



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

MEDICIÓN DE LA TRANSPIRACIÓN EN LA SELVA BAJA
CADUCIFOLIA DE LA RESERVA ESTATAL EL PALMAR EN
YUCATÁN, MÉXICO

Tesis que presenta

EVELYN RAQUEL SALAS ACOSTA

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Directores: Eduardo Cejudo y Jose Luis Andrade

Cancún, Quintana Roo a 25 agosto 2020

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de **Materiales y Métodos Experimentales**, los **Resultados y Discusión** de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación de Yucatán A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal de Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollados tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal de Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Cancún, Quintana Roo, México a 25 agosto del 2020

Nombre: Evelyn Raquel Salas Acosta

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA*



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Evelyn Raquel Salas Acosta** titulado “**Medición de la transpiración en la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar en Yucatán, México**” fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Ecología y Dinámica de Ecosistemas Acuáticos y Calidad del Agua, en el Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección de los Dres. Eduardo Cejudo Espinosa y José Luis Andrade Torres, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 26 de agosto de 2020

Agradecimientos

Gracias a Dios por el agua que mantiene la vida.

A mis padres, Gilberto y Raquel. Su amor por mí me mantiene fuerte. Ustedes son mis mejores amigos, mi apoyo incondicional y mis mejores consejeros. A mi hermano, Israel. A Flopy, mi fiel mascotita. A Tilak por estar disponible para mí, por su tiempo, su amor y paciencia. A Nidia García, por su amistad incondicional y duradera.

Al CONACYT por la beca otorgada No. Becario 849357. Al proyecto de *Línea de Agua Meteórica de la península de Yucatán* (CB 286049) y al proyecto Cátedras CONACYT 2944 *Modelación del ciclo del agua en la península de Yucatán*.

A mi amigo Juan Bárcenas por motivarme a hacer una maestría, por las pláticas de ciencia, termodinámica e hidráulica. Por la carta de recomendación para entrar al CICY.

A Victor y Estela Cerezo por confiar en mí para dar clases y darme las cartas de recomendación para entrar al posgrado. A Uriel por sus valiosos comentarios. Por escucharme. Mi maestro de redacción científica.

A Eduardo Cejudo por su apoyo constante en la realización de todas las actividades de gabinete, campo y logística para mi proyecto de investigación. Por darme la libertad de decidir lo que quería investigar. Por guiarme en el camino de la investigación científica. Por ser un director responsable y servicial., Por haber tenido interés en mi propuesta de investigación. Gracias.

A Jose Luis Andrade por su manera característica de enseñarme, sutil y silenciosa. Gracias por enseñarme el arte de divulgar la ciencia. Por darme la libertad de hacer y deshacer mis propias teorías. Por presentarme el mundo de los fisiólogos vegetales.

A Roberth Armando Us Santamaría, del Laboratorio de Fisiología Vegetal perteneciente a la Unidad de Recursos Naturales del CICY, por llevarme y traerme

con bien. Por su entusiasmo continuo en el trabajo de campo, por cuidarme y por su destreza para construir los sensores. Por las pláticas, la cerveza y el buen ramen.

A Jorge Uuh por siempre estar dispuesto y disponible para ayudarme en todo lo que se necesitase. A Bernardo Figueroa por su curiosidad en mi tema de investigación. A Jorge Perera por sus interesantes e intrigantes preguntas.

A Belem y Perri, por hospedarme en su casa todas las veces que estuve en Mérida. Por pasearme, por quererme, por aguantarme y por dejarme compartir con ella lo que soy.

A Arturo García por ser honesto, directo y amigable conmigo. Por los raites. Y por compartir conmigo tu comida. A mis compañeros de generación, Vania, Daniela y Ramón, por ser como son, tan inteligentes y detallistas. “Empezamos todos juntos, terminamos todos juntos”. A Dilsa Maria, por escuchar. A Gerardo “Depardiu”, por ser amigo y por ayudarme en mi trabajo de campo, por ser paciente y por ser “fortachón”.

Al grupo de fisiología vegetal de la generación 2018- 2020. A Gaby, Marypaz y Susy por hospedarme sin conocerme, por ser entusiastas y compartidas. Gracias. A Julio, Pedro, Lalo y Diana. A todos ustedes por ser incluyentes, por ser objetivos en todos los momentos de seriedad, por ser directos y por dejarme conocer una parte de ustedes. A María por las chelas y por bailar conmigo noches y madrugadas. A Jose F.Paz por hacerme de comer, platicar de Calakmul, por tenerme confianza y caminar conmigo.

A Celene Espadas del grupo de investigación de fisiología vegetal de la unidad de Recursos Naturales, por las pláticas interesantes en cuanto a las especies vegetales y por ser auténtica. A Jose Luis Tapia, del herbario del CICY por instruirme en el arte de las colecciones de los herbarios y por sus aportaciones en la identificación de especies.

A Eddy Eddy por ir conmigo al Museo y escucharme. A Amaranta, por cruzarte en mi camino saliendo del CICY, gracias por tu dulzura, por dejarme quedar en tu casa, por no dejarme estar sola, acompañarme y por motivarme.

A Hernán Moorfi Mestre por sus acertados comentarios, por darme seguimiento cada vez que se podía. Y decirme "...mide todo lo que puedas medir, con lo que tienes".

A Cesar Canché, por enseñarme que la disciplina en el posgrado rinde frutos, por dejarme ser su pareja de salsa y mostrarme sus mejores pasos de baile. Por hacerme pasar los últimos mejores días en mi estancia en Mérida.

A Casandra Reyes por tomarse el tiempo de explicarme los resultados de su artículo del 2012. Por ayudarme a entender los cálculos.

A Jose Luis Hernández, Stephanie George y Fernando Tun por darme acceso a la base de datos del inventario de la Reserva Estatal El Palmar. A Damien Bonal.,

A Don Filogonio May Pat, Don Filos, por ayudarme a identificar las plantas más difíciles.

A Sandra Bucci, por explicarme como hacer la extrapolación a "stand transpiration".

A Ping Lu, por explicarme el uso de la fórmula de Granier.

A Angelina por "empujarme" terminar de escribir la tesis. A Ana Celis, a Nayelli, a Mariana, a Yareli, a Leonela por estar al pendiente de mis avances de la tesis y por darme ánimos para terminarla.

A todos los profesores de la Unidad de Ciencias del Agua del CICY y a los laboratorios que representan. Gracias.

Índice

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción.....	3
1.1. Balances hidrológicos	8
1.2. El agua y las plantas	10
2. Antecedentes	20
3. Pregunta de investigación	22
4. Hipótesis.....	23
5. Objetivo General	23
6. Objetivos específicos.....	23
7. Materiales y métodos	23
7.1. Área de estudio	23
7.2. Método de medición de transpiración.	25
7.3. Análisis de datos.	37
7.4. Contenido volumétrico de agua.....	40
7.5. Contribución ecológica al ciclo hidrológico.....	40
8. Resultados	42
8.1. Medición de la transpiración por el método de disipación térmica	42
8.2. Índice de Área Foliar (IAF)	49
8.3. Transpiración en la Selva baja caducifolia del Palmar.	50
8.3.1 Ecuaciones empíricas	50
8.3.2 Categorías de diámetros a la altura del pecho.....	54
8.3.3 Estimación de Bucci.....	56

8.4.	Contenido volumétrico de agua.....	57
8.5.	Contribución T/ET	58
9.	Discusión.....	59
9.1.	Albura conductora	65
9.2.	Consideraciones finales	65
10.	Conclusiones.....	67
11.	Referencias	68
12.	ANEXOS	74

Listado de abreviaturas.

1 mm precipitación \equiv 1 L m⁻²

ΔA - cambio en el almacenamiento

AB - área basal (m²)

AC - albura conductora (m² o cm²)

CN - conglomerado

CV- coeficiente de variación

%HR- porcentaje de humedad relativa

DAP- diámetro a la altura del pecho (cm)

E - Esgurrimiento

ET - Evapotranspiración

P - Precipitación

T - Transpiración

DPV- Déficit de presión de vapor

Listado de tablas

Tabla 1. Especies y número de individuos estudiados. El símbolo representa la abreviatura de las primeras letras del género y la especie.....	42
Tabla 2. Resultados finales de flujo de savia.....	48
Tabla 3. Resumen de los índices de área foliar por temporada.	49
Tabla 4. Comparación de pendientes de las dispersiones de T vs DAP ambas temporadas.....	52
Tabla 5. Prueba t-Student ($\alpha=0.05$) de comparación entre temporadas para cada categoría de DAP.	55
Tabla 6. Valor de transpiración promedio por rango de DAP.	55
Tabla 7. Transpiración promedio para escalamiento por rango de DAP.	56
Tabla 8. Resumen estimación Bucci.	57
Tabla 9. Contenido volumétrico de agua.	58
Tabla 10. Contribución de la transpiración a la evapotranspiración en la selva baja caducifolia en la Reserva Estatal El Palmar, Yucatán.	58

Listado de figuras

Figura 1. La evapotranspiración es el proceso de transpiración por parte de las plantas y evaporación del agua del suelo.	5
Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración.	12
Figura 3. Métodos para el cálculo de la evapotranspiración.	17
Figura 4. Ubicación del sitio de estudio. Mapa elaborado en QGIS, Datum WGS 84. ..	25
Figura 5. Aguja hipodérmica de uso veterinario tamaño 19G.	27
Figura 6. Embobinado de constantán en la aguja; sensor caliente.	27
Figura 7. Representación del dispositivo tipo Granier armado y listo para instalar.	28
Figura 8. Selección de temporadas por el valor de la precipitación, las barras representan las estaciones meteorológicas.	29
Figura 9. Configuración del sistema de Granier para la medición de flujo de savia. Adaptado de Lu et al., 2004.	32
Figura 10. Aislamiento del sensor con anti reflejante y poliuretano.	33
Figura 11. Ejemplo de la radiación solar en un día despejado (●) y nublado (▲).	38
Figura 12. Ejemplo de un día despejado y con una DPV normal (30 de marzo del 2019)	38
Figura 13. Ejemplo del promedio de los sensores con dirección Norte y Sur.	39
Figura 14. Reflectómetro para la medición de contenido volumétrico de agua.	40
Figura 15. Representación gráfica entre el %HR y el DPV para la temporada de lluvias.	43
Figura 16. Representación gráfica entre el %HR y el DPV para la temporada de sequía.	44
Figura 17. Relación entre el DPV y la temperatura para la temporada de lluvias.	44
Figura 18. Ejemplo del comportamiento en lluvias. Dos máximos de flujo de savia. Días julianos.	45
Figura 19. Dispersión de dos días de datos de <i>Caesalpinia gaumeri</i> después de haber seleccionado los días que coincidían con un DPV y radiaciones normales. Fd, flujo de savia en kg min^{-1}	46

Figura 20. Transpiración (kg/día) de cada individuo medido.	47
Figura 21. Flujo de savia a nivel dosel vs DAP.	49
Figura 22. Dispersión de la transpiración (kg /día) con la albura conductora (A), área basal (superior B) y DAP (C) para organismos medidos en la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar, Yucatán.	51
Figura 23. Ecuación alométrica de la transpiración (kg /día) con el DAP para organismos medidos en temporadas de lluvias y sequía en la selva baja caducifolia del Palmar, Yucatán.	53
Figura 24. Resumen de las tres formas de escalamiento de la transpiración a nivel conglomerado.	57
Figura 25. Porcentajes de contribución a la transpiración por rango de DAP (cm).	63

Resumen

El conocimiento de cuánta agua puede existir en un lugar y en un tiempo específico incluye el estudio de los componentes del ciclo hidrológico, que tiene una única entrada y varias salidas, si se estudia como un balance de masa y energía. A cada variable del balance se le denomina componente. Se toma como única entrada la precipitación; los demás componentes son la escorrentía, infiltración y evapotranspiración. Esta última es la suma de la transpiración proveniente de las plantas, la evaporación del suelo y de las superficies interceptoras. Conocer los componentes del ciclo hidrológico sirve para estimar la cantidad de agua disponible, para hacer proyecciones de crecimiento y valoración de servicios ambientales de un terreno forestal. En particular, el componente de evapotranspiración es el que menos se estudia por la dificultad que representa su medición, también es el que aporta la mayor incertidumbre al momento de realizar la estimación de la cantidad de agua disponible.

Por esto, el presente trabajo estimó la transpiración de la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar, que representa el agua que se mueve del suelo a la atmósfera a través de las plantas. Mediante el método de disipación térmica propuesto por Granier, en 10 especies que representan las especies más importantes de la selva baja caducifolia de dicha reserva.

Se obtuvieron valores promedio para cada uno de los individuos medidos en las temporadas de lluvias y de sequía. Se proponen tres formas para el escalamiento de los datos a nivel conglomerado. En el primero se buscaron relaciones alométricas, en el segundo se consideran categorías de diámetros y en el tercero se utiliza el método de Bucci. Los resultados obtenidos respectivamente son 1.09, 1.15 y 0.84 mm día⁻¹. Se propone utilizar cualquiera de los tres métodos para estimar la transpiración a nivel paisaje para la vegetación tipo selva baja caducifolia como lo encontrado en la Reserva Estatal El Palmar en Yucatán, México.

Finalmente, se estima que la transpiración (373.4 mm año⁻¹) aporta entre el 25 y 35% de lo evapotranspirado tomando como base 1,211.8 mm año⁻¹.

Abstract

Knowing the amount of water that exist in a given time and place is part of the study of the hydrological cycle, which has a single input and several outputs when studying it as a mass and energy balance. Each variable is called a component. Each variable is called a component; the only input is precipitation, whereas the other components are runoff, infiltration and evapotranspiration, among the most important. The latter is the sum of transpiration from plants, and evaporation from the soil and from intercepting surfaces. Estimating the components of the hydrological cycle helps to estimate the amount of available water, to make projections of growth and assessment of environmental services that forests offer. In particular, the component of evapotranspiration is the least studied due to the difficulty of its measurement. Also, it is the one that provides the greatest uncertainty when estimating the amount of water.

For this reason, the present research estimated the transpiration of the tropical deciduous forest within the State Reserve of El Palmar, estimating the water that moves from the soil to the atmosphere through the plants. Using the thermal dissipation method proposed by Granier, in 10 species that represent the most important species of the tropical deciduous forest in this area of Yucatán.

Average transpiration values were obtained for each of the measured individuals during the seasons of rain and drought. Three options are proposed for scaling up the data to cluster or landscape level. The first approach are allometric relationships for the studied species; the second considered categories of tree diameters and the third is a previously published method by Bucci. The results obtained are 1.09, 1.15 and 0.84 mm per day, respectively. It has been proposed to utilise whichever of the three methods to estimate the stand transpiration at the landscape level for the tropical deciduous forest studied in the State Reserve El Palmar in Yucatán, México.

Finally, it was estimated that tree transpiration (373.4 mm per year) contributes between 25% and 35% of the estimated evapotranspiration, 1,211.8 mm per year.

1. Introducción

Los efectos asociados a las tasas de deforestación (particularmente en regiones tropicales o bosques) han sido documentados en diversas regiones del mundo por organismos como la FAO, organizaciones no gubernamentales, académicos y científicos. Estos efectos pueden asociarse al cambio climático, lo cual deriva en cambios especialmente graves en cuanto a la disponibilidad de agua en regiones donde antes se consideraba un recurso infinito. Aún con las advertencias de los científicos y organizaciones civiles, las tasas de deforestación siguen aumentando, lo que ha provocado la disminución en la capacidad de fijar carbono (CO₂), la pérdida de la capacidad de los suelos para captar y almacenar agua, el cambio en los microclimas, presencia de temporadas de sequías atípicas, entre otros (Allen et al., 2010).

En México, se han reportado cambios en el clima según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en los que se afirma que el país ha presentado un aumento de temperatura promedio a escala nacional de 0.85 °C y los inviernos aumentaron en promedio 1.3 °C. Este estudio del 2015 proyectaba que a nivel nacional habría una disminución de lluvias y las temporadas de sequía serían más prolongadas.

Recientemente en la península de Yucatán, el monitor de la sequía (MSM) del Sistema Meteorológico Nacional (SMN, 2019) reportó el año 2019 como uno de los años más anormalmente secos o con sequía moderada, lo que repercutió en la pérdida de cosechas y un alto número de incendios donde se perdieron grandes extensiones de selva baja.

Se cuenta con información suficiente para comparar a la vegetación arbórea con un imán para la precipitación (FAO, 2009). La relación que existe entre la deforestación, el cambio climático y el agua como recurso es directa; por lo que cualquier estudio o proyecto que cuantifique los componentes que dependen de los bosques, aportará datos para las predicciones del cambio climático y la disponibilidad de agua en el mundo.

El impacto hidrológico por el cambio en los tipos de vegetación y uso de suelos se puede estimar al conocer la transpiración de la vegetación (Lu et al., 2004). Las $\frac{3}{4}$ partes de la

superficie de la Tierra están cubiertas por agua, al conjunto de todas las aguas de la Tierra se le denomina hidrósfera (Fernández et. al., 2015); del total de agua, el 97% del agua disponible en la tierra se encuentra en los océanos. Así, los océanos cubren un área de $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$ y contienen $13 \times 10^8 \text{ km}^3$ de agua. Esta a su vez se mueve a través de la atmósfera, la litosfera y la biosfera; a través del ciclo hidrológico.

El presente trabajo estima directamente la proporción de transpiración que es aportada por el tipo de vegetación de selva baja caducifolia en Yucatán, México. Se explica la relación que tiene la vegetación con el ciclo hidrológico y se propone utilizar este valor de transpiración para integrarse en cálculos que permitan conocer la cantidad de agua presente en un área determinada.

El ciclo hidrológico (Figura 1) se basa en el movimiento del agua del suelo, a las plantas, a la atmósfera y a los cuerpos de agua, basado en las propiedades del agua, tipo de enlace y la polaridad para definir la teoría de cohesión tensión (Jones, 2014). En este sentido, la cantidad de agua dulce disponible y susceptible de ser utilizada, se puede estimar mediante un balance hidrológico. Es en éste balance donde se involucran todos los componentes del ciclo hidrológico, cada componente representa una fuente o volumen de agua que puede ser medida directamente, o estimada a partir de otra, mediante métodos específicos (Maderrey, 2005). Esta investigación presenta resultados de la medición de la transpiración, uno de los componentes del balance menos estudiado e incierto.

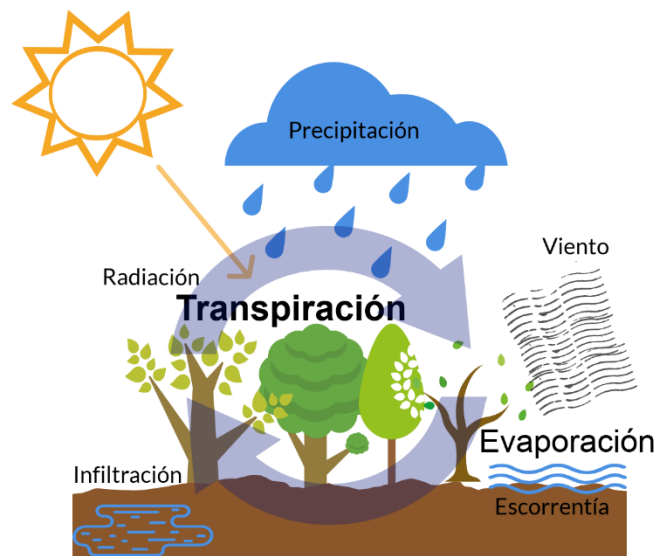


Figura 1. La evapotranspiración es el proceso de transpiración por parte de las plantas y evaporación del agua del suelo.

El agua es el componente común a todos los entornos celulares, en ella están disueltas o suspendidas las sustancias necesarias para la existencia de la célula. En el caso de las células vegetales, el agua representa el 80% o más del peso de las plantas herbáceas y alrededor de 50% de las leñosas (Devlin, 2004). Una vez absorbida por las raíces, una parte del agua forma parte de la estructura celular y otra parte se transfiere a la atmósfera a través de los estomas de las hojas (Hsiao, 1973). La transferencia de agua de las plantas a la atmósfera es el resultado del gradiente de presión de vapor entre las cavidades estomáticas y la atmósfera (Hsiao, 1973). Esta transferencia de agua por parte de las plantas se denomina transpiración.

También hay agua en la parte subterránea del suelo. Las rocas y el medio poroso por donde se filtra el agua pueden tener diferente capacidad para almacenar agua en sus poros. La ley de Darcy ayuda a conocer como es el movimiento del agua a través de este tipo de medios. Esta ley indica que el movimiento del agua será directamente proporcional a la sección transversal al flujo y a la pérdida de presión a lo largo del medio (Maderey, 2005). La zona en la que no exista agua en los poros se denomina no saturada, y es a través de esta que existe recarga de los acuíferos. El agua en la zona saturada (aguas

subterráneas), representan el 30.1% del total del agua dulce en el planeta (Martínez et al., 2006).

El proceso o etapa principal del ciclo hidrológico consiste en la evaporación del agua de los océanos y su subsecuente precipitación de regreso a los océanos y superficie terrestre. El volumen de agua en el planeta se ha calculado en $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ (Oki et al., 2004) y el agua que se mueve en la hidrosfera equivale a $3.5 \times 10^5 \text{ km}^3$ (Franks et al., 1972). El agua en la hidrosfera no permanece estática, presenta un constante movimiento en el cual se definen diferentes etapas o fases. Por su manera de enlazarse generan un verdadero ciclo, ya que su inicio ocurre donde posteriormente concluye. El ciclo hidrológico no tiene un camino único (Maderey, 2005)

Durante la precipitación, el agua puede iniciar su proceso de retorno a la atmósfera porque en su caída se evapora y una parte de ella no llega al suelo; otra parte cae sobre las plantas, donde parte se evapora y también regresa a la atmósfera y parte escurre hacia el suelo y se infiltra (Maderey, 2005). El agua que cae directamente al suelo será la que recorra propiamente el ciclo hidrológico; una parte de esta precipitación puede caer sobre cuerpos de agua, otra parte por la superficie dando lugar al escurrimiento superficial o escorrentía que llega a los cauces de los ríos. Asimismo, por infiltración llega a los mantos freáticos, que es la zona saturada del subsuelo en la que todos los poros se encuentran llenos de agua y a través de este flujo se alimenta el caudal base de los ríos (FAO, 2009).

El agua que se infiltra en el suelo puede volver a la superficie en forma de manantiales o descargas de agua subterránea o, por el contrario, desplazarse verticalmente a mayores profundidades y tener grandes recorridos de larga duración hacia el mar o hacia depresiones endorreicas (área en la que el agua no tiene salida fluvial hacia el océano). Es importante tomar en cuenta que la mayor parte de los movimientos subterráneos del agua es variable pues va de horas a miles de años (Maderey, 2005). El tiempo de residencia del agua en los mares puede durar hasta 4000 años, en los lagos de agua dulce dura unos 17 años, en los lagos de agua salada unos 15 años, en los ríos de unos

15 a 20 años, en la atmósfera de 8 a 10 días y en la biomasa algunas horas (Shiklomanov 1997; UNESCO/WHO/UNEP, 1996).

Cuando la energía procedente de la radiación solar actúa sobre la superficie de las masas de agua en estado sólido o líquido o sobre el suelo húmedo, y es suficiente para romper la fuerza de atracción entre las moléculas, el agua pasa a estado gaseoso mediante los procesos de evaporación (líquido a vapor) y sublimación (hielo a vapor, Martínez et al., 2006).

Por su parte, la precipitación es un proceso termodinámico, adiabático y no adiabático; este sucede por el cambio de presión y temperatura en la atmósfera que hace que la precipitación pueda ser en forma líquida o en forma sólida cristalizada o amorfa (Martínez et al., 2006). La condensación se lleva a cabo cuando hay una variación del equilibrio entre las variables termodinámicas de volumen de aire, temperatura, presión y humedad.

