



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**EVAPOTRANSPIRACIÓN E INTERCAMBIO NETO  
DEL ECOSISTEMA EN UN BOSQUE BAJO  
MANEJO PARA PRODUCCIÓN MADERABLE**

MELISSA EDITH HIDALGO SÁNCHEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: “**Evapotranspiración e intercambio neto del ecosistema en un bosque bajo manejo para producción maderable**”, realizada por la alumna: **Melissa Edith Hidalgo Sánchez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
CIENCIAS FORESTALES

**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO**



---

DR. GREGORIO ÁNGELES PÉREZ.

**ASESORA**



---

DRA. FRANCISCA OFELIA PLASCENCIA ESCALANTE.

**ASESOR**



---

DR. ENRICO ARTURO YÉPEZ GONZÁLEZ.

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2020

**Este estudio fue financiado por el Programa de Paisajes Sostenibles de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos de América, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal de la USDA, proyecto “Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Forest Management in Mexico” (Acuerdo No. 12-IJ-11242306-033).**

# EVAPOTRANSPIRACIÓN E INTERCAMBIO NETO DEL ECOSISTEMA EN UN BOSQUE BAJO MANEJO PARA PRODUCCIÓN MADERABLE

Hidalgo Sánchez Melissa Edith, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2020.

## RESUMEN

En los últimos años se ha reconocido el papel que juegan los bosques dentro de los ciclos del agua y del carbono, ya que regulan los flujos de humedad atmosférica y acumulan grandes cantidades de carbono. Por tal razón, el entendimiento de estos procesos es vital para proponer alternativas para el uso y conservación de los bosques. El objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad de la evapotranspiración (ET) y del intercambio neto del ecosistema (INE), así como identificar los principales factores que los rigen. El estudio se llevó a cabo en un bosque templado bajo manejo forestal, ubicado en Zacualtipán, Hidalgo. Los datos de ET e INE se derivaron de mediciones continuas de flujos de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> realizadas con el método de *eddy covariance*. Simultáneamente se registraron datos de radiación, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, contenido de humedad del suelo y temperatura del suelo. Todas las mediciones se realizaron del 01 de octubre de 2017 al 30 de septiembre de 2018. La evapotranspiración total fue de 980 mm y el INE de 15.59 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La evapotranspiración fue menor en el periodo de "nortes" y no se encontraron diferencias significativas entre el periodo de lluvias y el de secas. En cambio, el INE fue mayor en el periodo de lluvias y no hubo diferencias significativas en el periodo de "nortes" y secas. Los resultados indicaron que la temperatura, el contenido de agua en el suelo, la radiación neta y el déficit de presión de vapor, explicaron la mayor parte de la variabilidad de la evapotranspiración (61%). Sin embargo, el déficit de presión de vapor, radiación neta y humedad relativa solo explicaron el 43% de la variabilidad en INE. Se recomienda realizar estudios posteriores que involucren mediciones a largo plazo para comprender mejor las interacciones entre la biosfera y la atmósfera y abrir nuevas perspectivas para identificar prácticas de manejo sostenibles de los bosques.

**Palabras clave:** covarianza de vórtices, evapotranspiración, balance de carbono, *Pinus patula*, productividad.

# EVAPOTRANSPIRATION AND NET ECOSYSTEM EXCHANGE IN FOREST UNDER MANAGEMENT FOR TIMBER PRODUCTION.

Hidalgo Sánchez Melissa Edith, M. en C.  
Colegio de Postgraduados. 2020

## ABSTRACT

In recent years the role of forests within the water and carbon cycles has been recognized, since they regulate atmospheric humidity changes and accumulate large amounts of carbon. For this reason, the understanding of these processes is vital to propose management options for the use and conservation of forests. The objective of this study was to analyze the variability of evapotranspiration (ET) and the net ecosystem exchange (NEE) and identify the main factors that influence these processes. The study was carried out in a temperate managed forest located in the region of Zacualtipán, Hidalgo, Mexico. The ET and NEE data were derived from continuous measurements of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes using the *eddy covariance* technique. Simultaneously, net radiation, air temperature, relative humidity, precipitation, soil moisture content and soil temperature data were recorded. All measurements came from October 1, 2017 to September 30, 2018. The total annual evapotranspiration was 980 mm and the NEE was 15.59 Mg C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Evapotranspiration was lower in the "cold front" season and no differences were found between the rainy and dry seasons. In contrast, the NEE was higher in the rainy season and no difference were found between dry and "cold front" seasons. Temperature, soil moisture, net radiation and vapor pressure deficit explained most of the variability of evapotranspiration (61%). However, the vapor pressure, net radiation and relative humidity deficit only explains the 43% of the NEE variability. Further studies are necessary to involve long-term measurements to better understand the interactions between the biosphere and the atmosphere and open-up new perspectives to identify sustainable management practices forests.

**Key words:** *eddy covariance*, evapotranspiration, carbon budget, *Pinus patula*, productivity.

## DEDICATORIA

...

*A mis padres, Ma. de la Luz y Víctor  
por ser ejemplo de trabajo y constancia  
y por enseñarme el valor de la humildad.*

*A mis hermanos, Vanessa, Juan y Rodrigo  
por el apoyo incondicional en todo momento.*

*A mis sobrinos y primos por alegrar mi vida  
y motivarme a ser mejor persona cada día.*

*A mis amigos y familia por los consejos  
y por estar presentes en todo momento.*

...

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento otorgado para mis estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, en especial al **Postgrado en Ciencias Forestales**, por la oportunidad de formarme, personal y académicamente, en tan prestigiosa institución.

Al **Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT)** por el apoyo económico para una estancia en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON, Campus Obregón).

Al **Dr. Gregorio Ángeles Pérez** por su orientación y dedicación en la dirección de este trabajo de investigación. Agradezco profundamente la confianza brindada para el desarrollo de este proyecto. Mi reconocimiento y admiración.

A la **Dra. Francisca Ofelia Plascencia Escalante** por sus valiosas y acertadas sugerencias para la mejora de la presente tesis.

Al **Dr. Enrico Arturo Yépez González** por compartir su experiencia, por sus valiosos comentarios y por su participación clave en el desarrollo de esta investigación.

A los **Dres. Josué Delgado y Zulia Sánchez (ITSON)** por el apoyo, las facilidades brindadas, y en especial por compartir sus conocimientos, los cuales contribuyeron sustancialmente en esta investigación.

A los **profesores del Postgrado en Ciencias Forestales** por compartir sus conocimientos y experiencias, e impulsarnos a mejorar y lograr nuestras metas.

Al equipo de trabajo de campo (**Benja, Zaira y Freddy**) por su colaboración e invaluable amistad.

Y a todas aquellas personas, dentro y fuera de la institución, que de alguna u otra manera contribuyeron en mi formación. **Mi más sincero agradecimiento.**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>vii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
2.1. General.....	4
2.2. Específicos .....	4
<b>3. HIPÓTESIS .....</b>	<b>4</b>
<b>4. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
4.1. Los ecosistemas forestales.....	5
4.2. El ciclo del agua.....	6
4.3. Evapotranspiración .....	7
4.3.1. Evaporación.....	7
4.3.2. Transpiración.....	8
4.3.3. Intercepción del dosel.....	8
4.3.4. Factores que afectan el proceso de evapotranspiración .....	8
4.4. El Balance de energía.....	10
4.5. El ciclo del carbono.....	11
4.6. Balance de carbono .....	13



4.6.1.	Productividad Primaria Bruta .....	13
4.6.2.	Productividad Bruta del Ecosistema .....	13
4.6.3.	Respiración del ecosistema .....	13
4.6.4.	Productividad Primaria Neta .....	14
4.6.5.	Productividad Neta del Ecosistema .....	14
4.6.6.	Intercambio Neto del Ecosistema .....	14
4.7.	Factores que afectan la fijación de carbono .....	15
4.8.	<i>Eddy covariance</i> .....	16
<b>5.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
5.1.	Área de estudio.....	17
5.2.	Sistema <i>eddy covariance</i> y sensores meteorológicos .....	19
5.3.	Procesamiento de datos .....	21
5.3.1.	Recolección de datos .....	21
5.3.2.	Procesamiento de datos .....	21
5.3.3.	Control de calidad de datos .....	22
5.3.4.	Relleno de datos faltantes (Gapfilling) .....	22
5.3.5.	Partición de flujo de CO <sub>2</sub> .....	24
5.3.6.	Balace de energía.....	24
5.3.7.	Área de influencia (Footprint).....	25
5.4.	Estimación de la Productividad Primaria Neta con datos de inventario .....	25
5.4.1.	Fuste y ramas .....	25
5.4.2.	Hojarasca .....	26
5.4.3.	Raíces .....	26

5.5.	Análisis de datos.....	27
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>28</b>
6.1.	Control de calidad.....	28
6.2.	Condiciones meteorológicas.....	29
6.3.	Balance de energía.....	31
6.3.1.	Distribución de la radiación neta.....	31
6.4.	Evapotranspiración.....	34
6.4.1.	Estimación de evapotranspiración.....	34
6.4.2.	Respuesta de la evapotranspiración a condiciones meteorológicas.....	35
6.4.3.	Variación estacional de la evapotranspiración.....	36
6.5.	Balance de carbono.....	37
6.5.1.	Estimación de los componentes del balance de carbono.....	37
6.5.2.	Controles ambientales.....	40
6.5.3.	Variación estacional.....	41
6.6.	Estimación de la Productividad Primaria Neta.....	41
<b>7.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>43</b>
7.1.	Balance de energía.....	43
7.2.	Evapotranspiración.....	44
7.3.	Balance de carbono.....	47
7.4.	Interacción agua CO <sub>2</sub> .....	48
7.5.	Productividad Primaria Neta.....	49
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>52</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>66</b>
A1 Procedimiento en línea para el relleno de datos faltantes.....	66
A2 Procedimiento en línea para obtener el área de influencia .....	68
B1 PPN EN FUSTE Y RAMAS .....	70
B2. PPN EN RAÍCES GRUESAS .....	71
B3. PRODUCCIÓN DE HOJARASCA .....	72

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 5.4.1 Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.....	26
Cuadro 6.2.1 Valores medios mensuales, de octubre de 2017 a septiembre de 2018, de las variables biometeorológicas en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....	29
Cuadro 6.3.1 Radiación neta y su contribución relativa para cada flujo en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....	33
Cuadro 6.4.1 Tasas de evapotranspiración por hora y por día en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.....	35
Cuadro 6.4.2 Variación estacional de la evapotranspiración y principales factores de control en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....	37
Cuadro 6.5.1 Promedio diario por mes, de los componentes del balance de carbono en un bosque bajo manejo, en la región forestal de Zacualtipán Hgo. ....	38
Cuadro 6.5.2 Variación estacional del Intercambio neto del ecosistema y principales factores de control en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....	41
Cuadro 6.6.1 Estadísticas del incremento en el almacén de carbono, estimado a partir de mediciones de inventario, para cada componente, en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....	42
Cuadro 7.2.1 Variación temporal de la precipitación total anual en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.....	46

<b>Cuadro B.1.1 Estimación de carbono almacenado en fuste y ramas en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán Hgo.....</b>	<b>70</b>
<b>Cuadro B.1.2 Estimación de carbono almacenado en raíces en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....</b>	<b>71</b>
<b>Cuadro B.1.3 Estimación de carbono almacenado en hojarasca en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.2.1 Representación del ciclo hidrológico sobre la superficie terrestre</b> .....	<b>7</b>
<b>Figura 4.5.1 Esquema general de los flujos de carbono entre la atmósfera y el bosque.</b> .....	<b>12</b>
<b>Figura 5.1.1 Ubicación del sitio de estudio.</b> .....	<b>18</b>
<b>Figura 5.1.2 Diseño de las parcelas permanentes de muestreo y distribución de las trampas de hojarasca.</b> .....	<b>19</b>
<b>Figura 5.2.1 Esquema de la distribución del sistema eddy covariance.</b> .....	<b>20</b>
<b>Figura 6.1.1 Resumen de control de calidad de los flujos de agua y CO<sub>2</sub> medidos en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.</b> .....	<b>28</b>
<b>Figura 6.2.1 Variación temporal de la temperatura del aire (Ta), temperatura del suelo (Ts), déficit de presión de vapor (DPV), precipitación (P) y contenido de agua en el suelo (CAS), en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura 6.3.1 Cierre de balance de energía para la entrada de frentes fríos “nortes” (a), periodo de secas (b), época de lluvia (c) y anual (d), en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. Las pendientes de regresión indican el buen cierre de balance de energía.</b> .....	<b>31</b>
<b>Figura 6.3.2 Variación temporal de la radiación neta (Rn), calor sensible (H), calor latente (LE) y de calor del suelo (G) de octubre de 2017 a septiembre de 2018 en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.</b> .....	<b>32</b>
<b>Figura 6.4.1 Tendencia de la evapotranspiración (ET) de octubre de 2017 a septiembre de 2018 en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.</b> .....	<b>34</b>
<b>Figura 6.4.2 Evapotranspiración y principales factores de control durante las temporadas anuales en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.</b> .....	<b>36</b>

<b>Figura 6.5.1 Tendencia de la Productividad Primaria Bruta en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 6.5.2 Tendencia de la respiración del ecosistema en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 6.5.3 Tendencia del intercambio neto del ecosistema en un bosque bajo manejo forestal en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. Valores negativos representan absorción de CO<sub>2</sub> por el ecosistema. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 7.4.1 Tendencia de la eficiencia de uso de agua, calculada con el Intercambio neto del ecosistema y con la Productividad Primaria Bruta de octubre de 2017 a septiembre de 2018, en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán Hgo. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura A.1.1 Especificaciones del área de estudio y métodos para el gapfilling con la herramienta en línea REddyProc ....</b>	<b>66</b>
<b>Figura A.1.2 Especificaciones del área de estudio y métodos para el gapfilling con la herramienta en línea REddyProc. ....</b>	<b>67</b>
<b>Figura A.2.1 Ejemplo para cargar el archivo de entrada e ingresar las especificaciones del área de estudio para el análisis del área de influencia. ....</b>	<b>69</b>
<b>Figura A.2.2 Ejemplo del formato de datos de entrada para el análisis del área de influencia ....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren aproximadamente el 30% (~42 millones de km<sup>2</sup>) de la superficie total de la Tierra y se distribuyen a través de zonas templadas, tropicales y boreales (Kindermann *et al.*, 2008). En México, aproximadamente el 71.2% (138.4 millones de hectáreas) de la superficie del territorio nacional (194.3 millones de hectáreas), está cubierta por algún tipo de vegetación forestal, de los cuales el 24.6% (34 millones de hectáreas) corresponde a bosques templados (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2017).

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel esencial dentro del balance energético, el ciclo del agua y del carbono, ya que tienen la capacidad de capturar y redistribuir la energía solar, regulan los flujos de humedad atmosférica y capturan grandes cantidades de CO<sub>2</sub> (Ellison *et al.*, 2017; Ussiri y Lal, 2017). De la energía solar que llega a la superficie terrestre una parte es reflejada hacia la atmósfera, y el resto queda disponible en la superficie para impulsar los procesos naturales de los ecosistemas, denominándose radiación neta (Huryna y Pokorný, 2016). La radiación neta se distribuye en flujo de calor sensible, flujo de calor del suelo y flujo de calor latente. Este último proporciona la energía para que el proceso de evapotranspiración se realice (Bonan, 2016).

La evapotranspiración es la suma de vapor de agua liberados por el suelo y la vegetación, hacia la atmósfera (Biederman *et al.*, 2016; Law *et al.*, 2002). Gran parte de este proceso está directamente asociada a la productividad del ecosistema, ya que la asimilación de CO<sub>2</sub>, durante la fotosíntesis y la transpiración, están reguladas principalmente por la dinámica de apertura y cierre de los estomas (Canny, 1998). La evapotranspiración y la captura de carbono varían con el clima, el tipo y estructura de la vegetación, la etapa fenológica y se ve directamente afectada por las estrategias de manejo de la tierra y el cambio climático (Liu y El-Kassaby, 2018). Por lo tanto, los cambios en la cobertura del suelo y los factores del clima, afectan directamente el ciclo hidrológico regional, el balance de energía y las funciones del ecosistema, incluyendo la evapotranspiración y la asimilación de carbono (Liu *et al.*, 2018).



El manejo de los recursos forestales en México, se ha orientado a desarrollar prácticas silvícolas que permitan maximizar la producción de madera (Perez-Verdin *et al.*, 2018). Estas prácticas mejoran la productividad de los ecosistemas, además contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero, al compensar el 30% de las emisiones globales de carbono proveniente de combustible fósiles y el cambio de uso de la tierra (Ussiri y Lal, 2017). Sin embargo, varios estudios han reportado que la implementación de estas actividades, causan un impacto negativo en la regulación de los flujos de agua (Monárrez-González *et al.*, 2018).

A pesar de la importancia de entender la evapotranspiración y la productividad de los bosques, las mediciones directas a escala de paisaje solo han sido posibles en las últimas décadas (Wilson y Baldocchi, 2000; Baldocchi, 2019) y, en los últimos años, para el caso de México. Generalmente las estimaciones de evapotranspiración en ecosistemas forestales, han sido derivadas como un residuo del balance hídrico (Özhan *et al.*, 2010). También es común que la evapotranspiración se considere como una proporción de la evapotranspiración potencial; y por lo tanto se calcule a partir de información meteorológica obtenida en estaciones fijas y utilizando numerosos métodos directos, teóricos y empíricos (García *et al.*, 2008). Estos enfoques tienden a ser relativamente económicos; sin embargo, las estimaciones de evapotranspiración derivadas tienen una capacidad limitada para informar sobre los controles biofísicos en escalas de tiempo más cortas (Baldocchi y Ryu, 2011). En el caso de la productividad forestal, esta suele estimarse usando mediciones de campo, en intervalos de tiempo, para rastrear el cambio de masa dentro de las reservas de carbono. Actualmente existen otros métodos más sofisticados y de mayor precisión, que se basan en el análisis de turbulencias para determinar la evapotranspiración real y el intercambio neto de CO<sub>2</sub>, entre ellos el método de *eddy covariance*. Este método proporciona mediciones directas y continuas del intercambio de energía, dióxido de carbono y vapor de agua, entre un ecosistema y la atmósfera (Baldocchi, 2003; Aubinet *et al.*, 2012). Además, para las mediciones de CO<sub>2</sub>, existe la posibilidad de derivar la producción primaria bruta (PPB) y la respiración del ecosistema (Reco) (Reichstein *et al.*, 2005; Lasslop *et al.*, 2010), lo que

permite una mejor interpretación de los flujos en términos de procesos del ecosistema (Papale, 2015).

A nivel global, diversos estudios han informado que el reparto de energía y la evapotranspiración tienen variaciones estacionales (Tsuruta *et al.*, 2016; Sanwangsri *et al.* 2017; Mo *et al.*, 2018) , interanuales (Miyazaki *et al.*, 2014) y entre ecosistemas (Brümmer *et al.*, 2012; Cristiano *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2018). En México los estudios realizados sobre el intercambio de agua y energía, entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera son limitados. En su mayoría, estos se centran en matorrales y bosques tropicales caducifolios en las zonas áridas y semi áridas del país (Martínez-Yrizar *et al.*, 2017) . La mayoría de estas investigaciones se han centrado en tratar de comprender la influencia de la precipitación (Perez-Ruiz *et al.*, 2010), factores topográficos (Berry *et al.*, 2016), diferentes coberturas de vegetación (Holwerda *et al.*, 2016) y el papel de la neblina (Alvarado-Barrientos *et al.*, 2014) en la dinámica hidrológica y el intercambio de energía. En el caso de bosques templados, este estudio, es el primer reporte en México de evapotranspiración e intercambio de CO<sub>2</sub>, basadas en mediciones continuas de turbulencia. Comprender la variabilidad de estos procesos, sus principales mecanismos de control y la capacidad de captura de carbono del ecosistema, proporcionará bases sólidas para abordar los desafíos del cambio climático y los efectos de las decisiones para el manejo forestal sostenible.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. General

Determinar la evapotranspiración anual y el intercambio neto del ecosistema, en un bosque bajo manejo forestal, para la producción maderable en Zacualtipán, Hidalgo.

### 2.2. Específicos

- Estimar la evapotranspiración anual y el Intercambio neto del ecosistema en un bosque bajo manejo forestal, utilizando el método de *eddy covariance*.
- Evaluar que variables meteorológicas controlan la evapotranspiración y el intercambio neto del ecosistema, en un bosque bajo manejo forestal para la producción maderable, en Zacualtipán, Hidalgo.
- Analizar la variabilidad estacional de la evapotranspiración y el intercambio neto de carbono, en un bosque bajo manejo forestal para la producción maderable en Zacualtipán, Hidalgo.
- Comparar las estimaciones del Intercambio neto del ecosistema con la Productividad Primaria Neta obtenida con mediciones de campo.

## 3. HIPÓTESIS

- La evapotranspiración representa del 70 al 90% de la precipitación.
- Considerando las características climáticas de la región donde se localiza el sitio de estudio, se espera que la variación de la evapotranspiración y el intercambio neto del ecosistema sea estacional. Además, se podrán encontrar tres estaciones marcadas: la época de sequía (marzo a junio), el periodo de lluvias (julio a octubre) y durante el periodo de “nortes” (noviembre a febrero).

- Debido al vínculo entre la transpiración y la asimilación de carbono la evapotranspiración y el intercambio neto del ecosistema presentan una tendencia similar en su variación anual.
- La Productividad Primaria Neta derivada de mediciones de inventario será similar con las mediciones del Intercambio neto del ecosistema obtenidas con el método *eddy covariance*.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Los ecosistemas forestales

Los bosques desempeñan un papel importante en la regulación del clima, a través del intercambio de energía, agua y dióxido de carbono con la atmósfera (Bonan, 2016). Algunas de las características que diferencian a los bosques de otras superficies terrestres y por las que se le atribuye su importancia dentro de los balances de energía agua y carbono se describen a continuación:

**Rugosidad:** La cubierta forestal y las copas desiguales, en el dosel de los bosques, hacen que la superficie del suelo tenga una rugosidad mayor. La rugosidad es un parámetro que influye en el perfil vertical de la velocidad del viento. A medida que la rugosidad aumenta provoca turbulencias más fuertes y facilita la transferencia de agua de la superficie terrestre hacia la atmósfera (Marreno-Santana, 2011).

**Albedo:** Los bosques influyen en la cantidad de energía solar de la superficie terrestre, a través del albedo. Los bosques generalmente tienen un albedo superficial bajo. Esto significa que estos ecosistemas tienen una alta capacidad para absorber energía (Huryna y Pokorný, 2016).

