



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto Colombiano**

**Javier Fernando Méndez Monroy**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Agrícola y Civil  
Bogotá D.C, Colombia  
2013



# **Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto colombiano**

**Javier Fernando Méndez Monroy**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Recursos Hidráulicos**

Director:

Ph.D., Nelson Obregón Neira

Hidrología y Meteorología

Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos (GIREH)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Agrícola y Civil

Bogotá, Colombia

2013



*Voy siguiendo el ejemplo del Salmon,  
solo creo en mi propia dirección  
y en la Verdad*



*Andrés Calamaro*



## **Agradecimientos**

Al Ing, M. Sc, Ph.D Nelson Obregón Neira, director de la investigación, por sus invaluable enseñanzas, consejos y aportes.

A los profesionales Ing, M. Sc Patricia Téllez Guio y Ing, M.Sc Álvaro Jaramillo de Cenicafe, quienes en pro de la investigación en el país, amablemente facilitaron las bases de datos utilizadas para el entendimiento del proceso estudiado.

A la Universidad Nacional de Colombia, el Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos (GIREH) y a Colciencias, quienes apoyaron, colaboraron y financiaron este proyecto de investigación.



## Resumen

Desde la hidrología clásica el proceso de interceptación de lluvias se ha cuantificado como una fracción constante de la precipitación incidente, pero desde la década de los 70's se ha evidenciado que su comportamiento es dinámico y depende tanto de las características de la lluvia (intensidad y duración) como de las condiciones meteorológicas locales y las características de las coberturas vegetales presentes. El objetivo de esta investigación es entonces plantear una propuesta metodológica de medición de variables hidrometeorológicas que permita la implementación de modelos matemáticos, siendo consciente de la naturaleza dinámica del proceso.

Para alcanzar este objetivo se desarrollaron las siguientes actividades: 1) revisión del proceso de interceptación de lluvia dentro del ciclo hidrológico y estudio de las diferentes familias de modelos de interceptación de lluvias, 2) contextualización del proceso de interceptación en la investigación realizada en Colombia, 3) desarrollo y validación de aplicativo computacional para la implementación de los modelos de interceptación de lluvia y análisis de sensibilidad paramétrica de los modelos y 4) presentación de una propuesta metodológica de medición que facilite la implementación de los modelos de interceptación de lluvia, en función de la información requerida por los modelos y las series históricas registradas en el país.

**Palabras clave:** Interceptación, modelos dinámicos, variables hidrometeorológicas, metodología, simulación.

## Abstract

Classical Hydrology has quantified the rainfall interception process as a constant fraction of incident rainfall, but since the early 70's it was noticed that its behavior is dynamic and depends on rainfall characteristics (intensity and duration), local weather conditions and vegetation characteristics. The objective of this research is to propose a methodology for measuring hydrometeorological variables that enables the implementation of mathematical models, recognizing the dynamic nature of the process.

To achieve this objective the following activities were developed: 1) Reviewing of rainfall interception process in the hydrological cycle and studying the different types of rainfall interception models, 2) Contextualizing research in Colombia about rainfall interception process, 3) Developing and validating computer programs to implement models of rainfall interception and developing a parametric sensitivity analysis of models, and (4) proposing a measurement methodology that facilitates the implementation of rainfall interception models, according to the information required by the models and time series recorded in the country.

**Keywords:** Interception, dynamic models, hydrometeorological variables, methodology, simulation.

# Contenido

	<u>Pág.</u>
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	6
1.3. OBJETIVOS .....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos .....	6
1.4. ESQUEMA DEL DOCUMENTO.....	6
<b>2. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>9</b>
2.1. EL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIAS EN EL CICLO HIDROLÓGICO.....	9
2.2. INTERCEPTACIÓN POR COBERTURAS VEGETALES .....	13
2.3. VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN.....	17
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA COBERTURA VEGETAL.....	25
2.5. MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIAS .....	27
2.5.1. Modelos físicamente basados .....	29

---

2.5.2.	Modelos analíticos de interceptación de lluvia.....	41
2.6.	MODELOS DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL.....	52
<b>3.</b>	<b>ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....</b>	<b>57</b>
3.1.	REVISIÓN DE INVESTIGACIONES EN COLOMBIA.....	57
3.2.	ESTUDIO Y SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN.....	58
3.3.	MODELACIÓN DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN (ESTUDIO DE CASO PARA COLOMBIA).....	59
3.4.	PROPUESTA METODOLÓGICA DE MEDICIÓN DE VARIABLES.....	72
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>73</b>
4.1.	EL ESTUDIO DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN EN COLOMBIA.....	73
4.1.1.	Balance hídrico en el cultivo de Café y efecto de las pérdidas por interceptación en el ciclo hidrológico.....	76
4.1.2.	La simulación del ciclo hidrológico en cobertura de bosque para la amazonia Colombiana.....	83
4.1.3.	Discusión.....	87
4.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DINÁMICOS DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA: ESTUDIO DE CASO PARA COLOMBIA.....	89
4.2.1.	Preparación de datos para modelación.....	89
4.2.2.	Registro de flujos de agua en bosque maduro.....	91
4.2.3.	Estimación de parámetros de forma gráfica.....	93
4.2.4.	Solución del problema inverso de calibración.....	95
4.2.5.	Validación de modelos de interceptación de lluvias.....	99
4.2.6.	Simulación del proceso de interceptación de lluvias.....	110
4.2.7.	Discusión.....	112
4.3.	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN.....	122

---

4.3.1.	Protocolo de medición de variables del proceso de interceptación....	123
4.3.2.	Protocolo de modelación del proceso de interceptación de lluvia .....	138
4.3.3.	Discusión .....	143
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>145</b>
5.1.	CONCLUSIONES .....	145
5.2.	RECOMENDACIONES.....	147
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>149</b>



## Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
<b>Figura 2-1:</b> Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global ....	10
<b>Figura 2-2:</b> Balance de Masa en el follaje de un árbol .....	14
<b>Figura 2-3:</b> Técnicas de medición de los componentes del proceso de interceptación ..	21
<b>Figura 2-4:</b> Imágenes obtenidas para el análisis de la estimación del porcentaje de cobertura vegetal y la fracción de vacíos en un bosque .....	26
<b>Figura 2-5:</b> Modelo conceptual del modelo de Rutter.....	33
<b>Figura 2-6:</b> Relación entre Precipitación Incidente y Flujo de translocación para la estimación de los parámetros $S$ y $p$ para un Pino Corsican.....	36
<b>Figura 2-7:</b> Modelo conceptual de Rutter reformulado .....	39
<b>Figura 2-8:</b> Aplicación de modelos de interceptación de lluvia en el mundo.....	54
<b>Figura 2-9:</b> Distribución de aplicación de modelos según tipo de vegetación analizada.	55
<b>Figura 3-1:</b> Actividades realizadas en la estrategia metodológica propuesta en esta investigación .....	57
<b>Figura 3-2:</b> Esquema general de modelación del proceso de interceptación .....	59
<b>Figura 3-3:</b> Representación del Modelo de Bartlett Lewis. ....	62
<b>Figura 3-4:</b> Esquema de simulación de estudio de caso en cobertura de bosque maduro .....	72
<b>Figura 4-1:</b> Precipitación Incidente vs Precipitación neta para diferentes tipos de Cobertura Vegetal .....	77
<b>Figura 4-2:</b> Precipitación Incidente vs Interceptación para diferentes tipos de cobertura vegetal .....	78

---

<b>Figura 4-3:</b> Precipitación vs Precipitación neta según expresiones matemáticas de la Tabla 4-2.....	79
<b>Figura 4-4:</b> Precipitación vs Interceptación según expresiones matemáticas de la Tabla 4-2.....	80
<b>Figura 4-5:</b> Almacenamiento de agua en la parte aérea en diferentes agroecosistemas de cafetales y comparación para valores reportados para otras estructuras vegetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR(Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).....	82
<b>Figura 4-6:</b> Proporción de lluvia neta diaria en los diferentes agroecosistemas de cafetal y comparación para valores reportados para otras estructuras vegetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío). ....	82
<b>Figura 4-7:</b> Precipitación Incidente vs Precipitación neta para diferentes tipos de cobertura vegetal.....	85
<b>Figura 4-8:</b> Precipitación Incidente vs Interceptación para diferentes tipos de cobertura vegetal .....	86
<b>Figura 4-9:</b> Evaporación Potencial y precipitación incidente desde 01 de Mayo 2000 a 20 de Junio 2001.....	91
<b>Figura 4-10:</b> Diagramas BOX-PLOT para los flujos de precipitación incidente, precipitación neta, flujo de translocación, flujo cortical y pérdidas por interceptación .....	92
<b>Figura 4-11:</b> Histograma de frecuencias para los flujos de precipitación incidente, precipitación neta, flujo de translocación, flujo cortical y pérdidas por interceptación .....	93
<b>Figura 4-12:</b> Estimación de parámetros $St$ y $pd$ mediante regresión lineal .....	94
<b>Figura 4-13:</b> Estimación del parámetro $S$ mediante regresión lineal.....	94
<b>Figura 4-14:</b> Dotty y Likelihood Plot para parámetros $S$ y $St$ .....	96
<b>Figura 4-15:</b> A posteriori distribution para parámetros $S$ y $St$ .....	97
<b>Figura 4-16:</b> Regional Sensitive Analysis para parámetros $S$ y $St$ .....	97
<b>Figura 4-17:</b> Class Plot para parámetros $S$ y $St$ .....	97
<b>Figura 4-18:</b> GLUE Output Uncertainty para parámetros $S$ y $St$ .....	98
<b>Figura 4-19:</b> Parameter View para parámetros $S$ y $St$ .....	98
<b>Figura 4-20:</b> Porcentaje de precipitación neta en función de la precipitación incidente .	102

---

<b>Figura 4-21:</b> Porcentaje de flujo de translocación <i>TH</i> en función de la precipitación incidente.....	102
<b>Figura 4-22:</b> Porcentaje de Flujo Cortical ( <i>SF</i> ) en función de la precipitación incidente	103
<b>Figura 4-23:</b> Porcentaje de pérdidas por interceptación en función de la precipitación incidente.....	103
<b>Figura 4-24:</b> Precipitación Incidente vs precipitación neta .....	104
<b>Figura 4-25:</b> Precipitación Neta por eventos de tormenta utilizados para validación.....	105
<b>Figura 4-26:</b> Precipitación Incidente y Neta acumulada para valores registrados y simulados.....	106
<b>Figura 4-27:</b> Precipitación Incidente vs flujo de translocación .....	106
<b>Figura 4-28:</b> Flujo de translocación por eventos de tormenta utilizados para validación .....	107
<b>Figura 4-29:</b> Precipitación incidente y flujo de translocación acumulado para valores registrados y simulados.....	107
<b>Figura 4-30:</b> Precipitación Incidente vs flujo cortical .....	108
<b>Figura 4-31:</b> Flujo cortical por eventos de tormenta utilizados para validación.....	108
<b>Figura 4-32:</b> Flujo Cortical acumulado para valores registrados y simulados.....	109
<b>Figura 4-33:</b> Precipitación Incidente vs Interceptación .....	109
<b>Figura 4-34:</b> Interceptación por eventos de tormenta utilizados para validación .....	110
<b>Figura 4-35:</b> Interceptación acumulada para valores registrados y simulados .....	110
<b>Figura 4-36:</b> Evaporación Potencial y precipitación incidente para el año 2011 .....	111
<b>Figura 4-37:</b> Flujos de agua acumulados para cobertura de Bosque Maduro en el medio Caquetá para el año 2011.....	112
<b>Figura 4-38:</b> Ruta metodológica propuesta para la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvias .....	123
<b>Figura 4-39:</b> Pasos recomendados para la selección del área de estudio para la modelación del proceso de interceptación.....	125

---

<b>Figura 4-40:</b> Procesamiento de una fotografía digital con GreenCropTracker. A) Vista desde abajo de la cobertura vegetal analizada. B) Vista en planta de la cobertura vegetal analizada.....	127
<b>Figura 4-41:</b> Pasos recomendados para la instrumentación del área experimental .....	131
<b>Figura 4-42:</b> Resumen de técnicas de medición de variables del proceso de interceptación.....	135
<b>Figura 4-43:</b> Proceso de preparación de datos para su implementación en modelo dinámicos de interceptación de lluvias .....	138
<b>Figura 4-44:</b> Protocolo de modelación propuesto para simular el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales .....	140

## Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
<b>Tabla 2-1:</b> Componentes de modelo de interceptación de lluvia de Gash (1979).....	48
<b>Tabla 2-2:</b> Componentes del modelo de Interceptación de Gash reformulado (1995)....	50
<b>Tabla 2-3:</b> Componentes del modelo de interceptación Gash Sparse (Valente <i>et al</i> , 1997) .....	51
<b>Tabla 2-4:</b> Principales características de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia seleccionados .....	52
<b>Tabla 2-5:</b> Parámetros implícitos en los modelos dinámicos de interceptación de lluvia analizados .....	53
<b>Tabla 3-1:</b> Estadísticos de variables meteorológicas para el periodo Mayo 2001 a Junio 2002 .....	65
<b>Tabla 3-2:</b> Rango de los parámetros para calibración .....	67
<b>Tabla 3-3:</b> Estadísticos y sus expresiones matemáticas .....	70
<b>Tabla 4-1:</b> Resumen de investigaciones relacionadas con el procesos de interceptación de lluvias en Colombia .....	74
<b>Tabla 4-2:</b> Expresiones matemáticas para el cálculo de Precipitación Neta (mm) e Interceptación (mm) en la zona cafetera en función de la Precipitación Incidente (mm). 78	
<b>Tabla 4-3:</b> Flujos de agua (%) y capacidades de almacenamiento para diferentes coberturas vegetales en el eje cafetero (Colombia).....	79
<b>Tabla 4-4:</b> Coeficientes de regresión lineal entre precipitación incidente y precipitación neta para diferentes coberturas.....	86
<b>Tabla 4-5</b> Características dasométricas de las coberturas vegetales analizadas .....	87
<b>Tabla 4-6</b> Flujos de agua en volumen y porcentajes para 4 tipos de coberturas de Bosque .....	87

---

<b>Tabla 4-7:</b> Resumen de estadísticos para la variable precipitación medida en el experimento Téllez (2003) en el periodos 2001-06 a 2002-01 y 2002-05 a 2002-06 .....	90
<b>Tabla 4-8:</b> Parámetros Calibrados para el modelo de Bartlett Lewis, caso Téllez (2003) .....	90
<b>Tabla 4-9:</b> Descriptivos estadísticos para flujos de precipitación, flujo de translocación, flujo cortical, precipitación neta y pérdidas por interceptación bosque maduro.....	91
<b>Tabla 4-10:</b> Resumen de parámetros hallados gráficamente .....	95
<b>Tabla 4-11:</b> Mejores 10 combinaciones de parámetros para cobertura bosque maduro.	96
<b>Tabla 4-12:</b> Relaciones estadísticas entre valores observados y simulados .....	99
<b>Tabla 4-13:</b> Comparación de comportamiento de modelos dinámicos de interceptación de lluvia bajo diferentes escenarios.....	100
<b>Tabla 4-14:</b> Estadísticos representación porcentual de las variables hidrológicas en función de la precipitación incidente .....	101
<b>Tabla 4-15:</b> Coeficientes de regresión lineal entre valores observados y simulados para modelos de interceptación de lluvias .....	104
<b>Tabla 4-16:</b> Estadísticos de flujos de agua en cobertura de bosque maduro con el modelo GSC para el año 2011 en la cuenca amazónica.....	112

# 1.INTRODUCCIÓN

Dentro de la cuantificación de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, se encuentra la interceptación hecha por las coberturas vegetales la cual se ha estimado como una fracción de la precipitación incidente. La anterior cuantificación se conoce como balance hídrico, donde se realiza un cálculo de la cantidad de la masa de agua que ingresa menos las que sale del sistema estudiado, siendo esta diferencia el cambio de la masa en el sistema. En el caso de la interceptación, nuestro volumen de control es el follaje, el cual está conformado por las hojas y los tallos o ramas que se encuentran en la parte aérea de la planta.

La **interceptación** de lluvia es el proceso por el cual la lluvia incidente es interceptada por las coberturas vegetales y posteriormente es redistribuida. La lluvia que golpea la superficie de la planta es retenida temporalmente para luego ser evaporada a la atmósfera (**pérdida por interceptación**) o cae al suelo directamente (**goteo**) o fluye a través de las ramas y el tronco (**flujo cortical, escurrimiento fustal o flujo caolinar**). La lluvia que no es interceptada por la cobertura vegetal se conoce como **flujo libre de translocación** y junto con el goteo se conoce como **flujo de translocación** (David *et al*, 2005) o **Precipitación Foliar** (Téllez, 2003). El flujo de translocación más el flujo cortical se define como **precipitación neta**.

Según Gerrits M. (2010), esta interceptación se da no solo por coberturas vegetales, si no por otras estructuras como el suelo, la materia orgánica (litter), las construcciones civiles y la agricultura. El mismo autor comenta que existen tres grandes efectos de la interceptación sobre el ciclo hidrológico. Primero actúa como reductor de lluvias, segundo influencia la distribución espacial de la infiltración, en consecuencia la cantidad de humedad del suelo y el flujo subsuperficial, y por último redistribuye la lluvia en el tiempo, mediante un tiempo de retardo no homogéneo; estos tres efectos pueden ser una explicación del comportamiento no lineal de las cuencas (Gerrits M. , 2010). A lo anterior

se suma una modificación del comportamiento del proceso de evaporación y en consecuencia de las características de la precipitación incidente (Llorens & Domingo, 2007).

La estimación de la interceptación por coberturas vegetales se ha abordado tradicionalmente como un porcentaje constante de la precipitación. Las pérdidas por interceptación dependen directamente de la duración e intensidad de la lluvia, la estructura de la vegetación y de las condiciones climatológicas que controlan la evaporación durante y después de la lluvia (Rutter, *et al*, 1971; Rutter *et al*, 1975; Xiao *et al*, 2000)

La cantidad de agua interceptada varía según las características dasométricas<sup>1</sup> de la cobertura vegetal presente en la cuenca. La vegetación juega un papel importante en la evaporación de la precipitación, debido a que su follaje llega a retener del 10 al 50% de la precipitación total (Gerrits M. , 2006). Para zonas tropicales y subtropicales la interceptación se encuentra en el rango de 8.9-39% (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000). Jaramillo (2003) reporta valores para otras coberturas vegetales, p. e, Cacao (13-27%), Selva amazónica (25%), Selvas en Malasia (25-80%), Bosques (27%), etc.

La presencia de vegetación afecta la cantidad de agua que alcanza el nivel del suelo estando la interceptación directamente relacionada con la interacción suelo-planta-atmósfera, condicionando los procesos de infiltración, escorrentía y evaporación. La cantidad de agua disponible en la zona radicular es función de las anteriores variables, siendo determinante en los procesos de nutrición, reproducción y transpiración de la planta. Además, el agua sobre el follaje de la vegetación es un importante factor ecológico que condiciona los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre las superficies foliares (Jaramillo, 2003).

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

El estudiar el proceso de interceptación de lluvia por coberturas vegetales integrando las características de la estructura interceptora, las condiciones hidrometeorológicas de la zona, y además de esto, ver en detalle como suceden los procesos físicos que hacen

---

<sup>1</sup> La dasometría se ocupa de las mediciones forestales, tanto del árbol individual como de la masa forestal, así como del estudio del crecimiento de los árboles.

parte del mismo, permitirá cambiar el paradigma de estimar la interceptación como una fracción constante de la precipitación incidente y destacará la importancia de la interceptación dentro del ciclo hidrológico como un proceso dinámico.

Desde la hidrología clásica se ha visto la interceptación como un componente no relevante en el ciclo hidrológico, siendo incorporado a otros procesos o despreciándose, ya que se piensa que su cuantificación e interpretación no repercutirá en el comportamiento del ciclo hidrológico. Por otro lado, también se piensa que su cuantificación es laboriosa y no es fácil obtener un valor representativo de la interceptación, razón por la cual no se estudia en detalle este proceso.

Lo anterior se observa en modelos clásicos utilizados en hidrología como lo es el método de la Curva Número del SCS de los Estados Unidos (USDA, 1986). El método de la curva número CN, se diseñó para calcular abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. En este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación, y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, curva número CN. La curva número es función del tipo de suelo hidrológico, utilización y tratamiento del suelo, condiciones de la superficie del terreno, y de la condición antecedente de humedad del suelo. Las abstracciones iniciales (cantidad de precipitación para lo cual no ocurrirá escorrentía) se calculan como el 20% de la retención potencial máxima, la cual es función a su vez del número de curva CN.

En este método se asume la interceptación como una parte de las abstracciones iniciales, las cuales son a su vez un porcentaje de la retención potencial máxima. Además de todas las suposiciones que se tienen en este modelo, se debe mencionar que los valores tabulados de CN, se obtuvieron de la revisión de estudios realizados en cuencas en Estados Unidos, las cuales tienen características fisiográficas y climatológicas diferentes, debiéndose realizar ciertas consideraciones antes de su implementación.

También es el caso de las abstracciones estimadas en las ecuaciones de infiltración, donde dichas abstracciones incluyen la interceptación de precipitación por la vegetación del terreno, el almacenamiento en depresiones en la superficie del suelo a medida que el

agua se acumula en hundimientos en la superficie, y la infiltración de agua en el suelo. Las abstracciones por interceptación y almacenamiento en depresiones se estiman con base en la naturaleza de la vegetación y de la superficie del terreno o se suponen despreciables para una tormenta grande (Chow *et al*, 1994).

Se reitera en los conceptos clásicos de hidrología que el proceso de interceptación no presenta relevancia en el ciclo hidrológico. Investigaciones del proceso de interceptación de lluvia (Gash J, 1979; Gash *et al*, 1995; Valente *et al*, 1997; Calder, 1986; Xiao *et al*, 2000; Téllez, 2003; Jaramillo, 2003; Velasquez & Jaramillo, 2009; Hernandez, 2007; Gerrits M. , 2010) han destacado la importancia del estudio de este proceso mediante la formulación y aplicación modelos físicos, analíticos y estocásticos, demostrándose que la interceptación es un proceso dinámico.

La interceptación varía durante el evento de tormenta en función tanto de las características de la cobertura vegetal como de las condiciones hidrometeorológicas. Este proceso entonces incide directamente sobre los demás procesos del ciclo hidrológico al ser un elemento regulador de los flujos de agua dentro del ecosistema.

En el caso de la hidrología urbana, el impacto de las zonas verdes sobre la disminución del caudal de escorrentía y el control de inundaciones está siendo estudiado, con la intención de proteger la calidad del agua en las cuencas urbanas (Xiao *et al*, 2000). Es necesario conocer entonces cómo diferentes especies de árboles y su configuración espacial impacta en el volumen de agua de escorrentía.

En Colombia se han realizado investigaciones por parte de los centros de investigación y universidades, con la intención de estudiar el fenómeno de interceptación por coberturas vegetales. Cenicafe<sup>2</sup> ha realizado investigaciones en el cultivo de café bajo diferentes condiciones tales como sombrío y a libre exposición (Jaramillo, 2003; Velasquez & Jaramillo, 2009). Se reporta que la interceptación puede ser del orden del 14.3-59% de la precipitación incidente y que la capacidad de almacenamiento del follaje puede estar entre 0.33 y 1.07mm en cada evento de precipitación.

---

<sup>2</sup>FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. -Programa de Investigación Científica. Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ

Para el caso de coberturas de bosques Téllez (2003), realizó una investigación detallada en la cuenca amazónica, estudiando el comportamiento de las pérdidas por interceptación en tres tipos de cobertura vegetal encontrando valores de pérdidas por interceptación que varían entre el 10.8%-18.4% de la precipitación incidente registrada. Además de esto aplicó un modelo matemático físicamente basado para de la estimación de la precipitación neta encontrando una muy buena relación con los valores medidos en campo.

Investigadores citados por Reynolds y Thompson (1988) han confirmado la importancia del reciclaje del agua en el balance hidrológico de la cuenca amazónica; dicho reciclaje de vapor dentro de la cuenca presenta el 48 %. El 52% restante de la precipitación en la región amazónica se debe al fenómeno de la macrocirculación de masas húmedas procedentes del océano atlántico, o dicho de otra manera, cerca del 50 % de la precipitación que cae sobre la cuenca amazónica es reciclada por ella misma a través del proceso de interceptación de lluvias.

La interceptación se empieza a observar desde otra óptica procurando mostrar su relevancia en otros fenómenos a diferentes escalas. Tal es el caso de los estudios de cambio climático, donde el cambio del uso del suelo y el tipo de coberturas vegetales, generan cambios en la cantidad de agua interceptada y por ende en la cantidad de agua evaporada hacia la atmósfera, afectando la recirculación de agua a nivel global. A nivel anual estos valores de interceptación pueden llegar a ser un cuarto de la precipitación incidente (Tobón C. , 1999).

Se desea entonces integrar los modelos matemáticos de interceptación de lluvia al conocimiento clásico de la hidrología, realizando un estudio detallado de los mismos, mediante una identificación de parámetros y variables (entrada, salida y estado), una revisión de las técnicas de medición de variables hidrometeorológicas necesarias para su implementación y una contextualización del estado de la investigación en Colombia respecto el tema de interceptación. Por último se busca presentar una propuesta metodológica que permita realizar la implementación de los modelos de interceptación de lluvias en cuencas colombianas, esperándose que el resultado destaque la importancia del proceso de interceptación en el ciclo hidrológico.

## **1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

La pregunta de investigación planteada en este trabajo es ¿Cuál es la metodología de medición de variables hidrometeorológicas que facilite la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia por coberturas vegetales en el contexto colombiano?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo general**

Como objetivo general de esta investigación se planteó el desarrollar una metodología de medición de las variables hidrometeorológicas que facilite la implementación de modelos de interceptación de lluvia en el contexto colombiano.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Para alcanzar este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar modelos aplicativos computacionales a través del entendimiento conceptual y matemático de la familia de modelos de interceptación de lluvia.
- Identificar los parámetros de los modelos propuestos y evaluar la complejidad del problema inverso de calibración, en función de la cantidad de información hidrometeorológica requerida por los modelos.
- Evaluar los sistemas de información que existen en Colombia a la luz de los requerimientos de los modelos de interceptación propuestos y proponer mejoras para su diseño y estructuración, y realizar una comparación con el estado de la investigación a nivel mundial en los temas referentes a interceptación.
- Proponer una metodología para implementar los modelos de interceptación de lluvia, en función de los requerimientos de información de los modelos y de las series históricas registradas en el país.

## **1.4. ESQUEMA DEL DOCUMENTO**

En el Capítulo 2, se inicia con una contextualización de este proceso, visto como componente importante dentro del ciclo hidrológico, actuando como modulador de flujos

de agua. Se continúa con la presentación del modelo conceptual abstraído para entender el proceso de interceptación y se comenta cómo cuantificar dichas pérdidas a través del principio físico de conservación de masa. Teniendo claro las variables hidrológicas implícitas en este proceso, se estudia cada una en detalle y se comenta sobre los métodos de estimación y registro de cada una. Se continúa con la presentación los modelos dinámicos de interceptación de lluvia, que después de una revisión preliminar en la literatura, se destacaron por su amplia aplicación y predictibilidad. Se abordaron dos familias de modelos, los físicamente basados o familia de Rutter y los analíticos o familia de Gash. Para cada familia se realizó una presentación detallada de las bases teóricas, su funcionamiento, variables de entrada, estado y salidas, métodos de estimación de parámetros, y se terminó con una revisión del estado de la investigación del proceso de interceptación a nivel mundial.

Las actividades realizadas para cumplir con los objetivos planteados en ésta investigación se presentan en el Capítulo 3, titulado Estrategia Metodológica. Se enfatiza en los pasos que se siguieron y cuáles fueron los métodos utilizados para encontrar los resultados que permitieron entender y analizar el proceso de interceptación de lluvias.

El Capítulo 4, presenta los resultados de cada una de las actividades planteadas en la estrategia metodológica. Se presentan entonces 3 subcapítulos: Revisión de investigaciones en Colombia relacionadas con el proceso de interceptación, estudio de caso para Colombia donde se implementan dos modelos dinámicos de interceptación de lluvias y por último, se presenta una propuesta metodológica, que facilite la implementación de modelos de interceptación de lluvias.

Las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación se incluyen en el Capítulo 5.



## **2.MARCO CONCEPTUAL**

Para entender los modelos dinámicos que simulan el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales es necesario partir de la definición de interceptación y su papel en el ciclo hidrológico. Posterior a esto se presenta el balance hídrico donde el objeto es conocer el cambio de almacenamiento en el follaje, lugar donde se presenta el proceso de interceptación en coberturas vegetales. Se continúa presentando las variables hidrometeorológicas implícitas en el proceso de interceptación y las técnicas e instrumentos convencionales utilizados para su medición.

### **2.1. EL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIAS EN EL CICLO HIDROLÓGICO**

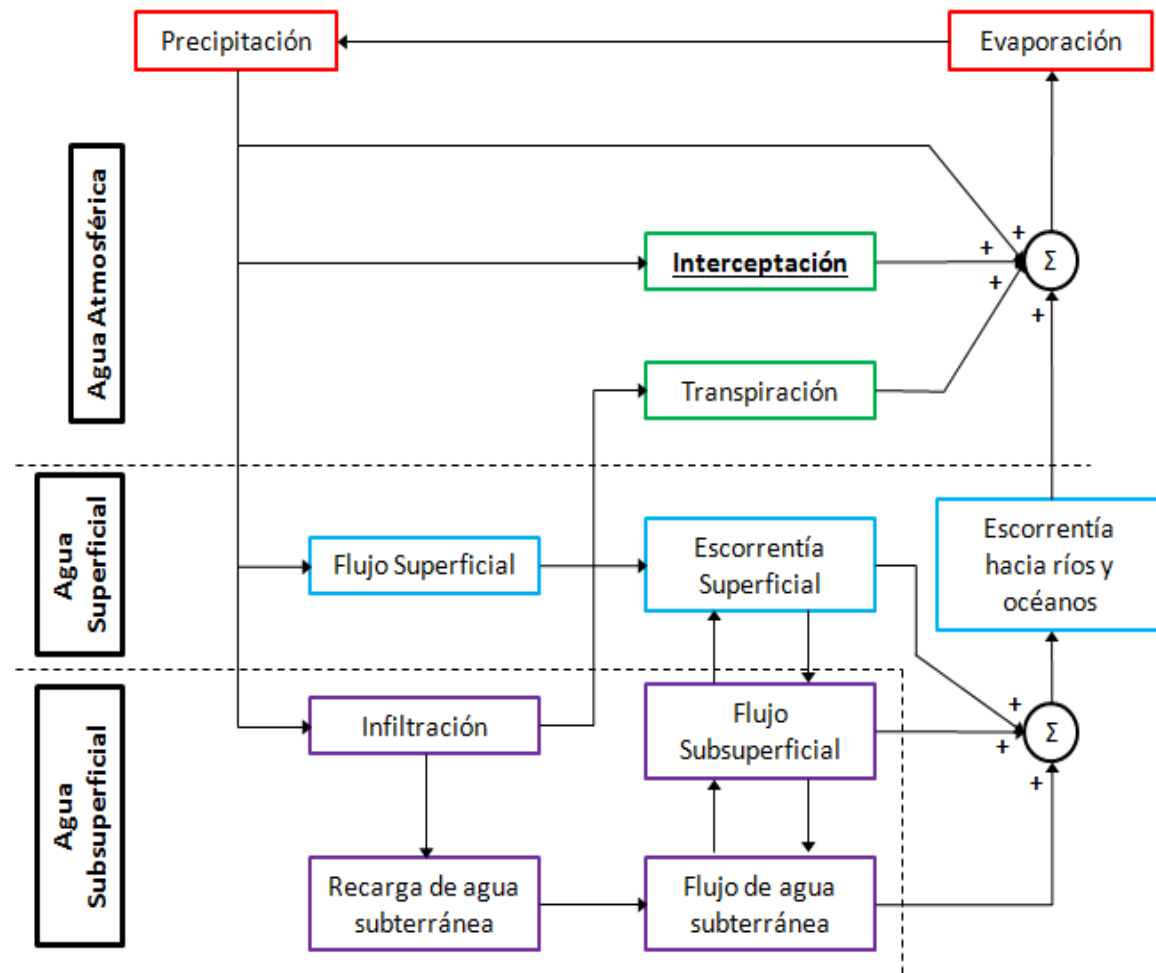
#### **El ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico se describe como el proceso de circulación de agua en la hidrosfera, siendo esta, el sistema material construido por el agua que se encuentra bajo, y sobre la superficie de la tierra. Dentro de este ciclo se encuentran diversidad de procesos que interactúan entre sí. En esta interacción de procesos existe conservación y transferencia de masa y energía, entre las partes que componen la hidrosfera, como lagos, ríos, aguas subterráneas, glaciares y la atmósfera (Chow *et al*, 1994).

La circulación del agua se da mediante procesos de evaporación, transpiración, circulación atmosférica, condensación, interceptación, precipitación, flujo superficial y subterráneo, tomando en cada caso el estado que corresponde a las condiciones de temperatura y presión (Silva, 1998). El sistema hidrológico como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas (Chow *et al*, 1994).

En la Figura 2-1 se observa la representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. A continuación se definen los componentes del ciclo hidrológico según varios autores, teniendo en cuenta el diagrama de bloques presentado anteriormente.

**Figura 2-1:** Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global



Fuente: Chow *et al*, 1994

- **Agua Atmosférica**

**Evaporación (E):** Es el proceso físico por el cual un sólido o un líquido cambia su estado a una fase gaseosa (Allen *et al*, 2006). Emisión de vapor de agua por una superficie libre a temperatura inferior a su punto de ebullición (Silva, 1998).

**Transpiración ( $E_t$ )** : Es el agua que es extraída por las raíces y es transportada hacia arriba a lo largo de sus tallos y difundida a la atmósfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas (Chow *et al*, 1994). La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas (Allen *et al*, 2006). Proceso por el cual el agua que una planta toma en la zona radicular, es llevada a las hojas desde donde se evapora; en este caso las hojas proveen la superficie evaporante, y la radiación neta proporciona la energía necesaria, tanto para el transporte del agua hasta las hojas, como para la evaporación (Silva, 1998).

**Evapotranspiración ( $E_{vt}$ )**: Es el proceso combinado de evaporación y transpiración por el cual el agua es transferida de la superficie de la tierra a la atmósfera; evaporación del agua líquida desde la superficie del suelo y agua interceptada por las plantas, más la transpiración de las plantas (Allen *et al*, 2006). Es el proceso combinado de evaporación y transpiración en un suelo húmedo (Chow *et al*, 1994).

**Condensación**: Transición de la fase de vapor a la líquida (Monsalve, 1999). El proceso de condensación requiere de la presencia en la atmósfera de núcleos de condensación sobre cuyas superficies se produce el fenómeno; estos núcleos pueden ser gotas de agua, partículas de hielo, sales o impurezas (Silva, 1998).

**Precipitación ( $P_G$ )**: Agregado de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o grupo de nubes y caen al suelo (Monsalve, 1999). Proceso mediante el cual el agua cae a la superficie del suelo. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Posteriormente cae a la superficie terrestre en forma líquida o sólida (Chow *et al*, 1994)

**Interceptación ( $E_i$  o I)**. Proceso por el cual la precipitación es detenida y retenida por la vegetación y estructuras, precipitación que se pierde por evaporación y transpiración antes de penetrar el suelo (Monsalve, 1999). Comprende el volumen de agua lluvia que no alcanza a llegar al suelo porque cae sobre los árboles, los edificios, etc., de donde posteriormente se evapora (Silva, 1998). La notación obedece a las diferentes fuentes bibliográficas donde el proceso se ha estudiado.

- **Agua Superficial**

**Escorrentía superficial ( $Q$ ):** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno. De la precipitación que alcanza el suelo, parte queda retenida ya sea en depresiones o como película en torno a partículas sólidas. Del excedente de agua retenida, parte se infiltra y parte se escurre superficialmente. Se define como exceso de precipitación la precipitación total caída al suelo menos la retenida e infiltrada (Chow *et al*, 1994)

- **Agua Subsuperficial**

**Flujo subsuperficial ( $SSF$ ):** Flujo que se presenta inmediatamente por debajo de la superficie del terreno (Monsalve, 1999). Comprende aquella parte de la infiltración que no es retenida por el suelo, y fluye por el medio poroso de las capas superiores, más o menos paralelo la superficie del terreno, Este flujo subsuperficial sale luego a la superficie, donde la topografía lo permite, y sigue su recorrido hasta la corriente de drenaje en forma superficial (Silva, 1998).

**Infiltración:** Formación de un paso de agua en forma de conducto a través de materiales naturales o artificiales, cuando las resultantes de todas las fuerzas que actúan sobre las partículas del suelo tienen una componente vertical en el sentido de la gravedad (Monsalve, 1999). La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo (Chow *et al*, 1994). La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del terreno y llega hasta las capas inferiores del suelo (Silva, 1998).

**Percolación Profunda ( $PP$ ):** Flujo de líquido a través de un medio poroso, por ejemplo de agua en el suelo, bajo la acción de gradientes hidráulicos moderados; principalmente es un flujo debido a la acción de la gravedad (Monsalve, 1999).

### **Balance hídrico**

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 (Hernandez, 2007).

El modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa (2-1), que dependerá del volumen de control y de las condiciones de frontera existentes.

$$\Delta S = I - O \quad (2-1)$$

Dónde  $\Delta S$  es el cambio de almacenamiento en el sistema,  $I$  las entradas y  $O$  las salidas del mismo para un periodo de tiempo establecido. En general, el modelo de balance hídrico considera como variable principal de entrada la precipitación incidente ( $P_G$ ) y la evaporación ( $E$ ) como variable principal de salida. Estas también se conocen como variables de forzamiento o fuerzas motrices del sistema.

## 2.2. INTERCEPTACIÓN POR COBERTURAS VEGETALES

### Balance de masa en el follaje

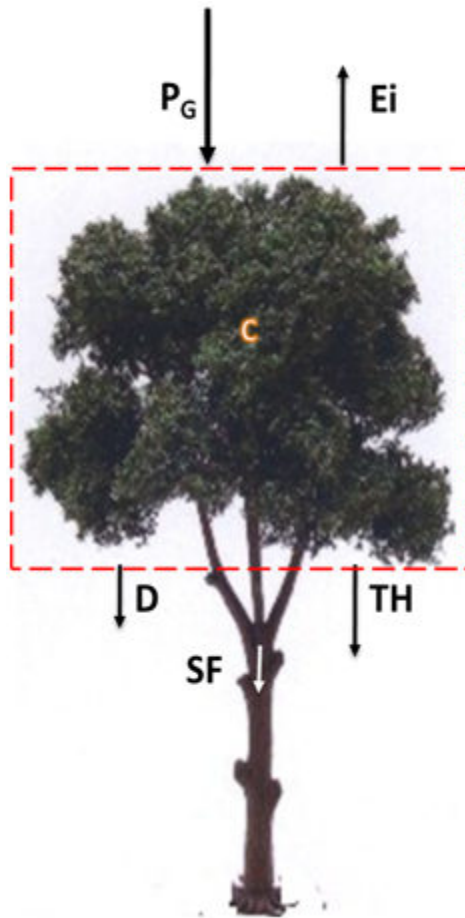
La caracterización de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica se puede entender mediante la utilización de la ecuación de balance de masa descrita anteriormente. Esta ecuación permite cuantificar los flujos de agua existentes en el volumen de control objeto de análisis. En el estudio del proceso de interceptación nuestro volumen de control será el follaje o follaje de la cobertura vegetal, compuesto por las hojas y las ramas, las cuales son las superficies interceptoras. La cantidad de agua proveniente de la precipitación que llega directamente al suelo, es decir, que no es interceptada y que pasa a través de los espacios existentes en el follaje, se conoce como **flujo libre de translocación**, que sumado al **goteo** ( $D$ ) que se presenta desde las superficies del árbol cuando existe interceptación, se define como **flujo de translocación** ( $TH$ ). La cantidad de agua que escurre por las ramas, que posteriormente pasa al tronco y finalmente llega al suelo se define como **flujo cortical** ( $SF$ ).

Del agua infiltrada, la que se encuentra en la zona radicular es tomada por la planta y posterior a los procesos metabólicos una parte se convierte en transpiración, que sumado a la evaporación desde el suelo se convierte en **evapotranspiración** ( $E_{vt}$ ). Si a los términos anteriores se asocian las pérdidas por interceptación, es decir la

**evaporación desde superficies interceptoras** como hojas y ramas ( $E_i$ ), se encontrará el valor de la evaporación total.

En la Figura 2-2 se muestra un balance de masa en el follaje de una cobertura vegetal, el cual consideramos nuestro volumen de control.

**Figura 2-2:** Balance de Masa en el follaje de un árbol



Dónde:

$P_G$ : Precipitación Incidente o externa

$E_i$ : Evaporación del agua que ha sido retenida en el follaje y ramas

$SF$ : Flujo Cortical o cantidad de agua que escurre por los tallos

$TH$ : Flujo libre de translocación (Cantidad de agua que a traviesa el follaje sin ser interceptada)

$D$ : Goteo desde el follaje (Cantidad de agua que es interceptada y escurre cuando se ha superado la capacidad de almacenamiento del follaje).

$C$ : Agua almacenada en el follaje

Realizando el balance de masa para un evento de precipitación se obtiene la siguiente ecuación:

$$C \approx P_G - (TH + D + SF) - E_i \quad (2-2)$$

En general el flujo cortical es menor al 2% de la precipitación incidente (Jaramillo, 2003), razón por la cual se desprecia en la mayoría de estudios de interceptación.

La ecuación (2-2) es la base para todos los modelos de interceptación de lluvia, y su implementación dependerá de las variables de estado y los parámetros particulares de cada uno.

### **Proceso de interceptación y su efecto en el ciclo hidrológico**

Como se comentó anteriormente la interceptación actúa como reductor de lluvias, influencia la distribución espacial de la infiltración y redistribuye la lluvia en el tiempo. La interceptación es función de la variabilidad de la vegetación, la duración e intensidad de las lluvias, cantidad de días secos y húmedos, el ángulo de incidencia de las gotas y de la turbulencia atmosférica (Jaramillo, 2003).

Dentro de los efectos que realizan las coberturas vegetales en las dinámicas existentes en las cuencas hidrográficas se destacan las siguientes citadas por Giraldo (2002):

- Reducción directa del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo.
- Reducción indirecta del volumen de escorrentía directa y por lo tanto el volumen de materia sólida que esta puede arrastrar hacia los cauces.
- Acción indirecta de los efectos del suelo forestal sobre la escorrentía (retraso del tiempo de concentración, aumento de infiltración, reducción de focos erosivos, conversión del escurrimiento superficial en subsuperficial, suministro adicional de una mayor potencial de almacenamiento de agua).

Las características de la tormenta condicionarán el proceso de interceptación, ya que para tormentas con intensidades bajas los valores de interceptación son mayores dado que el tamaño de gota es menor (Jaramillo, 2003) y en consecuencia el área foliar es capaz de interceptar y retener una mayor cantidad de gotas, caso contrario a tormentas muy intensas, las cuales saturan rápidamente el follaje, y tienden a ladearse y desocuparse por acción del volumen de agua.