Los procesos termodinámicos son enfriamiento por contacto (mezcla de masas de aire a diferente temperatura) y el enfriamiento dinámico (las masas de aire se elevan y enfrían). Este último es el responsable de la condensación del vapor de agua que se convierte en precipitación, debido a que los movimientos verticales de las masas de aire en la atmósfera van acompañados de cambios en la presión. Si una masa de aire se mueve hacia una zona de diferente presión, y si se realiza sin intercambio de calor con el ambiente, existe un cambio de volumen y de temperatura, proceso que se denomina adiabático. En la atmósfera, como es de esperarse, los movimientos verticales ascendentes y descendentes del aire suelen producir cambios adiabáticos de temperatura, pues el aire es un mal conductor de calor y es así como las masas de aire mantienen sus características térmicas (Casas Castillo y Alarcón Jordán, 1999).

Parte del agua que precipita nunca alcanza el suelo porque queda interceptada en su trayectoria por algún obstáculo (árboles, edificios) y vuelve otra vez a la atmósfera por evaporación. El agua retenida en el suelo (cuando no se infiltra o escurre), vuelve a la atmósfera en forma de vapor de agua, bien por evaporación directa o por transpiración de las plantas. En resumen, el movimiento cíclico del agua se debe a la gravedad, cambios de temperatura, presión y la energía de los rayos solares.

1.1. Balances hidrológicos

Para estudiar el movimiento del agua existen los balances hidrológicos que representan teóricamente el intercambio de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera (Maraux y Rapidiel, 1990) lo que conduce a un planteamiento matemático, denominado ecuación de balance:

$$\text{Variación en almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los datos utilizados para los balances de agua en la República Mexicana se extraen de los reportes de la Comisión Nacional del Agua. En el 2014 la CONAGUA, como caso de estudio, determinó la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Puebla sin evaluar evapotranspiración. Debido a la falta de información, se hicieron consideraciones como suponer los porcentajes de pérdidas y asumir que no existe una descarga por evapotranspiración (ETR), ni flujo base de ríos. En 2015, la CONAGUA publicó la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero península de Yucatán, en el cual se presenta el balance de aguas subterráneas para cada Unidad Hidrológica Administrativa. La recarga natural por infiltración se calculó al restar el volumen precipitado menos el volumen evapotranspirado (tomando en cuenta que no existen escurrimientos superficiales). Se consideró que no había variaciones importantes en el cambio de almacenamiento y definen entradas igual a salidas. En este documento, no se especifican los componentes explícitamente y los términos utilizados son referidos a la norma mexicana, NOM-011-CNA-2000 (Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales), respecto a la fracción relativa de aguas subterráneas. Respecto a los datos de precipitación, el documento no menciona que valores usa como base y en cuanto al valor de evapotranspiración, es posible que se haya utilizado el del Centro Regional de Pronóstico Meteorológico (1236.46 mm). Dicho valor no se especifica a partir de que variables o datos meteorológicos se obtuvo.

Al hacer un análisis de la forma en la que se realiza el balance o cálculo de un volumen disponible de agua, podemos observar que en cuanto a la evapotranspiración del

documento de Yucatán no especifican la forma en la que llegan al valor de evapotranspiración, y respecto al estado de Puebla ni siquiera se toma en cuenta la evapotranspiración. El objetivo de la CONAGUA al realizar estos cálculos fue obtener la disponibilidad de aguas subterráneas aplicando el procedimiento de la NOM-011-CONAGUA-2000. La existencia de cálculos con valores supuestos o estimados a partir de una serie de consideraciones que no son reales puede llevar a datos incorrectos de disponibilidad de agua, por lo que contar con estimaciones directas de salidas de agua (transpiración, evaporación, infiltración) es importante para obtener balances de agua de mayor precisión. Dicha norma ha sido cancelada y modificada, la nueva versión es NOM-011-CONAGUA-2015 (Conservación del recurso agua).

En el Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán (2017, No. 33687) menciona que Yucatán es un estado vulnerable al cambio climático, se pronostican modificaciones del régimen, distribución espacial y temporal de las precipitaciones, cambios en la humedad de suelos y aire, alteraciones en los procesos de evapotranspiración y recarga de acuíferos, así como mayor incidencia de incendios forestales, lo que profundizará la deforestación, la erosión y la liberación de carbono (INEGI, 2017).

En dichos estudios se considera una unidad hidrogeográfica y geomorfológica básica y se considera también un período de tiempo, por lo cual es factible estimar el agua que entra y sale a través de dicha unidad durante ese lapso de tiempo (Maderrey, 2005).

La forma en la que se relacionan los balances hidrológicos con el tema central de este trabajo es porque el balance tiene los mismos componentes que el ciclo hidrológico: precipitación, infiltración, evapotranspiración y escorrentía. El escurrimiento superficial, el flujo subsuperficial y el flujo subterráneo que descargan en los cauces constituyen el agua de escurrimiento (Maderrey, 2005). En la práctica, es muy difícil separar el volumen de agua que pasa a la atmósfera por evaporación directa del suelo o de las superficies de interceptación del que lo hace por transpiración. Ambos se suelen tratar en conjunto en un único concepto denominado evapotranspiración (Martínez et al., 2006).

Asumiendo que la precipitación es la única fuente de agua en la naturaleza, ha de cumplirse, para cualquier cuenca cerrada y para un intervalo de tiempo determinado el principio de conservación de la masa.

$$A = P - ET - E \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

A=cambio en el almacenamiento, P=precipitación, ET=Evapotranspiración, E =Escorrimento

La ecuación anterior representa el balance hidrológico en una cuenca (Martínez et al., 2006).

Si las condiciones hídricas en la cuenca son las mismas al inicio y al final del intervalo de tiempo considerando, la variación en el almacenamiento es cero y ha de cumplirse:

$$P = E + ET \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde la escorrentía (E) incluye tanto superficial como subterránea en forma de infiltración o recarga de manto freático (Martínez *et al.*, 2006). La precipitación (P) es una variable discontinua en el espacio y el tiempo, los valores medidos en una estación meteorológica sólo son representativos para el punto de medida y su entorno. Todos los tipos de precipitación atmosférica como lluvia, nieve y granizo forman parte de lo que conocemos como agua meteórica (Lehr y Keely, 2005). El balance hídrico sólo es válido para ciertas condiciones de espacio y tiempo.

La forma de representar o medir el agua precipitada en cada uno de los componentes del balance hidrológico es el milímetro (mm); donde 1 mm de agua representa un litro de agua sobre una superficie confinada en 1 m² que se elevaría 1 mm; por lo tanto 1 mm de lluvia equivale a 1 L/m². Las medidas de precipitación y de los componentes del balance hidrológico, en un intervalo de tiempo, suelen expresarse en estas unidades (Martínez et al., 2006).

1.2. El agua y las plantas

La evapotranspiración (ET) es una parte fundamental del ciclo hidrológico, siendo el volumen de agua que pasa del estado líquido al estado gaseoso para formar parte de la

atmósfera, ya sea por la transpiración de las plantas o por la evaporación de agua la superficie de la tierra o superficies interceptoras (Martínez et al., 2006). Se expresa en mm para un determinado tiempo por unidad de área y también puede expresarse en unidades de energía por unidad de área ($W\ m^{-2}$; Foken, 2008). En específico, la transpiración vegetal es el proceso por el cual el agua absorbida por las raíces de las plantas regresa a la atmósfera en forma gaseosa (Maderey, 2005).

El agua ocupa casi la totalidad de la masa de las células de las plantas. Cada célula contiene una vacuola llena de agua. En dichas células el citoplasma solo ocupa entre el 5 y 10% del volumen de la célula, lo demás es vacuola. El agua generalmente constituye entre el 80 y 95% de la masa de los tejidos cuando la planta está creciendo. La madera, constituida principalmente por células muertas, tiene un contenido menor de agua. La albura cuya función es la de transporte en el xilema, contiene de 35 a 75% de agua; en el duramen hay un contenido un tanto menor (Taiz y Zeiger 2002). Las plantas continuamente absorben y pierden agua. El agua perdida por evaporación a través de las hojas ocurre mientras el dióxido de carbono (CO_2) de la atmosfera es absorbido por las hojas para realizar la fotosíntesis. En un día cálido, seco y soleado una hoja podría liberar el 100% de su agua en una hora. Durante su vida, la planta pierde una cantidad equivalente a 100 veces el peso fresco de la planta que se puede perder a través de la superficie de las hojas. Se estima que por cada gramo de materia orgánica o biomasa que forma la planta aproximadamente 500 g de agua son transpirados para ser liberado a la atmósfera (Taiz y Zeiger, 2002).

Thornwaite (1948) menciona que es igualmente importante conocer la precipitación y la evapotranspiración, puesto que cada una tiene sus causas meteorológicas diferentes. Afirma que, la cantidad de agua que se evapora de una superficie no solo depende de las condiciones atmosféricas, sino también de las características físicas de la superficie de evaporación.

Acuerdo a Thornwaite (1948), Huxman y colaboradores (2005), Martínez y colaboradores (2006), la evapotranspiración es un parámetro difícil de estimar con precisión, pues depende de factores ligados a la meteorología y la vegetación. También el grado de

cobertura vegetal puede afectar el flujo superficial y subterráneo (Huxman et al., 2005) teniendo repercusión en los demás componentes de un balance hidrológico. Tijerina (1992) citó que los factores que afectan la evapotranspiración son el grado de cobertura, el área foliar, la altura del cultivo (en caso de cultivos de importancia comercial), la rugosidad de la cobertura y el control estomático de la transpiración. El mismo autor señaló que los factores del suelo que afectan la evapotranspiración son el contenido de humedad, la profundidad del manto freático y la salinidad (Tijerina, 1992 en Villaman Peña, 2001; Figura 2).

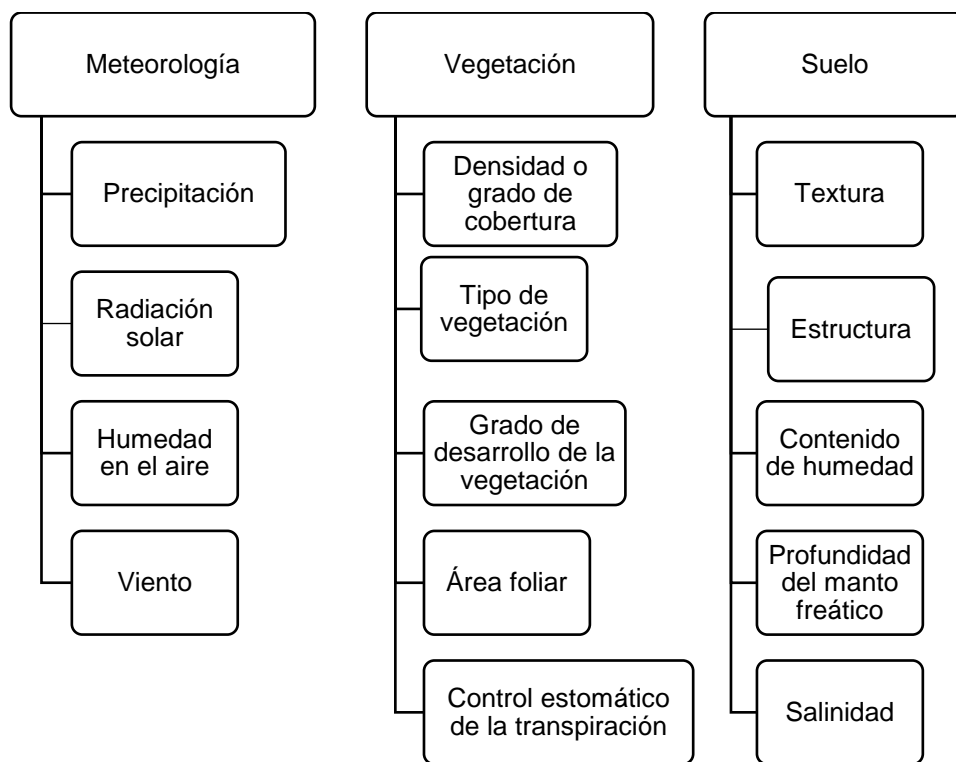


Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración.

En la literatura se pueden distinguir diferentes tipos de evapotranspiración. La evapotranspiración potencial (ETP), que es la cantidad de agua que se transmitiría a la atmósfera en forma de vapor si siempre hubiese la misma cantidad de agua para tales efectos. Esta no depende del valor de precipitación ni de la cantidad de agua contenida en el suelo que usan las plantas; es el agua que se evaporaría si existieran condiciones ideales de humedad en el suelo y en la vegetación. La evapotranspiración real (ETR) es

el volumen de agua que pasa a la atmósfera en forma de vapor en función del volumen de agua disponible. Es por ello la evaporación directa, resultado de la transpiración de las plantas. La ETR, a diferencia de la ETP, está condicionada por la cantidad de agua disponible en un momento determinado (precipitación y contenido de humedad en el suelo). En general, la ETP es mayor a ETR (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración es en sí un proceso físico, sin embargo, comúnmente no se mide directamente, como en el caso de la precipitación, sino que es estimado a través de otras variables como la radiación solar, humedad del aire y velocidad de viento, para la cual se usan modelos matemáticos que involucran estas variables para estimar la evapotranspiración. Además, está sujeta a un aspecto biológico, por lo cual es necesario también recurrir a herramientas de fisiología vegetal.,

La transpiración es un importante regulador de la temperatura. Dicho proceso es activado por la radiación solar, que hace que la temperatura en la superficie de las hojas aumente. La radiación proveniente del sol es la que activa todo el proceso de evapotranspiración. Cuando la temperatura de las hojas aumenta las vacuolas absorben energía llamado calor latente de vaporización, este hace que las moléculas pasen a fase gaseosa a una temperatura constante. Si asumimos que las moléculas están acomodadas en capas, podría decirse que la capa de moléculas con mayor energía es la que paso a fase gas, se desprende y deja debajo otra capa de moléculas de agua con menor energía, con menor temperatura, es este proceso bajo el cual las plantas se enfrían a sí mismas. Si no existiera ningún movimiento del aire, el agua que se transpira, saturaría poco a poco la atmósfera alrededor de la hoja, lo que reduciría la intensidad de transpiración. Sin embargo, el aumento de temperatura en la hoja, por la absorción de radiación solar, provoca una corriente de convección, la cual reemplaza el aire saturado alrededor de las hojas. Es por eso que el viento juega un papel importante en la remoción de las capas de aire saturadas alrededor de las hojas contribuyendo a una mayor transpiración (Gonzalez et al., 1995).

Existen métodos indirectos y directos para estimar la evapotranspiración. Los métodos indirectos utilizan las ecuaciones empíricas (modelos matemáticos) y son mejor

conocidos como métodos clásicos. En los últimos años se han realizado adecuaciones para que sean más exactos los coeficientes o constantes que utilizan. Estos métodos por lo general requieren de información climatológica (Lopez et al., 1991), provista por estaciones meteorológicas, que contengan como mínimo se señala en la figura 2. Estos se han clasificado a su vez en climatológicos, de percepción remota y micro-meteorológicos. Los métodos directos se explican en la siguiente sección.

Los climatológicos estiman la evapotranspiración en períodos mínimos de una semana, dentro de éstos tenemos: Penman modificado, evaporación del tanque tipo "A", Turc, Jensen-Haisen, Sthepens, Blaney-Cridde, Thornthwaite, Doorenbos-Pruitt, Ivánov y Papadakis (Villaman Peña et al., 2001). Los micro-meteorológicos estiman la evapotranspiración en intervalos cortos de tiempo (menores a 30 min), se estima el parámetro en tiempo real (Villaman Peña et al., 2001) y se basan en la medida del balance energético entre la atmosfera y la superficie de las hojas; aunque también pueden basarse en el movimiento de las masas de aire por intercambio de calor. Estos métodos consideran la radiación neta, reflejada, transmitida, velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa. Estos métodos proporcionan una buena estimación de la ETR; sin embargo solo permiten el análisis simplificado de la dinámica del agua, pues no proporcionan la información sobre la importancia relativa de la evapotranspiración directa de la masa arbórea, la interceptada ni la evaporada desde el suelo (Gonzalez et al., 1995). Como método micro-meteorológico, destaca el uso de la covarianza de vórtices turbulentos también conocida como covarianza de torbellinos (Eddy covariance; EC), la cual tiene sus bases en la determinación de la correlación entre las fluctuaciones de las concentraciones de un escalar (agua, CO₂, momento, entre otros) y las fluctuaciones de la velocidad vertical del viento (Burba y Anderson, 2010). Este método es utilizado como referencia entre los métodos micro-meteorológicos. La evapotranspiración que se mide es la referencia del intercambio de energía entre la superficie suelo-vegetación y la atmósfera. Esta energía es medida a través de evaluar el flujo de calor latente (λE) y sensible (H) a partir de la variación de la velocidad vertical del viento, de la densidad de vapor de agua y de la temperatura (Burba y Anderson, 2010).

El flujo de calor sensible está relacionado con la energía cinética de las moléculas del aire. En el suelo, el flujo de energía también es de esta forma, y se transfiere por conducción, de molécula a molécula, pues se tiene un medio sólido. Cuando la energía circula por el suelo por conducción se le denomina densidad de flujo de calor (G) y se expresa en las mismas unidades que la radiación ($W\ m^{-2}$, Shanafield et al., 2015). Podría decirse que el calor sensible es el que se puede sentir y la forma de sentirlo es midiendo la temperatura. Si la temperatura que se mide es alta se traduce que las moléculas del medio o fluido tienen una alta energía cinética (Tambutti y Muñoz, 2003).

El flujo de calor latente es la energía de cambio de fase; como la evaporación y la condensación y la transferencia de vapor de agua. La convección involucra a los dos tipos de flujo (sensible y latente). El calor latente se transforma en calor sensible cuando el vapor de agua se convierte en agua líquida. (Burba y Anderson, 2010). La evaporación del agua es la masa de agua que pasa por unidad de tiempo a través de una superficie; el calor latente de vaporización es la cantidad de energía necesaria para vaporizar esa unidad de masa de agua ($\lambda E \approx 2,45 \times 10^6 J\ kg^{-1}$). Para evaporar el agua, y romper los puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua, se necesita energía y esta proviene del calor sensible, de la energía cinética del aire, agua, suelo, etc. Esta energía pasa de calor sensible (energía cinética) a energía en forma de calor latente la cual se almacena en los puentes de hidrógeno y provoca una disminución de temperatura del medio que está cediendo energía. Al condensarse el agua sucede lo contrario, se forman puentes de hidrógeno y el calor latente se libera como calor sensible provocando un aumento de temperatura (Burba y Anderson, 2010).

En el aire, el contenido de vapor de agua se expresa en términos de vapor de agua o presión (barométrica) parcial. El parámetro que se utiliza con frecuencia en meteorología es la presión de vapor a saturación, que representa el equilibrio entre una superficie plana de agua pura y el aire, cuando las tasas de evaporación y condensación están en equilibrio y a la misma temperatura que el aire (Burba y Anderson, 2010). En fisiología vegetal y eco-hidrología, la diferencia entre esta presión de vapor de saturación y la presión de vapor real (relacionada con el contenido de humedad en el aire y temperatura

específica) se conoce como *déficit de presión de vapor*, que es un indicador de cuánta agua hay en el aire o que tan seco está el ambiente. Los métodos directos de medición de la ET proporcionan información directa del agua requerida por los cultivos o por las plantas, para llevar a cabo la fotosíntesis, la producción de frutos, semillas y conocer el volumen de agua que se aporta al ciclo hidrológico por medio de la transpiración.

Para medir directamente la transpiración, se utilizan instrumentos que miden el calor sensible y que son útiles para proporcionar valores del comportamiento real. Estos a su vez son útiles también para ajustar los parámetros de los métodos indirectos o empíricos (Aguilera y Martínez, 1996). Como ejemplo tenemos la medida del agua que pasa por el xilema activo de las plantas, que se mide por la vía térmica del flujo de savia. La diferencia de temperatura en el conjunto tronco-savia se mide utilizando dispositivos que detecten las oscilaciones térmicas. González y colaboradores (1995) mencionan tres ejemplos de los principales métodos térmicos que miden el flujo de savia:

- a) Balance térmico en el estado estacionario (BTE),
- b) Velocidad de desplazamiento de un impulso térmico breve (VIT),
- c) Conductividad de la savia, a partir de fuente de calor lineal (CST).

El que se utiliza en este trabajo de investigación es uno del tipo CST, propuesto por André Granier en 1985. La medida de la velocidad o del flujo de savia en el tronco o las raíces puede proporcionar una buena estimación directa de la transpiración (González et al., 1995).

Existe una buena cantidad de estudios relacionados a la transpiración que estudian una sola especie, grupo de especies y en algunos un tipo de vegetación y se realiza el cálculo a nivel parcela o conglomerado. Se pueden distinguir dos etapas en la historia asociadas a los métodos de medición directos e indirectos mencionados previamente. En la primera etapa, que comienza en los inicios de los 90's y termina en el año 2000, se establecieron las bases teóricas y se realizaron todos los experimentos para verificar el funcionamiento de los diferentes métodos. La segunda etapa, que comienza después del año 2000, marca el inicio de los estudios aplicados a cultivos de importancia comercial y a diferentes tipos de vegetación (figura 3).

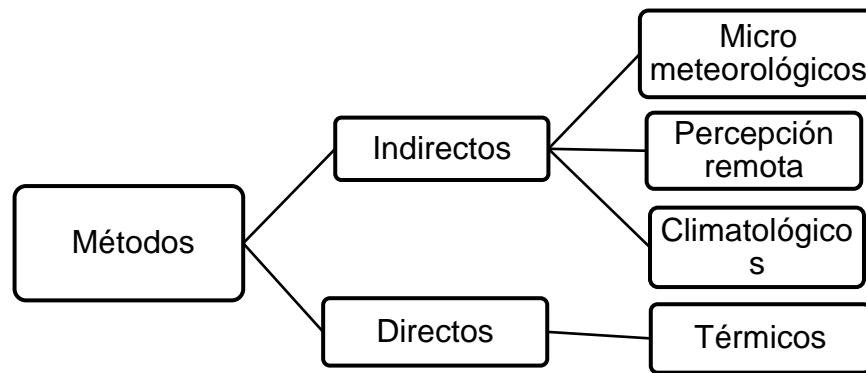


Figura 3. Métodos para el cálculo de la evapotranspiración.

Por ejemplo, Huber y Schmidt (1932), desarrollaron una medición termoeléctrica del flujo de savia llamado método de pulso de calor. En este método, la velocidad de un pulso de calor que se mueve hacia arriba en el xilema se mide como una indicación del movimiento del agua de la savia. Sin embargo, no lograron medir o saber cuáles eran los vasos que participaban en dicho transporte. En 1942, Thornwaite estudio el componente evapotranspiración y llegó a la conclusión de que es difícil hacer una separación entre la evaporación del suelo y la evaporación del agua proveniente de las plantas, además que el proceso depende de las condiciones atmosféricas y de las superficies de intercepción. Mas tarde, Thornwaite (1948) propone una ecuación que utiliza las mediciones exactas de presión, humedad relativa, temperatura y velocidades de viento a diferentes alturas.

En 1960, Vieweg y Ziegler y después Cermák (et al., 1973), usaron la capacidad calorífica del agua para mantener un gradiente de temperaturas constante, este método permitía observar el flujo en el xilema por más tiempo. En 1972, Swanson mide la transpiración con pulso de calor (HPV) y menciona que el movimiento del agua que se lleva a cabo en la noche se almacena en el tejido del tallo, más que constituir pérdidas por transpiración. En 1973, Hsiao mencionó que los estudios para entender y conocer las relaciones entre agua, planta y atmósfera iban en aumento pues la demanda de agua en la producción de alimentos también aumentaba, por ser un recurso crítico en naciones industrializadas y necesario para comprender los aspectos físicos de las relaciones entre las plantas y el agua.

