

**Balance hídrico de un bosque pluvisilva de montaña durante
el periodo 2010-2020**

**Trabajo de Diploma presentado en opción al Título de
Ingeniero Forestal**

AUTOR: George Vidal Ortíz

2022

Año 64 de la Revolución

**Balance hídrico de un bosque pluvisilva de montaña durante
el periodo 2010-2020**

**Trabajo de Diploma presentado en opción al Título de
Ingeniero Forestal**

AUTOR: George Vidal Ortíz

TUTOR: MSc. Yobanis Osorio Bornot

2022

Año 64 de la Revolución

PENSAMIENTO

Pensamiento

“Mira profundamente en la naturaleza y entonces comprenderás todo mejor”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedicatoria

Dedico a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza para seguir adelante día a día y lograr mis objetivos y metas.

A mis padres, hermanos, abuelos y otros familiares, que me han brindado a lo largo de mi vida su amor, apoyo, valores, cuidado y la motivación que me dieron para culminar mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

Mi agradecimiento a mis padres por su apoyo, perseverancia, consejos e insistencia, mis más sinceros agradecimientos a ellos por hacer de su niño un hombre de bien.

A la Facultad Agroforestal de la Universidad de Guantánamo, al claustro de profesores por impartir sus conocimientos a lo largo de estos cinco años.

A mi tutor MSc. Yobanis Osorio Bornot, que nos acogió, motivó, absolvió las dudas y ayudó con el planteamiento del trabajo de investigación. Le agradecemos su confianza y tiempo.

A todos mis compañeros que de una forma u otra influyeron en mi paso por la universidad, en especial a mis compañeros de cuarto en la residencia estudiantil, que más q compañeros somos hermanos.

RESUMEN

RESUMEN

Resumen

El trabajo se desarrolló en un bosque pluvisilva montano, en el Departamento de Conservación La Melba, ubicado al sureste del poblado de Moa, Holguín, con el objetivo de evaluar el comportamiento del balance hídrico del bosque pluvisilva de montaña. Para el cálculo de balance hídrico se tuvo en cuenta los valores medios de precipitación y temperatura, además de la metodología de Thornthworte Y Mather (1955). Los datos fueron procesados a través del software InnerSoft Balance Hídrico ISBH v0.7. Se caracterizó el comportamiento de las variables climáticas del bosque pluvisilva de montaña. Donde las temperaturas medias varían entre 23,45°C y 27,64°C, siendo enero el mes de menor valor y el de mayor temperatura el mes de Julio. En las precipitaciones se observa que en el mes de Febrero fue el mes donde cayó el menor nivel de precipitación con un valor de 20,36mm y el mes que tuvo mayor nivel de precipitación fue el mes de Octubre con 136,73mm. Las principales variables que se determinaron para el balance hídrico dentro del bosque pluvisilva de montaña fueron la evapotranspiración potencial (EP) y corregida (ETP) evidenciándose una pequeña diferencia, aunque no significativa, entre la secuencia de los meses, estos valores varían dese 0,036 hasta 0,063 mm en el caso de la Evapotranspiración potencial (EP), y de 0,038 hasta 0,059mm en la evapotranspiración potencial corregida (ETP). Las variables más afectadas fueron *NegAc* (Negativo Acumulado), ARM (Almacenamiento de agua en el suelo), DEF (Déficit de agua), R (Reposición de Agua en el Suelo).

Palabras Claves: Balance hídrico, variables meteorológicas, bosque pluvisilva

ABSTRACT

Abstract

The work was carried out in a montane rainforest in the La Melba Conservation Department, located southeast of the town of Moa, Holguín, with the objective of evaluating the behaviour of the water balance of the montane rainforest. For the calculation of the water balance, the mean values of precipitation and temperature were taken into account, in addition to the methodology of Thornthworte and Mather (1955). The data were processed through the software InnerSoft Water Balance ISBH v0.7. The behaviour of the climatic variables of the mountain rainforest was characterised. Average temperatures vary between 23.45°C and 27.64°C, with January being the month with the lowest value and July the month with the highest temperature. In terms of rainfall, February was the month with the lowest rainfall with a value of 20.36 mm and the month with the highest rainfall was October with 136.73 mm. The main variables determined for the water balance in the mountain rainforest were potential evapotranspiration (EP) and corrected evapotranspiration (ETP), showing a small difference, although not significant, between the sequence of months, these values varying from 0.036 to 0.063 mm in the case of potential evapotranspiration (EP), and from 0.038 to 0.059mm in the corrected potential evapotranspiration (ETP). The most affected variables were NegAc (Cumulative Negative), ARM (Soil Water Storage), DEF (Water Deficit), R (Soil Water Replenishment).

Keywords: Water balance, meteorological variables, rainforest.

ÍNDICE

INDICE

Índice

Nº	Título	Pág
I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Uso del agua en el mundo.....	4
2.2.	Uso del agua en Cuba.....	4
2.3	Balance Hídrico.....	5
2.3.1	Características y definición.....	5
2.3.2	Balance Hídrico en cuanto a escala temporal.....	6
2.3.3.	Procedimientos para determinar el balance hídrico.....	7
2.3.4.	Metodologías para la determinación del Balance Hídrico.....	7
2.3.5	THORNTHWORTE Y MATHER (1955).....	8
2.4	Consideraciones sobre los componentes Precipitación y evapotranspiración del Balance Hídrico.....	10
2.4.1.	Precipitación.....	10
2.4.2.	Evapotranspiración.....	11
2.4.3	Lluvia y probable evapotranspiración.....	12
2.4.4	Almacenamiento de agua en el suelo.....	13
2.4.5.	Caracterización del clima.....	14
2.4.6.	Aspectos hidrológicos del uso del agua por los bosques.....	16
2.4.7.	Interceptación.....	16
2.4.8.	Transpiración.....	17
2.4.9.	Productividad forestal y eficiencia en el uso del agua.....	18
2.4.10.	Los bosques tropicales.....	20
2.5.	Principales formaciones vegetales en el Departamento de Conservación La Melba.....	21
III.	Materiales y Métodos	22
3.1.	Ubicación del área de estudio.....	22
3.2.	<i>Características climáticas</i>	22
3.3.	Características de la vegetación.....	22
3.4.	Metodología empleada para el cálculo del Balance Hídrico.....	23
3.4.1	Capacidad máxima de agua disponible.....	23
3.4.2.	Cálculo del Balance hídrico según el método de Thornthwaite y Mather (1955).....	24
3.4.3	Modelo para retirada del agua del suelo.....	25
3.4.4.	Conferencias para validar los resultados del Balance hídrico.....	30
3.5.	Análisis de las propiedades físico-químicas del suelo.....	30
3.7.	Procesamiento matemático de los datos.....	30
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1.	Comportamiento de las variables climáticas del bosque pluvisilva de montaña en el Departamento de Conservación La Melba, durante el periodo 2010-2020.....	32
4.2.	Determinar las variables que componen el balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020.....	37

V.	Conclusiones.....	43
VI.	Recomendaciones.....	44

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

El balance hídrico en un ecosistema forestal es muy importante, ya que el agua es un factor determinante de las propiedades cuantitativas y cualitativas de la vegetación y la fauna, influyendo también en la propia formación del suelo (Zua, 2018). Un balance hídrico comprende la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, así como diversos componentes relacionados con los consumos de agua de los sectores usuarios en una cuenca y la interrelación que guardan entre sí, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. (Maxim,2016).

Al producirse una precipitación sobre un bosque, una parte de ésta es interceptada por su follaje (Hewlett 1969, Grimm y Fassbender, 1981). Esta agua, capturada por el dosel de la vegetación, se puede redistribuir a través del follaje (precipitación directa), escurrir por los troncos (escurrimiento fustal) o evaporar desde las hojas (pérdidas por intercepción) (López y Blanco 1978, Lee 1980, Crockford y Richardson 1990). Las precipitaciones que alcanzan el suelo y penetran en él modifican la reserva del agua edáfica, son utilizadas en la evapotranspiración o percolan hacia los estratos inferiores del suelo.

El ciclo hidrológico o el ciclo de agua son procesos continuos de movimiento y transformación de agua en la hidrosfera. Es un ciclo biogeoquímico ya que intervienen reacciones químicas en las cuales el agua cambia de estado o circula a otro lugar. La mayor reserva de agua se encuentra en forma líquida sobre todo en los océanos y mares, la segunda fracción está en forma sólida, acumulada como hielo en los casquetes polares. La fracción más pequeña de agua está en estado gaseoso como nubes en la atmosfera. (Maxim 2016).

El ciclo hidrológico comienza con la evaporación de agua comprendida en los océanos, mares, ríos, cuerpos de agua y también con la evapotranspiración de las plantas, que es la evaporación en el suelo y transpiración del material vegetal. La evaporación y la transpiración están producidas por la energía que desprende el sol y que estos están determinados por las condiciones climáticas de temperatura, humedad, radiación y viento. (GIRALDO, L. G (2002).

Aussenac y Boulangeat (1980) reconocen que dependiendo del clima las influencias sobre el ciclo hídrico son muy complejas y muy variables. Esto es debido a que la cubierta vegetal, sobre todo los árboles, juegan un papel importante en la redistribución de las precipitaciones, ya que ellos modifican la cantidad y lugar donde alcanzan la superficie (Echeverría, et al. 2007).

Gerrits, et al. 2006) observaron que la vegetación juega un papel importante en la evaporación de la precipitación, debido a que su follaje llega a retener una cantidad de lluvia de 20 al 50 % de la precipitación total. Para zonas tropicales y subtropicales la interceptación se encuentra en el rango de 8.9-39% (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

Los bosques también desempeñan funciones de amortiguación y mitigación de fenómenos meteorológicos extremos, así como reducción de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos. Por la relevancia que tienen los ecosistemas forestales en el ciclo del agua, es necesario realizar un manejo sustentable de estos, para lograr que todas las personas tengan acceso a este recurso vital. FAO. (2020).

El parque Nacional Alejandro de Humboldt, constituye el núcleo principal de la reserva de la biosfera Cuchillas del Tóa (ocupa más de la mitad de su área total), la mayor y más valiosa de las cuatro existentes en nuestro país. Este ecosistema, por su belleza natural y numerosos sitios de interés, bien es meritorio compararse, a la vista del visitante, con un escultural conjunto de postales exclusivas de montañas, mesetas, llanuras, bahías, ríos caudalosos, y arrecifes. Es considerado como uno de los sitios de mayor endemismo del mundo. En él se encuentra el 2% de las especies de flora de la Tierra. El parque concentra hermosos paisajes montañosos con bosques latifolios y pinares, ríos, pozos y cascadas. El (PNAH) se encuentra dividido en cuatro departamentos de conservación, que son Cupeyal del Norte, Ojito de Agua, Baracoa y La Melba.

El bosque tropical húmedo de montaña (Bosques pluviales), es un ecosistema mundialmente importante por su biodiversidad y servicios hidrológicos que provee este a la sociedad (Bruijnzeel *et al.*, 2010). Estos bosques se localizan en regiones tropicales donde el gradiente orográfico de la montaña favorece la condensación y la formación de nubes. Por tanto, estas zonas se caracterizan por

la presencia frecuente o permanente de nubes bajas las cuales aumentan la precipitación, al tiempo que reducen también la radiación y la evapotranspiración, lo que en conjunto conlleva a un aumento de los rendimientos hídricos en cuencas (Guzmán, 2017).

En el Parque nacional Alejandro de Humboldt se encuentran los bosques pluviales, estos son los más importantes dentro del área, este tipo de formación se establece bajo condiciones de humedad continua con precipitaciones superiores a los 2 000 mm/año, sin períodos de sequía, no presenta elementos caducifolios, aunque pueden existir emergentes deciduos y se subdivide en tres tipos, bosque pluvial de baja altitud, bosque pluvial submontano y bosque pluvial montano, este último se localiza en el Alto de Iberia y el Toldo, entre 800 – 1 600 m de altitud, está formado por dos estratos de 20 – 25 y 8 – 15 metros de altura; el estrato arbóreo es denso con árboles de hojas grandes y perennifolias (Zabala, 2005).

Teniendo en cuenta los antecedentes planteados se define el siguiente:

Problema

¿Cuál es balance hídrico del bosque pluvisilva de montaña en el Departamento de Conservación la Melva durante el periodo 2010-2020?

Objeto de estudio

Componentes del balance hídrico

Objetivo general

Evaluar el comportamiento del balance hídrico del bosque pluvisilva de montaña en el Departamento de Conservación la Melva en el periodo 2010-2020.

Hipótesis

Caracterizando el comportamiento de variables edafoclimáticas, determinando las principales variables hidrológicas, será posible identificar la variabilidad del balance hídrico el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020

Objetivos específicos

1. Caracterizar el comportamiento de las variables climáticas del bosque pluvisilva de montaña en el periodo 2010-2020.

2. Determinar las variables que componen el balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020.
3. Identificar la variables más afectadas del balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

REVISION BIBLIOGRAFICA

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Uso del agua en el mundo

La condición del agua en el mundo es muy preocupante, se estima que en 30 años ceca de 5,500 millones de personas estarán viviendo en zonas con escasez moderada o grave de agua, esta afirmación se torna aún más preocupante, pues se verifica en la literatura la proyección de un 45% de aumento de la población en el periodo 2004-2050, mientras que el volumen de agua disponible se mantendrá sin cambios **(Alber, 2021)**

En el mundo el mayor consumidor de agua es el sector industrial seguido por el abastecimiento público, parte del agua captada se consume en el proceso, es decir, cuando el volumen total de efluentes es menor que el volumen captado, **(CARCHI, 2015)**.

2.2. Uso del agua en Cuba

En Cuba se impone la necesidad de un uso sostenible del agua y de la creación de una mayor cultura al respecto, compulsada entre otros factores, por su carestía relativa en zonas vulnerables, la pérdida de su calidad original por efecto de la actividad antrópica en determinadas áreas y las pérdidas en su condición por ineficiencia en los sistemas en operación y por la aplicación de tecnologías inadecuadas, con énfasis en el riego de cultivos agrícolas. Esta necesidad se afianza, además, por un contexto climático complejo que está determinando la ocurrencia más frecuente de fenómeno extremos (sequías prolongadas y huracanes).

Según (Mesa y Barrueco, 2009) el 67% del territorio nacional está constituido por formaciones cárcicas y en este porcentaje se localizan las 165 cuencas, zonas y tramos hidrogeológicos más importantes, los cuales cuentan con abundantes recursos y un área acuífera efectiva elevada.

En Cuba los usos del agua se distribuyen de la siguiente manera: el 5% está destinado al sector industrial, el 15% para otros usos, el 20% para la población y el 50% para la agricultura.