La interceptación está directamente relacionada con las características de la cobertura, como lo son su morfología, el área foliar, la forma, la orientación y el tipo de inserción de las hojas, el tamaño de la corona, el ángulo de las ramas, la proporción de espacios ocupada por la parte aérea y el tipo de corteza y hojas (Velasquez & Jaramillo, 2009). La tasa de evaporación es mucho mayor para bosques que para vegetación con bajo porte,

debido a que los bosques tiene una mayor resistencia aerodinámica (Gash *et al*, 2009). La reducción del área basal y la poda (área de la copa del árbol) disminuyen los valores de interceptación. Se estima una interceptación mayor para periodos con condiciones atmosféricas húmedas, que para las secas. Se considera también que cuando los eventos de precipitación se presentan en la tarde o noche, los valores de interceptación serán más bajos, debido a que el déficit de presión de vapor, la velocidad del viento y por ende la conductancia aerodinámica cae rápidamente (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

Los valores de interceptación se ven directamente afectados por características como el número de árboles o especies por hectárea, el ángulo de las ramas, la forma e inclinación de las hojas, la uniformidad o no de la altura de la copa, la naturaleza y grosor de la corteza del árbol, la capacidad de almacenamiento del follaje y como esta cambia a través de las estaciones climáticas y de las especies, la hidrofobicidad (repelencia al agua) de las hojas y la madera, y el índice de área foliar (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

Los efectos del cambio de cobertura vegetal afectan también los diferentes balances dentro del ecosistema, como son el caso del balance de energía y de nutrientes (Chavez & Jaramillo, 1999). Estos autores destacan los siguientes al realizar la conversión de un bosque a un cultivo intensivo o pastos.

- Incremento en la fluctuación de la temperatura del suelo
- Disminución en la humedad relativa
- Incremento en la radiación incidente en la temperatura del suelo
- Cambio en la capacidad calórica del suelo
- Disminución de la materia orgánica
- Disminución en los niveles de nutrientes en el suelo

Otros efectos que se presentan al hacer una conversión del tipo de cobertura vegetal son el incremento de caudales picos posterior a un evento de precipitación y el aumento de la cantidad de agua producida por la cuenca (Llorens & Domingo, 2007).

## 2.3. VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN

En esta sección se presentan las variables hidrometeorológicas del proceso de interceptación por coberturas vegetales, destacando las técnicas e instrumentos de medición utilizados en la medición de la precipitación incidente, la evaporación, el flujo de translocación y el flujo cortical. También se comenta acerca de parámetros que permiten caracterizar la cobertura vegetal como lo son la capacidad de almacenamiento y la fracción de vacíos.

El proceso de interceptación tiene como tal dos variables de entrada o funciones de forzamiento: Los procesos de precipitación y evaporación desde las coberturas vegetales (hojas y tallos).

La evaporación es función de las condiciones meteorológicas presentes en la zona, y este proceso a su vez condiciona las interacciones con los demás procesos existentes en el ciclo hidrológico. Entre menor sea el periodo intertormentas menor será la interceptación, debido a que la cobertura no tendrá la misma capacidad que si estuviera totalmente seca (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

- **Precipitación Incidente ( $R$ )**

En general la precipitación incidente o total se mide a través de pluviómetros de manera manual o de pluviógrafos que registran la lluvia de forma automática. Tal es el caso de los pluviógrafos de balancín que unidos a un *data logger* almacenan la información registrada (Llorens & Domingo, 2007).

Esta medición se puede realizar en un área despejada cercana al experimento o sobre la cobertura vegetal analizada. En la mayoría de los casos y por facilidad de instalación la medición se realiza a campo abierto.

Las medidas de precipitación incidente pueden estar subestimadas debido a pérdidas inducidas por el viento si el medidor está en un área muy despejada o sobrestimadas si el medidor está muy cerca al bosque y por efecto del viento cierta cantidad de agua del follaje alcanza el pluviómetro (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

- **Evaporación Potencial ( $E$ )**

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor) (Allen *et al*, 2006). La vaporización se da por la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presente en la atmósfera circundante, y es regulada por la velocidad del viento, quien realiza el remplazo de aire húmedo por aire seco.

El tipo de superficie evaporante es otro factor que determina el comportamiento del proceso de evaporación, ya que esta superficie determina la cantidad de agua disponible. En el caso de las coberturas vegetales, una característica que determina este comportamiento es el área foliar, ya que en función de esta variable cambiarán las características de la superficie evaporante. Las características de la cobertura vegetal definirán los valores de rugosidad, albedo y el grado de cobertura del suelo.

La evaporación se expresa en unidades de milímetros por unidad de tiempo, es decir, la cantidad de agua perdida de una superficie en unidades de altura de agua en el periodo de registro. Una pérdida de 1 mm equivale a  $10 \text{ m}^3$  por hectárea (Allen *et al*, 2006). Esta altura de agua también se puede expresar en términos de la energía recibida por unidad de área. Es decir, para evaporar 1Kg o  $0.001 \text{ m}^3$  a una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ , se requieren de 2.45MJ de energía. Esta energía es conocida como calor latente de vaporización ( $\lambda$ ). En consecuencia un 1mm es igual a  $2.45 \text{ MJ m}^{-2}$  (Allen *et al*, 2006).

Existen diferentes técnicas para la estimación de la evaporación, pero en general y para el caso de las pérdidas por interceptación diferentes autores (Rutter *et al*, 1971; Gash J. , 1979) recomiendan seguir el procedimiento indirecto del método combinado de Penman Monteith.

Este método propuesto inicialmente por Penman en 1948 y modificado por Monteith (Monteith, 1985), combina el balance energético, donde la energía que llega a una superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo, con el método de transferencia de masa, que considera movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire o remolinos por encima de una amplia superficie homogénea. De lo anterior se derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos meteorológicos estándar de horas sol,

temperaturas máximas, mínimas o medias, humedad atmosférica y velocidad del viento. En la ecuación 2-3 se presenta la ecuación de Penman Monteith para el cálculo de evaporación.

$$E_p = \frac{\Delta R_n + \rho c \delta_e / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (2-3)$$

Donde  $E_p$  es la evaporación potencial,  $\Delta$  es la tasa del incremento de la presión de vapor de saturación del agua con la temperatura (a temperatura ambiente),  $R_n$  la radiación neta,  $\rho$  y  $c$  la densidad y el calor específico del aire, respectivamente,  $\delta_e$  el déficit de presión de vapor del aire,  $r_a$  la resistencia aerodinámica al transporte del vapor de agua desde el follaje hasta un plano 2 metros sobre el mismo,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua y  $\gamma$  es la constante psicométrica. La resistencia aerodinámica, describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas (Allen *et al*, 2006).

Los parámetros requeridos para el follaje son el albedo  $\alpha$ , el cual es requerido para el cálculo de  $R_n$  y  $f = r_a u$ , la cual es una propiedad aerodinámica del follaje, relacionada con la velocidad del viento a 2 metros sobre el mismo. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas clásicamente en la estimación de la velocidad del viento y la resistencia aerodinámica.

### Velocidad del viento

Para el cálculo de la velocidad del viento a una altura de 2 metros sobre la cobertura vegetal, Rutter (1971) realizó la medición de la velocidad del viento ( $u_a$ ) a una altura  $a$  del anemómetro, con la intención de calcular el valor de la velocidad a otra altura  $Z$ . Para tal efecto utilizó la ecuación de Hellman presentada por Anon (1969).

$$\frac{u_z}{u_a} = \frac{0.233 + 0.285 \ln|Z + 4.75|}{0.233 + 0.285 \ln|a + 4.75|}$$

Posteriormente calculó la velocidad a una altura  $h$  a dos metros de la estructura vegetal, utilizando la ecuación de perfil de velocidades sobre una superficie con un valor de longitud de rugosidad conocida  $z_0$ .

$$u_z = \frac{u^*}{k} \ln \left| \frac{z-d}{z_0} \right|$$

Entonces halló la siguiente expresión,

$$\frac{u_{h+2}}{u_z} = \ln \left| \frac{h+2-d}{z_0} \right| / \ln \left| \frac{z-d}{z_0} \right|$$

Un valor que se puede utilizar para  $z_0$  es 0.44m, el cual se halla de ir hacia atrás en la relación lineal existente entre  $u$  y  $\ln|z|$ . Si se toman los valores que se mencionan anteriormente y se combinan las ecuaciones anteriores es posible hallar la siguiente expresión que relaciona la velocidad del viento medida a una altura  $a$  con la velocidad esperada a 2 metros sobre la cobertura vegetal (Ecuación 2-4).

$$\frac{u_{h+2}}{u_a} = \left[ \ln \left| \frac{h+2-d}{z_0} \right| \right] / [0.818 + \ln|a + 4.75|] \quad (2-4)$$

### Resistencia Aerodinámica

Cuando existe ausencia de observaciones, se puede calcular la resistencia aerodinámica  $r_a$  utilizando la Ecuación 2-5.

$$r_a = \frac{1}{k^2 u} \left( \ln \left| \frac{z-d}{z_0} \right| \right)^2 \quad (2-5)$$

En el caso de árboles, se toman valores de  $z_0 = 0.1h$  y  $d = 0.75h$ , para perennes, y de  $z_0 = 0.18h$  y  $d = 0.5h$ , para caducifolios (Rutter *et al*, 1975).

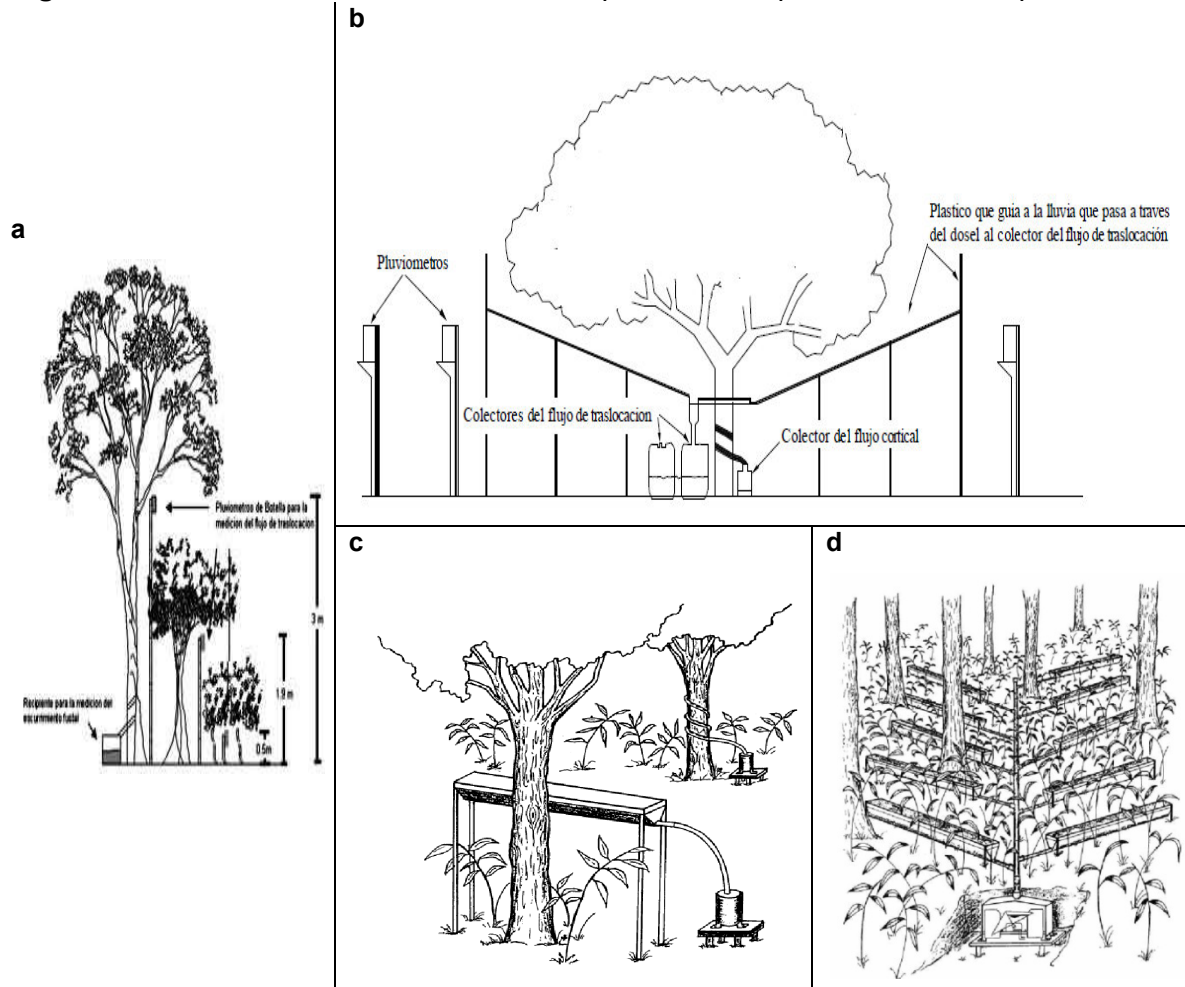
- **Flujo de Translocación (TH)**

El flujo de translocación se definió anteriormente como la fracción de la lluvia que pasa directamente a través del follaje sin chocar con alguna estructura sumada al goteo que se da desde hojas y ramas.

Esta variable se puede determinar en campo utilizando varias técnicas pero en general se mide colocando colectores bajo la estructura vegetal que se esté analizando y se hace

el registro posterior al evento de precipitación. En la Figura 2-3 se observan algunas de las técnicas utilizadas para el registro del flujo de translocación.

**Figura 2-3:** Técnicas de medición de los componentes del proceso de interceptación



a) Pluviómetros instalados a diferentes alturas en función del tipo de estructura vegetal y manguera enrollada en el tronco para medir flujo cortical. b) Estructura plástica conectada a tanque de almacenamiento y pluviómetros fuera del follaje para medir precipitación incidente. c y d) canaletas ubicadas bajo el follaje para medir flujo de translocación. Fuente: Hernandez (2007)

El agua se puede recolectar en pluviómetros contruidos manualmente y posteriormente calibrados, también conocidos como interceptómetros (pluviómetros o colectores con diámetros de 12-15cm) o mediante otras estructuras como canaletas y/o plásticos que se colocan bajo la que vegetación que posteriormente dirigen el volumen de agua capturado hacia recipientes donde la medida se transforma a milímetros de agua, para hacerlo comparable a la precipitación incidente. Las dimensiones de las canaletas varían de 1 a 30 metros de longitud. Las canaletas o cubetas pueden conducir a errores en la

medición de la precipitación interna, debido a la salpicadura de las gotas de lluvia y a que tales aforadores son afectados por el viento y sus efectos aerodinámicos, siendo esta función de su dirección relativa (paralela o perpendicular) al eje mayor de la cubeta (Giraldo L. , 2002).

En algunos casos en lugar de colocar un recipiente donde se mida el volumen total, se instala un instrumento de medición continuo como un pluviógrafo de balancín (Llorens & Domingo, 2007), con la intención de trabajar escalas temporales más finas y de esta forma estudiar el proceso de interceptación en mayor detalle. Es posible que en el momento de analizar los registros de flujo de translocación o precipitación neta, se hallen valores que superen a la precipitación incidente o lluvia externa. Lo anterior, según Trojer (1955) citado por Velasquez & Jaramillo (2009) se debe a la formación de gotas sobre el follaje, en general para precipitaciones superiores a los 10mm.

Esto se evidenció cuando Crockford R.H& Johnson (1983) citados por Crockford R.H & Richardson D.P (2000), compararon el flujo de translocación capturado por colectores estándar y canaletas. Los investigadores en cada parcela de 20x20m ubicaron 9 colectores (200mm diámetro de orificio) y tres canaletas de 5x0.22m mas una de 20mx0.22m. El área de captura de las canaletas era 27 veces el de los colectores. Esta comparación se realizó para 27 eventos de precipitación en el rango 2mm a 32mm. En promedio, la varianza de los colectores fue de 6 veces la de las canaletas, con un promedio de flujo de translocación un 9% mayor en las canaletas que en los colectores. La interceptación fue del 30% cuando se estimó con los colectores y del 11% con las canaletas. Un factor que afecta directamente el valor del flujo de translocación es el ángulo de la lluvia, ya que el área proyectada de la copa es mucho mayor a la proyectada desde una vista de planta, registrándose valores de  $TH$  mayores a los de la precipitación incidente.

- **Flujo Cortical ( $SF$ )**

Recordando que el flujo cortical es la cantidad de agua que es interceptada por la cobertura vegetal y que posteriormente escurre a través del tronco hacia el suelo, de forma general esta variable se determina realizando la instalación de mangueras alrededor del tronco en forma de espiral las cuales conducen el agua que baja por el

tronco hacia un tanque de almacenamiento, donde es posible estimar el flujo cortical, precipitación caolinar o escurrimiento fustal. Para esta medición Crockford R.H, & Richardson D.P (2000) utilizaron manguera de polietileno de diámetro interno 14mm envuelta alrededor de los árboles y unida con grapas de hierro galvanizado y sellado con silicona.

Los valores del flujo cortical reportados en investigaciones de interceptación varían de 2 a 8%. Este valor depende de múltiples factores, donde se destaca, la cantidad y la intensidad de la lluvia, la rugosidad del tallo, la morfología del árbol, diámetro del tallo, y la posición de la especie dentro de la totalidad de las coberturas vegetales (Giraldo L. , 2002).

Según Crockford R.H, & Richardson D.P (2000) las siguientes características de los árboles y de la lluvia son de suma importancia para la estimación del flujo cortical:

- Tamaño de la copa. Entre mayor sea el tamaño de la copa para un diámetro de tronco dado (DAP), mayor será el flujo cortical.
- Forma de la hoja y orientación. Si el ángulo de la hoja está por encima del plano horizontal, es decir, si la punta de la hoja está por encima del peciolo, y tiene una forma cóncava, el agua almacenada podrá ser conducida hacia las ramas. Para hojas verticales el aporte se da cuando existe goteo hacia las ramas.
- Angulo de las ramas. Ramas inclinadas tiene un mayor potencial de aporte al flujo cortical que las que son horizontales o por debajo de las horizontales.
- Obstrucciones en la trayectoria de flujo. La trayectoria de flujo se encuentra bajo las ramas. Obstrucciones como cortes pueden hacer que el agua gotee directamente al suelo o caiga de nuevo en las ramas. Esto también puede suceder en el tronco. Si este no está vertical el flujo se verá por la parte de abajo del mismo y si encuentra algún obstáculo esta agua empezara a gotear.
- Tipo de corteza. Existe una gran variación entre el grosor y el tipo de corteza entre especies de árboles del mismo tamaño. La humectabilidad y el grosor tiene efectos sustanciales sobre el flujo cortical. Superficies lisas conllevan a mayores valores de flujo cortical, en cambio cortezas con capacidad de absorción, producen menor cantidad de flujo cortical, ya que la corteza debe saturarse antes de que exista este flujo.

- Espacios en el follaje. Los espacios en el follaje pueden afectar el  $SF$ , aumentando su volumen debido a que un mayor número de gotas podrán ser retenidas por las ramas. Realmente depende en mayor medida de la forma de la hoja y su orientación.
- Continuidad y proporción de periodos secos
- Intensidad de la lluvia. Altas intensidades hacen que se exceda la capacidad de transporte de agua en las ramas produciendo goteo y por ende menor  $SF$ . Caso contrario se da para eventos con intensidades menores.
- Angulo de la lluvia. El ángulo de la lluvia es particularmente importante, debido a que si el ángulo es cercano a la horizontal el  $SF$  iniciara en el momento que el tronco este húmedo.

Crockford R.H & Richardson D.P (2000) reportan que en el estudio de Crockford & Richardson (1990) se obtuvo valores de 4.1% para Eucalipto y de 8.9% para Pinos, con valores hasta del 13.1% para precipitaciones mayores a los 25mm. Los bajos valores de flujo cortical en bosques tropicales probablemente resultan por la combinación de altas intensidades de precipitación y altos índices de área foliar (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000). En general se reportan valores entre el 0.3-3% para bosques de coníferas, quizá debido a que sus hojas son casi horizontales.

Yadav & Mishra (1985) citados por Crockford R.H & Richardson D.P (2000), encontraron una relación inversa entre el flujo de translocación como un porcentaje de la precipitación y el diámetro a la altura del pecho (DAP), es decir para pequeños arboles existía un mayor flujo cortical, que para los grandes. Bajas intensidades se caracterizan por tamaños de gotas menores, los cuales pueden ser arrastrados por el viento directamente a los troncos, incrementando el valor del flujo cortical (Crockford R.H, & Richardson D.P, 2000).

Bui & Box (1992) en un experimento con maíz y sorgo, encontraron que el 49% de la precipitación incidente llega al suelo como  $SF$ . Lo anterior sugiere que las hojas de las plantas en crecimiento tienen un ángulo agudo lo cual funciona como canal hacia el tallo.

Téllez (2003) comenta que en el caso de ecosistemas de bosques, el flujo cortical representa sólo una pequeña proporción de las entradas de agua, pero sin embargo, ésta cantidad puede llegar a ser una gran fuente de agua y nutrientes solubles para los

árboles, concentrándose en una pequeña área alrededor de los troncos de árboles individuales.

- **Pérdidas por interceptación ( $I$ )**

Las pérdidas por interceptación es una variable No Observable, la cual experimentalmente se estima como la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta, que a su vez es la suma entre el flujo de translocación y el flujo cortical (Ecuación 2-6).

$$I = P_G - (TH + SF) \quad (2-6)$$

La anterior expresión supone que el follaje antes del evento de precipitación se encuentra seco, y que el agua almacenada durante el evento de lluvia se evapora totalmente desde las estructuras interceptoras.

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA COBERTURA VEGETAL

### Cobertura vegetal o de follaje y fracción de vacíos

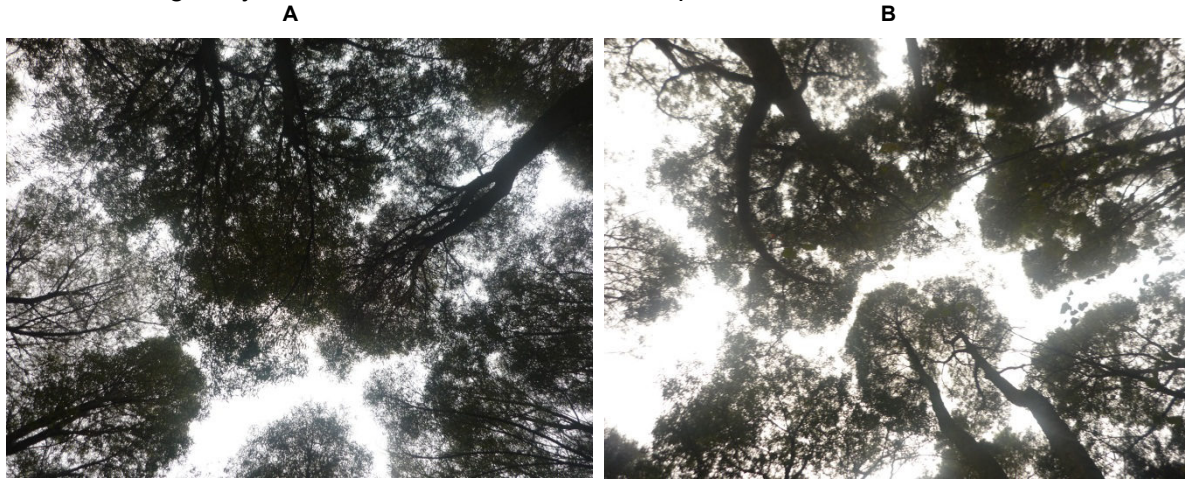
La cobertura vegetal se refiere a la relación existente entre el área que cubre una cobertura vegetal sobre un terreno dimensionado previamente ( $c$ ). Este valor varía entre 0 (suelo desnudo) y 1 (cobertura de follaje totalmente cerrada).

La fracción de vacíos ( $p$ ) relaciona la cantidad de espacios que existen en una cobertura vegetal y por los cuales las gotas de lluvia pueden a travesar hasta llegar al suelo, sin ser interceptados por alguna estructura de la cobertura. Esta característica se puede estimar mediante la toma de fotografías, ya sea sobre la cobertura para plantas de porte bajo, o desde la parte inferior para estructuras de porte alto, como bosques. La ecuación 2-7 relaciona estos dos parámetros.

$$p = 1 - c \quad (2-7)$$

En la Figura 2-4 se presentan dos imágenes de bosque donde los colores en la escala de grises corresponden a la cobertura vegetal ( $c$ ) y todo lo que se observe en blanco es la fracción de vacíos ( $p$ ).

**Figura 2-4:** Imágenes obtenidas para el análisis de la estimación del porcentaje de cobertura vegetal y la fracción de vacíos en un bosque



### Índice de Área Foliar

El Índice de Área Foliar (IAF) o Leaf Area Index (LAI) se define como la cantidad de área de vegetal ( $m^2$ ) por el área del suelo ( $m^2$ ). (Velasquez & Jaramillo, 2009) (Ecuación 2-8).

$$IAF = \frac{s_v}{P} \quad (2-8)$$

Donde  $s_v$  es la superficie funcional (verde) del ecosistema o cultivo que se encuentran en la superficie del terreno  $P$ . Como normalmente  $s_v$  y  $P$ , se miden como superficie ( $m^2$ ),  $IAF$  es adimensional,  $s_v$  se puede referir a la superficie total de hojas; esto es tanto a la superficie superior como a la inferior, a la superficie de una sola cara o a la proyectada por las hojas que no son planas, como en las coníferas.

### Capacidad de almacenamiento ( $S$ )

Las coberturas vegetales son capaces de interceptar una fracción de la precipitación incidente. Si se supera el valor de capacidad de almacenamiento se presentara goteo, de lo contrario esta cantidad se evaporara desde las hojas y los tallos. También se conoce como la capacidad estática de almacenamiento ( $S$ ) definida como la cantidad de agua retenida por el follaje sin que exista drenaje hacia el suelo. Grah & Wilson (1944) citados por Dunkerley (2000) reconocen tres componentes de la capacidad de almacenamiento: *almacenamiento transitorio* (agua que posteriormente puede gotear), *almacenamiento*

*condicional* (agua que puede ser desalojada por vibraciones de la planta causadas por el viento), y *almacenamiento temporal* (agua que solo puede ser removida por evaporación).

La capacidad de almacenamiento se ha medido en laboratorio como el incremento del peso que tiene una especie cuando se coloca bajo un simulador de lluvias. Esto se realiza hasta que el valor del peso se estabiliza indicando que se ha llegado a una capacidad de almacenamiento constante.

## **2.5. MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIAS**

Con la intención de tener una base conceptual sobre la cual se pueda trabajar los modelos matemáticos que buscan representar el proceso de interceptación, se empieza por presentar los conceptos de sistema, modelo, variables y parámetros. Ya introducidos estos conceptos se sigue con la revisión y posterior presentación de los distintos modelos dinámicos de interceptación de lluvia, destacando el modelo conceptual, los principios físicos utilizados y las ecuaciones implementadas en la modelación del proceso. Además, se estudian en detalle las variables de entrada, las de salida, las de estado y los parámetros característicos de cada modelo. En general los modelos de interceptación de lluvia se han trabajado desde dos perspectivas; la primera basada en la ecuación de balance de masa en el follaje, y la segunda con un enfoque estocástico basado en funciones de densidad de probabilidad. Del primer grupo de modelos, se puede realizar una división en los físicamente basados y los que estudian el proceso de interceptación mediante expresiones analíticas. Gash *et al* (2009) reporta en su revisión de modelos de interceptación de lluvia que existen más de 15 citados y publicados, cada uno con diferentes enfoques, siendo en algunos casos, unos las modificaciones de los modelos originales. Los modelos de interceptación de lluvia presentados en este documento guardan la mayor fidelidad posible con el planteamiento original, esto con el fin de entender la intención del investigador y no crear ambigüedades al momento de su lectura.

El estudio del proceso de interceptación se ha estudiado desde principios de siglo pasado cuando Horton (1919) propuso uno de los primeros modelos matemáticos de

interceptación de lluvia, el cual obedecía una relación lineal entre la precipitación incidente y la cantidad de agua interceptada y posteriormente evaporada desde las coberturas vegetales. Los primeros estudios del proceso de interceptación se realizaron de forma cualitativa, entendiendo la física de los procesos implícitos y destacando sus efectos sobre el ciclo hidrológico.

### **Base conceptual del proceso de modelación**

Para hablar un mismo lenguaje antes de iniciar con los modelos matemáticos que representan el proceso de interceptación es necesario uniformizar criterios respecto a la base conceptual de modelación. Empezaremos enunciando varias definiciones de sistema. **Sistema** se define como la combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un objetivo determinado. Ferrari (1978) citado por Téllez (2003) describe un sistema como una parte de la realidad que contiene elementos interrelacionados, los cuales comparten un propósito común y que, por consiguiente, tiene límites arbitrarios. Otra definición de sistema la presenta Hillel (1979) citado también por Téllez (2003), y lo define como un estado de incesantes flujos, donde la materia y la energía son transformadas hacia y desde una serie de numerosos procesos concurrentes que involucran cambios físicos, químicos y biológicos. Los sistemas pueden ser repetibles, recurrentes o únicos (Téllez, 2003).

En consecuencia un **modelo** es una representación de un objeto, sistema o idea, de forma diferente al de la entidad misma. El propósito de los modelos es ayudarnos a explicar, entender o mejorar un sistema.

Específicamente un modelo de simulación está compuesto por:

- **Los componentes**, que son las partes constituyentes del sistema. También se les denomina elementos o subsistemas.
- **Las variables**, que son aquellos valores que cambian dentro de la simulación y forman parte de funciones del modelo o de una función objetivo.
- **Los parámetros** o cantidades a las cuales se les asignan valores. Una vez establecidos los parámetros, son constantes y no varían dentro de la simulación.
- **Las relaciones funcionales**, que son las que muestran el comportamiento de las variables y parámetros dentro de un componente o entre componentes de un

sistema. Estas características operativas pueden ser de naturaleza determinística o estocástica. Las relaciones determinísticas son identidades o definiciones que relacionan ciertas variables o parámetros, donde una salida de proceso es singularmente determinada por una entrada dada. Las relaciones estocásticas son aquellas en las que el proceso tiene de manera característica una salida indefinida para una entrada determinada.

- **Las restricciones**, que son limitaciones impuestas a los valores de las variables o la manera en la cual los recursos pueden asignarse o consumirse.
- **Las funciones de objetivos**, las cuales definen explícitamente los objetivos del sistema y cómo se evaluarán; es una medida de la eficiencia del sistema.

Téllez (2003) cita a Rabbinge y de Wit (1989), quienes dicen que la **simulación** es una técnica que se caracteriza por la representación de un **sistema** mediante **modelos** simplificados, los cuales se expresan generalmente a través de la construcción de relaciones analíticas matemáticas y por el estudio de sus propiedades en referencia a las del sistema que ellas representan. Shannon (1988) define **simulación** como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema.

Según Chow *et al* (1994) un **modelo de sistema hidrológico** es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas.

### 2.5.1. Modelos físicamente basados

Estos modelos son aquellos que utilizan el balance hídrico como aproximación para el entendimiento del proceso de interceptación de lluvia. En el estudio de la interceptación de lluvia se ha conocido a este grupo como la familia de **Rutter**, ya que este autor fue uno de los pioneros en el estudio de los modelos de interceptación de lluvia físicamente basados. En general las modificaciones a estos modelos se han realizado desde tres enfoques; la estructura horizontal de la vegetación (vegetaciones poco densas vs.

especies cerradas), la estructura vertical (multicapa vs. capa sencilla) y su variación temporal (dinámica vs. cobertura estática) (Gash *et al*, 2009).

### **Modelo de Rutter *et al* (1971)**

Rutter *et al* (1971) desarrollaron un modelo numérico de interceptación de la precipitación, basado en el equilibrio de balance de agua en el follaje de la vegetación.

De las variaciones de la tasa de evaporación y drenaje, en función del almacenamiento en el follaje, se construyó el modelo, para calcular el balance de agua de la lluvia, el flujo de translocación, la evaporación y el cambio del almacenamiento. La evaporación desde el follaje húmedo constituye la interceptación.

El modelo se utilizó inicialmente para realizar predicciones a nivel mensual. Para su satisfactoria implementación el modelo requiere datos de precipitación a escala horaria, por lo menos una medida cada tres horas de temperatura y humedad, una medida promedio en tres horas para velocidad del viento y radiación neta.

Este modelo supone que el follaje se encuentra bastante cerrado y que además se extiende sobre toda el área de análisis, existiendo solo pequeños vacíos entre una especie vegetal y otra. Esto se traduce en que la evaporación es uniforme en el follaje, y por ende que el almacenamiento en el follaje y en los troncos se extiende sobre toda el área.

### **Derivación del modelo**

Este modelo fue derivado de mediciones realizadas por Robins (1969) citado por Rutter *et al*(1971) en un Bosque de Pino Corsican (*Pinus Nigra*). El modelo fue corrido y comparado con mediciones realizadas en Bosques Caducifolios y de Coníferas, en periodos de 8 a 18 meses, encontrándose muy buenas relaciones entre los valores simulados y las mediciones realizadas en campo.

A continuación se presenta la derivación del modelo procurando ser fiel a la idea del autor para tener la mejor comprensión de la formulación del mismo.

## Balance de masa

Sea  $R$ ,  $TH$  y  $E$  las tasas de precipitación, flujo de translocación y evaporación respectivamente, y  $\sum R$ ,  $\sum TH$  y  $\sum E$  los totales de esos componentes en un tiempo dado (i. e, tasa x tiempo). Luego las pérdidas por interceptación en una tormenta, es decir, el agua interceptada y evaporada entre el tiempo cuando la lluvia empieza a caer sobre el follaje seco, y el tiempo cuando el follaje está seco de nuevo se puede expresar como

$$I = \sum E = \sum R - \sum TH \quad (2-9)$$

Donde  $p$  es la proporción de lluvia que a traviesa el follaje sin chocar contra alguna superficie o **coeficiente libre de translocación**. Luego el balance de agua en el follaje para un periodo de tiempo dentro de una tormenta, se describe como:

$$(1 - p) \sum R = \sum E + \sum D \pm \Delta C \quad (2-10)$$

Donde  $\sum D$  es la cantidad de agua que gotea o drena desde el follaje ( $D$  es una tasa), y  $\Delta C$  es el cambio en la cantidad de agua,  $C$ , almacenada en el follaje. Nótese que

$$\sum TH = p \sum R + \sum D \quad (2-11)$$

Se asume que existe una mínima cantidad de agua  $S(mm)$ , requerida para humedecer todas las superficies del follaje. Esta corresponde a la **capacidad de almacenamiento** y se puede comparar a la capacidad de campo del suelo; es útil en la práctica y es difícil de definir con precisión.  $C$  tendrá valores mayores y menores a  $S$ .

Si se plantea en terminos de integrales a nivel diario, con la intención de hallar la cantidad de agua interceptada despues de un evento de lluvia, es posible plantear las dos siguientes ecuaciones, las cuales son el balance de masa tanto en el follaje (Ecuación 2-12) como en las ramas (Ecuación 2-13).

$$(1 - p - p_t) \int R dt = \int D dt + \int E dt + \Delta C \quad (2-12)$$

$$p_t \int Rdt = SF + \int E_t dt + \Delta C_t \quad (2-13)$$

Donde  $p_t$  es la proporción de lluvia interceptada por las ramas y el tronco,  $SF$  el flujo cortical,  $E_t$  la evaporación y  $\Delta C_t$  el cambio de almacenamiento en las ramas.

### Cálculo de la tasa de goteo

Rutter & Morton (1977), obtuvieron la siguiente relación entre los parámetros de la tasa de goteo y la capacidad de almacenamiento.

$$D = \begin{cases} D_s \exp(bC) & \text{si } C \geq S \\ 0 & \text{si } C < S \end{cases} \quad (2-14)$$

Donde  $D_s$  es la tasa drenaje cuando  $C = S$  y  $b$  es un coeficiente empírico. El parámetro  $D_s$ , se obtiene como  $3.91 \times 10^{-5} S$  [ $\text{mm min}^{-1}$ ] y  $b$  como  $3.89 S^{-1}$  [ $\text{mm}^{-1}$ ].

Con el fin de trabajar con otras capacidades de almacenamiento, se asumió que la variación de  $S$  se debió a la variación del índice de área foliar por unidad de área de suelo, en lugar de la variación de la profundidad de agua almacenada por unidad de área de la hoja; se asumió también que las características del drenaje de la unidad de área de la hoja permanecen constantes.

Estas suposiciones están justificadas únicamente en el hecho que cuando fueron incorporadas en el modelo, se obtuvieron resultados satisfactorios en las predicciones para el rango de variedades de diferentes especies y con diferentes valores de  $S$ .

### Tasas de evaporación desde el follaje y las ramas

Cuando el almacenamiento en el follaje ( $C$ ) es menor que la capacidad de almacenamiento ( $S$ ), la evaporación se reduce en una proporción  $C/S$ . Rutter *et al* (1971) propone realizar el cálculo de la evaporación valiéndose de la ecuación 2-3.

$$E = \begin{cases} E_p \text{ si } C \geq S \\ E_p \frac{C}{S} \text{ si } C < S \end{cases} \quad (2-15)$$

La evaporación desde los troncos se puede describir mediante las siguientes ecuaciones.

$$E_t = \begin{cases} \varepsilon E_p \text{ si } C_t \geq S \\ \varepsilon E_p \frac{C_t}{S_t} \text{ si } C_t < S \end{cases} \quad (2-16)$$

Dónde  $\varepsilon$  una constante que relaciona la evaporación desde los troncos con la existente en el follaje.

### Flujo cortical

El flujo cortical, escurrimiento fustal o flujo caolinar se estima con la siguiente ecuación

$$S_f = \begin{cases} C_t - S_t \text{ si } C_t \geq S_t \\ 0 \text{ si } C_t < S_t \end{cases} \quad (2-17)$$

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, el flujo de agua a través del follaje se da por las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)R - E_p - D \quad \text{para } C \geq S \quad (2-18)$$

$$\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)R - \left(\frac{C}{S}\right)E_p \quad \text{para } C < S \quad (2-19)$$

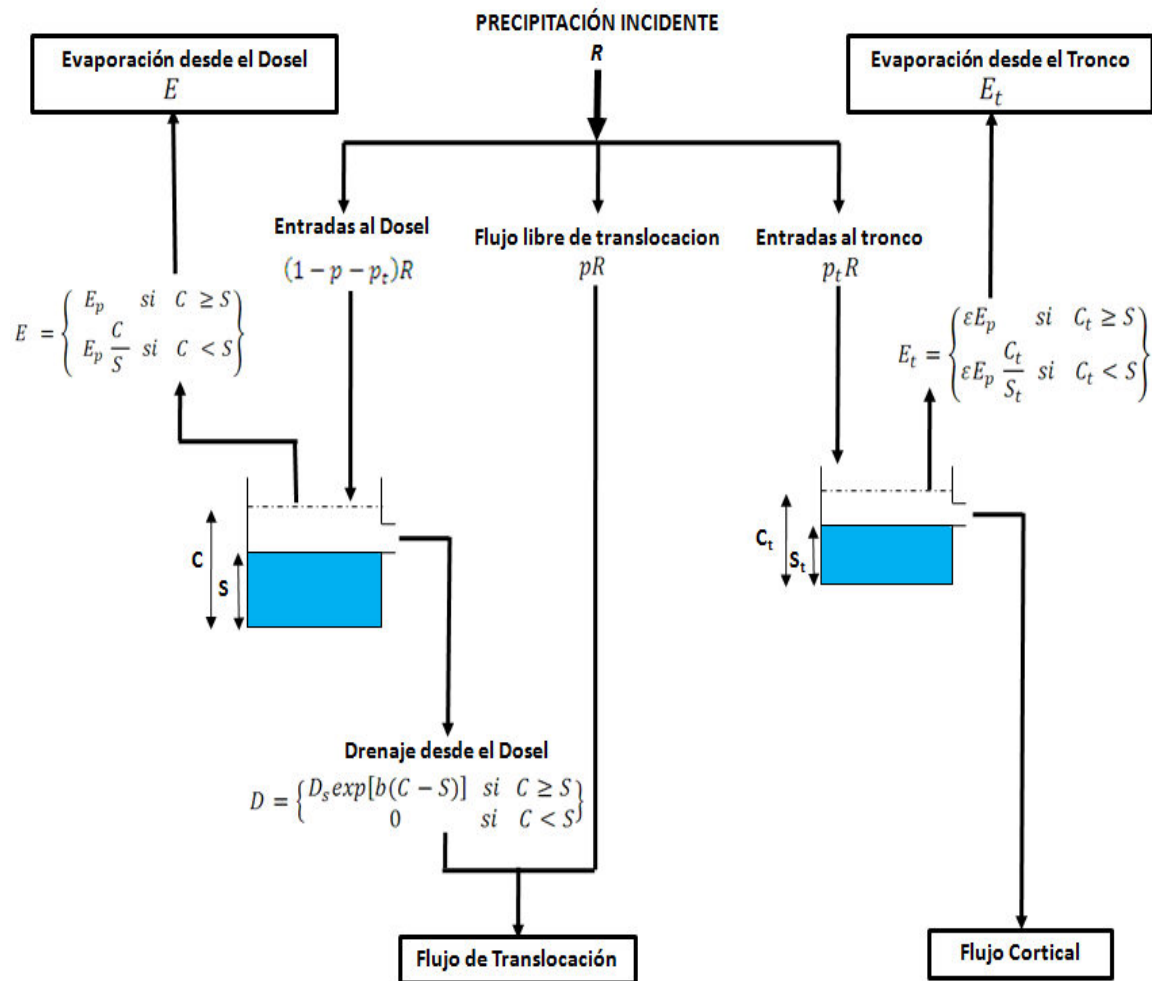
Para el caso de las ramas las ecuaciones que definen el cambio de almacenamiento durante el evento de precipitación son las siguientes

$$\frac{dC_t}{dt} = (p_t)R - \varepsilon E_p - S_f \quad \text{para } C_t \geq S_t \quad (2-20)$$

$$\frac{dC_t}{dt} = (p_t)R - \varepsilon E_p \frac{C_t}{S_t} \quad \text{para } C_t < S_t \quad (2-21)$$

La base conceptual del modelo de Rutter se muestra en la Figura 2-5.

Figura 2-5: Modelo conceptual del modelo de Rutter



Fuente: Valente *et al*, 1997. Adaptado de Gash & Morton, 1977. Modificado por el autor

Dónde:

- $p$ : Coeficiente de flujo de translocación libre (Adimensional)
- $p_t$ : Coeficiente de lluvia que se desvía por la corteza del árbol o flujo cortical (Adimensional)
- $S$ : Capacidad de almacenamiento del follaje (mm)
- $S_t$ : Capacidad de almacenamiento de agua en el tronco (mm)
- $R$ : Intensidad de precipitación incidente (mm hora<sup>-1</sup>)
- $D$ : Tasa de goteo o drenaje desde el follaje (mm hora<sup>-1</sup>)
- $E$ : Tasa de evaporación del agua interceptada por el follaje (mm hora<sup>-1</sup>)
- $C$ : Almacenamiento en el follaje (mm)
- $TH$ : Flujo de translocación (mm)
- $SF$ : Flujo cortical (mm)
- $E_t$ : Tasa de evaporación del agua interceptada por los troncos (mm hora<sup>-1</sup>)
- $C_t$ : Almacenamiento en los troncos (mm)

Este modelo tiene 7 parámetros y 3 variables de salida; las pérdidas por interceptación, el flujo de translocación y el flujo cortical.