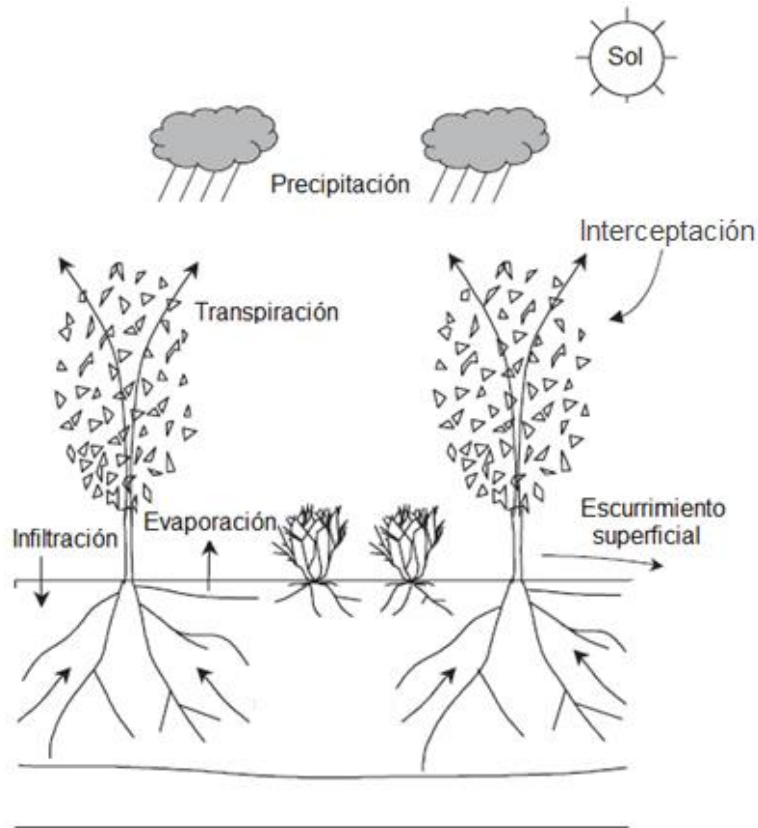
**Raíces profundas:** La gran cantidad de área foliar y biomasa, en combinación con raíces más profundas pueden interceptar parte de la precipitación y transferir más agua del suelo a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Estos sistemas de enraizamiento profundos les permiten extraer agua de los depósitos de humedad del suelo para satisfacer la demanda de agua de la superficie foliar (Sun y Liu, 2013).

Capacidad de infiltración: Los suelos forestales tienen mayor capacidad de infiltración que los suelos de otro tipo de vegetación. Los suelos forestales tienen un alto contenido de materia orgánica, derivada de la hojarasca de la planta que cae sobre el suelo y las raíces muertas debajo del suelo que conducen a altas actividades de los organismos del suelo, alta porosidad del suelo y mayor conductividad hidráulica (Sun y Liu, 2013).

Capacidad para almacenar carbono: Durante las últimas décadas los bosques han sido reconocidos por su capacidad para almacenar carbono (Pan *et al.*, 2011). Los bosques tienden a acumular carbono con el tiempo, absorbiendo dióxido de carbono de la atmósfera y almacenándolo como carbono en la biomasa viva, la materia orgánica muerta y el suelo mineral (SOCCR2, 2018). De ahí su importancia en la mitigación del cambio climático (Bonan, 2008). Se dice que los ecosistemas forestales son el sumidero de carbono terrestre más grande en la Tierra. El manejo de estos recursos ha sido reconocido como una estrategia viable para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Canadell y Schulze 2014).

#### **4.2. El ciclo del agua**

El ciclo del agua comienza cuando el agua abandonada la atmósfera y cae a la superficie de la Tierra como precipitación. Del agua que precipita, no toda llega al suelo, una parte se intercepta en la vegetación y queda retenida temporalmente, hasta que se evapora. Parte del agua líquida que llega al suelo se infiltra. Cuando la capacidad de infiltración del suelo se excede, el agua se acumula en la superficie del suelo. Dependiendo de las propiedades morfológicas del suelo, parte del agua puede fluir (escurrimiento superficial), otra parte puede infiltrarse más tarde y una parte del volumen de agua puede evaporarse. El agua infiltrada es retenida en el suelo, en la zona no saturada, entre la superficie del suelo y la capa freática. El agua almacenada en el suelo finalmente es devuelta a la atmósfera a través de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Cuando las condiciones son favorables, este vapor de agua se condensa para formar nubes y eventualmente precipitación para reponer el agua del suelo y así comenzar el ciclo nuevamente (**Figura 4.2.1**) (Bonan, 2016; Novak, 2012; Yan, 2019).



**Figura 4.2.1** Representación del ciclo hidrológico sobre la superficie terrestre  
Fuente: Adaptado de Bonan (2016)

### 4.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es uno de los componentes de mayor reconocimiento del ciclo hidrológico de los bosques y se define como una combinación de dos procesos separados, evaporación del suelo y transpiración, los cuales ocurren simultáneamente en la naturaleza (Allen *et al.*, 2006). Aunque en los ecosistemas forestales también se suele incluir la evaporación de la interceptación del dosel (Sun *et al.*, 2016).

#### 4.3.1. Evaporación

La evaporación es un proceso físico en el que el agua cambia de fase, de la fase líquida a la fase gaseosa. El agua puede evaporarse si sus moléculas tienen suficiente energía para la transición de fase (Novák, 2012)

#### 4.3.2. *Transpiración*

La transpiración es la evaporación del agua que se mantiene interna en las plantas. El agua se transporta a través de las plantas desde el suelo hasta las hojas a lo largo de un continuo de disminución del potencial hídrico y finalmente es liberado hacia la atmósfera. Cuando las plantas cubren una pequeña porción de la superficie, la evaporación es el flujo dominante. La transpiración se convierte más importante a medida que aumenta la cubierta vegetal. Sin embargo, es difícil distinguir la evaporación de la transpiración, y los dos términos son combinados en evapotranspiración (Bonan, 2016).

#### 4.3.3. *Intercepción del dosel*

La intercepción del dosel, se refiere a la fracción de la precipitación que cae en la superficie del dosel y por lo tanto no llega al suelo. Esta fracción puede variar del 10 al 50% de la precipitación, según la densidad de la vegetación (Bonan, 2016).

#### 4.3.4. *Factores que afectan el proceso de evapotranspiración*

Los procesos de evapotranspiración en bosques son bastante complejos debido a las diversas interacciones dentro del ecosistema forestal (Canny, 1998). De tal manera que la evapotranspiración tiende a cambiar considerablemente debido al tipo de vegetación, la etapa fenológica, las características del suelo y las condiciones climáticas. Además, se ve directamente afectada por las estrategias de gestión de la tierra y el cambio climático (Mu *et al.*, 2007; Domec *et al.*, 2012; Liu y El Kassaby, 2018). Los factores climáticos que influyen en la evapotranspiración incluyen la radiación solar, precipitación, velocidad del viento y temperatura (Pan *et al.*, 2015).

La radiación solar proporciona la energía para romper los enlaces que mantienen unidas las moléculas de agua en estado líquido. Cuando los enlaces se rompen, las moléculas de agua individuales ingresan a la atmósfera circundante como vapor (Fisher *et al.*, 2011).

La capacidad del aire para eliminar el agua de la superficie de evaporación también es importante (Novák, 2012). Esto está relacionado con la humedad del aire y la velocidad del viento (Bonan, 2016). Es posible que las moléculas de agua no puedan ingresar a la atmósfera si ésta ya está saturada de agua o si no hay viento para facilitar la transferencia de las moléculas de agua hacia la atmósfera. Si la atmósfera no está saturada y hay agua disponible en la superficie y suficiente viento para permitir la transferencia de vapor de agua de la superficie a la atmósfera, se deduce que la evapotranspiración aumentará con el aumento de la energía provista (Fisher *et al.*, 2011).

La evapotranspiración se ve afectada por la precipitación al influir en la humedad de la superficie y del suelo (Wilson y Baldocchi, 2000). El tipo de suelo y su contenido de agua también regulan la evapotranspiración (Allen *et al.*, 2011). Las propiedades del suelo, como la textura y la estructura, gobiernan la distribución del tamaño de poro, que dicta el almacenamiento total de agua, la capacidad de retención de agua disponible y el movimiento del agua en el suelo. En términos generales, los suelos ricos en arcilla tienen el mayor espacio de poros, de ahí la mayor capacidad total de retención de agua. Sin embargo, la capacidad total de retención de agua no describe la cantidad de agua disponible para las plantas, o qué tan libremente el agua drena en el suelo. Estos procesos se rigen por la energía potencial. (O'Geen, 2013)

El agua se almacena y redistribuye dentro del suelo en respuesta a las diferencias en la energía potencial. Un gradiente de energía potencial dicta la redistribución y las pérdidas de humedad del suelo, donde el agua se mueve de áreas de energía de alto a bajo potencial (la atmósfera tiene el potencial hídrico más bajo). Los suelos cerca de la saturación o saturados, generalmente muestran potenciales de agua cercanos a 0 MPa. Los potenciales de agua negativos surgen a medida que el suelo se seca, lo que resulta en succión o tensión del agua, lo que permite que el suelo retenga agua con facilidad (O'Geen, 2013).

El tipo de vegetación también es importante. Las plantas regulan la apertura y el cierre de sus estomas para minimizar la pérdida de agua y al mismo tiempo, maximizar la absorción de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis (Fisher *et al.*, 2011).



#### 4.4. El Balance de energía

La evapotranspiración es el consumidor más importante de energía, creando el vínculo entre el ciclo del agua y los ciclos de energía de la Tierra. La energía solar es la principal fuente que impulsa los procesos naturales de los ecosistemas (Huryna y Pokorný, 2016). La energía solar impulsa el ciclo hidrológico a través de la transferencia de agua desde la superficie terrestre a la atmósfera, es decir, a través de la evapotranspiración (Chapin *et al.*, 2012). Se estima que más de la mitad de la energía solar absorbida por las superficies terrestres se utiliza para evaporar el agua (Trenberth *et al.*, 2009).

De la energía solar que llega a la superficie terrestre una parte es reflejada hacia la atmósfera y la demás queda disponible en la superficie terrestre y se le conoce como radiación neta ( $R_n$ ). Esta energía se distribuye principalmente en flujo de calor sensible ( $H$ ), flujo de calor latente ( $LE$ ), flujo de calor del suelo ( $G$ ). Estos componentes conforman la ecuación de balance de energía (Ecuación 1) y sus unidades se expresan generalmente en  $W\ m^{-2}$  (Novák, 2012).

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

Por convención a estos flujos se les asignan signos positivos o negativos para denotar su dirección: signos positivos indican aportación de energía a la superficie vegetal y negativos, cuando los flujos que salen de la superficie.

- El flujo de calor sensible, es el calor que se consume para calentar el aire cerca del dosel del bosque (Sun *et al.*, 2016) su medición es compleja porque incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie (Allen *et al.* 2006).
- El flujo de calor latente, es la energía utilizada para vaporizar el agua, por lo que este componente representa la evapotranspiración en unidades de energía (Fisher *et al.*, 2011).

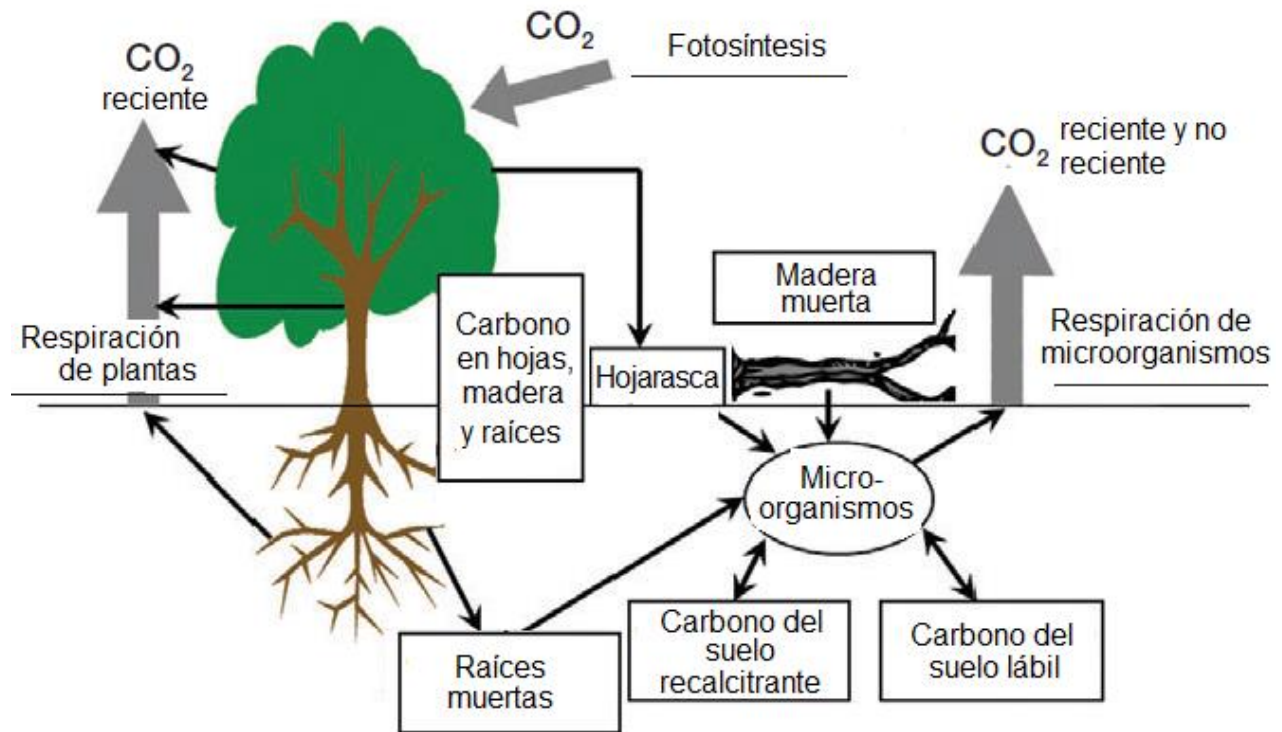
- El flujo de calor del suelo es la energía que se utiliza para calentar el suelo. Este flujo tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría (Allen *et al.*, 2006). En condiciones de dosel cerrado es insignificante, pero se vuelve más significativo cuando el índice de área foliar se reduce por perturbaciones como los aclareos o la cosecha (Gholz y Clark, 2002).

En la ecuación no se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado por las plantas, o la energía utilizada en procesos metabólicos. Estos términos pueden ser considerados como despreciables porque solo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar a comparación con los otros componentes (Allen *et al.*, 2006).

El carbono es otro de los elementos que está estrechamente vinculado con los ciclos del agua y de energía por medio de la fotosíntesis. La fotosíntesis, es el proceso por el cual el carbono ingresa a los ecosistemas, en dicho proceso se utiliza energía solar (la radiación visible del espectro) para reducir el CO<sub>2</sub> en compuestos orgánicos que contienen carbono y son transferidos a los componentes dentro del árbol y el ecosistema (Chapin *et al.*, 2002).

#### **4.5. El ciclo del carbono**

El ciclo de carbono forestal involucra cuatro grandes reservorios: la atmósfera, el suelo, la biomasa y los productos cosechados (Loustau y Rambal, 2010). El ciclo comienza cuando las plantas asimilan el CO<sub>2</sub> a través del proceso de fotosíntesis (Waring y Running, 1998). Durante este proceso, las hojas capturan la energía solar y convierten el CO<sub>2</sub> y el agua en azúcares. Por lo general, aproximadamente la mitad de los productos fotosintéticos generados son usados por las plantas en respiración para el mantenimiento de las células vivas, y utilizan la otra mitad en la producción de nuevas estructuras como hojas, madera y raíces. A medida que los árboles crecen, pierden las hojas, renuevan sus raíces y algunos mueren. Los microorganismos descomponen este material muerto, provocando que una parte del carbono asimilado, vuelva nuevamente a la atmósfera y otra permanezca en el suelo como materia orgánica (Ryan *et al.*, 2010).



**Figura 4.5.1** Esquema general de los flujos de carbono entre la atmósfera y el bosque.  
Fuente: Adaptado de Ryan y Law (2005)

Los procesos naturales y prácticas de manejo alteran la estructura y composición de la vegetación del sitio y por lo tanto el ciclo del carbono se modifica. La mayoría de las prácticas forestales implican cortar parte de la vegetación existente en el sitio, ya sea para reducir la competencia o para cosecha comercial. En ambos casos, parte de la biomasa se extrae del sitio y se convierte en algún producto. Pero, la biomasa restante (raíces, hojas, ramas, etc) por lo general permanece en el sitio para ser degradada por los microorganismos. La tasa de descomposición de la biomasa muerta dependerá de la composición química de los tejidos muertos y de las condiciones ambientales (por ejemplo, las bajas temperaturas, las condiciones secas y las inundaciones retardan la descomposición) (Intergovernmental Panel on Change Climatic [IPCC], 2001; Gorte, 2009).

## **4.6. Balance de carbono**

El potencial de secuestro de carbono de los ecosistemas terrestres depende del tipo y la condición del ecosistema. También son importantes las condiciones del sitio, incluido el clima y los suelos, las perturbaciones naturales y el manejo. Para el análisis de un presupuesto de carbono, se deben reconocer los siguientes términos (IPCC, 2006).

### *4.6.1. Productividad Primaria Bruta*

La Productividad Primaria Bruta (PPB) se refiere a la cantidad total de carbono fijado en el proceso de fotosíntesis por las plantas en un ecosistema (Kirschbaum *et al.*, 2001). Las plantas usan parte de esta energía para su metabolismo, respiración celular y para su crecimiento (Chapin *et al.*, 2002).

### *4.6.2. Productividad Bruta del Ecosistema*

La Productividad Bruta del Ecosistema (PBE) incluye la PPB más el componente de fotorrespiración, exudados de la raíz y compuestos volátiles biogénicos.

### *4.6.3. Respiración del ecosistema*

La respiración del ecosistema (Reco) involucra la suma de la respiración autotrófica (Ra) y respiración heterotrófica (Rh). La respiración autotrófica se refiere a la pérdida del carbono fijado por la fotosíntesis, debido al metabolismo interno de la planta. La pérdida de carbono por respiración autotrófica, generalmente representa aproximadamente el 50% del carbono fijado por las plantas. La respiración heterotrófica se refiere al carbono perdido por los organismos del suelo. Estos microorganismos son los encargados de la descomposición de la materia orgánica que llega al suelo por la caída de hojarasca, la exudación de las raíces, los organismos muertos. También incluye la liberación de carbono en la descomposición de árboles muertos en pie y material leñoso caído (Kirschbaum *et al.*, 2001).

#### 4.6.4. Productividad Primaria Neta

La Productividad Primaria Neta (PPN), es la ganancia neta de carbono de las plantas, es decir, el equilibrio entre el carbono ganado por la Productividad Primaria Bruta y el carbono liberado por la respiración autotrófica (Chapin *et al.*, 2002).

$$PPN = PPB - Ra \quad (2)$$

#### 4.6.5. Productividad Neta del Ecosistema

La Productividad Neta del Ecosistema es una medida de la cantidad de carbono disponible para la acumulación en un ecosistema durante un periodo de tiempo determinado (Chapin *et al.*, 2006). Es decir, refleja la diferencia entre la Productividad Primaria Neta (PPN) y la respiración heterotrófica (Rh). O lo que es lo mismo, la diferencia entre la Productividad Primaria Bruta (PPB) y la respiración total del ecosistema (Reco)

$$PNE = PPN - Rh \quad (3)$$

$$PNE = PPB - Reco \quad (4)$$

Otra manera de obtener la PNE es intercambio neto del ecosistema (INE).

#### 4.6.6. Intercambio Neto del Ecosistema

El equilibrio de carbono que se intercambia entre un ecosistema forestal y la atmósfera es el Intercambio neto del ecosistema (INE). Este puede considerarse como el flujo “visto” desde una torre o un avión sobre el ecosistema (Jung *et al.*, 2010). El Intercambio neto del ecosistema es el flujo neto inorgánico de carbono (CO<sub>2</sub>) entre el ecosistema y la atmósfera. INE se ha utilizado como una aproximación a corto plazo de la PNE (Baldocchi, 2003). Sin embargo, INE difiere de PNE al omitir ganancias y pérdidas no atmosféricas de carbono inorgánico, como la pérdida por lixiviación de los ecosistemas terrestres de carbono inorgánico disuelto derivado de la respiración. El INE se acerca al valor de PNE, cuando el flujo de la Reco es pequeño (Chapin *et al.*, 2006).

Además, un signo positivo en el INE representa la transferencia de carbono del ecosistema a la atmósfera y los valores negativos en el intercambio neto del ecosistema representan flujos de la atmósfera al ecosistema. En cambio, en la PNE un signo positivo indica la transferencia de carbono de la atmósfera al ecosistema y un signo negativo es una transferencia de carbono del ecosistema a la atmósfera.

#### **4.7. Factores que afectan la fijación de carbono**

La capacidad de los bosques para absorber y almacenar carbono está influenciada por muchos factores biofísicos. Estos incluyen la energía solar recibida, la temperatura, la humedad, las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico y la disponibilidad de nutrientes. Además de la edad del rodal, la estructura y composición de especies (Pardos-Carrión, 2004; Bonan, 2016).

El aumento de la temperatura y de las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, podrían aumentar la productividad de los bosques. Sin embargo, la magnitud de estos efectos dependerá de la fertilidad del suelo, en especial de la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y la composición de la comunidad microbiana del suelo (Drake, 2011). Las temperaturas elevadas también pueden inducir al estrés de la planta, aumentar la fotorrespiración y la respiración heterotrófica y a su vez conducir a una menor productividad en los ecosistemas (Birdsey y Pan, 2011).

De igual manera, el alto contenido de agua del suelo, en combinación con bajas temperaturas pueden reducir las tasas de mineralización de nitrógeno y afectar los nutrientes disponibles para las plantas (Benner *et al.*, 2011), lo que lleva a una disminución en la tasa de suministro de nitrógeno y fósforo foliares necesarios para la fotosíntesis. Dada la amplia gama de respuestas forestales, la mejor comprensión de los efectos de los cambios climáticos y atmosféricos sigue siendo una alta prioridad de investigación.

#### **4.8. Eddy covariance**

Los desarrollos efectuados en las técnicas micro meteorológicas de medida de flujos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O han permitido la cuantificación de la evapotranspiración y la Intercambio neto del ecosistema de forma continua (López *et al.*, 2011). Entre estas técnicas micro meteorológicas, las torres de *eddy covariance* han sido de las más utilizadas para estimar el intercambio neto de ecosistemas a través de mediciones directas de flujos verticales de masa y energía a través de un plano horizontal sobre el dosel (Aubinet *et al.*, 2012).

Este sistema consiste básicamente en un analizador de gases al infrarrojo y un anemómetro. El analizador de gases mide las concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, al controlar cuántas moléculas de gas pasan a través de un volumen definido, durante un tiempo determinado. El anemómetro mide la velocidad y dirección del viento con una alta frecuencia de respuesta (*i.e.* 10 Hz y 20 Hz) (Burba, 2013).

La técnica se basa en el movimiento del aire, el cual se mueve en forma de vórtices (remolinos) de diferentes tamaños, frecuencias y direcciones. Además, ese aire viene acompañado por diferentes gases. Los movimientos y concentraciones de los gases son captados simultáneamente por los instrumentos del sistema de *eddy covariance*, de tal manera que el flujo es calculado a través de la covarianza entre la velocidad vertical del viento y la densidad del CO<sub>2</sub> y vapor de agua (Burba, 2013).

Esta técnica es *in situ*, no destructiva, y se puede aplicar a escalas de tiempo que van desde fracciones de una hora a años; por lo tanto, es ideal para capturar las dinámicas de flujos en diferentes condiciones climáticas desde ciclos diurnos a cambios ambientales a largo plazo (Baldocchi, 2003; Baldocchi, 2008). Los sistemas de *eddy covariance* han sido adoptados por numerosas redes de monitoreo a nivel mundial, por ejemplo, la red internacional FLUXNET, o redes nacionales como EuroFlux, AsiaFlux, AmeriFlux, las cuales fueron constituidas con la finalidad de estudiar los intercambios de materia y energía entre la biosfera y la atmósfera en diferentes tipos de vegetación, climas y escalas de tiempo (Vargas *et al.*, 2013).