En 1985, André Granier propone el método de disipación térmica y una ecuación que calcula el flujo de savia, que se convirtió en una herramienta básica para estudiar los flujos de agua en los ecosistemas forestales. Esta técnica es de mayor utilidad cuando se combina con otros métodos como la correlación-Eddy o el balance de energía en parcelas forestales. Permite la separación de la contribución de los árboles al flujo total de agua y sobre todo, es una medida de la transpiración de los árboles (Granier et al., 1996). El método de disipación térmica CST propuesto por Granier es el más utilizado, ya que utiliza una fuente de calor lineal (sensor cálido) implantado en el xilema. Consiste en una evaluación del flujo de savia por unidad de superficie y por unidad de tiempo, con base al registro de temperatura del sensor cálido con respecto a un sensor de referencia. Se puede considerar que la magnitud medida se trata de un caudal por unidad de superficie (González et al., 1995).

En 1996, Dawson estima la transpiración en un árbol de maple mediante tres métodos, porometría, flujo de savia y relación de Bowen; llegando a la conclusión que el método de flujo de savia y la relación de Bowen fueron los que mejor miden la transpiración. Menciona que bosques de edad madura y con árboles grandes tienen un mayor impacto en el balance hidrológico que los arboles pequeños y de áreas donde el bosque es joven. Sin embargo, cuando hay áreas o zonas en el que están entremezclados maduros y jóvenes, puede existir un impacto en el equilibrio del balance hídrico regional, pues van a aprovechar las reservas subterráneas y del suelo; aumentando así una de las salidas de agua, en escalas de decenas a cientos de hectáreas.

Durante varias décadas se ha estado estudiando la evapotranspiración con diferentes objetivos, aproximaciones y resultados. Lo que ha llevado a un mejor entendimiento de este proceso, que se sabe es complejo, cada aportación suma a la causa.

Otro ejemplo lo podemos encontrar en el trabajo de Goldstein y colaboradores (1998) los cuales determinaron la contribución a la transpiración diaria por parte de las células del parénquima de los árboles, es decir la contribución a la transpiración diaria del agua que esta almacenada en las células o tejidos. El estudio lo realizaron en 5 especies del bosque tropical en Panamá y obtuvieron un rango entre 9 y 15% del aporte de agua

almacenada de las células a la transpiración diaria. Su estudio reveló que el agua que se transpira en las mañanas proviene en su mayoría del almacén de agua en las células (almacenamiento interno en tejido). Por lo que el flujo que median en la base del tronco, si bien servía para recargar las células, también sería el agua que en algún momento se transpiraría.

En 2001, Ordoñez y colaboradores calculan la evapotranspiración de un cultivo de alfalfa con un método indirecto de balance energía y se dan cuenta que éste subestima el valor de evapotranspiración. En 2005, Huxman y colaboradores atribuyen el aumento en la evapotranspiración al aumento de la vegetación leñosa en ecosistemas de pastizal. En 2006, la FAO publica una guía para el cálculo de la evapotranspiración con un método indirecto climatológico en los cultivos y establece como método para calcular la evapotranspiración el método Penman-Monteith, el cual requiere de datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.

Burba y Anderson (2010) publican una guía práctica de un método micro-meteorológico para el uso de las mediciones de flujo de covarianza de Eddy. Explican cómo se pueden utilizar para mediciones de flujos de agua en la atmósfera y en consecuencia el cálculo de evapotranspiración. Bolbotín-Nesvará y colaboradores (2011) compararon en un viñedo en un ambiente semiárido, dos métodos indirectos (la relación de Bowen y la covarianza de torbellinos) y observaron que la relación de Bowen sobreestima el valor de evapotranspiración en comparación con la covarianza de torbellinos. Harwell (2012), recopiló los casos de estudio de todos los métodos con los que se ha medido la evaporación en Estados Unidos. En 2013, Gallego-Elvira y colaboradores hacen uso de algoritmos y de un software llamado EVASPA para hacer una estimación espacial de la evapotranspiración.

En algunos ambientes semiáridos, el cambio en la cobertura vegetal de plantas leñosas conduce a que cambie la magnitud de transpiración, lo que se traduce en cambios en la escorrentía (Huxman et al., 2005). Respecto a la península de Yucatán, Reyes-García y colaboradores (2012) realizaron un estudio enfocado a la ecología y fisiología de algunas especies de una selva baja en Dzibilchaltún, Yucatán. Las mediciones de flujo de savia

que reportan son para *Ceiba schotti* $0.31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, *Apoplanesia paniculata* $0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, *Gymnopodium floribundum* $0.17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, *Piscidia piscipula* $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, *Lysiloma latisiliquum* $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y *Bursera simaruba* $0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. La extrapolación que hacen para calcular el uso de agua a nivel parcela en Dzibilchaltún se estimó para lluvias y sequía en $629\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ y $156\,000 \text{ kg ha}^{-1}$ por mes, respectivamente (equivalente a 2.1 mm día^{-1} en lluvias y 0.52 mm día^{-1} en sequía). León (2013), estimó el uso de agua en la selva mediana de la Reserva Kaxil Kiuic (Yucatán) utilizando el método de disipación térmica de Granier y obtiene un resultado de $9000 \text{ kg de agua ha}^{-1}$ por día (0.9 mm día^{-1}). En ambas investigaciones los factores meteorológicos son diferentes, principalmente la precipitación.

En el caso de los métodos micro meteorológicos y en específico de percepción remota, en el trabajo de Uuh-Sonda y colaboradores (2018) se realiza una compilación de 15 años donde se estudian dinámicas espacio-temporales de la evapotranspiración y la productividad primaria de las plantas durante condiciones de sequía y de lluvias por medio del análisis de imágenes satelitales de alta resolución. En dicho trabajo se concluye, a través de la comparación de la evapotranspiración y de la productividad primaria, que los bosques caducifolios del norte de la península de Yucatán tienen una mayor resiliencia a los cambios climáticos en comparación con los bosques subperennifolios y perennifolios, en los eventos climáticos que se detectaron durante ese período (15 años).

El presente trabajo contribuye a las ciencias del agua, la ecohidrología y la ecofisiología, estimando la transpiración en organismos representativos de la selva baja caducifolia, un componente poco estudiado del balance hidrológico.

2. Antecedentes

La necesidad de caracterizar los recursos hídricos con que cuenta la península de Yucatán y, en específico del agua disponible para uso y consumo humano, convierte el estudio de cualquier componente que involucre al agua, de vital importancia para la correcta gestión, manejo, administración y conservación de los mismos. Además, existe una desactualización de la información respecto a los datos de ciertos componentes del

balance hídrico, aunado a esto no se tiene certidumbre en los mismos, de que al utilizarlos realmente se esté haciendo un balance de la situación hidrológica real.

La evapotranspiración en particular es estimada a través de un método indirecto usando la precipitación y la suposición de un volumen de infiltración. No es medido directamente como la precipitación, que tiene procedimientos e instrumentos muy desarrollados. Para utilizar las fórmulas de los métodos empíricos o indirectos es necesario tener los registros históricos de los elementos o parámetros meteorológicos que se utilizan para estimar la evapotranspiración, el problema es que la mayoría de las estaciones meteorológicas no los tienen. Se ha demostrado que dichos métodos pueden sobreestimar o subestimar los valores de evapotranspiración. El único que se ha utilizado como de validación o comprobación en los últimos años, ha sido el método de covarianza de torbellinos o Eddy covariance.

Los datos de evapotranspiración que se utilizan generalmente en los balances hidrológicos no son datos calculados directamente. En México son limitados los valores de transpiración calculados con métodos directos, los que existen están asociados a cultivos de importancia económica o su enfoque es fisiológico.

Otro aspecto a resaltar es que, el tipo de vegetación puede alterar el flujo del agua en el ciclo hidrológico por la evapotranspiración, sobre todo según la abundancia y tipo de comunidad vegetal; ya que puede influir directamente en los flujos superficiales y subterráneos, pues el agua de lluvia es interceptada por los árboles y plantas, evitando que llegue al suelo. Es por esto que en esta investigación se realizaron mediciones directas de flujo de savia asociado a la transpiración de un tipo de vegetación representativa de la península de Yucatán, en una superficie específica de la selva baja caducifolia. La selva baja caducifolia representa el 8.4% del territorio nacional (CONABIO 2019) y que en Yucatán representa el 73.7% del territorio estatal (INEGI 2017).

En México son pocos los trabajos enfocados a estudiar las relaciones ecohidrológicas y los impactos directos sobre los balances de agua a escalas locales y regionales. Existe una brecha de información entre los beneficios (servicios ambientales) que se obtienen al conservar los bosques mexicanos apoyados de datos que representen la situación del

ecosistema. Estos estudios deben ir acompañados de metodologías alternativas que puedan dar valores directamente relacionados con la transpiración asociada a un tipo de vegetación y que sean fácilmente accesibles.

El resultado de este trabajo servirá de referencia para balances hidrológicos locales y regionales aportando información directa de la transpiración, que representa alrededor del 50% del aporte a la evapotranspiración en tipos de vegetación con plantas leñosas (Huxman et al., 2005).

Debido a la diversidad en las selvas bajas caducifolias todos los estudios científicos que se realicen respecto a ella servirán para su conservación, mantenimiento y recuperación, que representa menos del 10% del área del territorio nacional.

Trejo (2005) describe fisionómicamente estas selvas como asociaciones dominadas por árboles que se ramifican a corta altura, de copas extendidas, cuyas estaturas fluctúan alrededor de los 8 y 12 m, aun cuando pueden encontrarse eminencias asimiladas que por lo general no sobrepasan los 15 m. El estrato arbustivo es denso que en ocasiones impide el paso. Destacan las cortezas brillantes y exfoliantes de algunas especies (particularmente de familias como Burseraceae, Euphorbiaceae y Anacardiaceae), las hojas compuestas predominan en estas selvas, así como la presencia de flores de colores llamativos, como el amarillo, rojo, rosa y morado, las cuales tienen su época de floración principalmente durante las lluvias. Es posible encontrar especies con espinas, el incremento de elementos espinosos puede relacionarse con el déficit en humedad o con perturbación. Lo más distintivo es la fenología contrastante entre en la época de lluvias y el estío.

Las actividades económicas de las cuales se tienen registros para el municipio de Hunucmá, del que forma parte la reserva, son la agricultura, ganadería y pesca.

3. Pregunta de investigación

¿Cuál es la transpiración de la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar?

4. Hipótesis

La estimación de la transpiración, en árboles mayores de 5 cm de diámetro, de las especies de mayor valor de importancia en la Reserva Estatal El Palmar nos dará un valor semejante a otras selvas secas y podrá ajustarse a la medición de la evapotranspiración de la selva.

5. Objetivo General

Cuantificar la transpiración mediante el método de disipación térmica de un área representativa de la selva baja caducifolia en la Reserva Estatal el Palmar en Yucatán, México.

6. Objetivos específicos

- a) Identificar las especies con mayor valor de importancia de la selva de la Reserva Estatal El Palmar.
- b) Estimar la transpiración de individuos con diámetro mayor a 5 cm en época de sequía y lluvias en la reserva.
- c) Cuantificar el área del xilema activo (albura) de las especies de árboles seleccionados para la medición de transpiración.
- d) Escalar las mediciones de transpiración a la totalidad del bosque y compararlo con mediciones realizadas en otros bosques similares o mediante otras metodologías.

7. Materiales y métodos

7.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el noroeste de la península de Yucatán en el estado de Yucatán, municipio de Hunucmá, dentro de la reserva estatal El Palmar, en las coordenadas geográficas, 21°01'39.91" Norte y 90°03'46.53" Oeste (Figura 4). El tipo de suelo es leptosol réndzico que es el de mayor porcentaje en el estado; es un suelo gris oscuro calcáreo poco profundo (20-30 cm) arcilloso de buen drenaje. Se encuentra en la zona de llanuras, la geología predominante es sedimentaria del periodo terciario de la era cenozoica (INEGI, 2017). El tipo de clima es semi seco muy cálido y cálido, BS1(h'), la

temperatura media mensual oscila entre 23 y 28.8°C con los datos históricos de más de 30 años (CONAGUA, 2015). Los mismos datos históricos demuestran que el mes de septiembre es el mes con mayor precipitación de 100 hasta 240 milímetros de agua.

El tipo de vegetación en dicha área es la selva baja caducifolia (SBC) de acuerdo a la propuesta de Miranda y Hernandez-Xolocotzi (1963) o bosque tropical caducifolio de acuerdo a Rzedowski (1978). De acuerdo a INEGI (2017) las principales especies vegetales del estrato arbóreo son: *Vitex gaumeri*, *Piscidia piscipula*, *Metopium brownei*, *Spondias mombin*, *Achras zapota*, *Gymnopodium floribundum*, *Caesalpinia violacea*, *Pithecellobium albicans*, *Acacia millenariana*, *Lysiloma latisiliquum*, *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Talisia*, *Brosimum alicastrum*, *Bucida buceras*, *Guazuma ulmifolia*, *Mimosa hemiendyta* y *Leucaena glauca*.

Se utilizó un inventario de la vegetación de la Reserva Estatal El Palmar, que se elaboró siguiendo la metodología de la CONAFOR en los Sitios de Monitoreo Intensivo de Carbono como parte del proyecto “Uso de biomasa leñosa como biocombustible sólido para la generación de energía eléctrica en zonas rurales 249581 (Canché, 2019). El conglomerado donde se ubicaron los sensores, se encuentra al noreste de la torre meteorológica o de la torre de flujos de covarianza de torbellinos (Eddy covariance) de la Unidad Académica de la UNAM en SISAL.

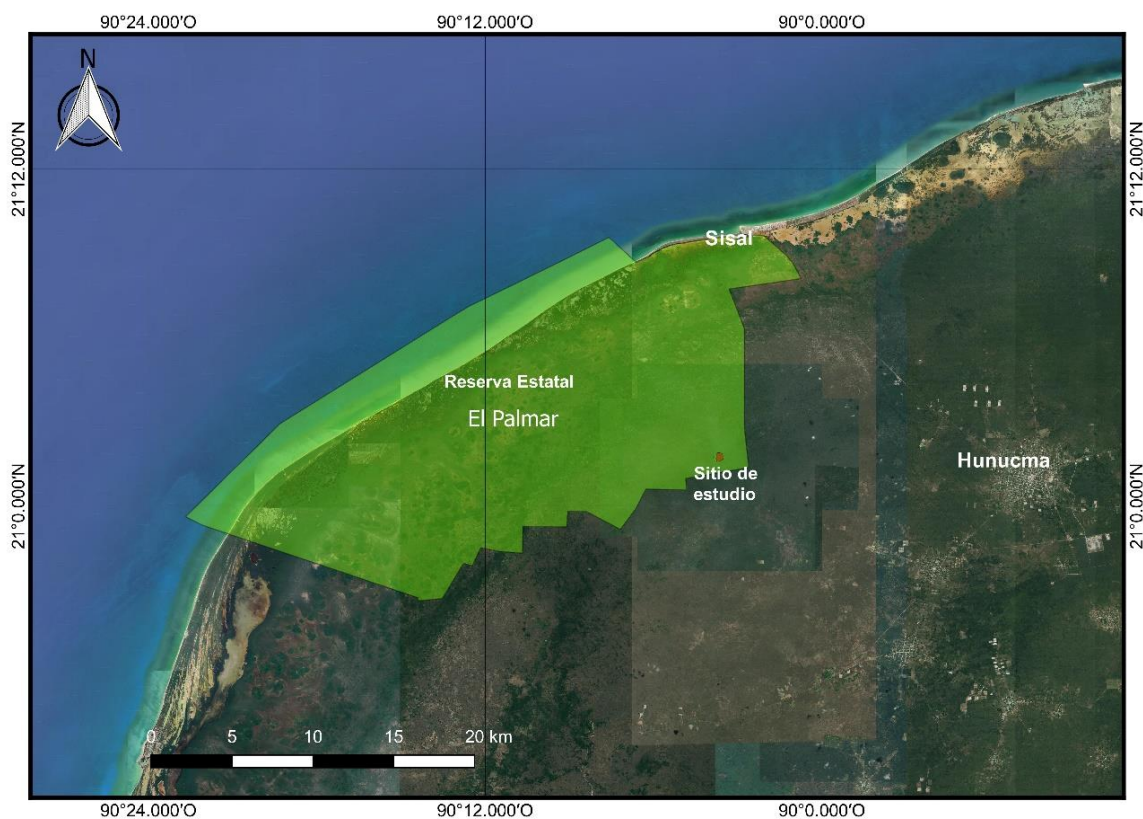


Figura 4. Ubicación del sitio de estudio. Mapa elaborado en QGIS, Datum WGS 84.

7.2. Método de medición de transpiración.

Para calcular la transpiración por medio del método de disipación térmica propuesto por Granier (flujo de savia), fue necesario seleccionar las especies representativas, seleccionar las temporadas de medición, construir e instalar sensores, mediciones en campo, descarga de datos, selección de datos útiles y finalmente usar la ecuación de Granier para obtener un flujo de savia a nivel basal. Con los resultados de la transpiración por especies se buscarán relaciones alométricas y finalmente hacer la extrapolación a nivel de un conglomerado representativo de la selva baja caducifolia.

Selección y ubicación de especies

Se seleccionaron individuos distribuidos en 4 parcelas. Las parcelas seleccionadas están cerca del radio de influencia de la torre de *Eddy covariance*, son de fácil acceso, los

árboles seleccionados debían de tener hojas, sin necesidad que fuera una especie perenne. Se eligieron árboles con DAP mayores a 5 cm y que estuvieran dentro de las especies con mayor índice de valor de importancia del Inventario. Se tomaron las coordenadas de cada árbol con ayuda de un GPS Garmin e-Trex. Las especies seleccionadas tienen un valor de importancia (IVI) asociado y se considera que representan la selva baja caducifolia. El IVI, indica que tan importante es dicha especie en la sección de la selva baja caducifolia en la Reserva Estatal del Palmar.

$IVI = Abundancia\ relativa + Frecuencia\ relativa + Dominancia\ relativa$ (Ecuación 4)

El índice es una sumatoria de porcentajes al 300%.

Construcción de los sensores tipo Granier.

Los sensores tipo Granier fueron diseñados por Granier (1985); el funcionamiento está basado en la teoría de la diferencia de potencial, la unión de dos metales distintos que pueden producir una diferencia de potencial (mV); la cual está en función de la diferencia de temperatura entre los extremos denominado sensor caliente y el otro denominado “frío” o de referencia, estos sensores son mejor conocidos como termopares.

En este trabajo se usan termopares “tipo T” por estar compuestos por constatan (una aleación cobre-níquel) y cobre, que resisten atmósferas húmedas. Estos dos metales fueron los conductores eléctricos (termopar) que se soldaron entre sí en un punto de conexión; cuando la temperatura de esta unión cambia se produce una fuerza electromotriz (FEM), dicho voltaje se mide con un voltímetro conectado al registrador de datos. Las mediciones de voltaje se convertirán a mediciones de temperatura mediante la conversión del coeficiente de Seebeck o la que el propio registrador de datos tenga. Dicho coeficiente está determinado por las características termoeléctricas del material utilizado, relaciona el calor con las cargas eléctricas, es la conductividad eléctrica de un material, que depende de los electrones que participan en la conducción, la masa de dichos electrones y la temperatura. Los dos sensores tienen una longitud de 3 centímetros de largo cada uno y 1 milímetro de diámetro, para lo cual se utilizan agujas hipodérmicas 19G x 1 ½”. Se les quita la punta con ayuda de una lija hasta obtener una punta en forma de circular (Figura 5).

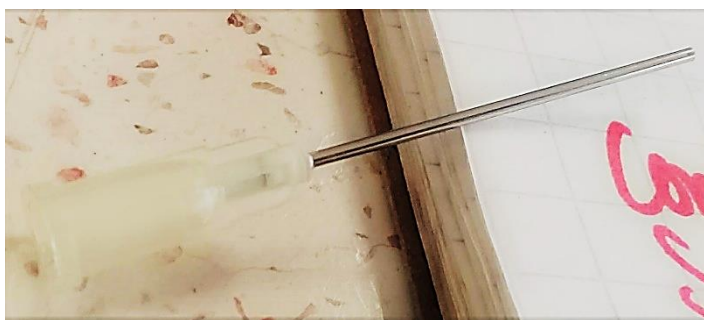


Figura 5. Aguja hipodérmica de uso veterinario tamaño 19G.

Dentro de la aguja se insertan el termopar de constantán y cobre, dichos cables tienen una longitud aproximada 15 cm de largo. A la aguja del sensor caliente se le enrosca en forma de espiral el cable de constantán, un embobinado, para crear la zona de calentamiento. Cada sensor se introduce en agujas de uso veterinario tamaño 19G (Figura 6). Se utilizó *thermofit*, tubo termo contráctil para aislar los cables y terminales de conexión, que al calentarlo se contrae y se pega a la superficie donde haya sido colocado. Para darles soporte a los sensores se utiliza alambre galvanizado en forma de “u” (Figura 7). Se utilizó un multímetro para medir la resistencia de los pares de sensores.



Figura 6. Embobinado de constantán en la aguja; sensor caliente.

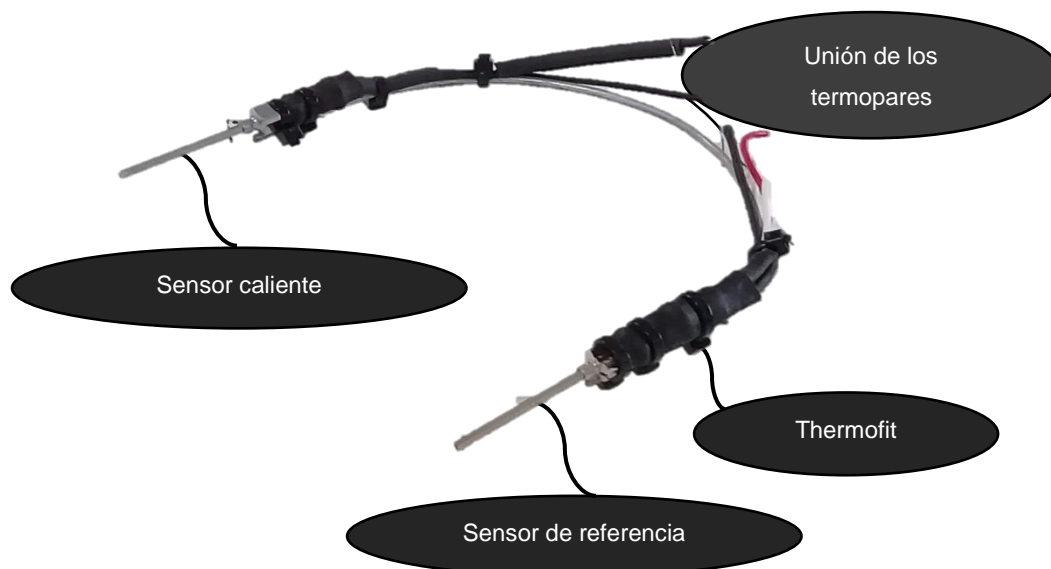


Figura 7. Representación del dispositivo tipo Granier armado y listo para instalar.

Las dos puntas de constatan de cada uno de los dos sensores (termopares) se unen para poder medir una diferencia de potencial la cual tiene una relación directamente proporcional con la diferencia de temperatura. Aproximadamente 40 microvoltios (μV) equivalen a 1 $^{\circ}\text{C}$.

Selección de las temporadas y las fechas de medición.

