tabla 9. Valores promedios de disponibilidad de agua por condición vegetal.

	PMP	CC	SAT	AW
BP	19.95	45.24	61.14	25.2
BG	26.65	45.4	68.79	18.7
BE	22.59	45.76	74.15	23.1
EP	21.63	44.39	74.22	22.7

Temporalmente, los resultados indican que la variación de la humedad edáfica promedio para cada condición presenta una dinámica diferente (Figura 16). Mientras el sitio de BE y BG son los que alcanzan valores cercanos al PMP, durante 5 o 6 meses previos a la temporada de lluvia; el sitio de BP se acerca a este valor de PMP durante el mes de marzo. A diferencia de todos, el sitio de EP se mantiene cerca del valor de CC durante todo el año y sobrepasa este valor durante la temporada lluviosa. Mientras las otras condiciones alcanzan solamente la CC para esa misma temporada.

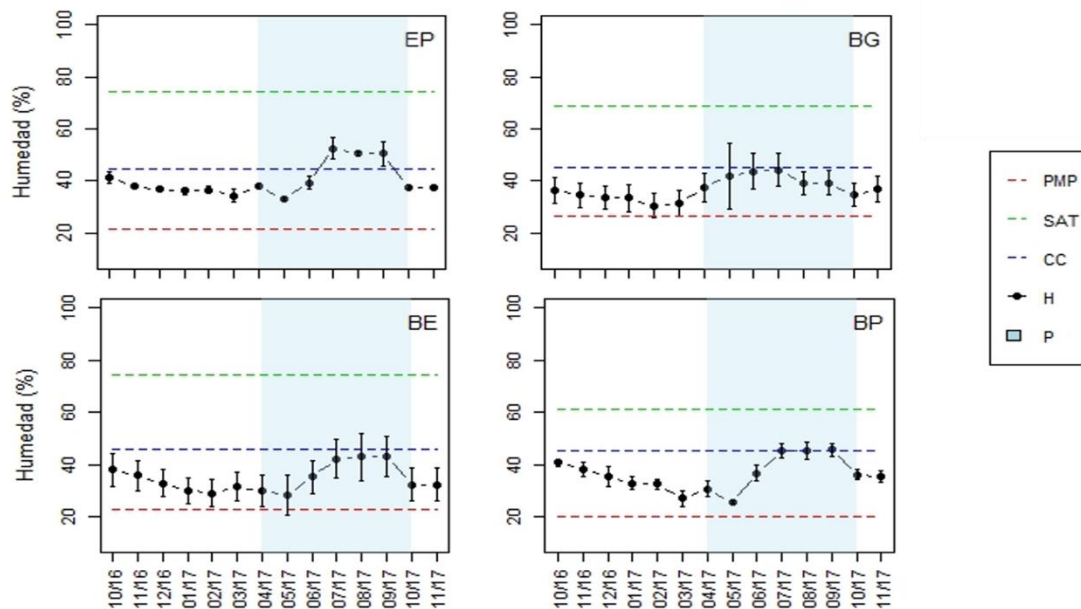


Figura 16. Variación temporal de la humedad edáfica; representación de PMP, CC Y SAT para cada cobertura vegetal.

Por otra parte, reconocemos la variación dentro de las capas de suelo (ANEXO 3), debido a ello se realizó una segmentación del perfil edáfico, obteniendo la humedad en milímetros para cada capa (Tabla 10). Esto nos proporciona información sobre la distribución del agua en las diferentes profundidades.

Tabla 10. Valores promedio de humedad edáfica mm para cada capa de suelo dentro de un perfil (1m profundidad)

	Profundidad (cm)			
	0-5	5 - 35	35-65	65-100
EP	16.58	44.58	89.91	165.98
BP	15.78	36.79	77.05	141.71
BE	18.25	36.88	83.76	132.81
BG	23.09	37.42	82.09	146.48

Los resultados indican que la mayor lamina de humedad se registró para la profundidad de 65-100 cm en el EP. Mientras, los valores menores son para la profundidad de 0-5 cm en el BP; aunque el sitio con mayor cantidad de humedad superficial está representado por el BG. Esto nos indica que la humedad edáfica presenta una estratificación ascendente, es decir la parte superficial contiene menos agua que la capa profunda.

7.3 Variables micrometeorológicas

Los resultados para estas variables corresponden al periodo de octubre 2016-noviembre 2017. Se consideraron cinco variables importantes para este trabajo (Figura 17). Observamos que, para la precipitación, la época humedad se establece a partir del mes de abril registrando 91.4 mm de lámina acumulada. La mayor cantidad de precipitación se presenta durante el mes de junio, mientras que el mes de septiembre establece el final de la época lluviosa. En cuanto a la temperatura promedio, se registra valores mínimos de 10.6 °C durante los meses de noviembre, la temperatura más alta es para el mes de abril. La humedad relativa mayor corresponde al mes más lluvioso, pero la menor humedad se presenta durante el mes de marzo. Derivada de esta última variable calculamos el déficit de vapor hídrico (DVH) para todas las fechas de medición. Es bien conocido las correlaciones que se establecen entre las variables micrometeorológicas.

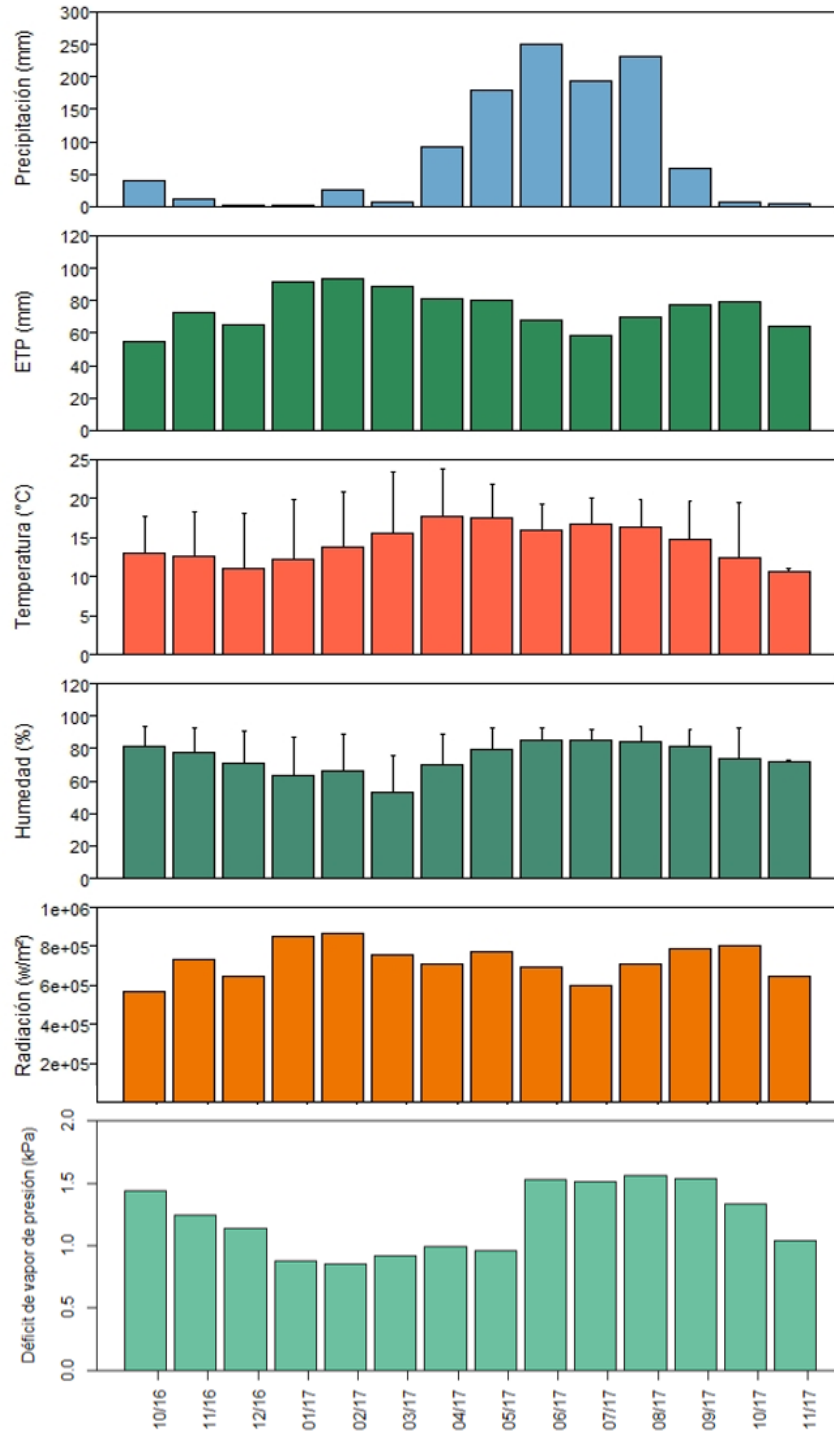


Figura 17. Variables micrometeorológicas para el periodo de estudio octubre 2016 - noviembre 2017.