### **Operación del modelo**

Las pérdidas totales por interceptación son la integral de la tasa de evaporación en el tiempo. Mientras  $C < S$ , la tasa de evaporación varía con la cantidad de agua  $C$ , en el follaje (Ecuación 2-15) y su vez  $C$  es determinada por el balance entre las tasas de precipitación, drenaje y evaporación (Ecuación 2-10).

Dados ciertos parámetros del follaje, y de la variación en el tiempo de la lluvia y de las condiciones climáticas que afectan la evaporación, el modelo construye un balance en el tiempo de  $C$ ,  $E$  y  $TH$ .

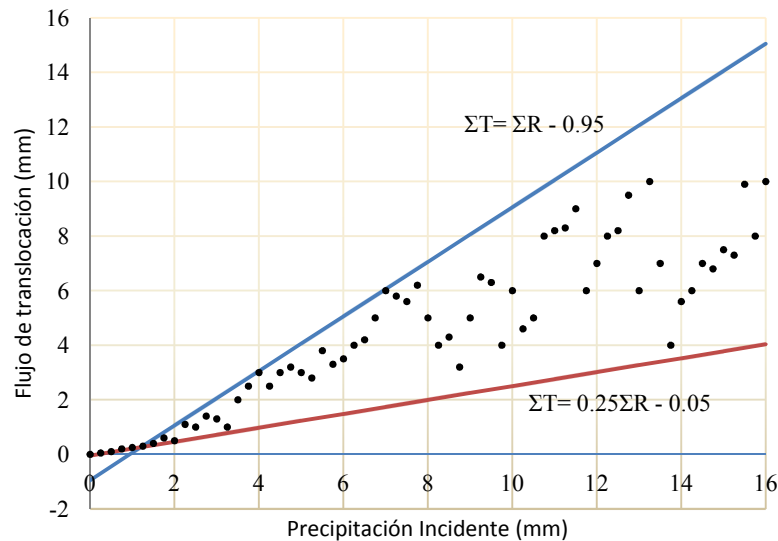
### **Estimación de los parámetros $S$ y $p$**

Rutter *et al* (1971) propuso un método gráfico para la estimación de los parámetros del modelo de interceptación de lluvia físicamente basado. Para hallar el parámetro de flujo libre de translocación ( $p$ ) y la capacidad de almacenamiento del follaje ( $S$ ), se debe entonces graficar los valores de precipitación incidente contra los de flujo de translocación agregados a nivel diario, como se muestra en la Figura 2-6.

Rutter *et al* (1971) asumió inicialmente que el punto de inflexión de la envolvente superior representa el valor alcanzado de saturación del follaje, y que a la izquierda de este punto los valores pueden ser representados por  $\sum TH = p \sum R$ .

Siguiendo a Leyton *et al* (1967), citado por Rutter *et al* (1971), se asume adicionalmente que la dispersión vertical de los puntos a la derecha de la inflexión son principalmente debidos a la variación de la evaporación desde el follaje húmedo, y que la envolvente superior de estos puntos representan la relación entre flujo de translocación y precipitación incidente cuando la evaporación es mínima.

**Figura 2-6:** Relación entre Precipitación Incidente y Flujo de translocación para la estimación de los parámetros  $S$  y  $p$  para un Pino Corsican.



Fuente: Rutter *et al* (1971)

Idealmente esta regresión puede ser expresada como una línea de pendiente unitaria

$$\sum T = \sum R - S$$

De donde  $S$  se obtuvo del intercepto en el eje del flujo de translocación. De la Figura 2-6 tomada de Rutter *et al* (1971),  $S$  se estimó entre 0.9 a 1 mm. El ajuste de la regresión a los datos menores a 1mm da un valor de  $p$  aproximado de 0.25.

Este tratamiento es subjetivo, tanto en el reconocimiento del punto del cambio de comportamiento (la inflexión) correspondiente al punto de saturación de follaje, como de la estimación de la línea de la envolvente superior a los datos medidos (Rutter *et al*, 1971). De igual forma es una primera aproximación a los parámetros que podrían caracterizar el modelo de interceptación de lluvias, y que podrán ser optimizados en la etapa de calibración del modelo.

Para el caso de los parámetros de las ramas se procede de forma similar pero graficando en las abscisas la precipitación incidente y en las ordenadas el flujo cortical.

## Modelo de Rutter Sparse (Valente et al, 1997)

Valente *et al* (1997) propuso un modelo basado en el modelo conceptual presentado por Rutter *et al* (1971), pero realizó algunas variaciones con la intención de poder aplicar dicho modelo a zonas donde existieran grandes vacíos en la vegetación. El mismo autor observó que al aplicar el modelo original a zonas con estas características la proporción de lluvia interceptada se sobrestima.

Se observó entonces algunas falencias en el comportamiento del modelo bajo condiciones específicas que desestabilizaban los resultados del mismo. Valente *et al* (1997) comenta algunas fallas en su documento.

La primera es la suposición de que la precipitación incidente,  $R$ , siempre debe ser mayor a la cantidad de agua que ingresa al follaje  $(1 - p - p_t)R$ , y la cantidad que es retenida por los ramas,  $(p_t)R$ . Cuando se tiene valores muy pequeños de  $p$  y  $p_t$ , como sucede en follajes densos y cerrados se afecta el comportamiento del modelo.

Sin embargo cuando  $p$  y  $p_t$  toman valores altos como en el caso de bosques o vegetaciones poco densas, la cantidad de agua que ingresa al follaje puede ser insuficiente para saturar el mismo, es decir,  $(1 - p - p_t)R < E$ .

Como la evaporación se calcula por unidad de área total, cuando  $p$  se incrementa la evaporación lo hará en forma proporcional. Entonces cuando  $p$  tiende a 1, la evaporación por unidad de área del follaje tendera a infinito, lo cual es imposible.

Además de lo anterior Valente *et al* (1997) comenta que se tiene un error conceptual al aplicar la ecuación de Penman Monteith para la estimación de la evaporación potencial sobre el área proyectada del follaje. El modelo original considera que  $E_p$  es la evaporación desde el follaje y  $\varepsilon E_p$  la evaporación desde las ramas y tronco cuando ambas estructuras se encuentran saturadas. Como se asume que el almacenamiento, tanto desde el follaje como desde los troncos se extiende sobre el área proyectada, entonces la evaporación para el caso de saturación, será,  $(1 + \varepsilon)E_p$ , cantidad que excede  $E_p$ , lo cual no cumpliría los requerimientos del balance de energía.

La idea básica de este modelo es dividir en dos el área total proyectada por el follaje; El área descubierta y el área cubierta, donde se encuentra el follaje y las ramas. Las dos subáreas reciben la misma intensidad de precipitación, la cual es la precipitación incidente o total. La evaporación desde las áreas cubiertas saturadas (follaje y ramas) se estimara como  $E_p$ . La evaporación desde las áreas descubiertas se asumirá como cero. Esto conlleva a que la evaporación se reduzca en proporción al área cubierta únicamente. Teniendo en cuenta que la evaporación desde los troncos se calcula como  $\varepsilon E_p$ , la evaporación desde el follaje se estimara como  $(1 - \varepsilon)E_p$ . El modelo conceptual del modelo de Rutter Sparse para vegetación con poca densidad se observa en la Figura 2-7.

Según este nuevo modelo las capacidades de almacenamiento para el follaje y los troncos se redefine como.

$$S_c = \frac{S}{c} \quad (2-22)$$

$$S_{t,c} = \frac{S_t}{c} \quad (2-23)$$

Donde  $c$  es la proporción relativa de área cubierta.  $S_c$  y  $S_{c,t}$  representan ahora las capacidades de almacenamiento del follaje y el tronco por unidad de área cubierta. El subíndice  $c$  de aquí en adelante se referirá a cualquier parámetro, variable o función relacionada con el área cubierta. En este modelo la tasa de drenaje se simplificó para cada intervalo de tiempo y se calcula como

$$\int D_c dt = \begin{cases} C_c - S_c & \text{si } C_c \geq S_c \\ 0 & \text{si } C_c < S_c \end{cases} \quad (2-24)$$

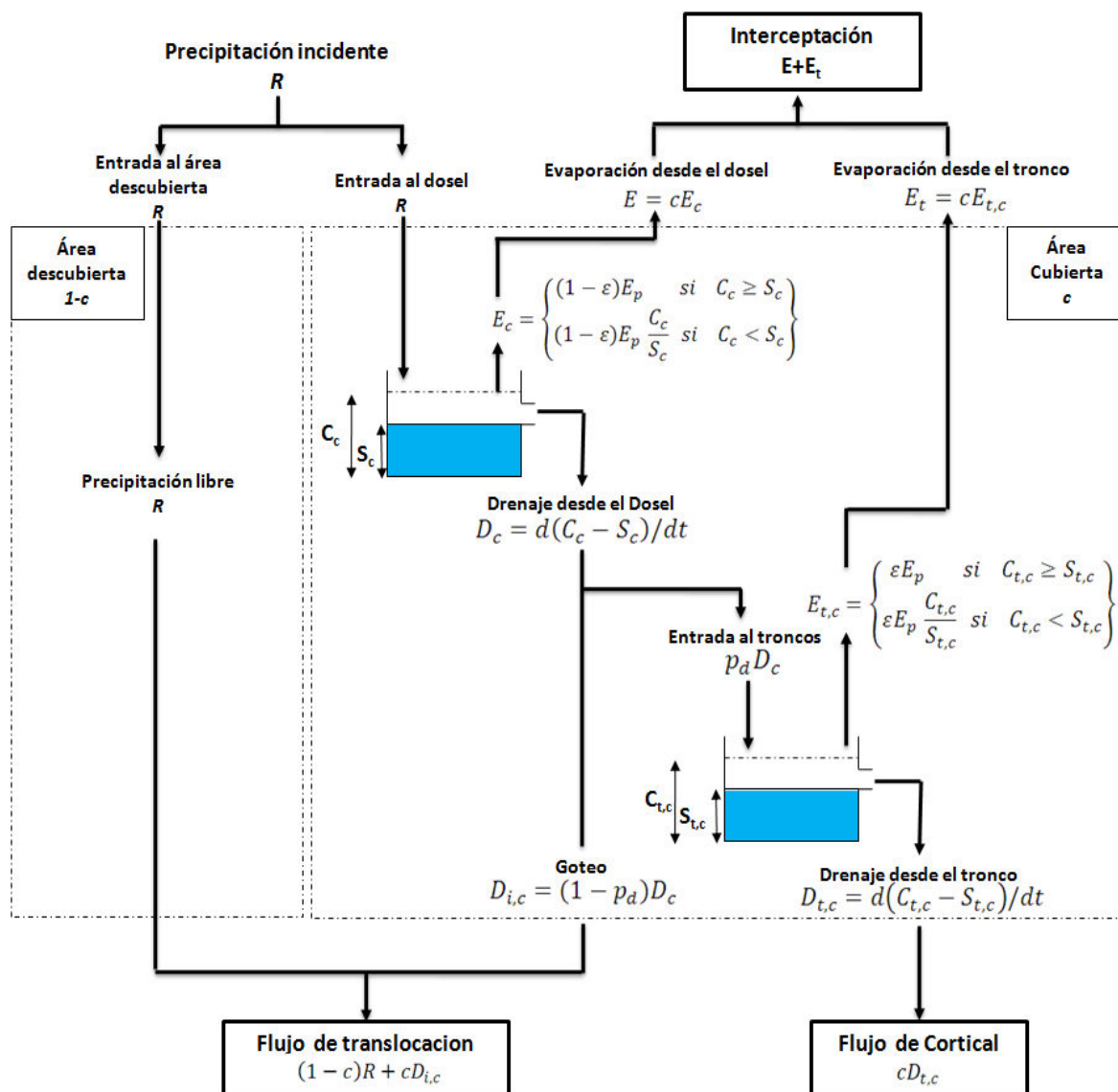
Esto significa que sobre cualquier valor mayor a la capacidad de almacenamiento producirá drenaje, y por lo tanto que el goteo se detendrá cuando la lluvia cese. Lo anterior evita trabajar con los parámetros  $D_s$  y  $b$ , los cuales son extrapolaciones y relaciones matemáticas de las capacidades de almacenamiento y tasas de goteo de los experimentos realizados por Rutter *et al* (1971), lo que podría conducir a errores.

La modelación del flujo cortical también fue modificada, debido a que se asume que la entrada de agua a los troncos proviene del drenaje del goteo ( $D_c$ ) y no directamente de la

interceptación de la lluvia. La partición del drenaje desde el follaje en la entrada a los troncos y en el goteo ( $D_{i,c}$ ) se realizó a través de un nuevo parámetro, el coeficiente de partición de drenaje ( $p_d$ ).

Los parámetros  $S$ ,  $S_t$  y  $p_d$ , se pueden obtener mediante relaciones matemáticas entre el flujo de translocación ( $TH$ ), el flujo cortical ( $St$ ) y la precipitación total incidente ( $\int R dt = P_g$ ), usando como referencia el área total proyectada.

**Figura 2-7:** Modelo conceptual de Rutter reformulado



Fuente: Valente *et al* (1997). Modificado por el autor

Dónde:

- $R$ : Intensidad de precipitación incidente (mm hora<sup>-1</sup>)  
 $E$ : Tasa de evaporación del agua interceptada por el follaje (mm hora<sup>-1</sup>)  
 $E_t$ : Tasa de evaporación del agua interceptada por los troncos (mm hora<sup>-1</sup>)  
 $\varepsilon$ : Proporción entre el agua evaporada desde el follaje con la evaporada desde los troncos (Adimensional)  
 $c$ : Proporción relativa de área cubierta (%)  
 $p_d$ : Coeficiente de partición de drenaje (Adimensional)  
 $S_c$ : Capacidad de almacenamiento del follaje (mm)  
 $S_{t,c}$ : Capacidad de almacenamiento de agua en el tronco (mm)  
 $C_c$ : Almacenamiento en el follaje (mm)  
 $C_{t,c}$ : Almacenamiento en los troncos (mm)  
 $D_c$ : Tasa de drenaje desde el follaje (mm hora<sup>-1</sup>)  
 $D_{i,c}$ : Tasa de goteo desde el follaje (mm hora<sup>-1</sup>)  
 $D_{t,c}$ : Tasa de goteo desde el tronco (mm hora<sup>-1</sup>)

Este modelo tiene 5 parámetros y 3 variables de salida; las pérdidas por interceptación, el flujo de translocación y el flujo cortical.

Analíticamente es posible obtener las siguientes expresiones:

$$TH = (1 - c)P_g + c(1 - p_d) \int D_c dt \quad (2-25)$$

$$SF = c \left( p_d \int D_c dt - S_{t,c} - \int E_{t,c} dt \right) \quad (2-26)$$

$$cP_g = c \left( \int D_c dt + S_c - \int E_c dt \right) \quad (2-27)$$

Si se reemplaza  $\int D_c dt$  por  $P_g - S_c - \int E_c dt$ , es posible obtener las siguientes expresiones para el flujo de translocación y para el cortical.

$$TH = (1 - cp_d)P_g - (1 - p_d)S - (1 - p_d)c \int E_c dt \quad (2-28)$$

$$SF = \frac{p_d}{1 - p_d} [TH - (1 - c)P_g] - S_t - c \int E_{t,c} dt \quad (2-29)$$

$S$ , se puede derivar de la ecuación 2-28, utilizando un método gráfico similar al utilizado por Rutter, donde la envolvente superior de la gráfica entre la precipitación incidente ( $P_g$ ) y el flujo de translocación ( $TH$ ), representa la relación entre estas dos variables si se desprecia la evaporación. Por lo tanto, calculando esta línea envolvente con una

pendiente preestablecida  $(1 - cp_d)$  permitirá obtener  $S$  como el intercepto negativo dividido entre  $(1 - p_d)$ . Además, despreciando el último término en la ecuación 2-29, el cual representa las pérdidas por evaporación desde los troncos durante un evento de lluvia, se observa que la expresión se convierte en una regresión lineal de  $SF$  con  $TH - (1 - c)P_g$  dará una estimación de  $p_d$  [ $p_d = \text{pendiente} / (1 + \text{pendiente})$ ] y de  $S_t$  como el intercepto negativo de la regresión.

Al final de la integración cada intervalo de tiempo, los diferentes componentes de la interceptación se calculan como

$$\text{Flujo de Translocación} \quad (1 - c) \int R dt + c \int D_{i,c} dt \quad (2-30)$$

$$\text{Flujo Cortical} \quad c \int D_{t,c} dt \quad (2-31)$$

$$\text{Pérdidas por Interceptación} \quad c \left( \int E_c dt + \int E_{t,c} dt \right) \quad (2-32)$$

Las variables arriba mencionadas se pueden expresar como

$$\text{Evaporación desde el follaje} \quad E = cE_c \text{ donde } E_c = \begin{cases} (1 - \varepsilon)E_p \text{ si } C_c \geq S_c \\ (1 - \varepsilon)E_p \frac{C_c}{S_c} \text{ si } C_c < S_c \end{cases} \quad (2-33)$$

$$\text{Evaporación desde los troncos} \quad E_t = cE_{t,c} \text{ donde } E_{t,c} = \begin{cases} \varepsilon E_p \text{ si } C_{t,c} \geq S_{t,c} \\ \varepsilon E_p \frac{C_{t,c}}{S_{t,c}} \text{ si } C_{t,c} < S_{t,c} \end{cases} \quad (2-34)$$

$$\text{Drenaje desde el follaje} \quad D_c = d(C_c - S_c)/dt \quad (2-35)$$

$$\text{Goteo} \quad D_{i,c} = (1 - p_d)D_c \quad (2-36)$$

$$\text{Drenaje desde los troncos} \quad D_{t,c} = d(C_{t,c} - S_{t,c})/dt \quad (2-37)$$

## 2.5.2. Modelos analíticos de interceptación de lluvia

Un modelo analítico se caracteriza por ser un conjunto de expresiones matemáticas las cuales describen un proceso y se basan en las relaciones teóricas, resultado de análisis de los fenómenos que describen el proceso de interceptación de lluvias.

## Modelo Analítico Original de Gash (Gash J. , 1979)

Gash J. (1979) construyó un modelo conceptualmente similar a Rutter (Figura 2-55), pero reemplazando el modelo numérico con un análisis de los eventos de tormenta. Este investigador comenta que el proceso de evaporación desde las hojas en el proceso de interceptación se ve afectado principalmente por dos factores; la cantidad de tiempo que le lleva a la hoja saturarse durante la lluvia y la tasa de evaporación aplicable bajo estas condiciones, y la capacidad de saturación del follaje y el tiempo utilizado para secar el follaje posterior a un evento de precipitación.

El modelo analítico trabaja en forma independiente la evaporación posterior al evento de lluvia, el efecto de las pequeñas tormentas que son insuficientes para saturar el follaje, el humedecimiento del follaje y la evaporación desde los troncos.

Este modelo analítico considera que la lluvia ocurre en una serie de eventos discretos, y que cada uno comprende tres fases distintas.

- Humedecimiento del follaje, donde la lluvia incidente ( $P_g$ ), es menor que la lluvia necesaria para saturar el follaje ( $P'_g$ ).
- Saturación del follaje
- Secado de la cobertura vegetal posterior a que la lluvia ha cesado.

La primera aproximación del cálculo de la interceptación se puede expresar mediante una regresión lineal.

$$I = aP_g + b \quad (2-38)$$

Donde  $I$  es la profundidad de agua interceptada y posteriormente perdida por evaporación, es decir las pérdidas por interceptación.  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión. Esta regresión no tiene en cuenta la intensidad, la duración de la lluvia, y el tiempo intertormentas.

Gash J. (1979) utilizó la teoría de regresión de ecuaciones para deducir el modelo analítico de interceptación de lluvia, basándose en algunos conceptos físicos tratados en el modelo de Rutter *et al* (1971).

## Regresión de ecuaciones

Para una tormenta que sea suficiente para saturar el follaje, Horton (1919) citado por Gash J. (1979) expreso la interceptación como.

$$I = \int_0^t E dt + S \quad (2-39)$$

Donde  $E$  es la tasa de evaporación del agua interceptada durante la tormenta;  $S$  es la capacidad de almacenamiento del follaje (la cantidad de agua en el follaje cuando la lluvia y el flujo de translocación a cesado y el follaje esta saturado);  $t$ , es la duracion de la tormenta; la evaporación desde los troncos es despreciable. Si ahora separamos la evaporación antes y despues de la saturación del follaje.

$$I = \int_0^{t'} E dt + \int_{t'}^t E dt + S \quad (2-40)$$

Donde  $t'$  es el tiempo necesario para que el follaje se sature.

Definiendo  $\bar{E}$ , que es la tasa de evaporación promedio desde la superficie del follaje saturado durante la lluvia como

$$\bar{E} = \left( \frac{1}{t - t'} \right) \int_{t'}^t E dt \quad (2-41)$$

Con la lluvia descrita de manera similar, la intensidad de precipitación media es

$$\bar{R} = \left( \frac{1}{t - t'} \right) \int_{t'}^t R dt$$

De donde se obtiene

$$P_g - P'_g = \bar{R}(t - t') \quad (2-42)$$

Donde  $P'_g$  es la cantidad de agua necesaria para saturar el follaje. Si se asume que no existe goteo desde el follaje antes de saturación,  $P'_g$  tambien se calcula como.

$$(1 - p - p_t)P'_g = S + \int_0^{t'} E dt \quad (2-43)$$

Reemplazando (2-41) y (2-42) en (2-40).

$$I = \int_0^{t'} E dt + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right)(P_g - P'_g) + S$$

Y sustituyendo por  $P'_g$  de la ecuación (2-43) y reorganizando términos se obtiene

$$I = \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right)P_g + \left(S + \int_0^{t'} E dt\right) \left\{1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right)(1 - p - p_t)^{-1}\right\} \quad (2-44)$$

Igualando los coeficientes de las ecuaciones (2-38) y (2-44).

$$a = \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right), b = \left(S + \int_0^{t'} E dt\right) \left\{1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right)(1 - p - p_t)^{-1}\right\}$$

Los valores de  $a$  y  $b$  se hallan de realizar la regresión de varias tormentas. Al realizar la regresión se tiene una suposición implícita, que el valor de  $\left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right)$  es constante, y los puntos fuera de la línea son desviaciones aleatorias de este valor. Se ha encontrado que los valores de  $\bar{E}$  y  $\bar{R}$  se encuentran altamente correlacionados, lo que valida en algún grado el método de la regresión.

### Derivación del modelo

En la búsqueda de proponer un modelo más sencillo de aplicar que el de Rutter, pero que además tuviera un profundo racionamiento respecto la física del proceso, Gash (1979) planteó inicialmente que la lluvia se podía representar con una serie discreta de tormentas, espaciadas lo suficiente para permitir el secado de las hojas y las ramas. Con esta simplificación, prosiguió a mejorar la integración analítica de las pérdidas por evaporación de la lluvia interceptada, reemplazando las tasas actuales de precipitación y evaporación para cada tormenta por el promedio de dichas tasas deducidas de todas las tormentas. El autor enunció las siguientes suposiciones para realizar la integración analítica:

- Las condiciones meteorológicas presentes en el humedecimiento del follaje se mantienen durante todo el periodo de tormentas. Las condiciones promedio de precipitación ( $\bar{R}$ ) y evaporación ( $\bar{E}$ ) son aplicables a todas las tormentas.
- La dependencia logarítmica de la tasa de goteo sobre el grado de saturación del follaje, observada por Rutter *et al* (1971), es suficientemente sensible que en efecto, no existe goteo durante el humedecimiento del follaje; y la cantidad de agua existente en el follaje es rápidamente (20-30 minutos) reducida a  $S$ , el valor mínimo de saturación, independiente del valor inicial cuando ha cesado la lluvia.

Las anteriores suposiciones permiten desligar los parámetros de la interceptación de los parámetros meteorológicos. Haciendo una dependencia entre las pérdidas por interceptación y los parámetros de manera explícita, contrario a la regresión que los hace de forma implícita, se espera que los resultados puedan ser extrapolados a otras coberturas vegetales y regiones climáticas.

### Evaporación desde el follaje saturado

Considere una serie de  $n$  tormentas cada una con la duración suficiente para saturar el follaje y separadas por un periodo suficiente para que el follaje se seque. Si la ecuación (2-40) es aplicada a cada tormenta las pérdidas por interceptación están dadas por

$$\sum_{j=1}^n I_j = \sum_{j=1}^n \left[ \int_0^{t'_f} E dt + \int_{t'_f}^{t_f} E dt \right] + nS \quad (2-45)$$

Si  $\bar{E}$  es ahora redefinido como

$$\bar{E} = \sum_{j=1}^n \int_{t'_f}^{t_f} E dt / \sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)$$

De forma similar la precipitación media está dada como

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^n \int_{t'_f}^{t_f} R dt / \sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)$$

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^n (P_{gj} - P'_{gj}) / \sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)$$

La ecuación (2-45) puede ser escrita como

$$\sum_{j=1}^n I_j = \sum_{j=1}^n \left[ \int_0^{t'_j} E dt + \left( \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (P_g - P'_{gj}) \right] + nS \quad (2-46)$$

### Humedecimiento del follaje

De la ecuación (2-43) las pérdidas por interceptación para el periodo antes de la saturación  $\int_0^{t'_j} E dt = (1 - p - p_t)P'_{gj} - S$ . Substituyendo esto en la ecuación (2-46)

$$\sum_{j=1}^n I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{gj} + \left( \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_g - P'_{gj}) \quad (2-47)$$

Para tormentas pequeñas que son insuficientes para saturar el follaje completamente,  $I = (1 - p - p_t)P_g$ . Incluyendo este número de tormentas ( $m$ ), la pérdida total por interceptación

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{gj} + \left( \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_g - P'_{gj}) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{gj} \quad (2-48)$$

### Evaporación desde los troncos

Tomado como referencia el modelo de Rutter, donde los troncos se conciben en el modelo conceptual de forma separada en el balance de agua en el follaje, la proporción de lluvia que es dirigida hacia los troncos es removida de la precipitación incidente antes que el balance de agua en el follaje sea considerado. El flujo cortical para cada tormenta con precipitación mayor a  $S_t/p_t$  es descrita por el *flujo cortical* =  $p_t P_g - S_t$ , donde  $S_t$  es la capacidad de almacenamiento del tronco, el cual debe ser llenado antes de que se observe cualquier flujo cortical en la base del tronco. La evaporación desde los troncos es probablemente mas pequeña comparado con la evaporación desde el follaje, Rutter & Morton (1977) calcularon que este valor puede estar típicamente entre 1-5% del valor

interceptado por el follaje en un evento de lluvia. La pérdidas por interceptación desde los troncos es entonces solo la cantidad de agua que reposa en los troncos despues que la lluvia ha cesado. Si se supone que el periodo intertormentas es lo suficientemente largo para permitir que todo el volumen de agua almacenado en los troncos se evapore, entonces las pérdidas por interceptación estan dadas por

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj}$$

Fuera del total  $(m + n)$  de tormentas hay  $q$  tormentas anteriores a la lluvia critica  $S_t/p_t$ , necesarias para saturar el almacenamiento del tronco. La ecuación (2-48) puede ser reescrita como

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{Gj} + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_G - P'_{Gj}) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj} \quad (2-49)$$

### Lluvia necesaria para saturar el follaje

Rutter *et al* (1971) asume que la evaporación desde el follaje esta descrita por  $\left(\frac{C}{S}\right) E_p$ , donde  $E_p$  es la evaporación que puede ocurrir desde la totalidad del follaje humedo y  $C$  es la cantidad de agua en el follaje. Esto es aplicado a condiciones en el follaje antes que de que se sature, con la suposición que las tasas evaporación y la precipitación media son aplicables. La evaporación duante este periodo esta dada por  $E = \left(\frac{C}{S}\right) \bar{E}$ . Asumiendo que no existe goteo desde el follaje antes de la saturación, el flujo de agua en el follaje puede estar descrita por  $\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)\bar{R} - E$ , o  $\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)\bar{R} - \frac{\bar{E}}{S}C$ , donde su solucion es

$$C = (1 - p - p_t) \frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\bar{E}t}{S}\right) \right\}$$

$$t = -\left(\frac{S}{\bar{E}}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}C}{\bar{R}S}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\}$$

El tiempo necesario para que ocurra saturación esta dado por

$$t' = -\left(\frac{S}{\bar{E}}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\}$$

Siguiendo la suposición que el valor medio de la precipitación es aplicable, al punto cuando se alcanza la saturación del follaje la lluvia esta dada por  $P'_G = \bar{R}t'$

$$P'_G = -\left(\frac{\bar{R}S}{\bar{E}}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\} \quad (2-50)$$

La ecuación (2-49) se puede describir, incluyendo  $P'_G$  considerando un periodo constante

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1 - p - p_t)P'_G + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj} \quad (2-51)$$

En la Tabla 2-1 se observan los componentes del modelo

**Tabla 2-1:** Componentes de modelo de interceptación de lluvia de Gash (1979)

Componente de la Interceptación	Formulación
Cantidad de lluvia necesaria para saturara el follaje ( $P'_G$ )	$-\left(\frac{\bar{R}S}{\bar{E}}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\}$
<b>Pérdidas por interceptación desde el follaje</b>	
Para $m$ tormentas pequeñas insuficientes para saturar el follaje ( $P_G < P'_G$ )	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$
Para $n$ tormentas suficientemente grandes para saturar el follaje ( $P_G \geq P'_G$ )	$n(1 - p - p_t)P'_G + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$
<b>Pérdidas por interceptación desde los troncos</b>	
Para $q$ tormentas que saturan el tronco ( $P_G \geq S_t/p_t$ )	$qS_t$
Para $m + q - n$ tormentas que no saturan el tronco ( $P_G < S_t/p_t$ )	$p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj}$
<b>Flujo Cortical</b>	$p_t \sum_{j=1}^q P_{Gj} - qS_t$
<b>Flujo de Translocación</b>	$p \sum_{j=1}^{m+n} P_{Gj} - \left[ (1 - p - p_t) - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \right] \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$

Este modelo tiene 4 parámetros y 3 variables de salida; las pérdidas por interceptación, el flujo de translocación y el flujo cortical.

### **Modelo analítico de Gash reformulado (Gash *et al*, 1995)**

Este modelo propuesto por Gash *et al* (1995), realiza una modificación del modelo original (Gash J. , 1979), mejorando las condiciones de frontera, con una mejor descripción del fenómeno de evaporación para bosques poco densos, debido a que el modelo original no era suficiente para describir el proceso de interceptación en este tipo de coberturas.

Este modelo requiere una estimación de la evaporación por unidad de área del follaje, como por unidad de área del suelo. Cuando la evaporación por unidad de área del follaje es igualada a la estimación de evaporación hecha con la ecuación de Penman Monteith se realiza una mejora en la descripción de las observaciones (Gash *et al*, 1995).

Este modelo asume una estructura cuasi-bidimensional de la superficie. Se introduce un parámetro adicional que es la fracción de cobertura del follaje,  $c$ . El modelo anterior falla en la modelación del humedecimiento del follaje en el momento en que  $(1 - p - p_t)\bar{R} < \bar{E}$ , ya que se encuentra un logaritmo negativo en el cálculo de  $P'_G$ . Si se realiza el cálculo de la precipitación necesaria para saturar el follaje en términos de la evaporación que solo se da desde el follaje saturado, es decir, desde el área proyectada cubierta por el follaje, se encuentra la siguiente expresión

$$P'_G = -\frac{\bar{R} S}{\bar{E}_c c} \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \right\} \quad (2-52)$$

Donde  $c$  se define de manera similar al planteamiento presentado por Valente *et al* (1997). Gash (1995) de manera similar a Valente *et al* (1997) afirma que el aporte hacia los troncos se da solo después que el follaje es saturado.

Se ha asumido que la evaporación para coberturas poco densas puede ser estimada de manera sencilla como una reducción de la evaporación calculada para el follaje completo en la proporción de la cobertura del follaje. Esta suposición asume implícitamente que la evaporación es unidimensional y que no existe interacciones horizontales o advección.

En la Tabla 2-2 se observan los componentes del modelo reformulado de Gash J (1995).

**Tabla 2-2:** Componentes del modelo de Interceptación de Gash reformulado (1995)

Componentes de la pérdida por interceptación	Formulación
Para m tormentas pequeñas, incapaces de saturar el follaje.	$c \sum_{j=1}^n P_{Gj}$
Humedecimiento del follaje, para n tormentas $>P'_G$ , suficientes para saturar el follaje	$ncP'_{Gj} - ncS_c$
Evaporación desde saturación antes de que la lluvia cese	$\left(\frac{c\bar{E}_c}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$
Evaporación después de que termina la lluvia	$ncS_c$
Evaporación desde los troncos, para q tormentas, donde $P_G > S_t/p_t$ , suficiente para saturar el tronco	$qS_c$
Evaporación para $n + m - q$ que no satura el tronco, donde $P_G < S_t/p_t$	$p_t \sum_{j=1}^{m-q} P_{Gj}$

Este modelo tiene 4 parámetros y 3 variables de salida; las pérdidas por interceptación, el flujo de translocación y el flujo cortical.

### Modelo analítico de Gash Sparse (Valente et al, 1997)

Valente *et al* (1997) presento algunas modificaciones al modelo ya reformulado de Gash (1995), con la intención de realizar un tratamiento similar a presentado en el modelo de Rutter modificado (Valente *et al*, 1997). Propuso entonces que el drenaje desde el follaje ( $Dr_j$ ) se presentaba para las j tormentas donde se sobrepasaba la saturación el follaje.

Considerando el balance de agua en el follaje para estas j tormentas se podía escribir como

$$Dr_j = \left[ 1 - \frac{(1 - \epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right] (P_{Gj} - P'_G) \quad (2-53)$$

Como la proporción de agua que es desviado hacia los troncos es  $p_d Dr$ , las pérdidas totales por interceptación desde los troncos se podrán calcular como  $qS_t + \sum_{j=1}^{n-q} Dr_j$ , donde fuera de las n tormentas suficientes para saturar el follaje, existen q tormentas con  $Dr > S_t/p_t$ . De esta desigualdad es posible calcular una nueva cantidad  $P''_G$  de lluvia necesaria para saturar los troncos, considerándolo constante para todo el periodo de modelación.

También la evaporación promedio potencial desde el follaje se ve afectada por el factor  $\epsilon$ , que relaciona la evaporación desde los troncos con la existente en el follaje (Valente *et al*, 1997). Lo anterior para satisfacer el principio de conservación de masa y energía.

Este modelo se puede trabajar con valores medidos a una escala diaria, suponiendo un único evento de precipitación por día.

En la Tabla 2-3 se observan los componentes del modelo Gash Sparse (Valente *et al*, 1997).

**Tabla 2-3:** Componentes del modelo de interceptación Gash Sparse (Valente *et al*, 1997)

Componente de la Interceptación	Formulación
Cantidad de lluvia necesaria para saturar el follaje ( $P'_G$ )	$-\frac{\bar{R}}{(1-\epsilon)\bar{E}_c} \frac{S}{c} \ln \left\{ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right\}$
Cantidad de lluvia necesaria para saturara el tronco ( $P''_G$ )	$\frac{\bar{R}}{\bar{R} - (1-\epsilon)\bar{E}_c} \frac{S_t}{p_d c} + P'_G$
<b>Pérdidas por interceptación desde el follaje</b>	
Para $m$ tormentas pequeñas insuficientes para saturar el follaje ( $P_G < P'_G$ )	$c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$
Para $n$ tormentas suficientemente grandes para saturar el follaje ( $P_G \geq P'_G$ )	$c \left[ nP'_G + \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) \right]$
<b>Pérdidas por interceptación desde los troncos</b>	
Para $q$ tormentas que saturan el tronco ( $P_G \geq P''_G$ )	$qS_t$
Para $n - q$ tormentas que no saturan el tronco ( $P_G < P''_G$ )	$p_d \left[ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$
<b>Flujo Cortical</b>	$p_d \left[ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^q (P_{Gj} - P'_G) - qS_t$
<b>Flujo de Translocación</b>	$(1-c) \sum_{j=1}^{m+n} P_{Gj} - (1-p_d)c \left[ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$

## 2.6. MODELOS DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL

Gash *et al* (2009) realizó una revisión detallada de los modelos matemáticos existentes utilizados para el entendimiento dinámico del proceso de interceptación. Se habla entonces que existen 15 modelos matemáticos publicados antes del año 2008, de los cuales 10 son modelos originales y 5 son mejoras de los anteriores. De estos 15 se trabajó con 2 modelos de cada grupo, siendo todos basados en la ecuación de balance de masa.

En general esto cuatro modelos escogidos se subdividen en dos familias, los de Rutter o físicamente basados, y los de Gash o analíticos. La gran diferencia entre los modelos originales y los reformulados, es que en los segundos se hace una distinción entre el área cubierta por el follaje y la que se encuentra descubierta, ya que inicialmente se suponía que el follaje era una estructura homogénea que cubría toda el área, lo cual generaba errores en las estimaciones de interceptación para estudios con grandes vacíos en la cobertura. En la Tabla 2-4 se muestran las características generales de los modelos seleccionados.

**Tabla 2-4:** Principales características de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia seleccionados

Modelo	Escala Temporal de Variables de Entrada		Variables de Salida			Nº Parámetros
	Lluvia	Meteorológicos	I	TF	SF	
Rutter (Rutter <i>et al</i> , 1971)	Horario	Horario	X	X	X	7
Rutter Sparse (Valente <i>et al</i> , 1997)	Horario	Horario	X	X	X	5
Gash (Gash J. , 1979)	Hora, Diario o Evento	Hora, Diario o Evento	X	X	X	4
Gash Sparse (Valente <i>et al</i> , 1997)	Hora, Diario o Evento	Hora, Diario o Evento	X	X	X	4

Fuente: Gash *et al* (2009)

En el caso del drenaje el modelo de Rutter *et al* (1971) realiza su cálculo en función del tiempo basado en relaciones empíricas. Los demás modelos identifican el drenaje como una parte integral del balance de agua en el follaje. El modelo de Rutter *et al* (1971) calcula el drenaje multiplicando una tasa de goteo empíricamente basada por un

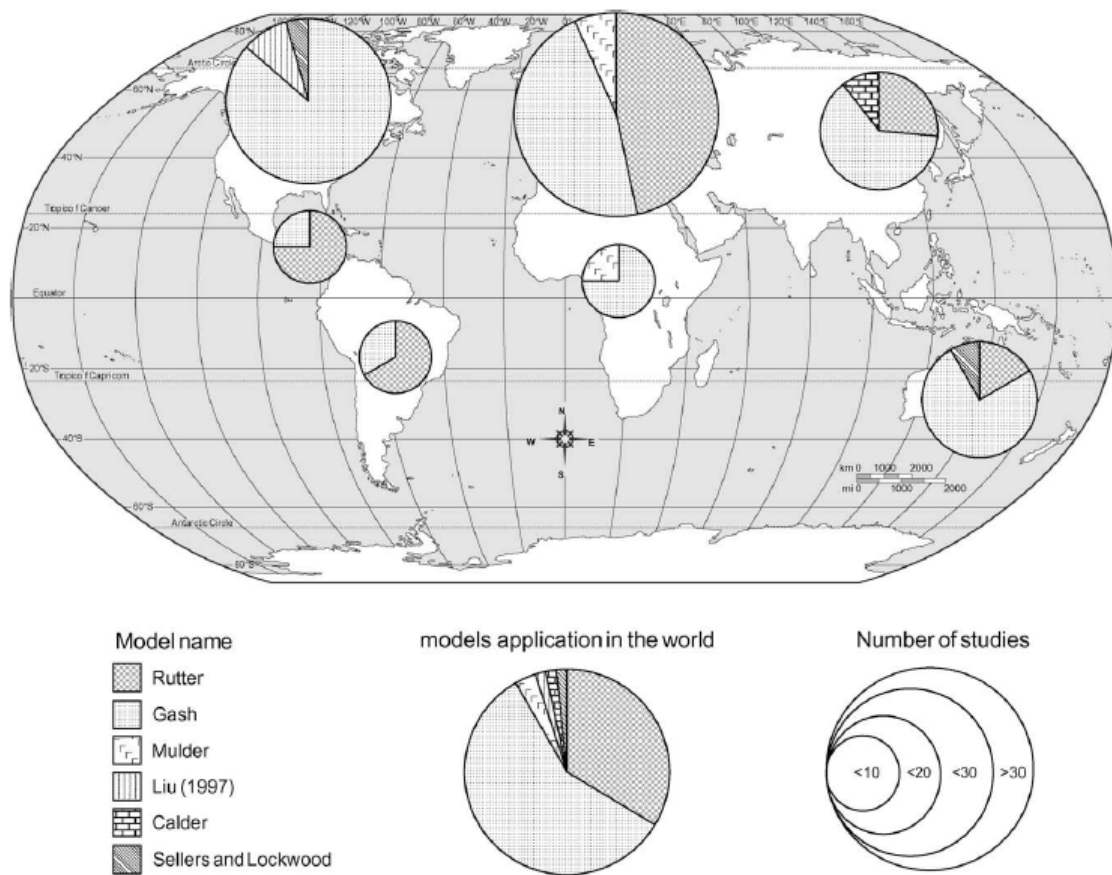
coeficiente que relaciona la tasa de drenaje con la capacidad de almacenamiento. El modelo de Rutter Sparse (Valente *et al*, 1997) utiliza una formulación en la cual evita trabajar con parámetros empíricos. El cálculo se basa en las diferencias entre la máxima capacidad de almacenamiento ( $S$ ) y el almacenamiento en el follaje ( $C$ ). El drenaje en el modelo de Rutter *et al* (1971), puede continuar hasta después que ha cesado la lluvia a diferencia de Rutter Sparse (Valente *et al*, 1997) donde el drenaje se interrumpe cuando cesa la lluvia. En todos los modelos analizados en este trabajo de investigación se recomienda realizar la estimación de la evaporación potencial utilizando la ecuación de Penman Monteith. Respecto las escala temporal de funcionamiento de los modelos, los analíticos utilizan como base el evento de precipitación y los físicamente basados son más detallados requiriendo información horaria tanto de la precipitación como de las variables meteorológicas. En el caso de los modelos originales el parámetro de capacidad de almacenamiento del follaje ( $S$ ) está relacionado con un área homogénea de follaje, caso contrario a los modificados o Sparse, donde esta característica del follaje se relaciona solo con el área cubierta por follaje, es decir su valor se reduce en función de la cobertura vegetal ( $c$ ). En la Tabla 2-5 se presenta el número de parámetros de cada modelo.

