

Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un  
**Bosque húmedo Tropical**, Parque Nacional

Guanacaste, Costa Rica

Julio Calvo-Alvarado<sup>1</sup>  
César Jiménez-Rodríguez<sup>2</sup>  
Miquel de Saá-Quintana<sup>3</sup>

## Resumen

La intercepción de precipitación fue determinada por medio de la precipitación bruta (PB), precipitación de copas (PC) y flujo caulinar (FC) en tres estadios de sucesión secundaria en un Bosque húmedo Tropical en el Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. En cada estadio se identificaron las especies y se midió la altura total y el diámetro de todos los árboles mayores a 5 cm de diámetro presentes en las parcelas de medición. El Índice de Área Vegetal (IAV) y el Índice de Complejidad de Holdridge (ICH) fueron estimados para describir la estructura de cada bosque. El ensayo se realizó entre julio y octubre del 2007, registrando una precipitación total de 491,2 mm en el estadio intermedio, y de 706,1 mm para el estadio temprano y tardío. Los resultados indican que la intercepción de precipitación aumentó conforme avanza la madurez del estado de sucesión del bosque.

**Palabras clave:** intercepción de precipitación, precipitación de copas, flujo caulinar, bosque húmedo Tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

## Abstract

**Rainfall interception in three secondary stages of Tropical wet Forest, Guanacaste National Park, Costa Rica.** The rainfall interception was determined by evaluating gross rainfall, canopy throughfall and stemflow in three secondary stages of Tropical wet Forest in the Guanacaste National Park, Costa Rica. Species composition, tree diameter and tree total height were measured in three temporal plots. The Vegetal Area Index (VAI) and the Holdridge Complexity Index (HCI) were estimated to describe the forest structure. The trial was carried out from July to October 2007; measured total rainfall during the sampling period was of 491,2 mm for the Intermediate stage and 706,1 mm in the Early and Late stages. The rainfall interception shows a pattern of increment with the maturity of the three stages of forest succession maturity

**Key words:** rainfall interception, throughfall, stemflow, Tropical wet Forest, Guanacaste National Park, Costa Rica.

1. Escuela de Ing. Forestal - Instituto Tecnológico de Costa Rica

Tel: (506) 2550-2211 [jucalvo@itcr.ac.cr](mailto:jucalvo@itcr.ac.cr)

2. Escuela de Ing. Forestal - Instituto Tecnológico de Costa Rica

[cdjimenezcr@gmail.com](mailto:cdjimenezcr@gmail.com)

3. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària, Universitat de

Lleida, España. [miquel\\_saa@yahoo.es](mailto:miquel_saa@yahoo.es)

## Introducción

Las implicaciones del cambio de uso del suelo a nivel global han generado una serie de inquietudes sobre los efectos reales que pueden conllevar a los sistemas biofísicos presentes en las regiones tropicales. Bruijnzeel (2004) discute ampliamente los efectos de la conversión de bosques hacia tierras agrícolas; donde se alteran las tasas de sedimentación, infiltración, evapotranspiración, flujos base y albedo de las superficies, entre otros.

Los escenarios de deforestación aplicados en los modelos de circulación global muestran una tendencia de aumento de la temperatura superficial y disminución en la precipitación (Cuartas *et al.* 2007); no obstante, para las regiones bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical este efecto no es tan notorio (Bruijnzeel 2004). Considerando que el cambio de uso del suelo no es unidireccional, la conversión a bosques por el abandono de tierras agrícolas, produciría una nueva alteración en las características de los ecosistemas, así como su influencia en el ciclo hidrológico. Durante los procesos de sucesión secundaria en bosques tropicales, se esperan modificaciones en la composición de especies conforme aumenta la edad de los nuevos sistemas boscosos y a su vez un aumento en la cobertura vegetal (Finegan 1992), reduciendo las tasas de erosión y el riesgo de deslizamientos superficiales (Bruijnzeel 2004). Un incremento de la cobertura vegetal y del número de especies leñosas generan mayores valores de intercepción de precipitación (García-Estringana *et al.* 2010), que no es disponible para el suelo, modificando los balances hídricos (Cuartas *et al.* 2007).

Es conocido en la literatura que la intercepción es afectada tanto por el tamaño como por la duración de las lluvias, e incluye procesos que afectan la deposición y el almacenamiento de agua en la superficie de las plantas (Cavelier y Vargas 2002; Fallas-Gamboa 1996) donde la precipitación de copas y el flujo caulinar modifican la distribución espacial de la precipitación sobre el suelo forestal (García-Estringana *et al.* 2010), siendo determinados estos factores por el tipo de dosel y por la corteza de ramas y troncos (Gupta y Usharani 2009).

Teniendo en cuenta que la distribución de ramas y follaje, así como su variabilidad estacional en bosques con especies caducifolias, determinan en parte la estructura de los bosques, la incorporación de estas variables estructurales es importante para los estudios de hidrología forestal, segmentando los procesos de intercepción en: flujo caulinar, precipitación de copas, pérdidas por evapotranspiración e intercepción total (Cavelier y Vargas 2002; Filoso *et al.* 1999; Staelens *et al.* 2003; Tobon-Marin *et al.* 2000).

Este estudio pretende contribuir a la evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca Alta del Río Tempisque de Costa Rica y a dilucidar el impacto del cambio del uso de la tierra y el cambio climático en los flujos de agua de esta cuenca (Guzman y Calvo-Alvarado 2011; Jiménez

*et al.* 2005; Nair *et al.* 2010; Tobon-Marin *et al.* 2010). En las últimas décadas se ha demostrado con el empleo de tecnología satelital, una restauración sostenida de la cobertura forestal en los bosques seco y húmedo de la provincia de Guanacaste (Arroyo-Mora *et al.* 2005; Calvo-Alvarado *et al.* 2009b; Cordero-Montoya *et al.* 2008), cuya consecuencia en el comportamiento del ciclo hidrológico aún no ha sido evaluada.

El objetivo de este estudio fue cuantificar la intercepción de precipitación de tres estados sucesionales del Bosque húmedo Tropical dentro del Parque Nacional Guanacaste. Esta información podrá ser empleada en modelos hidrológicos para simular el efecto de la restauración forestal en la cuenca alta del Río Tempisque.