La selección de temporadas se realizó utilizando los datos de seis estaciones meteorológicas en el estado de Yucatán datos obtenidos del sistema meteorológico nacional. Se elaboró un climograma con los registros históricos de precipitación y temperatura. En la figura 8 se aprecian dos temporadas definidas con respecto a la precipitación, las cuales fueron identificadas como temporada de sequía y de lluvias. Cuando la precipitación es menor a 100 mm se identificó como sequía y cuando fue mayor de 100 mm es la temporada de lluvias. El periodo de medición de sequía fue de 19 de marzo del 2019 al 12 de abril del 2019; para lluvias del 25 de septiembre al 17 de octubre del 2019.

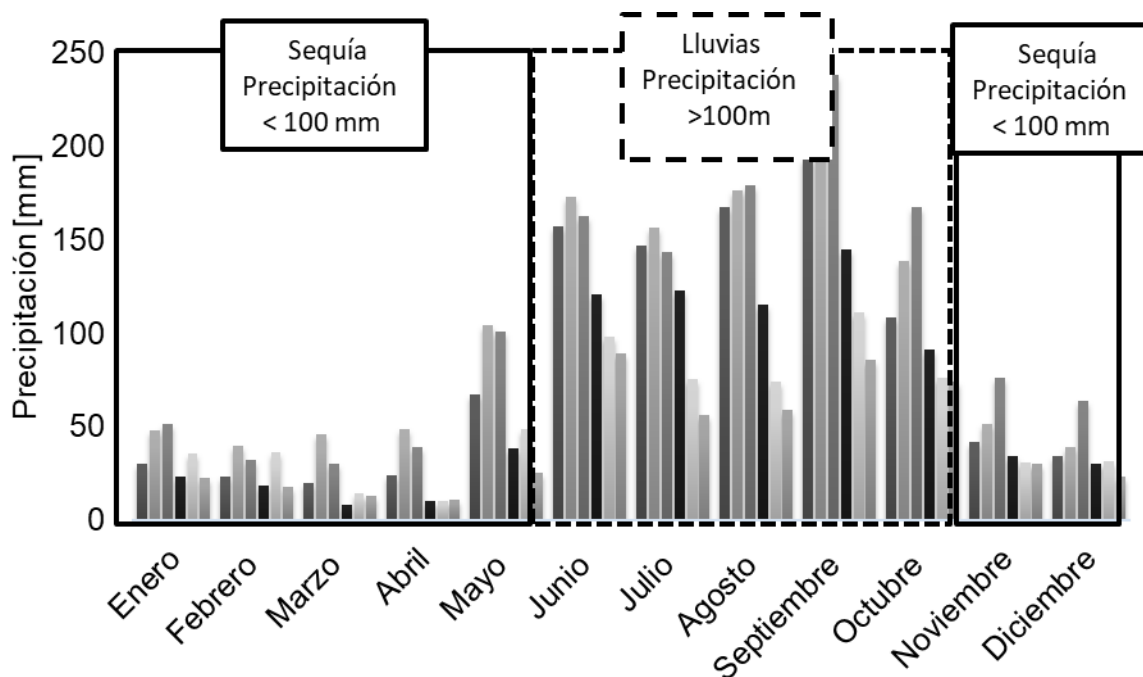


Figura 8. Selección de temporadas por el valor de la precipitación, las barras representan las estaciones meteorológicas.

En campo, se identificó la especie y se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), la cobertura del dosel (eje mayor y menor) y el área foliar en 19 individuos de 10 especies en sequía; 21 individuos de 10 especies en lluvias.

Albura conductora

La medición de albura conductora fue realizado al terminar las mediciones de flujo de savia en la temporada de lluvias. Las mediciones se realizaron en los mismos individuos medidos por el método de flujo de savia, a una altura de 1.5 metros, cercana a la sección en la cual se colocaron los sensores tipo Granier, se realizó una perforación a 1.5 metros de altura, con ayuda de una pipeta de plástico se introduce en la perforación colorante alimenticio de color azul. Se esperaron 90 minutos y con ayuda de un perforador de núcleo se obtiene una muestra del tronco 3 centímetros arriba la perforación donde se

inyectó el tinte. Finalmente, con un vernier se mide la proporción de tronco que se tiñó, la cual representa la albura conductora, convertida a área conductora con la ecuación:

$$A_{sw} = \pi[(r_T - d_B)^2 - (r_T - d_B - d_{sw})^2] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

r_T =radio del tronco del árbol (cm)

d_B =profundidad de la corteza (cm)

d_{sw} =profundidad de la albura (cm)

A_{sw} =área conductora se asume que no cambia en la temporada de secas (cm²)

Se extrajeron y midieron dos núcleos por individuo. Para distinguir entre la transición entre albura y corteza, se evaluó visualmente el color y la textura.

Medición del índice de área foliar

La medición del índice de área foliar (IAF) se basa en la estimación de la cantidad de follaje en un dosel vegetal a partir de mediciones de atenuación de la radiación a medida que pasa por el dosel. Al medir esta atenuación en varios ángulos desde el cenit, también se puede obtener información de la orientación del follaje. Para estimar el IAF se utilizó un medidor de dosel LI-COR (LAI-2200C). La medición que se realizó fue considerando todo el dosel de cada una de las parcelas en donde se encontraban los individuos. Se hicieron al menos 15 mediciones puntuales abarcando el perímetro de cada parcela en la que se midió el flujo de savia de los individuos seleccionados (aproximadamente 314.16 m²) de la cual se obtuvo un promedio de las mediciones por parcela. Las mediciones pueden considerarse como m² del área de dosel / m² de área de suelo, pero se considera adimensional. El IAF se calcula a partir de:

$$L = 2 \sum_{i=1}^5 \bar{K}_i W_i \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

L=índice de área foliar (para todos los objetos que bloquean la luz, LAI)

\bar{K}_i =número de contacto promedio con el primer aro del sensor óptico

W_i =factor de ponderación para el primer aro

El medidor de dosel permite decidir que tapa se utilizaría para medir. Se decidió utilizar una de las cubiertas del sensor óptico que tapa $\frac{3}{4}$ partes del mismo (tapa con un ángulo de 45°), ya que el dosel era cerrado. Aun en temporada de sequía cuando no había casi hojas, las copas de los árboles estaban entremezcladas. En el caso de la temporada de sequía, el IAF que se utiliza para caracterizar dicha temporada es el promedio estadístico de los IAF's de las parcelas. En la temporada de lluvias hubo que diferenciar los IAF's por parcela ya que se observó una diferencia en los doseles de los árboles en cuanto a tamaños y a cantidad, en la parcela 1 y 3 había más árboles que en la 2 y 4. Las áreas fueron delimitadas por la extensión de los cables que se conectaban al registrador de datos el cual colocábamos en medio de los árboles que queríamos medir, de allí tendíamos cables con una longitud máxima de 10 m hacia los árboles, con lo que nos daban parcelas de 20 m de diámetro, un área de 314.16 m^2 por parcela circular.

Instalación de los sensores tipo Granier.

Se instalaron sensores en la cara norte de los individuos seleccionados. Se determinó el número máximo de individuos de acuerdo a la disponibilidad de sensores y de equipos a fin de realizar mediciones simultaneas. Se completaron ciclos de 5 días como mínimo para asegurar mediciones en días despejados que representaran el máximo de transpiración. Cuando el diámetro del árbol fue mayor a 15 cm, se utilizaron dos pares de sensores por individuo para representar el flujo promedio de todo el diámetro del árbol dirección norte y sur.

Para realizar los orificios en donde se instalaron los sensores, fue necesario quitar parte de la corteza del árbol. Luego, con un taladro y con una broca de $\frac{1}{32}$ de pulgada se hicieron las perforaciones, llegando a una profundidad dentro del xilema de 3.5 centímetros (Figura 9). La separación entre cada una de las perforaciones fue de 10 cm en la cara norte del individuo, ya que es el hemisferio que recibe menos luz solar y así se disminuyen los problemas de gradientes de temperatura.

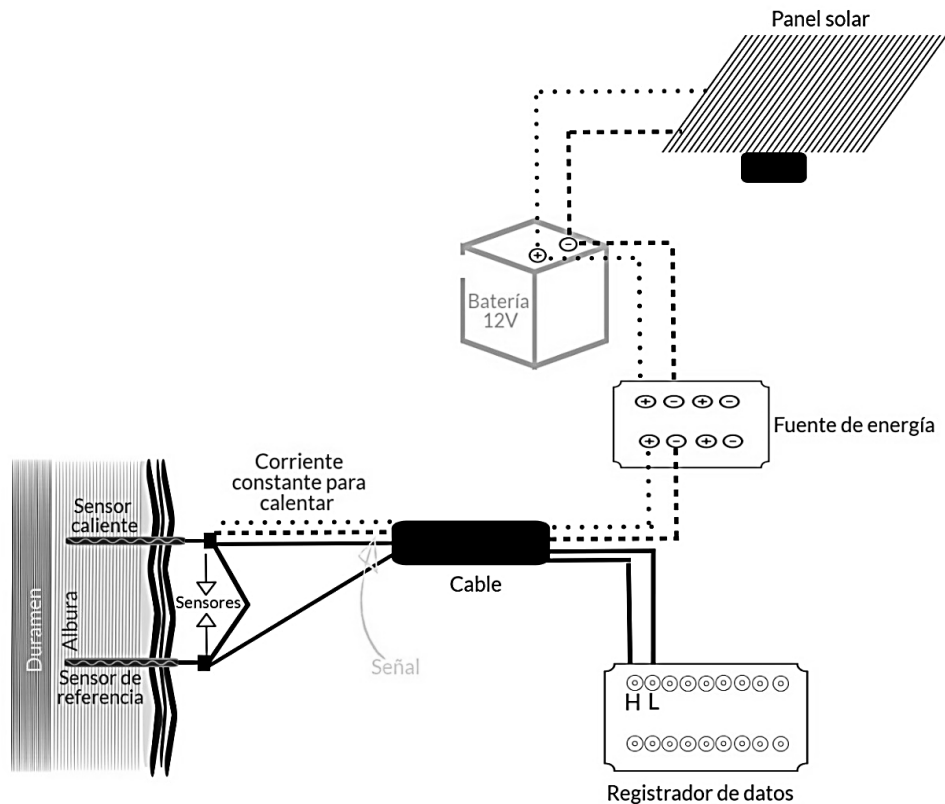


Figura 9. Configuración del sistema de Granier para la medición de flujo de savia.

Adaptado de Lu et al., 2004.

Para conocer el voltaje que se debe aplicar para calentar el sensor superior, se midió la resistencia, con la cual se calculó la corriente que es necesaria para calentarlo.

$$corriente \text{ (Amper)} = \sqrt{\frac{Potencia \text{ (Watt)}}{Resistencia \text{ (Ohm)}}} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

La corriente en Amperes se utiliza en la siguiente ecuación para conocer el voltaje necesario para calentar el embobinado de constatan del sensor caliente, el cual se regula en la caja de capacitores.

$$Voltaje \text{ (volt)} = Corriente \text{ (Amper)} \times Resistencia \text{ (Ohm)} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde la resistencia es la de la totalidad del circuito, es decir de todo el dispositivo. Se usaron los parámetros sugeridos por Granier (1985), corriente de calentamiento de 0.14 A, con una resistencia del embobinado de 10 Ohm y una corriente de 0.2 W. Se aislaron

los sensores con material reflejante y espuma de poliuretano para aislarlos y evitar cambios de temperatura drásticos (Figura 10). Los datos se registran en un registrador de datos (data loggers) colocados al centro de la parcela. Se registraron la diferencia de voltaje (ΔV) y la diferencia de temperatura (ΔT) entre la sonda calentada y la sonda de referencia y la corriente provista a la sonda. Los data loggers registran los datos cada 10 segundos y se promedian cada 10 minutos. Una vez instalados los sensores se supervisaron cada 2 días, para verificar que estuviesen funcionando y si alguno estaba dañado, se sustituía. Finalmente, se descargaron en formato “.xlsx” terminando cada ciclo de medición.



Figura 10. Aislamiento del sensor con anti reflejante y poliuretano.

Una vez concluido el período de medición se quitó el poliuretano y el aislante, se extrajeron los sensores sin dañar los termopares y de manera en que no se lastimase al árbol. Las perforaciones de los sensores y los núcleos fueron sellados con una pasta no toxica (resanador de madera).

Tomando como referencia una de las formas de la ecuación Hagen-Poiseuille y considerando el tronco del árbol como un tubo, podemos definir que el flujo volumétrico dentro del tubo dependerá del radio (r), la viscosidad del líquido (η) y el gradiente de presión ($\Psi_p/\Delta x$).

$$\text{Flujo volumétrico} = \left(\frac{\pi r^4}{8\eta}\right) \left(\frac{\Delta\Psi_p}{\Delta x}\right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Este flujo se expresa en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. La ecuación nos dice que la presión que impulsa el movimiento del flujo es independiente de un gradiente de concentración, siempre que no cambie la viscosidad. El agua se movería impulsada por un gradiente de presión. Esta fue la ecuación de la que se partió para estudiar el flujo, considerando el efecto Joule, el cual establece que, si en un conductor circula una corriente eléctrica, parte de la energía de los electrones se transforma en calor, debido a los choques con los átomos del material conductor, elevando así la temperatura del mismo. Ese calor o temperatura será igual al calor que se disipe por convección y conducción en las paredes de los sensores.

$$hS(T - T_f) = RI^2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

h , coeficiente de intercambio de calor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$);

S , área o superficie de intercambio (m^2);

T , temperatura del sensor ($^{\circ}\text{C}$)

T_f , temperatura de la madera en ausencia de calentamiento ($^{\circ}\text{C}$)

R , resistencia del sensor caliente (Ω)

I , intensidad eléctrica de la corriente (A)

$$h = h_0(1 + \alpha F_d^{\beta}) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

h_0 , coeficiente de intercambio térmico en un flujo cero, es decir $F_d=0$

F_d , densidad de flujo de savia ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

α y β , son los coeficientes dependiendo de la cantidad de calor aplicada

h_0 se calcula a partir de la primera ecuación

$$h_0 = \frac{RI^2}{S(T_{\max} - T_f)}; \quad (\text{Ecuación 12})$$

donde T_{\max} es la temperatura con un flujo cero ($F_d=0$) cuando ocurren pérdidas de calor por conducción. Según el artículo de Granier se menciona también “que esta temperatura

de equilibrio con flujo de savia cero podría medirse durante los ciclos nocturnos donde la humedad del aire está cerca de la saturación". Este valor de T_{max} es máximo comparado con cualquier T que se pueda obtener cuando el flujo de savia no es cero.

Cuando F_d es diferente a 0 y es constante, se puede describir de la siguiente forma:

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} * \frac{h-h_0}{h_0} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Combinando las ecuaciones tenemos;

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} * \frac{(T_{max}-T_f)-(T-T_f)}{T-T_f} \right]^{\frac{1}{\beta}} = \left[\frac{1}{\alpha} * \frac{\Delta T_{max}-\Delta T}{\Delta T} \right]^{\frac{1}{\beta}} = \left[\frac{1}{\alpha} * K \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

ΔT_{max} , diferencia de temperaturas máxima establecida entre el sensor caliente y el de referencia cuando $F_d=0$

ΔT , diferencia de temperaturas entre el sensor caliente y de referencia a un dado F_d

K , indice de flujo (adimensional)

Los experimentos que realizo Granier mostraron que el coeficiente K estaba correlacionado con la densidad de flujo de savia. Una serie de calibraciones de sensores de flujo de savia en diferentes tallos de diferentes especies proporcionaron la relación experimental y numérica entre K y F_d que demostró ser independiente de las especies estudiadas. La primera relación propuesta por Granier (1985) fue:

$$K = \left[\frac{(\Delta T_{max}-\Delta T)}{\Delta T} \right] = \alpha F_d^\beta = 0.0206 \times 10^{-6} F_d^{0.812} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Reorganizando la ecuación anterior para el flujo de savia, utilizando ya sea ΔV o ΔT , asumiendo la proporcionalidad directa entre los dos o utilizando el coeficiente Seebeck ($40 \mu V/^\circ C$) queda:

$$F_d = 118.99 \times 10^{-6} \left[\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{1.231} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

F_d = es el flujo de savia $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ s}} \right]$

ΔT_{max} = es la máxima diferencia de temperaturas entre el sensor de referencia y el caliente cuando F_d es cero

ΔT = es la diferencia de temperatura entre el sensor de referencia y el caliente a un dado F_d

$$F_d = 118.99 \times 10^{-6} \left[\frac{\Delta V_{max} - \Delta V}{\Delta V} \right]^{1.231} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

ΔV_{max} = es la diferencia de máximo voltaje entre el sensor de referencia y el caliente cuando F_d es cero

ΔV = es la diferencia de voltaje entre el sensor de referencia y el caliente a un dado F_d

A partir de este valor de F_d de cada individuo de cada especie, es posible convertir el valor de flujo de savia a litros o kilogramos por unidad de tiempo, o a milímetros de agua por día (mm/tiempo).

Almacenamiento y obtención de datos de registrador (data loggers).

La información obtenida de los sensores de flujo de savia es el promedio de las mediciones de diferencia de temperatura, de cada 10 minutos, por lo que hay 6 valores por cada hora por el total de días que se alcanzaron a medir, según la carga de la batería y la recarga de la misma con el panel solar. Dicho valor promedio se encuentra almacenado por fecha y hora en la tarjeta de memoria de los registradores de datos. La información se descarga en el software del registrador de datos, después se convierte a una hoja de cálculo de Excel. Los datos son acomodados en la hoja de cálculo por cada individuo y cada individuo se identificó con un código que incluye las iniciales de la

especie, el cable utilizado, el nombre de registrador y la parcela en donde se realizó la medición. Ejemplo: *Bursera simaruba* en la parcela 1, conectado con el cable 9 al registrador CR1000 se codificó como BS-9-CR1000-1.

7.3. Análisis de datos.

Del total de los días donde las mediciones fueron continuas, se seleccionaron los días despejados (valores de radiación solar por hora) de acuerdo a los datos de la estación meteorológica más cercana. Para considerar un día despejado, la gráfica de la radiación solar deberá ser lo más semejante a una distribución normal. La radiación tendrá un comportamiento ascendente hasta llegar a un máximo (el valor aceptado por la Organización Meteorológica Mundial es $1\,367 \pm 7 \frac{W}{m^2}$). Un valor típico de radiación en un día despejado y mediodía solar en el sitio de estudio es $1\,000 \frac{W}{m^2}$ (Figura 11).

Como segundo criterio de selección de datos, se verificó que los días tuvieran un comportamiento normal en cuanto el déficit de presión de vapor (DPV, Figura 12), que es un indicador de la humedad ambiental; mientras mayor sea el valor, más seco está el ambiente y más susceptible es la vegetación de transpirar. Para la selección de datos de buena calidad se utilizaron datos de estaciones meteorológicas de la UNAM Unidad Sisal.

Después de haber seleccionado los días despejados y con DPV normal, en días cálidos de máximo 2 KPa, se realizaron gráficas de dispersión de los datos de diferencia de temperaturas de cada individuo para eliminar los datos que sugerían falla en el sensor. En el caso de los individuos en los que se colocaron dos sensores, debido a que el DAP era mayor de 15cm, se sacó el promedio de las diferencias de temperatura de los sensores con posición sur y norte y este fue el que se utilizó para todos los cálculos subsecuentes.

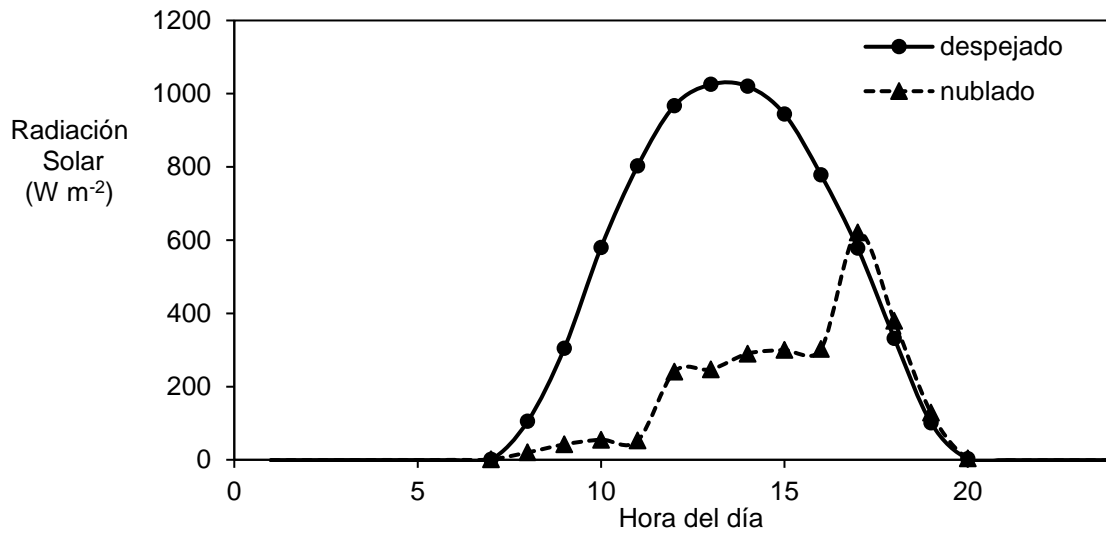


Figura 11. Ejemplo de la radiación solar en un día despejado (●) y nublado (▲).

La gráfica que se tomará de referencia para la temporada de sequía será la forma de un “día despejado” y para la temporada de lluvias la referencia podrá ser como la gráfica de un “día nublado”, que, considerando los registros realizados y tomados en cuenta, todos los días de la temporada de lluvias fueron nublados.

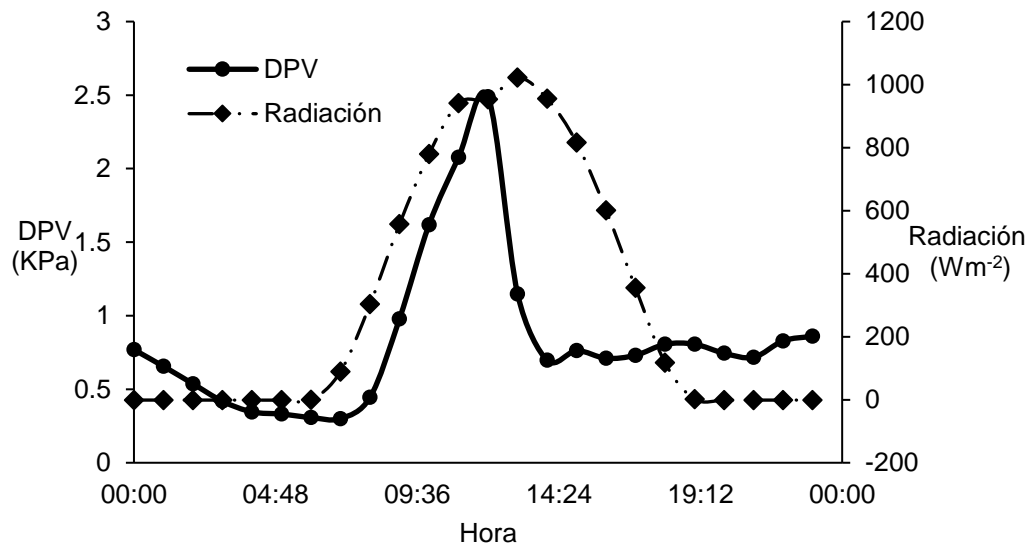


Figura 12. Ejemplo de un día despejado y con una DPV normal (30 de marzo del 2019)

En la figura 13 se presenta a manera de ejemplo un ciclo de uno de los individuos de 10 días.