Tabla 11. Variables micrometeorológicas, obtenidas de la estación climática en la EIEAF.

Fecha	Precipitación (mm)	ETP (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Radiación solar (w/m ²)	DVP (KPa)
10-16	41.0	54.7	13.0	81.6	567809	1.44
11-16	12.0	72.4	12.6	77.8	735727	1.24
12-16	3.2	64.8	11.0	70.6	643322	1.14
01-17	2.6	91.1	12.3	63.6	849337	0.88
02-17	24.6	93.9	13.8	65.7	864360	0.85
03-17	7.0	89.1	15.5	52.5	760222	0.92
04-17	91.4	81.4	17.7	70.0	711485	0.99
05-17	179.8	80.6	17.6	79.4	772978	0.96
06-17	250.4	67.9	16.0	84.8	693394	1.53
07-17	192.6	58.8	16.6	84.7	597680	1.51
08-17	230.2	69.7	16.4	84.2	709553	1.56
09-17	59.8	77.3	14.8	81.0	789190	1.54
10-17	8.0	79.4	12.5	73.6	801310	1.33
11-17	4.4	64.6	10.6	71.6	648227	1.04

La precipitación es la que se encuentra fuertemente correlacionada con la temperatura ($r= 0.74$, $p<0.001$) y la humedad ambiental ($r= 0.68$, $p<0.001$). Mientras la evapotranspiración se correlaciona fuertemente con la humedad ambiental ($r= 0.68$, $p<0.001$) y la radiación solar ($r= 0.92$, $p<0.001$).

Capítulo 5

Análisis de las variables explicativas del IAF

8.1 Variables explicativas del Índice de Área Foliar

Para determinar cuáles son las variables que rigen los patrones temporales y espaciales del IAF, se generó una correlación de Pearson entre las mediciones mensuales de las variables explicativas y el IAF. Incluyendo variables micrometeorológicas, humedad total y humedad diferentes profundidades. La humedad ambiental, precipitación, humedad 0-5 y 5-35 cm presentaron correlaciones significativas con respecto al IAF (Tabla 12).

Tabla 12. Correlaciones significativas entre las variables explicativas y el IAF.

Variable	BP	BE	BG	
Hum amb	0.40**	0.31 *	0.38 **	
θ superficial (0-5)	0.27*	0.25 *	0.27*	
θ subsuperficial (5-35)		0.27*		
Precipitación			0.44 **	
DVP	0.32*	0.27*	0.37**	Valores

de significancia: *= 0.05, **=0.001, ***= < 0.0001

Estas variables solo presentan correlación con el BP, BE y BG. Para el bosque de EP no se encontró ninguna relación con las distintas variables. En cada una de las condiciones se genera una combinación de variables que explican la dinámica temporal y espacial del IAF.

Para el BP solamente se encontraron dos variables explicativas: la humedad ambiental y la humedad edáfica superficial (Figura 18). La humedad ambiental presenta una variación similar al IAF, donde los

valores menores se presentan durante el mes de marzo y durante el periodo de lluvias se refleja un IAF mayor.

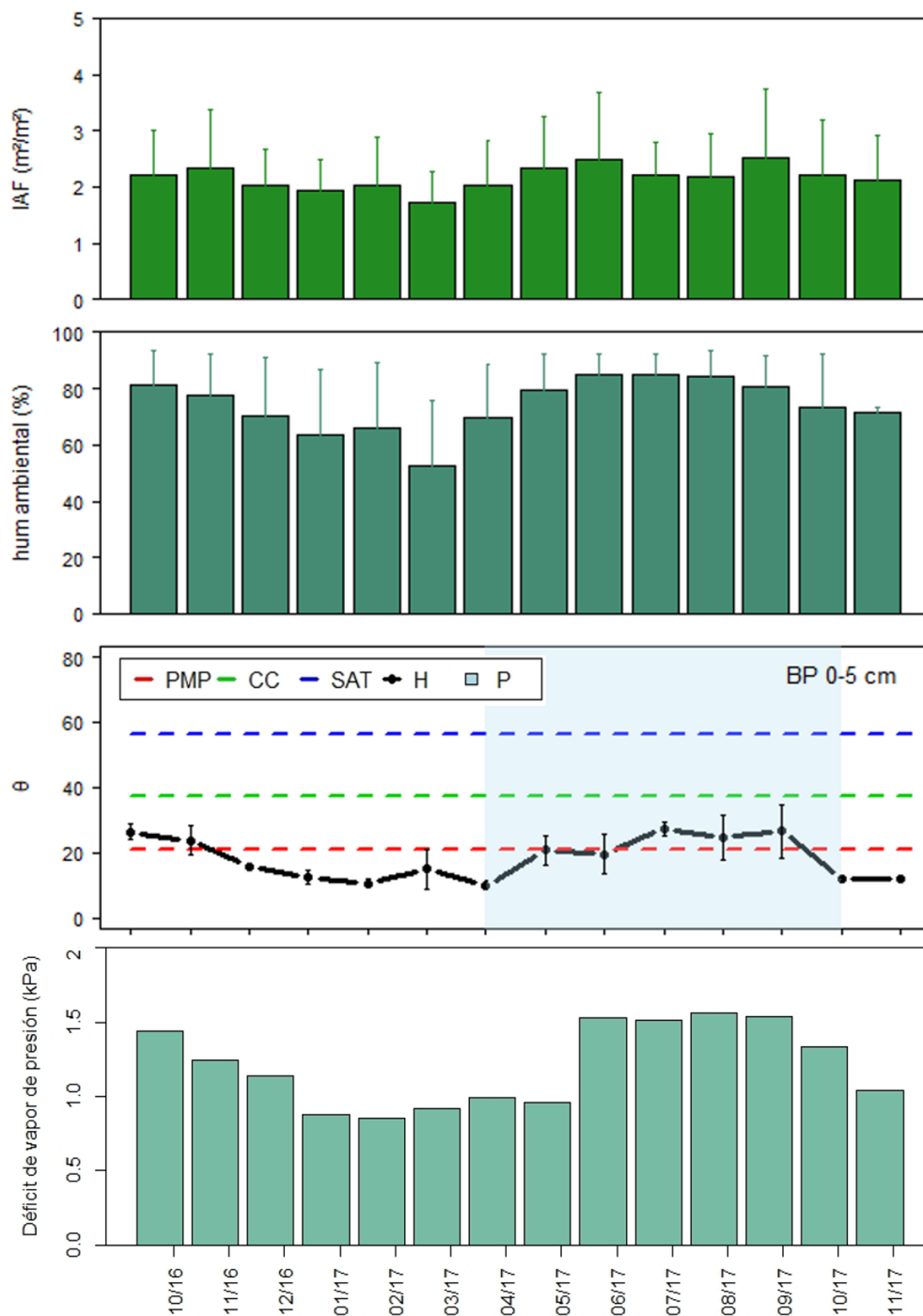


Figura 18. Variables explicativas del IAF para la condición de BP.

La humedad edáfica para la capa superficial de suelo, se encuentra por debajo del PMP (20.99) durante los meses de diciembre-abril, cuando se establece la época lluviosa, la humedad sobrepasa este nivel, pero sin alcanzar la CC (37.20). Posterior a la temporada húmeda, en el mes de octubre el suelo regresa a niveles de humedad por debajo del PMP.

Por otra parte, para el BE se determinaron tres variables explicativas: humedad ambiental, y humedad edáfica de 0-5 y 5-35 cm. Cabe mencionar, que de la misma manera que el BP la humedad ambiental menor se presenta durante el mes de marzo, registrando los valores más bajos de IAF; mostrando un incremento durante la época lluviosa (Figura 19).