## Metodología

### Sitio de Estudio

El área de estudio se ubica en la Estación Biológica Maritza (EBM) a 550 msnm, dentro del Parque Nacional Guanacaste (PNG), Costa Rica (Figura 1). Las áreas boscosas seleccionadas se localizan en las estribaciones del Volcán Orosí; dentro de la unidad fisiográfica continental del Pacífico Norte de Costa Rica, definida por la Cordillera de Guanacaste y la Cordillera de Tilarán (CRRH 2008); en la Cuenca Alta del Río Tempisque, cuyas aguas drenan hacia el Golfo de Nicoya en el Océano Pacífico.

En la EBM se presentó una precipitación media anual (PMA) de 2192,5 mm año<sup>-1</sup> y una temperatura media anual (TMA) de 24,0 °C para el periodo comprendido entre los años 1993 y 2005. En el periodo seco, de diciembre a marzo, se precipita el 4% de la PMA; mientras que el periodo lluvioso, abril a noviembre, el restante 96% de la precipitación (CRRH 2008). Por su localización al pie del Volcán Orosí, el clima es influenciado por vientos de valle y montaña, así como por la incursión de los vientos alisios, originando la dominancia de lluvias orográficas y convectivas.

Tres parcelas de 1000 m<sup>2</sup> (50 m x 20 m) fueron establecidas para describir la estructura y composición florística de tres bosques secundarios del Bosque húmedo Tropical (Bh-T) (Holdridge 1967). El estado de sucesión fue seleccionado con base en la clasificación de bosques secundarios de Finegan (1992): fase I (bosque Temprano), fase II (bosque Intermedio) y fase III (bosque Tardío).

Los estadios Temprano e Intermedio se encuentran en áreas antiguamente dedicadas al pastoreo de ganado. La edad estimada para el bosque Temprano es de 17 años, mientras que el bosque Intermedio puede tener entre 25 a 35 años. El estadio Tardío colinda con un bloque de bosque natural de galería, por lo que se espera que su estructura sea similar a la de un bosque sin intervención.

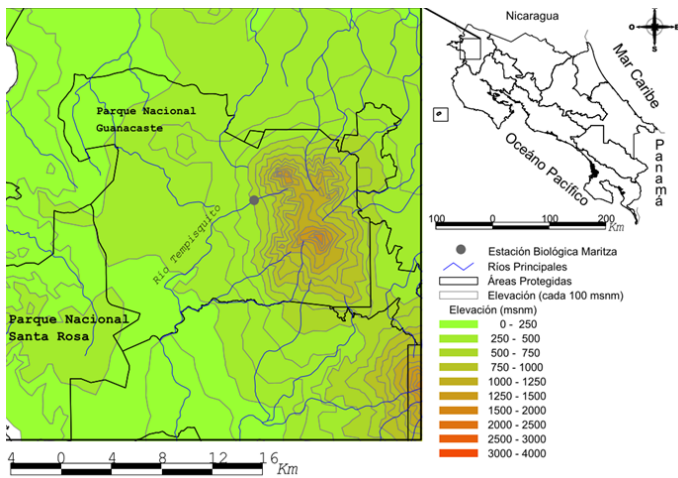


Figura 1. Localización geográfica del ensayo de intercepción de lluvia en la Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. Fuente: Atlas Costa Rica Digital 2004.

El diámetro (cm) y la altura total (m) fueron medidos en todos los árboles con un diámetro superior a los 5,0 cm. La especie de cada individuo fue determinada en campo, mientras que a los árboles no identificables se les colectó una muestra vegetativa para su posterior identificación.

### Estructura y composición florística

El análisis de la estructura de los bosques secundarios analizados se basó en dos parámetros principales. El primero corresponde al Índice de Complejidad de Holdridge (1967):

$$I_{CH} = \frac{HGDS}{1000}$$

Donde:

H= altura dominante (m),

G= área basal ( $m^2$  0,1  $ha^{-1}$ ),

D= densidad (No. 0,1  $ha^{-1}$ ),

S= densidad de especies (No. 0,1  $ha^{-1}$ )

El segundo parámetro es el Índice de Área Vegetal (IAV) que representa la acumulación del área de hojas y ramas, describiendo la cobertura de copas para los diferentes estadios de sucesión. Este parámetro fue estimado por medio del LAI-meter 2000 (Plant Canopy Analyzer). Para determinar el IAV por parcela, se promedió el IAV de 20 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente en las parcelas. El IAV fue procesado con el software LAI-2000 File Viewer 1.0.

### Diseño Experimental

Para evaluar la intercepción de precipitación (I), tres componentes principales fueron elegidos, donde cada uno representa un flujo de agua hacia el piso forestal. Estos elementos son integrados para determinar la intercepción de la precipitación con las siguientes ecuaciones:

$$I = PB - (PC + FC) \quad PN = PC + FC$$

PB = Precipitación Bruta ( $mm \text{ día}^{-1}$ )

PC = Precipitación de Copas ( $mm \text{ día}^{-1}$ )

FC = Flujo Caulinar ( $mm \text{ día}^{-1}$ )

I = Intercepción de Precipitación ( $mm \text{ día}^{-1}$ )

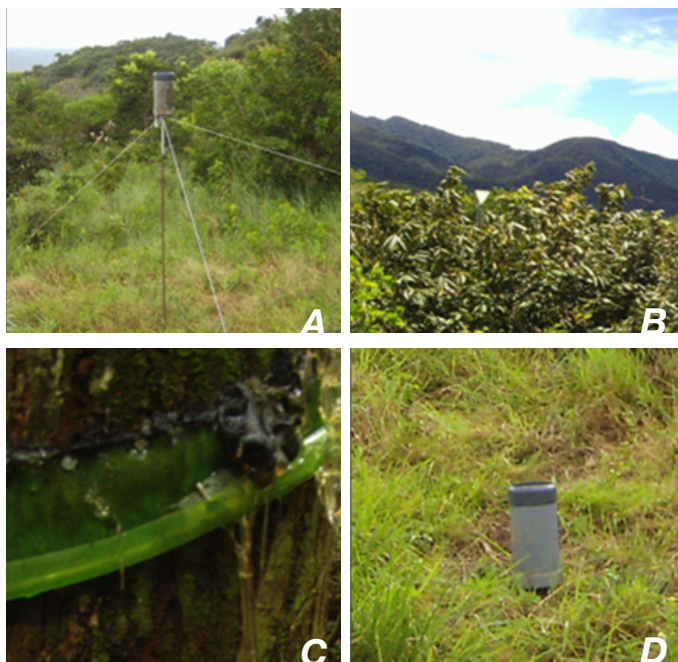
PN = Precipitación Neta ( $mm \text{ día}^{-1}$ )