2.3 Balance Hídrico

2.3.1 Características y definición

El balance hídrico es un sistema de contabilidad para monitorear los resultados del agua a partir de la aplicación del principio de conservación de la masa al agua en un volumen de suelo. Permite observar la dinámica del agua en el suelo a partir del almacenamiento, deficiencia y excedentes hídricos (Tucci, 1997).

La planificación hídrica es la base para dimensionar cualquier forma de gestión integrada de los recursos hídricos, así, el balance hídrico permite conocer la necesidad y disponibilidad de agua en el suelo a lo largo del tiempo. El balance hídrico como unidad de gestión, permite clasificar el clima de una región, realizar zonificaciones agroclimáticas y ambientales, el período de disponibilidad y necesidades hídricas en el suelo, además de favorecer la gestión integrada de los recursos hídricos (Lima, *et al.*, 2008).

El balance hídrico es una primera evaluación de una región, que determina la contabilización del agua de una determinada capa del suelo donde se definen los períodos seco (déficit hídrico) y húmedo (excedente hídrico) de un determinado lugar, identificando así las zonas donde los cultivos pueden ser explotados con mayor eficacia (Cajamarca R., Ronald (2017).

El balance hídrico es el método más eficiente para cuantificar el potencial hídrico de una región, ya que considera la interacción entre dos factores edáficos y climáticos. El factor edáfico interfiere con el almacenamiento de agua en el suelo y el factor climático, a su vez, está representado por la lluvia y la evapotranspiración (Moster, *et al.*, 2003).

Los principales componentes del balance hídrico para definir la demanda y disponibilidad de agua son la precipitación (P), la evapotranspiración real (ETR), la evapotranspiración potencial (ETP), el almacenamiento de agua en el suelo (ARM), el déficit hídrico (DEF) y el excedente de agua (EXC) (Pereira, *et al.*, 2002).

El balance hídrico permite conocer la necesidad y disponibilidad de agua en el suelo a lo largo del tiempo. El balance hídrico como unidad de gestión permite clasificar el clima de una región, realizar la zonificación agroclimática y ambiental,

el período de disponibilidad y necesidades hídricas en el suelo, además de favorecer la gestión integrada de los recursos hídricos (Santos, *et al.*, 2009).

El balance hídrico no es más que el cálculo de las entradas y salidas de agua de un sistema. Se pueden considerar varias escalas espaciales para dar cuenta del balance hídrico. A escala macro, el “balance hídrico” es el propio “ciclo hidrológico”, cuyo resultado nos proporcionará el agua disponible en el sistema (en el suelo, ríos, lagos, vegetación húmeda y océanos), es decir, en la biosfera (Sentelhas, *et al.*, 2012).

El balance hídrico es una primera evaluación de una región, que determina la contabilidad hídrica de una capa particular del suelo donde se definen los períodos seco (déficit hídrico) y húmedo (excedente hídrico) (REICHARDT, 1990), identificando así áreas donde los cultivos pueden ser explotados con mayor eficacia (BARRETO, *et al.*, 2009).

Para preparar el BHC, ya sea Normal o Secuencial, es necesario conocer la capacidad de agua disponible del suelo (CAD). La CAD representa la máxima cantidad de agua disponible que puede retener un determinado tipo de suelo en función de sus características físico-hídricas, es decir, humedad de capacidad de campo (FC), humedad de punto de marchitez permanente (PMP), masa específica del suelo (d_g) y la profundidad efectiva del sistema radicular (Z_r), donde se concentra alrededor del 80% de las raíces. (Costa, 1994)

Antes del propio BHC, existe la necesidad de comprender cómo el método propuesto por T&M (1955) considera la extracción y reposición de agua del suelo. Los autores adoptaron una función exponencial para la remoción de agua del suelo, mientras que la reposición es directa, simplemente sumando al almacenamiento de agua del suelo el saldo positivo del balance entre P y ETP [(P – ETP)+] (Thorntnwait, *et al.*, 1957).

2.3.2 Balance Hídrico en cuanto a escala temporal

En términos de escala, los balances se pueden clasificar en secuenciales (continuos) y cíclicos. (Pereira, *et al.*, 2002)

El balance hídrico cíclico normalmente utiliza datos promedio para la región, es decir, datos climatológicos normales. Refleja la condición normal del sitio y no tiene en cuenta las eventualidades del clima atmosférico.

El balance de agua secuencial o continuo generalmente se realiza durante períodos cortos de tiempo y demuestra la variación de las condiciones locales del agua. Cuanto más corto es el período de estudio, mayor es la interferencia de las variaciones del tiempo meteorológico (Souza, 1994).

El balance hídrico se puede realizar para diferentes periodos de tiempo, que van desde horas hasta años. Las escalas de tiempo más utilizadas son entre diaria y anual. La elección de una u otra escala temporal depende especialmente de la finalidad de la contabilidad del agua (Cintra, et al., 2000).

2.3.3. Procedimientos para determinar el balance hídrico

El balance hídrico considera los componentes: precipitación, evaporación, evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea (Tucci, 1997). En base a los componentes antes mencionados, se pueden realizar diferentes procedimientos para determinar el balance hídrico, los cuales se pueden clasificar en balances hídricos superficiales, aerológicos, isotópicos, energéticos, balances hídricos de superficies líquidas, modelos matemáticos, balances hídricos agrícolas y climatológicos.

2.3.4. Metodologías para la determinación del Balance Hídrico

Para (Camargo, et al., 1990) se puede obtener otra clasificación de los modelos de balance hídrico, cuando el objetivo del monitoreo es cuantificar las necesidades hídricas de los cultivos en sus etapas de desarrollo. Entonces ellos son:

Modelos edafológicos: Se monitorea la condición hídrica del suelo en base al contenido de humedad, determinado por diferentes métodos.

Modelos físicos: Basados en la relación entre el contenido de humedad y la tensión hídrica del suelo. Por lo tanto, la humedad se puede rastrear indirectamente, a través de la tensión del agua del suelo. Uno de los instrumentos más utilizados para la evaluación de la humedad en suelos agrícolas es el tensiómetro.

Modelos fisiológicos: Los modelos fisiológicos relacionan la deficiencia de agua del suelo con las reacciones de las plantas. De esta forma, la planta se convierte en un instrumento para monitorear la condición hídrica del suelo.

Modelos Irrigadores: Utiliza valores de Eto determinados por algún método de estimación (Tanque Clase A, Thornthwaite, Penman, entre otros) y coeficiente de cultivo (Kc) del cultivo para determinar la lámina de agua a aplicar al suelo (ETc). El principal objetivo es mantener la condición hídrica ideal para la planta, es decir, humedad de capacidad de campo (CC).

Modelos Climatológicos: Los modelos climatológicos para la realización del balance hídrico consideran la precipitación y evapotranspiración del cultivo para determinar potenciales carencias hídricas y realizar la suplementación de forma racional.

La elección del modelo de balance hídrico más adecuado está determinada principalmente por el grado de conocimiento del sistema suelo/planta/atmósfera. Los modelos más complejos son más exigentes en términos de datos de suelo, cultivo y atmósfera, lo que puede hacer inviable su uso (Souza, 2001).

El balance hídrico climatológico es utilizado en numerosos trabajos científicos, adaptándose a las necesidades de cada área de conocimiento. (Thornthwaite, 1948) Clasifica el balance hídrico climatológico como una herramienta para la obtención de datos indispensables en los trabajos e investigaciones agro meteorológicas (Camargo *et al.*, 2000).

En general, el balance hídrico climatológico se realiza con los datos climáticos normales de la región, las normas climatológicas que establecen la condición del clima local. Sin embargo, nada impide que se determine a partir de datos instantáneos. La metodología más frecuente del balance hídrico THORNTHWAITE & MATHER (1955). Adoptaron esta metodología de balance hídrico climatológico en varias modalidades de monitoreo (FRANKE, et al., 1997).

2.3.5 THORNTHWORTE Y MATHER (1955)

El balance hídrico climatológico (BHC) fue desarrollado por Thornthwaite & Mather (1955) para determinar el régimen hídrico de un sitio, sin necesidad de mediciones directas de las condiciones del suelo. Para su elaboración es necesario definir el almacenamiento máximo en el suelo (CAD - Capacidad Hídrica Disponible), y tener la medida de la precipitación total, así como la estimación de la evapotranspiración potencial en cada período. Con estos tres datos básicos, el BHC permite deducir la evapotranspiración real, la deficiencia o

excedente de agua y la cantidad total de agua retenida en el suelo en cada período (Contreras S., *et al.*, 2015).

Este balance es un método que permite la estimación de la evapotranspiración, y el volumen de agua almacenada en el suelo determina la tasa de evapotranspiración real. Cuanto más seco está el suelo, más difícil es para la evapotranspiración.

Como el suelo es un reservorio que dificulta la salida del agua al secarse, en los períodos en que la precipitación total (P) es menor que la evapotranspiración potencial (ETP), el agua retenida pasa a ser función de esta demanda potencial. ($P - ETP < 0$) y el CAD adoptado. Si existe una secuencia de periodos en esta condición, el agua retenida en el suelo será una función secuencial de los valores negativos acumulados de $P - ETP$, es decir, de la pérdida potencial acumulada. Esta suma se denominó "negativo acumulado". Para facilitar la elaboración del balance hídrico THORNTHWAITE y MATHER (1957) presentaron una serie de tablas de agua retenida en función del acumulado negativo para valores CAD que van desde 25 mm hasta 400 mm, debido a que en ese momento la capacidad de cómputo era restringida a máquinas mecánicas de difícil operación.

El balance hídrico climatológico desarrollado por Thornthwaite; Mather (1955) permite monitorear la variación del almacenamiento de agua en el suelo, tanto a escala diaria como a escalas mayores, como mensual, utilizando medidas de temperatura del aire y precipitación (Del Toro, *et al.*, 2014)

El balance hídrico climatológico se desarrolló inicialmente con el objetivo de caracterizar el clima de una región, para ser utilizada en la clasificación climática desarrollada por Thornthwaite en la década de los 40. Posteriormente, este método comenzó a utilizarse con fines agronómicos, dada la gran interrelación de la agricultura con condiciones climáticas (Angeloccl, 2012). El proceso de contabilidad del agua del suelo más utilizado con fines agrícolas es el de Thornthwaite; Mater (1995). El método ha demostrado ser eficiente para programar y definir diversas actividades agrícolas.

El balance hídrico involucra la cuantificación de los componentes del sistema, visando una mejor comprensión de su comportamiento y se basa en el principio de conservación de la masa, siendo analizado por las entradas y salidas de agua

del sistema (Tucci, 2000). Las posibles entradas de agua al sistema incluyen precipitación, rocío, precipitación oculta y ascenso capilar, mientras que las posibles salidas incluyen evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subterránea y flujo base.

De acuerdo con la ecuación del balance hídrico, la escorrentía es el balance contable entre la entrada de agua a través de la lluvia y las pérdidas por evaporación. Por lo tanto, cantidades idénticas de precipitación en dos cuencas deberían producir cantidades variables de escorrentía, debido a las diferentes características físicas de la cuenca. Para evaluar el efecto que tendría cualquier perturbación en una cuenca, primero es necesario conocer las características hidrológicas del ecosistema natural, para luego poder comparar con aquellos en los que hubo intervenciones antrópicas. El análisis de estos aspectos del ecosistema involucra características de clima, geomorfología, suelo, vegetación, escorrentía y evapotranspiración.

2.4 Consideraciones sobre los componentes Precipitación y evapotranspiración del Balance Hídrico

2.4.1. Precipitación

La precipitación es ampliamente reconocida por muchos investigadores como la variable climatológica más importante, especialmente en las regiones tropicales. La lluvia representa el principal aporte de agua en un sistema Sánchez, J. (2010).

La lluvia representa el principal aporte de agua en un sistema, mientras que el aporte de rocío sólo juega un papel importante en regiones muy áridas, siendo por tanto insignificante. Los aportes de agua por ascenso capilar también son muy pequeños y sólo se dan en lugares con napa freática superficial y en periodos muy secos. Aun así, la contribución de esta variable es pequeña, siendo también despreciable. Por el contrario, los caudales horizontales de agua (R_i , R_o , D_{Li} y D_{Lo}), para zonas homogéneas, se compensan, por tanto, anulándose entre sí. ET es la principal salida de agua del sistema, especialmente en periodos secos, mientras que DP es otra salida de agua del volumen de control del suelo en periodos excesivamente lluviosos (Sentelhas, 2012).

2.4.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso inverso de la precipitación, ya que explica la pérdida de agua que se evaporó del suelo sumado a la transpiración de las plantas.

La evapotranspiración consiste en el proceso inverso de la precipitación, porque es la contabilización de la pérdida de agua que se evaporó del suelo sumada a la transpiración de las plantas (MENDONÇA, *et al.*, 2003).

La evapotranspiración es la pérdida de agua de una superficie natural, en cualquier condición de humedad y cubierta vegetal, (Contreras S., *et al.*, 2015).

La evaporación consiste en un proceso físico, directamente relacionado con la disponibilidad de energía en la superficie considerada. La principal fuente de energía para abastecer la demanda de evapotranspiración es la radiación solar. La energía advectivo también es una fuente importante de energía para la evapotranspiración, ya que transfiere calor sensible y energía latente desde el área seca hacia el campo de estudio (Arcova, 1996).

La transpiración es un fenómeno biológico, determinado no sólo por las condiciones energéticas del sistema, sino también por las características de la propia planta. La transpiración es directamente proporcional al almacenamiento de agua en el suelo. En condiciones de una atmósfera deficiente en agua, un vegetal. Potencialmente transpira cuando hay suficiente humedad en el suelo (Arcova *et al.*, 1997)

La evapotranspiración, real o potencial, y el déficit hídrico son los parámetros indispensables para determinar la productividad del agua en una determinada región (Hernandez, 1995).

La relación entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real de la planta representa el déficit hídrico que se presenta en el suelo, es decir, la humedad del suelo se encuentra por debajo del nivel deseable, provocando que la planta reduzca sus actividades metabólicas, disminuyendo consecuentemente su crecimiento y desarrollo. Esta indisponibilidad de agua es la que debe ser sustituida por lluvias y/o riego para expresar todo el potencial productivo de una especie (Santos *et al.*, 1998).