Las mediciones y resultados de las torres de *eddy covariance* se han utilizado ampliamente para comprender la interacción entre el clima y el ecosistema, en la parametrización y validación de modelos y productos de teledetección, así como para extrapolar los hallazgos en sitios individuales a una escala regional (Baldocchi *et al.*, 2001; Tang *et al.*, 2012; Sulman *et al.*, 2016; Tsuruta *et al.*, 2016; Chan *et al.*, 2018; Collalti y Prentice, 2019)

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Área de estudio

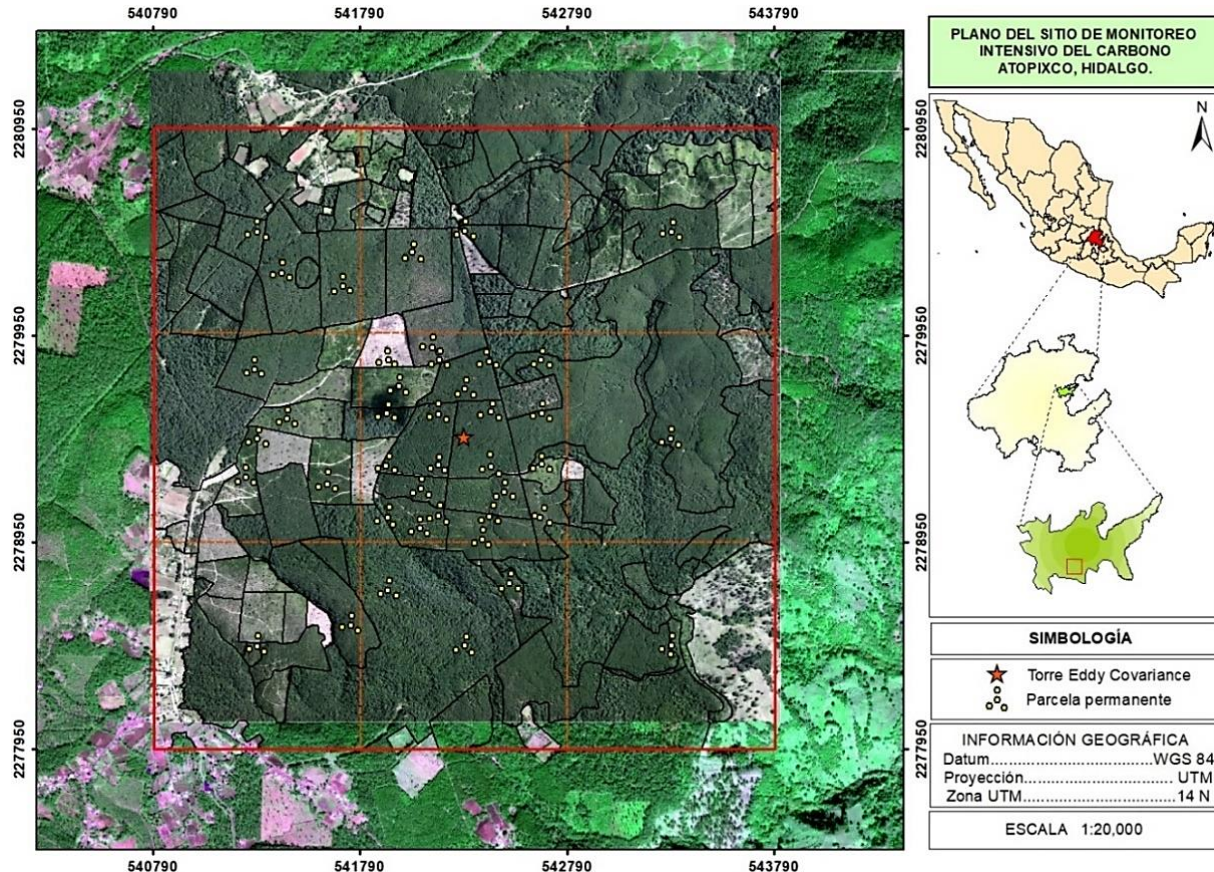
El área de estudio forma parte del Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono Atopixco (20° 37' 49.78" N y 98° 37' 51.01" W y 20° 35' 18.74" N y 98° 35' 23" W), ubicado en la región forestal de Zacualtipán, Hidalgo (**Figura 5.1.1**). Es un bosque templado bajo manejo forestal para producción maderable desde 1980. En este sitio se utiliza el método de desarrollo silvícola a partir de árboles padre, el cual ha permitido generar rodales coetáneos dominados por *Pinus patula* Schltld. *et* Cham. También forman parte de la estructura *Quercus laurina* Humb. *et* Bonpl, *Quercus rugosa* Neé, *Quercus excelsa* Liebm, *Clethra mexicana* D.C., y *Vaccinium leucanthum* Schltld en bajas densidades (Ángeles-Pérez *et al.*, 2015)

El clima predominante de la región es templado-húmedo, con una estación marcada de lluvias entre junio y octubre (1200 - 1600 mm anuales), la temperatura media anual oscila entre 12.5 a 14.5 °C (Soriano-Luna *et al.*, 2018). Por localizarse en una de las partes más altas de la Sierra Madre Oriental (2075 m s. n. m.) (Ángeles-Pérez *et al.*, 2015), este ecosistema se encuentra directamente expuesto a los vientos húmedos provenientes del Golfo de México; y a la entrada de frentes fríos ("nortes") que dominan durante la temporada de invierno. Los tipos de suelo son feozem háplico (Hh), ricos en materia orgánica (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

El Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono se estableció de acuerdo a la metodología propuesta por Hollinger (2008). El diseño consistió en un polígono de 3x3 Km, dividido en 9 cuadrantes de 1km<sup>2</sup> cada uno, con parcelas de muestreo permanentes similares a



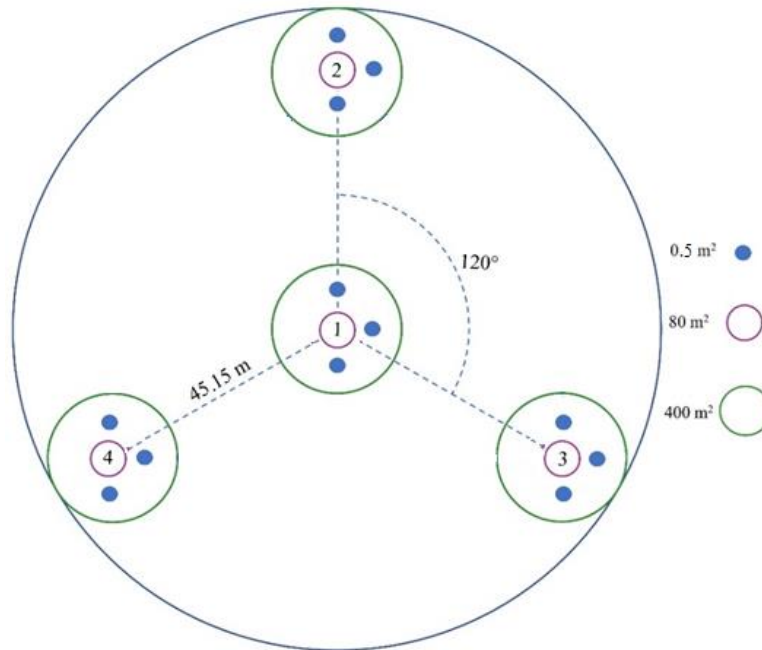
las utilizadas por la Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] (2012) en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos. En el centro del polígono se instrumentó una torre de flujo “*eddy covariance*” para medir el intercambio de energía, vapor de agua y dióxido de carbono entre el ecosistema y la atmósfera. El polígono central tuvo una mayor densificación de parcelas permanentes, debido a la posibilidad de que los flujos medidos con el sistema *eddy covariance* procederían de esta área (**Figura 5.1.1**).



**Figura 5.1.1** Ubicación del sitio de estudio.

El Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono cuenta con 41 parcelas de muestreo permanentes, de las cuales, 24 fueron establecidas siguiendo un patrón sistemático, y 17 más para incluir los rodales con edades que no habían sido representados. Cada parcela permanente está integrada por cuatro subparcelas circulares de 400m<sup>2</sup> (radio de 11.28 m) y cuatro micro parcelas de 80 m<sup>2</sup> (5.04 m de radio). En 18 de las 41 parcelas permanentes, existen trampas circulares de 0.5 m<sup>2</sup> (80 cm de diámetro) para recolectar la caída de hojarasca.

Cada subparcela cuenta con tres trampas, ubicadas a 5 m hacia el norte, sur y este, a partir del centro de la subparcela. En la **Figura 5.1.2** se muestra el diseño de las parcelas permanentes y la distribución de las trampas de hojarasca (Ángeles-Pérez *et al.*, 2015; Soriano-Luna *et al.*, 2018)

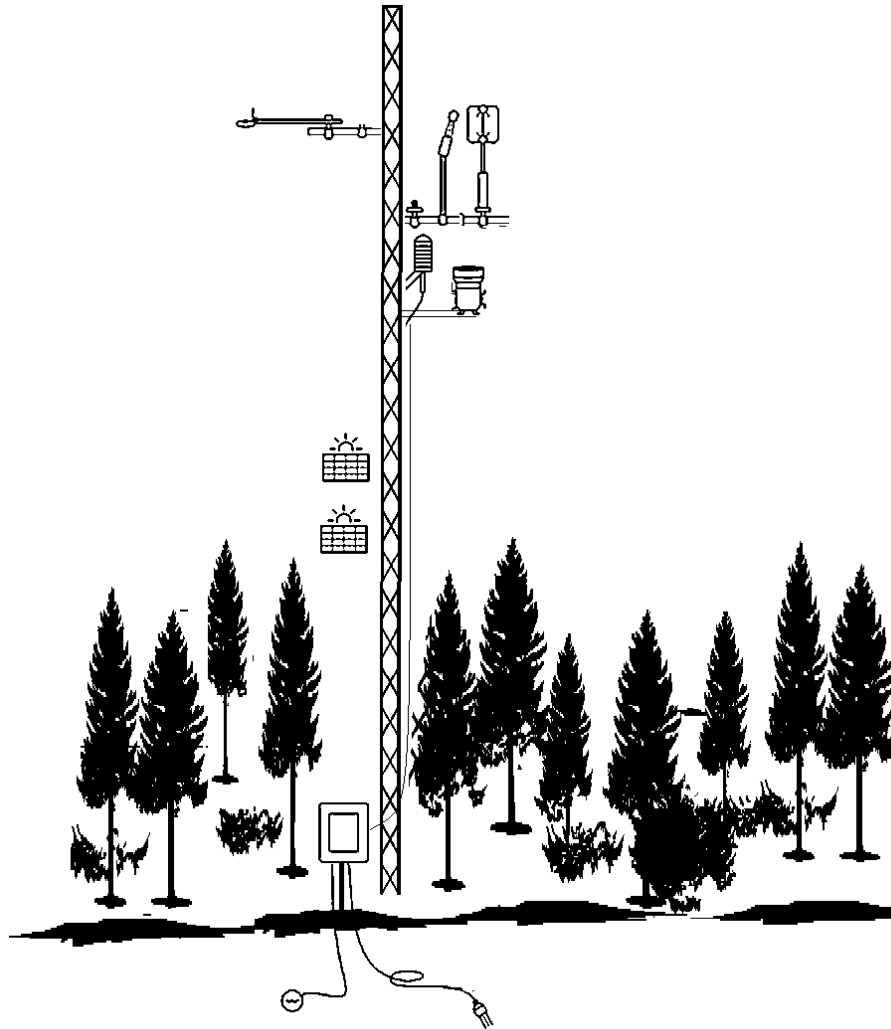


**Figura 5.1.2** Diseño de las parcelas permanentes de muestreo y distribución de las trampas de hojarasca (puntos azules).

Fuente: Modificado de Soriano *et al.*, 2018

## 5.2. Sistema *eddy covariance* y sensores meteorológicos

El sistema *eddy covariance* se instaló en una torre, a 32 m sobre el nivel del suelo. (**Figura 5.2.1**). Se utilizó un analizador de gases al infrarrojo de vía abierta (IRGA, modelo LI-7500A, LI-COR, Lincoln, NE, EE. UU.) para medir la concentración de agua y dióxido de carbono, un anemómetro sónico tridimensional (Gill Windmaster Pro) para medir la velocidad (m/s) y dirección del viento (°) en sus tres componentes x, y, z. Ambos equipos midieron a una frecuencia de 10Hz y los datos se registraron en una interface controladora y de almacenamiento (LI-7550, Li-COR, Lincoln, NE, EE. UU.).



**Figura 5.2.1** Esquema de la distribución del sistema eddy covariance.

Fuente: modificado de (LI-COR, nd; Turnipseed, 2011)

Simultáneamente se midieron variables meteorológicas, como: temperatura del aire y humedad relativa a 31 m sobre el suelo (sensor Vaisala HUMICAP); radiación global, radiación neta y radiación fotosintéticamente activa a una altura de 33 m (piranómetro LI-COR LI-200, radiómetro neto CNR4 Kip & Zonen y sensor quantum LI-COR LI-190R, respectivamente) y precipitación por encima de la superficie del dosel (pluviómetro TR-525Mrain).

Para medir la temperatura del suelo, se instalaron dos termopares (TCAV Campbell Scientific) a 5 cm por debajo de la superficie del suelo. El contenido de agua en el suelo se midió utilizando dos reflectómetros (CS616 Campbell Scientific). El flujo del calor del suelo se midió en cuatro puntos utilizando placas de calor del suelo (HFP01 Campbell Scientific) enterradas a 7 cm de la superficie del suelo.

Todos estos sensores tomaron mediciones a diferentes frecuencias que los instrumentos del sistema *eddy covariance*, pero también se almacenaron en un intervalo de 30 minutos, en un registrador de datos CR3000 (Campbell Scientific). El periodo de registro de datos abarcó del 01 de octubre de 2017 al 30 de septiembre de 2018.

### **5.3. Procesamiento de datos**

#### *5.3.1. Recolección de datos*

El acopio de datos se llevó a cabo cada cuatro semanas, consistió en descargar los datos almacenados en interface controladora y de almacenamiento y en el registrador de datos CR3000; vía ethernet; Los datos descargados son de dos tipos:

- Datos de alta frecuencia para el cálculo de flujos turbulentos (*i.e.*, flujo de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, calor latente y calor sensible)
- Datos biometeorológicos: estos incluyeron los registros de las variables meteorológicas y temperatura y humedad del suelo.

Cada que se realizó la colecta también se verificó el funcionamiento de los instrumentos.

#### *5.3.2. Procesamiento de datos*

Los datos colectados fueron procesados en el software Eddy Pro (LI-COR, 2016) versión 6.2. Este software es una aplicación desarrollada por LI-COR utilizada para calcular los flujos de calor sensible, calor latente y CO<sub>2</sub>, en periodos de 30 minutos, a través de la covarianza de la velocidad del viento, con la concentración de vapor de agua, la temperatura sónica y la concentración de CO<sub>2</sub>, respectivamente (Burba, 2013).

El programa incluyó una serie de procedimientos como: remoción de picos de la serie de tiempo (Vickers y Mahrt, 1997), corrección “W-boost” del error de cálculo del anemómetro que subestima la velocidad vertical del viento; corrección de la inclinación con el método de doble rotación de coordenadas (Wilczak *et al.*, 2001); corrección de retrasos entre las señales del analizador de gas y el anemómetro; correcciones por fluctuaciones en la densidad del aire (Burba, 2013; Webb *et al.*, 1980) y correcciones espectrales de alta y baja frecuencia (Moncrieff, 1997; Moncrieff, 2004). Finalmente, con el software se calcularon los indicadores de control de calidad para todos los flujos con base en la prueba de condiciones turbulentas y de estado estable (Mauder y Foken, 2006). El resultado del procesamiento fue una base de datos, la cual incluyó el valor de las variables intermedias y finales calculadas para cada periodo.

### 5.3.3. Control de calidad de datos

Este procedimiento se realizó en la base de datos que resultó del procesamiento en Eddy Pro. La base de datos muestra el valor de los flujos de calor sensible, calor latente, el flujo de agua y el flujo de CO<sub>2</sub>, acompañado de un código numérico (0, 1 o 2) que indica la calidad para cada flujo. El valor "0" indica flujos de mejor calidad, "1" representa a los flujos de buena calidad, mientras que el "2" señala a los flujos de mala calidad. Los flujos considerados de mala calidad fueron eliminados. También se eliminaron los registros que se encontraban fuera del límite de magnitud de flujo y aquellos valores que fueron registrados en periodos de intensa precipitación. Como la técnica *eddy covariance* se basa en la medida del transporte que se produce por la turbulencia, se rechazaron aquellos datos que tuvieran un valor de velocidad de fricción ( $u^*$ ) superior a 0.25, ya que bajo esas condiciones no hay turbulencia suficiente y las medidas de flujo podrían estar subestimadas. El filtro de  $u^*$  solo se aplicó en los flujos de CO<sub>2</sub>.

### 5.3.4. Relleno de datos faltantes (Gapfilling)

A pesar de que la técnica de *eddy covariance* permitió la generación de mediciones casi continuas a lo largo del tiempo, hubo periodos con ausencia de registros causados por fallas en el sistema y por el control de calidad de datos.

La estimación de los datos faltantes se hizo con REddyProc (Wutzler *et al.*, 2018), una herramienta en línea, basada en R y desarrollada en *Max Planck Institute of Biogeochemistry*, que está disponible en línea. Este paquete utiliza los métodos similares a los de Falge *et al.* (2001), también los estandarizados por Reichstein *et al.* (2005) que considera la covarianza de flujos con variables meteorológicas y la autocorrelación temporal de los flujos. Además, realiza el filtrado de  $u^*$  (condiciones de no turbulencia donde las mediciones no son confiables) utilizando como método la prueba de punto de movimiento (Papale *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2012). El procedimiento para llenar los vacíos causados por el filtrado en los datos de medias horas, varía según sea el caso. Los casos posibles son tres, y se describen a continuación:

- Caso1: Solo faltan datos de interés, pero se tienen datos de meteorología.
- Caso 2: Faltan variables meteorológicas de temperatura del aire y déficit de presión de vapor, pero los datos de radiación global están completos.
- Caso 3: Faltan todas las variables

En el primer caso, el valor perdido se reemplaza por el promedio de las mediciones validas que ocurren bajo condiciones meteorológicas similares utilizando tablas de búsqueda, dentro de una ventana de tiempo de 7 días. Se consideran condiciones meteorológicas similares cuando la radiación global ( $R_g$ ), temperatura del aire ( $T_a$ ) y déficit de presión de vapor (DPV) no se desvían más de  $50 \text{ W/m}^2$ ,  $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $5 \text{ hpa}$ , respectivamente. Si no se encuentran condiciones meteorológicas dentro de la ventana de tiempo de inicio, el tamaño de la ventana se va ampliando. En el caso dos se utiliza el mismo enfoque, pero solo utilizando la  $R_g$  como la condición meteorológica. Para el tercer caso el valor faltante se reemplaza por el valor promedio a la misma hora del día, es decir, por la variación diurna media (Rodríguez-Villarreal, 2012).

### 5.3.5. Partición de flujo de CO<sub>2</sub>

Con las estimaciones del intercambio neto del ecosistema obtenidas con el sistema *eddy covariance*, en combinación con algún método de partición de flujo de CO<sub>2</sub>, se pueden derivar estimaciones de la Productividad Primaria Bruta y respiración del ecosistema (Sulman *et al.*, 2016). Uno de los métodos más comunes para la partición del flujo de CO<sub>2</sub>, y utilizado en este estudio, es el método de Reichstein *et al.*, (2005). En este método se utilizan regresiones no lineales basadas en modelos cuasi empíricos que describen la relación entre los flujos de CO<sub>2</sub> y los controles meteorológicos. Como la fotosíntesis no ocurre en la oscuridad, el intercambio neto del ecosistema nocturno a menudo se usa para parametrizar un modelo simple de respiración del ecosistema, el cual depende de la temperatura del suelo. El Intercambio neto del ecosistema observado se resta de la respiración del ecosistema modelada durante el día para determinar la Productividad Primaria Bruta (Reichstein *et al.*, 2005).

$$\text{INE} = \text{Reco} - \text{PPB} \quad (5)$$

De modo que el intercambio neto del ecosistema (INE) es negativo cuando la fotosíntesis (es decir, PPB) excede la respiración del ecosistema (Reco), mientras que la PPB y Reco siempre se consideran cantidades positivas.

### 5.3.6. Balance de energía

La evaluación del balance de energía es un procedimiento estandarizado dentro de la metodología *eddy covariance* para verificar la calidad de las mediciones. Este procedimiento consistió en graficar los valores de 30 minutos de la suma de los flujos de calor sensible y calor latente contra la diferencia de los valores de radiación neta y el flujo de calor del suelo. Se ajustó una línea de tendencia donde el valor de la pendiente y la intercepción de la línea de regresión cuantifican la confiabilidad del cierre de balance de energía. La radiación neta y el flujo de calor del suelo, se obtuvieron de mediciones puntuales del radiómetro neto y las placas de calor, mientras que el flujo de calor sensible y flujo de calor latente procedieron de las mediciones con el método *eddy covariance* (solo se utilizaron los flujos de buena y alta calidad).

### 5.3.7. Área de influencia (*Footprint*)

El área de influencia se obtiene a partir de modelos de *footprint*, los cuales utilizan mediciones del sistema *eddy covariance* para determinar de donde proceden los flujos estimados con esta técnica. El análisis se realizó con la herramienta en línea *Flux Footprint Prediction (FFP) online data processing*, disponible en (Kljun *et al.*, 2015). Los parámetros de entrada para el cálculo del *footprint* se obtuvieron del archivo de salida generado en Eddy Pro.

Este análisis mostró que la mayor parte de los flujos procedieron de rodales con edades de entre los 22 y 26 años, y una pequeña superficie de rodales con 10 y 35 años de edad. En un análisis a nivel mensual se observó que la huella se mantuvo constante a lo largo del año.

## 5.4. Estimación de la Productividad Primaria Neta con datos de inventario

Además de las mediciones del intercambio neto de CO<sub>2</sub> entre el ecosistema y la atmósfera, también se calculó la Productividad Primaria Neta, a partir de datos provenientes de las parcelas permanentes de muestreo. La Productividad Primaria Neta se estimó como el incremento en biomasa, de fuste ramas y raíces gruesas, más la producción de hojarasca. La mortalidad de los árboles, pérdidas por herbívora y el crecimiento de las raíces finas no se incluyeron en la estimación. En los siguientes apartados se describe el procedimiento para cada uno de los almacenes.

### 5.4.1. Fuste y ramas

El incremento de biomasa individual se estimó a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT), utilizando las ecuaciones alométricas desarrolladas por Soriano-Luna *et al.* (2015) y Cruz-Martínez (2007) en el área de estudio (**Cuadro 5.4.1**). Los datos de DAP y HT utilizados, correspondieron a mediciones realizadas en el inventario de 2016 y de 2019. El incremento en biomasa solo se evaluó en los sitios que cayeron dentro del área de influencia de la torre (12 parcelas permanentes).