La PB, a excepción del bosque Intermedio, fue medida en una zona abierta colindante a cada parcela. Dos pluviómetros ubicados a 1,3 m sobre el suelo con un diámetro de 11,5 cm ( $\text{área} = 103,9 \text{ cm}^2$ ) fueron destinados para la colección de la PB. En el bosque Intermedio, se colocó un embudo de 12,5 cm de diámetro ( $\text{área} = 122,72 \text{ cm}^2$ ) sobre el dosel del bosque, dirigiendo el flujo de agua por un ducto de plástico hasta un recipiente para coleccionar el agua de lluvia (Figura 2).

Se emplazaron 40 pluviómetros de 11,5 cm y 12,5 cm de diámetro en la parcela del estadio Temprano, mientras que en los estadios Intermedio y Tardío fueron instalados 30 colectores con las mismas dimensiones; la diferencia en el número de receptores de lluvia se debió a la variabilidad del dosel en el bosque Temprano. En cada parcela se estableció una rejilla de puntos de 1,6 m x 1 m, para un total de 600 intersecciones. Los pluviómetros fueron redistribuidos cada 10 eventos de forma aleatoria en alguno de los 600 posibles puntos de medición. La finalidad de este procedimiento fue disminuir el error estándar de la estimación, ocasionado por la alta variabilidad en la distribución horizontal de las copas (Fleischbein *et al.* 2005, Lloyd y Marques 1988, Skau 1964; Tobon-Marin *et al.* 2000).

En ambos casos (PB y PC), los volúmenes de agua colectados por día ( $cm^3 \text{ día}^{-1}$ ) fueron convertidos a lámina ( $mm \text{ día}^{-1}$ ) al dividir el volumen colectado por el área de cada pluviómetro.

La escorrentía de fustes o flujo caulinar (FC) se determinó por medio del volumen de agua ( $cm^3 \text{ día}^{-1}$ ) que escurría por los troncos de los árboles, este flujo se tradujo a lámina ( $mm \text{ día}^{-1}$ ) al dividir el volumen por el área de la proyección horizontal de la copa ( $mm^2$ ) estimada con promedio de dos diámetros perpendiculares de la copa de los árboles seleccionados, los cuales se eligieron por su proximidad a los percentiles 20%, 40%, 60% y 80% de la distribución diamétrica de cada parcela. Por medio de tachuelas, se adhirió a cada árbol seleccionado un ducto plástico en forma de espiral, y se sellaron los espacios abiertos entre el ducto y la corteza con pasta asfáltica para evitar la pérdida de agua. El flujo fue coleccionado en recipientes con una capacidad relativa a la dimensión de cada árbol (Figura 2).



**Nota:** **A:** Modelo de pluviómetro utilizado en los estadios Temprano y Tardío para coleccionar la precipitación bruta. **B:** Pluviómetro modificado para coleccionar la precipitación sobre el dosel del estadio Intermedio. **C:** Ducto plástico adherido al fuste del árbol con problemas de exudación de savia. **D:** Colector de precipitación de copas empleado bajo el dosel de las tres parcelas.

**Figura 2.** Instrumentación empleada en el ensayo de intercepción de lluvia en la Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

El ensayo se realizó entre el 28 de julio y el 25 de octubre del 2007. Cada medición fue realizada de las 6:00 am hasta las 9:00 am, con la finalidad de disminuir las pérdidas por evaporación. Durante todo el periodo de muestreo se mantuvo el orden de colecta de datos (Temprano, Intermedio, Tardío) para disminuir los errores aportados por el goteo de copas entre mediciones.

## Análisis de Datos

Se llevó a cabo dos análisis estadísticos diferentes. Uno de ellos basado en regresiones lineales (A-RL) y el segundo en un análisis de covarianza (A-Co). Ambos análisis comparan los valores diarios de PB y PN de cada una de las parcelas de bosque secundario establecidas.

El A-RL se realizó para cada estadio de sucesión, tomando la PB como variable independiente y la PC y PN como variables dependientes. La pendiente de cada ecuación lineal fue considerada como el porcentaje de precipitación efectiva que llega al piso forestal (Balieiro *et al.* 2007, Oliveira Júnior y Dias 2005, Tobon-Marín *et al.* 2000)

Para comparar el efecto del tipo de ecosistema sobre la intercepción de precipitación, se aplicó el A-Co propuesto por Calvo-Alvarado *et al.* (2009a); donde la PN y PC fueron seleccionadas como variables dependientes, la PB como co-variable y el estadio de sucesión como factor de comparación.

Se aplicó el ANCOVA ( $p = 0,01$ ) y una prueba de Fisher LSD ( $p = 0,01$ ) para determinar grupos estadísticamente homogéneos. El análisis estadístico se llevó a cabo con el software STATISTICA 6.0 (StatSoft Inc. 2003).

## Resultados

### Estructura y Composición Florística

La fase de sucesión Temprana estaba dominada por *Roupala montana* y *Byrsonima crassifolia*, que aglomeraron el 77,3% del área basal y el 66,6% de la densidad arbórea. La tercer especie de mayor importancia de este estadio fue *Mollinedia sp.* con 21,3% del área basal y 30,9% de la densidad total. El área basal total fue de  $5,66 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , con una densidad de  $1230 \text{ árboles ha}^{-1}$ , para el conjunto diamétrico  $\geq 5 \text{ cm}$ .