En cuanto a la humedad edáfica, este sitio presenta una capa superficial donde las condiciones hídricas se encuentran por debajo del PPM (20.45), durante el periodo diciembre -junio. Aunque durante los meses de julio, agosto y septiembre alcanza valores por encima de esta condición de estrés hídrico. Por otra parte, aunque en la capa superficial se manifieste una condición de estrés, la capa siguiente presenta una mayor disponibilidad hídrica al menos durante toda la temporada lluviosa; alcanzando durante los meses de julio, agosto y septiembre valores sobre la CC (36.52). Por último, el IAF del BG se correlaciono con tres variables, la precipitación, humedad ambiental y humedad de la capa superficial de suelo (Figura 20).

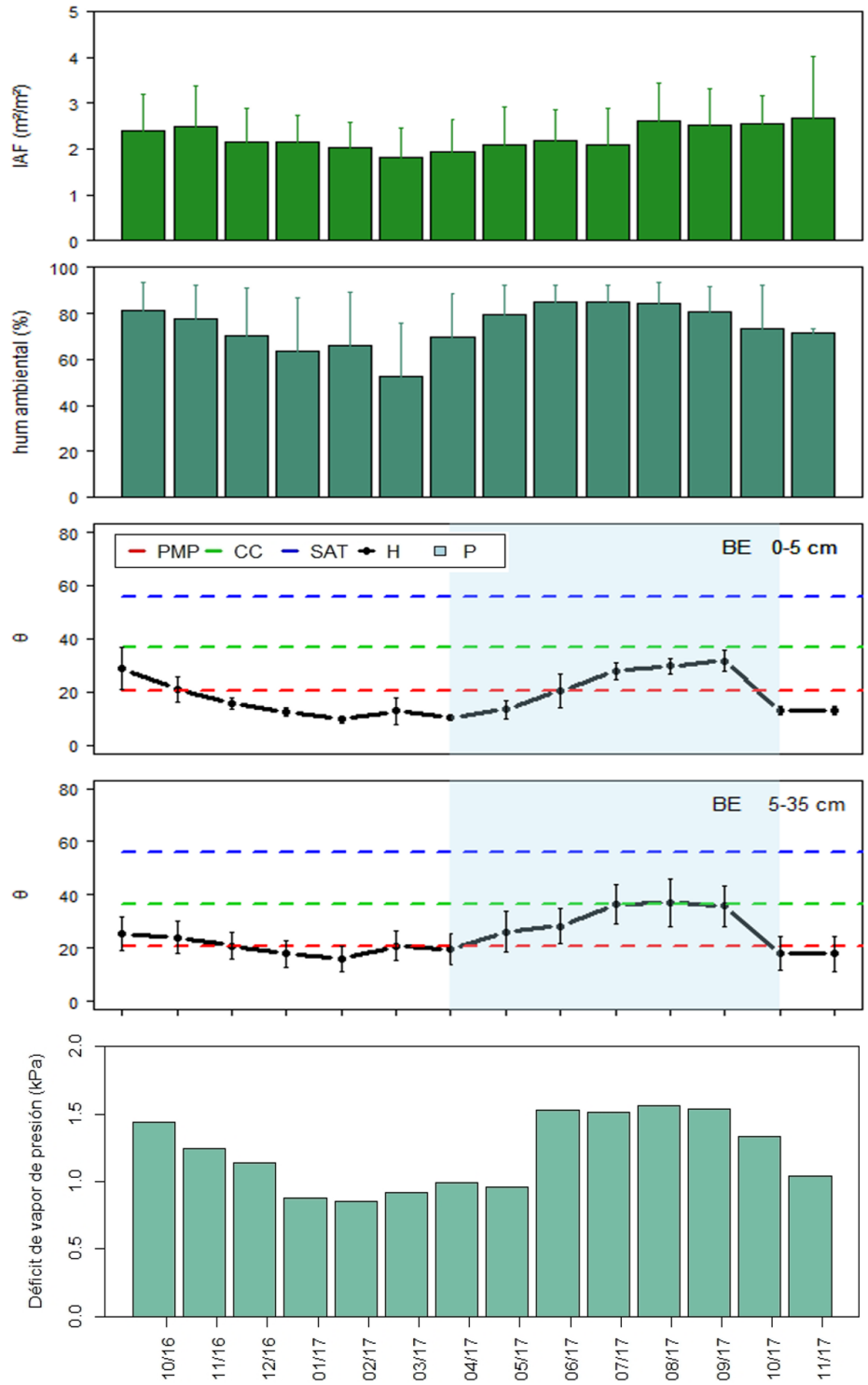


Figura 19. Variables explicativas del IAF para la condición de BE.

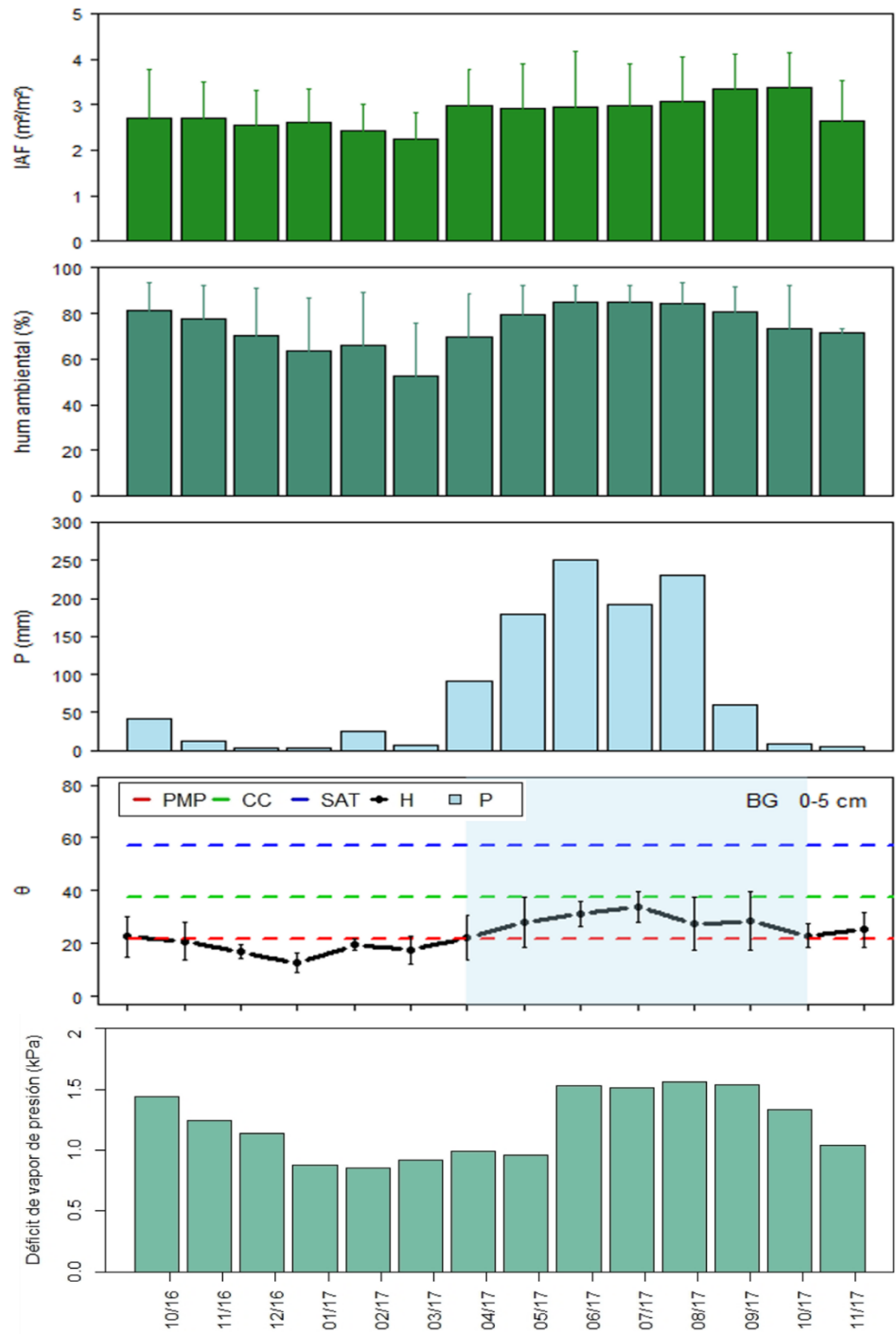


Figura 20. Variables explicativas del IAF para la condición de BG.