El contenido de carbono se calculó conforme a Goetz y Dubayah (2011), quienes consideraron que el 50% de la biomasa es carbono.

**Cuadro 5.4.1** Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

Especie	Ecuación (kg)	Referencia
<i>Pinus patula</i> , <i>Pinus greggii</i> , <i>Cupressus sp</i>	$\text{Exp} (-4.554805) \times (\text{DAP}^2 \times \text{HT})^{1.047218}$	Soriano-Luna <i>et al.</i> , 2015
<i>Pinus teocote</i>	$(0.000082 \times \text{DAP}^{1.84952} \times \text{HT}^{0.915827}) \times 623.2698$	Cruz-Martínez, 2007

#### 5.4.2. Hojarasca

Para contabilizar la producción de hojarasca se utilizaron los datos de las 18 parcelas permanentes, dispuestas en cronosecuencias, que contaban con trampas de hojarasca (216 trampas). La recolecta del material de las trampas se realizó mensualmente, a partir de octubre de 2017 hasta septiembre de 2018. El material recogido se llevó al laboratorio, se puso a secar a 70 °C y se registró su peso, hasta que alcanzó un peso constante. Para determinar el contenido de carbono, se utilizó un factor de 0.47 (*Intergovernmental Panel on Change Climatic [IPCC], 2006*).

#### 5.4.3. Raíces

La biomasa en las raíces se estimó utilizando las ecuaciones alométricas (Ecuación 6) para *Pinus patula* desarrolladas por Medrano-Méraz (2018). Para las latifoliadas se utilizó el cociente raíz/parte aérea de 0.20 Medrano-Méraz (2018).

$$y = 0.00744 \text{ DAP}^{2.078025} \text{ HT}^{0.729446} \quad (6)$$

Donde  $y$  es la biomasa subterránea total de las raíces (Kg),  $DAP$  es el diámetro a la altura del pecho (cm)  $HT$  la altura total del árbol (m). El contenido de carbono subterráneo del arbolado se estimó a partir de la multiplicación de los valores de biomasa y concentraciones promedio de carbono (50.31%) determinada por Díaz-Franco *et al.* (2007) para *Pinus patula*.

Finalmente, los contenidos de carbono de cada uno de los componentes antes mencionados se sumaron para obtener un valor allegado a la Productividad Primaria Neta.

### **5.5. Análisis de datos**

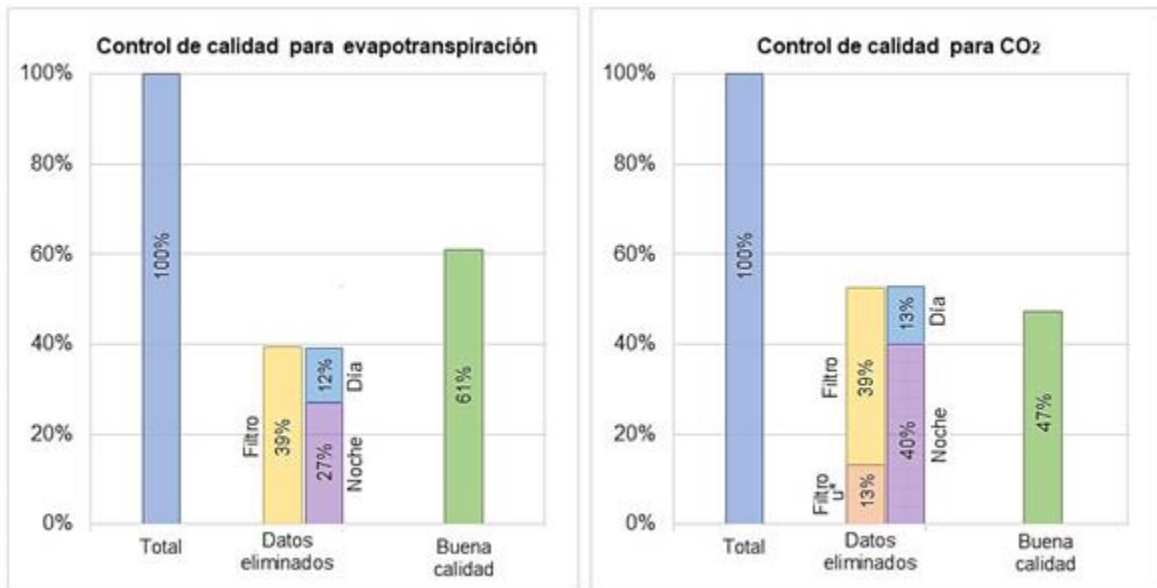
Para identificar los controles ambientales que influyen en la variación de la evapotranspiración y en el intercambio neto del ecosistema se utilizó una matriz de correlación de Spearman; se eligió este análisis no paramétrico, debido a que los datos no presentaron una distribución normal. Las variables utilizadas fueron radiación neta, radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, déficit de presión de vapor, precipitación y contenido de humedad del suelo. Posteriormente se generó un modelo de regresión lineal múltiple para evaluar la influencia que tienen en conjunto los predictores antes descritos, sobre evapotranspiración como en el intercambio neto del ecosistema. La confiabilidad de ambos modelos fue evaluada con el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ), la raíz cuadrada media del error (RMSE) y el Criterio de Información de Akaike (AIC).

Se analizó la variación estacional de la evapotranspiración y el intercambio neto del ecosistema, considerando tres periodos: entrada de frentes fríos (noviembre-febrero), época de secas (marzo-mayo) y periodo de lluvias (junio-octubre). Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las temporadas se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis, seguido de un análisis *post hoc* con la prueba de Mann–Whitney–Wilcoxon para determinar que periodos diferían entre sí. Los análisis estadísticos mencionados se realizaron con el Software R (Core Team, 2013) versión 3.5.0.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Control de calidad

El total de datos registrados del 01 de octubre de 2017 al 30 de septiembre de 2018, fue de 17,520 para cada variable (tomando en cuenta que el periodo de estudio fue de un año y que las mediciones de los flujos se registraron cada media hora). De este número de registros algunos fueron eliminados al realizar el control de calidad. De tal manera que, en el caso de evapotranspiración, los flujos considerados de mejor calidad representaron el 60% de las mediciones. En el caso de los flujos de CO<sub>2</sub>, los datos rechazados debido a los criterios de control de calidad fueron superiores, dado que 9,228 registros fueron suprimidos, solo el 47% de las mediciones quedaron disponibles para realizar el relleno de los datos. En ambos casos la mayoría de los datos eliminados pertenecieron a mediciones nocturnas (**Figura 6.1.1**).



**Figura 6.1.1** Resumen de control de calidad de los flujos de agua y CO<sub>2</sub> medidos en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

## 6.2. Condiciones meteorológicas

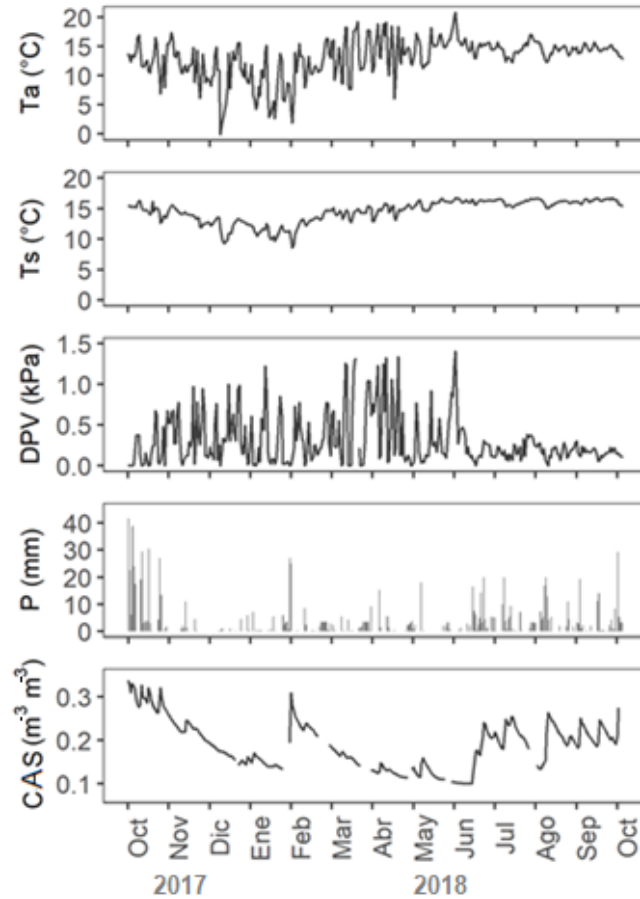
La radiación global, radiación neta y radiación fotosintéticamente activa alcanzaron su punto máximo en el mes de mayo y el mínimo en octubre; en el caso de la radiación neta, el mínimo fue en diciembre (**Cuadro 6.2.1**). La temperatura del aire varió de 2 a 20.8 °C (promedio diario) y durante los meses de junio a septiembre se mantuvo entre los (12 y 17°C) (**Figura 6.2.1**). La temperatura mínima del aire ocurrió en diciembre y la máxima en mayo. La temperatura del suelo osciló entre los 8.5 y 16.8 °C; en general, tuvo la misma tendencia que la temperatura ambiente. El déficit de presión de vapor se mantuvo alto durante los meses de marzo, abril y mayo, por lo que la demanda evaporativa fue mayor en este periodo.

**Cuadro 6.2.1** Valores medios mensuales, de octubre de 2017 a septiembre de 2018, de las variables biometeorológicas en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipan, Hgo.

Variable	2017			2018								
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Rg (W/m <sup>2</sup> )	136.1	175.9	156.8	144.7	171.5	201.1	210.2	229.9	175.4	215.7	180.5	164.8
Rn (W/m <sup>2</sup> )	99.0	115.5	95.7	99.5	121.2	144.8	151.6	164.7	128.5	159.1	126.1	130.5
RFA (μmol/m <sup>2</sup> /s)	250.4	322.6	288.0	268.3	325.8	383.8	404.5	447.1	349.5	431.9	346.2	343.8
Ta promedio (°C)	12.8	11.8	10.1	7.4	12.4	13.5	14.4	15.6	15.0	14.7	14.1	14.5
Ta mínima (°C)	3.8	1.7	-4.7	-0.4	6.8	4.8	3.9	9.2	10.7	9.8	10.5	10.7
Ta máxima (°C)	21.7	21.3	20.6	21.8	21.2	24.9	25.0	26.5	20.4	23.1	18.6	19.8
Ts (°C)	14.8	13.8	12.1	11.0	13.3	14.3	14.9	15.9	16.2	16.1	15.9	16.3
DPV (kPa)	0.19	0.36	0.37	0.24	0.34	0.57	0.46	0.41	0.20	0.21	0.17	0.15
CAS (m <sup>3</sup> /m <sup>-3</sup> )	0.29	0.22	0.16	0.16	0.22	0.16	0.13	0.12	0.16	0.21	0.21	0.22
ET (mm)	93.3	80.0	68.5	63.5	72.4	94.0	93.0	81.7	71.1	95.5	85.3	81.9
PPB (gC)	209.5	235.1	265.9	238.2	244.7	232.9	309.1	415.4	348.1	436.4	382.6	374.6
Reco (gC)	98.9	91.3	156.0	116.3	135.7	154.1	165.9	265.7	253.3	252.9	225.5	218.3
INE (gC)	110.6	143.8	109.8	121.8	108.9	78.8	143.2	149.8	94.8	183.5	157.2	156.3
P (mm)	294.9	21.1	13.8	83.3	35.6	44.8	39.6	29.3	100.3	76.3	124.1	89.8

Donde:  $R_g$  = radiación global,  $R_n$  = radiación neta, RFA = radiación fotosintéticamente activa,  $T_a$  = temperatura del aire,  $T_s$  = temperatura del suelo, DPV = déficit de presión de vapor, CAS = contenido de agua en el suelo y  $P$  = precipitación. ET = evapotranspiración, PPB = Productividad Primaria Bruta, Reco = respiración del ecosistema, INE= Intercambio neto del ecosistema Los valores del Intercambio neto del ecosistema indican absorción de carbono.

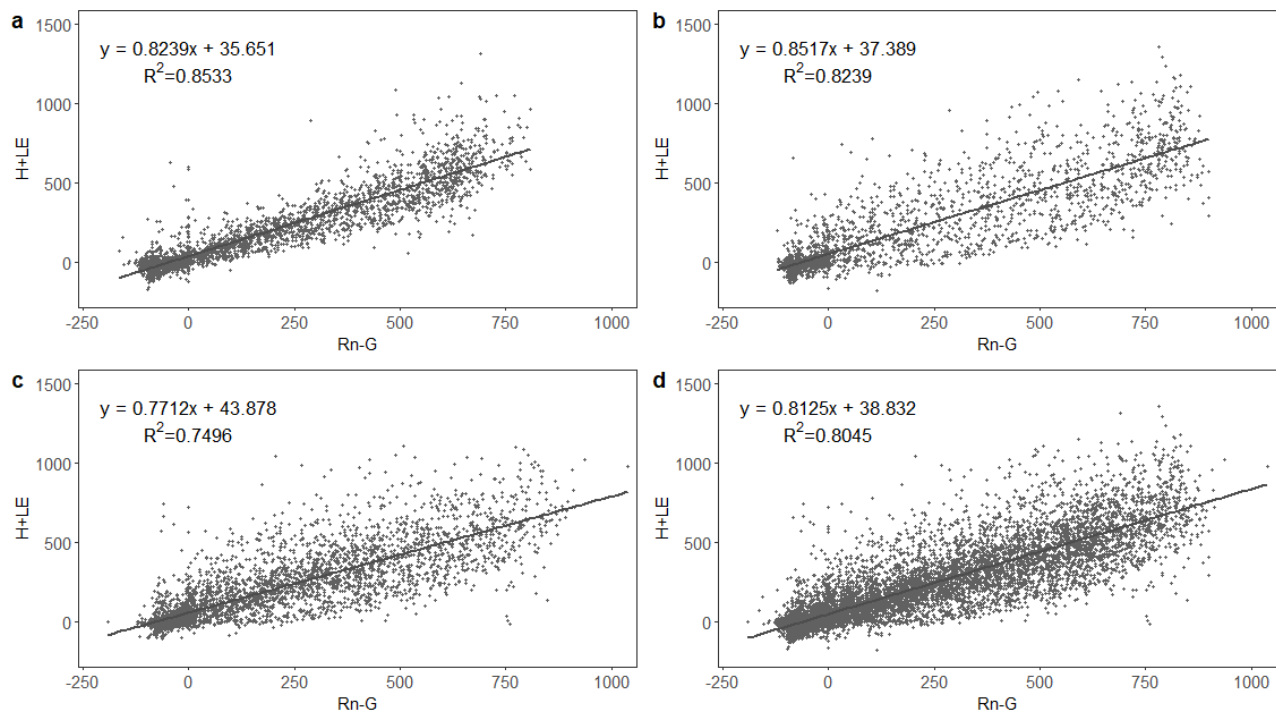
En todos los meses se presentó algún evento de precipitación, acumulando un total de 953 mm. El 72% de la precipitación total ocurrió de junio a octubre, siendo octubre el mes con mayor precipitación (294.9 mm). El cambio en el patrón del contenido de agua en el suelo varió de acuerdo con la precipitación. Los eventos de precipitación intensos a finales del mes de enero provocaron un aumento abrupto en el contenido de agua del suelo para el mes de febrero (*Figura 6.2.1*).



**Figura 6.2.1** Variación temporal de la temperatura del aire ( $T_a$ ), temperatura del suelo ( $T_s$ ), déficit de presión de vapor (DPV), precipitación ( $P$ ) y contenido de agua en el suelo (CAS), en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

### 6.3. Balance de energía

En el sitio de estudio, el cierre de balance de energía fue de 0.81 (**Figura 6.3.1**). El valor obtenido indica que hay una subestimación de los flujos de calor latente o sensible. A pesar de ello, la calidad de las mediciones de flujo fue suficiente para analizar los presupuestos de energía y evapotranspiración. El valor de cierre de energía obtenido fue similar a los encontrados por (Wilson *et al.*, 2002) en los sitios FLUXNET a nivel global.

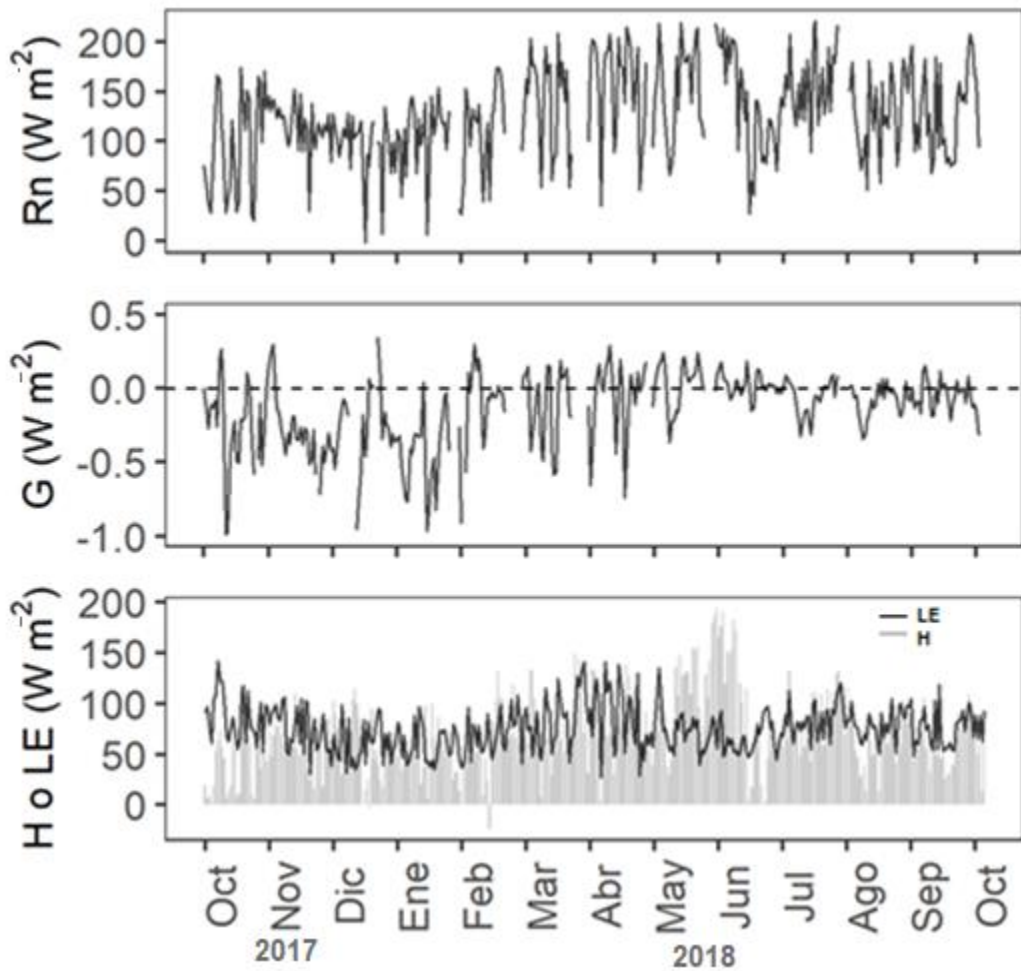


**Figura 6.3.1** Cierre de balance de energía para la entrada de frentes fríos “nortes” (a), periodo de secas (b), época de lluvia (c) y anual (d), en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. Las pendientes de regresión indican el buen cierre de balance de energía.

#### 6.3.1. Distribución de la radiación neta

Aunque existe más interés en los equilibrios de agua y carbono, cuantificar el balance energético ofrece información sobre cómo se distribuye la energía que se encuentra disponible en la superficie terrestre. Es por ello que en este estudio se incorporó un breve análisis de la distribución de los componentes del balance de energía en el sitio de estudio.

La distribución de la energía disponible (radiación neta) como flujo de calor latente y calor sensible varió a lo largo del año (**Figura 6.3.2**). En los meses de octubre de 2017 y agosto y septiembre de 2018, cuando había más agua disponible, la principal forma de intercambio de energía estuvo representada por el calor latente. Sin embargo, en los meses de mayo, principios de junio y parte de julio, el flujo de calor sensible fue el que dominó el intercambio de energía entre el ecosistema y la atmósfera. En general, en el resto de los meses, el calor sensible y latente se distribuyeron equitativamente en el ecosistema.



**Figura 6.3.2** Variación temporal de la radiación neta ( $R_n$ ), calor sensible ( $H$ ), calor latente ( $LE$ ) y de calor del suelo ( $G$ ) de octubre de 2017 a septiembre de 2018 en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

La proporción de radiación neta consumida por el flujo de calor del suelo, durante todo el periodo, fue baja. Este hallazgo es una característica común en suelos bajo una cubierta forestal perennifolia y se ve reflejado en variaciones reducidas en la temperatura del suelo. En el **Cuadro 6.3.1** se presentan los valores medios mensuales de radiación neta y las proporciones utilizadas por cada flujo.

**Cuadro 6.3.1** Radiación neta y su contribución relativa para cada flujo en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

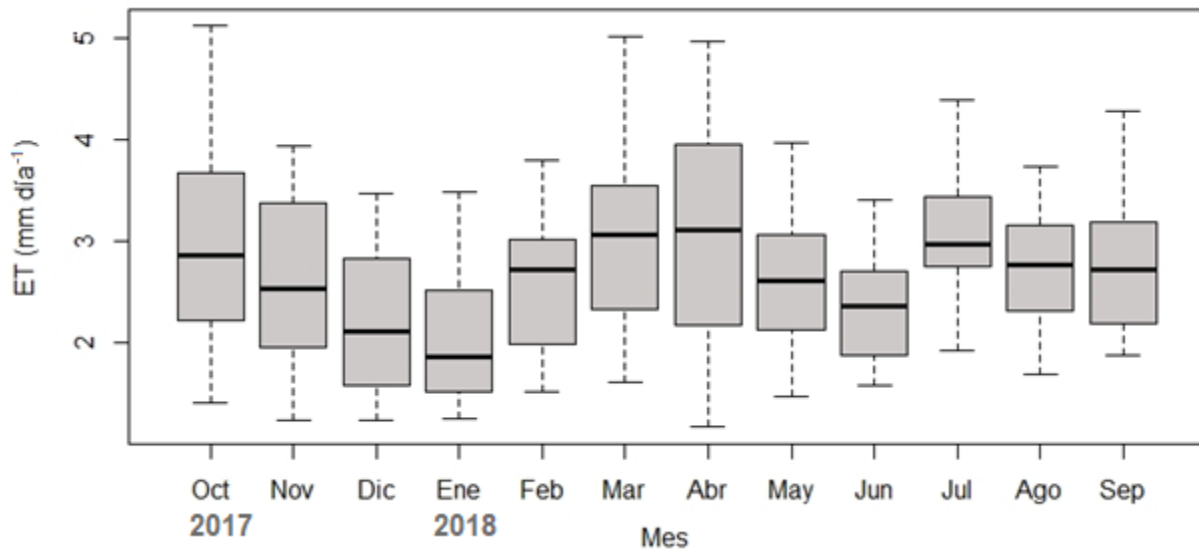
Mes	Rn	LE/Rn	H/Rn	G/Rn	Relación de Bowen H/LE
Octubre 2017	144.2	0.70	0.42	-0.0015	0.60
Noviembre 2017	167.5	0.55	0.53	-0.0017	0.95
Diciembre 2017	135.1	0.55	0.55	-0.0019	0.99
Enero 2018	142.6	0.47	0.52	-0.0030	1.10
Febrero 2018	157.6	0.51	0.53	-0.0003	1.04
Marzo 2018	165.0	0.51	0.50	-0.0008	0.98
Abril 2018	179.0	0.54	0.49	-0.0001	0.92
Mayo 2018	216.4	0.40	0.67	0.0002	1.65
Junio 2018	162.9	0.47	0.55	0.0002	1.16
Julio 2018	204.1	0.48	0.51	-0.0003	1.06
Agosto 2018	167.3	0.54	0.47	-0.0004	0.86
Septiembre 2018	179.7	0.52	0.47	-0.0001	0.90



## 6.4. Evapotranspiración

### 6.4.1. Estimación de evapotranspiración

Durante el periodo de estudio la evapotranspiración fue de 980 mm y excedió ligeramente la precipitación anual (953 mm). La evapotranspiración total mensual fue menor en enero (63.5 mm) y la mayor se reportó en marzo (94 mm) (**Figura 6.4.1** y **Cuadro 6.2.1**).