2.4.3 Lluvia y probable evapotranspiración

El conocimiento de las precipitaciones probables es de sumo interés para el diseño de aliviaderos de presas, canales, desagües pluviales, alcantarillas y presas de abastecimiento de agua y para la planificación agrícola y el diseño de un sistema de riego complementario. La precipitación probable es la precipitación que tiene una probabilidad específica de ocurrencia, basada en una larga serie de datos (Carrera, *et al.*, 2016)

La evapotranspiración potencial es un elemento macro meteorológico fundamental, al igual que las precipitaciones. Representa la lluvia teóricamente necesaria para que no haya escasez ni exceso de agua en el sol. Con el balance contable entre estos dos elementos opuestos, se puede caracterizar bien el factor humedad del clima y estimar la humedad disponible del suelo, a través del balance hídrico climatológico Sánchez, J. (2010).

Para calcular la evapotranspiración potencial se utiliza la fórmula: Etp sin corregir = $16 \times [(10 \times t/l)]^a$; el primer paso es calcular los índices de calor mensuales (i) a partir de los valores de temperatura interpolado (t), utilizando la siguiente fórmula: $i = [t/5]^{1,514}$; con el cálculo de los índices de calor mensuales se obtiene el índice de calor anual: $I = \sum i \text{ mensual}$; el factor $a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,792 \times 10^{-2} \times I + 0,49239$. Finalmente, la ETP se corrige considerando las horas de sol y la latitud de la zona de estudio mediante la ecuación: $ETP = ETP \text{ no corregida} \times [(n/12) \times (d/30)]$ donde n es el número de horas de sol dependiendo sobre el mes y latitud y d = número de días del mes (Aparicio, 2008).

La evapotranspiración potencial (ETp), que representa la precipitación requerida, es el proceso de pérdida de agua a la atmósfera, a través de una superficie de césped natural, estándar, sin restricción de agua para satisfacer las necesidades de evaporación y transpiración del suelo (Camargo *et al.*, 2000).

Para (Silva, *et al.*, 2011), los valores de probabilidad son variables y pueden ser adoptados considerando el riesgo económico de reducción en la calidad y cantidad de la producción resultante de la deficiencia de agua causada por la sobrevaloración de las alturas de lluvia. Este principio también puede ser adoptado para valores probables de evapotranspiración, considerando un nivel de probabilidad equivalente al seleccionado para la precipitación probable. Para

determinar la profundidad óptima de riego con el programa Tobruk utilizaron el nivel de probabilidad del 80% para estimar la precipitación y la evapotranspiración probables. Sánchez, J. (2010). destaca que el nivel de probabilidad más adecuado para trabajos con probable precipitación en áreas agrícolas no debe ser inferior al 75% u 80%, es decir, una profundidad mínima de agua que puede ocurrir en 3 años, de una secuencia de 4 años.

2.4.4 Almacenamiento de agua en el suelo

La cantidad de agua retenida en el perfil del suelo es importante para el desarrollo de las plantas. El agua se retiene en la superficie de las partículas del suelo. Los suelos con textura arenosa tienen menor capacidad de retención de agua en comparación con los suelos arcillosos y limosos. Esta propiedad está en función de la superficie específica de las costumbres del suelo (Carchi, 2015).

La profundidad del agua almacenada en el suelo también es función de la profundidad del perfil (z) que a su vez determina la dimensión del control. Cuanto más profundo sea el suelo, más agua se retendrá. En los cultivos agrícolas, los cultivos normalmente exploran diferentes horizontes, dependiendo de su sistema radicular, dando variación continua al almacenamiento (Burch, *et al.*, 1987).

Del volumen total de agua almacenada en el suelo, la porción de agua capilar comprendida entre las unidades de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se denomina CAD. Sin embargo, debido a la variación en el poder de extracción de agua del suelo por parte de las plantas, solo una fracción (p) del CAD está disponible para que las plantas lo absorban sin pérdida de crecimiento. Esta porción se denomina agua disponible (AD) (Souza, 2001).

Para determinar la capacidad de agua disponible (CAD), en un volumen dado de suelo, es necesario conocer la densidad aparente del suelo, la profundidad del perfil explorado por las raíces, así como la humedad en la capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente (Camargo *et al.*, 1990).

La humedad de capacidad de campo representa el contenido máximo de agua retenido en el suelo contra la fuerza de la gravedad. En la práctica, la humedad de capacidad de campo se logra saturando y drenando el exceso de agua del perfil del suelo. En suelos permeables de textura media, la condición de capacidad de

campo se presenta aproximadamente de 2 a 3 días después de una lluvia o riego (Leopoldo *et al.*, 1985).

El punto de marchitez permanente es el límite mínimo de humedad del suelo en el que las plantas permanecen marchitas y no vuelven a la turgencia cuando se restablece la condición hídrica, lo que impedirá su supervivencia (Pereira *et al.*, 2002).

El almacenamiento de agua en un determinado tipo de suelo a lo largo del tiempo se puede estimar realizando un balance hídrico, tomando medidas de evapotranspiración y lluvia. De esta forma, el agua (DA) estará en función de la cantidad y distribución de las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo, la tasa de infiltración, la CAD y el tipo de cultivo. La infiltración y la CAD están relacionadas con la porosidad del suelo. La infiltración se ve favorecida por los macro poros y la retención por los micro poros (Silveira *et al.*, 2001).

2.4.5. Caracterización del clima

La preocupación del hombre por los fenómenos que se originan en la atmósfera y que repercuten en la superficie terrestre es tan antigua como su propia percepción del medio ambiente habitado. Desde el inicio de la epopeya humana en la Tierra, el interés por el tiempo y el clima se justifica por la indudable influencia que sus fenómenos y los aspectos inherentes a ellos, ejercen sobre las actividades realizadas por el hombre (Ichiba, 2006).

El clima, como uno de los componentes más importantes del medio natural, puede ser un indicador de degradación ambiental, ya que afecta los procesos geomorfológicos actuales, los de transformación del suelo, el crecimiento y desarrollo de la vegetación y, en consecuencia, los procesos hidrológicos. Desde la década de 1980, la evidencia científica sobre la posibilidad de un cambio climático global ha sido expresiva y esto ha despertado gran interés en el público y la comunidad científica en general (Marengo, 2001).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) define el cambio climático como cambios temporales en el clima debido a la variabilidad natural y/o los resultados de las actividades humanas. Otros autores adoptan, por el mismo término, la definición de cambios asociados directa o indirectamente a

las actividades humanas que alteran la variabilidad natural observada en un período determinado.

En términos generales, la "variabilidad climática" se utiliza para las variaciones en el clima y en función de las condiciones naturales del planeta y de sus interacciones, de ahí la denominación de variabilidad climática natural. El cambio climático serían los cambios en la variabilidad natural del clima debido a las actividades humanas. Por lo tanto, es necesario identificar si hay un cambio en la variabilidad natural para poder decir que se está produciendo un cambio climático (Back, 2001).

Para la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la evolución del comportamiento atmosférico nunca es igual de un año a otro, ni siquiera de una década a otra, siendo posibles fluctuaciones a corto, mediano y largo plazo (Steinke, 2004).

Con la prerrogativa de que el aumento de la cantidad de CO₂ produce un aumento de la temperatura de la atmósfera inferior en un modelo a escala logarítmica, se organizaron varios eventos para discutir el problema del cambio climático global y esto fue implementado, en 1988, por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático - IPCC, con el fin de: 1º: evaluar la información científica existente sobre el cambio climático, 2º: evaluar las condiciones ambientales y socioeconómicas impactos del cambio climático y 3º: formulación de estrategias para responder a estos impactos (Steinke, 2004).

Según Steinke (2004), el Primer Informe de Evaluación del IPCC se finalizó en agosto de 1990 y sirvió de base para la negociación de la convención - Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En 1995, el Panel produjo el Segundo Informe de Evaluación. En este documento se discutió el sistema climático físico, los factores que inducen el cambio climático, el análisis del clima en el pasado, además de sugerir que el balance de la evidencia indica una clara influencia del hombre en el clima a través de las emisiones de gases de efecto invernadero. El Tercer Informe de Evaluación, anunciado oficialmente el 21 de enero de 2001, el IPCC declaró que "existen pruebas nuevas y más sólidas de

que la principal causa del calentamiento global observado en los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas”.

2.4.6 Aspectos hidrológicos del uso del agua por los bosques

El uso del agua por las plantas se puede definir, según Benyon (2007), como la pérdida total por evaporación, que resulta de la interceptación, la evaporación del suelo y la transpiración, también conocida comúnmente como evapotranspiración. Aproximadamente dos tercios de la precipitación global regresa a la atmósfera en forma de evaporación, constituyendo el componente principal del ciclo hidrológico (Wallace, 1995). El uso del agua por las plantas o transpiración (movimiento del agua a través del sistema suelo-planta-atmósfera) es el mecanismo más importante para transferir agua del suelo a la atmósfera cuando el suelo está cubierto por vegetación (Carlesso & Zimmermann, 2000). Aproximadamente el 95% del agua absorbida por las raíces es liberada a la atmósfera por la planta en forma de vapor de agua (Pallardy, 2008).

2.4.7. Interceptación

El problema hidrológico más importante que provocan las plantaciones a nivel local es la interceptación de la precipitación, la cual se puede considerar como una fracción del agua de lluvia que regresa a la atmósfera sin llegar al suelo (Lima, 1993; Ceccon & Martinez-Ramos, 1999). Del total de la precipitación en un ecosistema forestal, una porción es interceptada por el dosel, otra tiene el flujo por el tronco o por el goteo de hojas y ramas, así como también puede pasar por los espacios abiertos del dosel o ser interceptada por la hojarasca en el suelo del bosque (2006).

En los trópicos, la interceptación es un componente importante de la evaporación forestal anual. Los bosques húmedos tropicales pueden convertir, anualmente, el equivalente de prácticamente toda la radiación neta en evaporación. Es poco probable que cualquier otro uso de la tierra se evapore a un ritmo mayor. Por lo tanto, es probable que la conversión de bosques a cultivos anuales en estas áreas, como en la mayoría de las demás áreas del mundo, resulte en flujos anuales más altos de los cursos de agua (Calder, 1998).

La proporción de lluvia interceptada depende principalmente de las características del bosque y los regímenes de precipitaciones, variando considerablemente entre

especies. Según Cajamarca, 2017, en promedio, un bosque de pinos capta el 28% de la lluvia en comparación con el 14% de un bosque de eucaliptos. pérdidas de interceptación en estudios con eucaliptos en Australia, India e Israel, oscilan entre el 10 y el 34% de la precipitación anual (Calder, 1986; Whitehead y Beadle, 2004). En Brasil, la pérdida de interceptación promedio para *Eucalyptus grandis* de 9 años fue del 11% de la precipitación anual, con mayores pérdidas en períodos secos, cuando la lluvia es menos intensa (Soares & Almeida, 2001).

Por lo tanto, las diferencias fisonómicas y estructurales del dosel pueden influir en la captación de lluvia y, por lo tanto, en el balance hídrico. Las pérdidas por interceptación son generalmente menores en los bosques de frondosas que en los de coníferas; características como un menor albedo y una mayor aspereza del dosel de los bosques de coníferas en comparación con los bosques de hoja ancha pueden explicar esta diferencia, ya que las coníferas tienden a absorber más energía (Benyon, 2007). Tales diferencias en la captación de lluvia pueden o no ser compensadas por diferencias en la evaporación, transpiración (Van dijk & Keenan, 2007) e infiltración del suelo. Li (2008), al estudiar el flujo de agua a través del tronco de los arbustos en la región semiárida de China, encontró que puede canalizarse a niveles más profundos en el suelo con arbustos que en sitios sin arbustos, creando condiciones de agua en el suelo favorables para crecimiento de plantas en ambientes con estrés hídrico.

2.4.8 Transpiración

La transpiración en las plantas vasculares ocurre principalmente a través de poros microscópicos en la superficie de las hojas, conocidos como estomas, siendo la regulación de la apertura estomática el principal mecanismo que controla las tasas de transpiración (Larcher, 2006). Según Vincke & Thiry (2008), la vegetación arbórea, por su longevidad y alta capacidad evaporativa, tiene una gran influencia en el ciclo del agua; pudiendo transpirar el 80% de la evapotranspiración potencial bajo demanda evaporativa alta. Así, la demanda evaporativa de la atmósfera, que comprende condiciones climáticas como radiación, déficit de presión de saturación del aire, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura; y factores como la conductancia y estructura del dosel, el índice de área foliar y la disponibilidad de agua en el suelo, determinan las pérdidas de agua por transpiración (Cannell, 1999).

En consecuencia, la tasa de transpiración de las plantaciones forestales varía básicamente según la ubicación geográfica, las condiciones ambientales y las especies plantadas. En Chile, Huber & Trecaman (2004), al estudiar la eficiencia en el uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata*, observaron que las tasas de transpiración más bajas estaban asociadas a suelos con buena capacidad de retención de agua, eventos de precipitaciones importantes y cantidades menores de vegetación competidora. Vincke & Thiry (2008), estudiando la evapotranspiración y el contenido de agua del suelo en plantaciones de *Pinus sylvestris* en Bélgica, encontraron que la transpiración máxima de la especie estaba limitada por su índice de área foliar (LAI).

En Brasil, Soares & Almeida (2001) concluyeron, para plantaciones en Costa Atlántica con *Eucalyptus grandis*, donde hubo un déficit de transpiración de alrededor de 125 mm, provocado por la concentración de precipitaciones durante primavera y verano, y un período seco más prolongado en otoño e invierno; el flujo ascendente de agua desde la zona debajo de las raíces ayudó a evitar que los estomas se cerraran y mantuvo la plantación de eucaliptos en aproximadamente un 30% de su potencial al final de la estación seca. En este caso, se puede observar que la transpiración disminuye significativamente al aumentar el déficit hídrico del suelo. Para esta misma región, Mielke (1999) muestra que el intercambio de vapor de agua de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* está fuertemente dominado por el déficit de vapor de presión regional y que la transpiración del dosel está controlada principalmente por la conductancia estomática.

2.4.9 Productividad forestal y eficiencia en el uso del agua

Los bosques usan agua en cantidades variables y están influenciados por una gran cantidad de factores, incluidas las condiciones climáticas, los tipos de suelo y la tasa de crecimiento. Para Cannell (1999), las diferencias en la transpiración entre los tipos de bosque generalmente se relacionan positivamente con el volumen de producción, es decir, para condiciones climáticas y nutricionales comparables, mientras más agua transpira, mayor es la tasa de crecimiento de los árboles. De acuerdo con Whitehead & Beadle (2004), existe un alto potencial de productividad para un gran número de especies, que resulta de altos valores de índice de área foliar, conductancia estomática y tasa fotosintética, en condiciones

donde el agua y los nutrientes están fácilmente disponibles. . En cambio, en sitios donde el suministro de agua y nutrientes es limitado o se registran temperaturas extremas, la productividad es inferior a la potencial.