**Tabla 2-5:** Parámetros implícitos en los modelos dinámicos de interceptación de lluvia analizados

Parámetro relacionado con	Parámetro	Rutter	Rutter Sparse	Gash	Gash Sparse
Almacenamiento de agua	Capacidad de almacenamiento del follaje ( $S$ )	1	1	1	1
	Capacidad de almacenamiento de las ramas ( $S_t$ )	1		1	
Estructura del follaje	Cobertura Vegetal ( $c$ )		1		1
	Coefficiente libre de translocación( $p$ )	1		1	
Desviación de flujos de agua	Coefficiente desviación de flujo hacia ramas y troncos ( $p_t$ )	1		1	
	Coefficiente de partición de drenaje ( $p_d$ )		1		1
	Coefficientes de drenaje ( $D_s$ y $b$ )	2			
Otros	Constante entre $\varepsilon = E_t/E_c$	1	1		

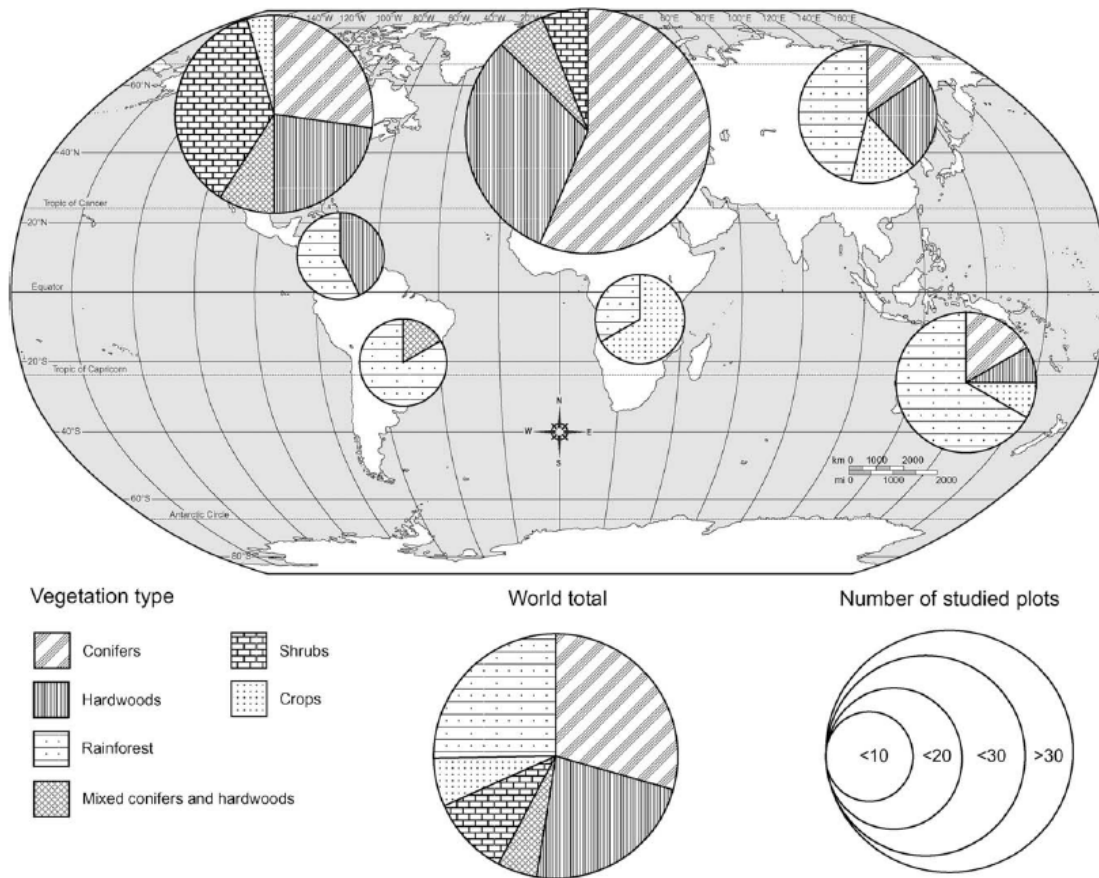
Gash *et al* (2009) también indagó sobre los modelos con mayor aplicabilidad en los estudios de interceptación en el mundo, encontrando los resultados presentado en la Figura 2-4. Investigó también acerca de cuáles son las coberturas vegetales más estudiadas y las clasificó en 6 tipos: rainforest-selva tropical, bosque de coníferas (conifers), bosques caducifolios (hardwoods), bosques de coníferas y especies caducifolias (mixed, conifers and hardwoods), arbustos (shrubs) y cultivos (crops). Encontró entonces que los modelos con mayor aplicación en el mundo son los de Gash (69 aplicaciones) y Rutter (42 aplicaciones), según su búsqueda virtual. Respecto las coberturas vegetales las más estudiadas son las coníferas, seguido por las selvas tropicales y los bosques caducifolios.

**Figura 2-8:** Aplicación de modelos de interceptación de lluvia en el mundo



Fuente: Gash *et al* (2009)

**Figura 2-9:** Distribución de aplicación de modelos según tipo de vegetación analizada



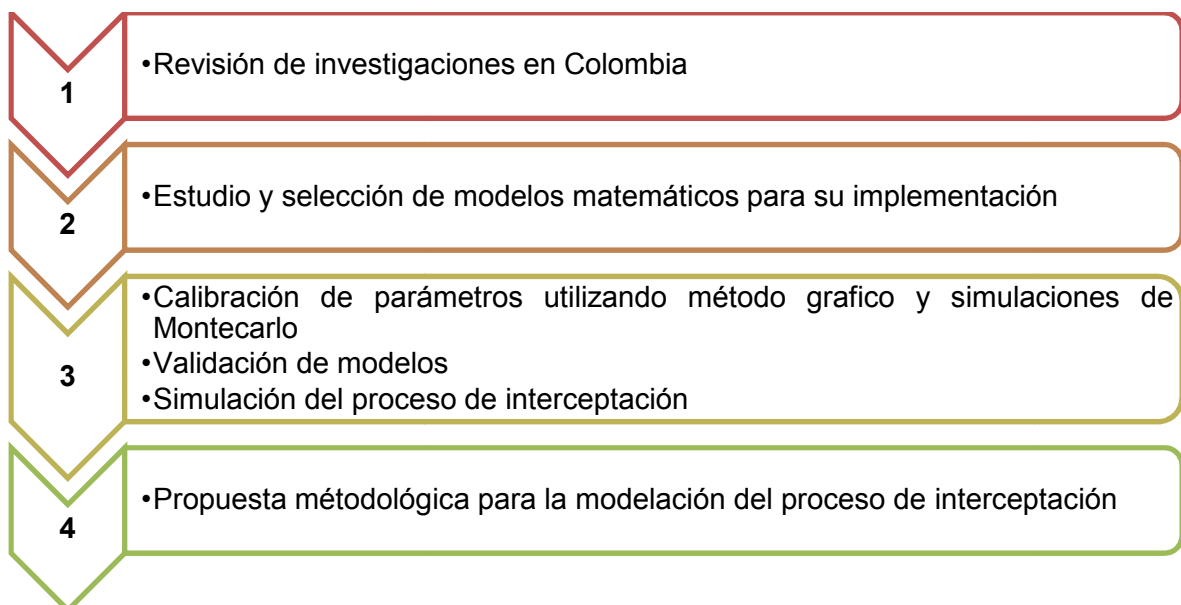
Fuente: Gash *et al* (2009)



## 3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

El desarrollo de esta investigación se dividió en cuatro etapas la cuales se representan en la Figura 3-1.

**Figura 3-1:** Actividades realizadas en la estrategia metodológica propuesta en esta investigación



Buscando cumplir con los objetivos propuestos se planteó la siguiente estrategia metodológica.

### 3.1. REVISIÓN DE INVESTIGACIONES EN COLOMBIA

Se realizó una revisión de las investigaciones publicadas en revistas indexadas, trabajos de grado e informes de consultoría que tuvieran algún tipo de relación con el tema de interceptación de lluvias por coberturas vegetales en el territorio nacional. De estas

investigaciones se destacó su localización, características de la cobertura vegetal, período de análisis y porcentaje de interceptación, respecto la precipitación incidente. Además de lo anterior se referenciaron ciertas investigaciones que por su relevancia, técnicas de medición, modelos implementados e importancia por sus resultados, sirvieron para contextualizar el proceso de interceptación de lluvias. De algunas de estas investigaciones, se gestionó la consecución de sus bases de datos para ser utilizados en la etapa de modelación del proceso de interceptación.

### **3.2. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN**

#### **Revisión de modelos de Interceptación de lluvia.**

Se realizó la revisión de las diferentes familias de modelos de interceptación de lluvia, destacando sus ventajas y limitaciones. Se consultaron artículos publicados en revistas indexadas, donde se comprobó la validez conceptual, matemática y práctica del modelo. Esta revisión se presentó en la sección 2.2 de este documento.

#### **Evaluación conceptual de los modelos de interceptación de lluvia seleccionados, identificando variables de estado y parámetros.**

Se seleccionaron modelos que por su consistencia conceptual y matemática fueron óptimos para su estudio y posterior implementación, y se justificó el porqué de su selección. Se estudió detenidamente su estructura conceptual y matemática, identificando las variables de estado y los parámetros de los modelos.

#### **Selección del lenguaje de programación, para integrar los algoritmos que rigen el funcionamiento de los modelos.**

En función de la cantidad de información requerida para implementar los modelos, la complejidad del problema inverso de calibración y la estructura matemática de los modelos, se seleccionó un lenguaje de programación, que permitió integrar adecuadamente los algoritmos de los modelos, con tiempos computacionales eficientes y un lenguaje de programación de fácil entendimiento y aplicación.

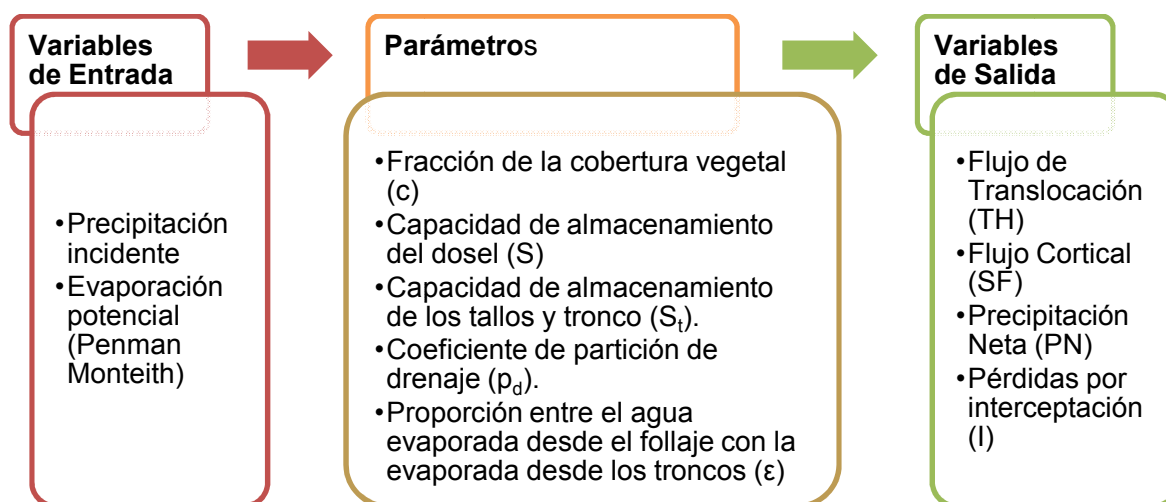
## Desarrollo y verificación del modelo aplicativo computacional

Posterior a la selección del lenguaje de programación se procedió a desarrollar el aplicativo computacional que permitió modelar el proceso de interceptación de lluvias. Se comprobó la operatividad de este aplicativo mediante la implementación de ejercicios controlados de modelación.

### 3.3. MODELACIÓN DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN (ESTUDIO DE CASO PARA COLOMBIA)

El esquema general de la etapa de modelación para el proceso de interceptación se presenta en la Figura 3-2. En esta se identifican las variables de entrada, los parámetros y las variables de salida.

**Figura 3-2:** Esquema general de modelación del proceso de interceptación



La información que se presenta en la figura anterior fue obtenida de Téllez (2003) quien investigó el proceso de interceptación en la Cuenca amazónica colombiana. Allí trabajó con 3 tipos de coberturas vegetales; uso agrícola, bosque secundario (5, 18 y 30 años de edad) y con bosque maduro. Para este ejercicio de modelación se trabajó con la cobertura de bosque maduro, la cual fue monitoreada en el periodo comprendido entre mayo de 2001 y junio de 2002.

Se registraron un total de 80 eventos de precipitación. Para estos se tomaron los flujos de agua presentes en esta cobertura vegetal; flujo de translocación y cortical. Los valores de cada variable hidrológica se obtuvieron del promedio de los registros interpretados de los colectores dentro de la cobertura boscosa.

Con la base de datos de la investigación de Téllez (2003) se procedió a realizar la calibración y validación de dos (2) modelos dinámicos de interceptación de lluvia; Rutter Sparse o Modificado (Valente *et al*, 1997) y Gash Sparse o Reformulado (Valente *et al*, 1997) para la cobertura de bosque maduro, en la cuenca media del río Caqueta. Se escogieron estos modelos por su amplia aplicación a nivel mundial y consistencia en su funcionamiento (Gash *et al*, 2009).

Se inició con la preparación de las bases de datos para su uso dentro de los modelos; se prepararon los registros de precipitación de forma que estuvieran a la misma escala temporal en la que opera el modelo y se calculó la evaporación potencial a través de la ecuación de Penman Monteith.

Este trabajo de investigación hace énfasis en la estructura de los modelos matemáticos que procuran representar el fenómeno físico de interceptación de lluvias por coberturas vegetales, y no en las coberturas vegetales. Por lo anterior sólo se decide implementar dichos modelos en una única cobertura vegetal, realizándose un análisis detallado sobre los parámetros, variables de entrada y salida del modelo.

### **Preparación de bases de datos para modelación**

Con la intención de obtener registros a nivel horario se implementaron dos técnicas: reescalamiento de datos medidos en estaciones meteorológicas cercanas y el modelo de pulsos rectangulares de Bartlett Lewis.

La primera técnica se implementó cuando se conocía el comportamiento de la lluvia a nivel horario en una estación cercana para el día del registro de variables. La segunda se utilizó para la generación de una serie sintética cuando no se conocía el comportamiento de la lluvia del día de registro de la precipitación, pero si el del proceso de precipitación a nivel horario en el mes.

- **Reescalamiento de series registradas a nivel horario**

Se filtró la información registrada en la estación meteorológica automática cercana a las parcelas experimentales, y con esta se procedió a realizar un proceso de reescalamiento de las mismas dividiendo los valores horarios entre la lluvia total diaria. Posteriormente este vector con rango entre 0 y 1, se multiplicó por la lluvia diaria registrada en el experimento.

- **Modelo de pulsos rectangulares de Bartlett Lewis para generación sintética de series de precipitación**

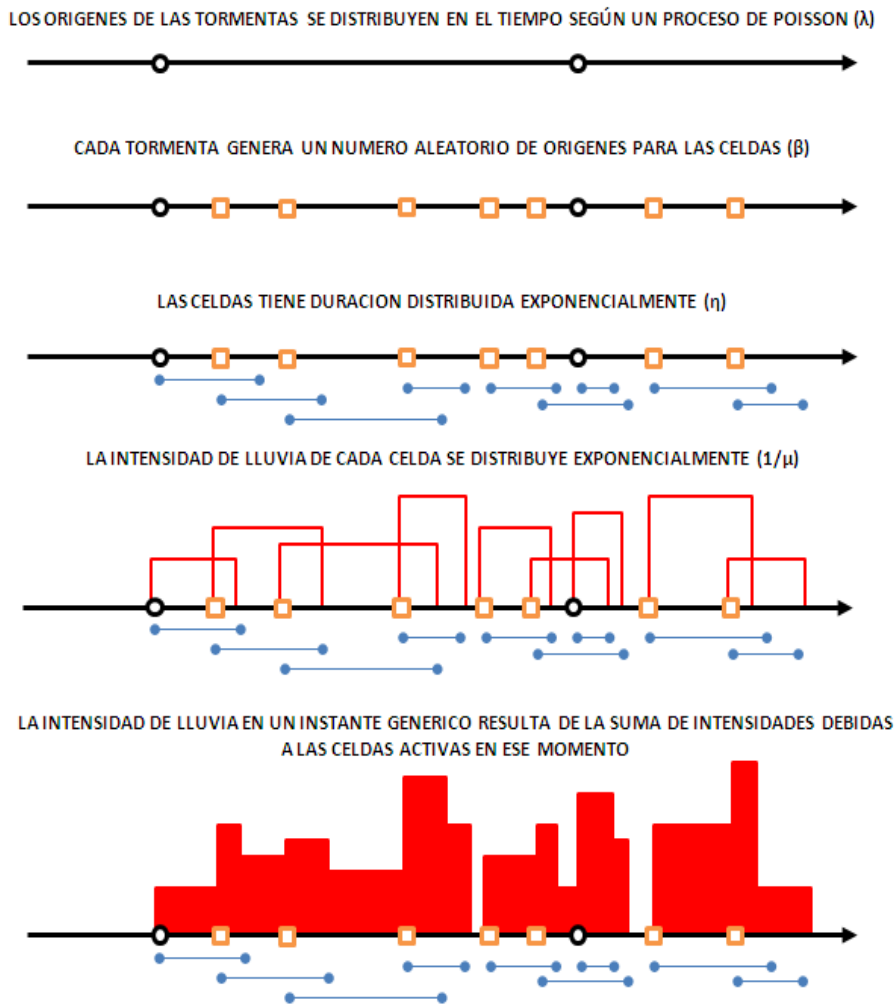
El modelo de pulsos rectangulares de Bartlett-Lewis se utiliza para generar series sintéticas de precipitación guardando la estructura estadística de los eventos registrados en una zona. A continuación se presenta una explicación de este método basado en las publicaciones de Casado & Bartual (1998) y Bo *et al* (1994).

Este modelo se basa en procesos de arribos de Poisson para el origen de los clústeres de la tormenta. Lo anterior ocurre a una tasa  $\lambda (d^{-1})$ , que representa el número de eventos por unidad de tiempo (semana, mes, año, etc.). Cada tormenta se caracteriza por un número de celdas  $C (C \geq 1)$ , de manera que los instantes de origen de las celdas siguen otro proceso de Poisson jerárquicamente inferior con parámetro  $\beta$ . La terminación del segundo proceso de Poisson obedece una distribución exponencial de parámetro  $\gamma$ , es decir el intervalo entre celdas sucesivas. La altura (intensidad) y ancho (duración) del pulso obedecen una distribución exponencial. La duración se distribuye con parámetro  $\eta$ . El número de celdas tiene una función de probabilidad geométrica dada por  $\mu_c = 1 + \beta/\gamma$ . En el modelo modificado de Bartlett-Lewis el parámetro de duración de la celda ( $\eta$ ) se toma como una variable aleatoria que cambia de tormenta a tormenta con una distribución Gamma de 2 parámetros, con parámetro de forma  $\alpha$  y de escala  $\nu (d)$ . Por último se define que cada profundidad o lluvia acumulada por celda tiene una distribución exponencial constante con media  $\mu_x (mm d^{-1})$ . En la Figura 3-3 se observa el proceso de construcción del modelo de Bartlett Lewis.

Para realizar la calibración de estos parámetros, Bartlett-Lewis propuso las siguientes expresiones que relacionan los estadísticos calculados de las series de datos originales,

con formas matemáticas que involucran los parámetros de las distribuciones de probabilidad.

**Figura 3-3:** Representación del Modelo de Bartlett Lewis.



Fuentes: Casado & Bartual (1998) y Bo *et al* (1994). Modificado por el autor

Media

$$E[Y_i^{(h)}] = \lambda \mu_x \mu_c \frac{v}{\alpha - 1} h \quad (3-1)$$

Varianza

$$\begin{aligned} Var[Y_i^{(h)}] = & \frac{2v^{2-\alpha}h}{\alpha - 2} \left( \kappa_1 - \frac{\kappa_2}{\phi} \right) - \frac{2v^{3-\alpha}}{(\alpha - 2)(\alpha - 3)} \left( \kappa_1 - \frac{\kappa_2}{\phi^2} \right) \\ & + \frac{2}{(\alpha - 2)(\alpha - 3)} \left[ \kappa_1 (h + v)^{3-\alpha} - \frac{\kappa_2}{\phi^2} (\phi h + v)^{3-\alpha} \right] \end{aligned} \quad (3-2)$$

Covarianza ( $s \geq 1$ )

$$\begin{aligned} \text{Covar} [Y_i^{(h)}, Y_{i+s}^{(h)}] &= \frac{\kappa_1}{(\alpha - 2)(\alpha - 3)} \{ [h(s - a) + v]^{3-\alpha} + [h(s + 1) + v]^{3-\alpha} \\ &\quad - 2(hs + v)^{3-\alpha} \} \\ &\quad + \frac{\kappa_2}{\phi^2(\alpha - 2)(\alpha - 3)} \{ 2(\phi hs + v)^{3-\alpha} - [\phi h(s - 1) + v]^{3-\alpha} \\ &\quad - [\phi h(s + 1) + v]^{3-\alpha} \} \end{aligned} \quad (3-3)$$

Donde:

$$\kappa_1 = \left( 2\lambda\mu_c\mu_x^2 + \frac{\lambda\mu_c\mu_x^2\phi}{\phi^2 - 1} \right) \left( \frac{v^\alpha}{\alpha - 1} \right)$$

$$\kappa_2 = \left( \frac{\lambda\mu_c\mu_x^2\kappa}{\phi^2 - 1} \right) \left( \frac{v^\alpha}{\alpha - 1} \right)$$

Probabilidad de no lluvia

$$\exp(-\lambda h - f_1 + f_2 + f_3) \quad (3-4)$$

Donde

$$f_1 = \frac{\lambda v}{\phi(\alpha - 1)} 1 + \phi(\kappa + \phi) - \frac{1}{4}\phi(\kappa + \phi)(\kappa + 4\phi) + \frac{\phi(\kappa + \phi)(4\kappa^2 + 27\kappa\phi + 72\phi^2)}{72}$$

$$f_2 = \frac{\lambda v}{(\alpha - 1)(\kappa + \phi)} \left( 1 - \kappa - \phi + \frac{3}{2}\kappa\phi + \phi^2 + \frac{\kappa^2}{2} \right)$$

$$f_3 = \frac{\lambda v}{(\alpha - 1)(\kappa + \phi)} \left( \frac{v}{v + (\kappa + \phi)h} \right)^{\alpha-1} \frac{\kappa}{\phi} \left( 1 - \kappa - \phi + \frac{3}{2}\kappa\phi + \phi^2 + \frac{\kappa^2}{2} \right)$$

Para la implementación de este modelo se utilizó la herramienta HYETOS® la cual es de libre distribución. El software HYETOS fue desarrollada en el Imperial College de Londres (Koutsoyiannis & Onof, 2005) y utiliza como base el modelo de pulsos rectangulares de Bartlett Lewis para la desagregación de series de escala diaria a horaria. Este programa se puede descargar en el siguiente link: <http://itia.ntua.gr/en/softinfo/3/>. Este proceso se realizó conservando las características de los valores registrados a escala diaria en el proceso de desagregación; Este modelo se basa además en técnicas de procesos de ajuste (proporcional, lineal y potencial), las cuales arrojan una serie consistente con los

valores diarios. Estos procedimientos de ajuste suponen que existe estacionariedad si quiera en un periodo de un mes.

Para la estimación de los 6 parámetros del modelos de Bartlett Lewis el programa cuenta con una hoja de cálculo auxiliar al programa HYETOS, que realiza la estimación de los parámetros mediante el complemento SOLVER de EXCEL. La función objetivo de minimización es el error cuadrático medio (*RMSE*), el cual es la diferencia entre los valores simulados e históricos de los estadísticos de los registros de precipitación estimados a diferentes escalas de agregación. Estos estadísticos son la media, la varianza, la covarianza de primer rezago, y la proporción seca (es decir, número de clústeres sin lluvia sobre número total de clústeres), para escalas temporales de 1, 24 y 48 horas.

El software se utiliza en alguno de los siguientes modos de operación:

**Desagregación modo de prueba (sin entradas, modo por defecto):** Se genera una secuencia de tormentas utilizando el modelo de Bartlett Lewis con unos parámetros dados y después agrega a escalas horarias y diarias. La secuencia diaria sirve como serie original, la cual es desagregada, y posteriormente genera otra serie horaria.

**Modo de prueba completo (con entrada horaria).** Para utilizar este modo, se debe definir un archivo de con el formato apropiado con espacio para los datos horarios. Este modo es apropiado para evaluar (comparar la serie original con la desagregada) el modelo de Bartlett Lewis, sus parámetros y el modelo de desagregación.

**Modo Operacional (con entrada diaria).** Este es similar al **Modo de prueba completo**, pero la diferencia es que el archivo de entrada no tiene valores horarios, sólo diarios.

**Modo de prueba para el modelo de lluvia (con entrada horaria).** Este es similar al **Modo de prueba completo** pero con unos datos sintéticos no desagregados pero generados del modelo de Bartlett Lewis con unos parámetros dados. Para utilizar este modelo, se debe: a) crear un archivo con los datos horarios históricos, b) la opción de Perform Adjustment debe estar apagada en la ventana de Parámetros del Modelo de Bartlett Lewis, y c) Distance Allowed debe ser un número grande (1000) para Repetitions Form.

**Modo de generación simple de lluvias (sin entradas y sin desagregar).** Este es similar al **Modo de prueba para el modelo de lluvia** pero sin entradas (no se define archivo de entrada). Este modo es apropiado para la generación de series utilizando el modelo de Bartlett Lewis con unos parámetros dados pero sin mejorar la desagregación.

Para el caso de estudio, el software HYETOS se corrió bajo el **Modo operacional (con entrada diaria)**, ya que se tenían los registros diarios de precipitación y los parámetros del modelo obtenidos de los registros horarios de la estación automática cercana al experimento.

- **Estimación de evaporación potencial**

En la estación meteorológica automática se registraron valores cada 20 minutos de temperatura del aire, humedad relativa y evaporación. Esta estación estaba compuesta de un *Datalogger*, un pluviógrafo automático de resolución 0.2 mm, un sensor de velocidad del viento y un sensor de dirección del viento. La humedad relativa se registró con un higrómetro de precisión. Los estadísticos para las variables meteorológicas estudiadas se consignan en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Estadísticos de variables meteorológicas para el periodo Mayo 2001 a Junio 2002

<b>Estadístico</b>	<b>Tmin (°C)</b>	<b>Tmax (°C)</b>	<b>HR (%)</b>	<b>Insolación (Horas)</b>	<b>Rad.Neta (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)</b>
<b>Media</b>	21.46	31.02	79.16	6.51	18.73
<b>Varianza</b>	1.55	4.72	21.16	2.80	7.05
<b>Desv. Estándar</b>	1.25	2.17	4.60	1.67	2.66
<b>Máximo</b>	24.0	35.2	96.0	10.3	24.6
<b>Mínimo</b>	15.6	22.0	69.0	0.3	9.5
<b>Rango</b>	8.4	13.2	27.0	10.0	15.1

Para el cálculo de la evaporación potencial se implementó la ecuación de Penman Monteith (1948).

### **Análisis de flujos de agua registrados**

Para los registros de los diferentes flujos de agua implícitos en el proceso de interceptación (flujos de translocación, flujo cortical, precipitación neta y las pérdidas por

interceptación) se realizó un análisis estadístico descriptivo, donde se graficaron diagramas de cajas y patillas e histogramas de frecuencias.

### Calibración de parámetros utilizando método gráfico y simulaciones de Montecarlo

- **Estimación de parámetros utilizando el método gráfico**

Se utilizó el método grafico propuesto por Rutter *et al* (1971) y que posteriormente fue adecuado para bosques no homogéneos por Valente *et al* (1997). Este método supone una dependencia lineal entre las variables del proceso de interceptación. Para esto se utilizaron las relaciones lineales de las ecuaciones 2-28 y 2-29. Se estimaron entonces los parámetros de capacidad de almacenamiento del dosel ( $S$ ), capacidad de almacenamiento de ramas y tronco ( $S_t$ ) y el coeficiente de partición de drenaje ( $p_d$ ). El valor de la fracción de cobertura vegetal ( $c$ ) se obtuvo del documento de Téllez (2003), quien a su vez lo estimo a través de un método fotográfico.

Para hallar estos parámetros se debio realizar una regresion lineal entre  $TH - (1 - c) * P_G$  (abcisas) y  $SF$  (ordenadas). De la pendiente obtenida es posible hallar el coeficiente de particion de drenaje (Ecuación 3-5).

$$p_d = \frac{\text{pendiente}}{1 + \text{pendiente}} \quad (3-5)$$

El intercepto de esta regresión es la capacidad de almacenamiento del tronco y las ramas ( $S_t$ ). Si se desprecian las pérdidas por interceptación desde el follaje se podrá utilizar la ecuación 2-20. Para hallar la capacidad de almacenamiento del follaje se utilizó el método grafico mencionado en la sección 2.2.2.1 (Rutter *et al*, 1971)), donde se habla de hallar la línea envolvente superior entre la precipitación neta y el flujo de translocación. Esta envolvente debe tener una pendiente preestablecida igual a  $1 - cp_d$ .

De la regresión lineal entre la precipitación incidente ( $P_G$ ) y el flujo de translocación ( $TH$ ) se obtiene el intercepto negativo, y con este valor se puede hallar la capacidad de almacenamiento del dosel ( $S$ ) con la ecuación 3-6.

$$S = \frac{\text{Intercepto}}{1 - p_d} \quad (3-6)$$

• **Estimación de parámetros utilizando simulaciones de Montecarlo**

Se procedió a realizar la solución del problema inverso (calibración) para esta cobertura buscando los parámetros óptimos de los modelos de *Rutter Sparse* y *Gash Sparse* (Valente, 1997). Para tal labor se calibraron 2 parámetros; capacidad de almacenamiento del follaje ( $S$ ), capacidad del almacenamiento de ramas y tronco ( $S_t$ ). Los parámetros coeficiente de partición de drenaje ( $p_d$ ) y la proporción entre el agua evaporada desde el follaje con la evaporada desde los troncos ( $\varepsilon$ ), no se modificaron, ya que en una revisión preliminar de la naturaleza de estos parámetros se verificó la insensibilidad y no identificabilidad de los mismos, lo que podría generar problemas de interdependencia paramétrica impidiendo la representación del flujo cortical y la evaporación desde las ramas. El valor de  $\varepsilon$  se tomo después de revisar estudios de interceptación en coberturas similares a la de bosque con resultados coherentes a los registrados experimentalmente (Rutter *et al*, 1971; Valente *et al*, 1997).

Los rangos de calibración obedecieron tanto el comportamiento intrínseco del parámetro como los valores reportados en investigaciones donde se han implementado estos modelos (Rutter *et al*, 1971; Rutter *et al*, 1975; Valente *et al*, 1997) (Tabla 3-2). La calibración se realizo con el 50% de los eventos de precipitación en los cuales se estudio el proceso de interceptación de lluvia. En esta etapa de calibración se utilizó el proceso de simulaciones de Montecarlo generando 1000 combinaciones de parámetros con funciones de probabilidad uniforme.

**Tabla 3-2:** Rango de los parámetros para calibración

Límites	$S(mm)$	$S_t(mm)$
<b>Inferior</b>	0	0
<b>Superior</b>	5	0.05

Como función objetivo se trabajó el error cuadrático medio normalizado (Ecuación 3-7), el cual también fue utilizado por Téllez (2003) en la etapa de calibración del modelo de Rutter *et al* (1971).

$$RMSEN = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}}{OBS} \tag{3-7}$$

Donde

*RMSEN*: Error cuadrático medio normalizado (Adimensional) o función objetivo (*OBJ*)

*OBS<sub>i</sub>*: Precipitación neta observada, la cual se estimó como la suma del flujos de translocación y cortical experimentales

*OBS<sub>i</sub>*: Precipitación neta simulada, la cual se estimó como la suma del flujos de translocación y cortical simulados

$\overline{OBS}$ : Precipitación neta promedio para la estructura de bosque en el número de eventos utilizados en la etapa de calibración

Para realizar los análisis de los resultados de las simulaciones generadas a través de la técnica de Montecarlo se utilizó la herramienta MCAT (MONTE-CARLO ANALYSIS TOOLBOX complemento de MATLAB), desarrollado por el Imperial College of Science Technology and Medicine de Inglaterra que permite indagar sobre la estructura, la sensibilidad, los parámetros y la incertidumbre de los resultados de los modelos dinámicos matemáticos (Wagener *et al*, 2001).

Con esta herramienta se realizaron los siguientes análisis gráficos:

**Dotty-Likelihood Plot:** esta salida gráfica es una proyección de la superficie de respuesta definida por la función objetivo en una dimensión para cada valor del parámetro. También se puede graficar la función de verosimilitud la cual se define como

$$L = 1 - RMSEN \quad (3-8)$$

**A posteriori distribution:** esta figura se obtienen cuando el rango de cualquier parámetro es dividido en 20 categorías de ancho igual, y después las verosimilitudes en cada categoría son sumadas y divididas por la suma de los valores del parámetro en cada categoría. Esta operación da como resultado la distribución del parámetro después de haber sido acondicionado por la función objetivo.

**Regional Sensitive Analysis:** esta salida gráfica se obtiene cuando la población de parámetros son clasificados de acuerdo a la función objetivo, posteriormente se transforman a verosimilitudes y se dividen en 10 grupos iguales. Para cada grupo las verosimilitudes se normalizan dividiendo por su total, y la distribución de frecuencias acumuladas se calculan y posteriormente se grafican. La sensibilidad paramétrica se define como el efecto de los parámetros sobre todo el comportamiento del modelo o las salidas específicas. Una diferencia en las distribuciones (líneas) sugiere sensibilidad del

comportamiento del modelo respecto el parámetro analizado, es decir, tiene un efecto fuerte sobre el comportamiento y las salidas del modelo.

**Class plot:** en esta gráfica se representa la población de parámetros cuando son ordenados de acuerdo a la función de verosimilitud y se dividen en 10 grupo iguales. El mejor grupo de parámetros de cada grupo se utilizan para graficar el fenómeno junto con los datos observados.

**GLUE Output Uncertainty:** se realizó una predicción de los límites de confianza utilizando la metodología GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation) propuesta por Beven & Binley (1992), la cual permite cuantificar la incertidumbre de un modelo de predicción. Para cada punto en el tiempo se genera una función de frecuencia acumulada utilizando la función objetivo transformada a verosimilitud y los límites de confianza se calculan utilizando una interpolación lineal. Para los valores registrados de precipitación neta se trabajó con el intervalo de confianza de 2.5 a 97.5%.

**Parameter View:** este gráfico presenta una superficie en 3D donde en los ejes X y Y se encuentran los parámetros objeto de calibración, y en el eje Z la función objetivo a minimizar.

### Validación de modelos

Como resultado de la estimación inicial (método gráfico) y la calibración de los parámetros (simulaciones de Montecarlo), se procedió a medir la eficiencia de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia seleccionados. Para tal fin se compararon los valores registrados con los simulados en los diferentes escenarios propuestos para el ejercicio; RUTTER SPARSE (**RS**), GASH SPARSE (**GS**), RUTTER SPARSE CALIBRADO (**RSC**) y GASH SPARSE CALIBRADO (**GSC**) (De aquí en adelante nos referiremos a los modelos por sus abreviaturas). Los dos primeros se implementaron con los parámetros estimados gráficamente y los dos últimos con los obtenidos mediante la técnica de simulaciones de Montecarlo.

Para efectos tanto de comparación de modelos como de validación de los mismos se trabajó con las 40 tormentas restantes registradas en la estructura de bosque, es decir desde la tormenta 51 a la 80. Estos eventos se registraron en dos periodos; el primero

del 01 de Septiembre hasta el 12 de Diciembre de 2001 y el segundo del 01 de Mayo al 19 de Junio de 2002.

Con estos resultados se procedió a realizar una comparación entre las salidas de los dos modelos de interceptación implementados, comentando sobre las ventajas, limitaciones y falencias de cada uno. En esta etapa de validación se realizaron análisis entre los datos simulados y los registrados para cada variable del proceso de interceptación.

Buscando evaluar la eficiencia de los modelos y procurando identificar cual de los modelos implementados tuvo un mejor ajuste con los registros experimentales, se calcularon los estadísticos presentados en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3:** Estadísticos y sus expresiones matemáticas

ESTADÍSTICO	ECUACIÓN
<b>Error medio absolute</b>	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  OBS_i - SIM_i $
<b>Error máximo absolute</b>	$MAXE = MAX( OBS_i - SIM_i )$
<b>Raíz del error cuadrático medio</b>	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}$
<b>Raíz del error cuadrático medio normalizado</b>	$RMSEN = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}}{\overline{OBS}}$
<b>Coefficiente de eficiencia (Coefficiente de Nash-Sutcliffe)</b>	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2}$

Fuente: Madsen (2007)

El error medio absoluto (*MAE*), es una cantidad utilizada para cuantificar que tan cerca estan las simulaciones de los valores registrados. Este estadístico se utiliza comunmente para cuantificar el error de prediccionEl error máximo absoluto (*MAXE*), indica la diferencia más amplia entre los valores simulados y observados.

El error medio cuadrático (*RMSE*) cuantifica el promedio cuadrático de los errores. El error es la diferencia entre los valores observados y los simulados. Los anteriores estadísticos tienen las unidades de la variable que se este analizando.

El error cuadrático medio normalizado (*RMSEN*) es el error cuadrático medio dividido el promedio de la variable observada, con lo el estadístico se hace comparable entre variables gracias a su normalización. El coeficiente de eficiencia (*E*) se mueve en el

rango desde  $-\infty$  hasta 1, siendo un valor de 1 para un ajuste perfecto con los registros experimentales. Un valor de 0 indica que la exactitud de predicción del modelo es similar a la media de los datos observados, y para valores menores a 0 es un indicativo que la media de los registros experimentales es un mejor predictor que el modelo implementado.

Se continuó realizando un análisis con los valores acumulados para todas las variables hidrológicas que componen el proceso físico de interceptación de lluvias; precipitación Neta ( $PN$ ), flujo de translocación ( $TH$ ), flujo cortical ( $SF$ ) y pérdidas por interceptación ( $I$ ). Se compararon entonces los porcentajes de cada una de las variables respecto al valor de precipitación total incidente para el periodo total de validación. También se estimó la diferencia de láminas de agua entre los valores simulados y los registrados acumulados para el periodo de análisis. De las simulaciones resultado de la implementación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia se calcularon los porcentajes de cada variable respecto a la precipitación incidente a nivel diario. Con estos porcentajes se procedió a calcular su valor medio, desviación estándar, máximo y mínimos.

También se verificó que las diferencias entre los valores registrados y simulados acumulados fueran mínimas. Se estimó también el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Un valor de 1 en este estadístico indica una fuerte relación entre las dos variables aleatorias.

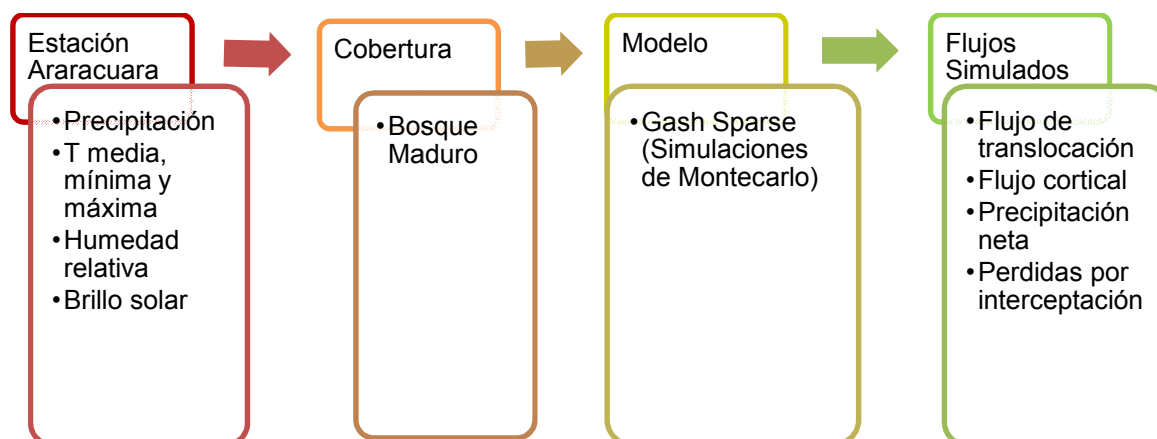
Por último se realizó un análisis gráfico de las salidas de los modelos físicos y analíticos. Se realizaron diagramas de puntos entre la precipitación incidente y las demás variables del proceso de interceptación, diagramas de barras para los eventos de validación, y diagramas de líneas acumuladas. En todas ellas comparando los modelos de Gash Sparse y Rutter Sparse con parámetros estimados con simulaciones de Montecarlo.

### **Simulación del proceso de interceptación**

Posterior a la verificación del funcionamiento de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia, se procedió a realizar una implementación del modelo de **Gash Sparse** para la estructura de bosque maduro para el año 2011 en la cuenca del medio Caquetá, con información hidrometeorológica de la estación Araracuara (44135010), la cual tiene coordenadas  $0^{\circ}36'$  Latitud Sur (S) y  $72^{\circ}22'$  Longitud Oeste (W) y una altitud de 150 msnm. El procedimiento resumido se presenta en la figura 3-4. De las salidas del modelo se destacó el efecto de las coberturas vegetales sobre el balance hídrico.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo y se gráfcaron las salidas acumuladas de cada variable, para identificar que flujos son los mas relevantes en el proceso de interceptación de lluvias.

**Figura 3-4:** Esquema de simulación de estudio de caso en cobertura de bosque maduro



### 3.4. PROPUESTA METODOLÓGICA DE MEDICIÓN DE VARIABLES

Se propuso una metodología que facilitara la implementación de los modelos de interceptación de lluvia en función de la información requerida, las técnicas de medición de variables y las escalas temporales de funcionamiento de los modelos. Esta propuesta se dividió en dos grandes grupos: la medición de las variables hidrometeorológicas y el protocolo de modelación en ingeniería. Dentro de la medición de las variables hidrometeorológicas se destaca la definición del objeto de estudio, la selección del área de estudio, la caracterización de la cobertura vegetal, la instrumentación, la medición de las variables del proceso y por último el análisis de los registros experimentales.

Para la modelación se revisaron algunos protocolos de modelación, y utilizando sus conceptos y secuencia en el proceso, se propuso uno para el caso del proceso de interceptación de lluvias. Se siguen las etapas de calibración, validación, simulación y análisis posteriores.

## 4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EL ESTUDIO DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN EN COLOMBIA

Diferentes investigadores y centros de investigación se han interesado por estudiar el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales en el país, tales son los casos de **Centro Nacional de Investigaciones de Café** (Cenicafé), La Universidad Nacional de Colombia, en sus sedes de Medellín y Bogotá, y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Buscando contextualizar el proceso de interceptación, su interpretación, cuantificación y modelación, se realizó una búsqueda virtual exhaustiva de investigaciones publicadas que estudiaron este proceso en el territorio nacional. En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de estas investigaciones, destacando los autores, la localización del experimento, el tipo de interceptación que se estudió (vertical u horizontal), la cobertura analizada y sus características (IAF, porcentaje de cobertura vegetal ( $c$ ) y capacidad de almacenamiento ( $S$ ), periodo de análisis y cantidad de agua interceptada respecto la precipitación incidente.