Las especies *Byrsonima crassifolia*, *Guazuma ulmifolia* y *Acacia collinsi* dominaron el estadio Intermedio agrupando el 59,2% de la densidad total de árboles (20,5%; 20,5% y 18,2% por especie respectivamente). Con respecto al área basal; *Guazuma ulmifolia* acumuló el 27,6% ( $3,09 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), *Luehea sp.* ocupó el 19,6% ( $2,19 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y *Byrsonima crassifolia* representó el 14,5% ( $1,62 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ).

El estado Tardío estaba dominado por el género *Eugenia sp.*, el cual aglomeró el 28,3% de la densidad total estimada para esta fase de sucesión ( $1660 \text{ individuos ha}^{-1}$ ), cubriendo un área basal de  $8,7 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ; lo que representó el 33,12% del total de área basal ( $39,4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ).

El IAV aumentó conforme avanza el estado de madurez de cada fase secundaria, mostrando diferencias significativas ( $p = 0,01$ ) entre todas las fases de sucesión. Estas variaciones implican que la cobertura vegetal entre estadios difiere significativamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores estructurales e índices de composición florística para tres estadios de sucesión en un Bosque húmedo Tropical, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

Estadio de sucesión	Especies	G ( $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ )	D ( $\text{n ha}^{-1}$ )	H (m)	$I_{CH}$	IAV ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ )
Temprano	5	5,66	1230	3,3	1,15	$2,21 \pm 0,44^a$
Intermedio	10	11,2	880	5,3	5,22	$3,62 \pm 0,41^b$
Tardío	38	39,4	1660	12	298,24	$6,70 \pm 0,31^c$

Nota: **G:** Área basal, **D:** Densidad, **H:** Altura dominante,  $I_{CH}$ : Índice de Complejidad de Holdridge, **IVA:** Índice de Área Vegetal con referencia a la desviación estándar en cada fase de sucesión. Letras iguales en la misma columna representan grupos homogéneos ( $p = 0,01$ ).

### Intercepción de precipitación

La distribución de la PB muestreada desafortunadamente no fue continua ya que en todos los estadios de sucesión existió un vacío de eventos entre los  $30 \text{ mm día}^{-1}$  hasta los  $60 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 3). El 81,2% de todos los eventos registrados para los estadios Temprano y Tardío correspondían a eventos menores a  $30 \text{ mm día}^{-1}$ , mientras que en el estadio Intermedio el 86,67% fueron menores a  $30 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 3).

El periodo de muestreo contempló 32 eventos; registrando una PB total de 701,6 mm en el estadio Temprano, de los cuales el 76,3% se movilizó como PC; de los 538,83 mm de PB en el estadio Intermedio, el 76,8% fue registrado como PC; mientras que el 71,5% de la PB (505,2 mm) se movilizó como PC en el estadio Tardío (Cuadro 2).

El porcentaje del FC de la fase Temprana representó un 7,6% de la PB registrada para esa variable, mientras que los porcentajes de lluvia movilizadas por los troncos de los árboles en los estadios Intermedio y Tardío fue de 3,8% y 3,8% respectivamente (Cuadro 2). El flujo de agua movilizado al suelo forestal por los troncos de los árboles incrementó la precipitación efectiva que llegó al piso del bosque, por lo que la PN para los diferentes estadios de sucesión aumentó al 83,9%; 80,6% y 75,3% para los estadios Temprano, Intermedio y Tardío respectivamente.

Los umbrales de goteo para los estadios Temprano, Intermedio y Tardío fueron de 0,8439 mm día<sup>-1</sup>, 0,8067 mm día<sup>-1</sup> y 0,7594 mm día<sup>-1</sup> respectivamente. Estos valores de precipitación representan la pendiente de la regresión lineal para cada fase de sucesión, difieren con los mostrados en la Figura 3 debido a que el intercepto con el eje Y que representa “la capacidad de almacenamiento de lluvia” para cada bosque (Carvajal-Vanegas 2004), no fue estadísticamente significativo (p = 0,05).

Cuadro 2. Valores totales de Precipitación Bruta (PB), Precipitación de Copas (PC) y Flujo Caulinar (FC<sup>o</sup>) para tres estadios de sucesión en un Bosque húmedo Tropical, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

Estadio de la sucesión	PB <sup>o</sup> (mm)	PC		FC <sup>o</sup>		
		(mm)	(%)	PB <sub>p</sub> (mm)	(mm)	(%)
Temprano	706,10	538,83	76,3	249,5	19,0	7,62
Intermedio	491,20	377,20	76,8	343,6	13,3	3,87
Tardío	706,10	505,20	71,5	349,5	13,6	3,89

**Nota:** “La precipitación bruta del bosque temprano fue utilizada para las estimaciones del estadio Tardío. “El flujo caulinar fue determinado por medio de la medición de 15 eventos para cada caso estadio, razón por la cual se determinó una precipitación bruta parcial (PB<sub>p</sub>) para cada estadio.

Por otra parte, la distribución de los flujos de agua en el bosque respecto a la PB aumentaron linealmente (p = 0,01) en todos los estadios de sucesión (Figura 3). Al comparar los porcentajes de intercepción por estadio de sucesión, eliminando el efecto del tamaño de la precipitación por medio de un análisis de covarianza (p = 0,01), se muestra efectivamente la existencia de diferencias significativas (p = 0,01) entre los tres tipos de bosque.

La prueba LSD de Fisher (p = 0,01) mostró que los porcentajes de intercepción de los estadios Temprano e Intermedio son estadísticamente iguales, difiriendo significativamente del estadio Tardío, el cual presentó el mayor porcentaje de intercepción de precipitación.