El trabajo de Stape y otros (2004), ofrece una mejor comprensión de la relación entre el agua y la productividad. Los autores, al estudiar la producción de eucalipto en un gradiente regional en Brasil, encontraron que la precipitación (mm año⁻¹) era la variable ambiental más fuertemente relacionada con el incremento anual medio (IMA-Mg ha⁻¹ año⁻¹) y la producción de biomasa aérea (producción primaria neta – NPP-Mg ha⁻¹ año⁻¹), lo que indica que el suministro de agua es probablemente la fuente principal que controla la productividad en las regiones tropicales. Por ejemplo, por cada 100 mm por año de incremento de lluvia, la productividad aumentó en 2,3 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Las parcelas más productivas utilizaron más agua (869 mm año⁻¹), pero también fueron las más eficientes en el uso de este recurso (3,21 kg de NPP por m³ de agua transpirada). El aumento de la precipitación también aumenta indirectamente la eficiencia del uso de la luz y el nitrógeno al aumentar su eficiencia de captura. Otros estudios realizados en Brasil por Almeida (2004) y en Sudáfrica por DYE (1996), muestran que la precipitación y el déficit de presión de vapor pueden reducir el crecimiento de las plantaciones de eucalipto; la distribución de la precipitación afecta la disponibilidad del agua en el suelo y el déficit de presión de vapor pueden restringir el crecimiento por sus efectos sobre los estomas.

Las teorías eco hidrológicas y la evidencia experimental sugieren una estrecha relación entre la precipitación y el índice de área foliar, y tarde o temprano las plantaciones alcanzan un área foliar y un uso del agua en equilibrio dinámico con la disponibilidad de agua y es independiente del número de árboles o del raleo (Hatton, 1998; Mcjannet & Vertessy, 2001; Ellis *et al.*, 2005).

El déficit hídrico del suelo afecta el uso del agua, ya que los árboles utilizan preferentemente el agua en la capa superior (hasta 1 metro) del suelo, donde se concentran las raíces finas responsables de la absorción de agua. Jarosz (2008), al evaluar la respuesta de una plantación de *Pinus pinaster* en Francia, concluye que la eficiencia del uso del agua aumenta en verano con el aumento del déficit de agua del suelo y disminuye con el aumento del déficit de vapor de presión. El dosel de los pinos utiliza el agua de manera más eficiente que el sub-dosel, cuya

contribución al uso eficiente del agua de todo el ecosistema es baja. Por lo tanto, las plantas por control de estomas utilizan el agua de manera más eficiente cuando la disponibilidad es menor, un sistema adoptado por otras especies, incluido el ser humano.

Los datos sobre eficiencia en el uso del agua, publicados en Europa por Schrelzenmayr (1981), muestran que para la producción de 1 gramo de biomasa *Pinus silvestre* utiliza 344 g de agua, *Picea abies* necesita 300 g y *Fagus silvatica* 169 g de agua. En Brasil, Lima (1993) describe que la eficiencia en el uso del agua en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, *Pinus caribaea var. hondurensis* y vegetación de Cerrado, en gramos de madera por kilogramo de agua consumida fueron 2.9, 2.1 y 0.4, respectivamente. Según los autores, sin tener en cuenta las pérdidas por interceptación, la plantación de eucalipto utilizó aproximadamente 215 mm más de agua por año que la vegetación de sabana natural. Según Whitehead & Beadle (2004), los altos valores de taxa (masa – área) y contenido de nitrógeno para las poblaciones de eucaliptos de sitios áridos sugieren que la alta eficiencia en el uso del agua se atribuye principalmente a la alta capacidad fotosintética.

2.4.10. Los bosques tropicales

Según EEM (2005). Los bosques tropicales juegan un papel especial en la conservación de la diversidad biológica. Sus ecosistemas albergan el 70% de las especies de plantas vasculares, el 30% de todas las especies de aves y el 90% de los invertebrados. Solo en términos de especies de árboles, los bosques tropicales son extremadamente diversos y, a menudo, contienen más de 200 especies por hectárea.

La importancia ecosistémica de los bosques tropicales radica en la variabilidad de los hábitats que poseen, lo que los convierte, en términos de biodiversidad, en los más ricos y diversos de la Tierra (Myers *et al.*, 1999).

2.5. Principales formaciones vegetales en el Departamento de Conservación La Melba

Las formaciones vegetales de este sector son: pluvisilva de baja altitud sobre complejo metamórfico, pluvisilva de baja altitud y submontana sobre ofiolitas (pluvisilva esclerófila), pluvisilva submontana sobre suelos de mal drenaje, bosque

siempreverde micrófilo calcifobo, bosque de galería, pinares de *Pinus cubensis*, charrascales de baja altitud, charrascales nublados, matorral de galería, herbazal de galería, vegetación cultural, y vegetación secundaria. Fong, *et al.* (2005)

MATERIALES Y MÉTODOS

WVLEBIVTEZ X VELODOZ

III. Materiales y Métodos

3.1. Ubicación del área de estudio

El trabajo se desarrolló en un bosque pluvisilva montano sobre suelos de mal drenaje, en el Departamento de Conservación La Melba, ubicado al sureste del poblado de Moa, Holguín, en la fecha comprendida de enero a diciembre de 2022.

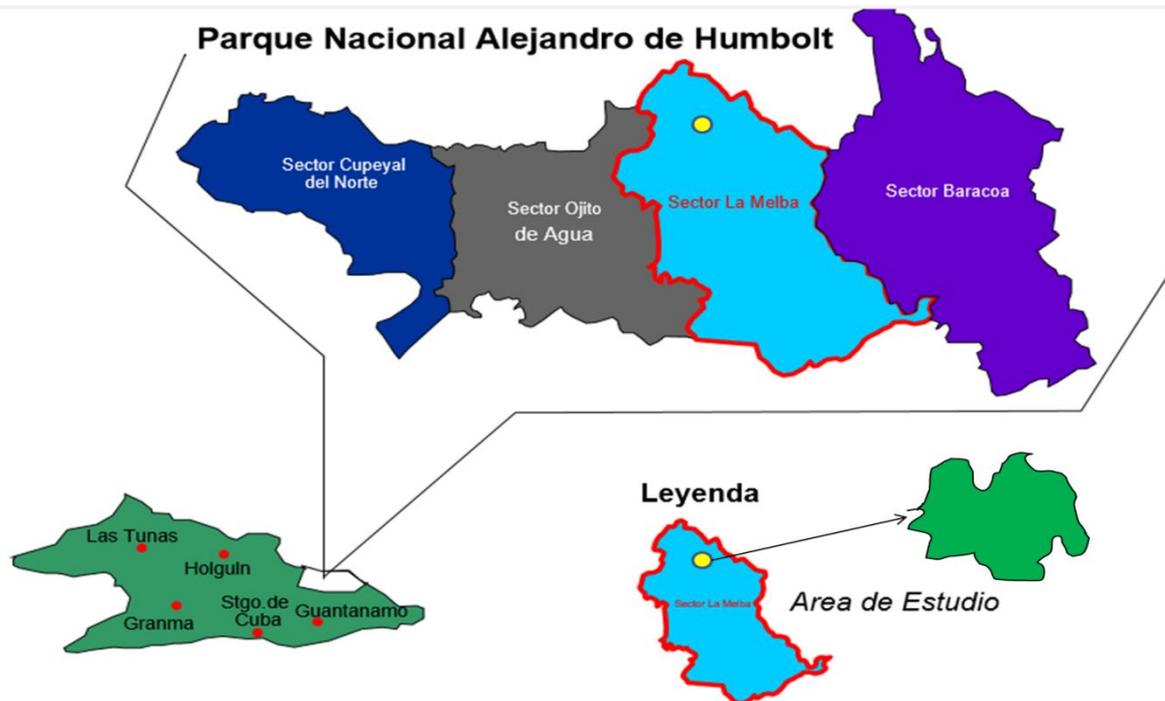


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Tomada de Mojena 2009)

3.2 Características climáticas

El clima es de tipo tropical lluvioso. Los niveles de pluviosidad oscilan entre 1 800 y 4 000 mm anuales y la temporada más lluviosa es octubre-noviembre. Las temperaturas son algo más cálidas en comparación con los sectores más occidentales (Cupeyal del Norte y Ojito de Agua) (Begué y Larramendi, 2013)

3.3 Características de la vegetación

La vegetación está representada por siete formaciones. Por su extensión y representatividad, se destacan las pluvisilvas de baja altitud (de 0 a 400 msnm), las pluvisilvas submontanas (de 400 a 800 msnm), los pinares, las pluvisilvas montanas (más de 900 msnm), los bosques siempreverdes mesófilos y el matorral xeromorfo subespinoso sobre serpentina (charrascal). (Begué y Larramendi, 2013)

3.4. Metodología empleada para el cálculo del Balance Hídrico

3.4.1 Capacidad máxima de agua disponible

Una vez que el objetivo es evaluar el comportamiento del balance hídrico en el bosque pluvisilva montano, es impredecible saber cuál es la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener en forma líquida. A esa grandeza se le denomina Capacidad Máxima de agua disponible (CAD), la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$CAD = \frac{(CC - PMP) * Da * z}{10}$$

Donde:

CAD = capacidad máxima de agua disponible (mm);

CC = capacidad de campo (%peso);

PMP = punto de marchitez permanente (%peso);

Da = densidad aparente del suelo (g/cm³);

z = profundidad efectiva del sistema radicular de la vegetación (cm).

Para realizar dicho cálculo Costa, *et al.*, (1994) resumieron algunas propiedades físicas de diversos tipos de suelos (Tabla 1). Que son necesarias para tener con mayor certeza la cantidad de agua almacenada en el suelo.

Tabla 1. Propiedades físicas representativas de algunos tipos de suelos y sus rangos de variación.

Textura del suelo	Da (g/cm ³)	CC (%peso)	PMP (%peso)
Arenoso	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	4 (2-6)
Franco arenoso	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 (4-8)
Franco	1,40 (1,35-1,50)	22(18-26)	10 (8-12)
Franco arcilloso	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	13 (11-15)
Siltoso arcilloso	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)

Arcilloso	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)
------------------	-------------------------	-------------------	-------------------

Tabla 2. Valores de la profundidad efectiva (**Z**) para adecuar el cálculo del balance hídrico en función de la textura del suelo y el tipo de cultivo:

Textura	Cultivos someros	Cultivos profundos	Árboles frutales y forestales
Arcilloso	100	250	250

3.4.2. Cálculo del Balance hídrico según el método de Thornthwaite y Mather (1955)

Determinar el balance hídrico de un bosque pluvisilva es en esencia, resolver la ecuación de la continuidad para ese bosque, considerándose como un sistema formado por una vegetación variada, y su relación directa con el suelo, donde se asume el agua como un fluido incomprensible “la diferencia entre la cantidad que entra en el sistema y la que sale del mismo sistema es igual a la variación del almacenamiento de agua en este sistema”. De forma analítica se describe de la siguiente forma:

$$\Delta A = E - S \text{ (eq.2)}$$

Donde:

E = entrada de agua en el sistema;

S = salida de agua del sistema;

ΔA = variación del almacenamiento de agua del sistema.

Si se considera apenas el movimiento vertical del agua, lo que entra en este sistema es apenas el agua debido a la precipitación (P), en cuanto la que sale es debido a la evapotranspiración (ETR) y el agua que percola por debajo del sistema radicular de la vegetación es denominada también exceso hídrico (EXC). Se describe en la eq.2 de la forma:

$$ALT = P - (ETR + EXC) \text{ o } P = ETRA + EXC + ALT$$

Donde:

P = precipitación media mensual (mm);

ETR = evapotranspiración real media mensual (mm);

EXC = excesos hídricos, representando la percolación debajo del sistema radicular (mm);

ALT = alteración de la humedad del suelo (ARM), del último día del mes anterior para el último día del mes en estudio.

3.4.3 Modelo para retirada del agua del suelo

El agua del suelo está sujeta a acciones de diversas fuerzas, dentro de las cuales las más importantes son:

- Tensión superficial, que es la responsable de la atracción entre las partículas del suelo y las moléculas de agua;
- Fuerza gravitacional: responsable de la percolación del agua;
- Fuerza de succión de las raíces.

Para calcular la humedad del suelo, si no hubiera aumento de la resistencia del suelo a la pérdida de agua, o sea, si la resistencia fuera siempre aquella en que el suelo está a capacidad de campo. En la práctica ese valor es determinado por la sumatoria de las diferencias de (P-ETP) mensual en la época seca, donde este valor siempre es negativo. Por esa razón, este valor es llamado Negativo Acumulado (Neg. Ac.):

Neg.Ac. = $\Sigma(P-ETP)$; en caso de que (P-ETP) ser negativo, se determina el almacenamiento de agua en el suelo (ARM) por la siguiente ecuación:

$$ARM = CADe^{(Neg.Ac./CAD)}$$

Para el cálculo del Balance hídrico se llevará a cabo un total de 16 pasos, los cuales se relacionan a continuación:

- **1^{er} Paso:**

Determinar los valores de Temperatura (T) y precipitación (P) para el periodo a evaluar.

- **2^{do} Paso:**

Determinar las medias de temperatura y precipitación del periodo a evaluar.

- **3^{er} Paso:**

Calcular el valor del índice térmico anual (**I**), utilizando a siguiente ecuación:

$$I = 1,049 * (T_{anual})^{1,514}$$

Donde:

I = índice térmico anual (-);

T_{anual} = temperatura media anual.

- **4^{to} Paso:**

Calcular el valor de la constante “ α ” que depende del sitio o local de estudio, utilizando a siguiente ecuación:

$$\alpha = (6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239$$

- **5^{to} Paso:**

Calcular la evapotranspiración potencial (EP), utilizando la siguiente ecuación:

$$EP = 16 \left(\frac{t_i}{I} \right)^a$$

Donde:

EP = evapotranspiración potencial (mm);

t_i = temperatura media mensual (°C);

I = índice térmico anual (-);

a = constante que depende del sitio o área de estudio (-).