**Figura 6.4.1** Tendencia de la evapotranspiración (ET) de octubre de 2017 a septiembre de 2018 en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

Las tasas de evapotranspiración a diferentes escalas de tiempo se muestran en el **Cuadro 6.4.1**. La evapotranspiración media diaria varió de  $2.0 \text{ mm} \pm 0.6$  a  $3.1 \text{ mm} \pm 1.1$ . La tasa máxima de evapotranspiración fue de  $0.86 \text{ mm h}^{-1}$  y tuvo lugar en el mes de marzo. Los valores superiores de evapotranspiración máxima diaria correspondieron a los meses de marzo, abril y mayo.

**Cuadro 6.4.1** Tasas de evapotranspiración por hora y por día en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo

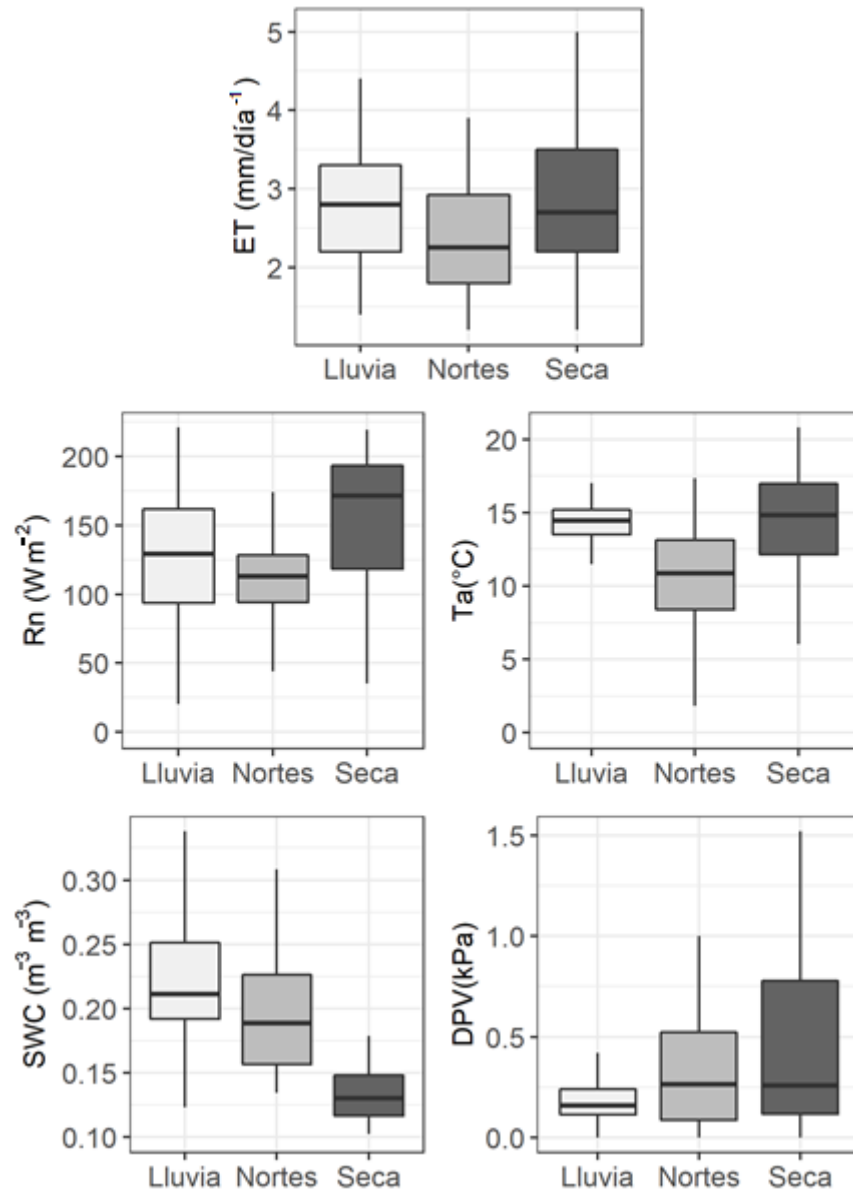
Mes	Evapotranspiración máxima por hora (mm h <sup>-1</sup> )	Evapotranspiración media diaria (mm día <sup>-1</sup> ± SD)	Evapotranspiración máxima diaria (mm día <sup>-1</sup> )
Octubre 2017	0.74	3.0 ± 0.9	4.4
Noviembre 2017	0.76	2.7 ± 0.8	3.9
Diciembre 2017	0.76	2.2 ± 0.7	3.5
Enero 2018	0.77	2.0 ± 0.6	3.5
Febrero 2018	0.72	2.6 ± 0.7	3.8
Marzo 2018	0.86	3.0 ± 0.9	5.0
Abril 2018	0.85	3.1 ± 1.1	5.0
Mayo 2018	0.83	2.6 ± 0.7	4.8
Junio 2018	0.70	2.4 ± 0.5	3.4
Julio 2018	0.71	3.1 ± 0.6	4.4
Agosto 2018	0.77	2.8 ± 0.6	3.7
Septiembre 2018	0.82	2.7 ± 0.6	3.7

#### 6.4.2. Respuesta de la evapotranspiración a condiciones meteorológicas

De acuerdo con el análisis de correlación de Spearman ( $p$  value < 0.01), la radiación neta (0.76), radiación fotosintéticamente activa (0.76), fueron las variables que tuvieron mayor relación con la evapotranspiración. La correlación fue menor, aunque significativa, con la temperatura del aire (0.41), humedad relativa (-0.30) y déficit de presión de vapor (0.34). Los resultados del análisis de regresión lineal múltiple mostraron que la evapotranspiración estuvo más influenciada por el contenido de humedad del suelo, la radiación neta, la temperatura, y el déficit de presión de vapor. Para apoyar este resultado, en el **Cuadro 6.2.1** se observa que los valores más altos de evapotranspiración correspondieron con los valores promedios más altos de la radiación neta y de déficit de presión de vapor (marzo, abril y mayo).

### 6.4.3. Variación estacional de la evapotranspiración

Los resultados del análisis de correlación y regresión lineal múltiple mostraron que la evapotranspiración estuvo más influenciada por el contenido de humedad del suelo, la temperatura, la radiación neta y el déficit de presión de vapor. La prueba de Kruskal – Wallis ( $p < 0.001$ ) indicó diferencias significativas en las tres estaciones (**Figura 6.4.2**).



**Figura 6.4.2** Evapotranspiración y principales factores de control durante las temporadas anuales en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

En un análisis más detallado con la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon, se encontró que la evapotranspiración en el periodo de “nortes” tuvo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con la evapotranspiración de la época de lluvia y de seca. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre la evapotranspiración del periodo de lluvias y la del periodo de secas. El mismo análisis se hizo para las variables que resultaron tener mayor influencia en la evapotranspiración. En el **Cuadro 6.4.2** se muestran las variaciones de evapotranspiración y las variables que resultaron tener mayor control sobre ET y se resumen los resultados de las pruebas de comparación.

**Cuadro 6.4.2** Variación estacional de la evapotranspiración y principales factores de control en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

	Nortes	Temporada Seca	Lluvia
ET	2.4±0.7 (b)	2.9±0.9 (a)	2.8±0.7 (a)
CAS	0.19±0.04 (b)	0.13±0.02 (c)	0.21±0.06 (a)
Ta	10.4±3.7 (b)	14.5±3.15(a)	14.2±1.54 (a)
Rn	108.5±33.0 (c)	153.9±49.2 (a)	127.4±47.6 (b)
DPV	0.33±0.29 (a)	0.48±0.45 (a)	0.19±0.13 (b)

\*Letras iguales indican que no hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las temporadas.

## 6.5. Balance de carbono

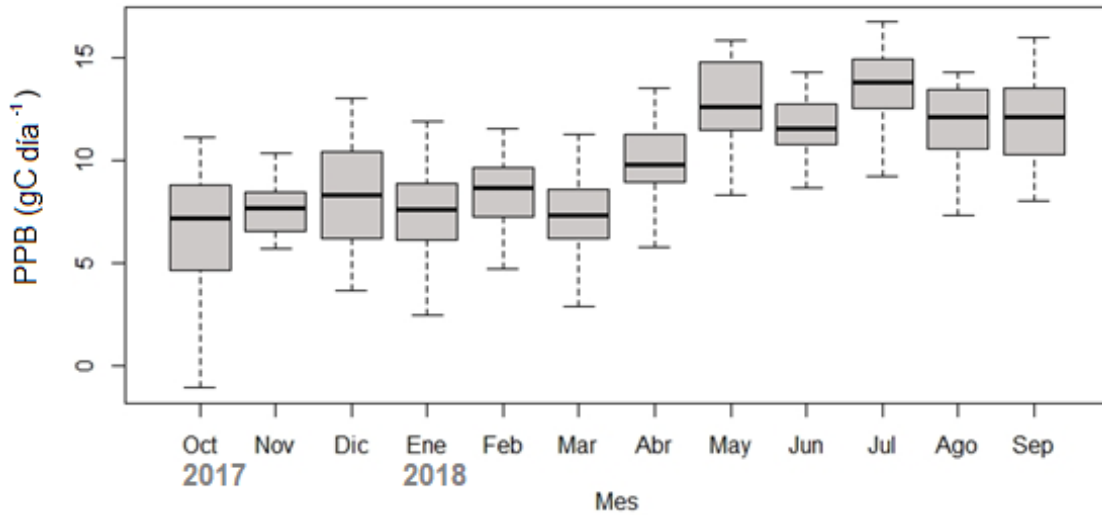
### 6.5.1. Estimación de los componentes del balance de carbono

El intercambio neto del ecosistema estimado fue de 1558 gC ha<sup>-1</sup>, por lo que el ecosistema actuó como un sumidero de carbono. De acuerdo con los resultados de la partición del flujo de CO<sub>2</sub>, el total de carbono absorbido por el proceso de fotosíntesis fue de 3692 gC ha<sup>-1</sup>. De estos, el 60% (2134 gC ha<sup>-1</sup>) retornó a la atmósfera producto de la respiración del ecosistema. En el **Cuadro 6.5.1** se muestra el promedio diario por mes, de cada uno de los componentes del balance de carbono.

**Cuadro 6.5.1** Promedio diario por mes, de los componentes del balance de carbono en un bosque bajo manejo, en la región forestal de Zacaltipán Hgo.

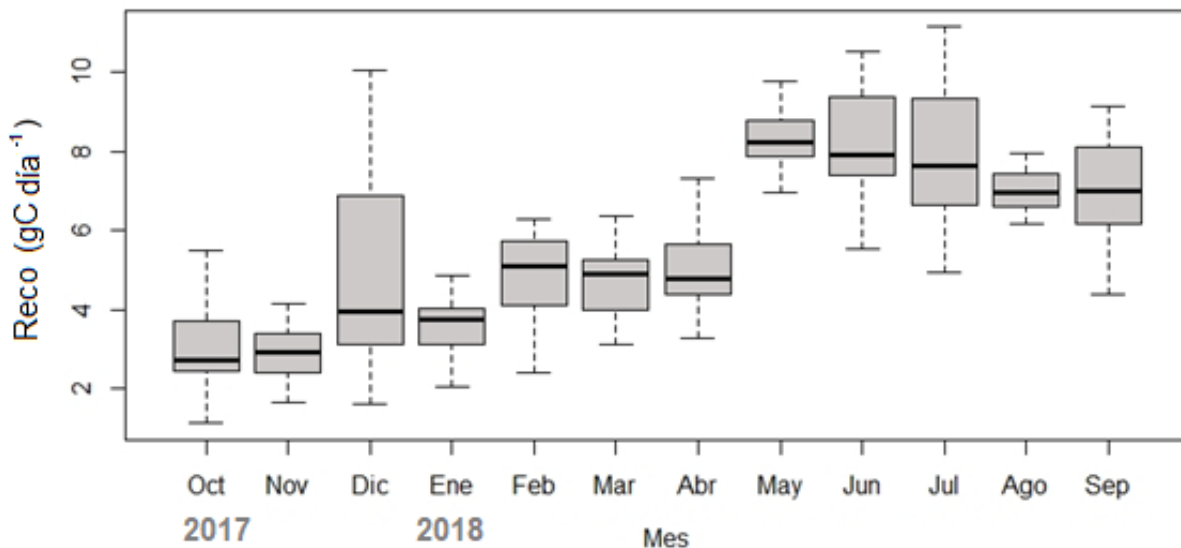
Mes	Intercambio neto del ecosistema (gC día <sup>-1</sup> )	Respiración del ecosistema (gC día <sup>-1</sup> )	Productividad Primaria Bruta (gC día <sup>-1</sup> )
Octubre 2017	-3.6 ± 2.5	3.2 ± 1.4	6.8 ± 3.0
Noviembre 2017	-4.8 ± 1.3	3.0 ± 0.7	7.8 ± 1.5
Diciembre 2017	-3.6 ± 2.1	5.0 ± 2.7	8.6 ± 3.4
Enero 2018	-3.9 ± 2.8	3.8 ± 0.7	7.7 ± 2.8
Febrero 2018	-3.9 ± 1.6	4.8 ± 1.4	8.7 ± 1.7
Marzo 2018	-2.5 ± 2.7	5.0 ± 1.1	7.5 ± 2.3
Abril 2018	-4.8 ± 2.3	5.5 ± 1.6	10.3 ± 2.2
Mayo 2018	-4.8 ± 2.3	8.6 ± 0.6	13.4 ± 2.6
Junio 2018	-3.2 ± 2.2	8.4 ± 1.5	11.6 ± 2.5
Julio 2018	-5.9 ± 1.3	8.2 ± 1.9	14.1 ± 1.9
Agosto 2018	-5.0 ± 1.7	7.3 ± 0.5	12.3 ± 1.8
Septiembre 2018	-5.2 ± 1.7	7.3 ± 1.2	12.5 ± 2.2

La variabilidad a lo largo del año fue diferente para cada uno de los flujos del balance de carbono. En general, la Productividad Primaria Bruta, en los primeros seis meses del periodo de estudio, se mantuvo dentro del mismo intervalo (5-10 gC día<sup>-1</sup>). Posteriormente la Productividad Primaria Bruta tendió a aumentar hasta mantener valores superiores a 10 g C día<sup>-1</sup>, durante el periodo de lluvias. Los meses de mayo y julio presentaron los valores más altos de Productividad Primaria Bruta (**Figura 6.5.1**).



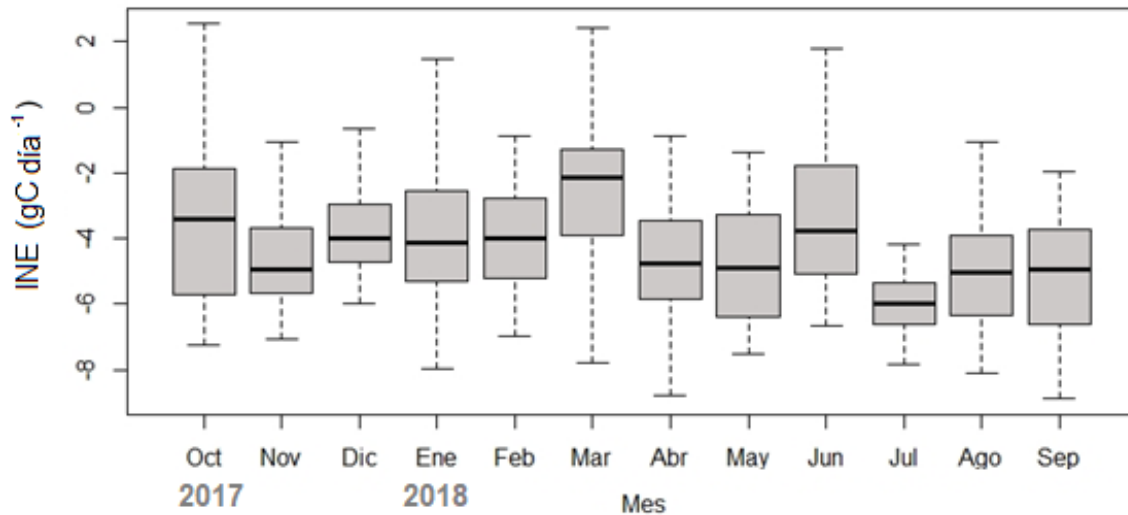
**Figura 6.5.1** Tendencia de la Productividad Primaria Bruta en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

La respiración del ecosistema mostró una tendencia similar a la Productividad Primaria Bruta. En los meses de octubre a abril, la respiración del ecosistema se mantuvo por debajo de  $6\text{gC día}^{-1}$ , a excepción del mes de diciembre donde se estimaron valores de hasta  $10\text{gC día}^{-1}$ . El aumento de la temperatura en combinación con eventos de lluvia a inicios del mes de mayo, provocaron un aumento considerable en la respiración del ecosistema (**Figura 6.5.2**).



**Figura 6.5.2** Tendencia de la respiración del ecosistema en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

La variabilidad del intercambio neto de CO<sub>2</sub> en el ecosistema no presentó una tendencia clara. Valores mayores de intercambio neto se presentaron en el periodo de lluvia, aunque el mes de octubre fue muy variable. En el mes de marzo y durante el invierno los valores del Intercambio neto del ecosistema fueron menores. Hubo algunos días en los meses de octubre, enero, marzo y junio, donde el ecosistema actuó como una fuente de CO<sub>2</sub> (**Figura 6.5.3**).



**Figura 6.5.3** Tendencia del intercambio neto del ecosistema en un bosque bajo manejo forestal en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo. Valores negativos representan absorción de CO<sub>2</sub> por el ecosistema.

#### 6.5.2. Controles ambientales

Los resultados del análisis correlación de Spearman ( $p$  value < 0.01) indicaron que la radiación neta (0.76), déficit de presión de vapor (0.4) y la humedad relativa (0.4) tuvieron mayor control sobre el Intercambio neto del ecosistema. El modelo de regresión lineal múltiple mostró que las variables con mayor correlación también resultaron ser las más significativas para explicar el intercambio de CO<sub>2</sub> en el ecosistema.

### 6.5.3. Variación estacional

El Intercambio neto del ecosistema fue similar en la temporada de “nortes” y de secas y ligeramente mayor en la temporada de lluvia. A pesar de ello la prueba de Kruskal – Wallis ( $p < 0.001$ ) indicó diferencias significativas entre las estaciones. Sin embargo, los resultados del análisis *post hoc* con la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon, mostraron que entre el periodo de “nortes” y secas no hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Pero ambos periodos sí fueron significativamente diferentes con respecto a la época de lluvias. El mismo análisis se hizo para las variables que tuvieron mayor control sobre el intercambio neto del ecosistema. En el **Cuadro 6.5.2** se muestran las variaciones del intercambio neto del ecosistema y se resumen los resultados de las pruebas de comparación.

**Cuadro 6.5.2** Variación estacional del Intercambio neto del ecosistema y principales factores de control en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

	Temporada		
	Nortes	Seca	Lluvia
INE	-4.0±2.0 (b)	-4.0±2.5 (b)	-4.6±2.2 (a)
Reco	4.2±1.7 (b)	6.4±2.0 (a)	6.9±2.4 (a)
PPB	8.2±2.5 (c)	10.2±3.3 (b)	11.4±3.4 (a)
Rn	108.5±33.0 (c)	153.9±49.2 (a)	127.4±47.6 (b)
DPV	0.33±0.29 (a)	0.48±0.45 (a)	0.19±0.13 (b)
HR	78.9±16.3 (b)	76.9±20.5 (c)	89.8±6.7 (a)

### 6.6. Estimación de la Productividad Primaria Neta

La Productividad Primaria Neta representa la cantidad de carbono disponible para su acumulación en un ecosistema. También se denomina Intercambio neto del ecosistema cuando se cuantifica usando mediciones de intercambio de CO<sub>2</sub> entre la superficie terrestre y la atmósfera.



El incremento en el almacén de carbono estimado para fuste y ramas, en las 12 parcelas de muestreo consideradas, fue muy variable. En el **Cuadro 6.6.1** muestra el incremento en el almacén de carbono para cada componente analizado. Asimismo, en el apartado de anexos se presentan los resultados del total de carbono almacenado por componente y por parcela de muestreo. (**Cuadro 10.3.1**, **Cuadro 10.3.2** y **Cuadro 10.3.3**). En promedio, se estimó que el incremento en la cantidad de carbono almacenado fue de 7.37 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 6.6.1** Estadísticas del incremento en el almacén de carbono, estimado a partir de mediciones de inventario, para cada componente, en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

	Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>			TOTAL
	Fuste y Ramas	Raíz	Hojarasca	
Mínimo	0.49	0.05	1.75	2.29
Máximo	6.65	1.27	3.61	11.53
Promedio	4.14	0.70	2.53	7.37
Desviación estándar	1.11	0.23	0.45	

La Productividad Primaria Neta estimada con datos de inventario (7.37 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en promedio) estuvieron por debajo de las obtenidas con el método de *eddy covariance* (15.58 Mg C ha<sup>-1</sup>). Aun tomando el valor máximo (11.53 Mg C ha<sup>-1</sup>) de almacén de carbono total, estas continuaron siendo menores a las del Intercambio neto del ecosistema.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. Balance de energía

La disponibilidad de humedad en el suelo tiene un control importante en la división de la energía (Gholz y Clark, 2002; Sun *et al.*, 2010). En los bosques templados, durante la temporada de crecimiento la disponibilidad de humedad en el suelo no suele ser limitante. Por lo que, durante este periodo, es común que el flujo de calor latente sea superior que el calor sensible (Yan *et al.*, 2017). En el periodo analizado en este estudio solo en los meses de junio, agosto, septiembre y octubre el calor latente tuvo valores superiores que el calor sensible. Lo que indica que para estos periodos la disponibilidad de agua no fue un factor que limitara el desarrollo de la vegetación. Varios autores relacionan estas dos variables energéticas a través de la relación de Bowen (H/LE) (Gholz y Clark, 2002; Giambelluca *et al.*, 2009; Tudoroiu *et al.*, 2018). Se encontró que para este sitio la relación de Bowen fue menor en octubre (0.60) y un valor mayor se obtuvo para mayo (1.65) (**Cuadro 6.3.1**). Valores superiores a 1 rep En este mes los promedios de radiación neta, y temperatura máxima fueron superiores y el contenido de agua en el suelo fue menor.