**Nota:** PC = Precipitación de copas; PN = Precipitación neta.

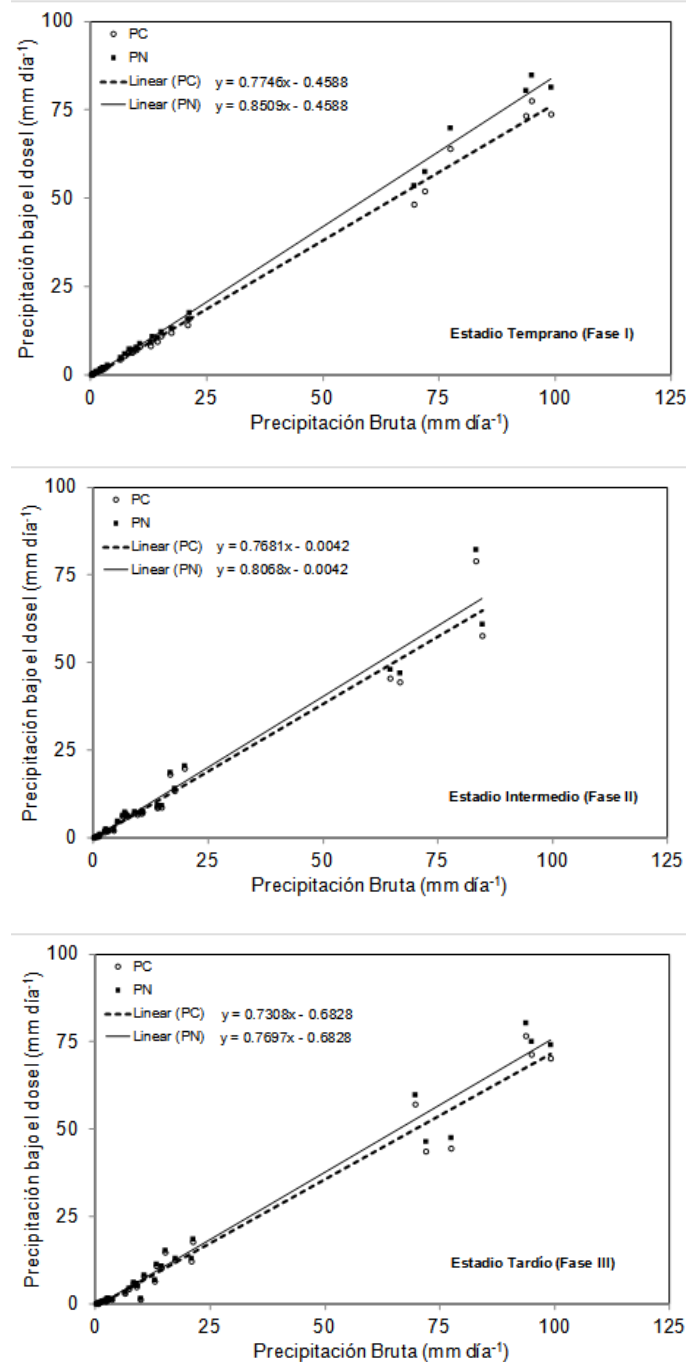


Figura 3. Distribución de la precipitación bajo el dosel respecto a la precipitación bruta registrada para tres estadios de sucesión, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

## Discusión

Las diferencias en la distribución de las lluvias están relacionadas con la ubicación geográfica del sitio de muestreo. Las precipitaciones menores a 30 mm día<sup>-1</sup> representan lluvias de origen orográfico de baja intensidad, mientras que las precipitaciones superiores a 60 mm día<sup>-1</sup> corresponden a lluvias originadas por mecanismos frontales y de convección (observaciones de

campo). Aunque el muestro no fue continuo, su impacto en las estimaciones de los valores y comparaciones estadísticas no es de considerar dado que la tendencia lineal es evidente y soportada igualmente por casi todos los estudios de intercepción de precipitación (Arcova *et al.* 2003, Calvo-Alvarado *et al.* 2009a, Gupta y Usharani 2009, Oliveira Júnior y Dias 2005, Tobon-Marin *et al.* 2000).

Los eventos de menor intensidad registrados presentan el mayor porcentaje de intercepción, debido a que el agua precipitada es retenida por las superficies de los árboles y no logra generar flujos o escurrirse entre las hojas. Este hecho fue observado en una cuenca en Brasil (Cunha-São Paulo) por Arcova *et al.* (2003), quienes registraron que la intercepción por parte de las copas puede llegar a sus valores máximos durante los periodos de lluvias continuas y poco intensas; punto de vista compartido por Crockford y Richardson (2000) quienes consideran que los eventos de baja intensidad tienen un efecto en el aumento de la intercepción de copas.

Para que se genere una precipitación efectiva en los ecosistemas evaluados en el presente estudio, como efecto de la distribución de copas y tamaño de precipitación, la lluvia debe superar el “umbral de goteo” que corresponde a la máxima cantidad de lluvia requerida para humedecer las superficies y producir de esta forma precipitación bajo el dosel.

Estos datos reflejan la capacidad del dosel de cada estadio de retener el agua interceptada, en este caso el dosel del estadio temprano está más expuesto al viento y al sol, por lo que el agua se evapora más rápidamente. Conforme el estadio avanza en complejidad, parte del agua es interceptada en hojas y estructuras que se encuentran a la sombra o protegidas del viento, con lo cual el umbral varía notablemente.

El umbral de goteo para bosques perennes de la Amazonía descritos por Arcova *et al.* (2003) y Tobon-Marin *et al.* (2000) oscila entre 0,6 mm día<sup>-1</sup> y 1,7 mm día<sup>-1</sup> (Cuadro 3). Por otra parte, es importante destacar el efecto que tiene la presencia de especies caducifolias en los bosques tropicales sobre el umbral de goteo; ya que para bosques semidecíduos de Brasil este valor es superior a 3 mm día<sup>-1</sup> (Oliveira Júnior y Dias 2005, Gupta y Usharani 2009).

El flujo caulinar de los bosques bajo estudio se vio influenciado por las características morfológicas de las especies. El bosque Temprano está caracterizado por la dominancia de especies con cortezas lisas y con surcos estrechos y parcialmente fisurados como *Roupala montana* y *Byrsonima crassifolia*, lo que facilita el movimiento de agua por el fuste hacia el piso forestal. Esta condición morfológica permite a este tipo de ecosistema movilizar hasta 19 mm de la precipitación por medio de los troncos y ramas. Los bosques Intermedio y Tardío muestran flujos caulinares muy similares (13,3 mm y 13,6 mm respectivamente), aunque la composición florística de ambas estructuras difiera.