- **6^{to} Paso:**

Determinar la corrección (Corr) teniendo en cuenta los valores presentes en la tabla 3.2. Para este estudio se tendrá en cuenta la Latitud 20°S

Tabla 3. Valores constantes para la corrección teniendo en cuenta las latitudes y los meses del año,

Lat.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
-------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	------------	------------	------------

0°S	1,03	0,93	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03
2°S	1,04	0,94	1,04	1,00	1,03	0,99	1,02	1,02	0,99	1,03	1,00	1,04
4°S	1,05	0,95	1,04	1,00	1,03	0,98	1,01	1,02	0,99	1,03	1,01	1,05
6°S	1,06	0,96	1,05	1,00	1,02	0,98	1,00	1,01	0,98	1,03	1,01	1,06
8°S	1,07	0,97	1,06	1,00	1,02	0,97	0,99	1,00	0,98	1,03	1,01	1,06
10°S	1,08	0,97	1,06	1,00	1,01	0,96	0,98	0,99	0,97	1,03	1,02	1,07
12°S	1,09	0,98	1,07	1,01	1,01	0,95	0,97	0,98	0,97	1,02	1,02	1,08
14°S	1,10	0,99	1,07	1,01	1,01	0,95	0,96	0,97	0,96	1,02	1,02	1,09
16°S	1,12	1,00	1,08	1,01	1,00	0,94	0,95	0,96	0,95	1,02	1,03	1,10
18°S	1,13	1,01	1,09	1,01	1,00	0,93	0,94	0,95	0,95	1,02	1,03	1,10
20°S	1,14	1,02	1,09	1,01	0,99	0,92	0,93	0,94	0,94	1,02	1,03	1,11
22°S	1,15	1,03	1,10	1,01	0,99	0,91	0,92	0,93	0,93	1,02	1,04	1,12
24°S	1,16	1,04	1,10	1,01	0,98	0,90	0,91	0,92	0,93	1,02	1,04	1,13
26°S	1,17	1,05	1,11	1,01	0,98	0,89	0,89	0,91	0,92	1,01	1,05	1,14
28°S	1,19	1,06	1,12	1,01	0,98	0,88	0,88	0,89	0,91	1,01	1,05	1,15
30°S	1,20	1,07	1,13	1,02	0,90	0,87	0,87	0,88	0,91	1,01	1,05	1,16

- **7^{mo} Paso:**

Determinar la evapotranspiración potencial corregida (ETP) utilizando la siguiente ecuación:

$$ETP = EP * Corr$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial corregida (mm).

- **8^{vo} Paso:**

Determinar los valores de precipitación menos la evapotranspiración corregida (P-ETP).

- **9^{no} Paso:**

Calcular la capacidad de agua disponible (CAD), utilizando la siguiente ecuación:

$$CAD = \frac{(CC - PMP) * Da * z}{10}$$

- **10^{mo} Paso:**

Determinar el negativo acumulado (Neg.Ac), de acuerdo con los siguientes criterios:

- Si $P - ETP \geq 0$ Neg.Ac = 0
- Si $P - ETP < 0$ Neg.Ac = Neg.Ac_{i-1} + (P - ETP)

- **11^{no} Paso:**

Calcular el **almacenamiento de agua en el suelo (ARM)**, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Se NegAc = 0 ARM = CAD
- Se NegAc < 0 ARM = CAD ^[Neg. Ac./CAD]

- **12^{mo} Paso:**

Calcular la alteración de la humedad del suelo (ALT), utilizando la siguiente ecuación:

$$ALT = ARM_i - ARM_{i-1}$$

- **13^{mo} Paso:**

Calcular la Evapotranspiración real (ETR) de acuerdo con los siguientes criterios:

a) Estación seca:

- Si $(P - ETP) \geq 0$ $ETR = ETP$
- Si $(P - ETP) < 0$ $ETR = P - ALT$

- **14° Paso:**

Determinar la deficiencia hídrica (DEF), utilizando la siguiente ecuación:

$$DEF = ETP - ETR$$

- **15° Paso:**

Calcular el excedente hídrico (EXC), teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Cuando $(P - ETP) > 0$ y $ARM = CAD$

$$EXC = (P - ETP) - ALT$$

- **16o Paso:**

Determinar la reposición de agua (R) de acuerdo con los siguientes criterios:

- Si $ALT \leq 0$ $R = ETR$
- Si $ALT > 0$ $R = ETR + ALT$

3.4.4. Conferencias para validar los resultados del Balance hídrico

Para validar el balance hídrico se hace necesario realizar las siguientes conferencias:

- ✓ $\Sigma ALT = 0$
- ✓ $\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF$
- ✓ $\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC$
- ✓ $\Sigma P = \Sigma ETP + (P - ETP)$

3.5 Procesamiento matemático de los datos

Para el procesamiento de los datos del balance hídrico se elaboró una base de datos en el programa de Microsoft Excel, donde se calcularon cada uno de los parámetros hidrológicos para el bosque pluvisilva montano, perteneciente al Departamento de Conservación La Melba, mediante la metodología de

Thornthwaite y Mather, 1955. Usando además el Software InnerSoft Balance Hídrico ISBH v0.7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comportamiento de las variables climáticas del bosque pluvisilva de montaña en el Departamento de Conservación La Melba, durante el periodo 2010-2020

La figura 2 muestra los resultados de la temperatura media en el departamento de conservación La Melba, durante el periodo 2010-2020, donde se puede apreciar que los valores oscilan entre 23,45 y 27,64°C, siendo enero el mes de más bajo valor y Julio el mes de mayor valor.

Estos resultados difieren con los obtenidos por Caraballo(2019), en un n bosque pluvisilva submontano en el departamento de conservación Cupeyal del Norte, donde los valores oscilan entre 20,1 y 25,4°C, manteniendo un comportamiento estable durante las diferentes épocas del año, en este caso los valores más bajos se muestran entre los meses de enero y abril ya que coincide con los meses donde más bajos valores se registran de las temperaturas mínimas, siendo además los meses más fríos para la zona en estudio

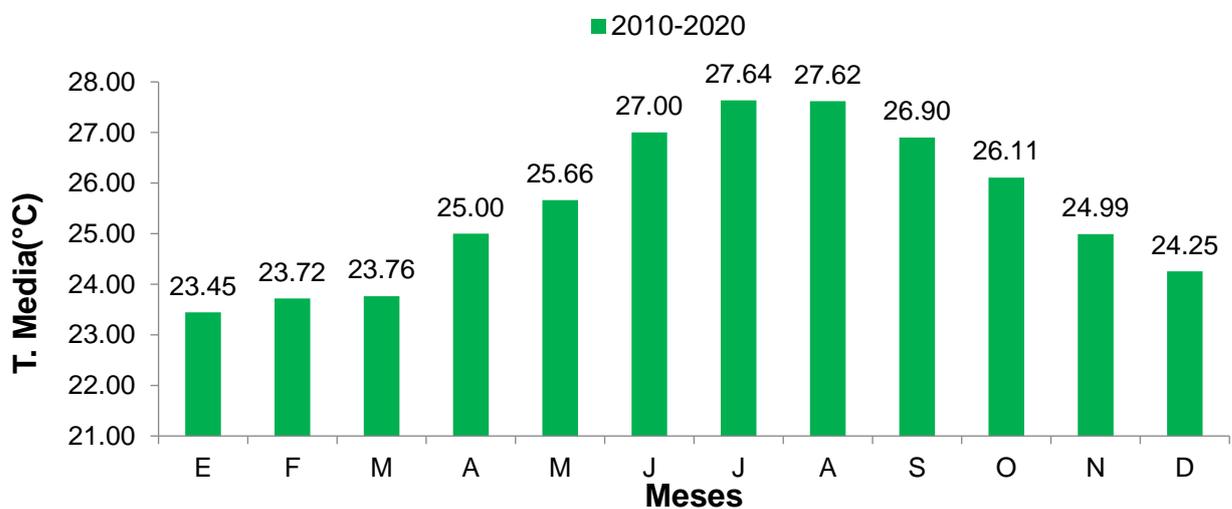


Figura 2. Comportamiento de las temperaturas medias durante el periodo 2010 – 2020 en el departamento de conservación La Melba

En la figura 3 se muestran los resultados de las temperaturas máximas medias del bosque pluvisilva montano en el Departamento de Conservación La Melba, durante el periodo 2010-2020, donde se puede apreciar que los valores varían entre 27,25 y 31,84°C, estableciéndose una diferencia de 4,59°C entre los meses

de menor valor y los de mayor valor, siendo el mes de enero el de menor valor y el mes de agosto el de más alto valor. Estos valores son similares a los expuesto por Fong, et al, 2005, donde plantean que la diferencia en temperatura entre los meses más fríos (enero y febrero) y los más cálidos (julio y agosto) oscilan entre 4° y 5°C.

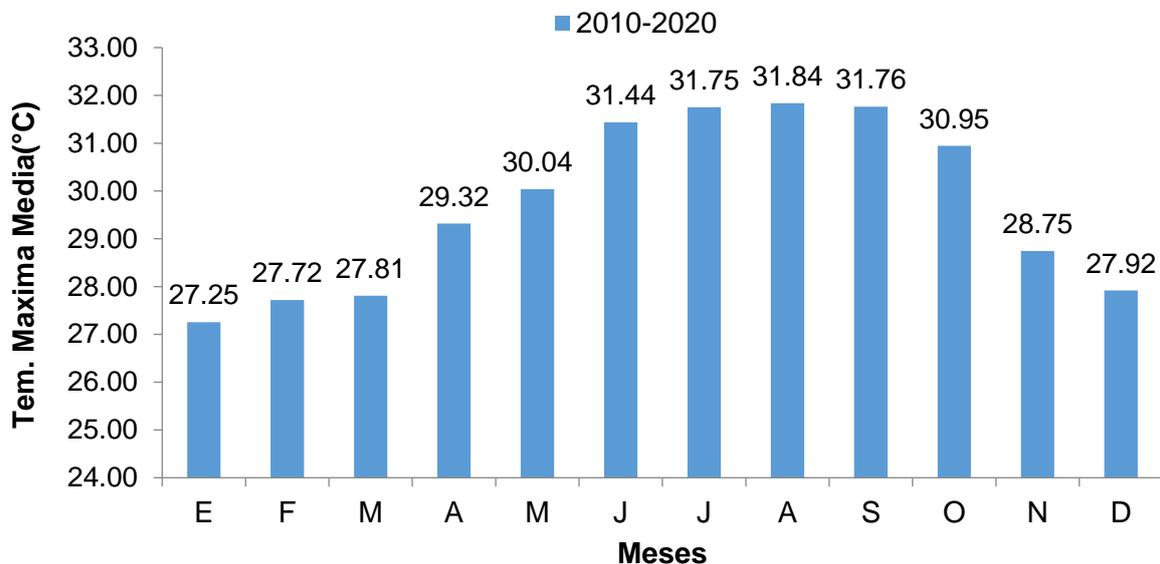


Figura 3. Comportamiento de las temperaturas máximas medias durante el periodo 2010-2020, en el departamento de conservación La Melba.

La figura 4 muestra los resultados de la temperatura mínima en el departamento de conservación La Melba durante el periodo de 2010-2020, donde se observa que los meses más fríos son los meses de Enero, Febrero y Marzo, siendo este ultimo el mes de menor valor en el área en estudio con 19,96°C, y el mes de Julio presentando el mayor valor con 23,91°C en dicha área. Estos resultados difieren con los planteados por Caraballo (2019) en un bosque pluvial submontano, en estos las temperaturas mínimas varían desde 14,65 hasta 17,12°C, siendo los meses de enero a marzo los de más bajo valor. El mismo autor plante a que el resto de los meses hay una estabilidad en cuanto a los valores mínimos alcanzados, oscilando entre 17,63 y 18,83°C.

Según Giraldo (2002), citado por Caraballo (2019) plantean que de forma general la temperatura es un factor influyente en el microclima del bosque, la cual a su vez es dependiente de los valores de radiación incidente. Según Richards (1952) el sotobosque exhibe un rango de temperatura más pequeño que los niveles superiores del bosque, debido a que las temperaturas mínimas presentan poca

variación con el perfil del bosque. Se presenta un gradiente de temperatura a partir de los estratos inferiores, puesto que la temperatura en las horas del medio día llega a ser 2 o 3 grados más bajas en el sotobosque que en las copas de los árboles del estrato superior.

Varios investigadores han realizado estudios sobre el comportamiento de la temperatura en bosques húmedos tropicales: Cachan y Duvan (1963), Schultz (1960), Longman y Jenik (1970). Hardy (1970) afirma que cuando se elimina la cobertura forestal la temperatura media anual del aire incrementa en $0,9^{\circ}\text{C}$, la temperatura media máxima del aire aumenta 6°C en época seca y $4,3^{\circ}\text{C}$ en época húmeda, la fluctuación media diaria de la temperatura del aire aumenta de $9,7^{\circ}\text{C}$ a 18°C .

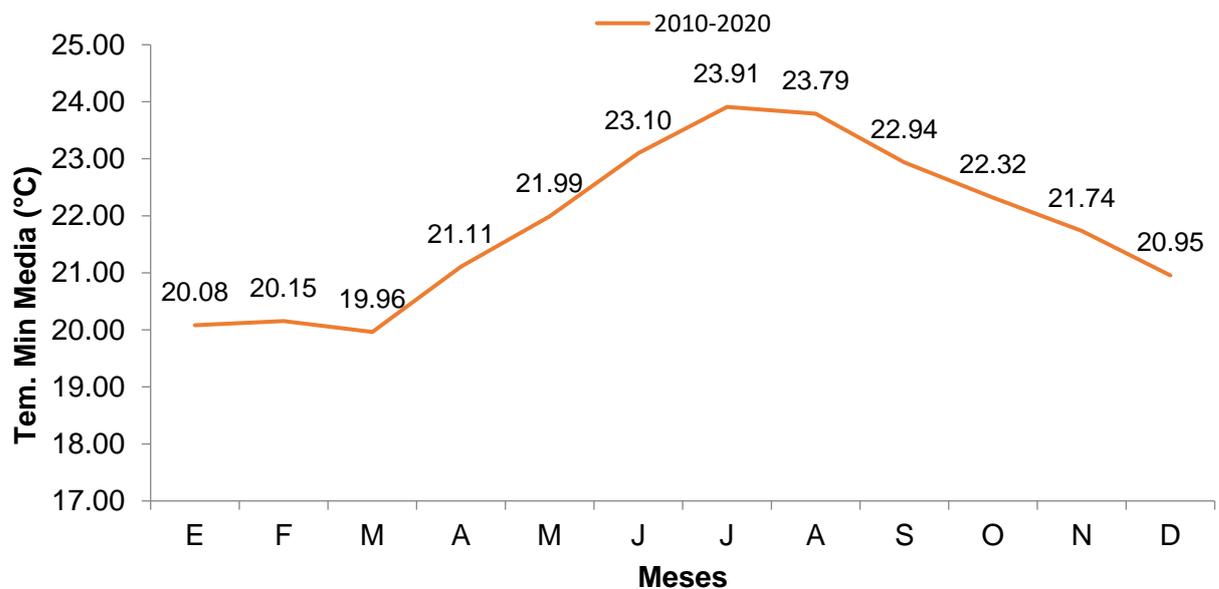


Figura 4. Comportamiento de las temperaturas mínimas en el departamento de conservación La Melba durante el periodo 2010-2020.