Al igual que en las condiciones anteriores, el IAF y la humedad ambiental se comportan de manera similar donde durante los meses de humedad relativa mínima, se presentan valores bajos de IAF. Para esta condición, también encontramos la precipitación como un factor explicativo, donde la variación que presenta establece un aumento o disminución del IAF. En cuanto al suelo, la capa superficial se encuentra en estrés hídrico por debajo del PMP (21.78) desde el mes de noviembre hasta el comienzo de la época lluviosa. Durante esta época alcanza valores cercanos a CC (56.99).

Capítulo 6
*Integración de los resultados y discusión
general*

9. CAPITULO 6

9.1 Variación del Índice de Área Foliar

El IAF general para el sitio de estudio es de 2.21 ± 0.29 este valor es similar al reportado por Gond de Pury *et al.* (1999) para un bosque compuesto por *Quercus robusta*, *Pinus silvestris* y *Pinus serotina* donde el IAF es de 2.23. También Roblero-Soto (2013), encontró valores de IAF entre 2.15 y 2.19 para una condición similar en un bosque mixto de Pino-Encino. En cuanto a las distintas coberturas vegetales, el BP presenta un IAF de 2.15 ± 0.85 , mientras que para cobertura de pino algunos autores reportan valores promedios de IAF entre 6 y 7 para un bosque de *Pinus sp.* (Aguirre-Salado *et al.* 2011). Por otra parte, Roblero Soto (2013) presenta valores de IAF de 1.8, para un bosque compuesto por *Pinus serótina*, estos valores difieren con el BP, probablemente la composición de especies este reflejando esta diferencia. Para la condición de BE el valor de IAF es de 2.27 ± 0.80 , aunque la composición de este sitio presenta varias especies del genero *Quercus spp.* se han reportado valores de 2.5, para ambientes compuestos por una especie de *Quercus robusta*. Todas las comparaciones anteriores han utilizado el mismo método de fotografía hemisférica para evaluar el IAF. El BG es la condición que presenta la mayor cantidad de IAF (2.83 ± 0.89). Arx *et al.* (2004) un IAF de 3.4 para un ambiente similar al BG utilizando el método de Fotografía hemisférica, aunque Nagler *et al.* (2005) ha reportado valores más cercanos de 2.9 muy similares para este sitio, aunque el método de adquisición es diferente, pero ambos son ambientes riparios.

La mayoría de estos trabajos reporta valores de IAF para un momento, pero solo algunas investigaciones se enfocan en evaluar el IAF de manera temporal; ya que este tipo de trabajos implica un muestreo extenso. Fang *et al.* (2008) realizaron un trabajo en el cual evalúan la variación temporal y espacial del IAF para América

del Norte. A pesar de que este trabajo es de una zona muy grande, se encontraron coincidencias con la variación presente en nuestra área de estudio. Reportan un incremento en el IAF durante los meses de abril-agosto, posteriormente hay una disminución (Figura 21). Esto concuerda con lo reportado en este trabajo, donde el incremento del IAF corresponde a la época lluviosa.

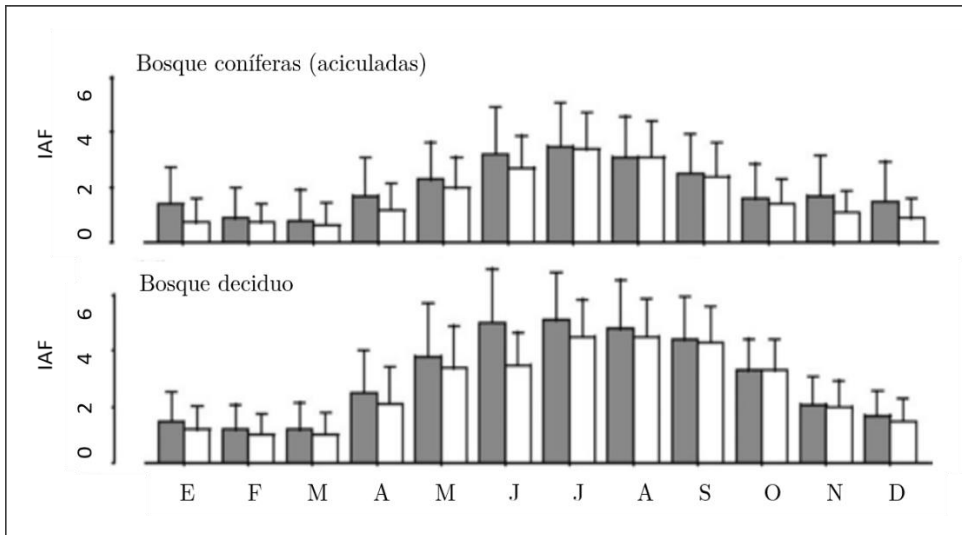


Figura 21. Variación espacial y temporal para dos bosques de coníferas (Figura modificada de Fang et al. (2008)).

Además, en otros trabajos se ha reportado una variación similar, por ejemplo, Naithani et al. (2013) encontraron distintos patrones espaciales y temporales de IAF en un bosque mixto. Por otra parte, Muraoka et al. (2010) reporta una variación similar, pero además evaluando el mismo sitio durante un periodo de cinco años consecutivos y utilizando fotografías hemisféricas. Como ya mencionamos, la fenología foliar es un factor determinante en la variación de IAF, es por esto que en una gran cantidad de trabajos se ha evaluado el efecto estacional de esta variable. Muraoka et al. (2010), realizaron una medición del IAF durante un periodo de cinco años, incorporando las observaciones fenológicas de las

hojas para determinar como esto tiene un impacto sobre la estacionalidad de IAF.

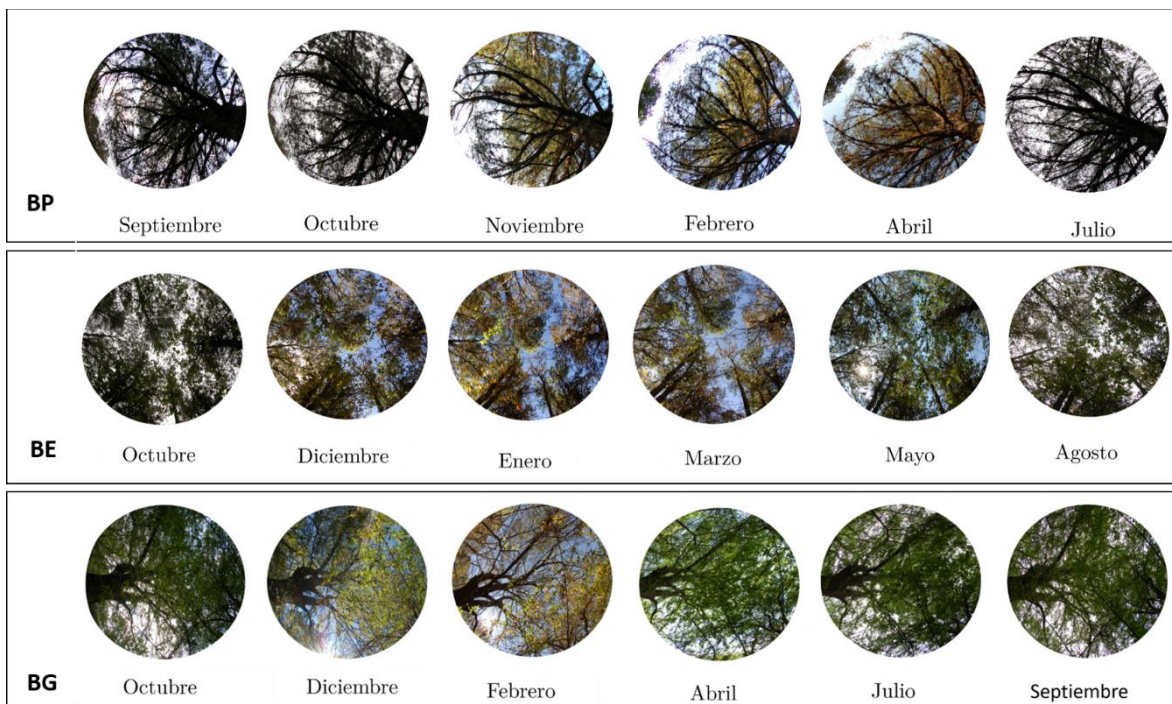


Figura 22. Fotografías hemisféricas para fechas representativas con cambios fenológicos.