Es posible que bajo estas condiciones el arbolado se estrese y en consecuencia genere modificaciones significativas en la productividad del ecosistema. Sin embargo, esto dependerá de los mecanismos de respuesta y tolerancia que las plantas hayan desarrollado ante tales situaciones (Méndez-Espinoza y Vallejo-Reyna, 2019). Por lo general, el cierre de estomas es el principal mecanismo de respuesta ante el déficit hídrico y altas temperaturas. Si únicamente las temperaturas altas son el problema, el arbolado continuará transpirando, ya que debido a su efecto de enfriamiento mantendrá una temperatura de la superficie foliar adecuada (Harfouche *et al.*, 2014). Probablemente esto es lo que suceda en el sitio de estudio, dado que no se encontraron diferencias significativas en las tasas de evapotranspiración del periodo de lluvia y la temporada de secas. De tal manera que, a pesar de los valores bajos en el contenido de agua en el suelo, esto no representa un problema de disponibilidad de agua para la vegetación arbórea.

## 7.2. Evapotranspiración

Los resultados de este estudio mostraron que la evapotranspiración del bosque bajo manejo fue muy variable durante el periodo evaluado. La evapotranspiración anual (980 mm) fue similar a las reportadas en una plantación de *Pinus taeda* (1076 ± 104 mm/año) en Carolina del Norte, USA (Sun *et al.*, 2010). En general, éste sitio presentó temperaturas cálidas, no tuvo problema en la disponibilidad de agua y el suelo tuvo un alto contenido de materia orgánica. De acuerdo con evaluaciones de las tasas de evapotranspiración asumidas para bosques templados (710.8 mm promedio), estas son más bajas que en bosques tropicales (1502.2 mm) (Ohte y Tokuchi, 2011). En el caso de las regiones áridas y semiáridas, la magnitud de la evapotranspiración es mucho menor a las reportadas en este estudio. En ecosistemas áridos uno de los principales factores que influye en la dinámica de la evapotranspiración es la precipitación y además existe una clara influencia de la vegetación (Bierderman *et al.*, 2016). En condiciones de sequía el proceso de transpiración se ve limitado a causa del estrés hídrico en las plantas, debido a la alta demanda de evaporación atmosférica y al contenido restringido de agua del suelo (Meza *et al.*, 2018).

Los procesos que controlan la evapotranspiración implican efectos de factores físicos y biológicos combinados (Novick *et al.*, 2015) controlados por las condiciones ambientales (Xu *et al.*, 2014). Por lo general, en sitios ubicado en latitudes medias y altas, la radiación neta y la temperatura del aire son las variables que dominan en el control de la evapotranspiración (Chen *et al.*, 2018). Esto se debe a que la radiación es considerada la dotación de energía disponible para llevar a cabo la evaporación (Izadifar y Elshorbagy, 2010). Además, la capacidad de la atmósfera para retener agua aumenta conforme aumenta la temperatura del aire (Pan *et al.*, 2015; Wagle *et al.*, 2016). Sin embargo, cuando la humedad en el suelo es limitante, aumenta el déficit de presión de vapor, lo que afecta la respuesta fisiológica de las plantas. Por lo tanto, el déficit de presión de vapor se vuelve más relevante en el control de la evapotranspiración (Zha *et al.*, 2013). Cuando la humedad del suelo no es la suficiente, se esperaría que la planta cerrará las estomas para evitar la pérdida excesiva de agua (Landsberg y Sands, 2011).

Sin embargo, las respuestas de las plantas a las condiciones climáticas dependen de las especies y del historial de vida y manejo, por lo tanto, puede haber un componente genético en las respuestas climáticas, que haga que tengan respuestas fisiológicas diferenciales a estímulos similares (Qaderi *et al.*, 2019). El papel de la vegetación ha sido evaluado a través del monitoreo del Índice de Área Foliar, conductancia de la hoja o del dosel, o índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (Cabral *et al.*, 2015; Mo *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2017). Pero pocos son los estudios que evalúan los efectos de los factores ambientales en las estructuras encargadas del transporte de agua, en especial el xilema (Qaderi *et al.*, 2019).

En una plantación dominada por *Pinus tabuliformis*, en Beijing China, un bajo contenido de agua en el suelo ( $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) en combinación con una radiación neta ( $\sim 200 \text{ W m}^{-2}$ ) y temperaturas altas ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ), causaron una evapotranspiración baja (51.7 mm, en el mes más seco) (Ma *et al.*, 2018). En contraste, aquí se reporta que las tasas de evapotranspiración más altas ( $89.5 \text{ mm mes}^{-1}$ , en promedio), ocurrieron en la época de secas (**Cuadro 6.2.1**). Esto sugiere que durante este periodo la vegetación no tuvo restricciones de suministro de agua y que tal vez la conductancia del dosel no sea un factor que limite el proceso de evapotranspiración.

Las condiciones de disponibilidad de humedad reducen la sensibilidad de la conductancia del dosel a los cambios en el déficit de presión de vapor (Liu *et al.*, 2018). Además, las variables climáticas lograron explicar la mayor parte (61%) de la variabilidad de la evapotranspiración. El bajo problema de falta de agua, durante la época de secas, puede atribuirse a la capacidad de los árboles para acceder a fuentes de agua más profundas como lo señalan Thompson *et al.* (2011). Otra posibilidad es que los eventos de precipitación, durante el periodo de “nortes”, proporcionaron humedad suficiente para contrarrestar los impactos de la época de secas.

Los efectos del manejo forestal en la evapotranspiración no se evaluaron. Sin embargo, un aclareo con una intensidad de 50% realizado en una plantación de *Pinus taeda* mostró pequeñas variaciones interanuales en la radiación neta, y una ligera disminución de la evapotranspiración. Con base en los resultados, Liu *et al.*, (2018) sugirieron que los bosques eran relativamente insensibles a las actividades de manejo, pues el rápido crecimiento del sotobosque y el cierre del dosel permitieron una pronta recuperación de las tasas de evapotranspiración. Los efectos del manejo forestal se vuelven más notables durante los periodos secos en sistemas con agua limitada, pero tienden a disminuir conforme la edad del rodal aumenta (Sun *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2017).

**Cuadro 7.2.1** Variación temporal de la precipitación total anual en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

Año	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Precipitación (mm)</b>	1 255	812	1 227	1 286	750.7

Los hallazgos aquí mostrados representan información sobre los principales factores climáticos que controlaron el intercambio de agua en un bosque bajo manejo. Estos resultados se basaron en el monitoreo continuo a lo largo de un año. Durante el periodo de estudio la precipitación fue 20% menor a la ocurrida en años anteriores (**Cuadro 7.2.1**). Puede ser que estas variaciones hayan provocado cambios en la evapotranspiración.

De acuerdo a lo señalado por Zha *et al.* (2013), las variaciones interanuales en la evapotranspiración suelen ser menores en bosques de coníferas (7-14%) en comparación a la de los bosques caducifolios, donde se han reportado intervalos interanuales de ~30%. A pesar de ello, son necesarios estudios a largo plazo, que además involucren otros parámetros, que permitan aclarar y ampliar la comprensión de los procesos de intercambio de agua en los bosques bajo manejo.

### 7.3. Balance de carbono

El Intercambio neto del ecosistema del bosque en estudio fue de  $1558 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Este resultado es superior que los reportados para bosques templados con especies de coníferas. En contraste, en estudios realizados en regiones áridas y semiáridas, la magnitud del intercambio neto de carbono fue mucho menor a la reportada en este estudio. Las causas de la variabilidad en el intercambio neto de carbono en los bosques son múltiples y varían según el clima y el tipo de bosque (Aubinet *et al.*, 2018). Baldocchi (2018) resumió que en las regiones templadas y semiáridas la deficiencia de lluvia causó una disminución de la fotosíntesis. En los trópicos húmedos, demasiada lluvia limitó el proceso de fotosíntesis, debido a la humectación de la hoja, esto puede generar una reducción en las tasas de crecimiento y un aumento en respiración autotrófica. Las temperaturas cálidas alargaron la temporada de crecimiento, aumentando la fotosíntesis, pero este efecto también aumentó la respiración del suelo.

En este estudio, el intercambio neto del ecosistema no mostró una tendencia clara en la estacionalidad. La radiación neta, déficit de presión de vapor y humedad relativa, solo lograron explicar el 43% de la variabilidad en el intercambio de (Zha *et al.*, 2010). En un bosque de coníferas de abeto negro, en la región subhúmeda del este de Canadá, el flujo de  $\text{CO}_2$  aumentó con la conductancia de la superficie y la radiación fotosintéticamente activa. En conjunto con el déficit de presión de vapor estas variables explicaron el 54% de la variación de los flujos de carbono (Zha *et al.*, 2010).  $\text{CO}_2$ . Explicar la variabilidad del intercambio de carbono, utilizando únicamente variables meteorológicas no es posible (Pilegaard *et al.*, 2011). La mayoría de las investigaciones que analizan los controles en el flujo de  $\text{CO}_2$ , incluyen análisis de la conductancia estomática y, mediciones de índice de área foliar

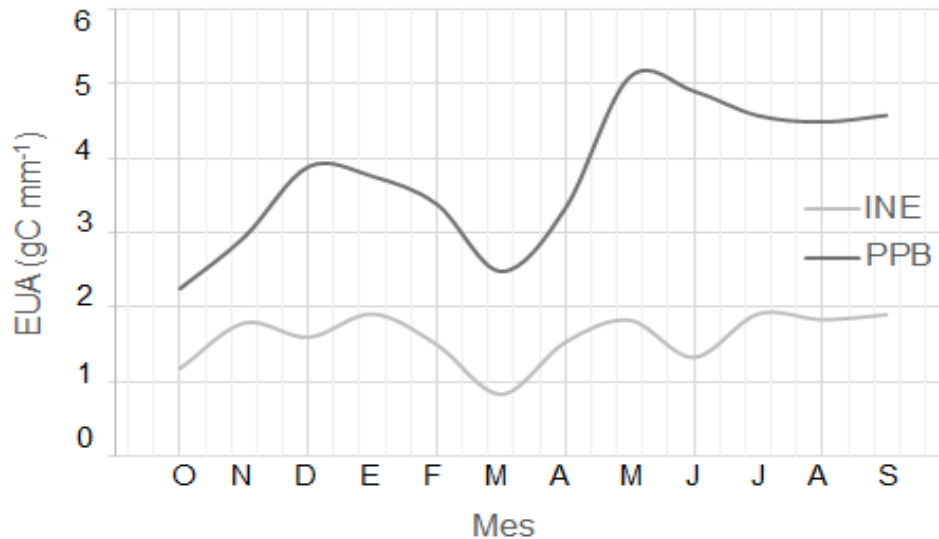
Comprender los cambios en el intercambio neto del ecosistema se vuelve más complejo debido a que depende de la magnitud de los flujos que la componen (Baldocchi, 2018). La Productividad Primaria Bruta y la respiración del ecosistema responden de diferente manera a los factores ambientales (Aubinet *et al.*, 2018).

En este estudio se encontró que la mayor parte (60%) de la Productividad Primaria Bruta fue devuelta a la atmósfera por la respiración del ecosistema. Los meses con mayor Productividad Primaria Bruta también fueron los meses con mayor respiración del ecosistema. La respuesta de la respiración del ecosistema está asociada principalmente a la combinación de los cambios en la temperatura (aire y suelo) y la humedad del suelo.

#### **7.4. Interacción agua CO<sub>2</sub>**

El intercambio de vapor de agua a través de la transpiración y la absorción de CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis se llevan a cabo en los estomas de las hojas. Por lo tanto, la tasa de evapotranspiración afecta directamente la fotosíntesis de la planta y por consiguiente la Productividad Primaria Neta (Zhang *et al.*, 2019). Es importante conocer las relaciones de la productividad con el uso del agua en el ecosistema.

La eficiencia del uso de agua (EUA) es un indicador de la compensación entre la absorción de carbono y la pérdida de agua a la atmósfera a nivel de planta o ecosistema (Wenping y Sinkyu, 2019). En la **Figura 7.4.1** se muestra la EUA calculada a nivel ecosistema ((INE y PPB) / ET) para el sitio de estudio. La EUA fue menor en el mes de marzo y tendió a aumentar durante la época de seca. Esto fue consistente con lo encontrado por Zha *et al.* (2013) quienes sugieren que un aumento en el uso eficiente del agua en condiciones de seca indica un mecanismo de respuesta de la planta al déficit hídrico.



**Figura 7.4.1** Tendencia de la eficiencia de uso de agua, calculada con el Intercambio neto del ecosistema y con la Productividad Primaria Bruta de octubre de 2017 a septiembre de 2018, en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán Hgo.

Lo ideal sería asegurar un equilibrio entre el aumento de la productividad y conservación de los recursos hídricos. El agua también es necesaria para que los árboles transporten nutrientes, mantengan la función celular y regulen la conductancia estomática. Además, el seguimiento de las propiedades fisiológicas mejoraría significativamente el entendimiento del ciclo del agua y el carbono dentro del ecosistema.

### 7.5. Productividad Primaria Neta

Comparaciones de enfoques biométricos con mediciones de flujos con el método de *eddy covariance*, realizadas por Campioli *et al.* (2016) en sitios forestales, principalmente selvas bajas tropicales, mostraron un buen acuerdo entre ambos enfoques. En contraste, para este estudio se encontró discrepancias entre las estimaciones de estos métodos. En un estudio a largo plazo (serie temporal de 9 años) realizado en un bosque caducifolio se encontraron resultados inconsistentes en los flujos de carbono y crecimiento de madera (Delpierre *et al.*, 2016) encontraron resultados inconsistentes, al analizar una serie temporal de 9 años de flujos de carbono y crecimiento de madera, en un bosque caducifolio.



Probablemente las diferencias entre las mediciones con ambos métodos puedan deberse al almacenamiento temporal de carbohidratos no estructurales (Babst *et al.* 2013). A menudo estos carbohidratos contribuyen al aumento temprano en biomasa de la siguiente temporada de crecimiento (Elgin *et al.*, 2010).

Teets *et al.*, (2018), vincularon el crecimiento anual de un bosque mezclado, a lo largo de 20 años, con mediciones de *eddy covariance*. Se encontró una gran cantidad de carbono asimilado por la fotosíntesis que no fue asignado al crecimiento estructural hasta un año después. El uso simultáneo de datos de inventario y métodos *eddy covariance* se realicen utilizando series de tiempo relativamente extensas es altamente recomendable.

Los hallazgos aquí mostrados representan información sobre los principales factores ambientales que controlaron el intercambio de agua y CO<sub>2</sub> en un bosque bajo manejo. Estudios posteriores a largo plazo que involucren la medición y análisis de otros parámetros como índice de área foliar, conductancia del dosel, potencial hídrico, humedad del suelo a diferentes profundidades, son necesarios para aclarar y ampliar la comprensión de los procesos de intercambio de agua y CO<sub>2</sub> en los bosques bajo manejo para la producción maderable.

## 8. CONCLUSIONES

Las mediciones del intercambio de vapor de agua y CO<sub>2</sub> entre el ecosistema y la atmósfera, realizadas en este estudio, representan las primeras observaciones continuas realizadas en un bosque bajo manejo forestal en México. Esta información permitió caracterizar la variabilidad de la evapotranspiración e inferir sobre la dinámica en la productividad del ecosistema.

La evapotranspiración total en el bosque bajo manejo forestal fue de 980 mm. El intercambio neto del ecosistema fue de 15.59Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La variación de la evapotranspiración no fue consistente con la variación del intercambio neto del ecosistema.

La evapotranspiración estuvo controlada por el contenido de humedad del suelo, la temperatura, la radiación neta y el déficit de presión de vapor. En conjunto estos factores explicaron el 61% de la evapotranspiración. En el caso del intercambio neto del ecosistema, el déficit de presión de vapor, la radiación neta y la humedad relativa tuvieron mayor influencia. Estas variables meteorológicas solo explicaron el 43% de la variabilidad de este proceso.

Valores mínimos de evapotranspiración ocurrieron durante el periodo denominado como “nortes”. A pesar de los cambios estacionales en la radiación neta y el contenido de humedad del suelo, no se encontraron diferencias significativas entre la evapotranspiración ocurrida durante la temporada de lluvia y la época de secas. El intercambio neto del ecosistema fue mayor durante la época de lluvias y no hubo diferencias significativas entre el intercambio neto del ecosistema de la época de secas y el periodo de “nortes”.

Las mediciones del Intercambio neto del ecosistema fueron superiores a la estimación de la Productividad Primaria Neta en el ecosistema evaluado.

## 9. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., De Los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapping aboveground tree carbon in managed patula pine forests in Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43, 209–220.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje 56, 297 p. DOI:10.1590/1983-40632015v4529143
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015
- Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Asbjornsen, H., Dawson, T. E., & Bruijnzeel, L. A. (2014). Suppression of transpiration due to cloud immersion in a seasonally dry Mexican weeping pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 186, 12–25. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.11.002
- Ángeles-Pérez, G., Méndez-López, B., Valdez-Lazalde, R., Plascencia-Escalante, F. O., De Los Santos-Posadas, H. M., Chávez-Aguilar, G., Ortiz -Reyes, A. D., Soriano-Luna, M. A., Zaragoza-Castañeda, Z., Ventura-Palomeque, E., Martínez-López, A., Wayson, C., López-Merlín, D., Olguín-Álvarez, M., Carrillo-Negrete, O., & Maldonado-Montero, V. (2015). *Estudio de Caso del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono en Hidalgo*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 105 p.
- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis*. Netherlands: Springer. 438 p. DOI: 10.1007/978-94-007-2351-1.
- Aubinet, M., Hurdebise, Q., Chopin, H., Debacq, A., De Ligne, A., Heinesch, B., Manise, T., & Vincke, C. (2018). Inter-annual variability of Net Ecosystem Productivity for a temperate mixed forest: A predominance of carry-over effects? *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 340–353. DOI:10.1016/j.agrformet.2018.07.024
- Babst, F., Poulter B., Trouet V., Tan K., Neuwirth B., Wilson, R., Carrer, R., Grabner, M., Teje W., & Levanic T. (2013). Site -and species- specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 706-717. DOI:10.1111/geb.12023
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Berhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., KAtul, G., Law, B., Lee, B., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, U. K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001).

FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415–2434. DOI:10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2

Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4), 479–492. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

Baldocchi, D.D., Ryu, Y. (2011) A synthesis of forest evaporation fluxes – from days to years – as measured with eddy covariance. In: Levia, D., Carlyle-Moses, D., Tanaka, T. (Eds.). *Forest hydrology and biogeochemistry: synthesis of past research and future directions*. (pp. 100-116). Delaware, USA: Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-1363-5\_5

Baldocchi, D. D. (2019). How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*. 26, 242-260. DOI:10.1111/gcb.14807

Benner, J., Vitousek, P. M., & Ostertag. R. (2011). Nutrient cycling and nutrient limitation in tropical montane cloud forests. In: Bruijnzeel, L.A., Scatena, F.N., & Hamilton, L.S. (eds). *Tropical montane cloud forests: science for conservation and management*. Cambridge University Press, London. pp: 90-100.

Berry, Z. C., Gotsch, S. G., Holwerda, F., Muñoz-Villers, L. E., & Asbjornsen, H. (2016). Slope position influences vegetation-atmosphere interactions in a tropical montane cloud forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 221, 207–218. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.02.012

Biederman, J. A., Scott, R. L., Goulden, M. L., Vargas, R., Litvak, M. E., Kolb, T. E., Yépez, E. A., Oechel, W. C., Blanken, P. D., Bell, T. W., Garatuza-Payan, J., Maurer, G. E., Dore, S., & Burns, S. P. (2016). Terrestrial carbon balance in a drier world: The effects of water availability in southwestern North America. *Global Change Biology* 22, 1867–1879. DOI:10.1111/gcb.13222

Birdsey, R., & Pan, Y. D. (2011). Ecology drought and dead trees. *Nature Climate Change*, 1(9), 444-445, DOI: 10.1038/nclimate1298.

Bonan, G. (2016). *Ecological climatology: concepts and applications*. 3a ed. Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. New York, USA. Cambridge University Press. 692 p. DOI: 10.21425/f58433332

Brümmer, C., Black, T. A., Jassal, R. S., Grant, N. J., Spittlehouse, D. L., Chen, B., Grant, Nicholas, J., Spittlehouse, David L., Chen, B., Nestic, Z., Amiro, B. D., Araine, M. A., Barr, A. G., Bourque, C. P., Coursolleh, C., Dunn, A. L., Flanagan, L. B.,

- Humphreysk, E. R., Lafleur, P. M., Margolish, H. A., McCaughey j. H., & Wofsyn S. C. (2012). How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 153, 14–30. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.04.008
- Burba, G. (2013). Eddy covariance method: for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications. LI-COR Biosciences. USA. 330 p.
- Cabral, O. M. R., da Rocha, H. R., Gash, J. H., Freitas, H. C., & Ligo, M. A. V. (2015). Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4: 22–40. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.04.010
- Campioli, M., Malhi, Y., Vicca, S., Luysaert, S., Papale, D., Peñuelas, J., Reichstein, M., Migliavacca, M., Arain, M. A., & Janssens, I. A. (2016). Evaluating the convergence between eddy-covariance and biometric methods for assessing carbon budgets of forests. *Nature Communications*, 7, 1–12. DOI:10.1038/ncomms13717
- Canny, M. J. (1998). Transporting water in plants that possible by protecting the stretched water and repairing it when it breaks. *American Scientist*, 86(2), 152–159.
- Chan, F. C. C., Arain, M. A., Khomik, M., Brodeur, J. J., Peichl, M., Restrepo-Coupe, N., Thorne, R., Beamesderfer, E., McKenzie, S., Xu, B., Croft, H., Pejam, M., Trant, J., Kula, M., & Skubel, R. (2017). Carbon, water and energy exchange dynamics of a young pine plantation forest during the initial fourteen years of growth. *Forest Ecology and Management*, 410, 12–26. DOI:10.1016/j.foreco.2017.12.024
- Chapin, F. S., Matson, P. a, & Mooney, H. A. (2002). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. 2a ed. Springer, New York, USA. 529 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-9504-9.
- Chapin, F.S., Woodwell, G.M., Randerson, J.T., Rastetter, E. B., Lovett, G. M., Baldocchi, D. D., Clark D. A., Harmon, M. E., Schimel, D. S., Valentini, R., Wirth, C., Aber, J. D., Cole J. J., Goulden, M. L., Harden, J.W., Heimann, M., Howarth, R. W., Matson, P.A, McGuire A. D., Melillo, J. M., Mooney, H. A., Neff, J. C., Houghton, R. A., Pace, M. L., Ryan, M. G., Running, S. W., Sala, O. E., Schlesinger, W. H., Schulze, E. D. (2006). Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems* 9 1041–1050. DOI: 10.1007/s10021-005-0105-7
- Chen, Y., Xue, Y., & Hu, Y. (2018). How multiple factors control evapotranspiration in North America evergreen needleleaf forests. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1217–1224. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.038
- Collalti, A., & Prentice, I. C. (2019). Is NPP proportional to GPP? Waring’s hypothesis 20 years on. *Tree Physiology*, 39, 1473–1483. DOI:10.1093/treephys/tpz034
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2012). Inventario Nacional Forestal y de

Suelos: Manual y procedimientos para el muestreo de campo. México. 136 p.

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2017). Primer resumen de información sobre la forma en que se están abordando y respetando todas las salvaguardas mencionadas en la decisión 1/CP.16 apéndice I, en México. México. 43 p.