Las precipitaciones es una de las variables más importantes a tener en cuenta a la hora de analizar el desarrollo de las distintas formaciones boscosas. La figura 5 muestra el comportamiento de las precipitaciones en el periodo comprendido entre 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba. Donde se observa que en el mes de Febrero fue el mes donde cayó el menor nivel de precipitación con un valor de $20,36\text{mm}$ y el mes que tuvo mayor nivel de precipitación fue el mes de Octubre con $136,73\text{mm}$. Caraballo (2019), plantea que

el estudio de las precipitaciones en los bosques es de gran importancia a la hora de evaluar el balance hídrico, sobre todo en el desarrollo de las plantas que más precisan de este preciado recurso para el desarrollo de todos sus procesos fisiológicos, que como seres vivos participan en la condensación de la lluvia, la evaporación y regulan el régimen hidrológico de los ríos.

Según Giraldo (2002), plantea que hay que referirse al papel del bosque sobre la cantidad de agua que cae en forma de precipitación sobre un área. Sobre este tópico es necesario analizar las diversas tendencias y evidencias de los investigadores, con un enfoque a escala de macro circulación o escala regional y a micro escala, para no acceder a argumentos simplistas o triviales de que la sola presencia de los bosques aumenta la cantidad de lluvia en un área.

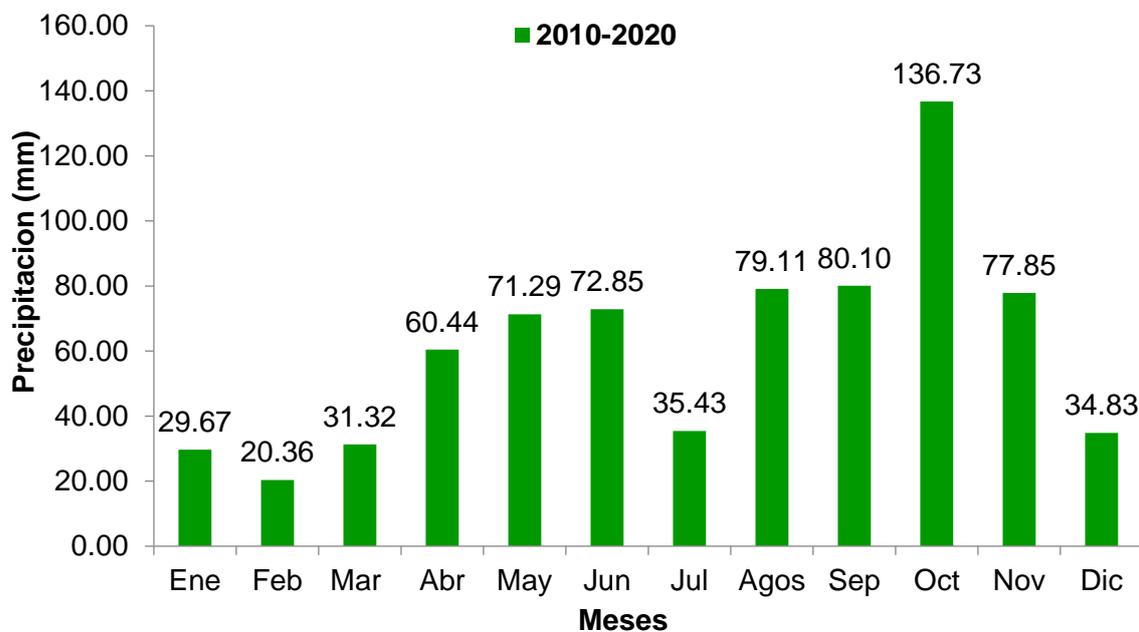


Figura 5. Comportamiento de las precipitaciones en el Departamento de Conservación La Melba en el periodo de 2010-2020.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la Humedad Relativa Media en el Departamento de Conservación La Melba en el periodo 2010-2020. Donde se observa que el mes con el mayor por ciento de humedad es el mes de octubre y el de menor por ciento es el mes de marzo con valores de 82,00% y 74,36% respectivamente.

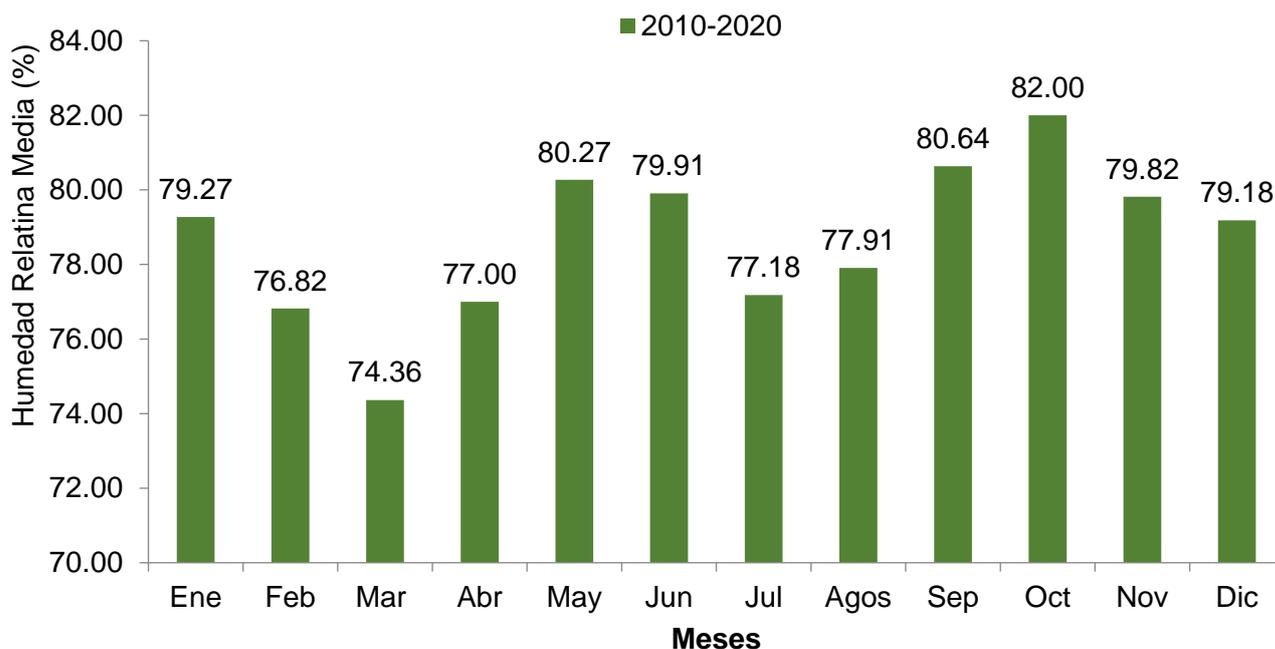


Figura 6. Comportamiento de la Humedad Relativa Media en el Departamento de Conservación La Melba en el periodo 2010-2020.

La figura 7 muestra las características climáticas del departamento de conservación La Melba, en la serie desde el año 2010 hasta el 2020, (con datos de 10 años de evaluación sistemática). La estación está a una altitud de 800 msnm, con temperatura máxima absoluta de 32,8°C, mínima absoluta de 21,2°C y máxima media anual de 28.5°C. La mínima media anual es de 17,1°C, mientras las precipitaciones promedio anual presentan niveles de pluviosidad que oscilan entre 1 800 y 4 000 mm anuales, la temporada más lluviosa es octubre-noviembre.

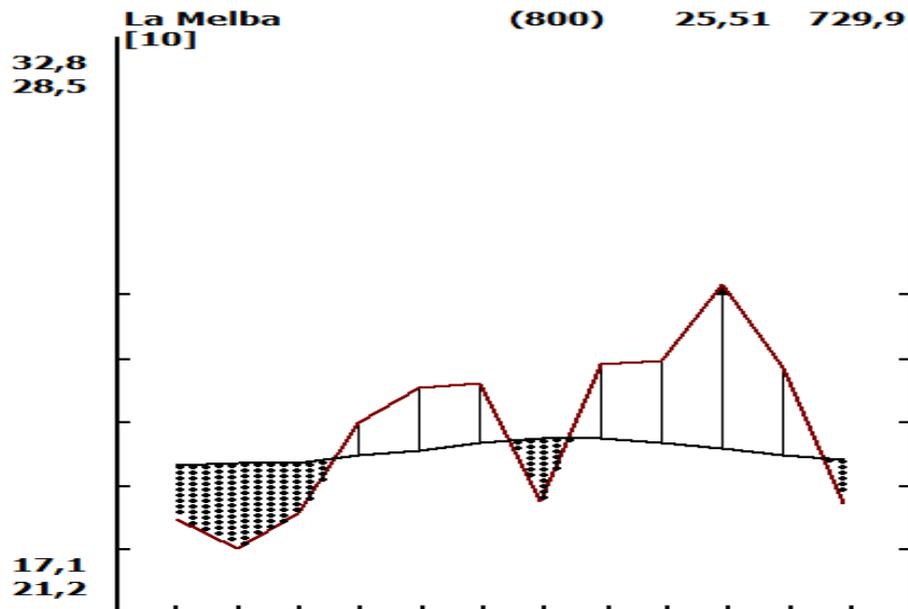


Figura 7. Climodiagrama del Departamento de Conservación La Melba, con una serie de datos de 10 años (desde el 2010 hasta 2020). **Fuente:** Elaborado por el autor

4.2. Variables que componen el balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020

La figura 8 muestra el comportamiento de las Precipitaciones (P) menos la evapotranspiración potencia corregida (ETPc) durante el periodo comprendido de 2010-2020, donde se puede apreciar que los niveles de precipitación siempre fueron superior a la evapotranspiración potencial corregida, en este sentido se muestra que el mes de octubre fue el de mayor acumulado de esta diferencia con un total de 136,67 mm seguido de septiembre con 80,05 mm, El resto de los meses presentan valores por debajo de 80mm.

Es válido destacar que esta relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial corregida es uno de los principales fenómenos que propicia el buen desarrollo del ciclo hidrológico.

Según Pires (2003) la evapotranspiración potencial (ETP) es un elemento meteorológico normal, representando a la precipitación necesaria para atender la necesidad meteorológica de agua en la cubierta vegetal, es además la cantidad de agua máxima que se puede evaporar de una superficie con disponibilidad de agua para la realización de la vaporización.

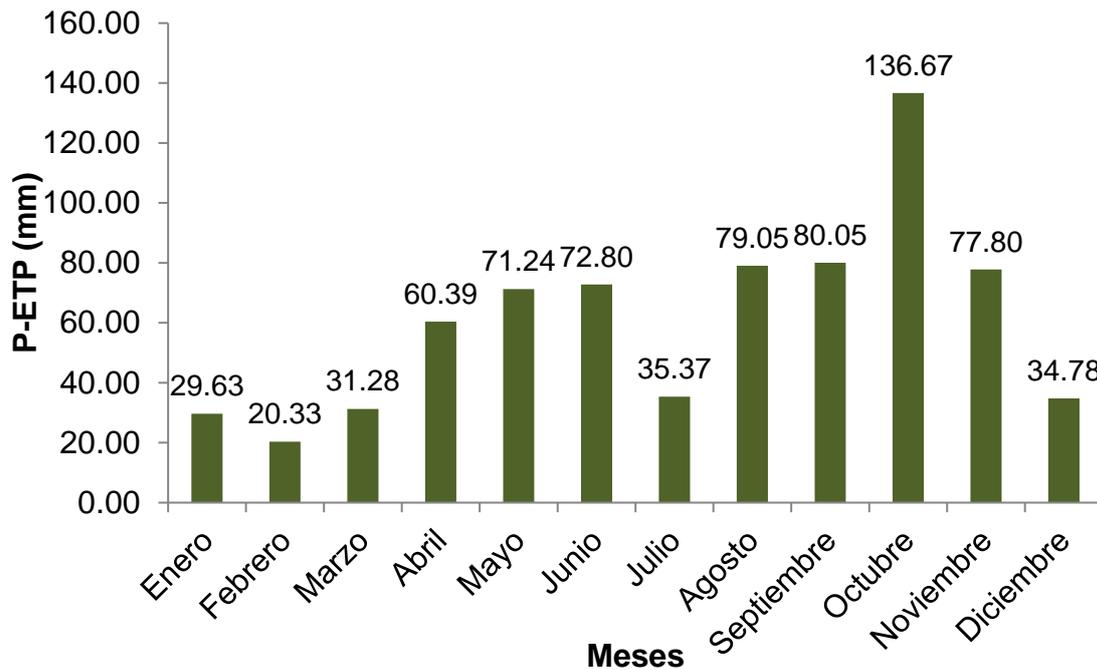


Figura 8. Comportamiento de las Precipitaciones (P) menos la evapotranspiración potencia corregida (ETPc) durante el periodo comprendido de 2010-2020.

El conocimiento de la evapotranspiración real (ETR) es fundamental en cuestiones relacionadas al balance hídrico y al ciclo hidrológico de los bosques. A través de los procesos de evaporación y transpiración, el bosque cumple papel importantísimo en este reciclaje de agua hacia la atmósfera. La figura 9 muestra el comportamiento de Evapotranspiración real (ETR) en el periodo de 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba, donde se observa que los valores varían desde 0,04 hasta 0,06 mm, siendo el mes de julio y agosto los de mayor pérdida. En este caso se aclara que la ETR adquiere los mismos valores de la ETP, ya que $(P - ETP)$ siempre fue ≥ 0 .

La transpiración es considerada un proceso secundario inevitable, resultado de la necesidad de la apertura estomática para realizar fotosíntesis en horas del día en la cual el déficit de presión de vapor es mayor (Schulze et al. 1987; Larcher (2003)). Sin embargo, Snyder et al. (2003) encontraron plantas en varios hábitats, con diferentes formas de vida y metabolismo fotosintético (C3 y C4), que presentan tasas de transpiración y conductancia estomática significativa en las horas de la noche.

Según Giraldo (2002), plantea a que muchos investigadores que han creído que todas las actividades del uso del suelo que propician un aumento de la

evaporación pueden contribuir también a un incremento local de la precipitación. En forma similar, a partir de observaciones de que la precipitación media es en general mayor en áreas con bosque que en áreas descubiertas; esto ha sugerido que el bosque contribuye a un aumento de la precipitación local a través del ciclo de las lluvias por el proceso de evapotranspiración.