Para este trabajo las notas fenológicas indican que hay una relación coherente entre el patrón temporal de IAF con la fenología (Figura 22). Aunque algunos autores como Thimonier *et al.* (2010) sugieren repetir las mediciones a lo largo del año para verificar si el patrón temporal obtenido es coherente con la fenología del rodal, en este trabajo se representa una buena variación de la fenología con mediciones mensuales.

9.2 Variación del contenido de agua en el suelo

La humedad del suelo a menudo muestra una gran variación espacial entre diferentes paisajes, tipos de suelo y vegetación (Vachaud *et al.*, 1985; Kachanoski y de Jong, 1988; Goovaets y Chiang, 1993; Pires da Silva *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2007). En este trabajo encontramos que en el sitio de estudio, existe una variación espacial y temporal; la primera se encuentra determinada por factores estáticos, como las propiedades topográficas y del suelo, mientras la segunda se relaciona con factores dinámicos como la precipitación, evapotranspiración, la presencia o ausencia de un nivel freático en el perfil del suelo, estas controlan la humedad general de una cuenca y pueden variar en el espacio y en escalas temporales de minutos a meses (Takagi y Lin, 2011).

Se esperaba que el sitio de BG por encontrarse en contacto con el arroyo perene, presentara una mayor cantidad de humedad disponible con respecto a las otras condiciones. Mientras el BG tiene un valor de 18.7, el BP presenta 25.2 para AW, a diferencia de los otros sitios el BG presenta el valor más alto para el PMP.

La condición de EP se comporta de manera más estable, la humedad edáfica no se acerca al PMP durante ninguna época del año. Esto puede estar influido por las características edáficas, por ejemplo, la clase textural (ANEXO), arcillo-limosos es la clase dominante, mientras en la capa superficial se presenta un horizonte Bt con un mayor contenido de arcilla y capacidad de retención de agua (Zhou *et al.*, 2007). Algo similar ocurre para el BP, donde también se presentan texturas finas y suelo con mayor profundidad. Para el caso del BG Y BE la variación edáfica espacial es mayor y los suelos presentan horizontes Cw con intemperismo, aunque también tienen texturas franco arcillosas a arcillosas, con una buena retención de humedad. La segmentación

del perfil en capas nos indicó que los horizontes más profundos (35-100 cm) presentan mayor contenido de humedad edáfica, aunque esto no necesariamente indica que las plantas puedan obtener el agua de estos horizontes, más adelante discutiremos esta dinámica raíces-suelo-agua.

9.3 Variables explicativas de Índice de área foliar

La variación del IAF encontrada se asoció a la humedad ambiental (HA), Déficit de Vapor de presión (DVH) y humedad edáfica superficial (0-5 cm y 0-35 cm). Ahora, la pregunta a responder es ¿cómo la HA, DVH y humedad edáfica superficial determinan la dinámica foliar?, algunos autores han reportado como la humedad superficial (10 cm) muestra mayor variabilidad espacial y temporal (Naithani *et al.*, 2013) y sugiere que por esto la distribución de diferentes especies crean patrones únicos de IAF.

Para discutir esta relación suelo-planta-atmosfera es importante tomar en cuenta cada componente. Una característica importante de este funcionamiento, es el sistema radicular que presentan las especies dominantes en las diferentes condiciones vegetales, principalmente los géneros *Quercus*, *Pinus* y *Fraxinus spp.* Para el caso de los pinos, se ha reportado raíces pivotantes con un sistema radicular profundo (Figura 23).

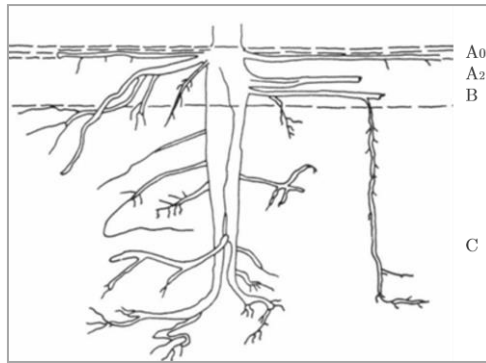


Figura 23. Morfología raíces para *Pinus spp.* (Imagen modificada de Brown, (1961)).

Para la morfología radicular de los encinos, también se reportan raíces profundas (Bonfil, 1998). En el caso del BG donde las especies dominantes son *Fraxinus spp.*, se reporta la tendencia de crecimiento profundo para el sistema radicular (Wiltshire, 1996). Las raíces que logran llegar a una mayor profundidad generalmente son estructuras de anclaje, mientras las raíces más cercanas a la superficie son raíces finas con mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes. La estructura radicular estará determinada por la profundidad del suelo, para el BP y BE, el suelo presenta mayor profundidad, mientras el BG tiene suelos más delgados y con una estratificación diferente. Por lo tanto, esperaríamos que las plantas del sistema ripario presenten raíces más someras con una mayor extensión lateral.

El microclima influye en una amplia gama de procesos, como el crecimiento de las plantas (Bonan, 2008). la humedad ambiental es una de las variables microclimáticas más relevantes en este trabajo. Estudios previos han demostrado que el aire dentro de un

dosel forestal tiene una humedad relativa más alta que el aire en áreas abiertas cercanas (Chen *et al.*, 1993). Además, la HR se encuentra relacionada con el Déficit de vapor hídrico, Kramer (2003) menciona que la interrelación entre el agua del suelo y el crecimiento de la planta se ve afectada por factores esféricos que influyen en la tasa de transpiración, principalmente debido a la alta temperatura y al alto déficit de presión de vapor que acompañan a un alto nivel de irradiación.

Modelo Conceptual:
*Variación espacial y temporal del IAF para
diferentes condiciones vegetales*

10. Modelo Conceptual

Es importante modelar conceptualmente la variación del IAF y sus variables de control (Figura 24). Aunque los ciclos fenológicos no son periodos bien marcados por una fecha determinada, se ha tratado de delimitar para explicar estos fenómenos. En el caso del BP la dinámica foliar presenta una baja oscilación, es decir que por estar compuesto de especies no caducifolias la pérdida foliar es menos evidente. En estos sitios se presenta un periodo (diciembre - enero) donde las plantas se encuentran en un ambiente edáfico con humedad disponible, la pérdida de acículas es muy poca y los valores de IAF están entre 1.6 y 1.8. Mientras durante el siguiente trimestre, el suelo presenta valores cercanos al PMP y la condiciones de HR y DVP son muy bajos, el IAF disminuye hasta 1.4 debido a la pérdida de biomasa foliar por estrés hídrico.

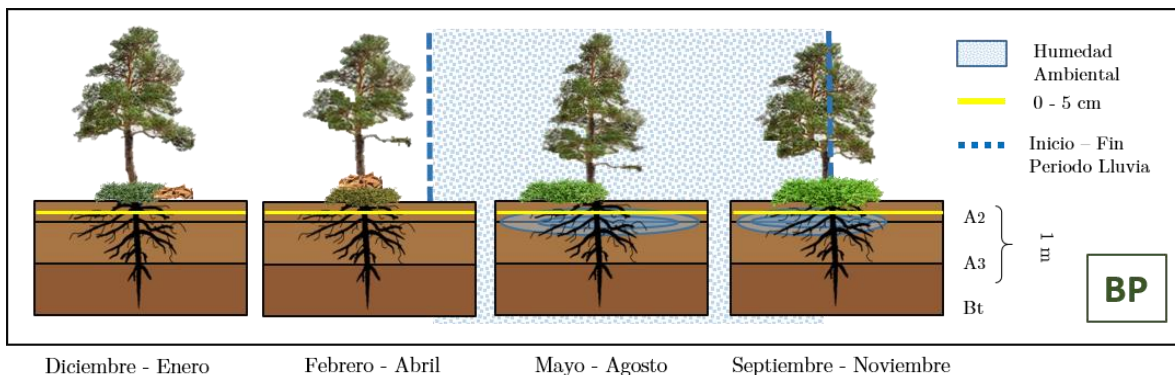


Figura 24. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BP.