**Tabla 4-1:** Resumen de investigaciones relacionadas con el procesos de interceptación de lluvias en Colombia

AUTOR	LOCALIZACIÓN	TIPO DE PRECIPITACIÓN	COBERTURA	IAF	C (%)	S(m m)	PERIODO DE ANÁLISIS	% I
<b>Ballesteros (1983)</b>	Neusa, Cundinamarca	VERTICAL	Pino	-	-	-	-	45
<b>Giraldo (1989)</b>	Piedras Blancas-Medellín, Antioquia	VERTICAL	Pino	-	-	-	-	35
<b>Tobón (1989)</b>	Guadalupe, Antioquia	VERTICAL	Cedro ( <i>Cupressus lusitanica</i> )	-	-	-	-	14.7
			Pino ( <i>Pinus patula</i> )	-	-	-		21
			Bosque natural	-	-	-		18
<b>Veneklaas &amp; Van Ek (1990)</b>	Parque de los Nevados-Cordillera Central	VERTICAL	Bosque tropical húmedo (2550 msnm)	-	78	-	Agosto 1986-Agosto 1987	12.4
			Bosque tropical húmedo (3370 msnm)	-	59	-		18.3
<b>Chávez &amp; Jaramillo (1999)</b>	Chinchiná, Caldas	VERTICAL	Bosque	-	-	-	Agosto 1996-Marzo 2000	Tabla 4-2
			Café libre exposición	-	-	-		
			Café con sombrío de guamo	-	-	-		
<b>Gonzales J (2000)</b>	El Tambo, Cauca	HORIZONTAL	Bosque de Niebla	-	-	-	Junio 1999-Diciembre 1999	9
<b>Jarvis (2000)</b>	El Tambo, Cauca	HORIZONTAL	Epifitas de Bosque de Niebla	-	-	24	1997-1998	46
<b>De las Salas &amp; García (2000)</b>	Cuenca San Cristóbal, Cundinamarca	VERTICAL	Bosque Nativo	-	-	-	Septiembre 1995-Agosto 1996	28
			Eucalipto	-	-	-		20
			Cipres	-	-	-		57
<b>Tobón, Bouten, &amp; Sevinj (2000)</b>	Araracuara, Caquetá	VERTICAL	Bosque-Plano sedimentario terciario	4.4	83.2	1.16	Diciembre 1993-Agosto 1997	11.84
			Bosque -Terraza Alta	4.9	84.6	1.28		12.24
			Bosque- Terraza Baja	5.6	88.3	1.32		12.92
			Bosque-Planicie de Inundación	6.6	91.8	1.55		17.15
<b>Martínez (2001)</b>	Araracuara, Caquetá	VERTICAL	Bosque-Plano sedimentario terciario	-	-	-	Enero 1999-Diciembre 1999	18.1
			Bosque -Terraza Alta	-	-	-		13.8
<b>Jaramillo (2003)</b>	Chinchiná, Caldas	VERTICAL	Bosque multiestrato	-	-	2.2	Agosto 1996-Diciembre 2001	59
			Café libre exposición (2 x 1)	-	-	0.3		46
			Café (2 x 1) sombrío de guamo (12 x 12)	-	-	0.9		58

	Buenavista, Quindío	VERTICAL	Café libre exposición (1.5 x 1.5)	-	-	0.3	Agosto 1996-Diciembre 2001	49
			Café (1.5 x 1.5) sombrío de pino (6 x 6)	-	-	0.4		52
			Café (1.5 x 1.5) sombrío de nogal (6 x 6)	-	-	1.1		56
			Café (1.5 x 1.5) sombrío eucalipto (6 x 6)	-	-	0.6		51
<b>Giraldo &amp; Jaramillo (2004)</b>	Chinchiná, Caldas	VERTICAL	Café (1.5 x 4.5) sombrío de guamo (6 x 6)	-	76.4	-	Octubre 2002-Julio 2003	18.3
			Café (1.5 x 4.5) sombrío de guamo (6 x 6)	-	76.9	-		17.2
			Café (1.5 x 4.5) sombrío de guamo (9 x 9)	-	87.5	-		21.3
			Café (1.5 x 4.5) sombrío de guamo (9 x 9)	-	91.4	-		22.9
			Café (1.5 x 4.5) sombrío guamo (12 x 12)	-	67.3	-		18.4
			Café (1.5 x 4.5) sombrío guamo (12 x 12)	-	65.04	-		17.4
<b>Téllez (2003)</b>	Araracuara, Caquetá	VERTICAL	Bosque Maduro	5.6	88.2	1.08	Agosto 2001-Junio 2002	14.11
			Rastrojo 5 años	4.2	87.11	1.27		10.27
			Rastrojo 15-18 años	3.6	82.6	0.7		6.96
			Rastrojo 30 años	4	85.2	0.83		7.27
<b>Velásquez &amp; Jaramillo (2009)</b>	Chinchiná, Caldas	VERTICAL	Bosque secundario	5.1 5	78.5	-	Octubre 2007-Junio 2008	8
			Café libre exposición (1.5 x 2.5)	4.1 3	67.5	-		7.6
			Café (1.6 x 2) sombrío de guamo (9 x 9)	5.6 1	80.7	-		14.3
			Pasto estrella y braquiaria	-	-	-		3.3
<b>León, Gonzales y Gallardo (2010)</b>	Piedras Blancas-Medellín, Antioquia	VERTICAL	Bosque-Roble	-	-	1.33	Marzo 2001-Marzo 2004	14.5
			Bosque-Pino	-	-	1.16 2		19.1
			Bosque-Cipres	-	-	1.07 3		10.2

De las anteriores investigaciones se referencian a continuación algunas que por su relevancia y accesibilidad se destacaron.

#### **4.1.1. Balance hídrico en el cultivo de Café y efecto de las pérdidas por interceptación en el ciclo hidrológico**

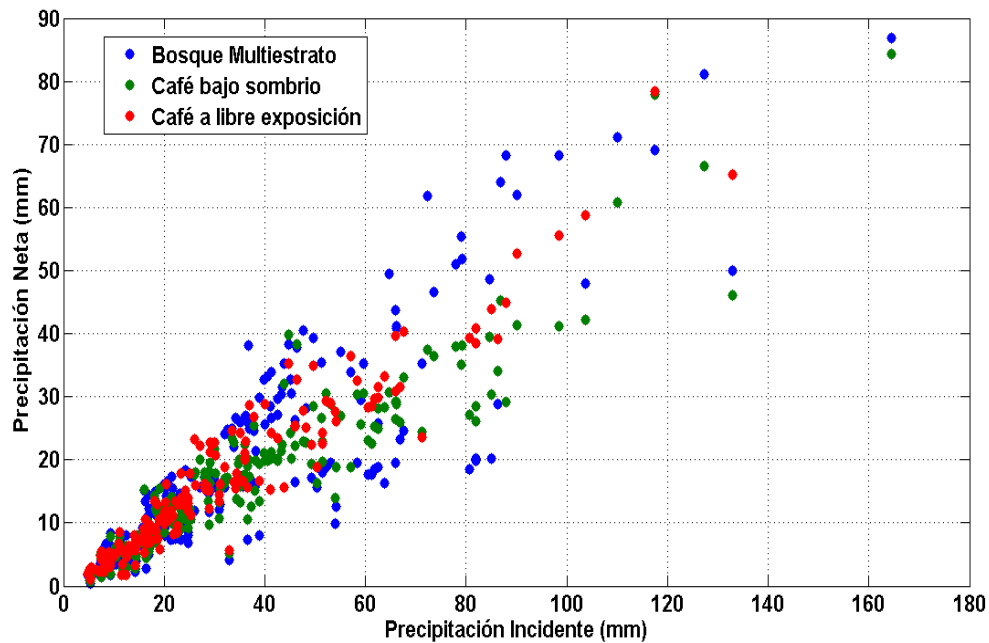
Si se analiza el efecto de la interceptación sobre los cultivos perennes que existen en el país, se deben desatacar los esfuerzos que **Cenicafe** ha realizado para entender el comportamiento e interacción con los ciclos vegetativos en el cultivo del café. Estos esfuerzos han sido liderados por el Ingeniero Álvaro Jaramillo Robledo M. Sc en Meteorología e investigador de esta institución. Tal es el caso de Jaramillo y Chávez (1999) quienes realizaron una investigación relacionada con el proceso de interceptación en la zona cafetera colombiana, con el fin de contribuir al conocimiento de criterios técnicos para guiar al agricultor en el manejo del sombrero en cafetales.

Estos investigadores trabajaron en tres áreas experimentales con características de cobertura vegetal diferentes todas cercanas a Cenicafe. La primera fue cobertura de bosque multiestrato, rastrojos y guaduales con intervención humana. La segunda fue un área con cobertura de cultivo de café variedad Caturra con distancia de siembra de 2 metros entre surcos y 1 metro entre plantas con un sombrero de Guamo (*Inga Sp* con distancia de siembra de 12 x 12 m). Y la tercera área estaba sembrada con café variedad Colombia a libre exposición solar, con distancia de siembra de 2 metros entre surcos y 1 metro entre plantas. El periodo de análisis fue desde el mes de agosto de 1996 a marzo de 2000 (218 días de lluvia) para el caso de las coberturas de bosque y café bajo sombrero, y de agosto de 1996 a abril de 1999 (180 días de lluvia) para el café a libre exposición.

Respecto a la cuantificación de las variables hidrológicas del proceso de interceptación, la precipitación incidente o lluvia externa se midió mediante un pluviógrafo Hellman de registro diario ubicado en la estación experimental a una distancia no mayor a 300 metros; el flujo de translocación se midió mediante 20 pluviómetros o colectores de vidrio (área de captación de 24cm<sup>3</sup>), situados en cada una de las parcelas y colocados debajo de las coberturas vegetales, dispuestos en una malla de 4x5 pluviómetros, con una distancia de 3 metros entre ellos.

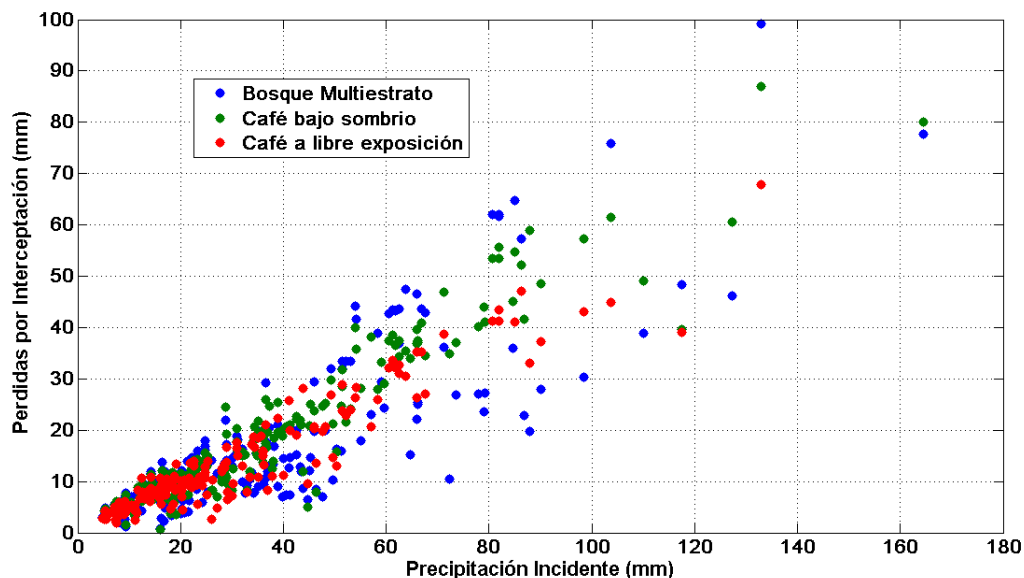
De las medidas obtenidas en los pluviómetros se obtuvo un valor representativo para la parcela (media). Cabe anotar que existe una gran variabilidad espacial en los registros de los colectores instalados bajo la cobertura vegetal y no existe correlación entre ellos, debido a las características variables de la cobertura vegetal y las propias de la lluvia (intensidad y duración) (Jaramillo & Chavez, 1999). De la investigación se obtuvo los valores de flujo de translocación o en este caso, de precipitación neta, ya que se supuso que el flujo cortical para el cultivo del café era despreciable y en las estructuras boscosas no se determinó. La interceptación se estimó como la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta (Figura 4-1 y 4-2).

**Figura 4-1:** Precipitación Incidente vs Precipitación neta para diferentes tipos de Cobertura Vegetal



Fuente: Jaramillo & Chavez (1999)

**Figura 4-2:** Precipitación Incidente vs Interceptación para diferentes tipos de cobertura vegetal



Fuente: Jaramillo & Chavez (1999)

Jaramillo y Chávez (1999) ajustaron curvas teóricas para explicar el comportamiento tanto de la interceptación como de la precipitación neta en función de la precipitación incidente para las diferentes coberturas analizadas, con los registros de los años 1997 y 1998. Las relaciones encontradas fueron de tipo exponencial y para su deducción se basaron en la función logística de crecimiento poblacional de Verhulst. Dichas expresiones se presentan en la Tabla 4-2, donde  $P_G$  es la precipitación incidente.

**Tabla 4-2:** Expresiones matemáticas para el cálculo de Precipitación Neta (mm) e Interceptación (mm) en la zona cafetera en función de la Precipitación Incidente (mm)

Cobertura vegetal	Precipitación neta	Interceptación
<b>Bosque</b>	$61.00 / [1 + 10.40 * \exp(-0.038 * P_G)]$	$53.66 / [1 + 16.09 * \exp(-0.054 * P_G)]$
<b>Café Bajo Sombrío</b>	$45.05 / [1 + 9.46 * \exp(-0.049 * P_G)]$	$60.30 / [1 + 16.04 * \exp(-0.050 * P_G)]$
<b>Café a libre exposición</b>	$69.13 / [1 + 12.45 * \exp(-0.040 * P_G)]$	$45.12 / [1 + 11.64 * \exp(-0.040 * P_G)]$

Fuente: Jaramillo & Chavez (1999)

Las gráficas de estas expresiones se presentan en las Figuras 4-3 y 4-4.

Jaramillo (2003) halló los porcentajes de los flujos de agua y capacidades de almacenamiento para las diferentes coberturas vegetales analizadas por Jaramillo y Chávez (1999) (Tabla 3-3). Los porcentajes se estimaron calculando los coeficientes de regresión lineal al relacionar cada componente hidrológico (Interceptación y lluvia efectiva) con la precipitación incidente o lluvia externa.

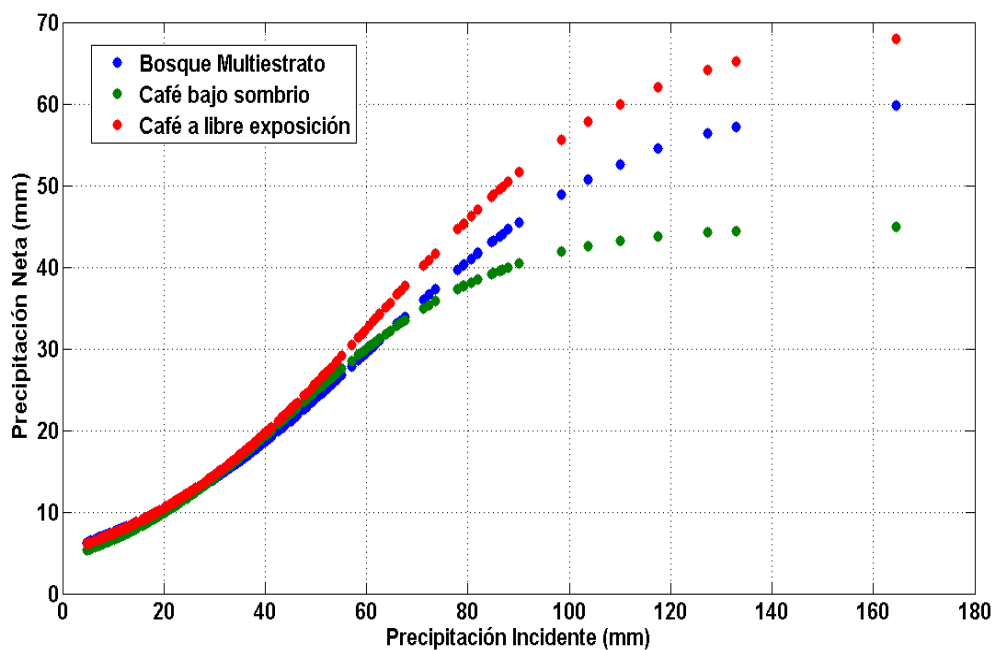
La capacidad de almacenamiento del follaje (Tabla 4-3), también conocida como la cantidad de agua necesaria para saturar el follaje antes de que se presente goteo, se estimó como el intercepto de la regresión lineal entre la cantidad de agua interceptada con la precipitación incidente para eventos individuales, siguiendo un procedimiento similar al propuesto por Rutter *et al* (1971).

**Tabla 4-3:** Flujos de agua (%) y capacidades de almacenamiento para diferentes coberturas vegetales en el eje cafetero (Colombia)

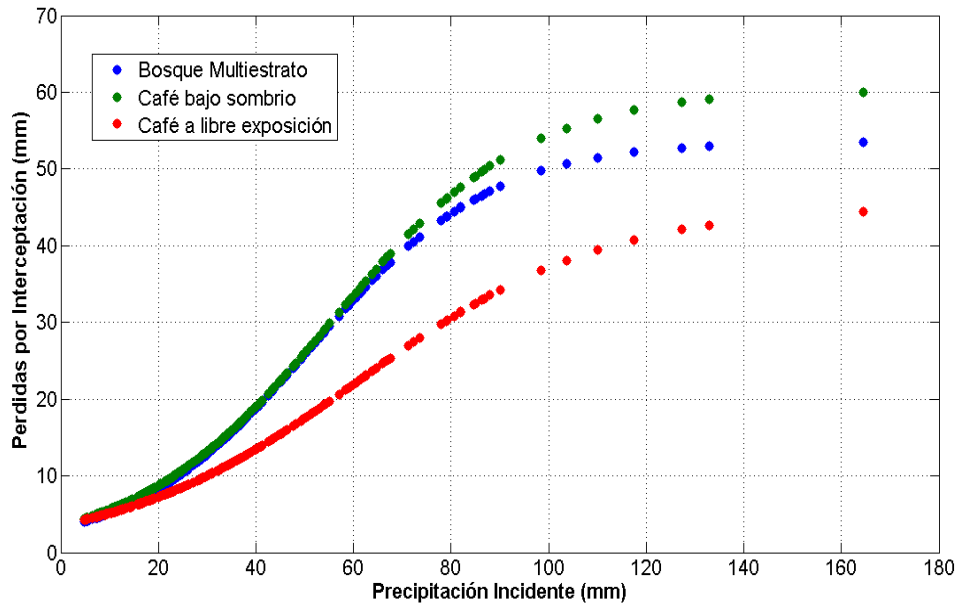
Cobertura	Interceptación (%)	Precipitación Neta (%)	S (mm)
Bosques	56	44	2.2
Café+Guamo (Sombrio)	58	42	0.9
Café libre exposición	46	54	0.3

Fuente: (Jaramillo, 2003)

**Figura 4-3:** Precipitación vs Precipitación neta según expresiones matemáticas de la Tabla 4-2



**Figura 4-4:** Precipitación vs Interceptación según expresiones matemáticas de la Tabla 4-2



Los valores de interceptación se explican por la alta densidad de siembra que existe para el cultivo de café, sumada a la asociación de árboles como sombrío, la cual generaría un efecto adicional a la interceptación (Jaramillo, 2003). Jaramillo (2003) habla del manejo de la interceptación en cuanto a las distancias de siembra, ya que si se tiene unas densidades muy altas, los valores de interceptación incrementarían, reduciendo la cantidad de agua disponible en el suelo.

Otro caso es el estudio realizado por Jaramillo & Velásquez (2009), titulado “Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia”, donde para café variedad Tabi a libre exposición solar (edad 3 años y distancia de siembra 1.5 x 2.5m), café variedad Tabi de 3 años y distancia de siembra 1.6 x 2.0m bajo sombrío de guamo (Inga Densiflora sembrado a 9 x 9m), pastizal (pasto estrella y braquiaria) y bosque, se midió la interceptación de la lluvia por la parte aérea de la vegetación y por el mantillo, la precipitación neta, la percolación y la tensión de la humedad en el suelo. Para cada cobertura se instalaron tres parcelas hidrológicas, cada una de 4 x 4m, efectuándose mediciones durante el periodo Octubre de 2007 a Junio de 2008.

Para el balance hídrico en el follaje de las coberturas vegetales estudiadas, se midió la lluvia externa o precipitación incidente mediante 4 pluviómetros de plástico ubicados en la parte externa de las parcelas. La precipitación neta se midió con dos pluviómetros por parcela, para un total de seis.

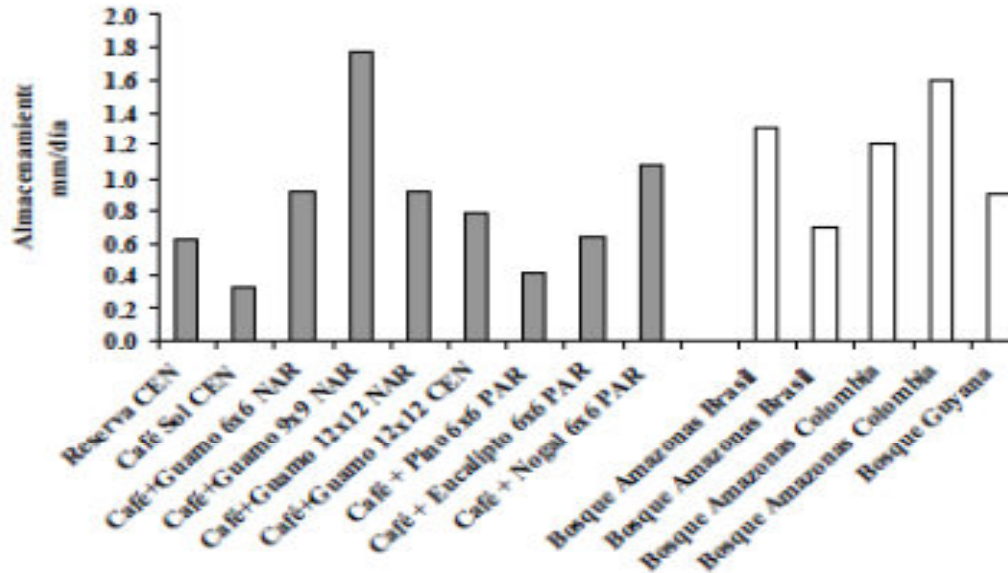
También se estimó el porcentaje de cobertura vegetal, mediante el análisis de fotografías digitales de cada uno de los lotes. Con estas fue posible obtener el Índice de Área Foliar y el porcentaje de cobertura. En el bosque y en los cafetales con sombrío se tomaron fotografías digitales a 25cm sobre el suelo bajo condiciones de radiación difusa.

Como resultado de esta investigación se obtuvo proporciones entre la precipitación neta y la precipitación incidente mediante regresiones lineales, con relaciones del 85.7% (14.3% de Interceptación) para café bajo sombrío, 92.1% en bosque (8% de Interceptación), 92.4% en café a libre exposición (7.6% de Interceptación) y 96.7% en pastizal (3.3% de Interceptación). Jaramillo & Velásquez (2009) explican que debido a que la medición de precipitación neta se realizó en pluviómetros muy cerca a la superficie de suelo pudo existir aportes por parte de hierbas terrestres en la zona superficial.

Jaramillo (2005) realizó un análisis de las capacidades de almacenamiento del cultivo de café bajo diferentes condiciones de sombrío, y para diferentes localidades del eje cafetero colombiano. Para los registros tomados como base para el balance hídrico en el agroecosistema del café estimó un valor promedio de  $0.83\text{mm dia}^{-1}$  con valores que varían entre  $0.33\text{mm dia}^{-1}$  para un cafetal a libre exposición y  $1.77\text{mm dia}^{-1}$  para un cafetal con cobertura de guamo sembrado a 6 x 6 metros. Estos valores se estimaron con el método propuesto por Rutter *et al* (1971) que relaciona la precipitación neta con la incidente. Otros valores de capacidad de almacenamiento se encuentran en la Figura 4-5.

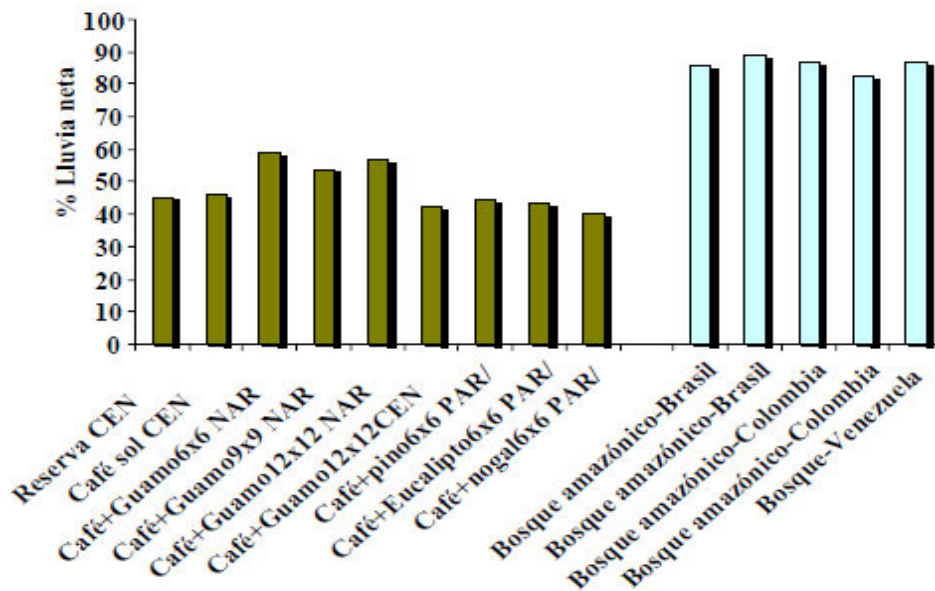
También reporta valores de precipitación neta (en porcentaje de la incidente) para diferentes coberturas de café (Figura 4-6). Debemos recordar que el porcentaje de interceptación está directamente relacionado con la lluvia neta, ya que se representa como la diferencia entre la precipitación indecente y la neta.

**Figura 4-5:** Almacenamiento de agua en la parte aérea en diferentes agroecosistemas de cafetales y comparación para valores reportados para otras estructuras vegetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR(Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).



Fuente: Jaramillo, 2005

**Figura 4-6:** Proporción de lluvia neta diaria en los diferentes agroecosistemas de cafetal y comparación para valores reportados para otras estructuras vegetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).



Fuente: Jaramillo, 2005

#### **4.1.2. La simulación del ciclo hidrológico en cobertura de bosque para la amazonia Colombiana**

Téllez (2003) investigó el proceso de interceptación en la Cuenca amazónica Colombiana, centrando sus mediciones en el área del medio Caquetá. Allí trabajo con 3 tipos de coberturas vegetales; uso agrícola, bosque secundario (5, 18 y 30 años de edad) y con bosque maduro. En estas coberturas se registró las variables hidrometeorológicas implícitas en el proceso de interceptación de lluvia, es decir, la precipitación, la evaporación desde coberturas vegetales, el flujo de translocación y el flujo cortical. También cuantificó la interceptación producida por el suelo forestal y la incluyo en el ciclo hidrológico. Por último, estudio el movimiento de agua modelando y cuantificando los flujos existentes en la zona no saturada. Para realizar el balance hídrico y estudio de flujos a través de las coberturas vegetales, trabajo tres módulos (follaje, suelo forestal y suelo) que le permitieron acoplar el complejo suelo-planta-atmósfera, y para cada uno de estos, diseño una herramienta computacional que permitiera la implementación de modelos matemáticos (validación, calibración y simulación).

Este autor utilizó el modelo Hidrobos, para realizar el acople del sistema. Este modelo lo utilizo previamente Tobón (1999) en un ecosistema de bosque maduro, encontrando que el modelo describe y predice con gran aproximación los procesos hidrológicos y los flujos de agua a través de cada uno de los compartimentos del bosque natural en la Amazonia colombiana (Téllez, 2003). Este modelo es capaz de simular gran cantidad de los procesos hidrológicos presentes en un bosque, como los son, la interceptación de lluvias, la evaporación del agua interceptada por el follaje, la hidrología de la capa de hojarasca o suelo forestal, los flujos de agua y absorción de agua por las raíces en la zona no saturada del suelo y la transpiración de la planta (Téllez, 2003). Para los fines de este trabajo de investigación, la revisión de esta investigación se centró en el proceso de interceptación que realiza la biomasa aérea.

En el proceso de simulación del sistema hidrológico analizado por Tellez (2003) se implementó el modelo de Rutter (1971, 1975), pero introdujo conceptos relacionados con las características de las coberturas vegetales analizadas (IAF).

El estudio realizado por Téllez (2003) se llevó a cabo en la región media del Caquetá, a un a altura de 150 m.s.n.m, con coordenadas aproximadas 0° 37' latitud S y 72° 23' y 70°

43' longitud W, con una vegetación característica de bosque húmedo tropical. El estudio fue desarrollado específicamente en la localidad Peña Roja (0° 37' a 0° 42' de latitud S y 72° 08' a 72° 05' de longitud W).

Climatológicamente ésta zona se caracteriza por una precipitación media anual de 3100mm, una temperatura media anual de 26°C y una humedad relativa media anual del 87%. Se presentan un comportamiento monomodal con periodo de baja pluviosidad desde el final de diciembre hasta el final de febrero y un periodo húmedo o de alta pluviosidad desde marzo hasta diciembre, existiendo una pequeña disminución en los valores de precipitación para agosto. Tellez (2003) seleccionó diferentes tipos de coberturas de bosques con la intención de comparar los flujos de agua en cada una de ellas. Trabajo entonces, sobre áreas de bosque maduro, rastrojo de 5 años, rastrojo de 15-18 años y rastrojo de 30 años, entendiéndose por rastrojo zonas donde se realizaron procesos de tumba y quema para destinar estas áreas a actividades de producción agrícola (Chagras) y que después de un tiempo se dejaron de explotar y naturalmente volvió a crecer vegetación de tipo boscosa. También analizó una Chagra, pero en ésta no se registraron valores de flujos internos por la arquitectura de la vegetación.

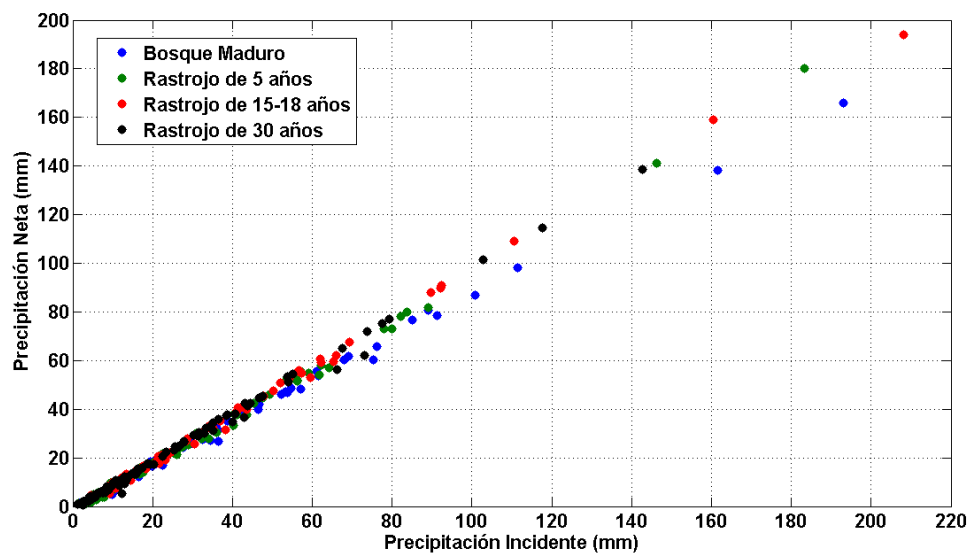
Para el registro de las variables inherentes al proceso de interceptación se instaló una estación meteorológica (junio 2001) en un área despejada a una distancia no mayor a 5 km de las parcelas experimentales. En la estación se registraron valores cada 20 minutos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, y evaporación. Esta estación estaba compuesta de un Datalogger, un pluviógrafo automático de resolución 0.2 mm, un sensor de velocidad del viento y un sensor de dirección del viento. También se registró la temperatura media del aire, temperatura máxima y mínima, con un termómetro de uso directo y un termómetro de máximas y mínimas. La humedad relativa se registró con un higrómetro de precisión. Estas lecturas se realizaban a las 7:00, 13:00 y 19:00, y se registraron del 27 de agosto 2001 al 20 de junio de 2002. El área promedio de las parcelas de experimentales fue de 1000 m<sup>2</sup>.

La precipitación incidente y el flujo de translocación o precipitación foliar se midieron de forma manual mediante tanques de polietileno de capacidad de 3 y 5 galones, unidos a embudos de 19.5 cm de diámetro. Los colectores de precipitación incidente se ubicaron sobre el follaje y los colectores de flujo de translocación se ubicaron de forma aleatoria en

las parcelas experimentales. En cada parcela ubicada en las diferentes coberturas vegetales se instalaron dos (2) pluviómetros y quince (15) colectores.

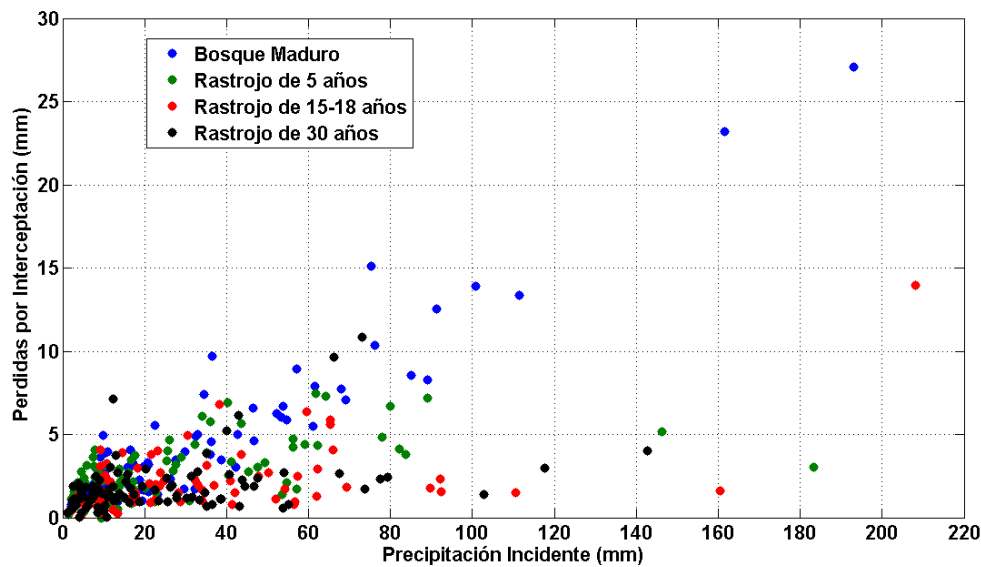
Para el flujo cortical o caolinar se seleccionaron 15 árboles con diferentes a características dasométricas como la altura de la copa, el diámetro del tronco, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la textura del tronco. A cada uno de estos se le instaló una manguera de polietileno o cinturón que conducía el agua a galones de 5 y 15 galones. También se realizaron 15 registros por parcela. Téllez (2003) registró estos flujos durante dos periodos; el primero del 18 del mayo al 12 de diciembre de 2001, y el segundo del 1 de mayo hasta el 19 de junio de 2002. Los flujos se midieron después del evento de lluvia con máximo 2 horas de posteridad. Téllez (2003) obtuvo entonces valores de precipitación, flujo libre de translocación, flujo cortical, y por ende de interceptación, para las 4 tipos de vegetación analizadas en su trabajo de investigación (Rastrojo de 5 años, de 15-18 años, de 30 años y bosque maduro). Es importante resaltar que los registros son valores promedio de las mediciones individuales obtenidas en los colectores y en los tanques donde se recolectaba el flujo cortical a nivel de parcela. Este valor promedio fue sometido a correcciones basándose en análisis estadísticos que permitieron la validación de la información registrada. Si se grafican los resultados de los registros de precipitación neta e interceptación contra la precipitación incidente, se obtienen las Figuras 4-7 y 4-8.

**Figura 4-7:** Precipitación Incidente vs Precipitación neta para diferentes tipos de cobertura vegetal



Fuente: Téllez (2003)

**Figura 4-8:** Precipitación Incidente vs Interceptación para diferentes tipos de cobertura vegetal



Fuente: Téllez (2003)

Téllez (2003) analizó las posibles relaciones lineales de la forma  $P_{Neta} = a + bP_{Incidente}$ , hallando sus parámetros y coeficientes de determinación (Tabla 4-4).

**Tabla 4-4:** Coeficientes de regresión lineal entre precipitación incidente y precipitación neta para diferentes coberturas

Tipo de Cobertura	Parámetro		Coefficiente de determinación
	b	a	$R^2$
Rastrojo 5 años	-1.91	0.944	0.997
Rastrojo 15-18 años	-1.13	0.966	0.998
Rastrojo 30 años	-1.37	0.969	0.996
Bosque Maduro	-0.49	0.87	0.997

Fuente: Téllez(2003)

También midió algunas características dasométricas en los diferentes tipos de cobertura vegetal analizados, como su altura, el diámetro a la altura del pecho (DAP, medido a 1.3m del suelo), el índice de área foliar (deducido de la ecuación de Lambert) y el coeficiente libre de Translocación, y su complemento el porcentaje de vacíos mediante método fotográfico (Tabla 4-5).

**Tabla 4-5** Características dasométricas de las coberturas vegetales analizadas

<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>H (m)</b>	<b>IAF</b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>c</i></b>
Rastrojo 5 años	12	10	4.2	0.129	0.871
Rastrojo 15-18 años	17	20	3.6	0.174	0.826
Bosque Maduro	31	25	5.6	0.118	0.882
Rastrojo 30 años	23	23	4	0.148	0.852

Fuente: Téllez(2003)

De las series registradas calculó los valores medios de cada variable hidrometeorológica y se los relacionó con la precipitación incidente, con la intención de tener un valor aproximado de interceptación y precipitación neta en porcentaje (Tabla 4-6).

**Tabla 4-6** Flujos de agua en volumen y porcentajes para 4 tipos de coberturas de Bosque

<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>P Incidente (mm)</b>	<b>TH (mm)</b>	<b>ST (mm)</b>	<b>P Neta (mm)</b>	<b>I (mm)</b>	<b>%P Neta</b>	<b>%I</b>
<b>Bosque Maduro</b>	32.1	27.4	0.17	27.57	4.53	85.89	14.11
<b>Rastrojo 30 años</b>	27.5	25.4	0.1	25.5	2.00	92.73	7.27
<b>Rastrojo 5 años</b>	29.2	25.6	0.6	26.2	3.00	89.73	10.27
<b>Rastrojo 15-18 años</b>	32.9	30.5	0.11	30.61	2.29	93.04	6.96

Fuente: Téllez (2003)

### 4.1.3. Discusión

De la revisión bibliográfica se encontró que los modelos de mayor relevancia y aplicación, son los denominados de las familias de Rutter (físicos) y de Gash (analíticos) y respecto las coberturas vegetales, las más estudiadas a nivel mundial son las coníferas, seguido por las selvas tropicales y los bosques caducifolios.

Respecto las investigaciones realizadas en Colombia en temas relacionados con la estimación de las pérdidas por interceptación, se han estudiado desde la década de los 80's hasta la actualidad, tres tipos de coberturas vegetales: bosque tropical húmedo, bosque de montaña y cultivo de café asociado a sombrío. En temas de modelación, Tobón *et al* (2000) y Téllez (2003) implementaron el modelo de Rutter *et al* (1971) con resultados consistentes, lo que indica que en el país se han desarrollado algunos ejercicios de modelación del proceso de interceptación.

De esta revisión se destacan las investigaciones donde se relaciona matemáticamente la precipitación incidente con la precipitación neta y las pérdidas por interceptación, siendo en principio una aproximación válida para conocer valores de referencia, pero si se desea conocer con mayor certeza el proceso de interceptación de lluvias, será necesario incluir modelos que tengan en cuenta la evaporación y ciertas características de la cobertura vegetal.

En los estudios realizados en el país se ha enfatizado en los efectos de la cobertura vegetal en los flujos que se presentan en los sistemas agroforestales, donde los resultados han servido como insumos para guiar a agricultores sobre cómo se deben establecer los sistemas productivos, recomendándose densidades óptimas de siembra por parte de los gremios.

Se debe resaltar entonces que el proceso de interceptación por coberturas vegetales no es totalmente desconocido para los investigadores en nuestro país, pero no se observa en esta revisión una difusión amplia del tema, estando concentrado en ciertos centros de investigación y universidades. A lo anterior se suma que no existe una metodología homogénea para el registro de las variables hidrometeorológicas necesarias para caracterizar el proceso, lo que puede inducir a errores de estimación e interpretación.

Respecto al uso de modelos matemáticos para el entendimiento de este proceso físico, se han hecho implementaciones puntuales, con resultados que han permitido acoplar todo el sistema suelo-planta-atmósfera, describiendo los flujos de agua en los diferentes compartimentos del ecosistema. Los análisis de los investigadores han sido más de naturaleza cualitativa soportado con estimaciones matemáticas sencillas, pero desligadas de la naturaleza de los procesos de precipitación (intensidad y duración), evaporación y de las características de las coberturas vegetales.

Lo anterior sustenta la hipótesis de la inexistencia de una metodología que guíe a los investigadores interesados en estudiar este proceso, en las etapas de medición y posterior modelación.

## **4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DINÁMICOS DE INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA: ESTUDIO DE CASO PARA COLOMBIA**

Se realizó una implementación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvias valiéndose de la base de datos obtenida por Téllez (2003) en su investigación.

Todos los procedimientos de calculo se programaron en la herramienta computacional MATLAB® (MathWorks), la cual es una herramienta de facil entendimiento, tiempos computacionales eficientes y posibilidad de obtener salidas gráficas.

### **4.2.1. Preparación de datos para modelación**

En la investigación de Téllez (2003) se contó con una estación automática próxima a las parcelas experimentales donde se hacia el registro continuo de precipitación, además de esto se tenía colectores sobre la cobertura vegetal para estimar la lluvia diaria.

Al comparar los valores registrados de precipitación en la estación automática con los medidos mediante los pluviómetros instalados sobre la cobertura de follaje, se observaron diferencias debido a la variabilidad espacial del proceso de precipitación. Para la implementación del modelo físicamente basado de Rutter Sparse (Valente *et al*, 1997) se debió desagregar la serie de precipitación a nivel horario ya que el fundamento de este modelo son ecuaciones diferenciales no lineales las cuales se alimentan progresivamente a traves del evento de precipitación.

Se implementaron dos técnicas para la desagregacion de las series: Reeescalamiento de datos medidos en estaciones meteorologicas cercanas y el modelo de pulsos rectangulares de Bartlett Lewis.

De la implementación de modelo Bartlett Lewis se estimaron los parámetros consignados en la Tabla 4-7.