Lima (1986), citado por Caraballo (2019) discute al respecto, las referencias, según las cuales, debido a la mayor tasa de evapotranspiración, se constituyen como fuentes importantes de la humedad de la atmósfera, causando, consecuentemente, un aumento de la precipitación.

Según Lima (1985), la transpiración de la mayoría de las especies vegetales está determinada por la demanda climática relacionada con la radiación solar, el déficit de saturación de vapor de la atmósfera, la temperatura y la velocidad del viento, los mecanismos fisiológicos relacionados con la respuesta estomática a factores ambientales, el índice de área foliar y la disponibilidad de agua en el suelo.

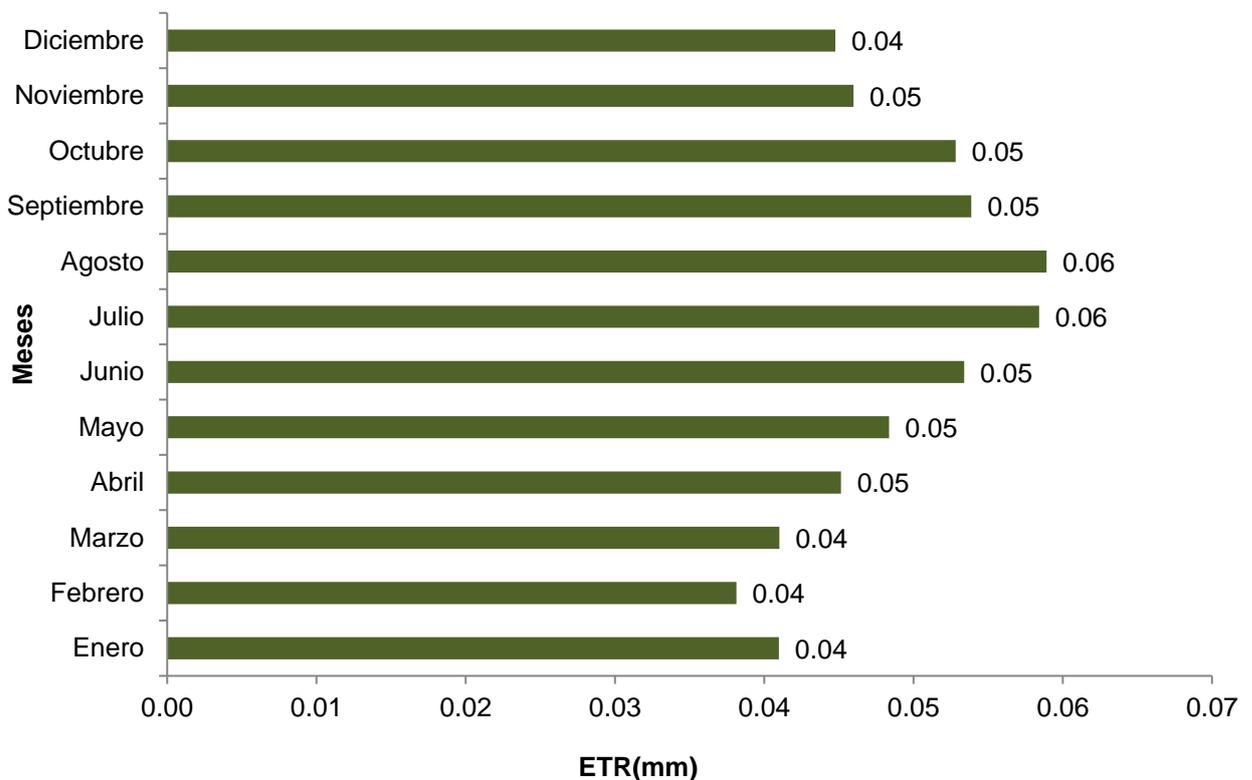


Figura 9. Comportamiento de Evapotranspiración real (ETR) en el periodo de 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba.

En la figura 10 se muestran los resultados del comportamiento de Evapotranspiración potencial (EP) y la Evapotranspiración Potencial Corregida (ETPc), durante el periodo de 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba, evidenciándose una pequeña diferencia, aunque no significativa, entre la secuencia de los meses, estos valores varían dese 0,036 hasta 0,063 mm en el caso de la Evapotranspiración potencial (EP), y de 0,038 hasta 0,059mm en el caso de la evapotranspiración potencial corregida (ETP). Esta diferencia entre las evapotranspiraciones se debe fundamentalmente a que se tiene en cuenta el factor de corrección que corresponde a la ubicación geográfica del sitio donde se realiza el balance hídrico.

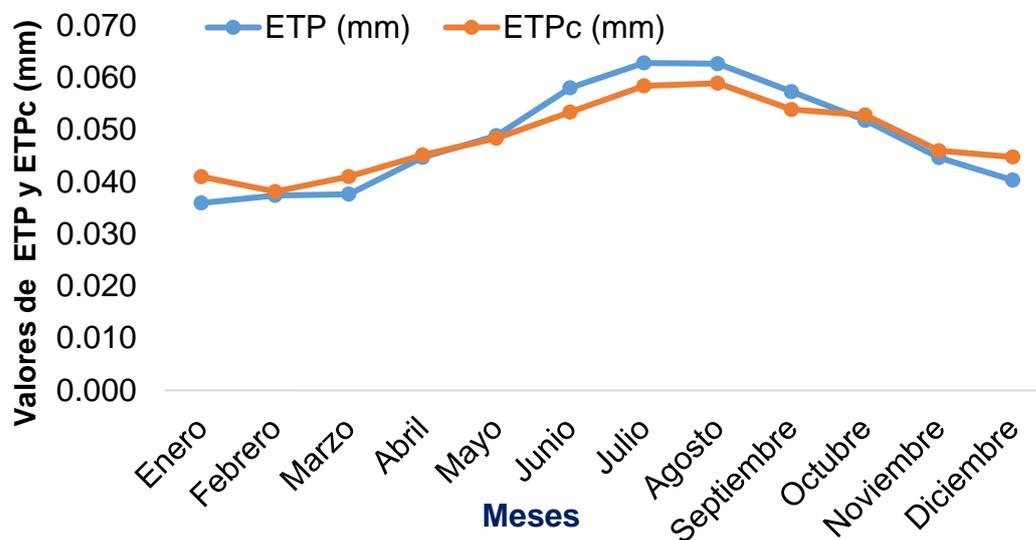


Figura 10. Comportamiento de Evapotranspiración potencial (EP) y la Evapotranspiración Potencial Corregida (ETPc), durante el periodo de 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba.

En la figura 11 se presentan los resultados del comportamiento del Excedente (EXC) de agua en el Bosque pluvial de montaña en el departamento de Conservación La Melba. En este caso los valores son variados, en el caso donde se presentan mayores excedentes se encuentra el mes de octubre (136,67mm), septiembre (80,05mm), los de menor excedente son febrero (20,33mm), enero (29,63mm). En este caso los valores del excedente coinciden con los resultados de $(P-ETP)$ - ALT puesto que la $(P - ETP) > 0$ y el almacenamiento de agua (ARM) es igual a la capacidad de agua disponible en el suelo (CAD).

Estos resultados coinciden con lo planteado por Caraballo (2019), que la hora de analizar la relación que existe entre el déficit y el excedente de agua, es importante tener en cuenta que los bosques reciben un alto por ciento de precipitación durante todo el año, lo que es muy difícil que exista déficit de agua en algún periodo del año.

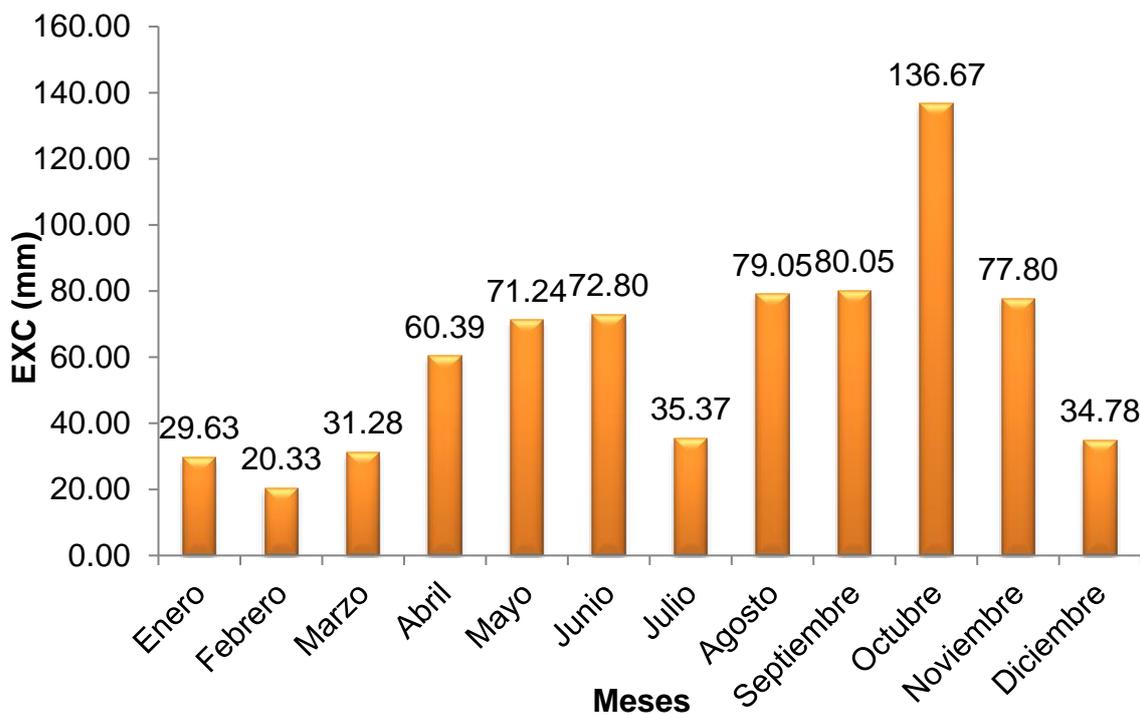


Figura 11. Comportamiento del Excedente (EXC) de agua en el Bosque pluvisilva de montaña en el departamento de Conservación La Melba.

4.3. Variables más afectadas del balance hídrico durante el periodo 2010-2020 en el bosque pluvisilva de montaña en el departamento de conservación la Melba

En la tabla 4 se muestran las variables afectadas por el balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba, en este caso el almacenamiento de agua (ARM) es igual a 562,5mm para todos los meses, valores que son iguales a la capacidad de agua disponible en el suelo (CDA) teniendo en cuenta que el Negativo acumulado (NegAc) es igual a cero (0) para el periodo que se evalúa. En el caso del déficit (DEF) toma valor cero (0) para todos los meses teniendo en cuenta que la reserva

(R) de agua es mayor que cero en este caso, y existe alto contenido de agua almacenada.

El concepto de Reserva de Agua (R) alude a la cantidad de agua que puede retener el suelo y que es susceptible de ser evaporada o consumida por la vegetación. Las plantas precisan, para vivir, que en su zona radicular exista oxígeno libre y por ello esta zona no debe estar permanentemente saturada de agua.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Caraballo (2019), donde observó una estabilidad en los niveles almacenados, aunque en el año 2015 hubo un descenso de la reserva con respecto a los demás años, esto se justifica, ya que en este año fue donde menor niveles de precipitación hubo, y la reserva de agua tiene una relación directamente proporcional a las precipitaciones.

Mes	NegAc (mm)	ARM (mm)	DEF (mm)	R (mm)
Enero	0,00	562,5	0,00	0,04
Febrero	0,00	562,5	0,00	0,04
Marzo	0,00	562,5	0,00	0,04
Abril	0,00	562,5	0,00	0,05
Mayo	0,00	562,5	0,00	0,05
Junio	0,00	562,5	0,00	0,05
Julio	0,00	562,5	0,00	0,06
Agosto	0,00	562,5	0,00	0,06
Septiembre	0,00	562,5	0,00	0,05
Octubre	0,00	562,5	0,00	0,05
Noviembre	0,00	562,5	0,00	0,05
Diciembre	0,00	562,5	0,00	0,04

Leyenda: NegAc(Negativo Acumulado), ARM(Almacenamiento de agua en el suelo), DEF (Déficit de agua), R(Reposición de Agua en el Suelo)

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

V. Conclusiones

1- Las temperaturas medias varían entre 23,45°C y 27,64°C, siendo enero el mes de menor valor y el de mayor temperatura el mes de Julio. En las precipitaciones se observa que en el mes de Febrero fue el mes donde cayó el menor nivel de precipitación con un valor de 20,36mm y el mes que tuvo mayor nivel de precipitación fue el mes de Octubre con 136,73mm.

2- Las principales variables que se determinaron para el balance hídrico dentro del bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba, fueron la evapotranspiración potencial (EP) y corregida (ETP) evidenciándose una pequeña diferencia, aunque no significativa, entre la secuencia de los meses, estos valores varían desde 0,036 hasta 0,063 mm en el caso de la Evapotranspiración potencial (EP), y de 0,038 hasta 0,059mm en el caso de la evapotranspiración potencial corregida (ETP).

3- Se identificaron las variables más afectadas por el balance hídrico en el bosque pluvisilva de montaña durante el periodo 2010-2020 en el Departamento de Conservación La Melba, estas fueron *NegAc (Negativo Acumulado)*, *ARM (Almacenamiento de agua en el suelo)*, *DEF(Déficit de agua)*, *R (Reposición de Agua en el Suelo)*.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

VI. Recomendaciones

- 1- Realizar estos estudios en otras formaciones boscosas dentro del Parque Nacional Alejandro de Humboldt para una comparación de los resultados
- 2- Que este trabajo sirva para la formación de futuros estudiantes de Ingeniería Forestal.

BIBLIOGRAFÍAS

Bibliografías

- Alber, J. 2001. «Forest processes and global environmental change: predicting the effects of individual and multiple stressors: we review the effects of several rapidly changing environmental drivers on ecosystem function, discuss interactions among them, and summarize predicted changes in productivity, carbon storage, and water balance». En: *BioScience* 51.9, 735-751. Online: <https://bit.ly/2tEEXbA>.
- Angelocci, L. R. 2012. LCE 306 – Meteorologia Agrícola. Campinas : s.n., 2012.
- Ansel Fong G., David Maceira F., William S. Alverson, y/and Tatziana Wachter, editores/editors. Cuba: Parque nacional Alejandro de Humboldt, 68p.
- Aparicio, M. 2008. Fundamentos de Hidrología de superficie. Mexico : Editorial Limusa., 2008.
- Arcova, F. C. S. 1996. Balanço hídrico, características do deflúvio e calibragem de duas microbacias hidrográficas na Serra do Mar. S. Paulo : Universidade de São Paulo Piracicaba, 1996.
- Arcova, F. C. S. & V, Cicco,. 1997. Características do deflúvio de duas microbacias no Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmercih. Cunha – SP : Revista Instituto Florestal de São Paulo, 1997. pp. 153-170. Vol. 2.
- Aussenac G, C Boulangeat. 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Annales des Sciences Forestières* 37(2): 91-107.
- BACK, A. J. 2001. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol.36, n.5. p.717-726
- Barreto, A. N., Faccioli, G. G. e Silva, A. A. G. 2009. Irrigação e drenagem na empresa agrícola: impacto ambiental versus sustentabilidade. Aracaju : Embrapa, 2009.
- Begué. G, Larramendi. J (2013). “Nombre del capítulo o sector”. En Parque Nacional Alejandro de Humboldt, la naturaleza y el hombre. Ediciones Polymita, 176 pp.