Los flujos caulinares determinados en el presente estudio en términos porcentuales (Temprano: 7,63%; Intermedio: 3,87%; Tardío: 3,89%) fueron mayores a los reportados para otros Bosques húmedos Tropicales; los cuales muestran valores bajos de escorrentía de fustes que van de 0,2% de la precipitación bruta (Tobon-Marin *et al.* 2000), hasta 1,8% (Lloyd y Marques 1988), principalmente debido a las grandes intensidades de lluvia que sobrecargan el paso del agua por el tronco y que produce un incremento del goteo (Crockford y Richardson 2000), originando en consecuencia un aumento de la precipitación de copas. Por otra parte, algunos autores alegan que la contribución del flujo caulinar en la precipitación neta es poco significativa, principalmente en bosques maduros (Cuartas *et al.* 2007, Holwerda *et al.* 2010). En este caso conjeturamos que los flujos caulinares son altos debido a la alta incidencia de lluvias de baja intensidad que dan pie a mejores condiciones de flujo caulinar que en sitios donde las lluvias son de alta intensidad.

Los flujos caulinares determinados con el presente estudio en términos porcentuales (Temprano: 7,63%; Intermedio: 3,87; Tardío: 3,89%) son mayores a los reportados para otros Bosques húmedos Tropicales; los cuales muestran valores bajos de escorrentía de fustes que van de 0,2% de la precipitación bruta (Tobon-Marin *et al.* 2000), hasta 1,8% (Lloyd y Marques F 1988), principalmente debido a las grandes intensidades de lluvia que sobrecargan el paso del agua por el tronco y se produce un incremento del goteo (Crockford y Richardson 2000), originando en consecuencia un aumento de la precipitación de copas. Por otra parte, algunos autores alegan que la contribución del flujo caulinar en la precipitación neta es poco significativa principalmente en bosques maduros (Cuartas *et al.* 2007, Holwerda *et al.* 2010). En este caso conjeturamos que los flujos caulinares son altos debido a la alta incidencia de lluvias de baja intensidad que dan pie a mejores condiciones de flujo caulinar que en sitios donde las lluvias son de alta intensidad.

Al aplicar el coeficiente de similitud de Jaccard [Cj] (Krebs 1998), el cual evalúa las especies presentes en ambos tipos de bosques, se puede observar una similitud de un 0,50 entre la interacción Temprano-Intermedio; mientras que al comparar ambos bosques respecto al Tardío, se observan valores de 0,24 y 0,13 para las relaciones -(Cuadro 4).

Cuadro 3. Regresiones lineales para la determinación de precipitación de copas (PC) y precipitación neta (PN) para bosques tropicales en función de la precipitación bruta (PB) y el respectivo umbral de goteo (Umbral).

Ecosistema	Ubicación Geográfica			Precipitación (mm)	Regresión Lineal		Umbral (mm día <sup>-1</sup> )	Referencias
	País	Latitud	Longitud		Ecuación	R <sup>2</sup>		
Bosque Latifoliado Perenne	Brasil	23° 13' S	45° 03' W	2240	PC = 0,8500 * PB - 0,5294	0,993	0,62	Arcova <i>et al.</i> (2003)
Tropical Forest	India	24,72° N 24,67° N	93,84° E	1365,5	PC = 0,5800 * PB - 13,44	0,990 0,990	8,34 19,20	Gupta y Usharani (2009)
Bosque Secundario Semideciduo	Brasil	20° 45' S	93,90° E	1345	PN = 0,8670 * PB - 2,716	0,991	3,13	Oliveira - Junior y Teixeira - Dias (2005)
Bosque Tropical Amazónico	Colombia	0° 37' S	42° 51' W	3100	PC = 0,9260 * PB - 1,02	0,990	1,10	Tobon - Marin <i>et al.</i> (2000)
					PC = 0,9180 * PB - 1,02	0,990	1,11	
					PC = 0,9060 * PB 1,07	0,990	1,18	
					PC = 0,8870 * PB - 1,48	0,990	1,67	
Bosque húmedo Tropical (secundario 25-30años)	Costa Rica	10° 26' N	83° 59' W	4194	PC = 0,7645 * PB - 0,1237	0,994	0,162	Calvo - Alvarado <i>et al.</i>
Bosque húmedo Tropical (Fase I)	Costa Rica	10° 26' N	85° 29' W	2192,5	PC = 0,7746 * PB - 0,4588	0,995	0,592	Presente estudio
Bosque húmedo Tropical (Fase II)	Costa Rica	10° 26' N	85° 29' W	2192,5	PC = 0,7746 * PB - 0,4588 PC = 0,7681 * PB - 0,0042 PC = 0,7308 * PB - 0,6828	0,960	0,592	Presente estudio
Bosque húmedo Tropical (Fase III)	Costa Rica	10° 26' N	85° 29' W	2192,5	PC = 0,7308 * PB - 0,6828	0,976	0,592	Presente estudio

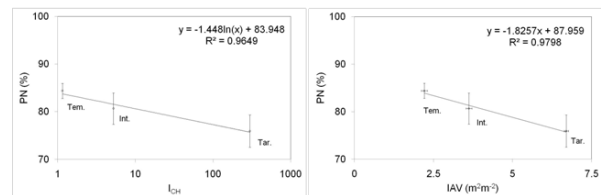
Cuadro 4. Matriz de comparación para los coeficientes de similitud de Jaccard [C<sub>j</sub>] en tres estadios de sucesión secundaria de un Bosque húmedo Tropical, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

	Temprano	Intermedio	Tardío
Temprano	1,00	--	--
Intermedio	0,50	1,00	--
Tardío	0,13	0,24	1,00

Al avanzar en el estado de sucesión, la complejidad de los bosques incrementa en términos florísticos-estructurales, afectando directamente la precipitación de copas. La Figura 4 muestra como el estado de sucesión disminuye el porcentaje de PN por la intercepción de agua por parte del dosel del bosque. Una tendencia similar fue observado por Tobon-Marin *et al.* (2000), quien reporta un aumento en la evaporación al aumentar la cobertura del dosel.

Estas diferencias en los flujos hídricos en los bosques evaluados son generadas por las características biológicas de los bosques, patrón que ha sido documentado para la India (Gupta y Usharani 2009) en donde la presencia de especies siempre verdes y caducifolias afectan la intercepción de precipitación.

Considerando el periodo de muestreo aplicado en este estudio (época lluviosa), es importante resaltar la disminución del error experimental que puede aportar las variaciones en intensidad y duración de las precipitaciones producidas por la variabilidad interanual e intra-estacional (Cuartas *et al.* 2007).