**Tabla 4-7:** Resumen de estadísticos para la variable precipitación medida en el experimento Téllez (2003) en el periodos 2001-06 a 2002-01 y 2002-05 a 2002-06

Año-Mes	1				24				48			
	$\bar{X}$ (mm)	Var (mm <sup>2</sup> )	Covar (mm <sup>2</sup> )	% Seca	$\bar{X}$ (mm)	Var (mm <sup>2</sup> )	Covar (mm <sup>2</sup> )	% Seca	$\bar{X}$ (mm)	Var (mm <sup>2</sup> )	Covar (mm <sup>2</sup> )	% Seca
2001-06	0.44	4.52	1.12	0.82	10.45	191.13	93.31	0.17	20.89	513.38	23.49	0.00
2001-07	0.50	7.23	3.24	0.86	11.94	435.31	72.46	0.13	23.14	934.60	-53.91	0.00
2001-08	0.09	1.24	0.24	0.97	2.22	49.48	0.63	0.74	4.30	111.07	29.79	0.69
2001-09	0.26	2.00	1.14	0.86	6.27	120.15	-0.97	0.30	12.55	221.43	-12.01	0.07
2001-10	0.27	3.11	1.28	0.87	6.57	163.03	-16.95	0.29	12.72	261.78	-13.69	0.06
2001-11	0.24	2.32	0.28	0.86	5.66	88.42	22.94	0.13	11.32	278.29	-44.91	0.00
2001-12	0.43	5.08	3.37	0.82	10.26	661.72	-8.19	0.13	19.88	1437.7	134.4	0.13
2002-01	0.36	5.69	1.32	0.84	8.59	179.73	62.84	0.19	16.65	452.59	238.1	0.13
2002-05	0.61	7.15	3.22	0.73	14.61	488.89	116.07	0.00	28.30	705.94	-85.67	0.00
2002-06	0.27	1.80	0.50	0.86	6.50	110.39	-7.15	0.32	12.49	213.77	39.99	0.15

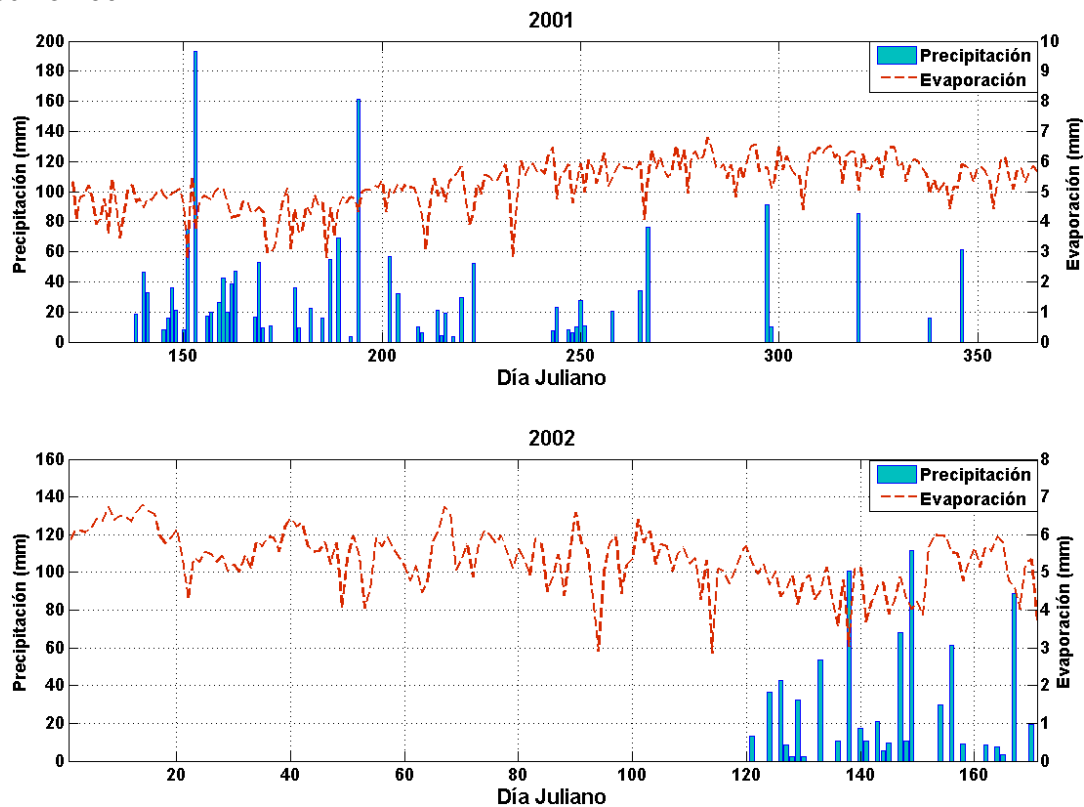
La calibración de los parámetros óptimos del modelo de Bartlett Lewis con la ayuda del complemento de Excel guarda la estructura estadística y memoria del proceso. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8:** Parámetros Calibrados para el modelo de Bartlett Lewis, caso Téllez (2003)

Año -Mes	$\lambda$ d <sup>-1</sup>	$\kappa = \beta/\eta$ (-)	$\varphi = \gamma/\eta$ (-)	$\alpha$ (-)	$\nu$ d	$\mu_X$ mm d <sup>-1</sup>	$\sigma_X$ mm d <sup>-1</sup>
2001-06	3.38113082	0.00682087	0.01000	99	1.966181	99.0	99.0
2001-07	4.50042031	0.00000010	0.66719	99	2.730452	99.0	99.0
2001-08	0.21444171	5.90807393	0.14292	99	0.239325	99.0	99.0
2001-09	1.23859017	13.14902302	0.26598	99	0.100009	99.0	99.0
2001-10	1.11941696	3.60407352	1.49001	99	1.738046	99.0	99.0
2001-11	0.87085314	23.35368121	2.54861	99	0.633154	99.0	99.0
2001-12	0.87500463	10.30786394	0.94901	99	1.135424	84.3	84.3
2002-01	0.82736171	9.06084531	1.02978	99	1.043777	99.0	99.0
2002-05	1.40525017	24.36396591	6.97305	99	2.264607	99.0	99.0
2002-06	1.36551081	23.26340800	10.46112	99	1.441017	99.0	99.0

Ya con los parámetros calibrados a nivel mensual se procedió a implementar el modelo de pulsos rectangulares bajo el Modo operacional (con entrada diaria) en la herramienta HYETOS. En la Figura 4-9 se presentan los valores calculados de evaporación potencial calculados con la ecuación de Penman Monteith y la serie de precipitación registrada en el experimento objeto de desagregación.

**Figura 4-9:** Evaporación Potencial y precipitación incidente desde 01 de Mayo 2000 a 20 de Junio 2001



#### 4.2.2. Registro de flujos de agua en bosque maduro

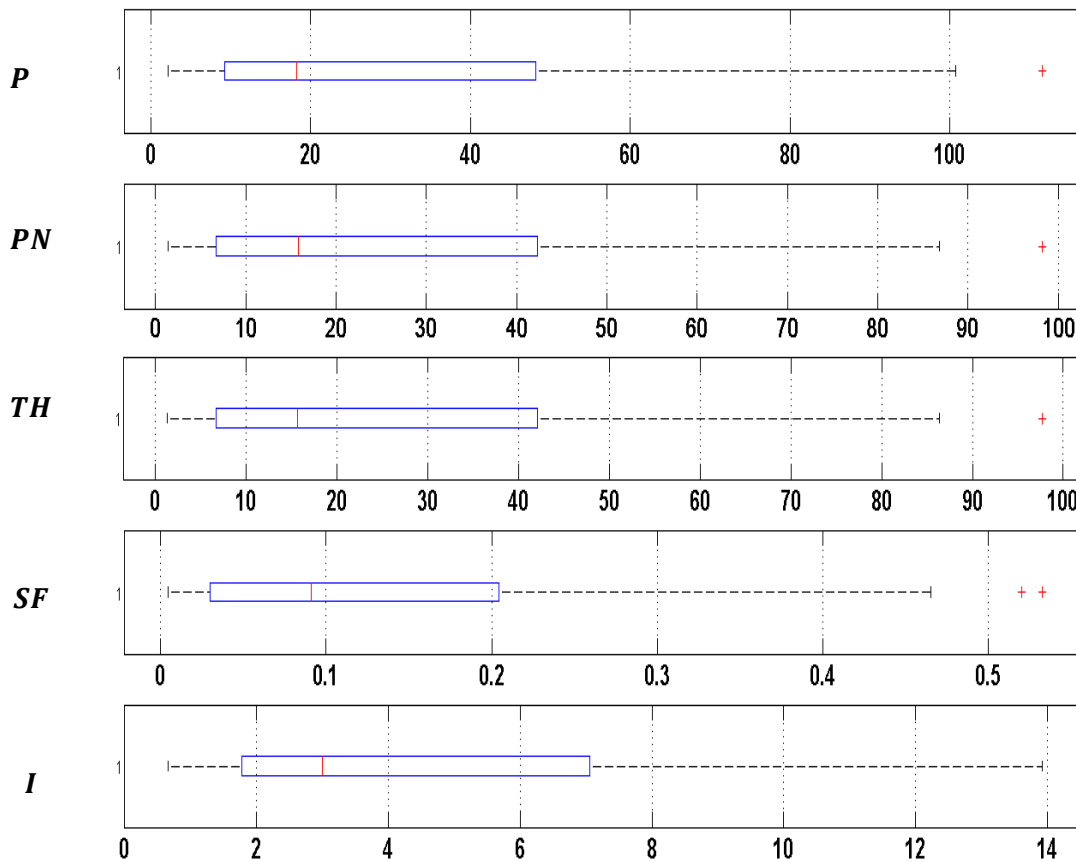
En la Tabla 4-9 se observa un resumen de la estadística descriptiva para los diferentes componentes de los flujos de agua del proceso físico de interceptación de lluvias por coberturas vegetales. La precipitación neta se obtiene como la suma del flujo de translocación y el cortical y las pérdidas por interceptación son la diferencia entre la precipitación incidente y la neta.

**Tabla 4-9:** Descriptivos estadísticos para flujos de precipitación, flujo de translocación, flujo cortical, precipitación neta y pérdidas por interceptación bosque maduro

Estadístico	$P(mm)$	$TH(mm)$	$SF(mm)$	$PN(mm) = TH + ST$	$I(mm)$
<b>Suma</b>	2637	2255.4	13.5	2268.9	368.1
<b>%P Incidente</b>	100	85.5	0.51	86.0	14.0
<b>Media</b>	33.0	28.2	0.2	28.4	4.6
<b>Desviación Estándar</b>	34.7	30.2	0.2	30.4	4.6
<b>Máximo</b>	193.1	165.4	0.7	166.0	27.1
<b>Mínimo</b>	2.1	1.3	0.0	1.3	0.7
<b>Rango</b>	191.0	164.0	0.7	164.7	26.4
<b>C.V (%)</b>	171.78	172.57	200	172.73	148.39

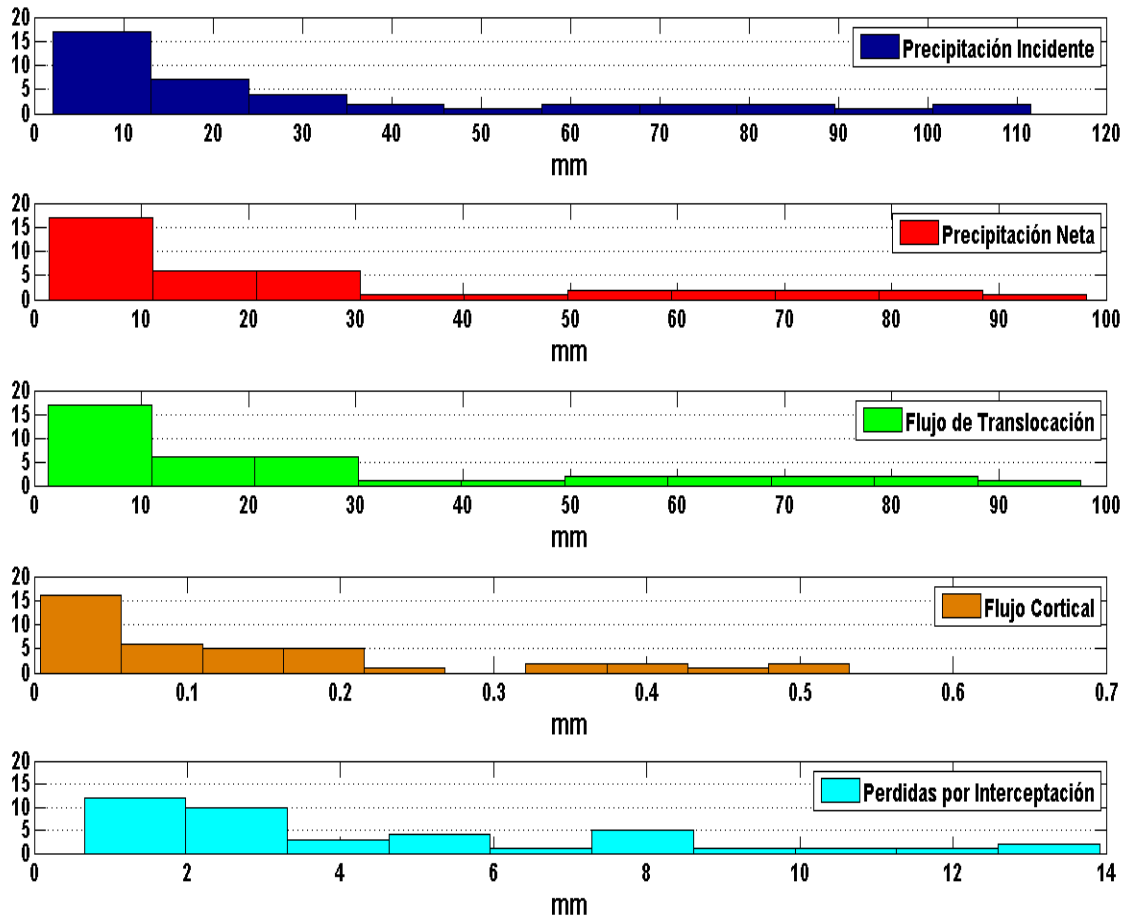
Se construyeron diagramas de cajas y patillas (BOX-PLOT) con la intención de identificar la tendencia de los registros y posibles datos atípicos. (Figura 4-10)

**Figura 4-10:** Diagramas BOX-PLOT para los flujos de precipitación incidente, precipitación neta, flujo de translocación, flujo cortical y pérdidas por interceptación



Para estudiar la distribución de frecuencias en los registros de flujos de agua se construyeron histogramas (Figura 4-11).

**Figura 4-11:** Histograma de frecuencias para los flujos de precipitación incidente, precipitación neta, flujo de translocación, flujo cortical y pérdidas por interceptación

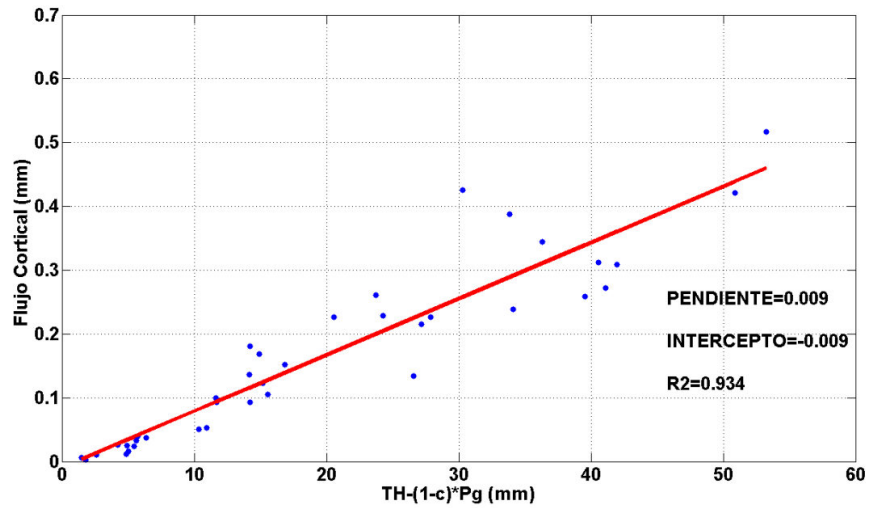


#### 4.2.3. Estimación de parámetros de forma gráfica

Para realizar la implementación de los modelos de interceptación de lluvia se estimaron los parámetros ( $S$ ,  $S_t$  y  $p_d$ ) implícitos en la estructura matemática de los mismos. Estos parámetros se estimaron con el primer 50% de los registros. El periodo analizado para la estimación de dicho parámetros fue desde el 18 de mayo hasta el 31 de agosto de 2001.

Se realizó una regresión lineal para valores de precipitación menores de 60mm, donde el almacenamiento en los troncos se diera de manera gradual y las pérdidas por interceptación desde esta estructura no afectarían el supuesto comportamiento lineal del flujo cortical (Figura 4-12).

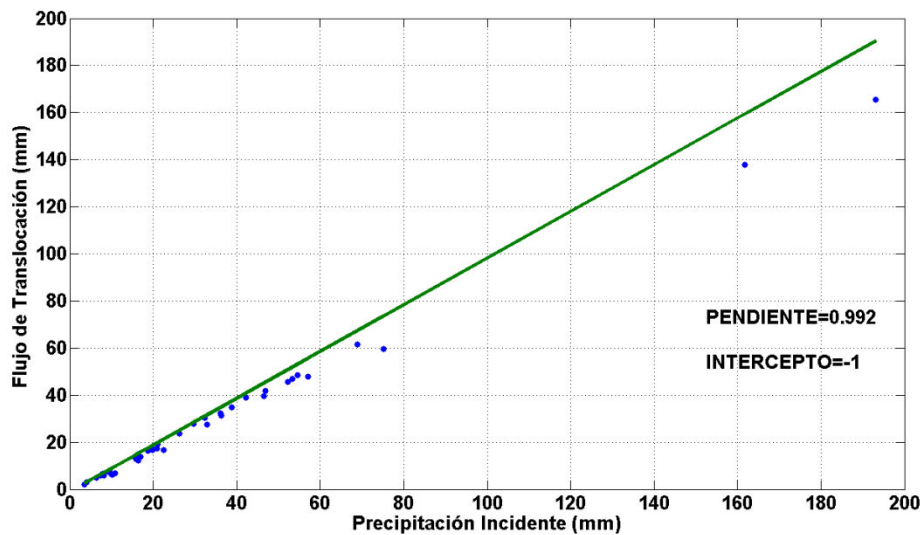
**Figura 4-12:** Estimación de parámetros  $S_t$  y  $p_d$  mediante regresión lineal



De esta gráfica se halló la capacidad de almacenamiento de los troncos ( $S_t$ ) de -0.009 y un coeficiente de partición de drenaje ( $p_d$ ) de 0.009, el cual representa la fracción de agua que gotea desde las hojas hacia las ramas y el tronco, es decir el 0.9% del agua que gotea desde el follaje es reinterceptada por las ramas, el resto llega al suelo como drenaje.

Con una pendiente preestablecida de 0.992, se graficó la precipitación incidente ( $P_G$ ) contra el flujo de translocación ( $TH$ ) y se halló el intercepto (Figura 4-13).

**Figura 4-13:** Estimación del parámetro  $S$  mediante regresión lineal



Con el intercepto de -1 se halló una capacidad de almacenamiento ( $S$ ) de 1.01mm.

Los parámetros hallados con el método gráfico se consignan en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10:** Resumen de parámetros hallados gráficamente

$p$	$c$	$S$	$S_t$	$p_d$	$\varepsilon$
0.118	0.882	1.01	0.0092	0.0089	0.03

El parámetro  $\varepsilon$ , que relaciona la evaporación desde los troncos con la que sucede desde el follaje se mueve en el rango de 0.01-0.05, el cual fue hallado experimentalmente y que para coberturas boscosas se reporta un valor apropiado para utilizar en modelación de 0.03 (Rutter *et al*, 1971).

#### 4.2.4. Solución del problema inverso de calibración

Se calibraron los parámetros utilizando la técnica de simulaciones de Montecarlo para los modelos dinámicos de interceptación de lluvia para la cobertura de bosque maduro en la cuenca del Caquetá.

Es importante recordar que en la calibración de los modelos analizados se tuvo como función objetivo la minimización de la diferencia de los valores registrados con los simulados para la variable precipitación neta ( $PN$ ), la cual es de vital interés en los modelos de precipitación-escorrentía, y condiciona directamente otros procesos como la infiltración y en consecuencia los flujos subsuperficiales.

#### Análisis mediante MCAT TOOL

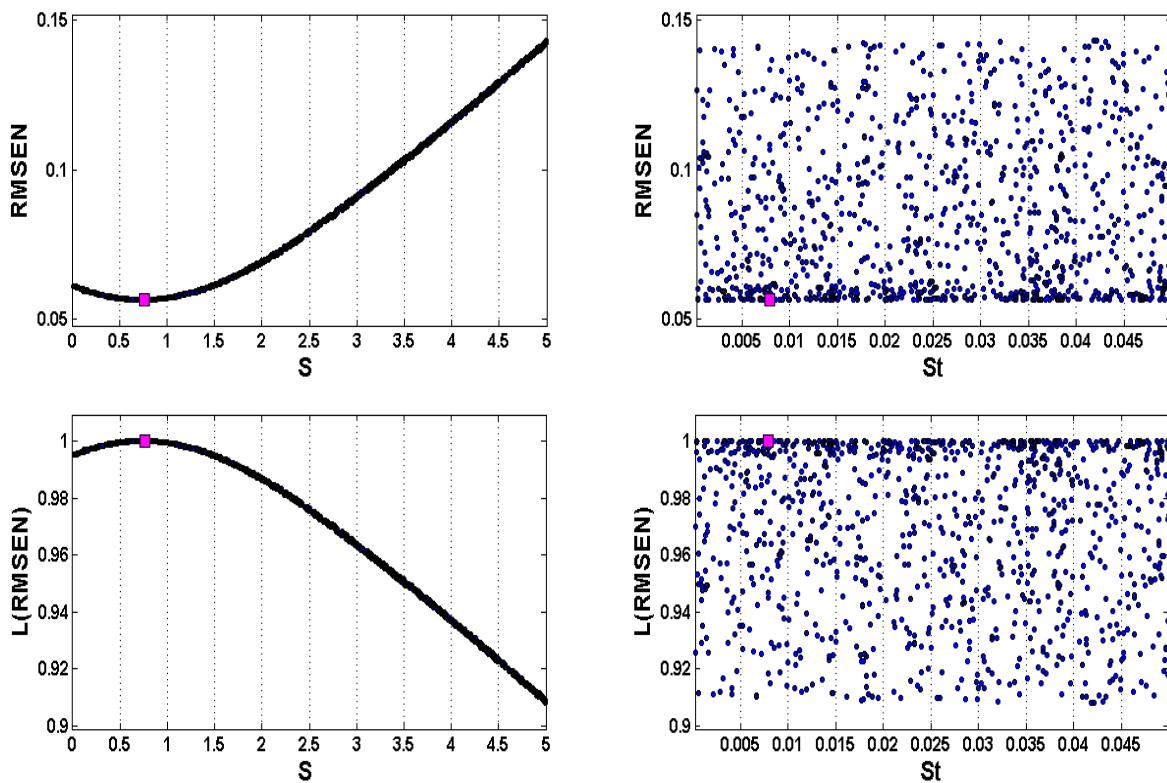
Mediante la herramienta MCAT TOOL se listaron las diez combinaciones de parámetros que minimizaran de la mejor manera la función objetivo (Tabla 4-11). Esta función objetivo relaciona los valores de precipitación neta observados con los simulados.

Se graficaron las simulaciones realizadas con el método de Montecarlo contra la función objetivo a minimizar y su transformada en función de verosimilitud (Figura 4-14).

**Tabla 4-11:** Mejores 10 combinaciones de parámetros para cobertura bosque maduro

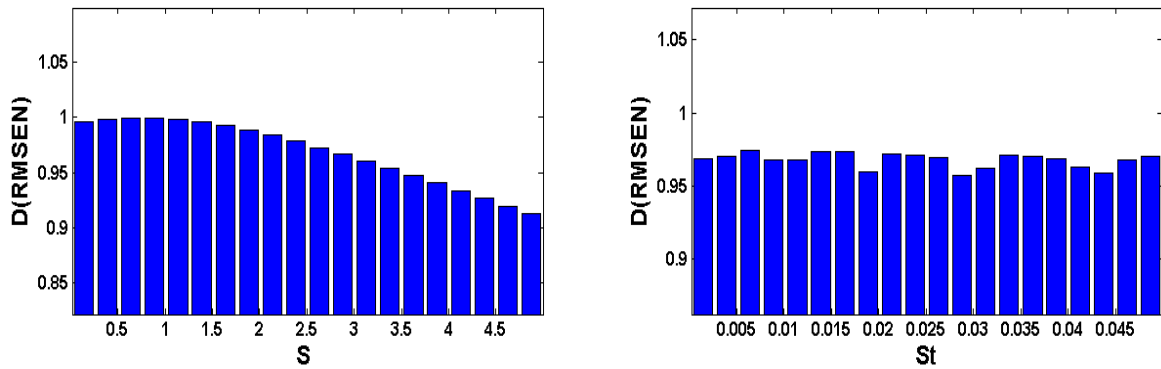
	$S$ (mm)	$S_t$ (mm)	$RMSE - N$
<b>1</b>	0.7598	0.0079	0.05659024
<b>2</b>	0.7501	0.0171	0.05659025
<b>3</b>	0.7445	0.0230	0.05659029
<b>4</b>	0.7587	0.0099	0.05659029
<b>5</b>	0.7193	0.0467	0.05659031
<b>6</b>	0.7439	0.0291	0.05659092
<b>7</b>	0.7682	0.0089	0.05659137
<b>8</b>	0.7759	0.0033	0.05659174
<b>9</b>	0.7792	0.0032	0.05659256
<b>10</b>	0.7786	0.0052	0.05659302

Figura 4-14: Dotty y Likelihood Plot para parámetros  $S$  y  $S_t$



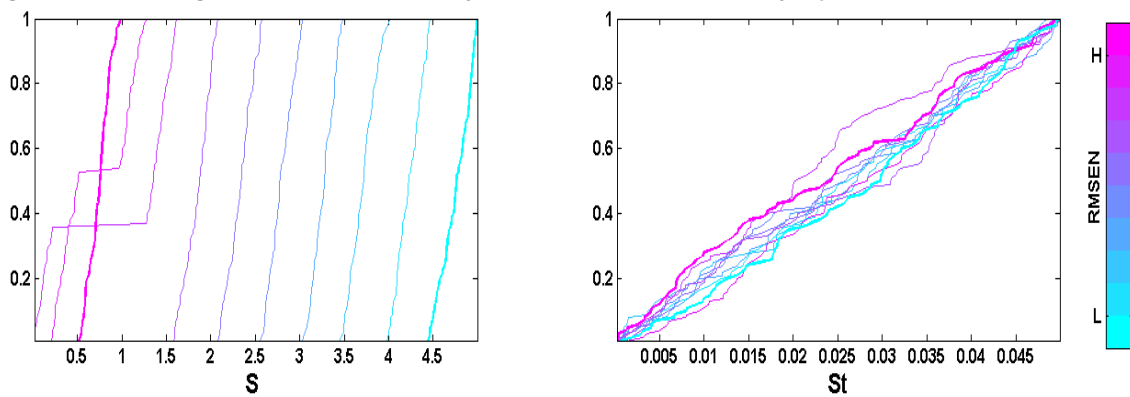
La distribución de probabilidad del parámetro condicionado por la verosimilitud calculada de la función objetivo se presenta en la Figura 4-15.

Figura 4-15: A posteriori distribution para parámetros  $S$  y  $S_t$



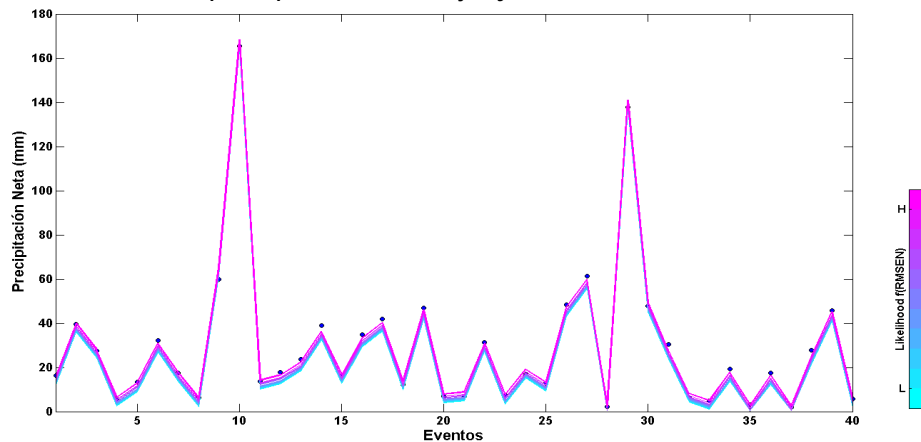
En la Figura 4-16 se presenta el análisis de sensibilidad regional para los parámetros estudiados.

Figura 4-16: Regional Sensitive Analysis para parámetros  $S$  y  $S_t$



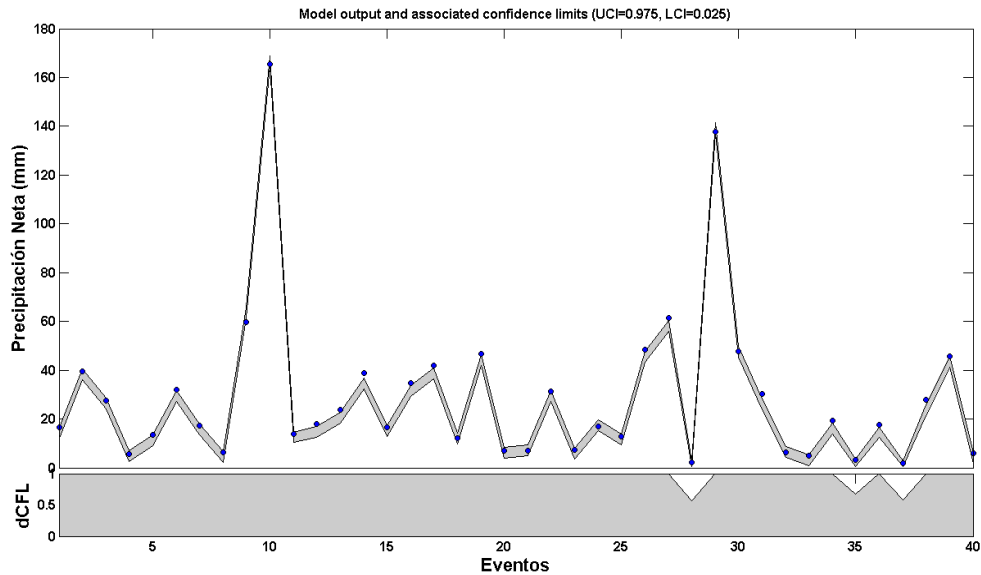
En la Figura 4-17 se observa la salida gráfica CLASS PLOT de la herramienta MCAT. El color es de acuerdo a la verosimilitud de cada grupo de parámetros.

Figura 4-17: Class Plot para parámetros  $S$  y  $S_t$



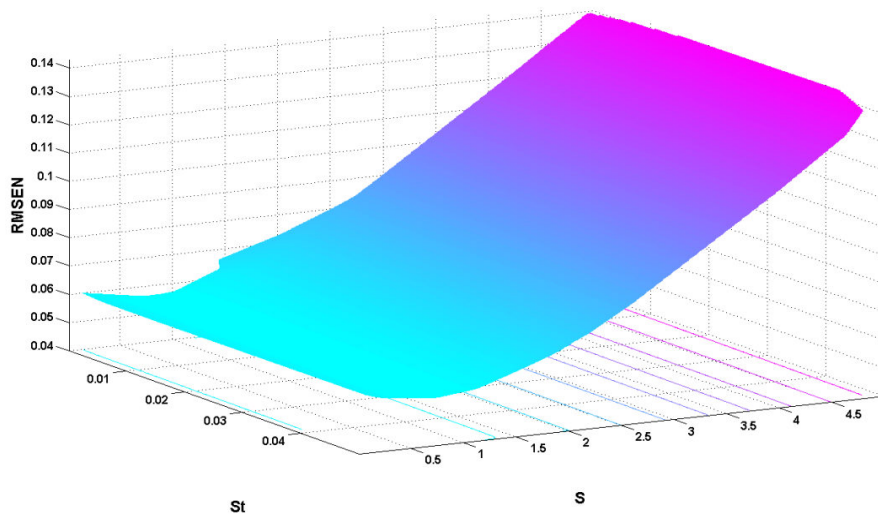
La herramienta MCAT también permite generar salidas gráficas donde se presenten las bandas de incertidumbre para las simulaciones generadas en la etapa de calibración mediante simulaciones de Montecarlo (Figura 4-18).

Figura 4-18: GLUE Output Uncertainty para parámetros  $S$  y  $S_t$



Con MCAT se generaron superficies del espacio paramétrico, donde se pudo estudiar la interacción de los parámetros con la función objetivo y entre ellos. Esta salida gráfica se conoce como Parameter View, y se muestra en la Figura 4-19.

Figura 4-19: Parameter View para parámetros  $S$  y  $S_t$



#### 4.2.5. Validación de modelos de interceptación de lluvias

Se estimaron los estadísticos de la Tabla 3-3, relacionando los valores observados y simulados para cada variable hidrológica. Los resultados se consignan en la Tabla 4-12.

**Tabla 4-12:** Relaciones estadísticas entre valores observados y simulados

ESTADÍSTICO	ESCENARIO	<i>PN</i>	<i>TH</i>	<i>SF</i>	<i>I</i>
<b>MAE</b>	<b>RS</b>	1.618	1.606	0.051	1.618
	<b>GS</b>	1.280	1.319	0.058	1.280
	<b>RSC</b>	1.488	1.473	0.050	1.488
	<b>GSC</b>	1.189	1.227	0.060	1.189
<b>MAXE</b>	<b>RS</b>	7.192	7.186	0.332	7.192
	<b>GS</b>	4.379	4.490	0.352	4.379
	<b>RSC</b>	6.780	6.773	0.329	6.780
	<b>GSC</b>	4.199	4.262	0.355	4.199
<b>RMSE</b>	<b>RS</b>	2.115	2.101	0.083	2.115
	<b>GS</b>	1.715	1.757	0.099	1.715
	<b>RSC</b>	1.994	1.982	0.082	1.994
	<b>GSC</b>	1.638	1.677	0.101	1.638
<b>RMSE-N</b>	<b>RS</b>	0.078	0.078	0.567	0.477
	<b>GS</b>	0.063	0.065	0.677	0.387
	<b>RSC</b>	0.073	0.073	0.557	0.450
	<b>GSC</b>	0.060	0.062	0.689	0.370
<b>NASH-SUTCLIFFE</b>	<b>RS</b>	0.994	0.994	0.694	0.667
	<b>GS</b>	0.996	0.996	0.564	0.781
	<b>RSC</b>	0.995	0.995	0.705	0.704
	<b>GSC</b>	0.996	0.996	0.549	0.800

Las comparaciones entre modelos y medidas de validación se encuentran en la Tabla 4-13 donde se presenta como punto de referencia la precipitación incidente total registrada (1265.7mm) para los 40 eventos de validación de los modelos.

**Tabla 4-13:** Comparación de comportamiento de modelos dinámicos de interceptación de lluvia bajo diferentes escenarios

VARIABLE	ESCENARIO	$\frac{P \text{ Incidente}}{\text{Variable}} * 100$ (%)	Total (mm)	DIF. (mm)
PN	EXPERIMENTO	86.0	1088.2	-
	RUTTER SPARSE (RS)	83.5	1056.4	-31.8
	GASH SPARSE (GS)	83.9	1061.5	-26.7
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	84.0	1063.6	-24.6
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	84.6	1070.8	-17.4
TH	EXPERIMENTO	85.5	1082.3	-
	RUTTER SPARSE (RS)	83.0	1050.0	-32.3
	GASH SPARSE (GS)	83.3	1053.8	-28.6
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	83.5	1057.2	-25.1
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	84.0	1062.9	-19.4
SF	EXPERIMENTO	0.5	5.9	-
	RUTTER SPARSE (RS)	0.5	6.3	0.5
	GASH SPARSE (GS)	0.6	7.8	1.9
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	0.5	6.3	0.5
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	0.6	7.9	2.0
I	EXPERIMENTO	14.0	177.3	-
	RUTTER SPARSE (RS)	16.5	209.1	31.8
	GASH SPARSE (GS)	16.1	204.0	26.7
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	16.0	201.9	24.6
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	15.4	194.7	17.4

$P \text{ Incidente} = 1265.47\text{mm}$

En la primera columna se presenta la variable hidrológica analizada, seguido por el escenario o modelo aplicado para su estimación. Se continúa con la columna de porcentaje de precipitación incidente, que expresa el porcentaje de la variable analizada respecto la precipitación incidente acumulada. La cuarta columna es la sumatoria de las variables para el periodo de análisis de validación de los modelos. La siguiente columna expresa la diferencia entre los valores simulados con los registrados en el experimento para cada uno de los modelos implementados.

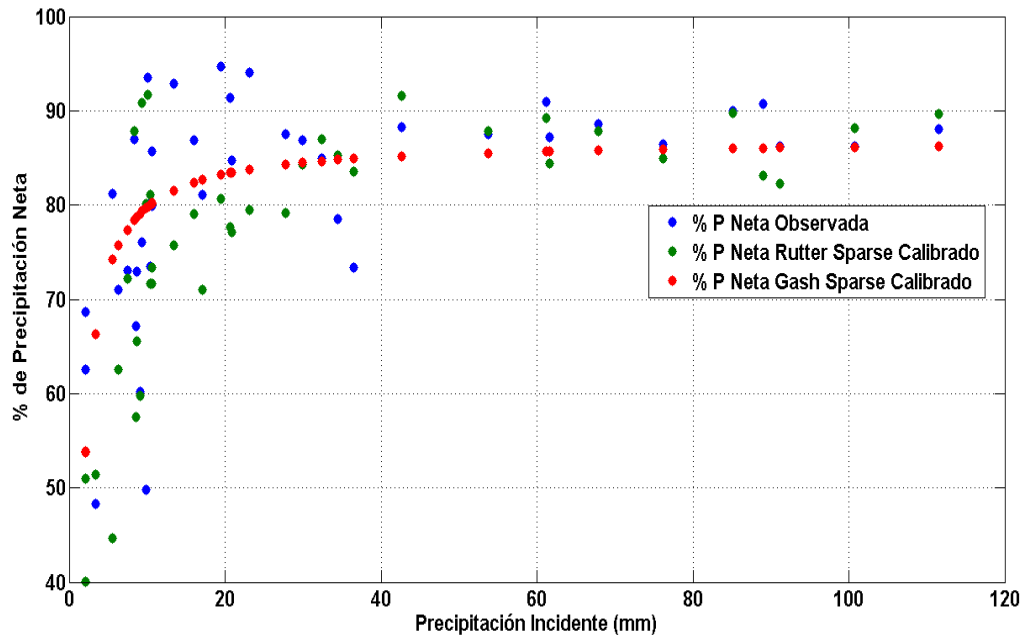
De manera complementaria a la validación de los modelos, se estudiaron las proporciones de cada variable respecto la precipitación incidente (Tabla 4-14).

**Tabla 4-14:** Estadísticos representación porcentual de las variables hidrológicas en función de la precipitación incidente

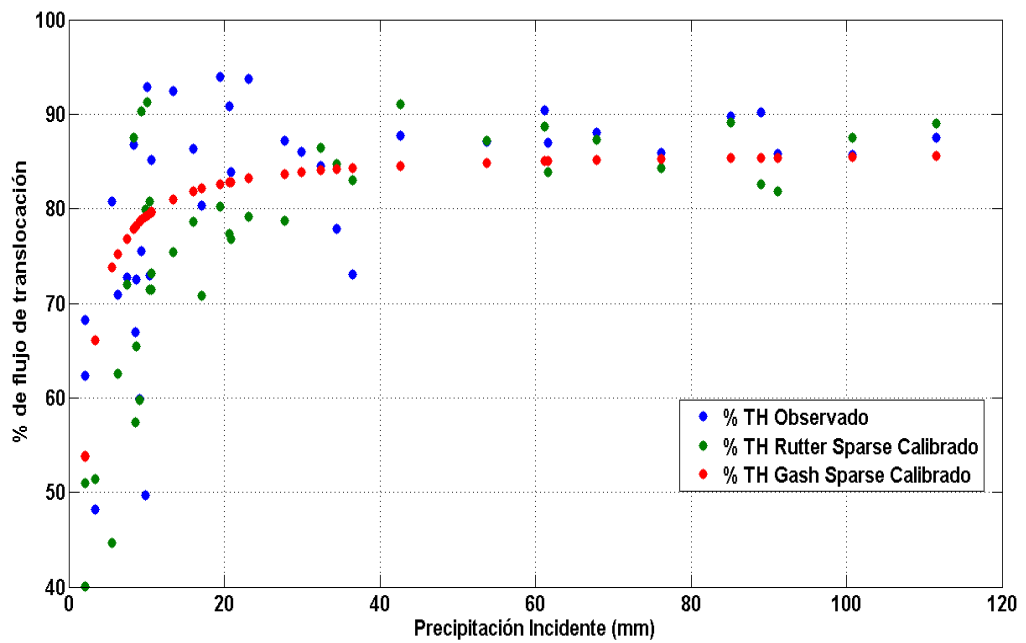
VARIABLE	ESCENARIO	Media (%)	Desviación Estándar	Máxima (%)	Mínima (%)
<i>PN</i>	EXPERIMENTO	80.9	11.4	94.66	48.22
	RUTTER SPARSE (RS)	74.6	15.6	91.38	28.55
	GASH SPARSE (GS)	78.5	9.9	86.01	43.00
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	76.8	13.4	91.75	40.12
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	80.6	7.4	86.22	53.82
<i>TH</i>	EXPERIMENTO	80.5	11.3	93.94	48.10
	RUTTER SPARSE (RS)	74.3	15.4	90.75	28.55
	GASH SPARSE (GS)	78.0	9.7	85.36	43.15
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	76.4	13.2	91.29	40.12
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	80.0	7.3	85.56	53.81
<i>SF</i>	EXPERIMENTO	0.4	0.2	0.85	0.12
	RUTTER SPARSE (RS)	0.3	0.2	0.65	0.00
	GASH SPARSE (GS)	0.5	0.2	0.65	0.00
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	0.3	0.2	0.65	0.00
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	0.5	0.1	0.66	0.01
<i>I</i>	EXPERIMENTO	19.1	11.4	51.78	5.34
	RUTTER SPARSE (RS)	25.4	15.6	71.57	8.61
	GASH SPARSE (GS)	21.5	9.9	57.15	13.99
	RUTTER SPARSE CALIBRADO (RSC)	23.2	13.4	60.00	8.28
	GASH SPARSE CALIBRADO (GSC)	19.4	7.4	46.18	13.78

Las salidas porcentuales de precipitación neta, flujo de translocación, flujo cortical y pérdidas por interceptación respecto la precipitación incidente se observan en las Figura 4-20, 4-21, 4-22 y 4-23, respectivamente.