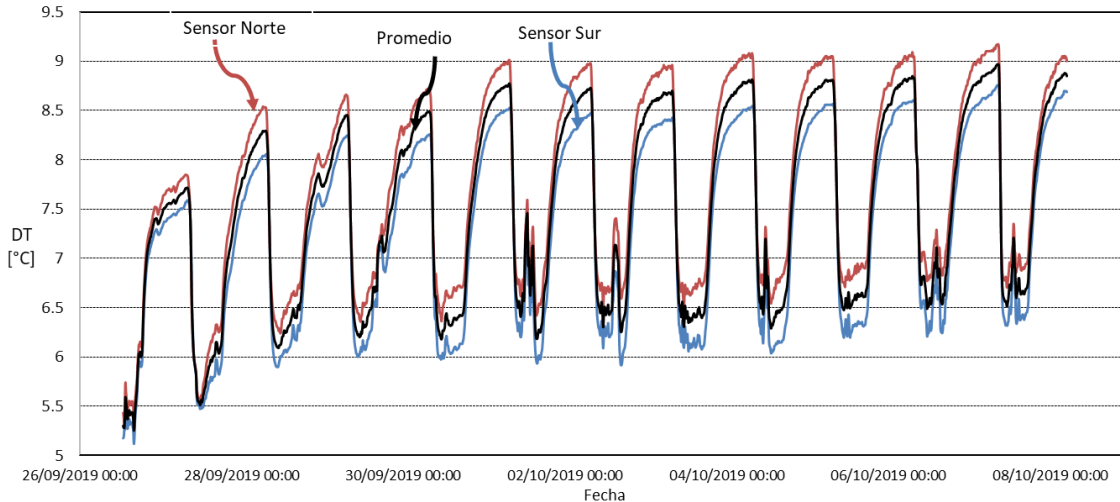


Figura 13. Ejemplo del promedio de los sensores con dirección Norte y Sur.

Después de la depuración, se calculó una diferencia de temperatura máxima de todos los días seleccionados por individuo. Este es el valor que se utilizara para ir calculando la velocidad de flujo de savia (Fd) para cada 10 minutos de medición. Se comprobó que este valor se alcanzaba en la madrugada, cuando el DPV era entre 0 y 0.4 KPa.

El valor de área conductora (albura conductora) se incorpora al cálculo al multiplicar la velocidad de flujo de savia para obtener un valor de volumen por tiempo ($m^3 h^{-1}$) que se puede convertir a $L h^{-1}$. Como estos valores son los promedios de cada 10 min, se multiplicaron para obtener la fracción de litros que se está moviendo por hora, para finalmente obtener un valor de L o $kg día^{-1}$.

Los valores de IAF se proponían utilizar para obtener la transpiración a nivel dosel; sin embargo, no se encontró ninguna relación con la cual se pudiera extrapolar al conglomerado y se decidió utilizar la relación que se encontró de transpiración a nivel basal, $kg día^{-1}$ y DAP. Se utiliza la media muestral y la desviación estándar de la media para representar todos los valores en los cálculos.

7.4. Contenido volumétrico de agua

Se utilizó un reflectómetro para contenido volumétrico de agua en suelo marca Campbell Scientific (Figura 14). Las mediciones fueron realizadas en ambas temporadas en paralelo con las mediciones de flujo de savia. Por lo que se cuenta con datos que representan los mismos ciclos. Se obtienen valores promedio por temporada del total de registros que se obtuvieron. El contenido volumétrico de agua es un porcentaje que representa el volumen de agua que hay en un volumen de suelo (cm^3 de agua/ cm^3 de suelo).

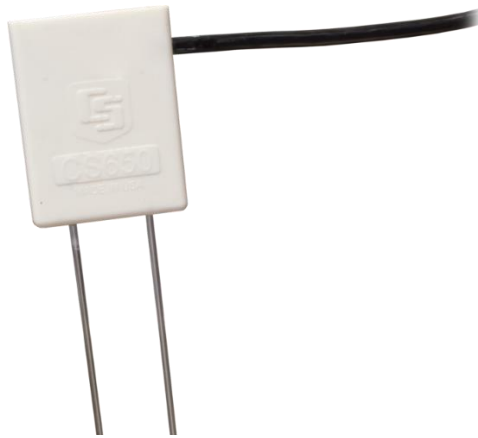


Figura 14. Reflectómetro para la medición de contenido volumétrico de agua.

Una forma práctica de visualizar el contenido volumétrico de agua (CVA) es expresarlo con unidades de lámina de agua (mm), para conocerla solo se necesita del espesor o lamina de uno de los componentes en este caso del espesor del suelo. Es decir, la profundidad a la que colocamos los sensores, en este caso fueron 5cm. Con lo cual podemos estimar un valor de lámina de agua que está presente en el suelo en cada temporada.

$$\text{lamina de agua} = \text{espesor de suelo}(\text{mm}) \times \frac{\%CVA}{100} \quad (\text{Ecuación 18})$$

7.5. Contribución ecológica al ciclo hidrológico

Se calculará la contribución ecológica - biológica de la transpiración a los flujos hidrológicos mediante la ecuación:

$$\frac{\text{Transpiración de las plantas}}{\text{Evapotranspiración total del sistema}} \times 100 = \% \text{Transpiración} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Como una medida de las dinámicas ecológicas e hidrológicas. Con esta relación se asume que T/ET vincula el equilibrio hídrico a los procesos de las plantas en una unidad de paisaje.

La evapotranspiración total del sistema empleada es la reportada por Uuh-Sonda y colaboradores (2018), se utiliza esta para los fines de la aproximación.

8. Resultados

8.1. Medición de la transpiración por el método de disipación térmica

Se midieron 11 especies en dos temporadas. En la Tabla 1 se resume la cantidad de individuos donde se instalaron sensores térmicos tipo Granier, el símbolo que se utilizara para abreviar cada especie y su IVI al 300%.

Tabla 1. Especies y número de individuos estudiados. El símbolo representa la abreviatura de las primeras letras del género y la especie.

Especie	Símbolo	No. Individuos	IVI al 300%
<i>Caesalpinia sp.</i>	Csp	1	-
<i>Bursera simaruba</i>	Bs	6	49.62
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Ll	5	35.41
<i>Gymnopodium floribundum</i>	Gf	6	25.4
<i>Caesalpinia gaumeri</i>	Cg	4	22.98
<i>Havardia albicans</i>	Ha	2	15.33
<i>Neea chorophylla*</i>	Nc	3	11.96
<i>Piscidia piscipula</i>	Pp	2	10.12
<i>Cordia gerascanthus</i>	Cog	2	9.38
<i>Plumeria obtusa</i>	Po	4	7.49
<i>Erytroxylum rotundifolium</i>	Er	2	5.17
<i>Total</i>		37	192.86

*Se midió un individuo de la familia Nyctaginaceae, *Neea chorophylla* sin embargo al no estar representada en el inventario se decidió utilizar el IVI reportado para la especie de la familia que si estaba contemplada en el inventario el de *Neea psychotrioides*.

En lluvias, el DPV presenta oscilaciones con los cambios en la radiación es decir si aumenta la radiación, o hay un pico de radiación, el DPV aumenta. Finalmente, la radiación y el DPV comparten valores máximos a las mismas horas en la mayoría de los días registrados. En la temporada de lluvias, la mayoría de los días de medición no alcanzaban el máximo de radiación de $1\ 000\ \text{Wm}^{-2}$; la condición para seleccionar el día según el comportamiento del DPV fue que presentara un aumento y disminución por lo menos de una décima de kPa pues dependiendo de la temperatura y la humedad relativa a la que estuviera el aire, este valor sería menor en la madrugada cuando desciende la

temperatura y no existe una necesidad en el ambiente de agua o viceversa cuando aumenta la temperatura en el aire. Esto se cumple al ver que en la madrugada la transpiración es, en la mayoría de los casos, despreciable. La oscilación de esta décima de kPa o 100 Pa significa que el DPV disminuye si la temperatura en el aire disminuye, disminuyendo así la transpiración. En la Figura 15 y 16 se muestra el comportamiento del cambio que hay en la humedad relativa y el DPV durante los dos periodos correspondientes a cada temporada, como un indicador de que tan seco se encontraba el ambiente. Se tomo en cuenta este parámetro meteorológico pues la intensidad de transpiración depende de la diferencia de presión de vapor de agua entre el interior de las hojas y la atmósfera. Mientras mayor sea el gradiente, la transpiración será mayor. Una hoja que se calienta con la radiación solar puede transpirar aun cuando en el aire la humedad relativa sea del 100%, aumentando el DPV. En el caso del número de datos fue diferente para cada temporada debido a que, en la temporada de lluvias, logísticamente, fue posible tener mejor calidad en registros de diferencias de temperatura de los sensores.

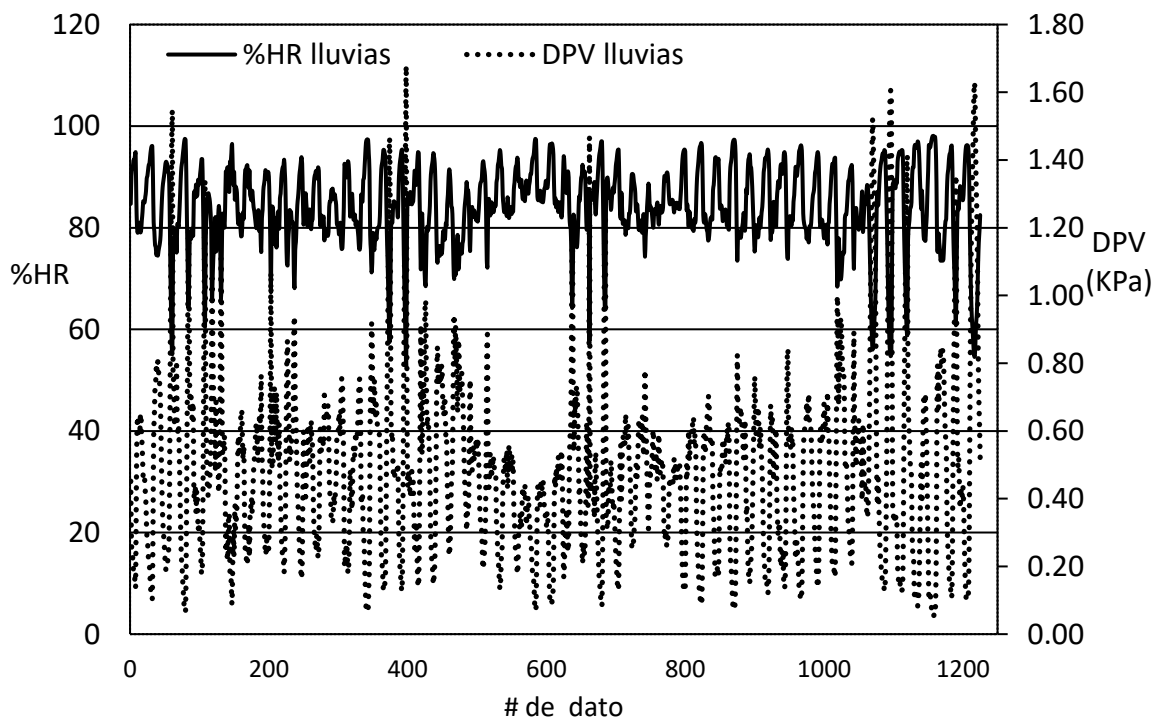


Figura 15. Representación gráfica entre el %HR y el DPV para la temporada de lluvias.

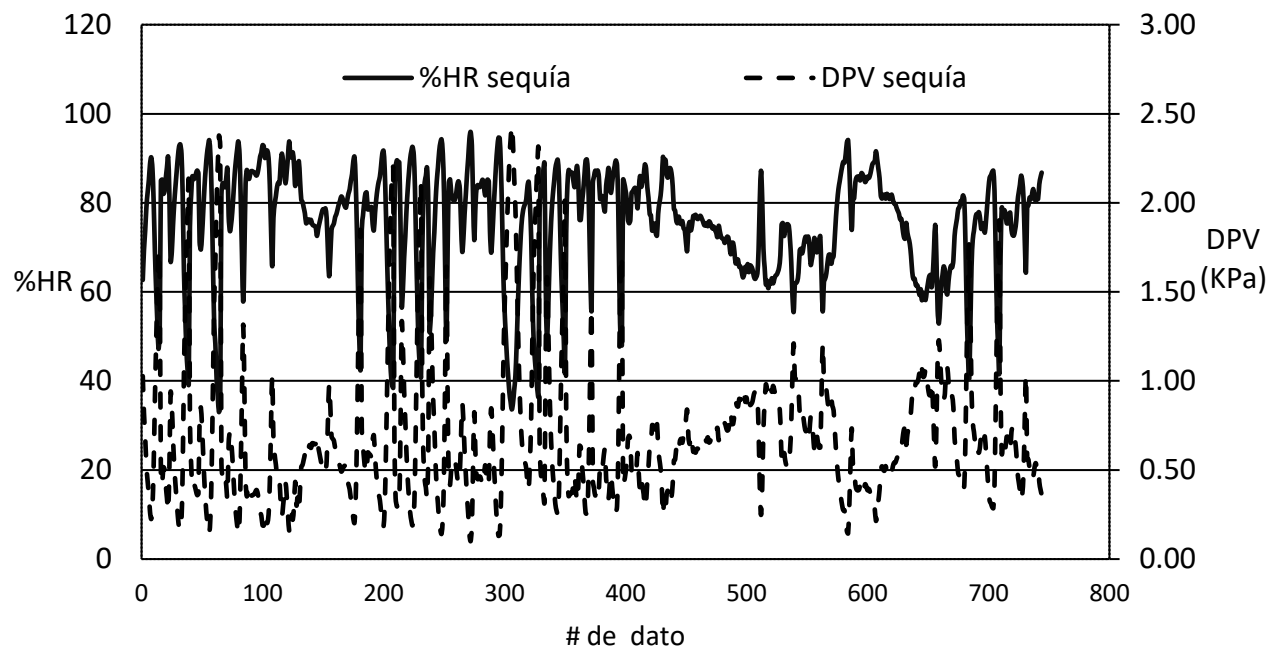


Figura 16. Representación gráfica entre el %HR y el DPV para la temporada de sequía.

En la figura 17 se demuestra la dependencia directa que existe entre el DPV y la temperatura cuando esta disminuye o aumenta.

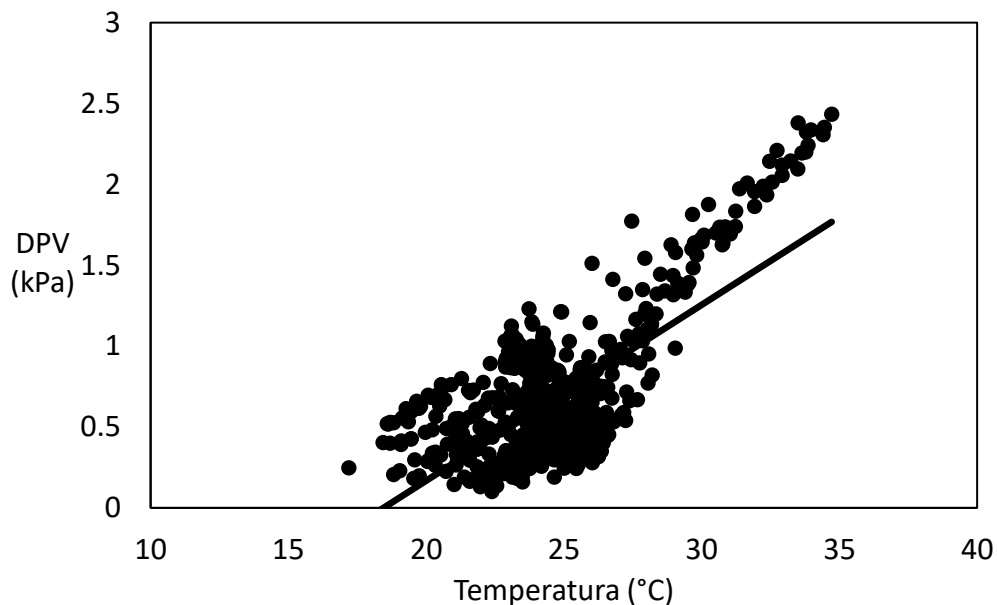


Figura 17. Relación entre el DPV y la temperatura para la temporada de lluvias.

Un porcentaje de humedad bajo está asociado a un aumento en el DPV. El DPV representa la diferencia entre la presión de saturación (a una temperatura y %HR) y la presión real de vapor. Es un indicador preciso de la capacidad real evaporativa del aire; es decir, el poder energético que tiene el aire para evaporar las superficies que tengan agua o que tan seco está el ambiente; a mayor DPV el ambiente está más seco.

En la época de lluvias se observó que el flujo de savia máximo podía completarse en dos momentos durante el día; en la temporada de lluvias precipita durante el día y durante la noche, sin embargo, durante el día se puede observar el comportamiento de aumento, disminución y aumento de flujo de savia en el periodo de las 11 de la mañana a las 3 de la tarde. Esto lo atribuimos a que, al haber precipitación, el DPV disminuía, pues el que influye en el proceso de transpiración. Esto se puede observar en la figura 18 que muestra la secuencia de flujo de savia a nivel basal de dos individuos de diferente especie.

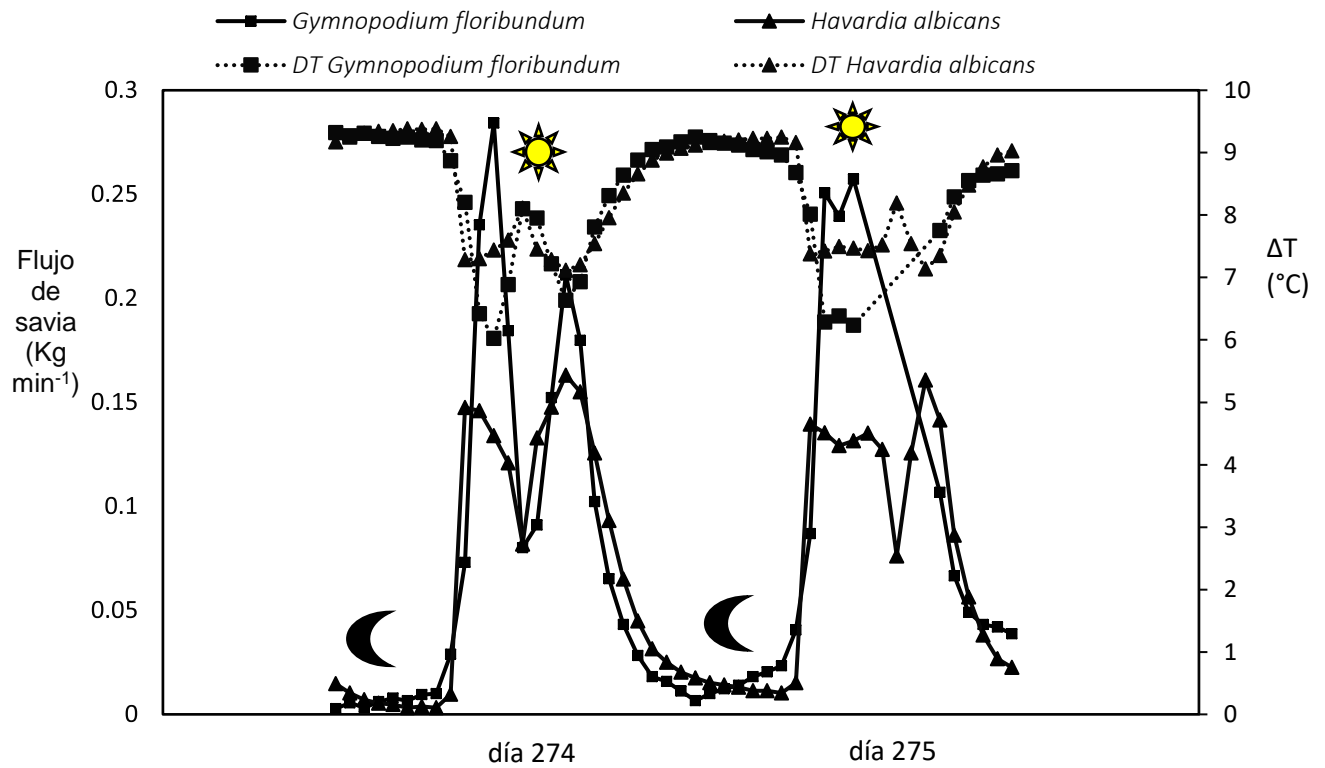


Figura 18. Ejemplo del comportamiento en lluvias. Dos máximos de flujo de savia. Días julianos.

Para la temporada de sequía, la relación sugiere baja cantidad de agua en el aire (menor %HR) y el aumento en el DPV en el aire. Se ejemplifica esta diferencia con un individuo de *Caesalpinia gaumeri* en las dos temporadas de medición (Figura 19, los días representados para cada temporada: día 1, 8 abril 2019 para sequía, 15 octubre 2019 para lluvias; día 2, 10 abril 2019 sequía y 16 octubre 2019 lluvias).

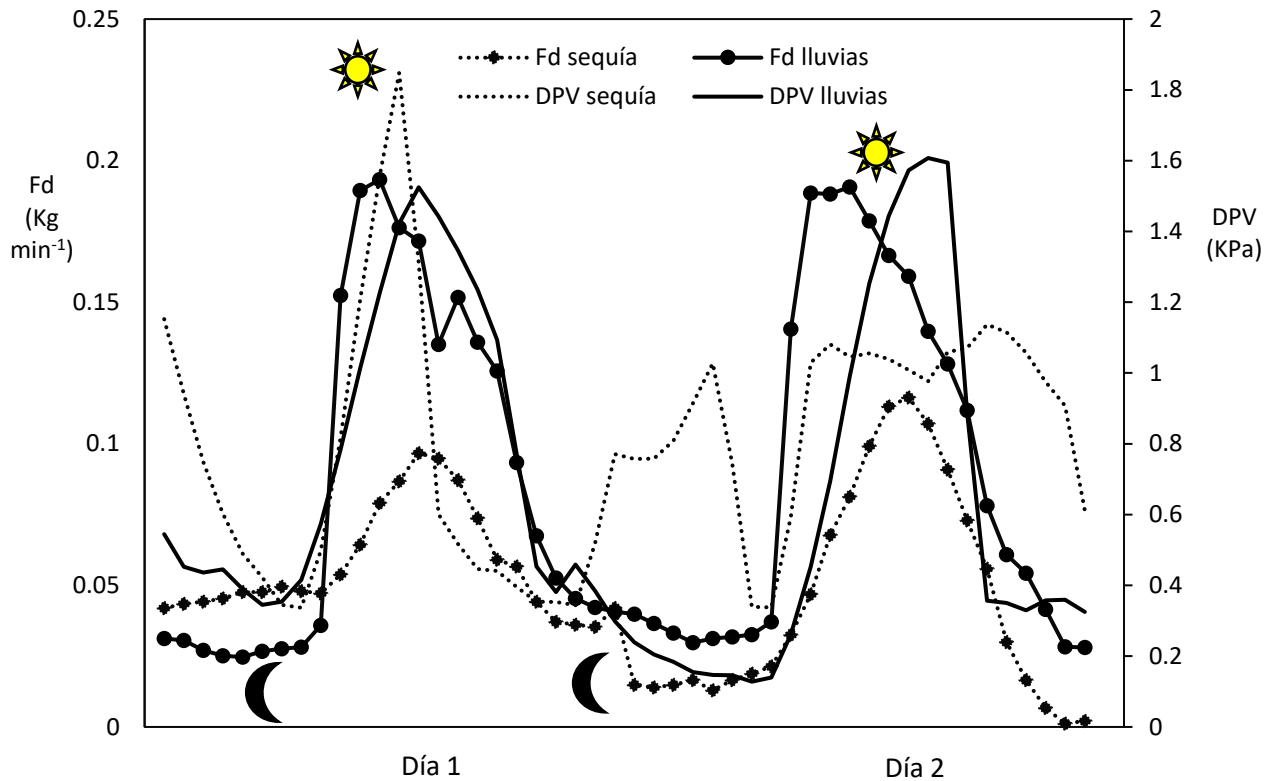


Figura 19. Dispersión de dos días de datos de *Caesalpinia gaumeri* después de haber seleccionado los días que coincidían con un DPV y radiaciones normales. Fd, flujo de savia en kg min^{-1} .