En el mes de abril se establece el periodo de lluvias, la HR y el DVP aumentan, por lo tanto, la transpiración disminuye. Durante este periodo la humedad edáfica es muy alta y se mantiene durante todo el periodo de lluvia. Mientras tanto, la vegetación aumenta los valores de IAF hasta 2.4, debido a que la transpiración es

menor gracias a los valores de DVP y HR. El sotobosque presenta cambios importantes y existe una mayor presencia de herbáceas. Para el BE la dinámica es muy distinta (Figura 25), durante el periodo de octubre-enero los *Quercus spp.* comienzan a presentar senescencia en algunas hojas, debido a que los valores de humedad edáfica comienzan a disminuir. El déficit hídrico continua hasta el mes de abril y los árboles se ven obligados perder todas sus hojas y la cantidad de biomasa en el suelo es muy alta. Durante el comienzo de la época de lluvias la vegetación comienza a recuperar las hojas, ya que la humedad disponible en el suelo comienza a aumentar. La precipitación propicia que la HA y el DVP sean mayores por lo tanto la transpiración disminuye y alcanza valores promedios máximos de 2.8 para el IAF.

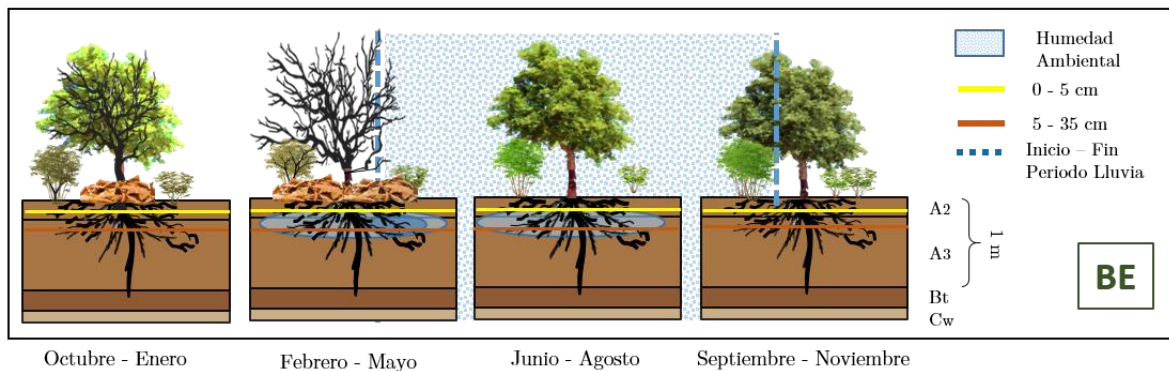


Figura 25. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BE.

Durante los últimos meses del año la precipitación disminuye y la vegetación continúa manteniendo los valores de IAF, utilizando la humedad disponible presente en el suelo. Pero, la humedad edáfica comienza a disminuir, la HR y el DVP; la transpiración aumenta y la vegetación comienza a perder poco a poco el componente foliar

El BG tiene una dinámica similar al BE (Figura 26), pero presenta un desfase en la defoliación. Durante el periodo octubre-

diciembre la humedad mantiene el IAF utilizando la humedad edáfica residual de la temporada de lluvias que acaba de terminar. Durante los primeros meses del año, las plantas se encuentran bajo un gran estrés hídrico ya que el suelo presenta una condición cercana al PMP. Por lo tanto, las plantas pierden en su totalidad el área foliar y la biomasa foliar seca es muy alta. Al comienzo de la temporada de lluvia la humedad edáfica comienza a aumentar, alcanzando valores de CC y las plantas generan biomasa foliar, para alcanzar valores altos de IAF.

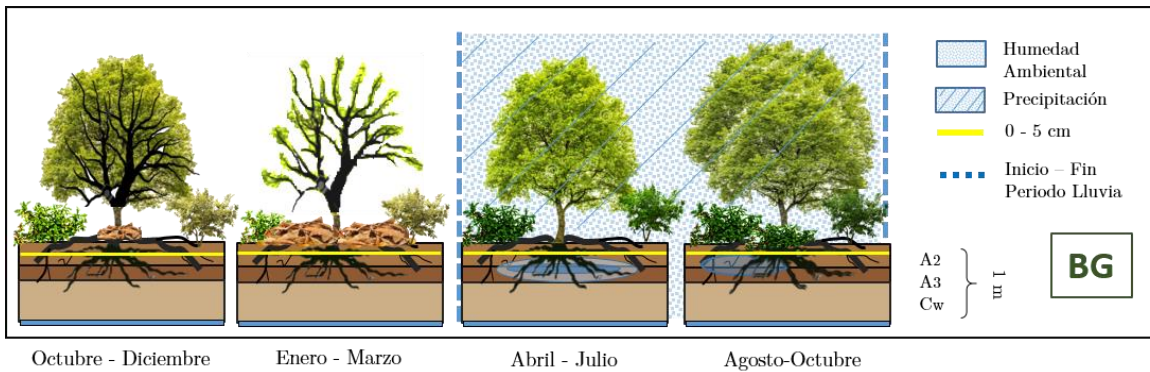


Figura 26. Modelo conceptual de la variación de IAF y sus variables de control en el BG.

Los valores máximos de IAF se presentan durante agosto -octubre alcanzando valores de 3.7 3n promedio, debido a que los valores mayores de HA y el DVP contribuyen a evitar una demanda de transpiración mayor. Finalmente, los valores de humedad edáfica comienzan a disminuir la planta se encuentra bajo estrés hídrico y el ciclo fenológico se repite.

Conclusiones

11. Conclusiones

- o En la EIEAF se presentan cuatro coberturas de vegetación: Bosque de Pino, Bosque Encino-Pino, Bosque de Encino y Bosque de Galería.
- o Las diferentes coberturas vegetales tienen distintos patrones de distribución temporal del Índice de Área Foliar.
- o La dinámica de humedad edáfica temporal se encuentra diferenciada entre las distintas condiciones vegetales.
- o La variación temporal del IAF en el BP está influenciada por la humedad ambiental, el déficit de vapor de presión y la humedad edáfica en la primera capa (0-5 cm).
- o En el BE las variables determinantes para la variación del IAF son la humedad ambiental, déficit de vapor de presión y la humedad en las primeras dos capas de suelo (0-5 y 5-35 cm).
- o El IAF en el BG se encuentra controlado por la precipitación, humedad ambiental, déficit de vapor de presión y la humedad edáfica en la capa superficial (0- 5 cm).

Literatura citada

Arx, A. Von, Huber, S., Kneubühler, M., & Itten, K. (2004). Leaf area index estimates obtained for mixed forest using hemispherical photography and hysmap data. *Isprs.Org*. Retrieved from <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/7-C50/papers/P79.pdf>

Baldocchi, D.D., Wilson, K.B., (2001). Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. *Ecological Modelling* 142 (1-2), 155-184.

Barclay, H. J., Trofymow, J.A. and Leach, R.I. (2000). Assessing bias from boles in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with the LI-COR canopy analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology* 100:255-260

Barr, A. G., Black, T. A., Hogg, E. H., Kljun, N., Morgenstern, K., & Nesic, Z. (2004). Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen- hazelnut forest in relation to net ecosystem production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126(3-4), 237-255.

Bianchi, S., Cahalan, C., Hale, S., & Gibbons, J. M. (2017). Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphone hemispherical photography. *Ecology and Evolution*, (October), 1-11. <https://doi.org/10.1002/ece3.3567>

Bolstad, P. V., and S.T. Gower. (1990). Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree Physiol.* 7:115-124.

Bonan, G., (2008). *Ecological Climatology*, second ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Bonfil, C. (1998). CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/31-fagac10m.pdf

- Breda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417.
- Breshears, D. D., & Barnes, F. J. (1999). Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland / forest continuum: a unified conceptual model, 465-478.
- Calder, I., R., Kidd, C., H., (1978). A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges. *Journal of Hydrology* 39 (3-4), 383-386.
- Chapin, F. S., Matson, P. a & Mooney, H. (2002). Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. System 21.
- Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston, M.A., (1991). Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area. *Agric. For. Meteorol.* 57, 107-128
- Chazdon, R. L., & Field, C. B. (1987). Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerised technique. *Oecologia*, 73(4), 525-532.
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1995). Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34(27), 6211-6222
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102(D24), 29429-29443. <https://doi.org/10.1029/97JD01107>
- Choler, P., Sea, W., Briggs, P., Raupach, M., & Leuning, R. (2010). Biogeosciences A simple ecohydrological model captures essentials of seasonal leaf dynamics in semi-arid tropical grasslands, 907-920.
- Díaz, G. M., & Lencinas, J. D. (2015). Enhanced Gap Fraction Extraction from Hemispherical Photography. *IEEE Geoscience and*

Remote Sensing Letters, 12(8), 1785-1789.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2425931>

Diaz, G. M., Lencinas, J., & del Valle, H. (1995). *Madera y bosques*. *Madera y bosques* (Vol. 20). Instituto de Ecología. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Englund SR, O'Brien JJ, Clark DB (2000) Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Can J For Res-Rev Can Rech For* 30:1999-2005

Fang, H., Liang, S., Townshend, J. R. & Dickinson, R. E. (2008). Spatially and temporally continuous LAI data sets based on an integrated filtering method: Examples from North America. *Remote Sens. Environ.* **112**, 75-93

Feldkirchner, D.C. and Gower, S.T. (2001). Using the LI-COR LAI-2000 to estimate leaf area index and light transmittance in forest canopies. Methodology papers series of the 4th International Conference on ILTER in East and Pacific Region, Ulaanbaata-Hatgal, Mongolia, 2001, pp. 12-14

Fortanelli-Martínez, J., García-Pérez, J. & Castillo-Lara, P. (2014). Estructura y composición de la vegetación del bosque de niebla de copalillos, San Luis Potosí, México. *Acta Botánica Mex.* **106**, 161-186

Frazer, G., Trofynow, J. & Lertzman, K. (1997). A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques.