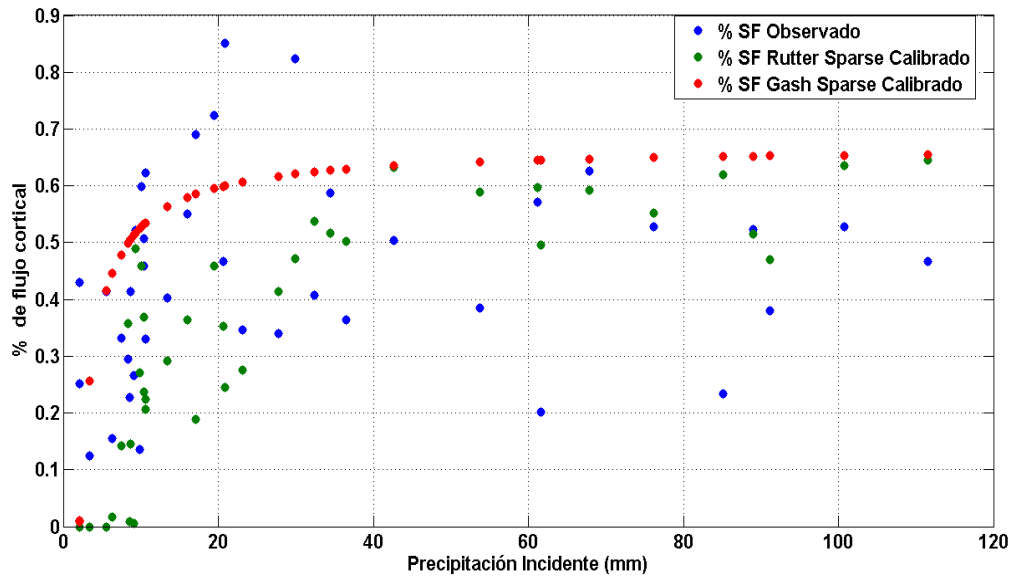
**Figura 4-20:** Porcentaje de precipitación neta en función de la precipitación incidente



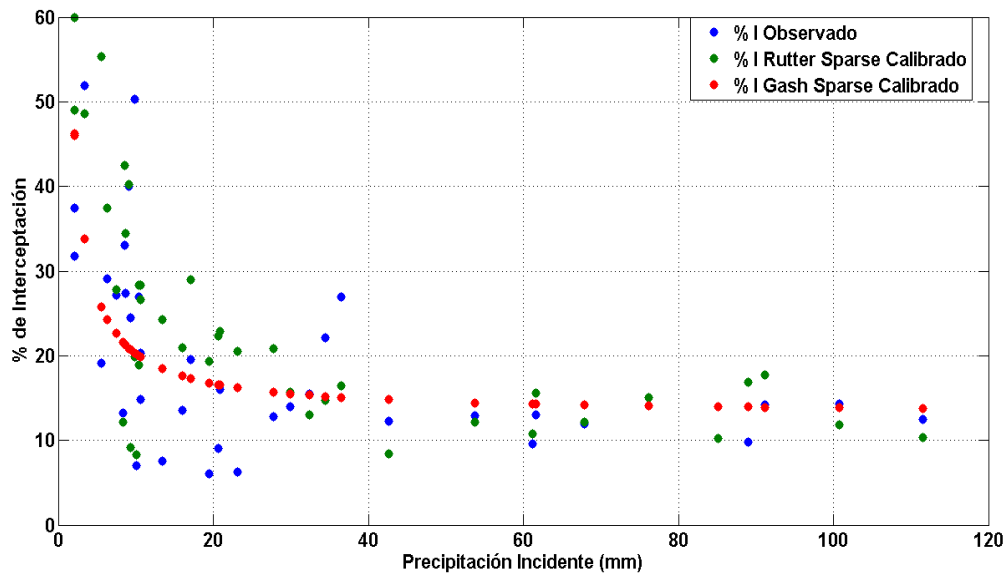
**Figura 4-21:** Porcentaje de flujo de translocación ( $TH$ ) en función de la precipitación incidente



**Figura 4-22:** Porcentaje de Flujo Cortical (*SF*) en función de la precipitación incidente



**Figura 4-23:** Porcentaje de pérdidas por interceptación en función de la precipitación incidente



Teniendo en cuenta los resultados de la validación y comparación entre los modelos de interceptación de lluvia que fueron implementados, se decidió representar gráficamente aquellos que fueron más consistentes en sus resultados y representaron de una mejor manera las variables implícitas en este proceso.

A continuación se presentan los resultados gráficos de la validación de los modelos **RSC** y **GSC**.

### Análisis gráfico de la etapa de validación

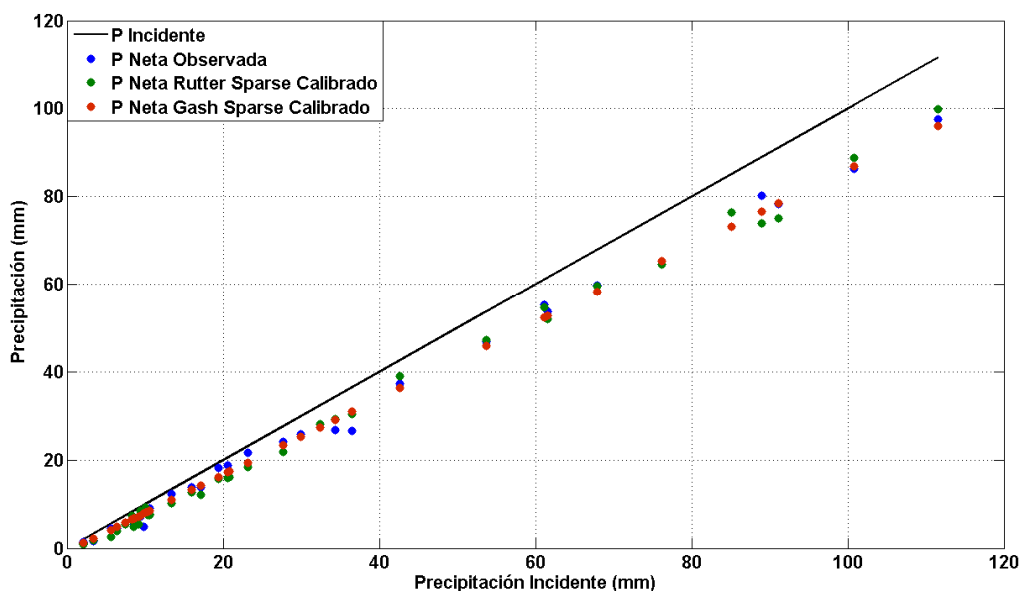
Se continuó la validación de los resultados de la implementación de los modelos construyendo regresiones lineales entre los valores observados y simulados para las diferentes variables hidrológicas implícitas (Tabla 4-15).

**Tabla 4-15: Coeficientes de regresión lineal entre valores observados y simulados para modelos de interceptación de lluvias**

Variable	Escenario	Pendiente	Intercepto	Coefficiente de determinación ( $R^2$ )
PN	RSC	1.002	0.559	0.998
	GSC	1.025	-0.228	0.999
TH	RSC	1.004	0.518	0.998
	GSC	1.027	-0.244	0.999
SF	RSC	0.713	0.033	0.921
	GSC	0.678	0.013	0.926
I	RSC	0.845	0.166	0.870
	GSC	0.836	0.361	0.920

Se graficó la precipitación neta en función de la precipitación incidente, para los diferentes eventos registrados en la etapa de validación (Figura 4-24).

Figura 4-24: Precipitación Incidente vs precipitación neta

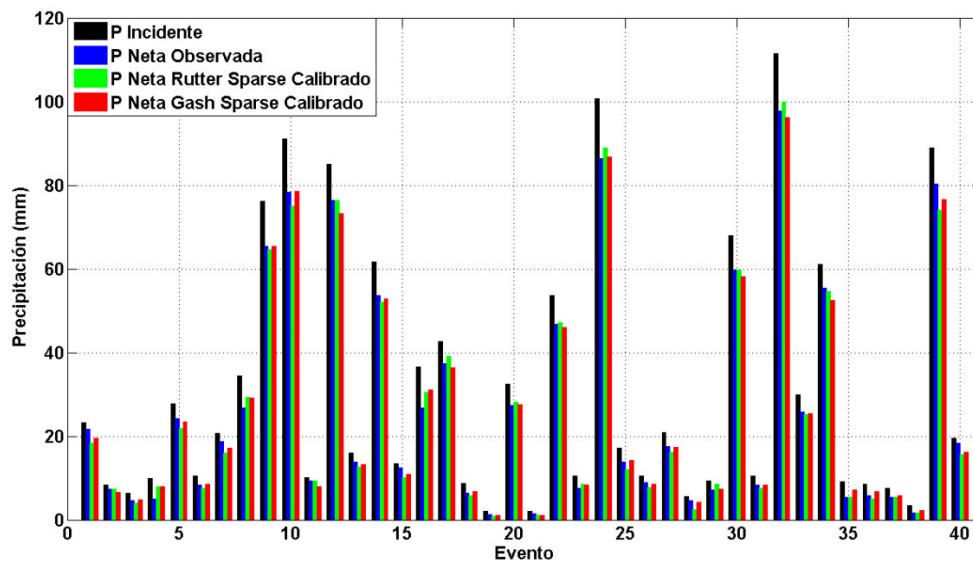


La línea continua de color **Negro** representa la precipitación incidente para el escenario donde no existe ningún tipo de estructura que evite el paso de las gotas de lluvia

directamente al suelo. Los puntos color **Azul**, **Verde** y **Rojo**, representan respectivamente los valores registrados en el experimento, los simulados por **RSC** y los simulados por **GSC**. Con estos colores se identificarán dichas salidas en el resto de esta sección. La distancia vertical entre la línea negra (precipitación incidente) y los diferentes puntos, son las pérdidas por interceptación, o el amortiguamiento que realizan las coberturas vegetales en las cuencas hidrográficas. Se observa una relación directa positiva entre la precipitación incidente y la neta.

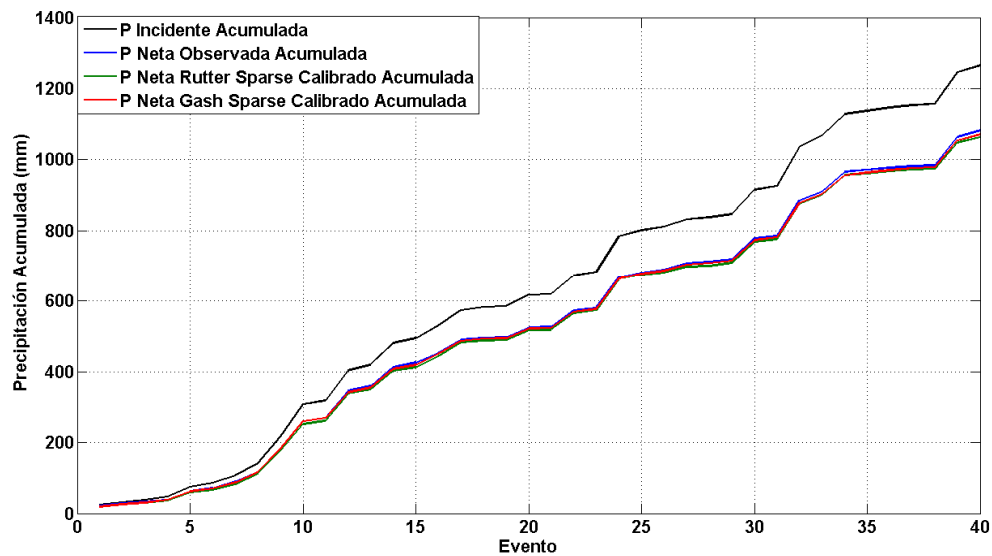
Se analizó el comportamiento de los modelos respecto la tormenta registrada en los experimentos (Figura 4-25). Se observa en esta figura la precipitación incidente, la neta y la salida de los modelos validados.

**Figura 4-25:** Precipitación Neta por eventos de tormenta utilizados para validación



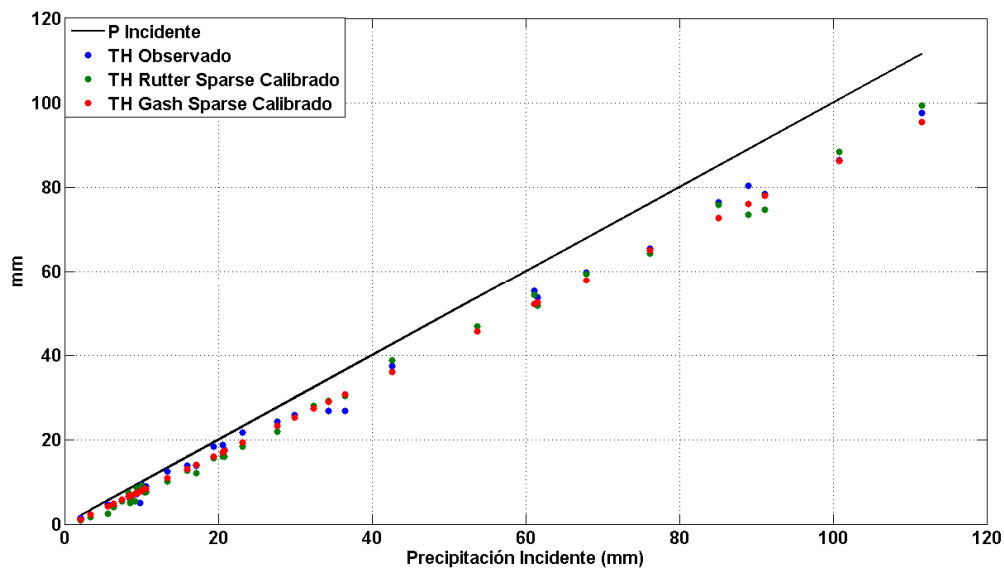
Al acumular los valores de precipitación neta y compararlos con los de precipitación incidente, es posible observar al finalizar el periodo de análisis que la diferencia entre la línea negra y las demás son las pérdidas totales por interceptación registradas y simuladas (Figura 4-26).

**Figura 4-26:** Precipitación Incidente y Neta acumulada para valores registrados y simulados

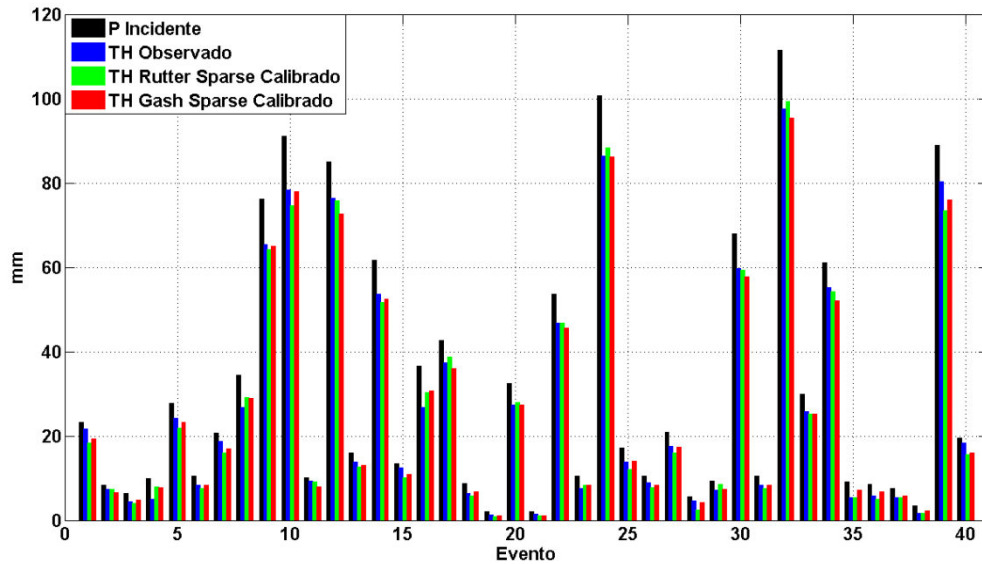


Se registró entonces para los 40 eventos de tormenta analizados una precipitación total de  $1265.47\text{mm}$  y una precipitación neta de  $1088.19\text{mm}$ . Para el caso de la variable de flujo de translocación ( $TH$ ), se realizaron las mismas gráficas encontrándose resultados similares a los de precipitación neta (Figuras 4-27, 4-28 y 4-29).

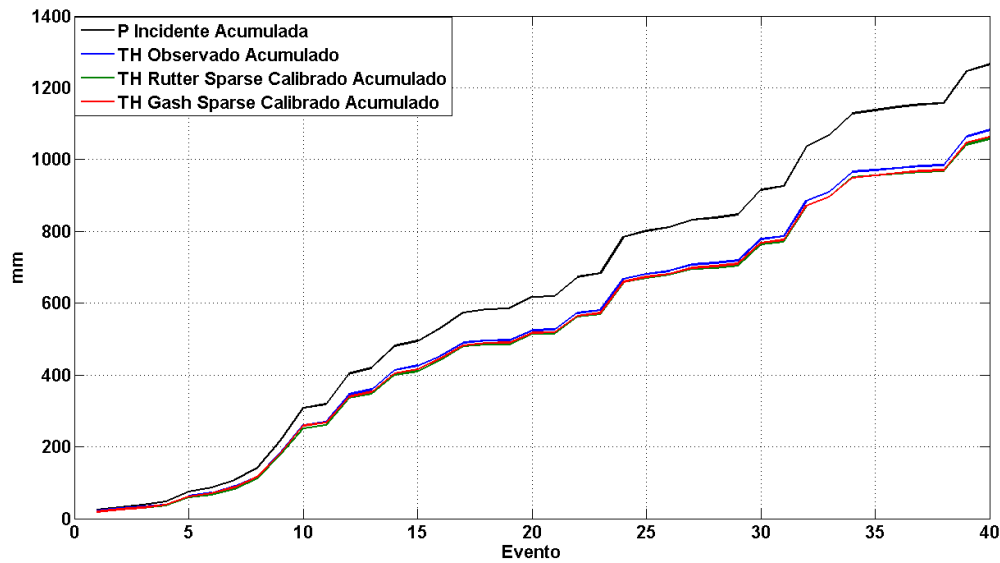
**Figura 4-27:** Precipitación Incidente vs flujo de translocación



**Figura 4-28:** Flujo de translocación por eventos de tormenta utilizados para validación



**Figura 4-29:** Precipitación incidente y flujo de translocación acumulado para valores registrados y simulados



La diferencia entre la línea negra (precipitación incidente acumulada) y las demás expresarán las pérdidas por interceptación sumado al flujo cortical para los diferentes escenarios planteados.

Como variable complementaria del flujo de translocación en la precipitación neta, se procedió a analizar el comportamiento del flujo cortical. En la Figura 4-30 se presenta el

comportamiento de los valores registrados de flujo cortical en función de la precipitación incidente.

Los puntos azules representan los valores registrados, los verdes las simulaciones del modelo **RSC** y en rojo los resultados de **GSC**. En la Figura 4-31 se presenta en análisis por evento y en la Figura 4-32 los valores acumulados.

Figura 4-30: Precipitación Incidente vs flujo cortical

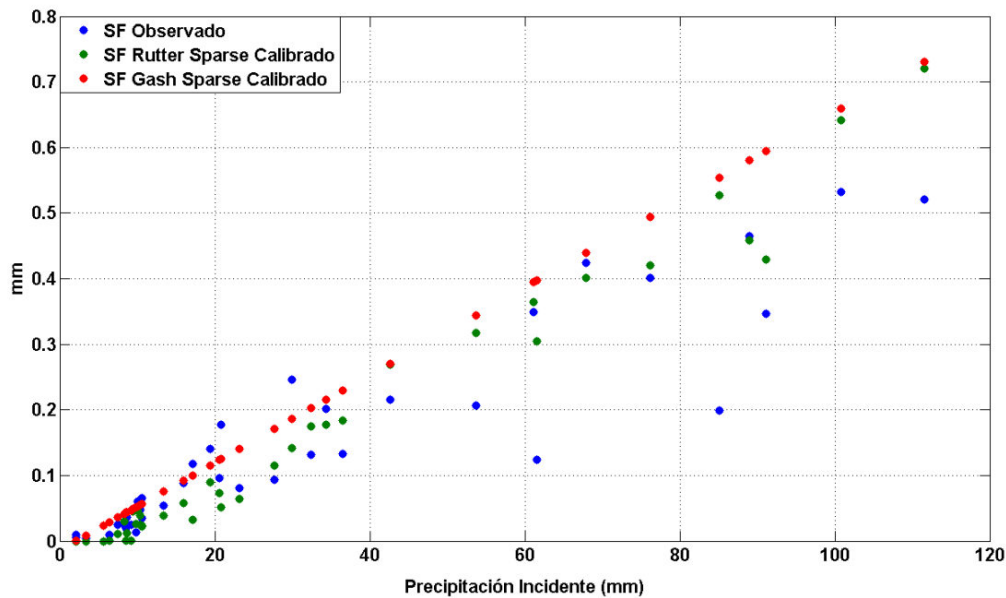
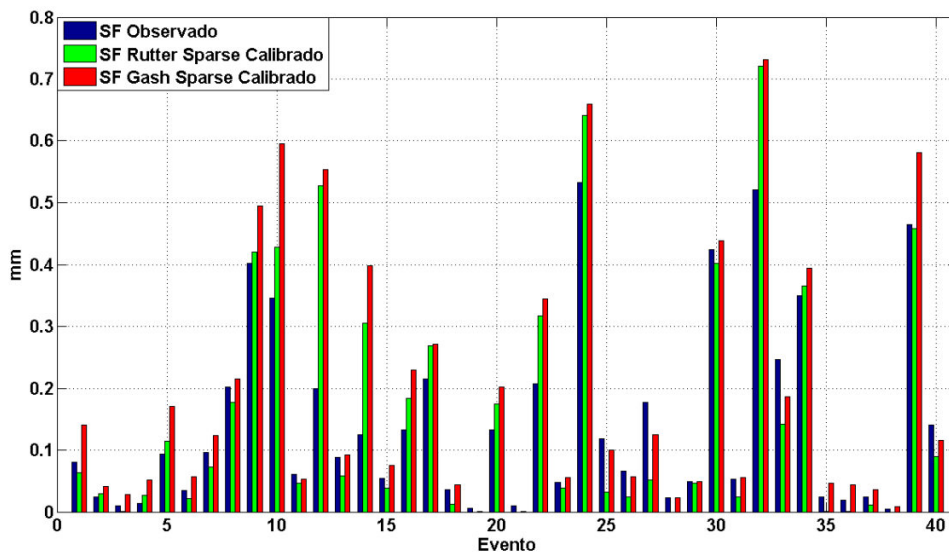
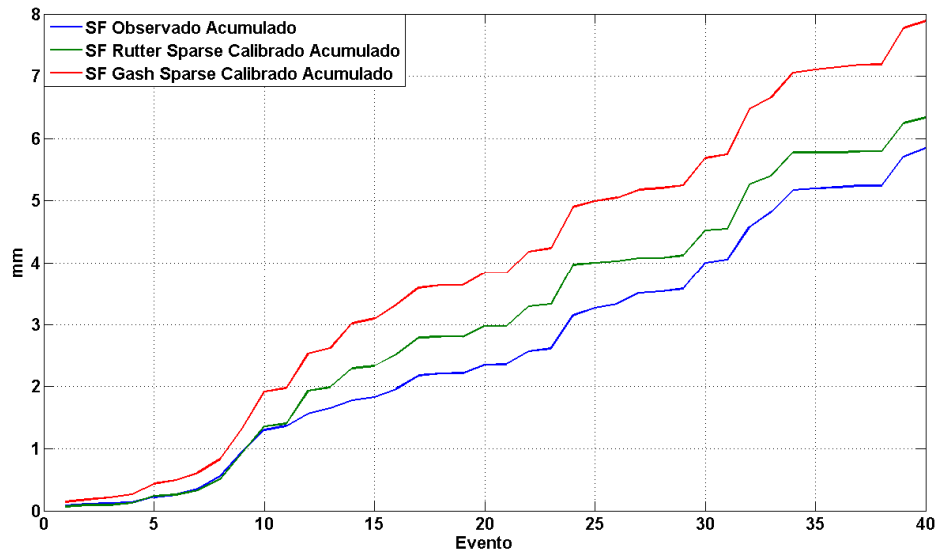


Figura 4-31: Flujo cortical por eventos de tormenta utilizados para validación

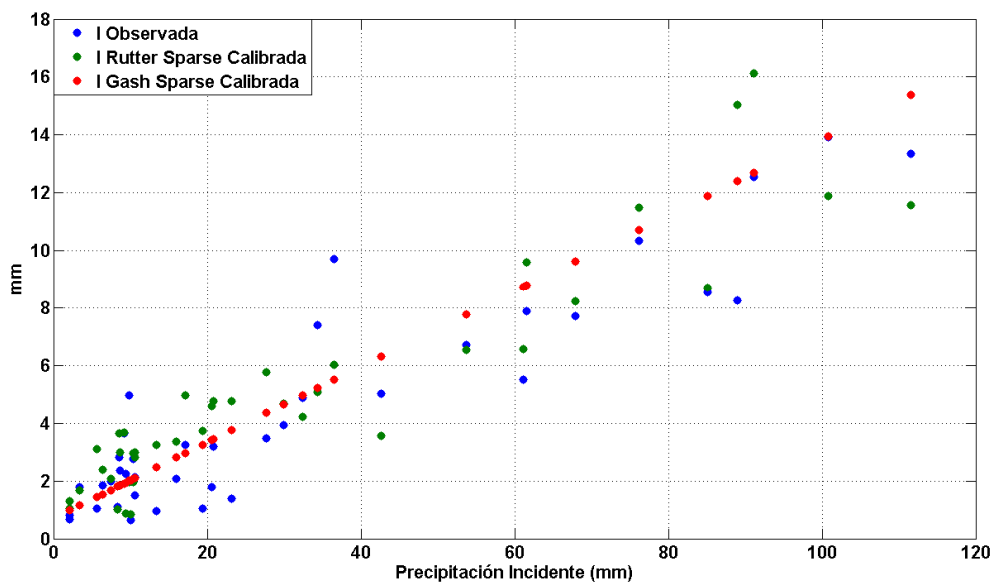


**Figura 4-32:** Flujo Cortical acumulado para valores registrados y simulados

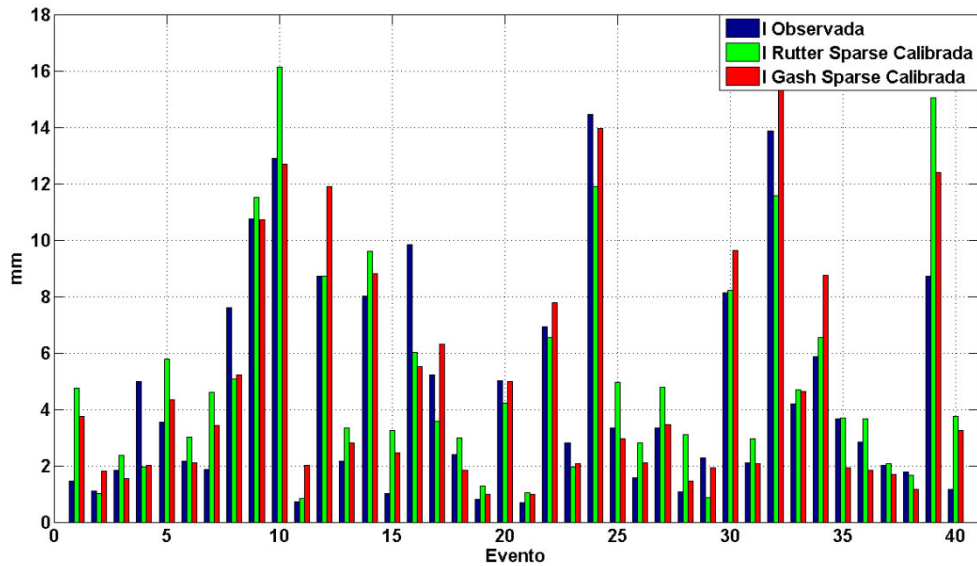


Las pérdidas por interceptación se estiman como la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta. La precipitación incidente se registró en el experimento y la neta, se estimó como la suma del flujo de translocación y el cortical, tanto para el caso experimental como para las simulaciones implementadas los modelos **RSC** y **GSC**. Para las Figuras 4-33, 4-34 y 4-35 la convención de colores es similar a la presentada para el flujo cortical.

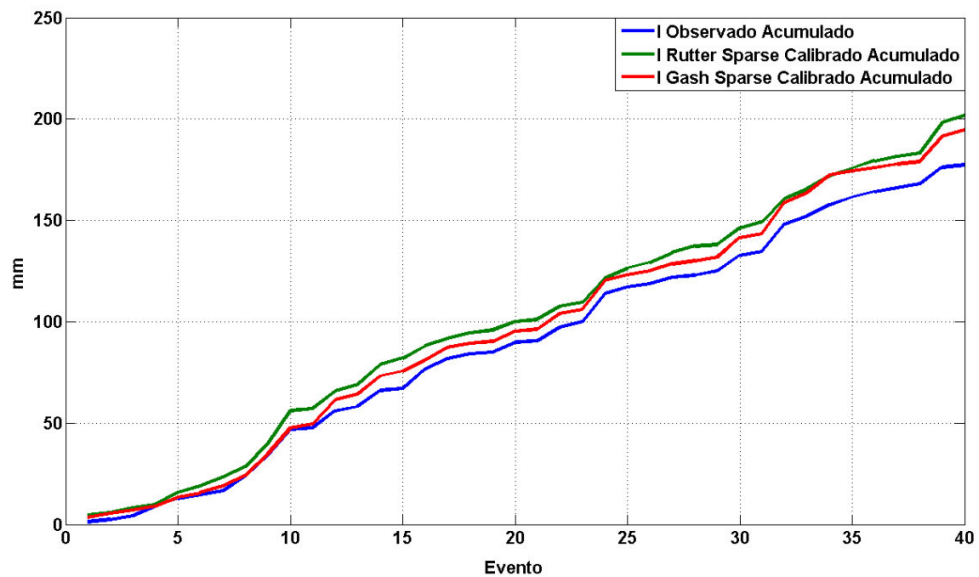
**Figura 4-33:** Precipitación Incidente vs Interceptación



**Figura 4-34:** Interceptación por eventos de tormenta utilizados para validación



**Figura 4-35:** Interceptación acumulada para valores registrados y simulados

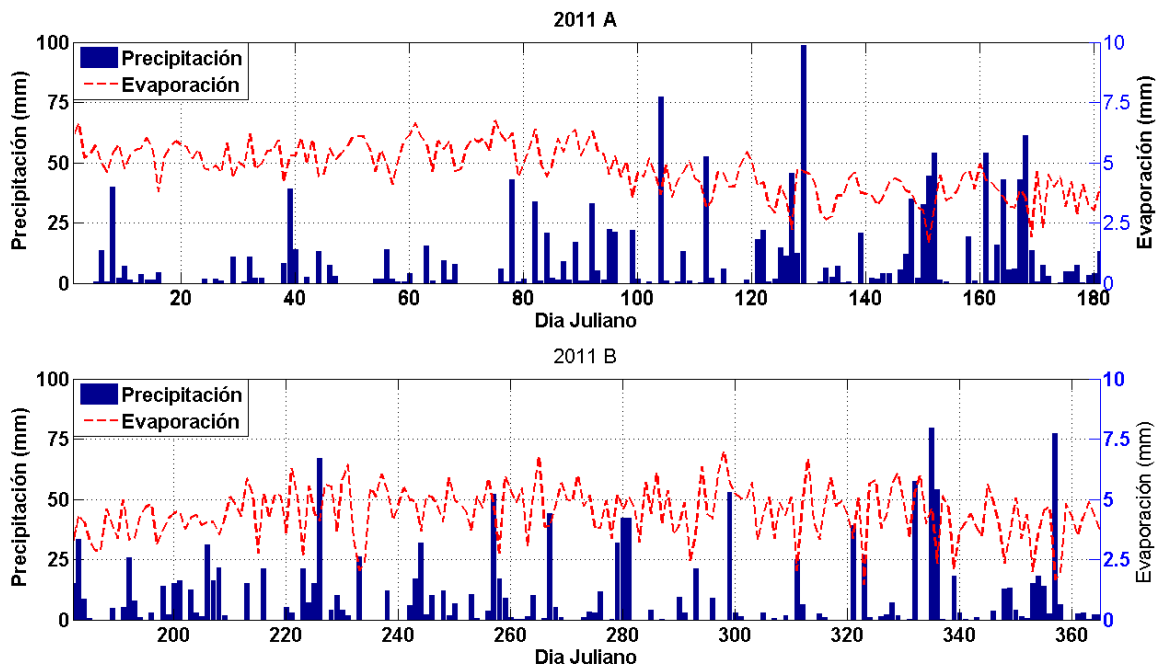


#### 4.2.6. Simulación del proceso de interceptación de lluvias

Para esta simulación se contó con información diaria de las variables precipitación, temperatura media, mínima y máxima, humedad relativa y brillo solar. Se aplicó la ecuación de Penman Monteith y se obtuvo los valores de evaporación potencial diaria. En

la Figura 4-36 se grafican los valores de evaporación y precipitación diaria para el año 2011.

**Figura 4-36:** Evaporación Potencial y precipitación incidente para el año 2011



Observando las bondades de los modelos analíticos de interceptación de lluvias y siendo coherente con la escala temporal a la cual se registraron los valores de precipitación y las demás variables meteorológicas utilizadas para el cálculo de evaporación potencial, se procedió a la implementar el modelo **GSC** para el año 2011.

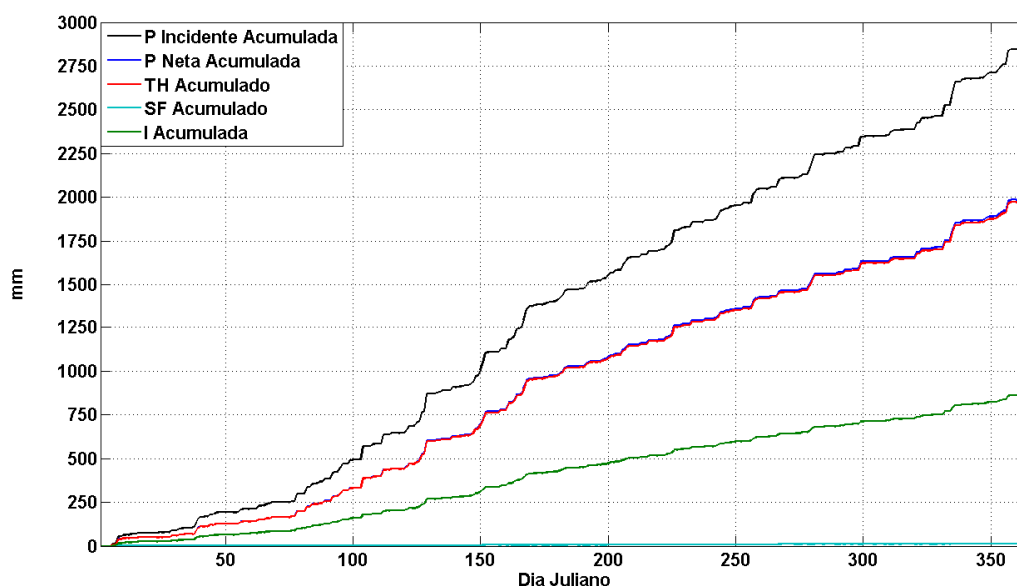
Se utilizaron los parámetros hallados en la etapa de calibración con el método de simulaciones de Montecarlo los cuales tuvieron el mejor ajuste. Se trabajó con lluvias con valores superiores a 1mm para un total de 199 eventos para el año 2011. De la aplicación del modelo **GSC** se obtuvieron los flujos de agua total para el periodo de análisis (Tabla 4-16).

**Tabla 4-16:** Estadísticos de flujos de agua en cobertura de bosque maduro con el modelo GSC para el año 2011 en la cuenca amazónica

n=199	<i>P</i>	<i>PN = TH + SF</i>	<i>TH</i>	<i>SF</i>	<i>I</i>
<b>Suma</b>	2856.10	1988.72	1975.52	13.29	867.38
<b>%P Incidente</b>	100.00	69.63	69.17	0.47	30.37
<b>Media</b>	14.35	9.99	9.93	0.07	4.36
<b>Desv. estándar</b>	17.62	13.06	12.96	0.10	4.56
<b>Max</b>	98.50	72.35	71.82	0.53	26.15
<b>Min</b>	1.00	0.12	0.12	0.00	0.88
<b>Rango</b>	97.50	72.23	71.94	0.53	25.97
<b>C.V (%)</b>	122.75	130.64	130.53	145.43	104.67

Se graficó el comportamiento de los flujos de agua a través de una gráfica de valores acumulados para el año 2011 (Figura 4-37).

**Figura 4-37:** Flujos de agua acumulados para cobertura de Bosque Maduro en el medio Caquetá para el año 2011.



#### 4.2.7. Discusión

- **Preparación de datos**

Se implementaron las técnicas de reescalamiento y la generación sintética de lluvias con el modelo de Bartlett-Lewis, buscando tener una serie de precipitación a escala horaria consistente con la registrada en las parcelas experimentales. Lo anterior fue necesario

por las diferencias existentes entre los valores registrados en la estación automática y los medidos sobre la cobertura de bosque maduro. Esto se puede deber a efectos de variabilidad espacial y la diferencia en los microclimas presentados en la zona de la estación y en la cobertura vegetal. Con la aplicación de estas técnicas se generaron series que permitieron la implementación del modelo de Rutter Sparse.

- **Registros experimentales**

De los registros experimentales tomados por Téllez (2003) en la cuenca media del río Caquetá se analizó que para un evento de precipitación promedio de 33mm, la cobertura de bosque es capaz de interceptar 4.6mm y al suelo llegan 28.4mm, es decir un 86.0% de la lluvia alcanza el suelo y el 14.0% regresa a la atmósfera por evaporación. En esta investigación se alcanzaron a registrar precipitaciones hasta del 193.1mm, las cuales sin la existencia de una estructura (cobertura vegetal) que amortigüe su efecto, podría generar erosión e inundaciones en la cuenca. El flujo de cortical aporta una pequeña parte del agua que llega al suelo que equivale a 0.5% de la precipitación incidente, lo que indica que esta variable no es un aporte importante dentro del ecosistema estudiado.

Del diagrama de cajas y patillas construido con los registros de Téllez (2003) se observó que los registros están concentrados a valores por debajo de los 50mm para las variables precipitación incidente, neta y flujo de translocación. Se identifican ciertos valores atípicos que están por fuera de los límites de confianza para valores mayores a 100mm en precipitación incidente y mayores de 90 mm para precipitación neta y flujo de translocación. Estos valores se pueden presentar como eventos extremos en la cuenca amazónica y su recurrencia también se verá afectada por fenómenos climáticos globales. El flujo cortical se concentra en valores menores a los 0.2mm por evento, con datos atípicos mayores a 0.45mm, los cuales se pueden presentar cuando los valores de precipitación son altos y los aportes de flujo por el tronco son mayores.

De los histogramas de frecuencias para estos mismos registros se destacó que la mayoría de los registros fueron menores a los 30mm, tanto para precipitación total, neta y flujo de translocación. Para lluvias menores a 10mm se registró el mayor número de eventos. Los registros de flujo cortical se concentran en valores menores a los 0.2mm.

- **Calibración**

En la etapa de calibración de los modelos dinámicos de interceptación de lluvias se observó que para la mayoría de las variables analizadas, los parámetros calibrados a través del método de simulaciones de Montecarlo representaron adecuadamente las salidas con una menor diferencia respecto los registros experimentales.

De la implementación de las simulaciones de Montecarlo se halló una capacidad de almacenamiento ( $S$ ) de 0.7598mm. Téllez (2003) reportó una capacidad de almacenamiento en su estudio de 1.08mm, pero este valor fue obtenido para la calibración del modelo clásico de Rutter *et al* (1971). Además no tuvo en cuenta la capacidad de almacenamiento desde las ramas y el tronco, que en este estudio se estimó en un valor de 0.0079mm.

Se observó que el parámetro del almacenamiento en el follaje ( $S$ ) es identificable y controla las relaciones entre las entradas y las salidas del modelo. El parámetro del almacenamiento en las ramas y troncos ( $S_t$ ) es claramente no identificable en el rango paramétrico, lo que significa que cualquier valor de este parámetro puede arrojar una salida con una minimización de la función objetivo para el modelo de interceptación.

Del análisis de las gráficas de probabilidad para la función de verosimilitud, se encontró para la capacidad de almacenamiento en el follaje ( $S$ ) una distribución similar a una de tipo normal sesgada a la derecha para el rango paramétrica de 0 a 5mm, con máximo en el rango de 0.75 a 1mm. El parámetro del almacenamiento en las ramas y troncos ( $S_t$ ) tiene una distribución de probabilidad similar a la uniforme, lo que indica que diferentes valores del rango paramétrico tiene probabilidades similares y por ende son capaces de representar el proceso.

Del análisis de sensibilidad paramétrica se identificó que el parámetro  $S$  es sensible y  $S_t$  es insensible o tiene un menor efecto sobre el comportamiento del modelo. Tobón (1999) realizó una implementación del modelo de Rutter en la cuenca amazónica para la cobertura de bosque y encontró que el parámetro  $S$  es sensible dentro de la estructura de este modelo físico.

En el *Class Plot* se observó que para el mejor grupo de parámetros (línea magenta), el modelo es capaz de representar los valores registrados en la mayoría de los puntos. Esto indica que los parámetros calibrados para los modelos estudiados son capaces de representar el fenómeno estudiado.

Con la metodología GLUE se encontró que dentro de las bandas de incertidumbre en el intervalo de confianza 2.5 y 97.5% se ubican la mayoría de valores registrados, es decir la calibración de parámetros es objetiva y permite la representación del fenómeno con buen grado de certidumbre.

Cuando en la salida gráfica *Parameter View (3D)*, los parámetros estudiados son identificables se presenta una figura cóncava con un mínimo global. Para el caso de los parámetros  $S$  y  $S_t$ , se observa que el primero es identificable, pero el segundo puede tomar cualquier valor en el rango paramétrico. Cuando los parámetros son no identificables e insensibles, la superficie no se puede definir claramente observándose muchos mínimos locales. Para los parámetros de los modelos de interceptación de lluvia se generó una superficie definida, indicando que al menos uno de los parámetros es representativo del proceso y es necesario calibrarlo.

- **Validación**

El ajuste de los valores simulados a los registros experimentales se estudió a través de estadísticos que permitieron cuantificar la eficiencia de los modelos. Se notó en un primer análisis que los modelos analíticos (Gash) representan de forma adecuada las variables precipitación neta, flujo de translocación y pérdidas por interceptación, y los modelos físicos (Rutter) describen de una mejor manera la variable flujo cortical. En estadísticos como el coeficiente de eficiencia y los errores cuadráticos medios normalizados no se observan diferencias significativas entre los comportamientos de los modelos, pero si nos apoyamos del error máximo absoluto (MAXE), se observa que el escenario con el menor valor fue **GSC** para **PN, TH y I**.

Si se estudia entre el tipo de estimación de parámetros, se puede afirmar que tienen un mejor ajuste aquellos modelos que fueron calibrados utilizando las simulaciones de Montecarlo.

Se observó además que la variable precipitación neta es la más representativa en el proceso de interceptación de lluvias, siendo en todos los escenarios mayor de 84%, respecto la precipitación incidente. Si se analiza los componentes de la precipitación neta, el flujo de translocación caracteriza esta variable en un 99.5% y el flujo cortical en tan solo un 0.5% en promedio.

Resultado de la regresión lineal entre los valores registrados y simulados se obtuvo coeficientes de determinación que presentan un buen ajuste lo que indica que los modelos son capaces de simular el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales, percibiéndose un mejor desempeño del modelo **GSC**.

A continuación se presenta el análisis para cada una de las salidas de los modelos matemáticos validados.