Considerado que la savia es una mezcla de agua, nutrientes y minerales que fluye de manera ascendente, de las raíces a las hojas, la densidad que se toma para hacer la conversión a unidades de masa es la del agua (1 kg m^{-3}).

En el caso de los individuos a los que se les colocaron dos sensores se trabajó con el promedio de ambos. Es decir; el promedio de la suma de los promedios de Fd para una hora del día.

$$\overline{F_d} = \frac{F_{d \text{ cable } a} + F_{d \text{ cable } b}}{2} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Con el promedio de las diferencias de temperaturas de los dos sensores, se obtuvo ΔT máxima y se calculó la velocidad de flujo de savia. De la menor diferencia de temperatura se obtiene el flujo de savia mayor, relacionado también a la pérdida de agua, mayor transpiración. Cada individuo fue estudiado individualmente para la selección de los días que servirían para calcular un promedio de flujo de savia por día, si tomamos el individuo de la gráfica anterior el flujo de savia del día 1 sería la suma todos los kg/min de ese día y luego del día 2, el resultado de cada uno se promedió para sacar un valor de kg/día de ese individuo de esa temporada (Tabla 2). La figura 20 muestra la comparación de la transpiración basal promedio y sus desviaciones estándar en especies representativas de la selva baja de la Reserva Estatal El Palmar. La especie *Piscidia piscipula* solo fue posible medirla en la temporada de lluvias por cuestión de logística.

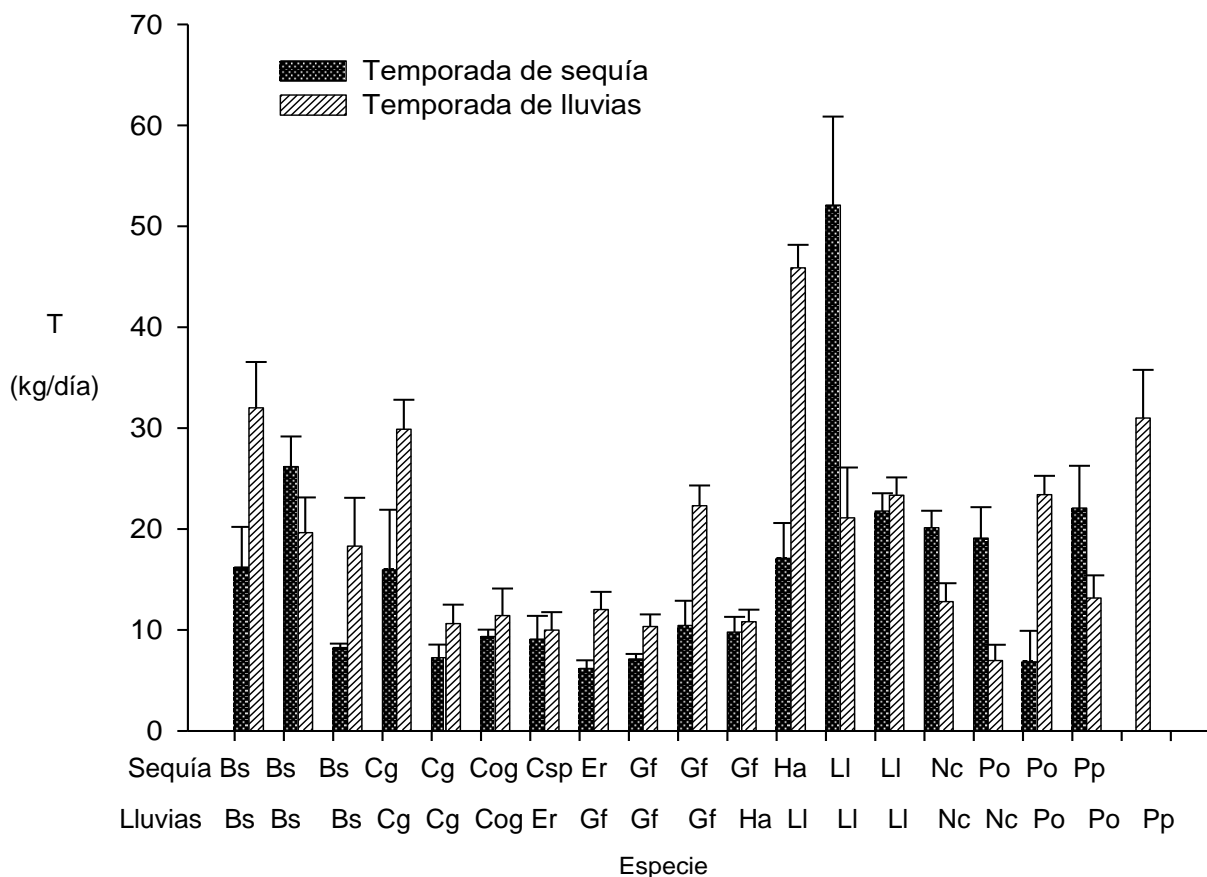


Figura 20. Transpiración (kg/día) de cada individuo medido.

Tabla 2. Resultados finales de flujo de savia.

Temporada	Símbolo	AC (cm ²)	DAP (cm)	AB (m ²)	Media (kg/día)	d.e	n	CV %
Sequia	LI	232	38.20	0.11	52.09	8.8	3	16.85
Sequia	LI	81	28.01	0.06	21.78	1.8	4	8.12
Sequia	Ha	70	21.33	0.04	17.14	3.5	9	20.21
Sequia	Pp	147	20.37	0.03	22.08	4.2	2	18.96
Sequia	Cg	72	19.74	0.03	15.94	6.0	5	37.45
Sequia	Bs	123	16.87	0.02	16.22	4.0	5	24.59
Sequia	Bs	181	16.55	0.02	26.19	3.0	5	11.39
Sequia	Po	151	15.60	0.02	19.11	3.1	3	16.04
Sequia	Gf	146	14.64	0.02	7.13	0.5	4	7.11
Sequia	Bs	116	14.64	0.02	8.26	0.4	4	4.83
Sequia	Cog	54	14.32	0.02	9.35	0.7	8	7.30
Sequia	Cg	49	13.37	0.01	7.26	1.3	2	17.73
Sequia	Er	58	12.10	0.01	6.19	0.8	2	13.13
Sequia	Nc	78	10.82	0.01	20.13	1.7	5	8.30
Sequia	Po	72	10.82	0.01	6.85	3.1	6	44.91
Sequia	Gf	72	10.50	0.01	10.45	2.4	5	23.44
Sequia	Csp	37	9.55	0.01	9.14	2.3	4	25.65
Sequia	Gf	57	8.59	0.01	9.79	1.5	3	15.44
Lluvias	Bs	181	17.51	0.02	32.01	4.5	5	14.21
Lluvias	LI	232	39.15	0.12	45.88	2.3	3	4.99
Lluvias	Cg	72	20.69	0.03	29.88	2.9	3	9.81
Lluvias	Cog	54	14.32	0.02	11.43	2.7	5	23.41
Lluvias	Nc	78	11.46	0.01	12.81	1.8	4	14.24
Lluvias	Po	151	15.92	0.02	23.40	1.9	2	8.00
Lluvias	Po	72	10.82	0.01	13.17	2.2	11	17.07
Lluvias	Gf	72	11.46	0.01	12.03	1.8	11	14.64
Lluvias	Ha	70	21.96	0.04	10.82	1.2	8	11.38
Lluvias	Bs	123	15.92	0.02	19.65	3.5	7	17.78
Lluvias	Gf	57	9.87	0.01	10.34	1.2	10	11.60
Lluvias	LI	98	23.87	0.04	21.11	5.0	11	23.65
Lluvias	Gf	146	14.96	0.02	22.31	2.0	10	8.98
Lluvias	LI	81	28.01	0.06	23.34	1.8	10	7.56
Lluvias	Bs	116	14.96	0.02	18.31	4.8	9	26.14
Lluvias	Nc	46	8.82	0.01	6.97	1.6	8	22.52
Lluvias	Pp	147	21.17	0.04	30.99	4.8	5	15.41
Lluvias	Cg	49	14.01	0.02	10.63	1.9	6	17.70
Lluvias	Er	58	12.41	0.01	9.99	1.8	8	17.88

AC área de la albura conductora, *DAP* diámetro a la altura de pecho, *AB* área basal, *media* de transpiración en kg/día. *d.e.* desviación estándar.

8.2. Índice de Área Foliar (IAF)

Para la temporada de sequía se utiliza un dato para caracterizar el área foliar y en lluvias se utilizan IAF's para cada parcela estudiada, por las diferencias en los doseles. El IAF representa los metros cuadrados de dosel por metro cuadrado de suelo Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los índices de área foliar por temporada.

Temporada	Parcela	IAF promedio	Desviación Estándar
Sequía	Todas	1	0.68
Lluvias	1	4.96	0.99
Lluvias	2	1.68	0.68
Lluvias	3	2.99	0.49

Se pretendía utilizar los valores de IAF para obtener una transpiración a nivel dosel, pero debido a que no se encontró una relación positiva (Figura 21), pues la ecuación de regresión lineal tuvo una pendiente negativa, resultado ilógico pensar que a mayor diámetro del tronco la transpiración sería menor, por lo que para hacer la extrapolación a todo el conglomerado en estudio se decidió utilizar el valor de transpiración a nivel basal (kg/día) y proporcionar como referencia un IAF promedio, la cobertura del individuo, su altura, DAP y área basal.

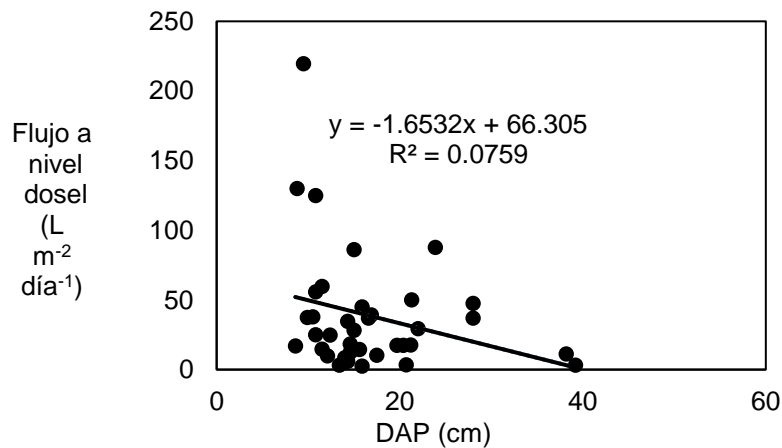


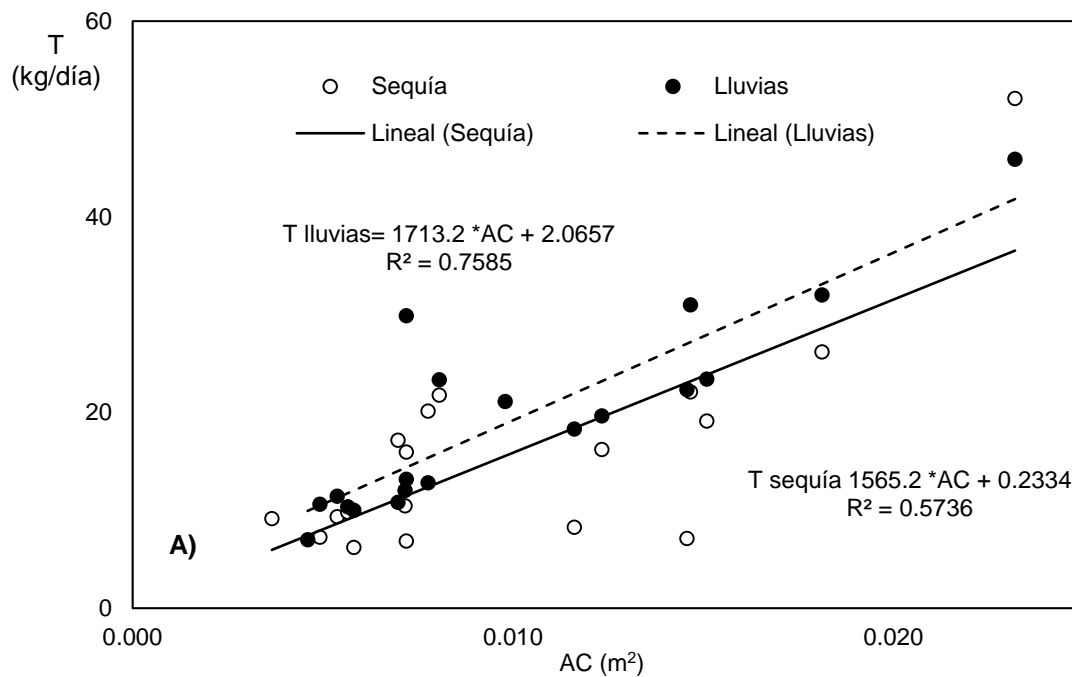
Figura 21. Flujo de savia a nivel dosel vs DAP.

8.3. Transpiración en la Selva baja caducifolia del Palmar.

Para realizar la estimación de la transpiración de la selva baja caducifolia de el Palmar, se evaluaron tres aproximaciones usando la información del método directo de flujo de savia.

8.3.1 Ecuaciones empíricas

En primer lugar, se usaron ecuaciones empíricas mediante regresiones con los individuos instrumentados con sensores de dispersión térmica. Se investigaron dispersiones que relacionaran la transpiración por algún agrupamiento. El agrupamiento por familias (Leguminosas vs no leguminosas) no tuvo buena correlación, por lo cual se exploraron relaciones con la albura conductora, área basal y DAP (Figura 22).



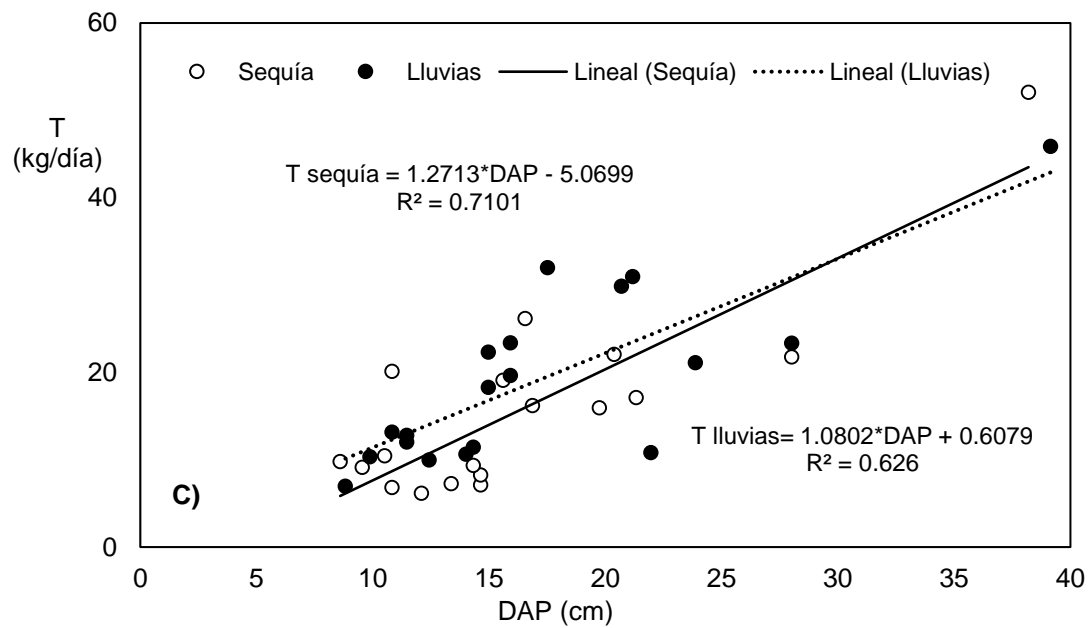
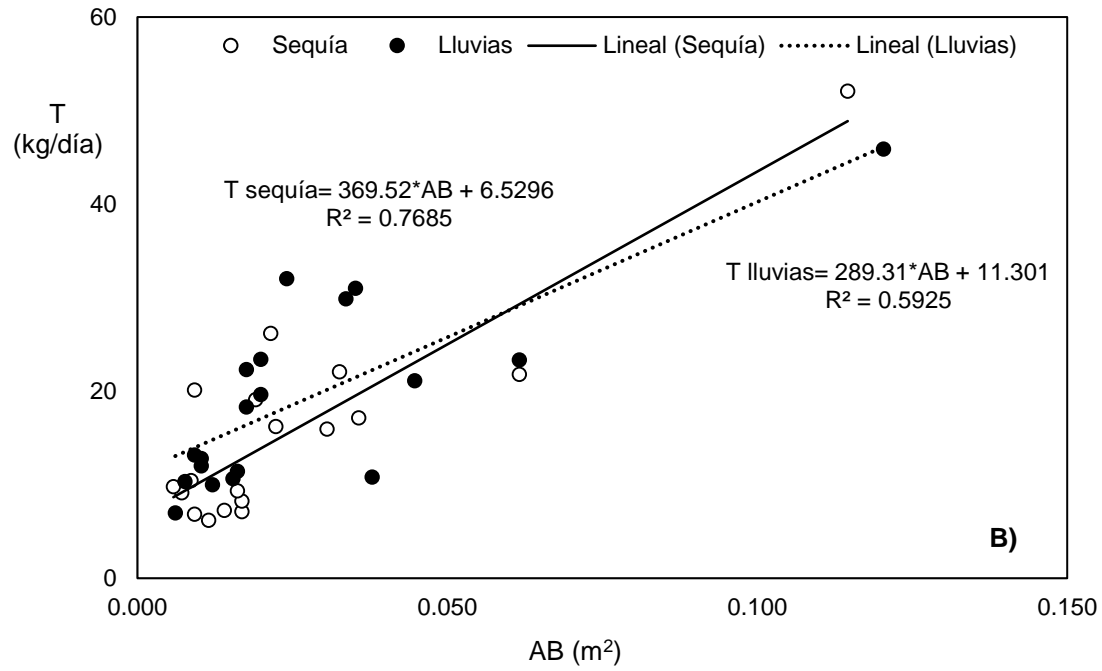


Figura 22. Dispersión de la transpiración (kg /día) con la albura conductora (A), área basal (superior B) y DAP (C) para organismos medidos en la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar, Yucatán.

Si bien, las regresiones con la albura conductora pueden estimar el volumen de agua transferido por el tronco, su uso sería limitado de forma práctica pues requiere primero la tinción de la madera, dejar pasar dos o tres horas, la obtención de núcleos en campo y su posterior medición, lo cual lo hace poco práctico. El área basal se estima a partir del DAP, y este último es la medición más sencilla de realizar estando en campo, la albura conductora depende de las características de la madera y de su xilema activo, la cual ya ha sido estudiada en otros trabajos; el fin de este trabajo se centra en proponer una forma accesible de estimar la transpiración en campo por el tipo de vegetación considerando solamente una variable alométrica común en estudios forestales y ecohidrológicos. Es por esto que se insiste en el uso del DAP para establecer una ecuación alométrica para la estimación de transpiración en la selva baja caducifolia.

A continuación, se realizó una comparación de pendientes de las regresiones lineales de la temporada de sequía y de lluvias (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de pendientes de las dispersiones de T vs DAP ambas temporadas.

	Sequía	Lluvias
N	18	19
b	1.27	1.08
e.e _{y,x}	6.1	6.33
d.s. x	6.47	8.76
S _b	0.23	0.17
$\sqrt{(Sb1 - Sb2)^2}$		0.29
t-Student		0.67
g.l.		35
α		0.05
p		0.31
t _{crit}		2.03

b: pendiente, e.e: error estándar, d.s: desviación estándar, Sb: error estándar de la pendiente, g.l: grados de libertad, p: probabilidad; t_{crit}: valor crítico de t de Student.

Considerando los DAP's como variable independiente (figura 22 C) el resultado de dicha comparación es que las pendientes de ambas regresiones no son diferentes (t=0.67, p=0.31) y por lo tanto se decide emplear una regresión lineal que incluyan todas las

mediciones de ambas temporadas para estimar la transpiración del conglomerado como representante de la selva baja de el Palmar (Figura 23).

$$T \text{ (kg/día)} = 1.1814 \times \text{DAP} \text{ (cm)} - 2.3297 \quad \text{(Ecuación 21)}$$

La ecuación 21 es sugerida para usarse en la estimación de la transpiración únicamente midiendo el DAP de los árboles y sustituyendo el valor del DAP (en cm) en la ecuación. Esta relación será válida para conglomerados que tengan una dispersión de datos similar. Donde la composición de especies sea de una selva baja caducifolia.

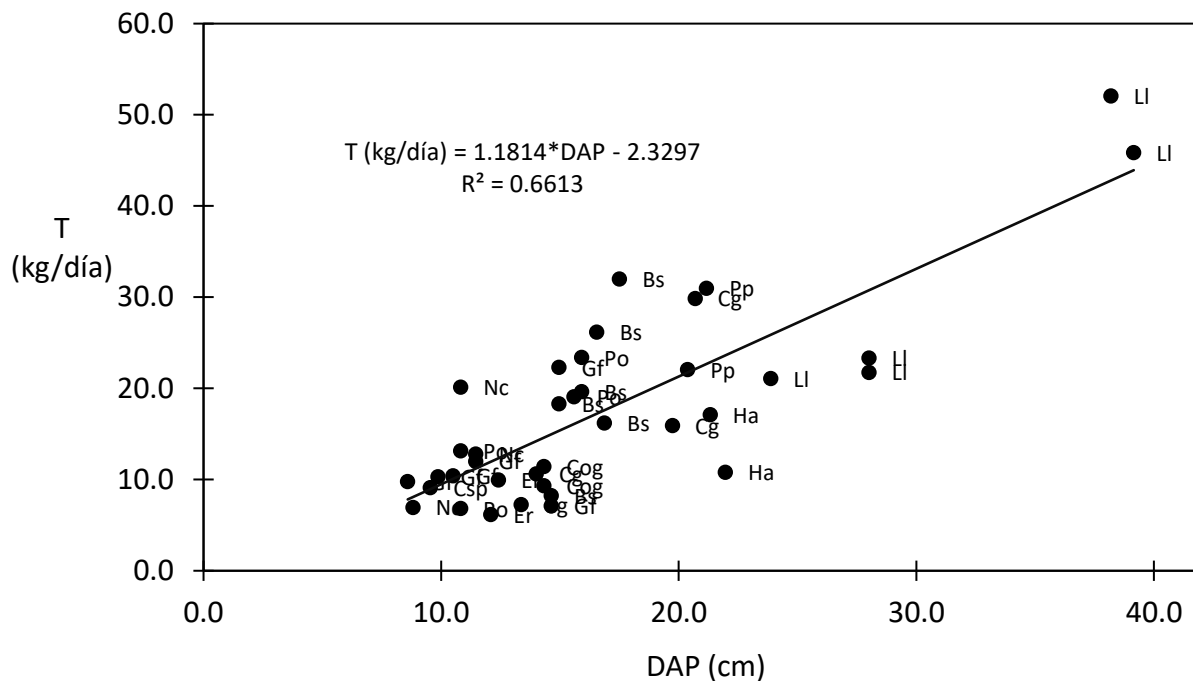


Figura 23. Ecuación alométrica de la transpiración (kg /día) con el DAP para organismos medidos en temporadas de lluvias y sequía en la selva baja caducifolia del Palmar, Yucatán.