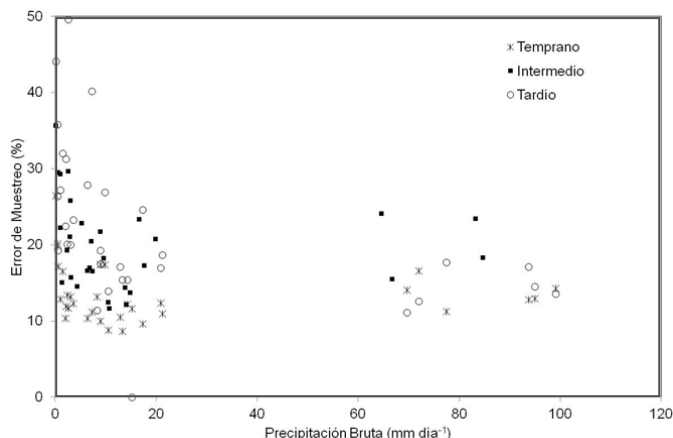


Nota: barras de error en ambos ejes corresponden al error estándar de la media.

Figura 4. Distribución de la Precipitación Neta (PN) respecto al Índice de Complejidad de Holdridge (ICH) y al Índice de Área Vegetal (m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>) para tres estadios de sucesión, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

El error de muestreo para la estimación de la precipitación de copas se muestra en la Figura 5; donde al aumentar el tamaño de la precipitación bruta se reduce el error de muestreo para los tres estados de sucesión.

De los tres estadios analizados, el Temprano presenta el menor error promedio (13,5%), mientras que al avanzar en la madurez del bosque el error promedio se incrementa a un 19,9% para el bosque Intermedio y a un 22,1% en el bosque Tardío. El error menor en el temprano se debe a que se emplazaron 40 pluviómetros en respuesta a la variabilidad de la estructura de este estadio, con lo cual se logró efectivamente disminuir el error; mientras que los otros dos estadios fueron evaluados con 30 pluviómetros. Para todos los estadios, más del 50% de los eventos muestreados presentaron un error de muestreo menor al promedio obtenido para cada parcela (Figura 5).



**Figura 5.** Distribución del error de muestreo (%) respecto a la precipitación bruta ( $\text{mm día}^{-1}$ ) para tres estadios de sucesión, Estación Biológica Maritza, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica.

Por otra parte, la mayoría de los eventos con errores de muestreo superiores a los promedios fueron obtenidos en precipitaciones brutas menores a los  $9,8 \text{ mm día}^{-1}$  en el bosque Temprano,  $19,8 \text{ mm día}^{-1}$  en el bosque Intermedio y  $17,3 \text{ mm día}^{-1}$  en el bosque Tardío. Este aumento del error en precipitaciones de baja intensidad implican un aumento en la inexactitud cuando se estima la interceptación; debido a que los eventos menores a estos umbrales representan un 12,43%, 27,75% y 25,26% de los volúmenes totales de precipitación registrados durante el estudio.

Para mantener un error de muestreo menor al 10% en la estimación de la precipitación de copas en este tipo de bosque, es necesario incrementar el número de pluviómetros en cada estadio. Bajo las condiciones específicas de estructura es necesario aumentar los colectores de precipitación de copas a 78 en el estadio Temprano, 128 en el estadio Intermedio y 176 en el estadio Tardío.

## Conclusiones

Los resultados de este estudio confirman que al avanzar en el estado de sucesión secundaria, la estructura y composición florística es más compleja, lo cual aumenta la interceptación de precipitación. El bosque Temprano presenta el mayor porcentaje de Flujo Caulinar debido a las características morfológicas de las especies presentes y a la baja altura dominante del bosque.

Los datos generados son útiles para estimar los flujos de agua durante el proceso de interceptación empleando ecuaciones de regresión; estas ecuaciones podrán a su vez ser empleadas en modelos de simulación hidrológica para evaluar el impacto de la restauración de bosques en los flujos de agua de las cuencas, en este caso particular para la cuenca alta del Río Tempisque.

Los estudios reportados hasta la fecha sobre interceptación de precipitación no han profundizado en las estimaciones del error de muestreo, lo que consideramos un desacierto dado que se debe reportar las estimaciones con errores aceptables uniformizando protocolos. En este estudio los errores están alrededor del 20%, que podemos considerar

aceptable pero idealmente se debería ajustar los protocolos a un error menor del 10%, si se desea emplear la información en modelos de simulación.

## Recomendaciones

Para reducir la alta variación al determinar la precipitación de copas, se debe de incrementar el número de colectores a más 40 o en su defecto aumentar el área de muestreo con pluviómetros de mayor capacidad. Por otra parte, debido al efecto de los diferentes mecanismos de precipitación es indispensable establecer ensayos con una duración mínima de un año para monitorear la estacionalidad de las lluvias y su efecto sobre la interceptación de precipitación.

Se debe incorporar a los estudios de interceptación de precipitación variables estructurales como el Índice de Área Vegetal y sus variaciones como el Índice de Área Foliar, para facilitar la determinación de la interceptación por medio de sensores remotos y la aplicación de modelos de simulación hidrológica a nivel de cuenca.

## Agradecimientos

Al programa EU-ALFA Project EUFORLA por la oportunidad del intercambio académico entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y la Universitat de Lleida. Este estudio es parte del proyecto: “Long-Term Research in Environmental Biology: Streams of the Area de Conservación Guanacaste” conducido por el Stroud Water Research Center con el apoyo de USA National Science Foundation (DEB 05-16516) y del proyecto TROPY-DRY: “Dimensiones Humanas, Ecológicas y Biofísicas de los Bosques Secos Tropicales”; proyecto desarrollado por una red de investigación respaldada por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN II # 021, y financiada por el US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

## Referencias

- Arcova, FCS; Cicco, V de; Rocha, PAB. 2003. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - São Paulo. Revista *Árvore* 27:257-262.
- Arroyo-Mora, JP; Sanchez-Azofeifa, GA; Kalacska, MER; Rivard, B; Calvo-Alvarado, JC; Janzen, DH. 2005. Secondary forest detection in a neotropical dry forest landscape using Landsat 7 ETM+ and IKONOS Imagery. *Biotropica* 37(4):497-507.
- Balieiro, F de C; Franco, AA., Fontes, RLF; Dias, LE; Campello, EFC; Faria, SM de. 2007. Evaluation of the throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapele* and *Eucalyptus grandis*. Revista *Árvore* 31:339-346.
- Bruijnzeel, LA. 2004. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems y Environment* 104(1):185-228.