Cristiano, P. M., Campanello, P. I., Bucci, S. J., Rodríguez, S. A., Lezcano, O. A., Scholz, F. G., Madanes, N., Francescantonio Di, D., Carrasco, L. O., Zhang, Y. J., & Goldstein, G. (2015). Evapotranspiration of subtropical forests and tree plantations: A comparative analysis at different temporal and spatial scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203: 96–106. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.01.007

Delgado-Balbuena J., Yépez, E. A., Paz-Pellat, F., Ángeles-Pérez, G., Alvarado-Barrientos, M. S., Bullock, S. H., Castellanos, A. E., Arredondo, T., Figueroa-Espinoza, B., Garatuza-Payán, J., González-del Castillo, E., González-Sosa, E., Maya-Delgado, Y., Rodríguez, J. C., Vargas, R., Vivoni, E. R., & Watts, C. J. (2019). Flujos verticales de carbono en ecosistemas terrestres. *In: Paz-Pellat, F., Hernández-Ayon, J. M., Sosa-Avalos, R. y Velázquez-Rodríguez, A. S. (Eds.). Estado del ciclo del carbono en México agenda azul y verde.* (pp. 605-625). Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

Delpierre, N., Berveiller, D., Granda, E., & Dufrêne, E. (2016). Wood phenology, not carbon input, controls the interannual variability of wood growth in a temperate oak forest. *New Phytologist*. 210(2), 459-470. DOI: 10.1111/nph.13771

Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. DOI:10.21829/myb.2007.1311233

Domec, J., Sun, G., Noormets, A., Gavazzi, M. J., Treasure, E. A., Cohen, E., Swenson, J. J., McNulty, S. G., & King, J. S. (2012). A comparison of three methods to estimate evapotranspiration in two contrasting Loblolly pine plantations : Age-related changes in water use and drought sensitivity of evapotranspiration components. *Forest Science*, 58(5), 497–512.

Dolman, A. J., Moors, E. J., Grundwald, P. B., & Bernhofer, C. (2003). Factors controlling forest atmosphere exchange of water, energy, and carbon. *In: Valentini R. (Ed.). Fluxes of carbon, water and energy of european forests. ecological studies analysis and synthesis.* (pp. 207–224). Berlin, Germany: Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-05171-9\_6

Drake, J. E., Gallet-Budynek, A., Hofmockel, K. S., Bernhardt, E. S., Billings, S. A., Jackson, R. B., Johnsen, K. S., Lichter, J., McCarthy, H. R., McCormack, M. L., Moore, D. J., Oren, R., Palmroth, S., Phillips, R. P., Phippen, J. S., Pritchard, S. G.,

- Treseder, K. K., Schlesinger, W. H., Delucia, E. H., & Finzi, A. C. (2011). Increases in the flux of carbon belowground stimulate nitrogen uptake and sustain the long-term enhancement of forest productivity under elevated CO<sub>2</sub>. *Ecology Letters*, 14(4), 349–357, DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01593.x.
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D. L. A., Spracklen, D. V., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebrehiwot, S. G., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43: 51–61. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002
- Falge, E., Baldocchi, D. D., & Olson, R. (2001). Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 43–69. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00225-2
- Fisher, J. B., Whittaker, R. J., & Malhi, Y. (2011). ET come home: Potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 1–18. DOI:10.1111/j.1466-8238.2010.00578.x
- García, A. G., Campos, A. N., Di Bella, C. M., & Posse, G. (2008). Evolución de la evapotranspiración en diferentes coberturas vegetales de la Argentina utilizando productos derivados del sensor MODIS. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1–5.
- Gholz, H. L., & Clark, K. L. (2002). Energy exchange across a chronosequence of slash pine forests in Florida. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(2), 87–102. DOI: 10.1016/S0168-1923(02)00059-X
- Giambelluca, T. W., Martin, R. E., Asner, G. P., Huang, M., Mudd, R. G., Nullet, M. A., DeLay, J. K., & Foote, D. (2009). Evapotranspiration and energy balance of native wet montane cloud forest in Hawai'i. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(2), 230–243. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.08.004
- Goetz, S., & Dubayah, R. (2011). Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. *Carbon Management*, 2(3), 231–244. DOI:10.4155/cmt.11.18
- Gorte, R. W. (2009). *Carbon Sequestration in Forests*. Congressional Research Service. 23 p.
- Harfouche, A., Meilan, R., & Altman, A. (2014). Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*. 34, 1181-1198. DOI: 10.1093/treephys/tpu012.

- Hollinger, D. Y. (2008). Defining a landscape-scale monitoring tier for the North American Carbon Program. *In: Hoover, C. M. (Ed.). Field measurements for forest carbon monitoring.* (pp. 3–16). Durham NH, USA: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4020-8506-2\_1
- Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., & González-Martínez, T. M. (2016). Surface energy exchange in a tropical montane cloud forest environment: Flux partitioning, and seasonal and land cover-related variations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 13–28. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.06.011
- Huryňa, H., & Pokorný, J. (2016). The role of water and vegetation in the distribution of psolar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica*, 51(3), 191–208. DOI: 10.1007/s12224-016-9261-0
- Intergovernmental Panel Change Climatic [IPCC]. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *In: Climate Change 2001: The scientific basis.* DOI:10.1256/004316502320517344
- Intergovernmental Panel Change Climatic [IPCC]. (2006). *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories.* Prepared by the National Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T. y Tanabe K (eds.). IGES, Japan.
- Izadifar, Z., & Elshorbagy, A. (2010). Prediction of hourly actual evapotranspiration using neural networks, genetic programming, and statistical models. *Hydrological Processes*, 24(23), 3413–3425. DOI: 10.1002/hyp.7771
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., Jeu de, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Ley, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A. D., Roupsard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., & Zhang, K. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467(7318), 951–954. DOI:10.1038/nature09396
- Kindermann, G. E., McCallum, I., Fritz, S., & Obersteiner, M. (2008). A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*, 42(3), 387–396. DOI:10.14214/sf.244
- Kirschbaum, M. U. F., Eamus, D., Gifford, R. M., Roxburgh, S. H., & Sands, P. J. (2001). Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. *In: Kirschbaum, M. U. F., & Mueller, R. Net Ecosystem Exchange Workshop.* (pp. 1–5). Australia: CRC for Greenhouse Accounting.



- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., & Schmid, H. P. (2015). A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8, 3695–3713. DOI: 10.5194/gmd-8-3695-2015
- Landsberg, J., & Sands, P. (2011). *Physiological ecology of forest production: principles, processes and models*. Massachusetts, USA: Elsevier. 352 p. DOI: 10.1016/S1936-7961(11)04007-3
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A. D., Arneeths, A., Barr, A., Stoy, P., Wohlfahrt, G. (2010). Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16(1), 187–208. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x
- Law, B. E., Falge, E., Gu, L., Baldocchi, D. D., Bakwin, P., Berbigier, P., Davis, K., Dolman, A. J., Falk, M., Fuentes, J. D., Goldstein, A., Granier, A., Grelle, A., Hollinger, D., Janssens, I. A., Jarvis, P., Jensen, N. O., Katul, G., & Wofsy, S. (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agriculture and Forest Meteorology*, 113(113), 97–120.
- LI-COR, Inc. (2016). EddyPro® Software (Version 6.2) [Software]. Lincoln, NE. LI-COR, Inc; Infrastructure for Measurements of the European Carbon Cycle consortium. Recuperado de <https://www.licor.com/env/support/EddyPro/software.html>
- Liu, X., Sun, G., Mitra, B., Noormets, A., Gavazzi, M. J., Domec, J-C., Hallema. D. W., Li, J., Fang, Y., King, J. S., & McNulty, S. G. (2018). Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 14–23. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.06.025
- Liu, Y., & El-Kassaby, Y. A. (2018). Evapotranspiration and favorable growing degree-days are key to tree height growth and ecosystem functioning: Meta-Analyses of Pacific Northwest historical data. *Nature*, 8228 (8), 1-12. DOI: 10.1038/s41598-018-26681-1
- López, F. R., Rubio, E., Moya, D., de las Heras, J., Andrés, M., Cerro del, A., García, F. A., Sánchez, J. M., Lucas, M. E., Dadi, T., González, J. L., Martínez, E., & Candel, D. (2011). Los bosques como sumideros de CO<sub>2</sub>: incertidumbre en los cálculos y necesidad de potenciar la investigación. *Foresta*, 47–48, 74–81.
- Loustau, D., & Rambal, S. (2010). The forest carbon cycle: Generalities, definitions and scales. In: Loustau, D. (Ed.). *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*. (pp. 19-26). Paris, France: Quae. DOI:10.35690/978-2-7592-0385-7
- Ma, J., Zha, T., Jia, X., Tian, Y., Bourque, C. P. A., Liu, P., Bai, Y., Wu, Y., Ren, C., Yu,

- H., Zhang, F., Zhou, C., & Chen, W. (2018). Energy and water vapor exchange over a young plantation in northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 334–345. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.09.004
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., & Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 27–41. DOI: 10.1016/j.rmb.2017.10.008
- Marreno Santana, M. (2011). *Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales*. Tesis de maestría. Universidad de Granada. Disponible en: <http://www.ugr.es/~andyk/Theses/TesinaMaria.pdf>.
- Matsumoto, K., Ohta, T., Nakai, T., Kuwada, T., Daikoku, K., Iida, S., Yabuki, H., Kononov, A. V., Molen van der, M. K., Kodama, Y., Maximov, T. C., Dolman, A. J., & Hattori, S. (2008). Energy consumption and evapotranspiration at several boreal and temperate forests in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(12), 1978–1989. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.09.008
- Mauder, M., & Foken, T. (2006). Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(6), 597-609
- Medrano M., F. (2018). *Biomasa subterránea de Pinus patula: Ecuaciones alométricas y efectos de algunas características del sitio*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Méndez-Espinoza, C., & Vallejo-Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56), 33–64. DOI: 10.29298/rmcf.v10i56.567
- Meza, F. J., Montes, C., Bravo-Martínez, F., Serrano-Ortiz, P., & Kowalski, A. S. (2018). Soil water content effects on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and actual evapotranspiration in a Mediterranean semiarid savanna of Central Chile. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. DOI: 10.1038/s41598-018-26934-z
- Miyazaki, S., Ishikawa, M., Baatarbileg, N., Damdinsuren, S., Ariuntuya, N., & Jambaljav, Y. (2014). Interannual and seasonal variations in energy and carbon exchanges over the larch forests on the permafrost in northeastern Mongolia. *Polar Science*, 8(2), 166–182. DOI: 10.1016/j.polar.2013.12.004
- Mo, X., Liu, S., Chen, X., & Hu, S. (2018). Variability, tendencies, and climate controls of terrestrial evapotranspiration and gross primary productivity in the recent decade over China. *Ecohydrology*, 11(4), 1–13. DOI: 10.1002/eco.1951

- Monarrez-González, J. C., Perez-Verdin, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. del S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–16. DOI: 10.21829/myb.2018.2421569
- Moncrieff, J. B. (1997). A system to measure surface fluxes of momentum sensible heat, water vapor and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 589-611.
- Moncrieff, J. B. (2004). Averaging, detrending and filtering of eddy covariance time series. In: Lee, X., Massman, W. J., & Law, B. E. (Eds.). *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurements*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol 29. Dordrecht: Springer. DOI: 10.1007/1-4020-2265-4\_2
- Novák, V. (2012). *Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere system*. New York, USA: Springer. 256 p. DOI:10.1007/978-94-007-3840-9
- Novick, K. A., Oishi, A. C., Ward, E. J., Siqueira, M. B. S., Juang, J. Y., & Stoy, P. C. (2015). On the difference in the net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> between deciduous and evergreen forests in the southeastern United States. *Global Change Biology*, 21(2), 827–842. DOI: 10.1111/gcb.12723
- Ohte, N., & Tokuchi, N. (2011). Hydrology and biogeochemistry of temperate forest. In: Levia, D., Carlyle-Moses, D., Tanaka, T. (Eds.). *Forest hydrology and biogeochemistry: synthesis of past research and future directions*. (pp. 261-283). Delaware, USA: Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-1363-5\_5
- O'Geen, A. T. (2013). Soil water dynamics. *Nature Education Knowledge* 4(5), 9. Disponible en: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-water-dynamics-103089121/>
- Özhan, S., Gökbülak, F., Serengil, Y., & Özcan, M. (2010). Evapotranspiration from a mixed deciduous forest ecosystem. *Water Resources Management*, 24(10), 2353–2363. DOI:10.1007/s11269-009-9555-6
- Pan, S., Tian, H., Dangal, S. R. S., Yang, Q., Yang, J., Lu, C., Tao, B., Ren, W., & Ouyang, Z. (2015). Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO<sub>2</sub> in the 21st century. *Earth's Future*, 3(1), 15–35. DOI: 10.1002/2014EF000263
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., & Rambal, S. (2006). Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique : algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 571–583.
- Papale D., Migliavacca, M., Cremonese, E., Cescatti, A., Alberti, G., Balzarolo, M.,

- Marchesini, L. B., Canfora, E., Casa, R., Duce, P., Facini, O., Galvagno, M., Genesio, L., Gianelle, D., Magliulo, V., Matteucci, G., Montagnani, L., Petrella, F., Pitacco, A., Seufert, G., Spano, D., Stefani, P., Vaccari, F. P., & Valentini, R. (2015) Carbon, water and energy fluxes of terrestrial ecosystems in Italy. *In: Valentini R., Miglietta F. (Eds.) The greenhouse gas balance of Italy.* (pp. 11-45). Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-32424-6\_2
- Pardos-Carrión, J. A. (2004). La ecofisiología en el ámbito forestal. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 20, 11–23.
- Pérez-Ruiz, E. R., Garatuza-Payan, J., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Yépez, E. A., & Scott, R. L. (2010). Carbon dioxide and water vapour exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS). *Journal of Arid Environments*, 74(5), 556–563. DOI:10.1016/j.jaridenv.2009.09.029
- Perez-Verdin, G., Monarrez-González, J. C., Tecle, A., & Pompa-Garcia, M. (2018). Evaluating the multi-functionality of forest ecosystems in northern Mexico. *Forests*, 9(4), 1–14. DOI: 10.3390/f9040178
- Pilegaard K., Ibrom, A., Courtney, M. S., Hummelshøj, P., & Jensen, N. O. (2011). Increasing net CO<sub>2</sub> uptake by a Danish beech forest during the period from 1996 to 2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 934–946.
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., & Dixon, S. L. (2019). Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. *Plants*, 8(3), 1–23. DOI: 10.3390/plants8030065
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <http://www.R-project.org/>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, M., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, M., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., & Valentini, R. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x
- Rodríguez-Villarreal, S. (2012). *Variabilidad interanual de la evapotranspiración en dos ecosistemas semiáridos con patrones de precipitación distintos*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada [CICESE]. Ensenada, Baja California, México.

- Ryan, M.G., & Law, B.E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* 73(1),3-27.
- Ryan, M. G., Harmon, M. E., Birdsey, R. A., Giardina, C. P., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jackson, R. B., McKinley, D. C., Morrison, J. F., Murray, B. C., Pataki, D. E., & Skog, K. E. (2010). A synthesis of the science on forests and carbon for u.s. forests. *The Ecological Society of America*, 13, 1-13. USA.
- Sanwangsri, M., Hanpattanakit, P., & Chidthaisong, A. (2017). Variations of energy fluxes and ecosystem evapotranspiration in a young secondary dry dipterocarp forest in Western Thailand. *Atmosphere*, 8(152), 1-14. DOI: 10.3390/atmos8080152
- Soriano-Luna, M. de los Á.; Ángeles-Pérez, G.; Martínez-Trinidad, T.; Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015) Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49(4), 423-438.
- Soriano-Luna, M. de los Á., Ángeles-Pérez, G., Guevara, M., Birdsey, R., Pan, Y., Vaquera-Huerta, H., Valdez-Lazalde, J. R., Johnson, K. D., & Vargas, R. (2018). Determinants of above-ground biomass and its spatial variability in a temperate forest managed for timber production. *Forests*, 9(8), 1–20. DOI: 10.3390/f9080490
- Sulman, B. N., Roman, D. T., Scanlon, T. M., Wang, L., & Novick, K. A. (2016). Comparing methods for partitioning a decade of carbon dioxide and water vapor fluxes in a temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 226–227, 229–245. DOI:10.1016/j.agrformet.2016.06.002
- Sun, G., Noormets, A., Gavazzi, M. J., McNulty, S. G., Chen, J., Domec, J., ... Skaggs, R. W. (2010). Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina , USA. *Forest Ecology and Management*, 259, 1299–1310. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.016
- Sun, G., Domec, J. C., & Amatya, D. M. (2016). Forest evapotranspiration: measurement and modelling at multiple scales. *In: Amatya, D. M., Williams, T. M., Bren, L., & Jong de, C. Forest hydrology: processes, management and assessment* (pp. 32–50). DOI: 10.1079/9781780646602.0032
- Sun, X., Zou, C. B., Wilcox, B., & Stebler, E. (2018). Effect of vegetation on the energy balance and evapotranspiration in tallgrass prairie: a paired study using the eddy-covariance method. *Boundary-Layer Meteorology*. DOI: 10.1007/s10546-018-0388-9
- Tang, X., Wang, Z., Liu, D., Song, K., Jia, M., Dong, Z., Munger, J. W., Hollinger, D. Y., Bolstad, P. V., Goldstein, A. H., Desai, A. R., Dragoni, D., & Liu, X. (2012). Estimating the net ecosystem exchange for the major forests in the northern United States by

- integrating MODIS and AmeriFlux data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 75–84. DOI:10.1016/j.agrformet.2012.01.003
- Teets, A., Fraver, S., Hollinger, D. Y., Weiskittel, A. R., Seymour, R. S., & Richardson, A. D. (2018). Linking annual tree growth with eddy- flux measures of net ecosystem productivity across twenty years of observation in a mixed conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249:479–487. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.08.007.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *American Meteorological Society*, 1-13. DOI:10.1175/2008BAMS2634.1
- Thompson, S. E., Harman, C. J., Konings, A. G., Sivapalan, M., Neal, A., & Troch, P. A. (2011). Comparative hydrology across AmeriFlux sites: The variable roles of climate, vegetation, and groundwater. *Water Resources Research*, 47(7), 1–17. DOI: 10.1029/2010WR009797
- Tsuruta, K., Kosugi, Y., Takanashi, S., & Tani, M. (2016). Inter-annual variations and factors controlling evapotranspiration in a temperate Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, 30(26), 5012–5026. DOI: 10.1002/hyp.10977
- Tudoroiu, M., Genesio, L., Gioli, B., Schume, H., Knohl, A., Brümmer, C., & Miglietta, F. (2018). Solar dimming above temperate forests and its impact on local climate. *Environmental Research Letters*, 13(6), 1-11. DOI: 10.1088/1748-9326/aac4e0
- Ussiri, D. A. N., & Lal, R. (2017). *Carbon sequestration for climate change mitigation and adaptation*. Ohio, USA: Springer. DOI:10.1007/978-3-319-53845-7
- Vargas, R., Yopez, E. A., Andrade, J. L., Ángeles, G., Arredondo, T., Castellanos, A. E., Delfado-Balbuena, J., Garatuza-Payan, J., González del Castillo, E., Oechel, W., Rodríguez, J. C., Sánchez-Azofeifa, A., Velasco, E., Vivoni, E. R., & Watts, C. (2013). Progress and opportunities for water and greenhouse gases flux measurements in Mexican ecosystems: The MexFlux network. *Atmosfera*, 26(3), 325–336.
- Vickers, D., & Mahrt, L. (1997). Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 512–526.
- Wagle, P., Xiao, X., Kolb, T. E., Law, B. E., Wharton, S., Monson, R. K., Chen, J., Blanken, P. D., Novick, K. A., Dore, S., Noormets, A., & Gowda, P. H. (2016). Differential responses of carbon and water vapor fluxes to climate among evergreen needleleaf forests in the USA. *Ecological Processes*, 5(8), 1-17. DOI: 10.1186/s13717-016-0053-5
- Waring, R. H., & Running, S. W. (1998). *Forest ecosystems: analysis at multiple scales*. 3a ed. Massachusetts, USA:Elsevier. DOI:10.5860/choice.36-1577

- Webb, E. K., Pearman, G. I., Leuning, R. (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106, 85-100
- Wenping, K., & Sinkyu K. (2019). On the use of alternative water use efficiency parameters in dryland ecosystems: a review. *Journal of Ecology and Environment*. 43(24), 1-8. DOI: 10.1186/s41610-019-0122-7
- Wilczak, J. M., Oncley, S. P., & Stage, S. A. Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* 99, 127–150. DOI: 10.1023/A:1018966204465
- Williams, C. A., Reichstein, M., Buchmann, N., Baldocchi, D., Beer, C., Schwalm, C., Wohlfahrt, G., Hasler, N., Bernhofer, C., Foken, T., Papale, D., Schymanski, S., & Schaefer, K. (2012). Climate and vegetation controls on the surface water balance : synthesis of evapotranspiration measured across a global network of flux towers. *Water Resources Research*, 48, 1–13. DOI:10.1029/2011WR011586
- Wilson, K. B., & Baldocchi, D. D. (2000). Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 83-103.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B. E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., & Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243.
- Wutzler, T., Lucas-Moffat, A., Migliavacca, M., Knauer, J., Sickel, K., Šigut, L., Menzer, O., & Reichstein, M. (2018). Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15, 5015–5030. DOI:10.5194/bg-15-5015-2018
- Xu, M., Wen, X., Wang, H., Zhang, W., Dai, X., Song, J., Wang, Y., Fu, X., Liu, Y., Sun, X., & Yu, G. (2014). Effects of climatic factors and ecosystem responses on the inter-annual variability of evapotranspiration in a coniferous plantation in subtropical China. *PLoS ONE*, 9(1), 1–14. DOI: 10.1371/journal.pone.0085593
- Yan, C., Zhao, W., Wang, Y., Yang, Q., Zhang, Q., & Qiu, G. Y. (2017). Effects of forest evapotranspiration on soil water budget and energy flux partitioning in a subalpine valley of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246, 207–217. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.07.002
- Yang, Y., Anderson, M. C., Gao, F., Hain, C. R., Semmens, K. A., Kustas, W. P., Noormets, A., Wynne, R. H., Thomas, V. A., & Sun, G. (2017). Daily Landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA,

using multi-satellite data fusion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1017–1037. DOI: 10.5194/hess-21-1017-2017

Zha, T., Barr, A. G., van der Kamp, G., Black T. A, McCaughey J. H., & Flanagan, L. B. (2010). Interannual variation of evapotranspiration from forest and grassland ecosystems in western Canada in relation to drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (11), 1476–1484. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.08.003

Zha, T., Li, C., Kellomaki, S., Peltola, H., Wang, K., & Zhang, Y. (2013). Controls of evapotranspiration and CO<sub>2</sub> fluxes from Scots pine by surface conductance and abiotic factors. *PLoS ONE*, 8(7). DOI: 10.1371/journal.pone.0069027

Zhang, M., Chen, S., Jiang, H., Lin, Y., Zhang, J., Song, X., & Zhou, G. (2019). Water-use characteristics and physiological response of moso bamboo to flash droughts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2174), 1-18. DOI:10.3390/ijerph16122174