Se considera que el ajuste de la ecuación es representativo de la selva baja caducifolia del Palmar, en primer lugar por las otras correlaciones que se han encontrado en otros trabajos, como el de Bucci (2008) en el que relaciona el flujo de savia con el AB y en

donde su r^2 fue igual a 0.62; en segundo lugar utilizando porque el conglomerado del inventario considera una metodología aceptada para estudios forestales y por el tipo de índice que se determinó, IVI al 300%, que considera abundancia, frecuencia y dominancia. El cual fue utilizado para calcular el IVI de 215 individuos sobre los cuales se realiza la aproximación y se cuenta con los datos de DAP's de cada uno de los individuos, es posible utilizarlos pues el criterio es que los DAP's son mayores a 5cm y el DAP máximo de los 215 individuos es 36cm, las mediciones realizadas de disipación térmica (37 individuos) tienen entre 5 y 38 cm de DAP. Al hacer uso de la ecuación alométrica el resultado es de 2,390.59 kg de agua día⁻¹ y si dividimos entre la superficie del conglomerado, 2 200m² nos da el resultado en mm día⁻¹, 1.09 mm día⁻¹, que es lo mismo que 3'978,500 kg de agua ha⁻¹año⁻¹.

8.3.2 Categorías de diámetros a la altura del pecho

La segunda aproximación a la estimación de la transpiración fue mediante el establecimiento de rangos de diámetros a la altura del pecho (DAP). Se crearon tres rangos de DAP considerando los individuos estudiados y que abarcaran los DAP de todos los individuos del conglomerado del inventario de referencia de la Reserva Estatal el Palmar, cuyas medidas no superan los 36 cm. De acuerdo a las dispersiones arriba exploradas, se establecieron tres categorías: 8.6 a 18.8 cm, 18.9 a 29 y >29 cm. La selección de rangos se basa en la experiencia y en la literatura manejada por Lu, Meinzer, Bucci, Andrade y otros investigadores que crearon rangos de DAP para sus estudios de fisiología vegetal enfocada a la transpiración.

Se realizaron pruebas t-Student para comparar la variación entre temporadas para cada categoría de DAP y se observó que en ningún caso hay diferencias entre las mediciones de transpiración (kg día⁻¹) entre lluvias y sequías (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba t-Student ($\alpha=0.05$) de comparación entre temporadas para cada categoría de DAP.

Categoría DAP (cm)	<i>t</i>	<i>p</i>
8.6 - 18.8	1.461	0.169
18.9 - 29	0.591	0.59
>29	-2.59	0.122

Al no haber diferencias entre temporadas para cada rango de DAP, se realizó una prueba de ANOVA con análisis pos hoc Tukey HSD para saber si entre rangos existían diferencias. Se obtuvo que las categorías de DAP de 8.6 a 18.8 y 18.8 a 29 cm no son diferentes (Tukey HSD, $p=0.375$). Solo la categoría >29 cm de DAP es diferente. Se podría usar un solo valor de transpiración para las primeras dos categorías, pero se decidió mantener la propuesta de usar el promedio de transpiración para cada una de las tres categorías para tener más rangos de DAP que puedan ser utilizados en un futuro para una mejor aproximación (Tabla 6).

Tabla 6. Valor de transpiración promedio por rango de DAP.

DAP (cm)	Transpiración promedio (kg/día)	d.e.
8.6 a 18.8	13.81	2.56
18.9 a 29	21.23	2.82
>29	48.98	4.40

*d.e. desviación estándar

Para estimar la transpiración del conglomerado mediante este método, se tuvo que crear una nueva categoría de DAP, ya que existían 86 individuos que tenían un rango de DAP entre 5 y 8.5 cm. Se utilizó la ecuación 21 para obtener las transpiraciones asociadas a DAP's en este rango y se obtuvo un valor promedio del rango (Tabla 7). La razón por la cual no se tienen datos experimentales en este rango de DAP es porque uno de los criterios para la selección de los individuos fue que tuvieran DAP mayor a 5 cm (los sensores tienen un largo de 3 cm).

En la Tabla 7 se muestran los datos empleados para llegar al resultado de transpiración por día del conglomerado. La aproximación de transpiración en el conglomerado de 2200

m² es de 2,523.06 kg de agua por día; es decir, 1.15 kg agua m⁻² d⁻¹, o 1.15 mm día⁻¹, 4'197,500 kg de agua ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 7. Transpiración promedio para escalamiento por rango de DAP.

DAP (cm)	T _{promedio} (kg/día)	d.e	Individuos en el conglomerado	T _{Conglomerado} (kg/día)
5 a 8.5	5.64	1.45	86	485.449
8.6 a 18.8	13.81	2.56	102	1408.82
18.9 a 29	21.23	2.82	25	530.829
>29	48.98	4.40	2	97.964
		Total	215	2523.06

8.3.3 Estimación de Bucci

La tercera aproximación es usando la fórmula de Bucci. Considerando un valor de transpiración promedio de ambas temporadas, para obtener la representación de la transpiración en un año:

$$\text{Transpiración} \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right) = \frac{T \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)}{AB_i} * \frac{\sum AB_{CN}}{A_{CN}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

$T \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$ es el valor promedio de la transpiración de todos los individuos medidos = 17.57 $\frac{\text{kg}}{\text{día}}$

AB_i es el promedio de área basal de los árboles que se midieron con el método de disipación térmica = 0.03 m²

$\sum AB_{CN}$ es la suma de las áreas basales del conglomerado = 2.75 m²,

A_{CN} = área del conglomerado = 2200 m²

El resultado después de sustituir los valores en la ecuación es 0.84 mm día⁻¹, 0.84 kg de agua m⁻² día⁻¹ o 3'066,000 kg ha⁻¹ año⁻¹.

En el siguiente cuadro se presentan los datos de T si se tomaran los valores promedio para cada temporada y se compararan con el promedio de ambas utilizando la ecuación 22, tabla 8.

Tabla 8. Resumen estimación Bucci.

Temporada	Ambas	Sequía	Lluvias
T (mm/día) solo individuos medidos	17.57	15.83	19.21
T (mm/día) nivel conglomerado	0.84	0.83	0.88

La estimación de la transpiración a nivel conglomerado o a nivel de paisaje mediante los tres métodos presentados se representa gráficamente en la figura 24.

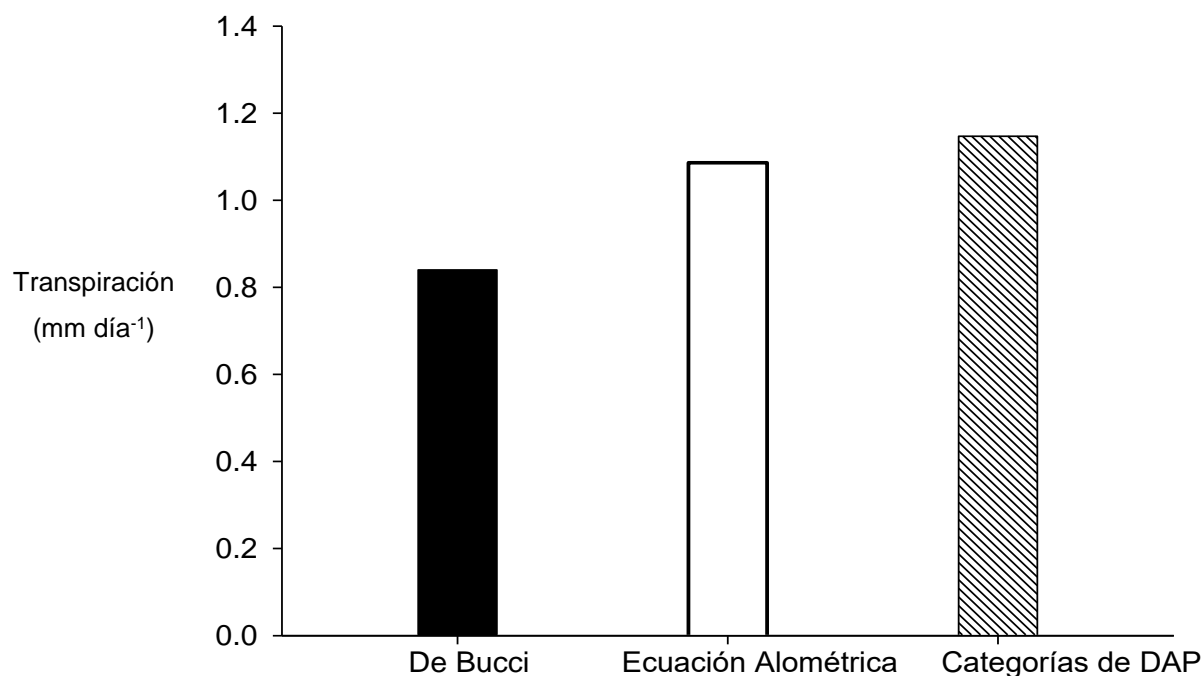


Figura 24. Resumen de las tres formas de escalamiento de la transpiración a nivel conglomerado.

Entonces el valor de transpiración asociado a la selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar esta entre 0.84 y 1.15 mm día⁻¹.

8.4. Contenido volumétrico de agua

Se calculó la media de las mediciones del contenido volumétrico de agua (CVA) para cada temporada con sus respectivos parámetros estadísticos. Con el valor promedio

podemos estimar la lámina de agua que está presente en el suelo en cada temporada. El espesor del suelo equivale a la profundidad a la que fueron instalados los sensores, 5cm.

$$\text{lamina de agua} = \text{espesor de suelo}(\text{mm}) \times \frac{\%CVA}{100} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Dado que los valores en la tabla 9, están en mm y se considera un espesor de suelo muy delgado, a la impresión de que siempre hay agua en la reserva, lo cual podría justificar que las aproximaciones de transpiración en ambas temporadas sean similares.

Tabla 9. Contenido volumétrico de agua.

Temporada	Lámina de agua (mm)	CVA %	Desviación estándar	Varianza	No. datos	IC al 95%
Sequía	2.18	4.36	0.33	0.11	1231	0.02
Lluvias	4.84	9.69	2.65	7.03	1003	0.16

*Intervalo de confianza (IC)

8.5. Contribución T/ET

De acuerdo a Uuh-Sonda y colaboradores (2018), se reportan dos valores de ET utilizando imágenes espaciales del satélite MOD16A2 para la región de la Reserva Estatal El Palmar. El valor que se utiliza de referencia de ET es de 3.32 ± 0.62 mm día⁻¹. Evaluando la contribución de la transpiración promedio estimada de los resultados obtenidos en esta investigación (utilizando las 3 formas de estimación) se obtiene la contribución de la ecológica en la Reserva Estatal El Palmar a la evapotranspiración calculada es de entre 25 y 35%, tabla 10.

Tabla 10. Contribución de la transpiración a la evapotranspiración en la selva baja caducifolia en la Reserva Estatal El Palmar, Yucatán.

ET* (mm día ⁻¹)	3.32±0.62			
	Ecuación alométrica	Categorías de DAP	Estimación de Bucci	Promedio de los tres métodos
T (mm día ⁻¹)	1.09	1.15	0.84	1.02 d.e. 0.16
% contribución a la ET	25.2%	32.7%	34.5%	30.8%

*Referencia de ET de acuerdo a Uuh-Sonda y colaboradores (2018).

9. Discusión

Wullschleger y King (2000) mencionan que la extrapolación de la transpiración a nivel parcela requiera de mediciones precisas de velocidades de flujo de savia, pero también se requiere tener un inventario de la parcela y de sus características, incluyendo la dominancia de cada especie, el área basal, el área foliar y la albura conductora. Estas características se han utilizado con éxito variable para determinar la transpiración en doseles o como parte de los balances hidrológicos en cuencas con bosques. En esta tesis se cumplen todos los requisitos, por lo cual se convierte en el primer estudio de transpiración dirigido a obtener un valor de transpiración que mejore el balance hidrológico en una unidad de paisaje del estado de Yucatán. Son pocos los estudios que utilizan más de dos características para extrapolar el flujo de savia a nivel parcela o dosel (Wullschleger y King, 2000). Huxman y colaboradores (2005) mencionan que hacen falta trabajos que se enfoquen en el estudio de la evapotranspiración a través del estudio individual de la transpiración y la evaporación, para así comprender la dinámica ecohidrológica de la vegetación. Esta investigación realizó la medición de la transpiración en un tipo de vegetación dominante en la península de Yucatán estudiando los árboles más importantes de la selva baja caducifolia y obteniendo mediciones directas de la transpiración, el componente más olvidado y peor evaluado en un balance hidrológico.

Al definir las temporadas se corroboró lo que menciona Trejo (2005), que a bajas temperaturas y bajas precipitaciones, existe una menor transpiración en los bosques tropicales secos. Según lo obtenido en nuestros resultados, durante la temporada de sequía, caracterizada por menores precipitaciones a 100mm, la transpiración es ligeramente menor en las especies medidas que en la temporada de lluvias, 0.83 y 0.87 mm día⁻¹, por estimación Bucci. Los coeficientes de variación son mayores en la temporada de sequía que en la de lluvias, que coincide con lo reportado por Granier y colaboradores (1996) al comparar varios estudios. Ellos concluyen que los coeficientes de variación en árboles de los bosques tropicales son mayores a los encontrados en bosques de coníferas. La variabilidad en los coeficientes incrementa en las especies que

sufren un adelgazamiento por el estrés hídrico, esto lo podemos corroborar en la temporada de sequía donde se obtuvieron los CV mayores.

La variabilidad en la transpiración es determinada por la disponibilidad de agua en el suelo. Sobre el contenido volumétrico de agua en el suelo de la Reserva Estatal el Palmar muestran que es mayor en lluvias (9.7%) que en sequía (4.4%). Una forma práctica de visualizar el contenido volumétrico de agua es expresarlo con unidades de lámina de agua (mm). El contenido volumétrico del agua representa el volumen de agua que hay en un volumen de suelo (cm^3 de agua/ cm^3 de suelo) y para conocer la lámina de agua se necesita conocer el espesor del suelo. Es decir, a una profundidad aproximada de 5cm, la lámina de agua presente en el suelo en la temporada de lluvias es más gruesa que en la temporada de sequía.

En el trabajo de Andrade y colaboradores (1998) se estudiaron especies de la selva de Panamá, obteniendo resultados entre 46 kg día^{-1} en árboles de 18 m alto y 379 kg día^{-1} en árboles de 35 m de alto. La diferencia se atribuye a las condiciones meteorológicas. Aun cuando pueden tener la misma altura, podemos concluir que el agua que se transfiere a la atmósfera por el proceso de transpiración está determinada por el agua existente en el medio ambiente ya sea como humedad relativa, el contenido volumétrico de agua en el suelo y el diámetro del árbol es más importante que la especie, hecho demostrado en estudios de fisiología vegetal (Bucci et al., 2004; Dawson 1996; Goldstein et al., 1998; Granier et al., 1996).

En investigaciones de Vertessy y colaboradores (1995, 1997) Loustau y colaboradores (1996), Saugier y colaboradores (1997) y Wullschlegel y colaboradores (2000), se utilizan ecuaciones obtenidas de las relaciones alométricas entre el diámetro, la circunferencia o la albura conductora con el flujo de savia con diferentes rangos de diámetros, utilizando un inventario forestal., En esta investigación se midió la transpiración del área en estudio (selva baja caducifolia de la Reserva Estatal el Palmar) y se probaron tres métodos para estimarla. La primera es una extrapolación utilizando una relación empírica con datos de campo de un número razonable de individuos (36), mayor al de otros autores (Bucci et al., 2004; Cochard et al., 2002; Dawson 1996; López-López et al., 2013). La segunda

utilizando un promedio de transpiración correspondiente a categorías del DAP, la cual se considera de mayor facilidad. La tercera es la descrita por Bucci y colaboradores (2008). Las tres formas muestran valores similares, por lo cual se sugiere usar la estimación por categorías de DAP, ya que es una medición sencilla de campo que se puede hacer con facilidad y personas o agencias con poco instrumental pueden realizar.

Bucci y colaboradores (2008) hacen un cálculo de transpiración calculando un promedio del volumen de agua en L día⁻¹, considerando el área basal promedio. Esta aplicación es útil a nivel de parcela de conglomerados con un buen inventario. Sin el área basal precisa y el total de los organismos, esta estimación no logrará su objetivo.

Reyes-García et al. (2012) obtienen valores de transpiración asociados a la selva baja caducifolia de Dzibilchaltún (aproximadamente a 50km del Palmar). Aun cuando el tipo de vegetación es el mismo, en ambos lugares se encontraron diferentes magnitudes para la transpiración asociada, en el caso de Dzibilchaltún para la temporada de sequía se reportó 0.52 mm día⁻¹ y para la temporada de lluvias 2.09 mm día⁻¹.

Para hacer la comparación de este trabajo con el de Reyes usamos la ecuación alométrica de cada temporada; para la de lluvias, $T \left(\frac{kg}{día} \right) = 1.0802xDAP + 0.6079$ $R^2 = 0.626$ (Ecuación 24), y para la temporada de sequía, $T \left(\frac{kg}{día} \right) = 1.2713xDAP - 5.0699$ $R^2 = 0.710$ (Ecuación 25). Obteniendo 0.92 mm día⁻¹ en la temporada de sequía y 2.06 mm día⁻¹ en la temporada de lluvias. Las diferencias entre los valores pueden deberse a que en el trabajo de Reyes-García et al. (2012), las especies deciduas no fueron medidas en la temporada de sequía, por lo que la forma en la que está calculado el valor de Reyes-García (2012) puede estar subestimando la transpiración, o puede ser que los árboles en Dzibilchaltún tienen menor disponibilidad de agua en el suelo en la temporada de sequía. O que las aproximaciones realizadas en este trabajo sobrestimen la transpiración, para corroborar la información valdría la pena realizar otras mediciones en otros conglomerados de la reserva. Finalmente, comparando con lo reportado por Reyes y colaboradores (2012), para la temporada de lluvias se reportó 629,000 kg ha⁻¹ mes⁻¹, para sequía 156, 000 kg ha⁻¹ mes⁻¹, esta investigación arrojó un resultado menor, de 619,240

kg ha⁻¹ mes⁻¹ y 275,656 kg ha⁻¹ mes⁻¹ para la temporada de lluvias y de sequía respectivamente. Consideramos que, para futura referencia o estimación de transpiración por tipo de vegetación, podría utilizarse un promedio del valor reportado por Reyes y colaboradores y este trabajo para la selva baja caducifolia del estado de Yucatán. Las diferencias que existen entre los valores para cada temporada entre el estudio de Reyes y este puede deberse a la misma naturaleza de las selvas bajas caducifolias que de acuerdo a Trejo (2005) estas presentan una composición de especies diferente de lugar a lugar. Es decir, en cada “manchón” de selva baja caducifolia pueden existir especies que no existan en otro lugar cuya vegetación sea tipo selva baja caducifolia. Esta situación representaría un diferente aporte a la transpiración de acuerdo a la diversidad de las especies que se estén considerando en el estudio de la selva baja caducifolia. Inclusive se podría utilizar como límite inferior y superior los valores obtenidos por Reyes y colaboradores.

Continuando con los métodos, la transpiración estimada mediante el método de Bucci es de 0.84 mm día⁻¹. Las unidades mm día⁻¹ son útiles para presentar estos valores en los balances hidrológicos. Este valor se parece a lo que Bucci y colaboradores (2008) encontraron en su investigación en la sabana de Brasil para la temporada de sequía 0.8 mm día⁻¹. De las familias que estuvieron representadas en su estudio destacan Nyctaginaceae, Leguminosae, Malpighiaceae, Bombacaceae, Araliaceae entre otras; características del neotrópico. Vertessy y colaboradores (1997) calcularon un uso de agua a nivel parcela de 94 árboles de la especie *Eucalyptus regnans* F.J. Muell. y mediante la ecuación empírica que encontraron determinaron un máximo de transpiración de 3.1 mm día⁻¹. Los árboles que estudiaron son muy altos comparados con los que se encuentran en la selva baja caducifolia e igualmente la proporción de sus diámetros es mayor, así como el área conductora en comparación con los encontrados en esta investigación. En el estudio de Dawson (1996) con árboles de maple, se demuestra que los bosques con árboles adultos usan y reciclan el agua de 2 a 5 veces más que los árboles jóvenes o pequeños. Esto es importante porque se demuestra que la edad de la vegetación puede influenciar en el balance hidrológico. Parcelas con árboles jóvenes pueden transpirar de 2 a 5 veces menos agua que parcelas con árboles grandes o

adultos. Nuestros resultados indican que, durante el año 2019, la transpiración en el área de estudio fue dominada por los árboles de 8.6 a 18.8 cm de DAP, conformado por el mayor número de individuos. No obstante, la mayor transpiración volumétrica (48.98 kg día⁻¹) se observó en árboles de diámetro mayor a 29 cm (Figura 25). Los resultados sugieren que el comportamiento de la transpiración cuantificada en la selva baja caducifolia del Palmar responde al tamaño del individuo (DAP), además de su cobertura (IAF) o área de albura conductora.

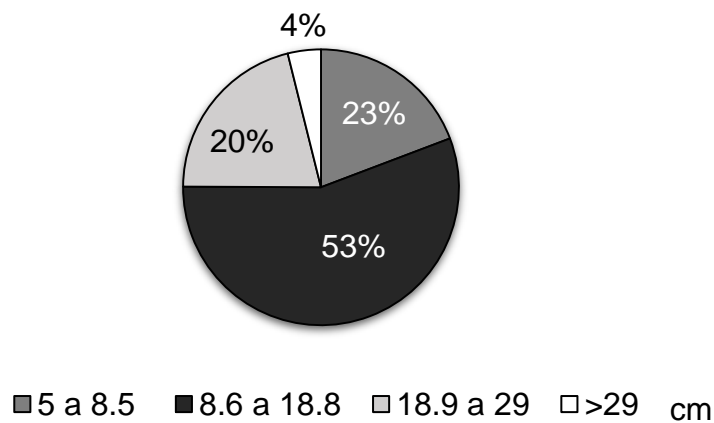


Figura 25. Porcentajes de contribución a la transpiración por rango de DAP (cm).

Tal como Santiago y colaboradores (2016) lo expone se puede tomar como característica de un bosque tropical decíduo o selva caducifolia la reducción de la transpiración en la temporada de sequía lo cual le confiere a este tipo de vegetación una mayor capacidad de sobrevivencia aun cuando el recurso agua este limitado, debido a que son especies caducifolias y que pierden sus hojas durante dichas temporadas de estrés hídrico les da una ventaja sobre las que son perennes.

De acuerdo a Goldstein y colaboradores (1998) el agua que se transpira en las primeras horas del día es agua que hay almacenada en las ramas. Después comienza el movimiento de agua desde las raíces, un aumento en el flujo de savia de la base del árbol. En los resultados se observa este comportamiento en los árboles medidos. Esto sucede cuando las células de las ramas y del tronco se mantienen con turgor si el agua que se transpira es el agua que se ha almacenado en las ramas, entonces, el ciclo de recarga y descarga se mide a través del flujo de savia en el tronco y se está calculando

la savia que llegara a recargar las ramas con agua; por lo que se puede asumir que el agua que se midió en el tronco o en la base del tronco es en algún momento transpirada.

Con estas consideraciones puede concluirse que el movimiento en el tronco representa la cantidad de agua que llegará a las ramas superiores, las recargará de agua y se transpirará. Los estudios que se han realizado de la capacidad del xilema para almacenar agua, indican que aun cuando pueda almacenarse el agua en las células parenquimatosas durante el día, llegará un punto en el que la transpiración, o el agua para transpirar provenga del agua almacenada en las ramas y también del suelo. Se concluye entonces, en el trabajo de Goldstein y colaboradores, que la contribución de agua almacenada a la transpiración diaria, de los cinco árboles que midieron, va del 9 al 15 % en el tallo. Este trabajo se realizó en una temporada de sequía de enero a abril. El tamaño del árbol (el área de la albura y el volumen) fueron más determinantes en el almacenamiento de agua durante el día que la especie.

Aun cuando el DPV sea mayor en la temporada de sequía y esto pueda dar pauta a pensar que la capacidad de evaporación fuera en esta temporada, si no existe un contenido de agua mayor, como es el en el caso de la temporada de lluvias esta transferencia de agua no podría darse. Sin embargo, las temporadas según la estimación Bucci, no parecen tener una diferencia considerable si no por unas cuantas centésimas.