Fregoso, A., A. Velázquez, G. Bocco y G. Cortéz. (2001). El enfoque de paisaje en el manejo forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México.

Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. 46:58-77.

Garduño-Monroy VH, Giordano N, Ávila-Olivera JA, *et al.* (2014) Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. In Vieyra A, Larrazabal A (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente*. UNAM Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Michoacán, México. pp. 197-222.

Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morissette, J.T., Weiss, M., Nickeson, J.E., Fernandes, R., Plummer, S., Shabanov, N.V., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Yang, W., (2008). Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *J. Geophys. Res.* 113, G02028

Glatthorn J, Beckschafer P (2014) Standardizing the Protocol for Hemispherical Photographs: Accuracy Assessment of Binarization Algorithms. *PLoS ONE* 9(11)

Goovaerts, P. and Chiang, C. N. (1993). Temporal persistence of spatial patterns for mineralizable 1199 HESSD 4, 1185-1214, 2007 Temporal stability of soil moisture spatial variability X. Zhou *et al.*, *Soil Science Society of American Journal*, 57, 372- 381.

Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M., (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 70, 29-51

Guevara-Escobar, A., Tellez, J., & Gonzalez-Sosa, E. (2005). Use of digital photography for analysis of canopy closure. *Agroforestry Systems*, 65(3), 175-185. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-0504-y>

Guzmán-Mendoza, R., G. Castaño-Meneses y M.C. Herrera-Fuentes. (2010). Variación espacial y temporal de la diversidad de hormigas en el Jardín Botánico del valle de Zapotitlán de las Salinas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80(2):427-435.

Harada, Y., and Takada, T. (1988). Optimal timing of leaf expansion and shedding in a seasonally varying environment. *Plant Species Biol.* 3: 89 -97.

Herbert, T. J. (1987). Area projections of fisheye photographic lenses. *Agric. For. Meteorol.* 39, 215-223

Hill, R. (1924). A lens for whole sky photographs. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50(211):227- 235.

Hopmans, J.W., Bristow, K.L., (2002). Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. *Adv. Agron.* 77, 103-183

INEGI. (2014). Guía para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, 5, 195.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Ito A, Saigusa N, Murayama S, Yamamoto S (2005) Modeling of gross and net carbon dioxide exchange over a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan: analysis of seasonal and interannual change. *Agric For Meteorol* 134:122-134

Jain, M., Kuriakose, G., & Balakrishnan, R. (2010). Evaluation of methods to estimate foliage density in the understorey of a tropical evergreen forest. *Current Science*, 98(4), 508-515.

Jarvis PG, McNaughton KG. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15, 1-49.

Jin M, Zhang DL (2002) Observed variations of leaf area index and its relationship with surface temperatures during warm seasons. *Meteorology and Atmospheric Physics* 80: 117-129.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and

hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>

Jury, W.A., and Tanner, C.B. (1975). Advection modification of the Priestley and Taylor evap- otranspiration formula. *Agronomy J* 67; 840-842

Kachanoshi, R. G. and de Jong, E. (1988). Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage, *Water Resour. Res.*, 24, 85-91.

Kikuzawa K (1983) Leaf survival of woody plants in deciduous broad-leaved forests. 1. Tall trees. *Canadian Journal of Botany* 61: 2133-2139.

Kirkham, M. B., Gardner, W. R., and Gerloff, G. C. (1972). Regulation of cell division and cell enlargement by turgor pressure. *Plant Physiol.* 49, 961-962

Kucharik, C.J., Norman, J.M., Gower, S.T., (1998). Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agric. For. Meteorol.* 11 (91), 69-88.

Le Roux, X., Sinoquet, H., Vandame, M., 1999. Spatial distribution of leaf dry weight per area and leaf nitrogen concentration in relation to local radiation regime within an isolated tree crown. *Tree Physiol.* 19, 181-188.

Leaf, M. (2011). Mapping leaf area index and canopy cover using hemispherical, 105-119.

Lieth, H. (1975). Modeling the primary productivity of the world. Pages 237-264 in H. Lieth and R. H. Whittaker, editors. *Primary productivity of the biosphere*. Springer-Verlag, New York, New York, USA.

Liu, Z., Jin, G., & Qi, Y. (2012). Estimate of leaf area index in an old-growth mixed broadleaved-korean pine forest in northeastern China. *PLoS ONE*, 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032155>

Mattoni, R., Longcore T. y V. Novotny. (2000). Environmental auditing arthropod monitoring for fine-scale habitat analysis: a case study of the El Segundo sand dunes. *Environmental Management* 25(4):445-452

McClain, M. E., Chícharo, L., Fohrer, N., Gaviño Novillo, M., Windhorst, W., & Zalewski, M. (2012). Training hydrologists to be ecohydrologists and play a leading role in environmental problem solving. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1685-1696. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1685-2012>

McPherson, E.G., Peper, P.J., (1998). Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees. *J. Arboric.* 24, 98-111.

McPherson, E.G., Peper, P.J., (1998). Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees. *J. Arboric.* 24, 98-111.

Medhurst, J. L., & Beadle, C. L. (2001). Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. *Tree Physiology*, 21(12-13), 989-999. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.989>

Miller JB (1967) A formula for average foliage density. *Aust J Bot* 15:141-144

Moreno, N. P. (1984). Glosario botánico ilustrado. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, México. 300 pp.

Muraoka H, Koizumi H (2005) Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest: implication to the ecosystem carbon gain. *Agric For Meteorol* 134:39-59

Muraoka H, Koizumi H (2009) Satellite ecology (SATECO)—linking ecology, remote sensing and micrometeorology, from plot to regional scale, for the study of ecosystem structure and function. *J Plant Res* 122:3-20

Muraoka, H. et al. (2010). Effects of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. *J. Plant Res.* 123, 563-576.

Muraoka, H., Saigusa, N., Nasahara, K. N., Noda, H., Yoshino, J., Saitoh, T. M., ... Koizumi, H. (2010). Effects of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. *Journal of Plant Research*, 123(4), 563-576. <https://doi.org/10.1007/s10265-009-0270-4>

Nagler, P., Cleverly, J., Lampkin, D., Glenn, E., Huete, A., Wan, Z. (2005). Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment* 94, 17-30.

Naithani, K. J., Baldwin, D. C., Gaines, K. P., Lin, H., & Eissenstat, D. M. (2013). Spatial Distribution of Tree Species Governs the Spatio- Temporal Interaction of Leaf Area Index and Soil Moisture across a Forested Landscape, 8(3), 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058704>

Nayegandhi, A., & Brock, J. C. (2009). Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management. *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88183-4>

Nemani R, Pierce L, Running S, Band L (1993) Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. *International Journal of Remote Sensing* 14: 2519-2534

Neumann, H. H., Den Hartog, G., & Shaw, R. H. (1989). Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall.

Agricultural and Forest Meteorology, 45(3-4), 325-345.
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90052-X)

Onchi-Ramuco, N.L. (2018). Caracterización de suelos con método directo e Indirecto en una microcuenca del sur de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 103 p

Pekin, B., & Macfarlane, C. (2009). Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing. *Remote Sensing*, 1(4), 1298-1320.
<https://doi.org/10.3390/rs1041298>

Pielke, R. A., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A. J., Zeng, X., & Denning, A. S. (1998). Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biology*, 4(5), 461-475. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00176.x>

Pires da Silva, A., Nadler, A., and Kay, B. D. (2001). Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone, *Soil Tillage Research*, 58, 207-218, 2001.