- Calvo-Alvarado, JC; Jiménez-Rodríguez, C; Carvajal-Vanegas, D; Arias-Aguilar, D. 2009a. Rainfall interception in tropical forest ecosystems: Tree plantations and secondary forest. (on line). In Water Resources in Changing Climates. (2009, Virginia, US). Proceedings of Water Research Conference. Virginia US: Virginia Tech. p. 74-83. Accessed October 01, 2011. Available on <http://wrrc.vt.edu/proceedings.html>
- Calvo-Alvarado, JC; McLennan, B; Sánchez-Azofeifa, A; Garvin, T. 2009b. Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management* 258(6):931-940.
- Carvajal-Vanegas, D. 2004. Intercepción de precipitación en dos especies forestales nativas: *Vochysia guatemalensis* y *Vochysia ferruginea* (Vochysiaceae). Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. 45 p. (Informe de Práctica de Especialidad).
- Cavelier, J; Vargas, G. 2002. Procesos hidrológicos. Ecología y conservación de bosques neotropicales. Guariguata, MR; Kattan, GH, (Eds). Cartago, CR, Libro Universitario Regional. p. 145-165.
- Cordero-Montoya, R; Acevedo, H; Calvo-Alvarado, JC. 2008. Cambio de la cobertura de la tierra para el Área de Conservación Tempisque, periodo 1998-2003. (en línea). *Kurú: Revista Forestal (CR)*. 5(15). Consultado 01 Octubre 2011. Disponible en [http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista\\_Kuru/antiores/antior15/Articulo%201.htm](http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/antiores/antior15/Articulo%201.htm)
- Crockford, RH; Richardson, DP. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14(16-17):2903-2920.
- CRRH (Comité Regional de Recursos Hidráulicos). 2008. El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica. San José, CR, CRRH. 75 p.
- Cuartas, LA; Tomasella, J; Nobre, AD; Hodnett, MG; Waterloo, MJ; Múnera, JC. 2007. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology* 145(1-2):69-83.
- Fallas-Gamboa, J. 1996. Cuantificación de la intercepción en un bosque nuboso. Monte de los Olivos, Cuenca del Río Chiquito, Guanacaste, Costa Rica. San José, CR, Centro Científico Tropical / Centro Internacional en Política Económica para el Desarrollo Sostenible de la UNA / International Institute for Environment and Development. 37 p.
- Filoso, S; Williams, MR; Melack, JM. 1999. Composition and deposition of throughfall in a flooded forest archipelago (Negro River, Brazil). *Biogeochemistry* 45(2):169-195.
- Finegan, B. 1992. The management potential of neotropical secondary lowland rain forest. *Forest Ecology and Management* 47(1-4):295-321.
- Fleischbein, K; Wilcke, W; Coller, R; Boy, J; Valarezo, C; Zech, W; Knoblich; 2005. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological processes*. 19: 1355-1371.
- García-Estringana, P; Alonso-Blázquez, N; Alegre, J. 2010. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology* 389 (3-4):363-372.
- Gupta, A; Usharani, L. 2009. Rainfall partitioning in a tropical forest of Manipur, North East India. *Tropical Ecology* 50(2):355-358.
- Guzman, I; Calvo-Alvarado, JC. 2011. Availability and use of water resources in the Upper Tempisque River Watershed, Costa Rica. *Water International*. (Accepted).
- Holdridge, LR. 1967. Life zone ecology. San José, CR, Tropical Science Center. 149 p.
- Holwerda, F; Bruijnzeel, LA; Muñoz-Villers, LE; Equihua, M; Asbjornsen, H. 2010. Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* 384 (1-2):84-96.
- Jiménez, J; Calvo-Alvarado, JC; Pizaro, F; González, E. 2005. Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el río Tempisque. San José, CR, Organización para Estudios Tropicales-UICN. 40 p. (Área temática de humedales, agua y zonas costeras).
- Krebs, CJ. 1998. *Ecological methodology*. 2nd ed. British Columbia, CA, University of British Columbia; United States Department of Agriculture, Forest Service. 620 p.
- Lloyd, CR; Marques, FA de O. 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 42(1):63-73.
- Nair, U; Ray, D; Lawton, R; Welch, R; Pielke, P; Calvo-Alvarado, JC. 2010. The impact of deforestation on orographic cloud formation in a complex tropical environment. *Tropical montane cloud forests: Science for Conservation and Management*. LA. Bruijnzeel, FN. Scatena, and LS Hamilton (Eds.) 538-548. Cambridge Books Online. 04 January 2012 <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511778384.057>
- Oliveira-Júnior, JC de; Dias, HCT. 2005. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. *Revista Árvore* 29:9-15.
- Skau, C.M. 1964. Interception, throughfall, and stemflow in Utah and Alligator Juniper Cover Types of Northern Arizona. *Forest Science*. 10 (3): 283-287.
- Staelens, J; Schrijver, AD; Oyarzún, C; Lust, N. 2003. Comparison of dry deposition and canopy exchange of base cations in temperate hardwood forests in Flanders and Chile. *Gayana Botánica* 60:9-16.
- StatSoft, Inc. 2003. STATISTICA (Data analysis software system), version 6.
- Tobon-Marin, C; Bruijnzeel, LA; Frumau, F; Calvo-Alvarado, JC. 2010. Changes in soil hydraulic properties and soil water status after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. *Tropical montane cloud forests: Science for conservation and management*. LA. Bruijnzeel, FN Scatena, and LS Hamilton (Eds). 502-515. Cambridge University Press, 2011. Cambridge Books Online. 04 January 2012 <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511778384.054>
- Tobon-Marin, C; Bouten, W; Sevink, J. 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237 (1-2):40-57.