- Benyon, R. 2007. Tree water use in forestry compared to other dry-land agricultural crops in the Victorian context: report prepared for the Department of Primary Industries Victoria to promote scientific knowledge in this area. Vict3ria, 50 p. (Ensis Technical Report, 159).
- Bruijnzeel, L. A., Scatena, F.N., Halminton, L.S., 2010. Tropical montane cloud forest: State of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. En tropical montane cloud forest, Bruijnzeel, L.A., Scatena, F.N., Halminton, L.S. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge. Reino Unido, 691-740.
- Burch, G. J., *et al.*. 1987. Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in south-eastern. Australia: Journal of Hydrology, 1987.
- Cajamarca R., Ronald (2017). «Estudio del balance h3drico superficial de las cuencas hidrogr3ficas, sector Jad3n y Zhidmad en el 3rea de interceptaci3n con el Bosque y Vegetaci3n Protectora Aguarongo (BVPA)». B.S. thesis. Online: [vhttps://bit.ly/2tDf1gE](https://bit.ly/2tDf1gE).
- Calder, I. R. 1986. Water use of eucalypts—a review with special reference to South India. Agricultural Water Management, v. 11, p. 333–342.
- Calder, I. R. 1998. Water use by forests, limits and controls. Tree Physiology, v. 18, p. 625-631.
- Camargo, A. P e Pereira, A.R. 1990. Prescri3o de rega por modelo climatol3gico. Campinas : Cargil , 1990.
- Camargo, A.P.de e Camargo, M.B.P. 2000. Uma revis3o an3litica sobre evapotranspiraci3o potencial. . S3o Paulo : Revista Bragantia, 2000.
- Cannell, M. G. R. 1999. Environmental impacts of forest monocultures: water use, acidification, wildlife conservation, and carbon storage. New Forests, v. 17, p. 239-262.
- Caraballo, O. 2019. Balance h3drico del bosque pluvisilva submontano, Departamento de Conservaci3n Cupeyal del Norte. Memoria escrita en Opci3n al grado acad3mico de M3ster en Ciencias Forestales. FACULTAD AGROFORESTAL. UNIVERSIDAD DE GUANT3NAMO, 93p
- Carchi G., Esteban (2015). «Elaboraci3n de un balance h3drico de la Cuenca del R3o Machangara». B.S. thesis. Online: <https://bit.ly/2VgDKTy>.

- Carrera V., David Vinicio y col. (2016). «Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media». En: *Idesia (Arica)* 34.3, 81-90. Online: <https://bit.ly/2SqH8JF>.
- Carlesso, R.; Zimmermann, F. L. 2000. *Água no solo: Parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação*. Santa Maria: UFSM. Departamento de Engenharia Rural, 88 p.
- Cintra, F.L.D, *et al.*. 2000. *Balanço hídrico no solo para para porta enxertos de citros em ecossistema de tabuleiros COsteiro*. Campina Grande : s.n., 2000.
- Costa, M. H. 1994. *Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1995*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. *Engenharia na Agricultura : Caderno didático, 1994*. pp. 19-22 .
- Contreras S., Jose, Juan., (2015). «Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la microcuenca del río Quinuas». B.S. thesis. Online: <https://bit.ly/2Xorvq3>.
- Crockford RH, DP Richardson. 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: IV. The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrological Processes* 4(2): 169-198.
- Crockford R.H, & Richardson D.P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *HYDROLOGICAL PROCESSES* (14), 2903-2920.
- Crockford R.H, & Richardson D.P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *HYDROLOGICAL PROCESSES* (14), 2903-2920.
- Del Toro Guerrero, Francisco José, Tomas Kretschmar y Alejandro Hinojosa Corona (2014). «Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México». En: *Tecnología y ciencias del agua* 5.6, 69-81. Online: <https://bit.ly/2GLx3Wu>.

- Dye, P.J. Response of Eucalyptus grandis trees to soil water deficits. *Tree Physiology*, v. 16, p. 233- 238, 1996.
- Ellis, T.; Hatton, T.; Nuberg, I. 2005. An ecologically optimality approach for predicting deep drainage from tree belts of alley farms in water-limited environments. *Agricultural Water Management*, v. 75, p. 92-116.
- EEM (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses*. Volumen 3. Cap. 8. Island Press, Washington, DC. 75 p.
- FAO. (2020). *Situación de los bosques del mundo*. Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas. Roma, Italia. 157p.
- Franke, L. B e Saibro, J.C. 1997. Efeito do Fósforo e da irrigação no rendimento de sementes de alfafa. Brasília : Pesquisa agropecuária, 1997.
- Gerrits, M. (2006). Measuring forest floor interception in a beech forest in Luxembuourg. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 2323 – 2341.
- Giraldo, L. G (2002). MEMORIAS: HIDROLOGIA FORESTAL. Influencia de los bosques. Departamento de Ciencias Forestales Universidad Nacional de Colombia- Medellín, 229p.
- Grimm U, H Fassbender. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela III: ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba* 31(2): 89-99.
- Guzman,H. 2017. Facultad de Ciencias., Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Hewlett J, W Nutter. 1969. An outline of forest hydrology. Georgia. University of Georgia Press. 137 p.
- Hecheverria, et al. 2007. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile.
- Hernandez, F. B. T., Lemos Filho, M.A.F., Buzetti, S. 1995. Software Hidrisa e o balanço hídrico de Ilha Solteira. Ilha Solteira. Ilhas Solteira : FEIS/UNESP, 1995.
- Huber, A. J.; Trecaman, R. V. 2004. Eficiencia del uso del agua en plantaciones de Pinus radiata en Chile. *Bosque*, v. 25, n. 3, p. 33-43

- Hatton, T. 1998. Does water efficiency vary among eucalypts in water-limited environments. *Tree Physiology*, v. 18, p. 529-536.
- Ichiba, S.H.K. 2006. Estudo das temperaturas do ar no estado do Paraná. Maringá- PR, 2006, 124p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências humanas, Letras e Artes.
- IPCC (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. por Rajendra K. Pachauri et al. Online : <https://bit.ly/2C36ubt>:IPCC.
- Jarosz, N. 2008. Carbon dioxide and energy flux partitioning between the understorey and the overstorey of a maritime pine forest during a year with reduced soil water availability. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1508-1523.
- Larcher, W. 2006. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: Rima. 531 p.
- Lee R. (1980). *Forest Hydrology*. New York, United States of America. Columbia University Press. 349 p.
- Leopoldo, P. R. e CONTE, M. L. 1985. Repartição da água de chuva em cobertura florestal com características típicas de cerradão. . São Paulo: Anais : Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1985 .
- Lima, W. P. 2008. *Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas*. 2. São Paulo : Piracicaba, 2008.
- Lima, W. P. 1993. *Impacto ambiental do eucalipto*. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 301p.
- Li, X. Y. 2008. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1501-1507.
- López C, C Blanco. 1978. *Hidrología Forestal*. Segunda Parte. Madrid, España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 134 p.
- Maxim (2016) . Balances hídricos en bosques de encinar mediterráneo. Universitat D'Alcant. Facultat de Ciéncies. 5 p.
- Marengo, J. A. 2001. Mudanças Climáticas Globais e Regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.16, n.1, p.1-18.

- Mesa, O.M. & Barrueco, J.M. (2009). Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el desarrollo sostenible. Indicadores de seguimiento Ciudad de La Habana.
- Moster, C. e W., Lima. 2003.Determinação do ano hidrológico visando a quantificação do balanço hidrológico e m microbacias. s.l. : IPEF, 2003.
- Mendonça, J. C. Sousa, E. F.,... 2003.Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. Rio de Janeiro : Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2003
- Mielke, M. S. 1999. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. *Trees*, v. 13, p. 152-160.
- Mcjannet, D.L.; Vertessy, R.A. 2001. Effects of thinning on wood production, leaf area index, transpiration and canopy interception of a plantation subject to drought. *Tree Physiology*, v. 21, p. 1001- 1008.
- Myers, N; Mittermeier, R; Gill, P. & Mittermeier, C. 1999. Hotspots. Hotspots Terrestres. Estrategias de conservación. CEMEX. México DF. 1344 p.
- Pereira, A. R, Angelocci, L.R e Sentelha, P.C. 2002.Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba : Ed. Agropecuária, 2002.
- Sánchez, J. (2010). Evapotranspiración. Inf. téc. Online: [https:// bit.ly/2IEH7Cx](https://bit.ly/2IEH7Cx): Universidad de Salamanca.
- Santos, G. O., Lima, F. B. e Vanzela, L. S. 2009.Balanço hídrico ponderado da cultura da bacia do Ribeirão Santa Rita, Noroeste do Estado de São Paulo. Belo Horizonte : CD., 2009.
- Santos, R. F. e Carlesso, R. 1998.Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. Campina Grande : Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,, 1998.
- Silva, Morgana Vaz y Cláudia Rejane Jacondino Campos (2011). «Anomalias decadais do regime hídrico do RS no período de 1977 a 2006». En: *Ciência e Natura* 33.1, 75-89. Online: <https://bit.ly/2EfdnXa>.

- Silveira, A. L. da e Silveira, G. L. da. 2001. Vazões Mínimas: hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. 1. Porto Alegre : UFRGS, 2001.
- Schrelzenmayr, M. 1981. Der Wald. Vrania – Verlag: Berlim,. 264p.
- Soares, J. V.; Almeida, A. C. 2001. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. Journal Ci. Fl., v. 23, n. 3, jul.-set., 2013
- Stape, J. L.; Binkley, D.; Ryan, M. G. 2004. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. Forest Ecology and Management, v. 193, p. 17-31.
- Soares, J. V.; Almeida, A. C. 2001. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. Journal Ci. Fl., v. 23, n. 3, jul.-set., 2013
- Steinke, E. T. 2004. Considerações sobre variabilidade e mudanças climáticas no Distrito Federal, suas repercussões nos recursos hídricos e informação ao grande público. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biologia. Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília. 201p.
- Souza, J.L.M. 2001. Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projectos de irrigação para a cultura do cafeeiro. Piracicaba : s.n., 2001.
- Souza, J.L. de. 1994. Avaliação do efeito da energia advectiva na estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Lavras. Minas Gerais : s.n., 1994.
- Srntelhas, P.C. 2012. Balanço Hídrico Climatológico Normal e Seqüencial, de Cultura e para Manejo da Irrigação. São Paulo : ESALQ, 2012.
- Thornthwaite, C. W. e Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. s.l. : Drexel Institute of Technology. Climatology, 1957. p. 10. 185-311.
- Tucci, C.E.M. 1997. Hidrologia : Ciências e Aplicação. Rio Grande do Sul : Editora da Universidade, 1997.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. New York : s.n., 1948.

- Thornthwaite, C. W., Matther, J.R. 1955. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. *Climatology*. 10(3):185-311.
- Tucci, C. E. M. 2000. Hidrologia, ciência e aplicação. Porto Alegre : UFRGS: ABRH, 2000. p. 943
- Tucci, C. E. M (1997). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Universidade/UFRGS. ABRH,. 946p.
- Van dijk, A. I. J. M.; Keenan, R. 2007. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*, v. 251, p. 1-9.
- Vincke, C.; Thiry, Y. 2008. Water table is a relevant source for water uptake by a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand: Evidences from continuous evapotranspiration and water table monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1419-1432.
- Whitehead, D.; BEADLE, C. L. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management*, v. 193, p. 113-140.
- Wallace, J. S. 1995. Calculating evaporation: resistance to factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 73, p. 353-366.
- Zabala. B, (2005). Características físico-geográficas, Unidad de Servicios Ambientales "Alejandro de Humboldt", Guantánamo, Cuba.
- Zua. J. 2018. Balanço hídrico da fazenda experimental do ngongoinga, no período 2013 – 2018,. universidade josé eduardo dos santos faculdade de ciências agrárias departamento de gestão e transformação de produtos florestais. huambo

ANEXOS

Anexo 1. Balance hídrico del bosque pluvial de montaña del departamento de conservación la Melba durante el periodo 2010-2020

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mes	T (oC)	ETP (mm)	Corr (q)	ETPc (mm)	P (mm)	P-ETP (mm)	NegAc (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)	R (mm)
Enero	23,45	0,036	1,14	0,041	29,67	29,63	0	562,5	0	0,04	0,00	29,63	0,04
Febrero	23,72	0,037	1,02	0,038	20,36	20,33	0	562,5	0	0,04	0,00	20,33	0,04
Marzo	23,76	0,038	1,09	0,041	31,32	31,28	0	562,5	0	0,04	0,00	31,28	0,04
Abril	25,00	0,045	1,01	0,045	60,44	60,39	0	562,5	0	0,05	0,00	60,39	0,05
Mayo	25,66	0,049	0,99	0,048	71,29	71,24	0	562,5	0	0,05	0,00	71,24	0,05
Junio	27,00	0,058	0,92	0,053	72,85	72,80	0	562,5	0	0,05	0,00	72,80	0,05
Julio	27,64	0,063	0,93	0,058	35,43	35,37	0	562,5	0	0,06	0,00	35,37	0,06
Agosto	27,62	0,063	0,94	0,059	79,11	79,05	0	562,5	0	0,06	0,00	79,05	0,06
Septiembre	26,90	0,057	0,94	0,054	80,10	80,05	0	562,5	0	0,05	0,00	80,05	0,05
Octubre	26,11	0,052	1,02	0,053	136,73	136,67	0	562,5	0	0,05	0,00	136,67	0,05
Noviembre	24,99	0,045	1,03	0,046	77,85	77,80	0	562,5	0	0,05	0,00	77,80	0,05
Diciembre	24,25	0,040	1,11	0,045	34,83	34,78	0	562,5	0	0,04	0,00	34,78	0,04
Suma/Media	25,51	0,58		0,58	729,97	729,39092			0	0,58	0	729,39092	0,581804