Pujolar, M.R., Salgado, N.E., Sánchez, O.S. y Vilaró, S.A. (2011). Estudio de la conductividad hidráulica saturada a distintas profundidades en un bosque de suelo volcánico en Morelia, centro de México. Tesis de Licenciatura Universidad de Barcelona, España, 99 pp.

Rich, P.M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sens. Rev.* 5, 13-29.

Ridler, T.W. Calvard, S. (1978). Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8(8), 630-632.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4310039>

Ridler, W., & Calvard, S. (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8, 260-263

Roblero Soto, A. (2013). Caracterización del microambiente lumínico en áreas bajo diferentes sistemas de manejo, utilizando fotografías hemisféricas. (Universidad Autónoma de Nuevo León).

Rodríguez, R., J. (2014). Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 83 p.

Schleppi, P., Thimonier, A. & Walthert, L. (2011). Estimating leaf area index of mature temperate forests using regressions on site and vegetation data. *For. Ecol. Manage.* 261, 601-610

Seiwa K. (1999) Changes in Leaf Phenology are Dependent on Tree Height in *Acer mono*, a Deciduous Broad-leaved Tree. *Annals of Botany* 83: 355-361.

Sprintsin, M., Karnieli, A., Berliner, P., Rotenberg, E., Yakir, D., & Cohen, S. (2007). The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the desert transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 109(4), 416-428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.020>

Stenberg, P., Nilson, T., Smolander, S., Voipio, P., (2003). Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 363-370.

Tagle, M. A. G., Pérez, J. J., & Himmelsbach, W. (2011). Impact of firewood extraction on leaf area index and canopy openness in mixed pine-oak forests in northeast Mexico. *Forstarchiv*, 82(1), 20-25. <https://doi.org/10.2376/0300-4112-81-20>

Takagi, K., Lin, H.S. (2011). Temporal evolution of soil moisture spatial variability in the Shale Hills catchment. *Vadose Zone J.* 10, 832-842.

Thimonier, A., Sedivy, I., & Schleppei, P. (2010). Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: A comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 543-562. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0353-8>

Tissue DT, Wright SJ (1995) Effect of Seasonal Water Availability on Phenology and the Annual Shoot Carbohydrate Cycle of Tropical Forest Shrubs. *Functional Ecology* 9: 518-527.

Turner, D.P., Acker, S.A., Means, J.E., Garman, S.L., (2000). Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands. *Forest Ecol. Manag.* 126, 61-76

Vachaud, G., Passerat de Silans, A., Balabanis, P., and Vauclin, M.: (1985). Temporal stability of spatially measured soil water probability density function, *Soil Science Society of American Journal*, 49, 822-828.

Vitasse Y, Delzon S, Dufrene E, Pontailleur JY, Louvet JM, et al. (2009) Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: ¿Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 735-744.

Walter, J. M, and Torquebiau, E. (2000). The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors. *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Life Sciences*, 323:

Watson, D.J., (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.* 11:41-76.

Welles, J.M., Cohen, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *J. Exp. Bot.* 302, 1335-1342

White MA, Running SW, Thornton PE (1999) The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evaporation over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int J Biometeorol* 42:139-145

Wiltshire, J.J.J., C.J. Wright, J.J. Colls, J. Craigon and M.H. Unsworth. (1996). CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/53-oleaclm.pdf

Zavala-Hurtado, J.A., P.L. Valverde, M.C. Herrera-Fuentes y A. Díaz-Solís. (2000). Influence of leaf-cutting ants (*Atta mexicana*) on performance and dispersion patterns of perennial desert shrubs in an Inter-tropical region of Central Mexico. *Journal of Arid Environments* 46(1):93-102.

Zhang Y, Chen JM, Miller JR (2005) Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agric For Meteorol* 133:166-181

Zhou, H. Lin, Q. Zhu. (2014). Temporal stability of soil moisture spatial variability at two scales and its implication for optimal field monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 2007, 4 (3), pp.1185-1214.

ANEXO

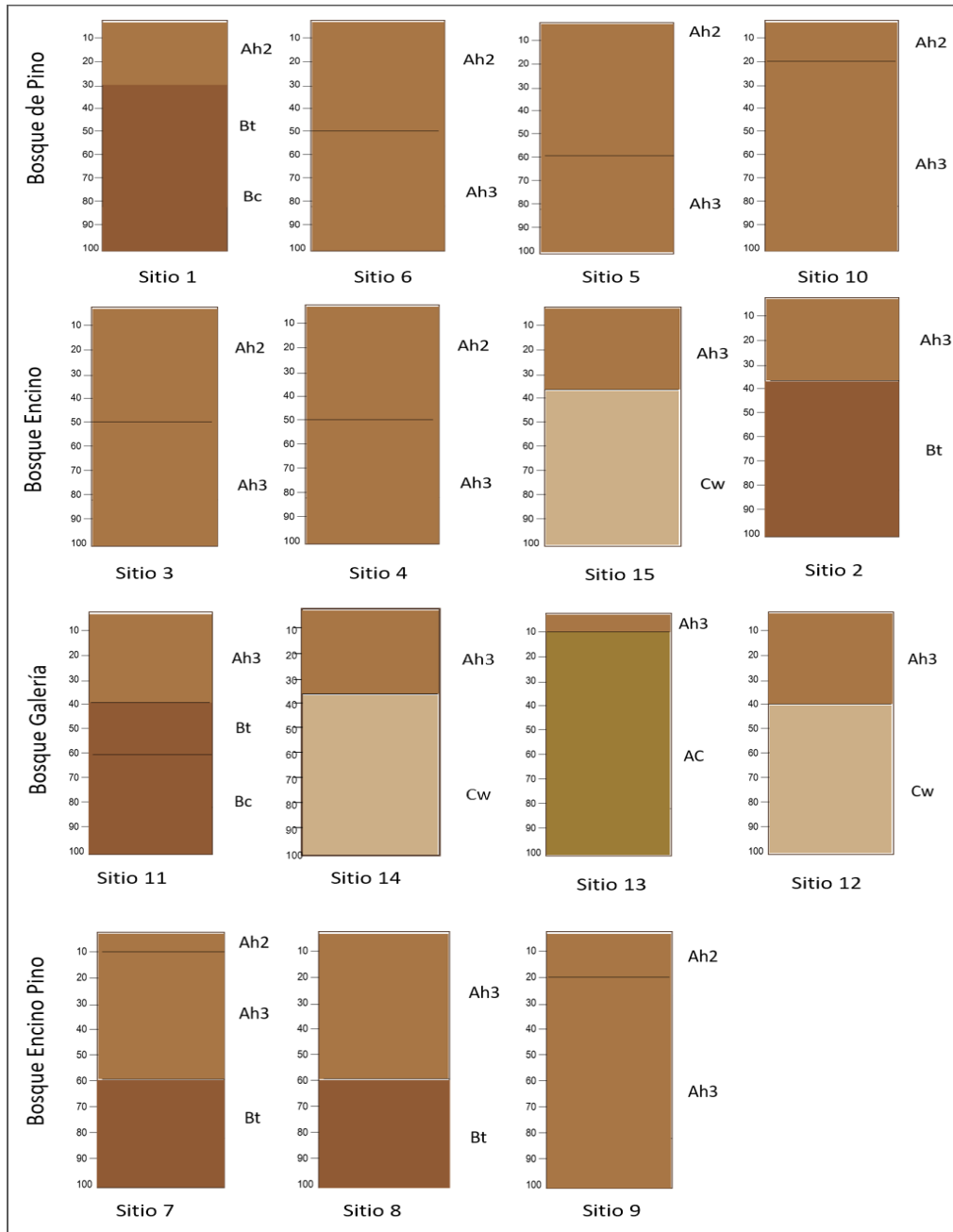


Figura 26. Características edáficas para cada uno de los sitios de medición de humedad edáfica. Obtenidos de datos Onchi-Ramuco (2018).

Clases texturales para los diferentes horizontes del perfil edáfico. Datos obtenidos del ANEXO (Onchi - Ramuco, 2018).

Horizonte	Clase textural (USDA)
Ah2	Arcillo limoso
Ah3	Arcillo limoso
Bt	Arcilloso
BC	Arcilloso
Bw	Arcillosos
AC	Franco arcillosos
Cw	Arcilloso