## ANEXOS

### ANEXO A

#### A1 Procedimiento en línea para el relleno de datos faltantes

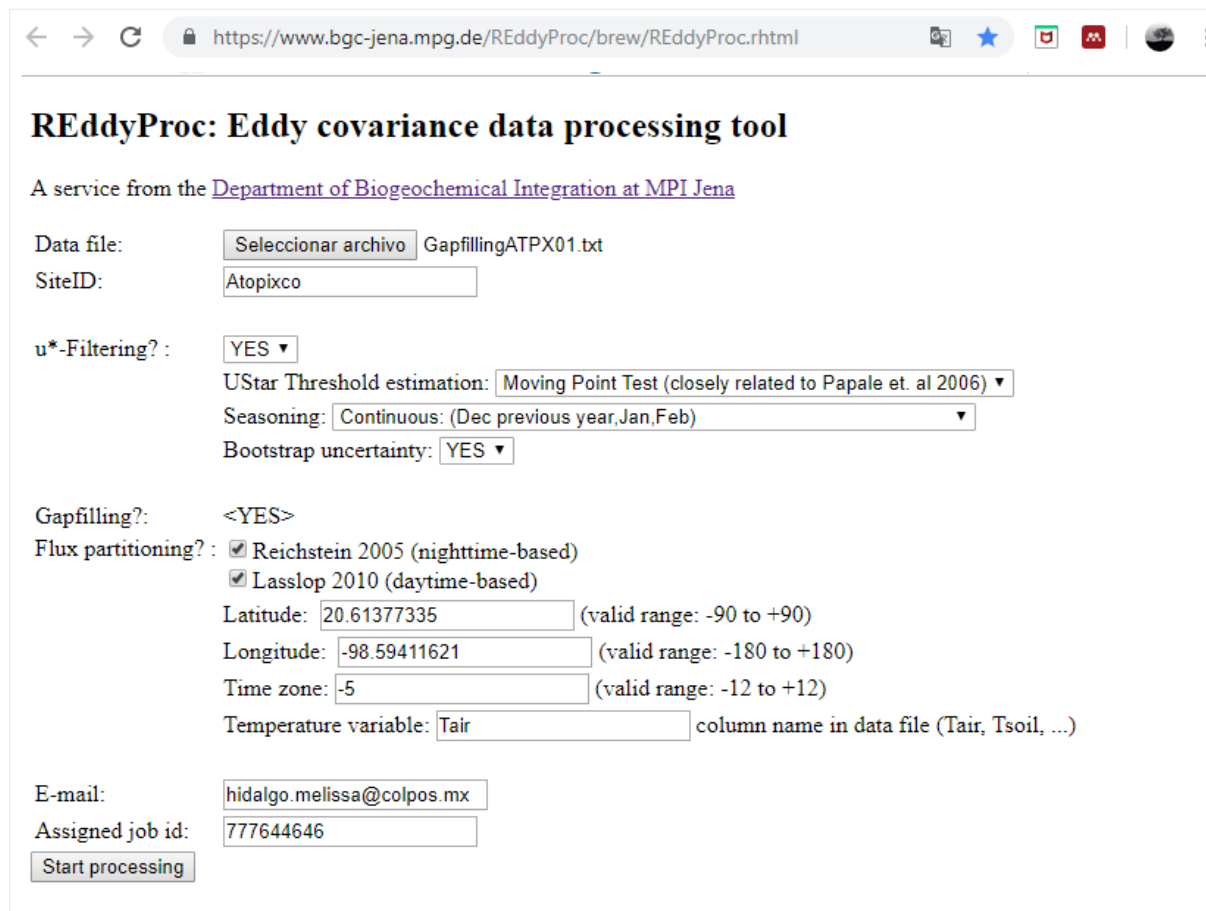
Uno de los requisitos para realizar el procedimiento de *gapfilling* con la herramienta en línea fue ingresar un formato de datos de entrada. Este formato se hizo en un archivo EXCEL, que fue guardado como archivo de texto delimitado por tabulaciones. En la primera fila del archivo se colocó el nombre de las variables, en la segunda fila las unidades para cada variable, y en las filas posteriores los valores correspondientes a cada variable. Los periodos con ausencia de datos, en alguna de las variables, se indicaron con el valor -9999. En la **Figura A. 1. 1** se muestran las primeras filas del archivo ingresado. Para más detalles de las especificaciones del formato puede consultar la página

<https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWebDataFormat>.

Year	DoY	Hour	NEE	LE	H	Rg	Tair	Tsoil	rH	VPD	Ustar
-	-	-	umolm-2s-1	Wm-2	Wm-2	Wm-2	degC	degC	%	hPa	ms-1
2017	266	0.5	-9999	-9999	-9999	0.04	13.42	16.41	99.9	0.02	0.47
2017	266	1	-9999	39.46	-24.48	0.05	13.4	16.36	99.7	0.05	0.41
2017	266	1.5	16.08	66.98	-24.86	0.04	13.52	16.32	99.7	0.05	0.29
2017	266	2	28.71	43.57	-32.68	0.04	13.76	16.27	99.7	0.05	0.27
2017	266	2.5	13.94	21.35	-25.35	0.04	13.86	16.22	99.4	0.1	0.34
2017	266	3	14.56	32.33	-25.66	0.05	13.84	16.18	99.8	0.03	0.3
2017	266	3.5	3.59	13.69	-14.27	0.06	13.78	16.14	99.9	0.02	0.12

**Figura A. 1. 1** Especificaciones del área de estudio y métodos para el *gapfilling* con la herramienta en línea REddyProc

Una vez cargado el documento, se indicó que el filtrado de  $u^*$  fuese con el método *moving point test* (Papale *et al.*, 2006). La partición de los flujos de  $CO_2$  se hizo siguiendo la metodología de Reichstein *et al.*, (2005). También se especificó la latitud, longitud y zona horaria del área de estudio y finalmente el correo electrónico al cual se enviaron los resultados. En la **Figura A.1.2** se muestra una captura de la página para el procesamiento de los datos.



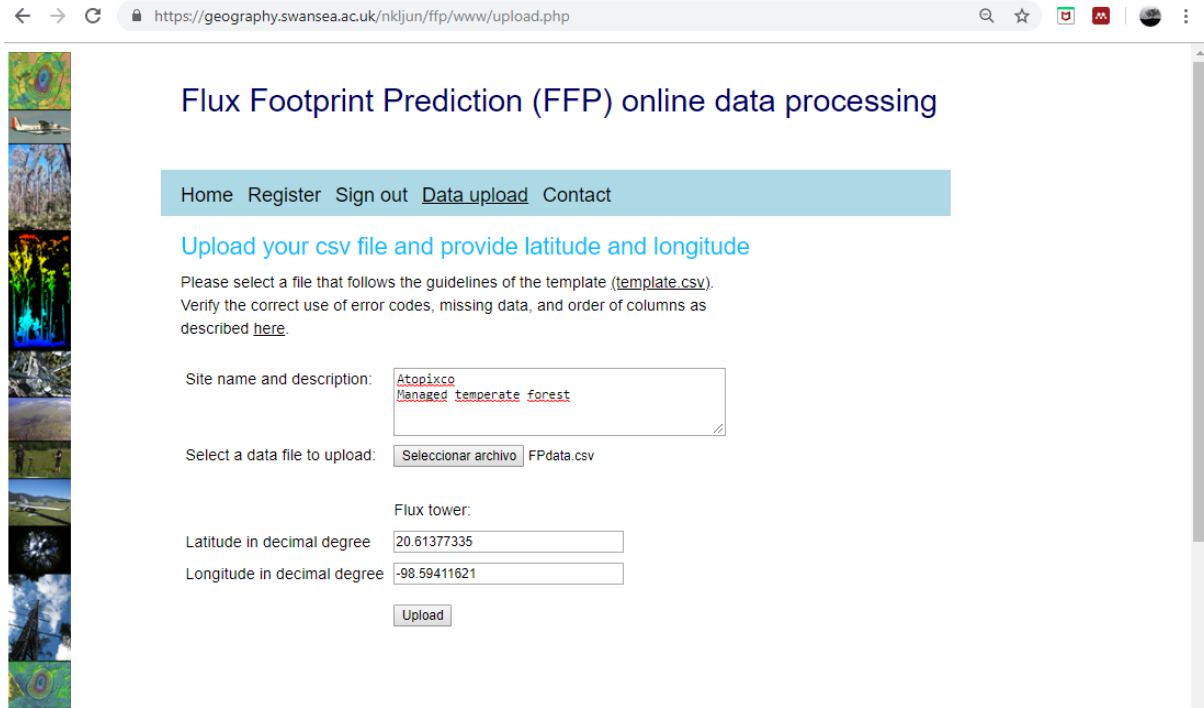
The screenshot shows a web browser window with the URL <https://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/brew/REddyProc.rhtml>. The page title is "REddyProc: Eddy covariance data processing tool". Below the title, it states "A service from the [Department of Biogeochemical Integration at MPI Jena](#)". The form contains the following fields and options:

- Data file:  GapfillingATPX01.txt
- SiteID:
- $u^*$ -Filtering?:  ▾
- UStar Threshold estimation:  ▾
- Seasoning:  ▾
- Bootstrap uncertainty:  ▾
- Gapfilling?:
- Flux partitioning?:  Reichstein 2005 (nighttime-based)  
 Lasslop 2010 (daytime-based)
- Latitude:  (valid range: -90 to +90)
- Longitude:  (valid range: -180 to +180)
- Time zone:  (valid range: -12 to +12)
- Temperature variable:  column name in data file (Tair, Tsoil, ...)
- E-mail:
- Assigned job id:
- 

**Figura A.1.2** Especificaciones del área de estudio y métodos para el gapfilling con la herramienta en línea REdDyProc.

## A2 Procedimiento en línea para obtener el área de influencia

El análisis de *footprint* se realizó con la herramienta en línea *Flux Footprint Prediction (FFP) online data processing*, disponible en <http://geography.swansea.ac.uk/nkljun/ffp/www/index.php>. Para hacer uso de la herramienta en línea fue necesario registrarse e iniciar sesión en <http://footprint.kljun.net/ffp2d.html>. Una vez iniciada la sesión se cargó el archivo csv y se proporcionó la latitud y longitud del sitio de estudio (**Figura A.2.1**). El archivo csv estuvo integrado con los parámetros que se enlistan a continuación: yyyy = Año, mm = Mes [1-12], day = Día del mes [1-31], HH = Horas [0-23] o [1-24], MM = Minutos, por ejemplo [0-30], zm = Altura de medición sobre el suelo [m], d = Altura de desplazamiento [m], z0 = Longitud de rugosidad [m], u\_mean = Velocidad media del viento en zm [ms<sup>-1</sup>], L = Longitud de Obukhov [m], sigma\_v = Desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad lateral después de la rotación [ms<sup>-1</sup>], u\_star = Velocidad de fricción [ms<sup>-1</sup>], wind\_dir = Dirección del viento en grados. Todos estos datos fueron obtenidos de las salidas del procesamiento en Eddy Pro. En aquellos casos donde no se contaba con el dato se ingresó -9999. Para conocer más detalles sobre la estimación de la huella, puede consultar (Kljun *et al.*, 2015). En la **Figura A.2.2** se muestran las primeras filas del archivo como ejemplo de los datos ingresados.



**Figura A.2.1** Ejemplo para cargar el archivo de entrada e ingresar las especificaciones del área de estudio para el análisis del área de influencia.

yyyy	mm	day	HH_UTC	MM	zm	d	z0	u_mean	L	sigma v	u_star	wind_dir
2017	10	1	1	0	32	15.41	3.45	3.48	-1055.57	1.17	0.75	346.64
2017	10	1	1	30	32	15.41	3.45	2.58	-750.04	0.52	0.55	342.20
2017	10	1	2	0	32	15.41	3.45	2.66	-323.59	0.66	0.49	336.25
2017	10	1	2	30	32	15.41	3.45	2.64	-318.30	0.75	0.57	330.95
2017	10	1	3	0	32	15.41	3.45	2.45	400.01	0.73	0.64	342.57
2017	10	1	3	30	32	15.41	3.45	1.79	-443.83	0.63	0.47	334.05

**Figura A.2.2** Ejemplo del formato de datos de entrada para el análisis del área de influencia

## ANEXO B

### B1 PPN EN FUSTE Y RAMAS

**Cuadro B.1.1** Estimación de carbono almacenado en fuste y ramas en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtupán Hgo.

Folio Anualidad	Sitio	Biomasa 2016	Biomasa 2019	Incremento total de biomasa (Kg 400m <sup>-2</sup> 3años <sup>-1</sup> )	Incremento total de biomasa (Kg 400m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	Incremento biomasa TOTAL anual (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Carbono almacenado (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
<b>7</b> <b>1993</b>	1	7659.0	9139.5	1480.5	493.5	12.3	6.2
	2	3165.6	3850.8	685.3	228.4	5.7	2.9
	3	4940.8	5597.4	656.6	218.9	5.5	2.7
	4	6190.2	7642.4	1447.9	482.6	12.1	6.0
<b>8</b> <b>1998</b>	1	3861.7	4778.8	902.1	300.7	7.5	3.8
	2	3055.9	3674.2	616.1	205.4	5.1	2.6
	3	5704.0	6744.0	1040.0	346.7	8.7	4.3
	4	4530.4	5689.5	1139.8	379.9	9.5	4.7
<b>10</b> <b>1994</b>	1	4404.7	5562.2	1146.8	382.3	9.6	4.8
	2	4639.1	5677.7	1023.6	341.2	8.5	4.3
	3	5748.5	6993.1	1236.0	412.0	10.3	5.2
	4	5256.5	6473.1	1214.5	404.8	10.1	5.1
<b>11</b> <b>1995</b>	1	5652.6	6932.0	1255.9	418.6	10.5	5.2
	2	4879.6	5852.0	970.2	323.4	8.1	4.0
	3	5175.8	6215.9	1018.7	339.6	8.5	4.2
	4	5415.3	6600.2	1174.3	391.4	9.8	4.9
<b>12</b> <b>1998</b>	1	4031.9	5235.3	1203.4	401.1	10.0	5.0
	2	1971.4	2899.7	926.2	308.7	7.7	3.9
	3	3658.3	4696.8	1032.1	344.0	8.6	4.3
	4	4846.8	6124.2	1268.9	423.0	10.6	5.3
<b>13</b> <b>1994</b>	1	3873.4	4979.3	1097.3	365.8	9.1	4.6
	2	4376.8	5938.1	1548.5	516.2	12.9	6.5
	3	3801.9	4739.5	922.7	307.6	7.7	3.8
	4		142.1	118.6	39.5	1.0	0.5
<b>14</b> <b>1994</b>	1	4540.3	5562.2	1009.1	336.4	8.4	4.2
	2	4466.5	5628.4	1161.9	387.3	9.7	4.8
	3	4807.3	5780.4	968.8	322.9	8.1	4.0
	4	4388.7	5573.6	1178.5	392.8	9.8	4.9
<b>15</b> <b>1995</b>	1	5012.2	6138.7	1113.7	371.2	9.3	4.6
	2	3768.6	4701.6	926.6	308.9	7.7	3.9
	3	3307.2	4062.9	742.8	247.6	6.2	3.1

	4	3853.9	4686.2	815.1	271.7	6.8	3.4
<b>16</b> <b>2009</b>	1	588.1	1141.7	515.1	171.7	4.3	2.1
	2	6678.9	7773.7	1088.4	362.8	9.1	4.5
	3	626.1	2052.8	1396.9	465.6	11.6	5.8
	4	1398.8	2048.1	638.6	212.9	5.3	2.7
<b>31</b> <b>1993</b>	1	4800.6	5782.7	980.0	326.7	8.2	4.1
	2	3718.3	4540.5	809.5	269.8	6.7	3.4
	3	4338.8	5224.2	885.4	295.1	7.4	3.7
	4	5529.6	6772.9	1241.2	413.7	10.3	5.2
<b>32</b> <b>1996</b>	1	3240.7	3980.0	718.0	239.3	6.0	3.0
	2	2712.5	3612.1	863.2	287.7	7.2	3.6
	3	3474.5	4133.2	643.7	214.6	5.4	2.7
	4	4462.1	5246.7	763.2	254.4	6.4	3.2
<b>33</b> <b>1997</b>	1	4806.4	5874.8	1066.3	355.4	8.9	4.4
	2	5462.9	6549.6	1078.1	359.4	9.0	4.5
	3	4353.1	5463.5	1101.9	367.3	9.2	4.6
	4	4204.7	5112.5	905.6	301.9	7.5	3.8

## B2. PPN EN RAÍCES GRUESAS

*Cuadro B.1.2 Estimación de carbono almacenado en raíces en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.*

Folio Anualidad	Sitio	Biomasa 2016	Biomasa 2019	Incremento total de biomasa (Kg 400m <sup>-2</sup> 3años <sup>-1</sup> )	Incremento biomasa (Kg 400m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	Incremento biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Carbono almacenado (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
7 1993	1	1858.1	2193.3	335.2	111.7	2.8	1.4
	2	789.7	955.2	165.5	55.2	1.4	0.7
	3	1211.2	1372.1	160.9	53.6	1.3	0.7
	4	1520.7	1834.6	313.9	104.6	2.6	1.3
8 1998	1	1009.7	1214.3	204.6	68.2	1.7	0.9
	2	781.1	937.4	156.3	52.1	1.3	0.7
	3	1482.0	1730.2	248.2	82.7	2.1	1.0
	4	1160.7	1435.6	274.9	91.6	2.3	1.1
10 1994	1	1110.2	1363.1	252.9	84.3	2.1	1.1
	2	1166.2	1396.6	230.4	76.8	1.9	1.0
	3	1438.0	1698.8	260.8	86.9	2.2	1.1
	4	1337.4	1600.8	263.4	87.8	2.2	1.1
11 1995	1	1471.6	1766.4	294.8	98.3	2.5	1.2
	2	1236.6	1456.7	220.1	73.4	1.8	0.9
	3	1336.5	1567.1	230.6	76.9	1.9	1.0
	4	1387.9	1660.6	272.7	90.9	2.3	1.1
12	1	1057.2	1343.5	286.3	95.4	2.4	1.2

1998	2	507.9	737.9	229.9	76.6	1.9	1.0
	3	1020.3	1272.6	252.3	84.1	2.1	1.1
	4	1290.7	1586.9	296.2	98.7	2.5	1.2
13 1994	1	967.9	1213.8	245.8	81.9	2.0	1.0
	2	1117.6	1481.6	364.1	121.4	3.0	1.5
	3	976.4	1182.9	206.6	68.9	1.7	0.9
	4	0.0	36.3	36.3	12.1	0.3	0.2
14 1994	1	1138.4	1375.1	236.7	78.9	2.0	1.0
	2	1119.1	1447.5	328.4	109.5	2.7	1.4
	3	1160.8	1389.7	228.8	76.3	1.9	1.0
	4	1111.5	1383.0	271.4	90.5	2.3	1.1
15 1995	1	1271.5	1541.9	270.4	90.1	2.3	1.1
	2	974.6	1193.4	218.8	72.9	1.8	0.9
	3	869.0	1047.2	178.2	59.4	1.5	0.7
	4	1031.6	1232.6	201.0	67.0	1.7	0.8
16 2009	1	171.6	325.9	154.3	51.4	1.3	0.6
	2	1611.5	1866.3	254.7	84.9	2.1	1.1
	3	223.6	634.5	410.9	137.0	3.4	1.7
	4	376.5	541.3	164.8	54.9	1.4	0.7
31 1993	1	1195.4	1427.8	232.4	77.5	1.9	1.0
	2	941.2	1138.5	197.3	65.8	1.6	0.8
	3	1076.0	1282.3	206.3	68.8	1.7	0.9
	4	1391.7	1678.5	286.9	95.6	2.4	1.2
32 1996	1	891.6	1065.7	174.1	58.0	1.5	0.7
	2	756.4	972.1	215.7	71.9	1.8	0.9
	3	942.4	1097.2	154.8	51.6	1.3	0.6
	4	1168.1	1346.3	178.2	59.4	1.5	0.7
33 1997	1	1267.7	1513.6	245.9	82.0	2.0	1.0
	2	1433.6	1681.9	248.3	82.8	2.1	1.0
	3	1196.0	1454.4	258.4	86.1	2.2	1.1
	4	1129.8	1341.5	211.7	70.6	1.8	0.9

### B3. PRODUCCIÓN DE HOJARASCA

**Cuadro B.1.3** Estimación de carbono almacenado en hojarasca en las parcelas permanentes dentro del área de influencia en un bosque bajo manejo forestal en Zacualtipán, Hgo.

Folio	Sitio	Producción de hojarasca (g 1.5m <sup>2</sup> año <sup>-1</sup> )	Producción de hojarasca (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Contenido de carbono almacenado (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
19 1998	1	1001.9	6.7	3.0
	2	820.4	5.5	2.4
	3	766.57	5.1	2.3
	4	951.45	6.3	2.8
23 1993	1	914.1	6.1	2.7
	2	947.1	6.3	2.8
	3	802.4	5.3	2.4
	4	666.1	4.4	2.0

1933	1	708.7	4.7	2.1
	2	855.5	5.7	2.6
	3	723.1	4.8	2.2
	4	916.3	6.1	2.7
1982	1	538.6	3.6	1.6
	2	653.9	4.4	2.0
	3	639.4	4.3	1.9
	4	642.0	4.3	1.9
1983	1	1048.1	6.9	3.1
	2	915.1	6.1	2.7
	3	923.2	6.2	2.7
	4	981.6	6.5	3.0
1985	1	811.6	5.4	2.4
	2	932.9	6.2	2.8
	3	781.2	5.2	2.3
	4	770.5	5.1	2.3
1986	1	535.7	3.6	1.6
	2	896.9	6.0	2.7
	3	891.6	6.0	2.7
	4	1085.1	7.3	3.3
1987	1	853.6	5.7	2.6
	2	754.2	5.0	2.3
	3	805.1	5.4	2.4
	4	895.5	6.0	2.7
1988	1	846.8	5.6	2.5
	2	866.6	5.7	2.6
	3	997.0	6.6	3.0
	4	785.1	5.2	2.4
1993	1	815.9	5.4	2.4
	2	766.0	5.1	2.3
	3	668.1	4.5	2.0
	4	731.8	4.9	2.2
1996	1	672.4	4.5	2.0
	2	729.1	4.9	2.2
	3	757.2	5.0	2.3
	4	845.5	5.6	2.5
1997	1	1205.0	8.0	3.6
	2	1059.5	7.1	3.2
	3	1145.1	7.6	3.4
	4	866.3	5.8	2.6
1998	1	952.4	6.3	2.8
	2	815.7	5.4	2.4
	3	827.9	5.5	2.4
	4	840.5	5.6	2.5
1999	1	794.8	5.3	2.4
	2	584.2	3.9	1.7
	3	940.9	6.3	2.8
	4	716.7	4.8	2.1
2001	1	927.1	6.2	2.8



	2	528.7	3.5	1.6
	3	973.7	6.5	2.9
	4	854.5	5.7	2.5
2004	1	618.9	4.1	1.9
	2	479.7	3.2	1.4
	3	318.5	2.1	0.9
	4	611.2	4.1	1.8
2005	1	547.3	3.6	1.6
	2	695.7	4.6	2.1
	3	580.3	3.9	1.7
	4	528.7	3.5	1.6
2006	1	496.0	3.3	1.5
	2	282.3	1.9	0.8
	3	824.5	5.5	2.5
	4	632.7	4.2	1.9
2008	1	542.3	3.6	1.6
	2	699.2	4.7	2.1
	3	775.1	5.2	2.3
	4	574.9	3.8	1.7