Lo que lleva a concluir que aun cuando exista un DPV mayor si el árbol no tiene una provisión de agua no realizará la transpiración al igual que cuando tiene la provisión de agua o cuenta con el recurso.

El flujo de savia también ocurre de noche, como lo comprobamos en todos los individuos, particularmente en condiciones de advección de aire seco (Green *et. al.*, 1989).

En el trabajo de Medina y colaboradores (2019), se hace mención de la evapotranspiración potencial (ET_p) media anual en la península de Yucatán tiene valores mayores a 2000 mm año⁻¹, utilizando el producto satelital del MOD16A3 en el periodo 2000-2012. Recordemos que la ET_p es mayor que una ET ya que considera la disponibilidad de agua todo el tiempo (Medina et al., 2019).

En la presente investigación la transpiración (373.4 mm año⁻¹) representa entre el 25 y 35 % de la evapotranspiración tomando como base el dato reportado por Uuh-Sonda y colaboradores (2019), 1,211.8 mm año⁻¹.

9.1. *Albura conductora*

Se obtuvieron dos núcleos de cada individuo instrumentado para no cometer errores como los mencionados por Wullschleger y King (2000), que observaron que las mediciones incorrectas en los diámetros de los tallos y el grosor de la albura conductora pueden generar errores en la velocidad de flujo y al hacer la extrapolación del uso de agua de los bosques. El tejido leñoso no es completamente sólido, está lleno de espacios que se pueden llenar de agua o aire. Se consultaron estudios de características anatómicas de las maderas de las especies que se estudiaron, la información indica que *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Erythroxylum rotundifolium* y *Cordia gerascanthus* tienen porosidad difusa. De las otras especies, en el estudio de Mcculloh y colaboradores (2010) se indica que el tipo de porosidad que pueden tener los árboles depende de su distribución geográfica, en el caso de las especies con anillo poroso se restringen a los hábitats del hemisferio norte, mientras que los de porosidad difusa se expanden en un espectro de latitudes en los dos hemisferios. Los de tipo coníferas predominan en latitudes altas, pero también pueden existir en los trópicos y subtrópicos, especialmente en el hemisferio sur. Briceño-J. y colaboradores (2018) mencionan que la característica de porosidad difusa es común en las especies que crecen en bosques tropicales secos, los cuales tienden a tener poros pequeños.

9.2. *Consideraciones finales*

Se verifica que las tres formas de estimar transpiración para el cálculo pueden ser utilizadas por cualquier tipo de público para estimar una transpiración asociada a la vegetación selva baja caducifolia. De acuerdo a los resultados de esta tesis, la forma más fácil y recomendable para calcular la transpiración de la selva baja caducifolia es medir en campo los diámetros (DAP) de los individuos, así como obtener la cantidad de estos

y determinar un área o superficie ocupada por los árboles. *A posteriori*, durante el análisis detallado de los datos por individuo, se pueden asociar el valor de transpiración, el contenido volumétrico de agua en el suelo, el déficit de presión de vapor o un índice de área foliar (cobertura de dosel) para aplicaciones fisiológicas, pero está fuera de los objetivos de esta investigación, cuyo enfoque es hidrológico. Dichas relaciones pueden ser exploradas en el futuro.

Hay que tomar en cuenta que los reportes al 31 de Julio del 2019 del sistema meteorológico nacional, a través del monitor de sequía, reportó una condición de sequía moderada y sequía anormal en la península de Yucatán. Comparando 5 años, 3 años han sido anormalmente secos. Lo que se traduce en una menor disponibilidad de agua en el suelo para ser transpirada por las plantas.

Tal como se ha estudiado en los trabajos de Andrade, Bucci, Meinzer y otros, las relaciones alométricas son buenos predictores del flujo de agua en los árboles sin importar la especie. Se comprueba que la transpiración está mayormente asociado al tamaño del tronco que a la especie. Es decir, la transpiración no es especie específica.

Este trabajo aporta al entendimiento de la dinámica eco-hidrológica de las selvas y contribuye con un valor de transpiración que se puede considerar e incluir en los balances hidrológicos pues se reportan en las mismas unidades.

10. Conclusiones

La selva baja caducifolia de la Reserva Estatal El Palmar contribuye con 1.02 ± 0.16 mm día⁻¹ a la evapotranspiración, promedio de los tres métodos estudiados.

Si bien la selva baja caducifolia estudiada, y según la transpiración calculada, esta no contribuye en un porcentaje por arriba del 30% de lo evapotranspirado; el estudio de las especies y su conservación, puede dar una guía o base de lo que las especies vegetales tendrían que adaptar en cuanto a su fisiología, para sobrevivir. Es decir, las especies representadas en la selva baja caducifolia, su forma de respirar, transpirar y llevar a cabo sus procesos fisiológicos servirá de referencia para explicar lo que suceda con otro tipo de vegetación o ecosistemas en el mundo. Y probablemente sean las únicas que puedan sobrevivir al cambio climático debido a su marcada resistencia a la sequía.

Una aproximación que podría realizarse, en trabajos futuros, sería utilizar los datos de transpiración por especie, aquí calculados, y ponderar su contribución a la transpiración total utilizando como función el IVI.

Esta tesis abre el camino para otras posibilidades de análisis y reflexión sobre la importancia de todos los factores involucrados en el ciclo hidrológico, la necesidad de incrementar el conocimiento que integre las cuestiones biológicas e hidrológicas; para concientizarnos del valor del agua en todos y cada uno de los procesos de la vida.

Actualmente todo conocimiento de cómo usan el agua las plantas y la transpiración asociada a bosques y plantaciones permitirá hacer mejores evaluaciones en cuanto a los impactos que se generan por el cambio de uso de suelo y así manejar responsablemente los ecosistemas locales.

11. Referencias

- Aguilera, C. & Martínez, R. (1996) *Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera.*, 4a edn, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHAPINGO, Chapingo, México.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., Mcdowell, N., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D. & Mcdowell, N. (2010) 'A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests To cite this version : HAL Id : hal-00457602', *Forest Ecology and Management, Elsevier.*, 259(4), pp. 660–84.
- Allen G., R., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (2006) 'Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.', *FAO :Estudios FAO Riego y Drenaje 56*, p. 297.
- Andrade, J.L., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Holbrook, N, M., Cavelier, J., Jackson, P. & Silvera, K. (1998), 'Regulation of Water Flux through Trunks , Branches , and Leaves in Trees of a Lowland Tropical Forest', *Oecologia*, 115(4), pp. 463–71.
- Bolbotín-Nesvará, C., Calera-Belmonte, A., González-Piqueras, J., Campos-Rodríguez, I., López-González, M.L. & Torres-Prieto, E. (2011) 'Comparación de los sistemas covarianza y relación de bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semi-árido', *Agrociencias*, 45, pp. 87–103.
- Briceño-J., A.M., Rangel-Ch., J.O. & Marys Bogino, S. (2018) 'Anatomía y anualidad de los anillos de crecimiento de tres especies del bosque seco tropical del caribe de Colombia', *Polibotánica*, 46, pp. 169–78.
- Bucci, S.J., Goldstein, G., Meinzer, F.C., Scholz, F.G., Franco, A.C. & Bustamante, M. (2004) 'Functional convergence in hydraulic architecture and water relations of tropical savanna trees : from leaf to whole plant', *Tree Physiology*, 24.
- Bucci, S.J., Scholz, F.G., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Meinzer, F.C., Franco, A.C.,

- Giambelluca, T. & Miralles-Wilhelm, F. (2008) 'Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna', *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, pp. 839–49.
- Burba, G. & Anderson, D. (2010) *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications.*, LI-COR Biosciences, Versión 1., LI-COR Biosciences, Nebraska, USA.
- Casas Castillo, M.C. & Alarcón Jordán, M. (1999), *Meteorología y clima*, Ediciones UPC.
- Cochard, H., Coll, L., Le Roux, X. & Améglio, T. (2002), 'Unraveling the Effects of Plant Hydraulics on Stomatal Closure during Water Stress in Walnut', *Plant Physiology*, 128, pp. 282-290.
- Comisión Nacional del Agua (2015) 'Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán', *Diario Oficial de la Federación*.
- CONABIO (2019), *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*.
- Dawson, T.E. (1996) 'Determining water use by trees and forests from isotopic , energy balance and transpiration analyses : the roles of tree size and hydraulic lift', *Tree Physiology*, 16, pp. 263–72.
- Devlin, T.M. (2004) *Bioquímica : libro de texto con aplicaciones clínicas*, Reverté. pp. 358
- FAO (2009) *Los bosques y el agua*, Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Roma.
- Fernández Fernández, A., Muguruzca Cañas, C., Azcárate Luxán, M.V., Santa-Cecilia Mateos, F.J. & Contreras Cortés, I. (2015) *Iniciación a la geografía : la Tierra, un planeta habitado*, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A.
- Foken, T. (2008) *Micrometeorology*, C. Nappo (ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Bayreuth, Germany.
- Franks, F., Kern, C.W., Karplus, M., Rao, C.N.R., Walrafen, G.E., Glasel, J.A., Hasted, J.B., Narten, A., Levy, H.. & Page, D.I. (1972) *Water a Comprehensive Treatise*.

Volume 1. The Physics and Physical Chemistry of Water., Water a Comprehensive Treatise., 1, Plenum press, London, England.

- Gallego-Elvira, B., Olioso, A., Mira, M., Castillo, S.R., Boulet, G., Marloie, O., Garrigues, S., Courault, D., Weiss, M., Chauvelon, P. & Boutron, O. (2013) 'EVASPA (EVapotranspiration Assessment from SPAce) Tool: An overview', *Procedia Environmental Sciences*, 19, pp. 303–10.
- Goldstein, G., Andrade, J.L., Meinzer, F.C., Holbrook, N.M., Cavelier, J., Jackson, P. & Celis, A. (1998) 'Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees', *Plant, Cell and Environment*, 21, pp. 397–406.
- Gonzalez García, M.A., Paz Gonzalez., A. & Castelao Gegunde., A. (1995) 'La medida termica del flujo de savia aplicada al estudio de la extracción de agua por los arboles: revisión bibliografica y puesta a punto del método.', *Investigación Agrícola Sistemas de Recursos Forestales*, 4 (2), p. 16.
- Granier, A, Biron, P., Bréda, N., Pontailier, J.-Y. & Saugier, B. (1996) 'Transpiration of trees and forest stands: short and long- term monitoring using sapflow methods', *Global Change Biology*, 2, pp. 265–74.
- Granier, A., Biron, P., Bréda, N., Pontailier, J.-Y. & Saugier, B. (1996) 'Transpiration of trees and forest stands: short and longterm monitoring using sapflow methods', *Global Change Biology*, 2, pp. 265–74.
- Green, S.R., McNaughton, K.G. & Clothier, B.E. (1989) 'Observations of night-time water use in kifruit vines and apple trees', *Agricultural adn Forest Meteorology*, 48, pp. 251–61.
- Harwell, G.R. (2012) *Scientific Investigations Report 2012–5202 Estimation of Evaporation from Open Water—A Review of Selected Studies, Summary of U.S. Army Corps of Engineers Data Collection and Methods, and Evaluation of Two Methods for Estimation of Evaporation from Five R*
- Hsiao, T.C. (1973) 'Plant Responses to Water Stress', *Annual Review of Plant Physiology*, 24, pp. 519–70.

- Huxman, T.E., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Scott, R.L., Snyder, K.A., Small, E.E., Hultine, K., Pockman, W.T. & Robert, B. (2005) *Ecohydrological Implications of Woody Plant Encroachment*, 86(2), pp. 308–19.
- INEGI 2017, *Anuario estadístico y geográfico de Yucatán (2017)* Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jones, H.G. (2014) *Plants and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*, Third., Cambridge University Press, United Kingdom.
- Lehr, J. & Keely, J. (2005) *Water Encyclopedia: Oceanography; meteorology; physics and chemistry; water law; and water history, art, and culture, Culture*, Wiley Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, United States of America.
- López-López, R., Ojeda-Bustamante, W., López Andrade, A.P. & Catalán-Valencia, E.A. (2013) 'Heat Pulse Method and Sap Flow for Measuring Transpiration in Cacao', *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(2), pp. 85–96.
- López, E., Tijerina, L., Haro, A. & Arteaga, R. (1991) 'Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México.', *Agrociencia*, 2, pp. 55–72.
- Lu, P., Urban, L. & Zhao, P. (2004) 'Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice', *Acta Botanica Sinica*, 46(6), pp. 631–646.
- Maderey, L.E. (2005) *Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico.*, Serie de T., Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México., México.
- Maraux, F. & Rapidiel, B. (1990) *La Simulación Del Balance Hídrico. Aplicación para la determinación de fechas de siembra*, Programa de manejo integrado de recursos naturales CATIE, Costa Rica.
- Martínez, P.E., Martínez, P. & Castaño, S. (2006) *Fundamentos de Hidrogeología*, Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Mcculloh, K., Sperry, J.S., Lachenbruch, B., Meinzer, F.C., Reich, P.B., Voelker, S. &

- Mcculloh, K. (2010) *Moving water well : comparing hydraulic efficiency in twigs and trunks of coniferous , ring-porous , and diffuse- porous saplings from temperate and tropical forests*, pp. 439–50.
- Medina, I.O., Alvarado Barrientos, M.S., López-de la Cruz, J. & Ramiírez Orozco, A.I. (2019) 'Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Resumen Introducción', *Acta Universitaria*, 29, pp. 1–15.
- Miranda, F. & Hernandez-Xolocotzi, E. (1963) 'Los tipos de vegetación de México y su Clasificación.', *Boletín de la Sociedad Botánica de México.*, 23.
- Oki, T., Entekhabi, D. & Harrold, T.I. (2004) 'The Global Water Cycle', *American Geophysical Union*.
- Reyes-Garcia, C., Andrade, J.L., Sima, J.L., Us-Santamaria, R. & Jackson, P.C. (2012) 'Sapwood to heartwood ratio affects whole-tree water use in dry forest legume and non-legume trees', *Trees*, 26, pp. 1317–30.
- Rzedowski, J. (1978) *Vegetación de México*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Santiago, L.S., Bonal, D., De Guzman, M.E. & Ávila-Lovera, E. (2016) 'Drought Survival Strategies of Tropical Trees', *Goldstein G., Santiago L. (eds) Tropical Tree Physiology*, Springer, Cham, 6.
- Shanafiield, M., Cook, P.G., Gutiérrez-Jurado, H.A., Faux, R., Cleverly, J. & Eamus, D. (2015) 'Fiel comparison of methods for estimating groundwater discharge by evaporation and evapotranspiration in an arid-zone playa', *Journal of Hydrology*, 527, pp. 1073–83.
- Shiklomanov, I.A. (1997) *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World.*, *World Meteorological Organization.*, Stockholm.
- Sistema Meteorológico Nacional (2019) *Monitor de sequía*.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2002) *Plant Physiology, Plant Physiology*, Third., 1, Sinauer

Associates.

Tambutti, R. & Muñoz, H. (2003) *Física 1*, Limusa, pp. 258

Trejo, I. (2005) 'Análisis de la diversidad de la selva baja caducifolia en México.', *Sobre la Diversidad Biológica: El significado de las Diversidades alfa, beta y gamma.*, México.

UNESCO/WHO/UNEP (1996) *Water Quality Assessments - A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*, D. Chapman (ed.), *University Press, Cambridge ISBN*, 2nd edn, 2, E&FN Spon, Great Britain.

Uuh-Sonda, J., Gutiérrez-Jurado, H., Figueroa-Espinoza, B. & Méndez-Barroso, L. (2018) 'On the ecohydrology of the Yucatan Peninsula: Evapotranspiration and carbon intake dynamics across an eco - climatic gradient.', *Hydrological Processes*, 32, pp. 2806–28.

Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K. & Gribben, P.R. (1995) 'Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest', *Tree Physiology*, 15(9), pp. 559–67.

Vertessy, R.A., Hatton, T.J., Reece, P., Sullivan, S.K.O. & Benyon, R.G. (1997) 'Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique', *Tree Physiology*, 17, pp. 747–56.

Villaman Peña, R., Tijerina Chávez, L., Quevedo Nolasco, A. & Crespo Pichardo, G. (2001) 'Comparison of Some Micrometeorological Methods to Estimate Evapotranspiration', *Terra*, 19, pp. 281–91.

Wullschleger, S.D. & King, A.W. (2000) 'Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees', *Tree Physiology*, 20 (8), pp. 511–8.

12. ANEXOS

Resultados de todos los individuos, ambas temporadas.

Temporada	Código	Símbolo	Familia	DAP (cm)	AC (m ²)	AB (m ²)	T _{promedio}	T _{Mediana}	Min	Max
Sequia	LL-11y26-CR1000-1	<i>Li</i>	Leguminosae	38.2	0.023	0.115	52.1	54.0	42.5	59.8
Sequia	LL-3 y 20-CR10X-3	<i>Li</i>	Leguminosae	28.0	0.008	0.062	21.8	21.9	19.5	23.8
Sequia	HA-15-CR3000-2	<i>Ha</i>	Leguminosae	21.3	0.007	0.036	17.1	16.3	12.9	24.2
Sequia	PP-5y6-CR3000-2'	<i>Pp</i>	Leguminosae	20.4	0.015	0.033	22.1	22.1	19.1	25.0
Sequia	CG-22y24-CR1000-1	<i>Cg</i>	Leguminosae	19.7	0.007	0.031	15.9	14.7	8.3	23.4
Sequia	BS-17-CR3000-2	<i>Bs</i>	Burseraceae	16.9	0.012	0.022	16.2	14.5	11.9	22.2
Sequia	BS-12-CR1000-1	<i>Bs</i>	Burseraceae	16.6	0.018	0.022	26.2	27.5	22.3	29.6
Sequia	PO-16-CR1000-1	<i>Po</i>	Apocynaceae	15.6	0.015	0.019	19.1	17.8	16.9	22.6
Sequia	GF-1-CR10X-3	<i>Gf</i>	Polygonacea	14.6	0.015	0.017	7.1	7.3	6.4	7.5
Sequia	BS-8-CR10X-3	<i>Bs</i>	Burseraceae	14.6	0.012	0.017	8.3	8.2	7.8	8.7
Sequia	CoG-13-CR1000-1	<i>Cog</i>	Boraginaceae	14.3	0.005	0.016	9.3	9.3	8.2	10.3
Sequia	CG-15-CR3000-2'	<i>Cg</i>	Leguminosae	13.4	0.005	0.014	7.3	7.3	6.4	8.2
Sequia	ER-19-CR3000-2' etap 1	<i>Er</i>	Erythroxlaceae	12.1	0.006	0.011	6.2	6.2	5.6	6.8
Sequia	NC-7-CR1000-1 PO-6-CR3000-2 etapa 1	<i>Nc</i>	Nyctaginaceae	10.8	0.008	0.009	20.1	20.8	18.3	22.0
Sequia	1	<i>Po</i>	Apocynaceae	10.8	0.007	0.009	6.8	6.6	2.2	11.6
Sequia	GF-10-CR3000-2	<i>Gf</i>	Polygonacea	10.5	0.007	0.009	10.4	10.0	7.4	14.1
Sequia	Csp-10-CR3000-2'	<i>Csp</i>	Leguminosae	9.5	0.004	0.007	9.1	8.9	6.9	11.8
Sequia	GF-19-CR3000-2	<i>Gf</i>	Polygonacea	8.6	0.006	0.006	9.8	10.1	8.1	11.1
Lluvias	BS-9-CR10000-1	<i>Bs</i>	Burseraceae	17.5	0.018	0.024	32.0	31.7	25.5	37.4
Lluvias	LL-15 y 18-CR1000-1	<i>Li</i>	Leguminosae	39.2	0.023	0.120	45.9	45.4	43.8	48.4
Lluvias	CG-13y25-CR1000-1*	<i>Cg</i>	Leguminosae	20.7	0.007	0.034	29.9	28.3	28.1	33.3
Lluvias	CoG-19-CR1000-1	<i>Cog</i>	Boraginaceae	14.3	0.005	0.016	11.4	11.7	7.4	14.7
Lluvias	NC-2-CR1000-1	<i>Nc</i>	Nyctaginaceae	11.5	0.008	0.010	12.8	13.2	10.3	14.5
Lluvias	PO-5-CR1000-1	<i>Po</i>	Apocynaceae	15.9	0.015	0.020	23.4	23.4	22.1	24.7
Lluvias	PO-1-CR3000-2	<i>Po</i>	Apocynaceae	10.8	0.007	0.009	13.2	13.4	10.0	16.4
Lluvias	GF-11-CR3000-2 HA-7-CR3000-2 etapa 1	<i>Gf</i>	Polygonacea	11.5	0.007	0.010	12.0	11.7	9.4	14.5
Lluvias	1	<i>Ha</i>	Leguminosae	22.0	0.007	0.038	10.8	10.5	9.8	13.3

Temporada	Código	Símbolo	Familia	DAP (cm)	AC (m ²)	AB (m ²)	T _{promedio}	T _{Mediana}	Min	Max
Lluvias	BS-11-CR3000-2	Bs	Burseraceae	15.9	0.012	0.020	19.6	20.5	13.7	23.3
Lluvias	GF-24-CR3000-2	Gf	Polygonacea	9.9	0.006	0.008	10.3	10.4	8.5	12.0
Lluvias	LL-6y14-CR3000-2	Ll	Leguminosae	23.9	0.010	0.045	21.1	19.5	15.5	33.2
Lluvias	GF-8-CR10X-3	Gf	Polygonacea	15.0	0.015	0.018	22.3	22.8	18.8	25.1
Lluvias	LL-3y21-CR10X-3	Ll	Leguminosae	28.0	0.008	0.062	23.3	23.6	20.0	25.9
Lluvias	BS-17-CR10X-3	Bs	Burseraceae	15.0	0.012	0.018	18.3	17.9	11.7	26.1
Lluvias	NC-22-CR3000-2'	Nc	Nyctaginaceae	8.8	0.005	0.006	7.0	7.1	4.4	9.5
Lluvias	PP-14y24-CR3000-2'	Pp	Leguminosae	21.2	0.015	0.035	31.0	32.3	26.0	37.2
Lluvias	CG-7-CR3000-2'	Cg	Leguminosae	14.0	0.005	0.015	10.6	10.5	8.6	13.0
Lluvias	ER-6-CR3000-2'	Er	Erytroxylaceae	12.4	0.006	0.012	10.0	10.8	6.8	11.5

Índices de Valor de Importancia de las especies en conglomerado de extrapolación datos de Inventario.

Especie	IVI al 300%
<i>Bursera simaruba</i>	49.62
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	35.41
<i>Gymnopodium floribundum</i>	25.40
<i>Caesalpinia gaumeri</i>	22.98
<i>Lonchocarpus xuul</i>	16.90
<i>Havardia albicans</i>	15.33
<i>Thouinia paucidentata</i>	14.03
<i>Neea psychotrioides</i>	11.96
<i>Piscidia piscipula</i>	10.12
<i>Cordia gerascanthus</i>	9.38
<i>Plumeria obtusa</i>	7.49
<i>Vitex gaumeri</i>	7.20
<i>Colubrina elliptica</i>	6.61
<i>Jatropha gaumeri</i>	6.47
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	6.35
<i>Diphysa carthagenensis</i>	5.56

Especie	IVI al 300%
<i>Hampea trilobata</i>	5.50
<i>Metopium brownei</i>	5.48
<i>Erythroxylum rotundifolium</i>	5.17
<i>Ceiba schottii</i>	5.16
<i>Randia obcordata</i>	5.09
<i>Spondias purpurea</i>	5.01
<i>Ficus pertusa</i>	4.63
<i>Mimosa bahamensis</i>	4.39
<i>Neomillspaughia emarginata</i>	4.39
<i>Cascabela gaumeri</i>	4.38
<i>Total, general</i>	300.00