### **Precipitación neta (PN)**

Al estudiar el comportamiento de la variable precipitación neta en la etapa de validación se reafirmó que dentro de los modelos el que se ajusta mejor en términos del porcentaje de precipitación neta es **GSC**. Este modelo presenta la menor diferencia en milímetros entre los valores registrados y los simulados en el experimento(17.4mm).

Respecto su relación porcentual con la precipitación neta, es el más cercano con un valor de 84.6% en comparación con el 86% registrado. Esta diferencia se puede deber a procesos que el modelo no representa o se han obviado en las suposiciones del mismo. Dentro de estas suposiciones se destaca que la cobertura se encuentre totalmente seca antes de que inicie un evento de precipitación, que el periodo intertormentas dure lo suficiente para que el follaje se seque totalmente, y que las tasas de precipitación y evaporación promedio sean aplicables a todos los eventos de tormenta. También se está suponiendo que la estructura de la cobertura vegetal y sus parámetros son invariantes para el periodo de análisis. Lo anterior es discutible ya que pueden existir modificaciones al follaje, densidad y forma de la copa, ya sea por crecimiento o actividades antrópicas dentro de la cuenca, lo cual afectara los valores de pérdidas por interceptación.

La diferencia entre modelos no supera las 2.5 unidades porcentuales respecto el valor registrado de precipitación neta, lo que indica que los métodos utilizados para la

estimación de parámetros son válidos, consistentes y comparables con valores reportados en la literatura. La máxima diferencia se presenta para el modelo de **RS** (31.8mm). Se observó también que con la implementación de un método robusto como simulaciones de Montecarlo para la estimación de parámetros, se mejora el comportamiento y consistencia de los modelos.

Del análisis de porcentajes de cada variable del proceso de interceptación respecto a la precipitación incidente se estudió que en general los promedios diarios para la precipitación neta en comparación con los calculados para el periodo de análisis difieren en menos del 5%, siendo el modelo **GSC** el que tiene una mejor aproximación. También se debe mencionar que este modelo tiene la menor desviación estándar por su naturaleza lineal. Se encontró que el porcentaje de precipitación neta en función de la precipitación incidente tiende a estabilizarse para valores mayores a los 40mm. Antes de los 40mm de precipitación incidente las salidas de precipitación neta son muy dispersas con valores máximos de hasta 95% y mínimos de 48%, en relación a **PN**. Lo anterior confirma la naturaleza no lineal del proceso de interceptación de lluvias, observándose que para un valor dado de precipitación incidente se pueden encontrar distintas salidas de precipitación neta, las cuales estarán condicionadas por las condiciones meteorológicas locales y las características dasométricas de la cobertura vegetal.

Los modelos representan la tendencia de los valores registrados, lo que indica que la estructura matemática está de acuerdo con la naturaleza del proceso. Respecto a los porcentajes registrados comparados con los estimados, en los modelos analíticos se presentan mejores ajustes que en los modelos físicos.

### **Flujo de translocación (TH)**

Se evidencia una relación directa entre la precipitación neta y el flujo de translocación, lo que se traduce en que el comportamiento de las variables sea muy similar y de igual forma el comportamiento de los modelos respecto a sus salidas. La mayoría del flujo hacia el suelo hace parte del flujo libre de translocación y del goteo desde las hojas, lo que indica que el estudio de estas variables podría caracterizar de manera apropiada el fenómeno de redistribución de flujos de agua en coberturas vegetales. Respecto a los escenarios planteados el modelo con mejor desempeño fue **GSC**, seguido por **RSC**, con diferencias porcentuales respecto al experimento de 1.5 y 2% respectivamente. Los

modelos subestiman esta variable en 19.5 y 25.1mm de lámina de agua, para todos los eventos utilizados en validación.

El comportamiento para la variable de flujo de translocación (*TH*) es similar al que presentó la precipitación neta en términos de porcentaje de la precipitación incidente, con una tendencia a estabilizarse después de los 40mm de precipitación, punto donde se reduce el rango de las salidas de forma paulatina. Respecto los modelos, el de **GSC** no representa valores por debajo del 50% de **PN**, caso contrario a **RSC** el cual genera hasta valores del 40% de **PN** para un evento de baja intensidad.

En el análisis por eventos de tormenta para el flujo de translocación se observó que los modelos **Gash** y **Rutter** implementados con parámetros estimados mediante simulación de Montecarlo representan adecuadamente la variable de flujo de translocación.

### **Flujo cortical (*SF*)**

Respecto a la variable de flujo cortical (*SF*), los valores porcentuales del total de precipitación que entra al volumen de control estudiado y que posteriormente es interceptado por las estructuras de ramas y tronco son menores del 1%. Lo anterior confirma la suposición que realizan ciertos autores de despreciar esta variable en el estudio del proceso de interceptación por sus bajos valores y efectos en el balance hídrico. Para esta variable los modelos que representan mejor el comportamiento de las variables son los de **RS** y **RSC**. Las diferencias en lámina para el total de eventos analizados se sobrestiman en 0.5mm para los dos casos. Se observó que esta variable tiene un comportamiento disperso para altos valores de precipitación. Los modelos analíticos realizan una sobrestimación de hasta 2mm lo que se puede deber a la naturaleza lineal implícita en el modelo conceptual.

Para el caso del flujo cortical se observó una gran dispersión en las salidas, lo que confirma la dificultad de modelar esta variable a través de modelos matemáticos. El flujo cortical es difícil de caracterizar por la complejidad del fenómeno de interceptación por ramas debido a sus características, como el ángulo de inserción de la rama en el tronco, la rugosidad, la hidrofobicidad, la presencia de salientes, canales y cortes, los efectos del viento y el ángulo de la precipitación incidente.

Téllez (2003) comenta que según los resultados encontrados se sugiere que entre mayor es el aguacero, menor es la capacidad de retención de agua por la vegetación y mayor es el flujo por translocación. Otra anotación de esta investigadora es respecto el área de la copa del árbol, ya que los resultados obtenidos en su experimento sugieren que con áreas de coronas grandes no se conduce el agua hacia el centro para su posterior drenaje, sino que por el contrario el agua participa más en el proceso de goteo, reduciendo los valores de  $SF$ .

Para esta variable, el modelo **RSC** tiene un rango más amplio en términos del porcentaje que representa dicha variable respecto la precipitación incidente. Ninguno de los modelos representa fielmente las salidas que se encuentran por encima de  $0.66\%P$  en el eje de las abscisas. El modelo **RSC** representa valores de cero por ciento, ya que es necesario sobrepasar el umbral de la capacidad de almacenamiento del follaje ( $0.0079\text{mm}$ ) para que se presente flujo cortical. Estos valores suceden para lluvias con valores menores a los  $15\text{mm}$ , fenómenos caracterizados por ser de baja intensidad.

También se observó que no existe un comportamiento definido de esta variable en función de la precipitación incidente, lo que indica que este flujo debe ser afectado por otros factores que los modelos en su estructura matemática no tienen en cuenta. Claramente el comportamiento de los modelos obedece a la variable de forzamiento precipitación incidente en forma proporcional con la salida en el valor de flujo cortical. En el caso de **GSC** se observa claramente la suposición de proporcionalidad que existe entre las entradas y las salidas del modelo, lo que puede sobrestimar valores de flujo de cortical. En el caso de **RSC** su comportamiento barre un espectro más amplio en las salidas, observándose que para una entrada de precipitación es posible tener valores diferentes de flujo cortical, como sucede con los registros experimentales. Para esta variable el modelo de **RSC** es mucho más adecuado, aunque no sea capaz de representar cabalmente todas las salidas, por las limitaciones que implícitamente tiene un modelo matemático.

En el análisis por eventos para el flujo cortical se observó que los modelos evaluados sobrestiman en la mayoría de los casos respecto el valor registrado. Los valores medidos son menores a  $1\text{mm}$  lo que implica que el instrumento utilizado para tal fin debe ser de alta precisión. En este punto pueden existir errores ya que se habla de un método de

medición que utiliza una manguera instalada en forma de espiral en el tronco, donde las filtraciones, aportes por precipitación horizontal y obstrucciones se pueden presentar, modificando los valores registrados. Como ya se comentó anteriormente esta es una variable que además de ser difícil de medir, no es fácil de representar mediante modelos matemáticos por la complejidad del proceso. La modelación de esta variable va depender directamente del parámetro de capacidad de almacenamiento del follaje ( $S_t$ ), el cual como se observo en la fase de calibración es insensible y no identificable, lo que implica que en el rango paramétrico cualquier valor puede ser tomado de forma indistinta.

En el análisis de flujo cortical acumulado para los 40 eventos de precipitación se observó una sobrestimación de los modelos **RSC** y **GSC**, siendo el primero más próximo a los valores registrados con una diferencia de 0.5mm y el segundo con una diferencia de 2mm,

### **Pérdidas por interceptación ( $I$ )**

La variable de pérdidas por interceptación( $I$ ) para el caso de bosque maduro llega ser el 14% de la precipitación incidente, para el periodo utilizado para la validación de los modelos. Los modelos implementados están sobrestimando este porcentaje hasta en un 2.5%, lo que se traduce en 32mm aproximadamente cuando se acumula esta variable. Lo anterior indica que a pesar de la sobrestimación de las pérdidas por interceptación, los modelos matemáticos describen de forma adecuada el proceso de interceptación de lluvias. Respecto estos modelos el que representa de mejor manera los registros experimentales es **GSC**, con la menor diferencia entre la interceptación acumulada registrada y la simulada (17.4mm), lo sigue el modelo **RSC**, el cual realiza una representación adecuada del proceso de interceptación de lluvias, con una sobrestimación de tan solo el 2%.

Se analizó además que el comportamiento es decreciente a medida que los valores de precipitación incidente aumentan, tendiendo a estabilizarse después de los 40mm. Para los valores menores a 40mm la interceptación toma valores entre 6 y 52%; este amplio rango indica que otros factores como las condiciones meteorológicas, la duración e intensidad de la lluvia, el ángulo de la lluvia, el tamaño de la gota y las condiciones antecedentes de humedad en el follaje. A lo anterior se suma el tiempo de saturación y secado del follaje. Para valores de precipitación incidente menores a 15mm se presentan

los mayores porcentajes de interceptación debido a que se trata de tormentas de baja intensidad, además con tamaño de gotas más pequeñas, siendo la cobertura foliar capaz de interceptar un mayor número de estas. Para el análisis de porcentajes respecto a la precipitación incidente, si se comparan los valores medios experimentales (19.1%) con los de los obtenidos por los modelos, el más cercano es el de **GSC** (19.4%).

Al graficar la interceptación en función de la precipitación incidente se observa que los registros experimentales no tiene un patrón que pueda ser definido claramente por una función matemática. Se observa una naturaleza proporcional y positiva, es decir entre mayor sea la precipitación incidente, mayor serán las pérdidas por interceptación.

Rutter *et al* (2009) comenta que errores de medición en la variables precipitación incidente y neta de 2.5%, se pueden ver traducidas en errores de medición de hasta el 22% en interceptación. Lo anterior indica que la modelación de la variable interceptación es más dispendiosa por sus estimación indirecta y escala en el rango de salidas, el cual es más reducido, es decir, las diferencias entre valores registrados y simulados en interceptación hace más evidente posibles errores en el registro.

El modelo de **RSC** sobrestima la interceptación para las 40 tormentas analizadas en 24.6mm, mientras que el modelo de **GSC** solo lo hace en 17.4mm. Si se compara con la precipitación total estaríamos hablando que se está sobre estimando en 2.5%.

- **Simulación**

De la simulación del proceso de interceptación para el año 2011 en el medio Caquetá, se encontró que la cobertura de bosque maduro es capaz de interceptar un 30% de la precipitación incidente, lo que se traduce en una reducción de caudales, erosión y además un aumento en la recirculación interna de flujos de agua, lo que regula los demás procesos del ciclo hidrológico. El restante 70% hace parte de la precipitación neta o cantidad de agua que alcanza el suelo y que puede convertirse en escorrentía, infiltrarse o evaporarse si por ejemplo existe una capa de hojarasca que realice un proceso de reinterceptación de lluvias. Los valores de flujo cortical no superan el 1%, lo que confirma su irrelevancia en el ciclo hidrológico.

Se estimó una precipitación acumulada de 2856.1mm de donde 1988.72mm se estimaron como precipitación neta y los restantes 867.38mm como pérdidas por interceptación. La precipitación neta y el flujo de translocación están muy ligados y el flujo cortical llega a ser solo el 0.5% de la precipitación incidente, lo que se traduce en un aporte de 13.29mm para el año 2011.

El incremento de interceptación en comparación a la investigación de Téllez (2003) se puede deber a un mayor número de eventos de precipitaciones con valores menores a 40mm. Se registraron valores máximos de precipitación que no excedieron los 100 mm, diferentes a los registros de Téllez (2003) donde se midieron hasta de 193.1 mm de precipitación en un solo evento. Para tormentas tan intensas el follaje se satura más rápido y no es capaz de interceptar la misma cantidad de agua, además el tamaño de las gotas suelen ser más grandes, lo que genera un choque con las estructuras de la cobertura vegetal ocasionando que las hojas se desocupen súbitamente.

### **4.3. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL PROCESO DE INTERCEPTACIÓN**

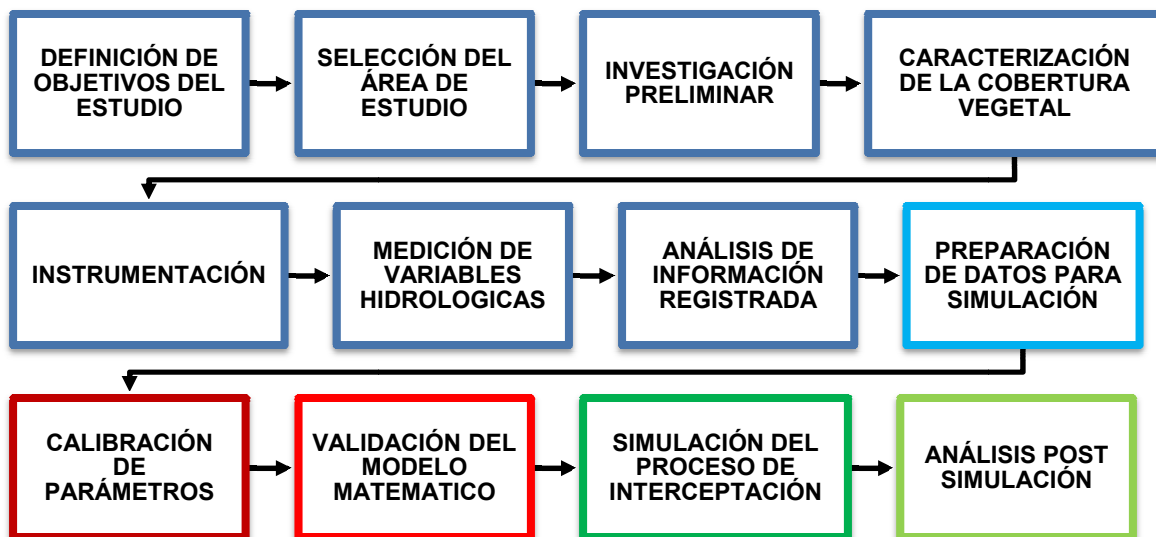
En las secciones anteriores se contextualizó el proceso de interceptación dentro de las investigaciones desarrolladas en el país y se desarrolló un estudio de caso donde se implementaron dos modelos matemáticos; **Rutter Sparse** y **Gash Sparse**. Todo lo anterior se realizó con el fin de estudiar el proceso de modelación, desde el registro de variables, su uso en las etapas de calibración y validación, y por último en la simulación del proceso. Con esto se determinó el *modus operandi* de los modelos matemáticos y cuál podría ser la metodología a seguir para que el proceso de modelación sea claro y secuencial.

Esta metodología se presenta en dos secciones; la primera enfocada a un protocolo de medición de variables hidrometeorológicas y el segundo a un protocolo de modelación del proceso de interceptación a través de la implementación de modelos matemáticos.

Con la intención de generar una ruta metodológica la cual los investigadores, estudiantes y consultores puedan seguir para estudiar el proceso de interceptación por coberturas vegetales, se ha propuesto el flujograma presentado en la Figura 4-38, el cual se divide

en tres subprocesos: el registro de variables (casillas azules), la validación y calibración del modelo (casillas rojas), y la simulación del proceso y el análisis de las salidas (casillas verdes).

**Figura 4-38:** Ruta metodológica propuesta para la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvias



#### 4.3.1. Protocolo de medición de variables del proceso de interceptación

Para la implementación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia se propone una secuencia de pasos que permita obtener un registro confiable de las variables del proceso que se puedan utilizar en el modelo matemático. Lo anterior se complementa con procesos estadísticos que verifiquen la calidad de las mediciones o que en su caso nos permita descartar registros anómalos, evitando futuros errores en las salidas del modelo.

##### Definición de objetivos

Antes de iniciar con una etapa de medición y posterior modelación, es necesario definir claramente el objetivo de la modelación, es decir, qué proceso físico se desea representar, cuál es la finalidad de caracterizar dicho proceso, que posibles conclusiones se esperan obtener y cuál será la utilidad del estudio. Esto permitirá definir de forma previa la inversión de recursos tanto físicos como humanos, el tiempo de ejecución del

estudio y en si la viabilidad del proyecto. Este análisis permite también establecer qué tipo de modelo es más apropiado; aglutinado o distribuido, determinístico o estocástico (Domínguez, 2007).

### **Selección del área de estudio**

La selección del área de estudio debe obedecer al objeto de la investigación, justificando el porqué de su selección, el efecto de su estudio y los posibles resultados al entender el comportamiento de los flujos de agua dentro del ecosistema. Estará entonces en función de los posibles escenarios que se esperen estudiar y la representatividad de la cobertura analizada. A lo anterior se suma la posibilidad de instrumentación de dicha área de estudio, ya que si no se cuenta con presupuesto para la instalación de los instrumentos de medición de variables hidrometeorológicas, será necesario trabajar en un área cercana a una estación meteorológica administrada por alguna entidad que distribuya posteriormente dicha información.

El área seleccionada debe ser en lo posible homogénea, sin cambios bruscos en su topografía, con coberturas vegetales identificables y caracterizables, esto con el fin de obtener valores representativos que puedan ser analizables y comparables con otras investigaciones. En la Figura 4-39, se presentan las actividades que se recomiendan realizar para seleccionar el área de estudio.

Ya definida el área de estudio se delimitaran las parcelas experimentales donde se espera realizar la medición de las componentes del proceso de interceptación. Con la intención de tener un referente respecto las mediciones realizadas en cada cobertura vegetal, se recomienda que existan al menos dos parcelas experimentales por cobertura. El tamaño de las parcelas es variable pero se recomienda que esta no sea mayor a 1000m<sup>2</sup> buscando disminuir los efectos de variabilidad espacial en las mediciones (Téllez, 2003).

### **Investigación preliminar**

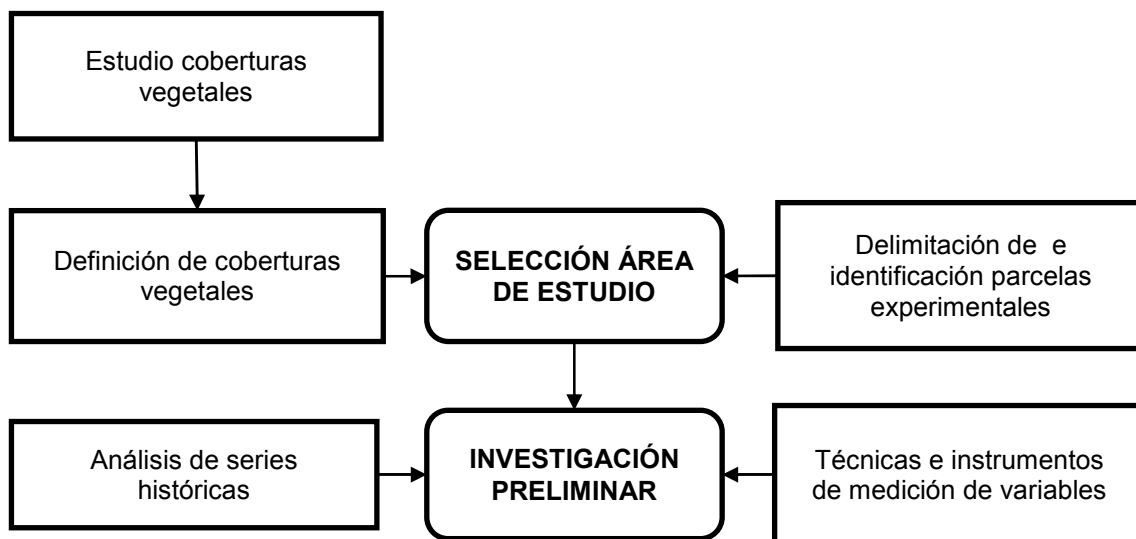
En esta etapa se recolecta la información climatológica de la zona de estudio y se procede a realizar un análisis estadístico de la misma, destacando periodos homogéneos, posibles estacionalidades e incidencia de fenómenos macroclimáticos (ENSO, PDO, NAO, etc). Para trabajar bajo un periodo climático representativo, se debe seleccionar una

media climática de a los menos 30 años (p. e 1981-2010), y con esto realizar un informe climático que caracterice el comportamiento de la zona.

Es importante entonces realizar un reconocimiento de las estaciones meteorológicas que se encuentren dentro o cerca del área de estudio, verificando su fecha de instalación, si todavía está en funcionamiento, su tipo (AM, CP, CO, ME) y qué variables se encuentra registrando. A lo anterior se suma reconocer la resolución de los registros (hora, día, década, mes, etc.).

Dependiendo el área experimental se debe consultar en las bases de datos del IDEAM, corporaciones autónomas regionales, centros de investigación, asociaciones gremiales o investigadores independientes. En esta etapa es importante realizar un reconocimiento de las técnicas de medición y registro de variables hidrometeorológicas con la intención de conocer la capacidad de adquisición e instalación de equipos o que técnicas alternativas se deben adoptar para realizar los registros.

**Figura 4-39:** Pasos recomendados para la selección del área de estudio para la modelación del proceso de interceptación



## Caracterización de la cobertura vegetal analizada

Para empezar en cada parcela se deben identificar las diferentes coberturas que se desean analizar, su especie, edad, altura, diámetro a la altura del pecho (DAP) y su densidad de siembra. Además de las mediciones anteriores es importante determinar el porcentaje de cobertura vegetal ( $c$ ) y el índice de área foliar (IAF). El primero está relacionado directamente en los modelos dinámicos con la cantidad de agua que puede ser interceptada por el follaje, y el segundo está relacionado indirectamente con la capacidad de almacenamiento del follaje.

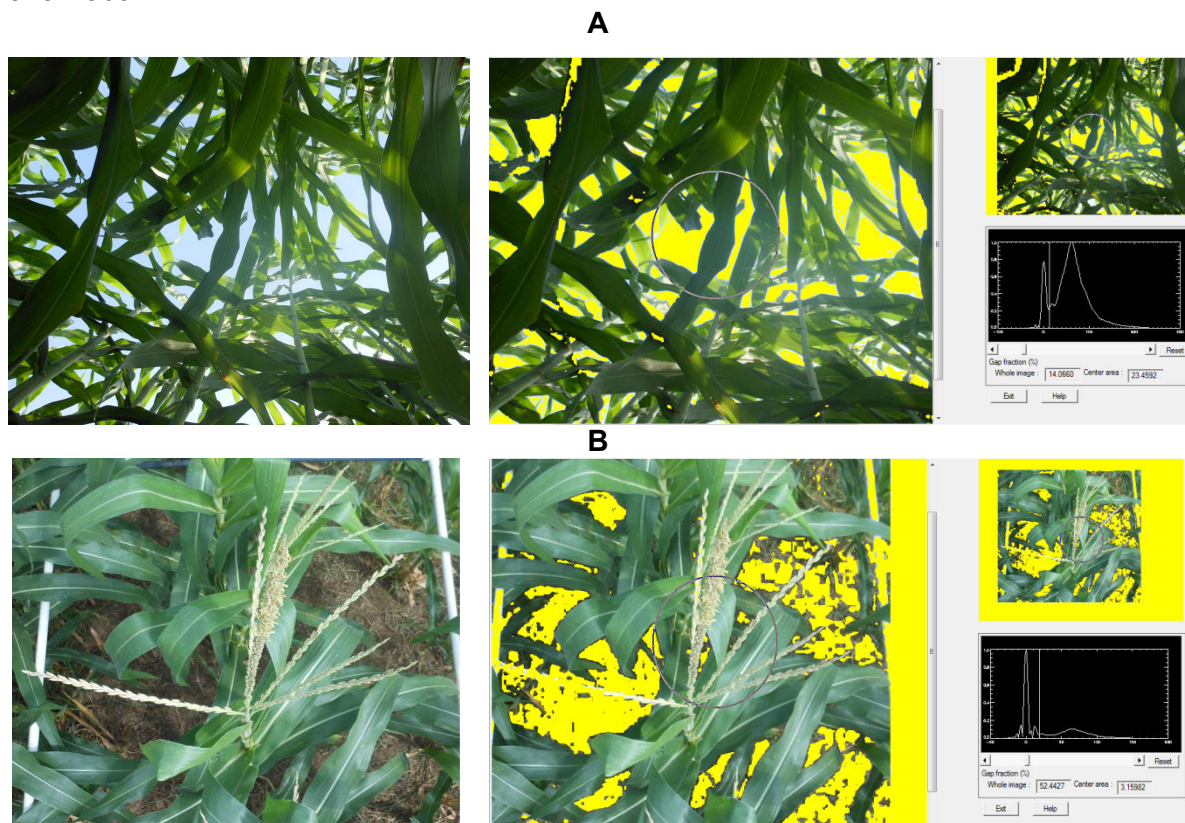
- **Porcentaje de cobertura vegetal**

El porcentaje de cobertura vegetal o de follaje se refiere a la cantidad de biomasa que cubre un área delimitada vista desde una perspectiva en planta o en dirección cenital (ortogonal). La primera aplica para estructuras de bajo porte, como arbustos y ciertos cultivos. La segunda se utiliza en coberturas boscosas o en cultivos de porte alto. Para el caso de cultivos de ciclo corto (<1 año) el valor de porcentaje de la cobertura vegetal será un valor dinámico que estará en función de la etapa fenológica en la que se encuentre el cultivo.

Para lo anterior se recomienda un seguimiento semanal de la cobertura de follaje mediante fotografías, estableciendo cuadrículas fijas dentro de las parcelas experimentales y que la fotografía se tome siempre a la misma altura, con la intención que los valores estimados sean comparables a través del ciclo de cultivo. Se debe tener en cuenta el crecimiento máximo del cultivo y establecer la altura de toma de la fotografía por encima de esta, siendo en algunos casos necesario contar con estructuras que permitan al operario realizar esta labor.

La determinación de la cobertura vegetal se puede realizar a través de la toma de fotografías y su posterior procesamiento mediante programas de computador que realicen la diferenciación de los colores mediante la refracción de su longitud de onda. Uno de estos programas es GreenCropTracker®, el cual procesa fotografías digitales a color, estimando características estructurales de la cobertura vegetal (Figura 4-40).

**Figura 4-40:** Procesamiento de una fotografía digital con GreenCropTracker. A) Vista desde abajo de la cobertura vegetal analizada. B) Vista en planta de la cobertura vegetal analizada



En la Figura 4-40A se presenta un ejemplo para una fotografía tomada en el cultivo de Maíz en dirección cenital, obteniéndose un área vacía de 14% es decir un porcentaje de cobertura vegetal o del follaje del 86%. En la Figura 4-40B se muestra un procesamiento de una imagen tomada en planta, y se obtuvo una fracción de cobertura vegetal del 48%. La estimación del porcentaje de follaje también se puede realizar utilizando la técnica de segmentación y conteo de píxeles (Hernandez, 2007), donde en la primera etapa se convierte las imágenes a escala de grises y mediante un programa de edición de imágenes se cuenta los píxeles que estén en la escala de grises y se dividen por el total de píxeles de la imagen.

- **Índice de área foliar (IAF)**

Según Castillo & Castellvi (2001) el índice de área foliar se define como el área de las hojas que se proyectan verticalmente sobre la unidad de superficie del terreno. Existen varios métodos para medir el área de las hojas de las plantas:

- Reproduciendo el contorno de la hoja y planimetriando el área
- Mediante relaciones peso-superficie
- Midiendo la longitud y ancho de las hojas
- Mediante el uso de fotografías por comparación visual con las hojas
- Métodos fotocásticos

El primero se conoce como método destructivo, donde se requiere arrancar las hojas de las plantas. El segundo y tercer método se conocen como métodos estimativos, los cuales se basan en la demostración de una relación matemática entre alguna característica biométrica de la hoja (longitud, ancho, diámetro, etc) o de biomasa (peso fresco o seco de una sección de hoja o de todas) el área foliar. Y los restantes se denominan métodos no destructivos.

De los métodos fotográficos se puede obtener el valor de la fracción de vacíos ( $p$ ), y esta a su vez es posible relacionarla con el Índice de Área Foliar (IAF) a través de la Ley de Beer Lambert (Ecuación 4-1), la cual fue enunciada por Scott et al (1993) y citada por Téllez (2003).

$$IAF = \frac{-\ln \left[ \frac{Q_i}{Q_0} \right]}{k} \quad (4-1)$$

Dónde:

$Q_i$ : Luz arriba del follaje

$Q_0$ : Luz abajo del follaje

$\frac{Q_i}{Q_0}$ : Fracción de vacíos ( $p = 1 - c$ )

$k$ : Coeficiente de extinción

El coeficiente de extinción es de 0.5 para follajes con una distribución esférica de los ángulos de inclinación de las hojas. Para bosques se reportan valores que varían entre 0.6-0.8 (Ross, 1975 citado por Van Dijk & Bruijnzeel, 2001) y para cultivos este valor puede tomar valores entre 0.5-0.7 (Van Heemst, 1988 citado por Van Dijk & Bruijnzeel, 2001).

Si se desea relacionar el índice de área foliar de la cobertura vegetal con la capacidad de almacenamiento del follaje, Aston (1979), Pitman (1989) y Liu (1998) citados por Van Dijk

& Bruijnzeel (2001) comentan acerca de una relación lineal entre la capacidad de almacenamiento y el Índice de Área Foliar (IAF) (Ecuación 4-2).

$$S = S_L IAF \quad (4-2)$$

Donde  $S_L$  es la capacidad de almacenamiento de las hojas, es decir, la cantidad de agua que puede ser retenida por las hojas de una especie particular por unidad de área de las hojas (Lousteau *et al.*, 1992; Tobón, 1999 citados por Van Dijk & Bruijnzeel, 2001). Es posible entonces calibrar el parámetro  $S_L$  y mediante la estimación del  $IAF$  extrapolar los modelos de interceptación a otro tipo de coberturas vegetales.

### **Área proyectada de la copa de la cobertura vegetal ( $A_c$ ) y altura del follaje ( $h$ )**

Se debe definir el área proyectada de la copa del árbol para la instalación de los colectores. Esto se puede hacer con una vista en planta del árbol, realizando una proyección de su imagen hacia el suelo o alternativamente trazando dos diámetros ortogonales sobre una aproximación de la proyección del área de la copa, y con estos formar una elipse la cual se supondrá el área donde se pueda presentar el flujo de translocación. Téllez (2003) realizó la proyección de la copa arbórea utilizando estacas y posterior triangulación referenciándose del tronco. La suma de las triangulaciones individuales más el área transversal del tronco es el área de la copa del árbol.

Respecto la altura del follaje en el caso de coberturas de porte alto, Téllez (2003) cita a Saldarriaga (1994) quien encontró una relación para bosques secundarios (Ecuación 4-3)

$$h = \frac{35 \text{ DAP}}{12.5 + \text{DAP}} \quad (4-3)$$

Donde DAP (*cm*) es el diámetro a la altura de pecho, es decir el diámetro del tronco medido a 1.3 metros desde el suelo. El conocer la altura del follaje es una entrada en el cálculo de la resistencia aerodinámica, utilizada a su vez en para la estimación de la evaporación potencial.

## **Instrumentación**

La instrumentación debe obedecer a dos elementos de juicio; la disponibilidad de recursos económicos y los modelos que se deseen implementar, siendo el primero el mayor limitante para los objetivos de una investigación.

A lo anterior se suma la posibilidad de instalación de una estación automática o si por cuestiones de presupuesto en el proyecto de investigación, se hace necesario trabajar con una estación ya instalada y administrada por alguna entidad.

De este proceso se debe resaltar qué es necesario retroalimentar la escala de medición de los instrumentos dependiendo el modelo que se desee implementar para el estudio de la interceptación. Las estaciones automáticas cuentan con sensores que permiten escoger la escala de registro de la variable analizada (minuto, hora, día).

La instalación de la estación o su selección, deberá ser consistente con las características del área experimental, es decir, estar a una altura sobre el nivel del mar similar a la de las parcelas y dentro de la misma cuenca hidrográfica, esperando que el comportamiento de las variables climáticas sea similar.

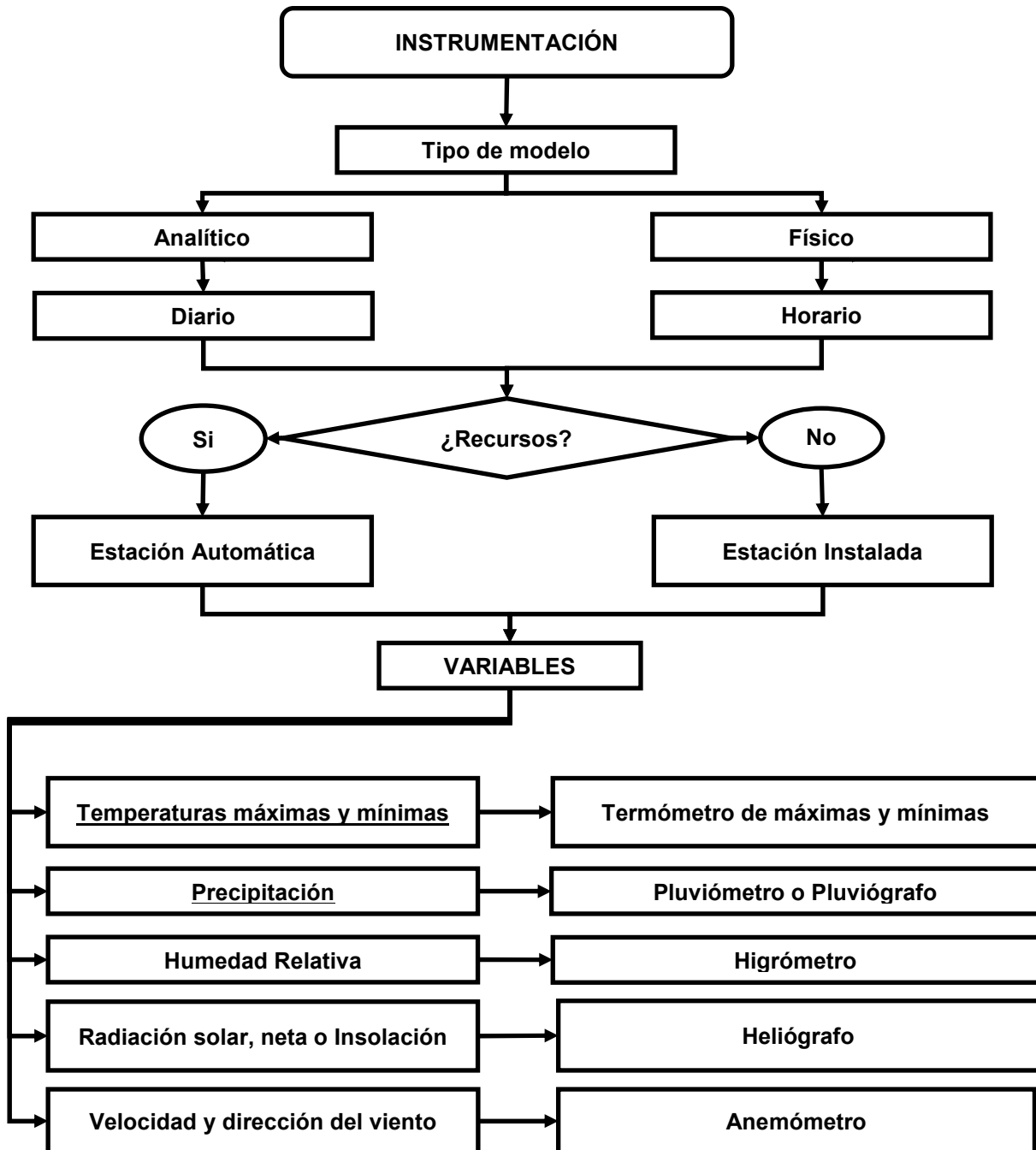
En función de estos factores se ha construido una ruta, donde se indica las variables que se deben registrar en función de la escala temporal del modelo (Figura 4-41).

También se pueden instalar sensores de humedad del follaje, permitiendo determinarla presencia y duración de la humedad sobre las hojas, estando esta medición directamente relacionada con las pérdidas por interceptación o retención superficial y posterior evaporación de agua a la atmósfera. Los valores se pueden relacionar con la capacidad de almacenamiento del dosel.

Es posible también realizar estudios a escalas microclimáticas, donde se enfatice sobre los procesos y los estados que ocurren en el suelo, en la planta y en la atmósfera (Jaramillo, 2005). Dentro de los estudios microclimáticos se destaca el conocer el flujo de radiación solar y energía dentro de las coberturas vegetales, y con esto la estimación de la evaporación y la evapotranspiración. En las coberturas vegetales se distingue una serie sucesiva de capas de hojas superpuestas, donde la capa externa de hojas absorbe la

mayor parte de la radiación solar incidente. Una característica que condicionará los valores de radiación neta absorbida es el índice de área foliar. Teóricamente se han realizado relaciones exponenciales entre estas dos variables (Saeki, 1933 citado por Jaramillo, 2005).

**Figura 4-41:** Pasos recomendados para la instrumentación del área experimental



## Medición de variables hidrometeorológicas

La medición de variables hidrometeorológicas se debe realizar de forma continua durante el período de estudio siendo conscientes de la periodicidad de la toma de datos, la calibración de equipos y reconfiguración de la red de monitoreo. Se medirá entonces la precipitación incidente, el flujo de translocación, el flujo cortical y las variables necesarias para determinar la evaporación potencial mediante el método indirecto como la ecuación de Penman Monteith.

De la revisión de investigaciones en el país se recomienda que el periodo mínimo de caracterización de los eventos de precipitación y de los demás flujos presentes en una cobertura vegetal sea de 12 meses, con la intención de tener un número significativo de registros para realizar la calibración y validación del modelo. Además se podrá contar con las características de la variabilidad climática intranual la cual es condicionada por el paso de la ZCIT.

En la Figura 4-41 se nombran las variables e instrumentos recomendados para la medición de las variables hidrometeorológicas implícitas en el proceso de interceptación. Para el caso de tenerse recursos para la instalación de una estación automática, es importante acoplarla a un sistema automático de almacenamiento de datos (*Datalogger*) donde se almacenan los registros a la escala requerida por el modelo que se desea implementar o en función de los objetivos del estudio que se espere desarrollar.

Para la medición de flujos de agua se deben considerar tres variables: la precipitación incidente, el flujo de translocación y el flujo cortical. La precipitación incidente se determina instalando un pluviómetro o pluviógrafo dependiendo la escala temporal del modelo. Este se debe instalar en un área despejada y cercana al área experimental, donde no haya efectos de sombra ni interceptación por parte de alguna cobertura vegetal. Si se desea que la medición sea más precisa se recomienda hacer la instalación de algún tipo de estructura recolectora encima de la cobertura de follaje y conectarlo al instrumento. Esta medición *in situ* es más confiable ya que evita diferencias en las mediciones debido a la variabilidad espacial del proceso de interceptación, aunque sea una tarea dispendiosa.

Para lo anterior es importante conocer el área de captación y su debida correspondencia a milímetros de agua para ser consistente con las unidades en el balance hídrico. Se ha encontrado después de múltiples trabajos que para muestrear la precipitación basta con de 2 a 4 pluviómetros adecuadamente protegidos en áreas descubiertas cercanas a la zona de estudio (Giraldo L. , 2002).

El flujo de translocación se puede estimar a través de la instalación de colectores bajo las coberturas interceptoras analizadas y promediando las mediciones para obtener un valor representativo. Si se tiene un presupuesto que permita la compra de un mayor número de pluviógrafos, estos se pueden colocar bajo la cobertura vegetal para que el flujo de translocación se registre de forma continua. Con esto se podrá comparar a través del tiempo **TH** con **PN**. Lo anterior permite conocer el tiempo de retardo que genera la cobertura vegetal sobre la precipitación.

En general investigadores han concluido que un número óptimo de colectores es de dieciocho (18) por cada dos pluviómetros ubicados a campo abierto, sobre la cobertura vegetal (Giraldo L. , 2002) o por cada parcela experimental.

Los colectores pueden ser instrumentos con diferentes características pero con la misma finalidad. Por ejemplo se pueden utilizar pluviómetros o pluviógrafos bajo las estructuras, con la intención de tener una medición representativa y sin necesidad de realizar un procesamiento del dato. Otra opción es utilizar recolectores plásticos los cuales estén calibrados y tengan una equivalencia a milímetros de columna de agua.

Hernandez (2007) comenta sobre la fabricación manual de colectores siguiendo una metodología presentada por investigadores de la Universidad de Dakota del Sur, quienes calibraron botellas plasticas de 2 litros. La construccion del colector es sencilla, y solo se debe cortar la botella donde la sección se angosta y pegar la parte superior de forma invertida, de manera que quede con la boquilla en la parte interior del recipiente. Para transformar la cantidad de agua recolectada a milímetros de precipitación se debe utilizar la siguiente expresion.

$$TH = \frac{V_p}{A_p} \quad (4-4)$$

Dónde:

$TH$ : Flujo de translocación ( $mm$ )

$V_p$ : Volumen recolectado y medido con una probeta ( $l$ )

$A_p$ : Área de captación del colector ( $m^2$ )

Téllez (2003) utilizó en su experimento colectores plásticos de capacidad de 3 y 5 galones, a los que se adaptaron embudos de polietileno de 19.5cm de diámetro, con una distribución aleatoria en las parcelas.

Se debe mencionar que estos métodos no son exactos debido a la heterogeneidad del follaje, siendo difícil obtener un valor representativo para la vegetación que se esté analizando (Gerrits M. , 2010). Se ha demostrado que al aumentar el número de colectores y el cambio de posición de los mismos de forma continua, aumentan la exactitud de la medida.

Como ya se comentó en el capítulo 2.1.2.4 el flujo cortical se puede estimar instalando una manguera cortada a la mitad enrollada de forma de espiral al tronco y conectarlo a un colector en el suelo. Se recomienda también una muestra representativa de mediciones de este flujo siendo como mínimo 15 por parcela un número adecuado. Con la intención de caracterizar este flujo de la mejor manera se sugiere que los árboles tengan características dasométricas diferentes.

Giraldo (2000) comenta que para obtener el valor del flujo cortical en mm se usa la estimación de la proyección del área de la copa. Esta permite convertir volúmenes de escurrimiento a lámina de agua uniformemente distribuida debajo de la muestra de árboles (Ecuación 4-5).

$$SF = \frac{V_R}{A_c} \quad (4-5)$$

Dónde:

$SF$ : Flujo cortical ( $mm$ )

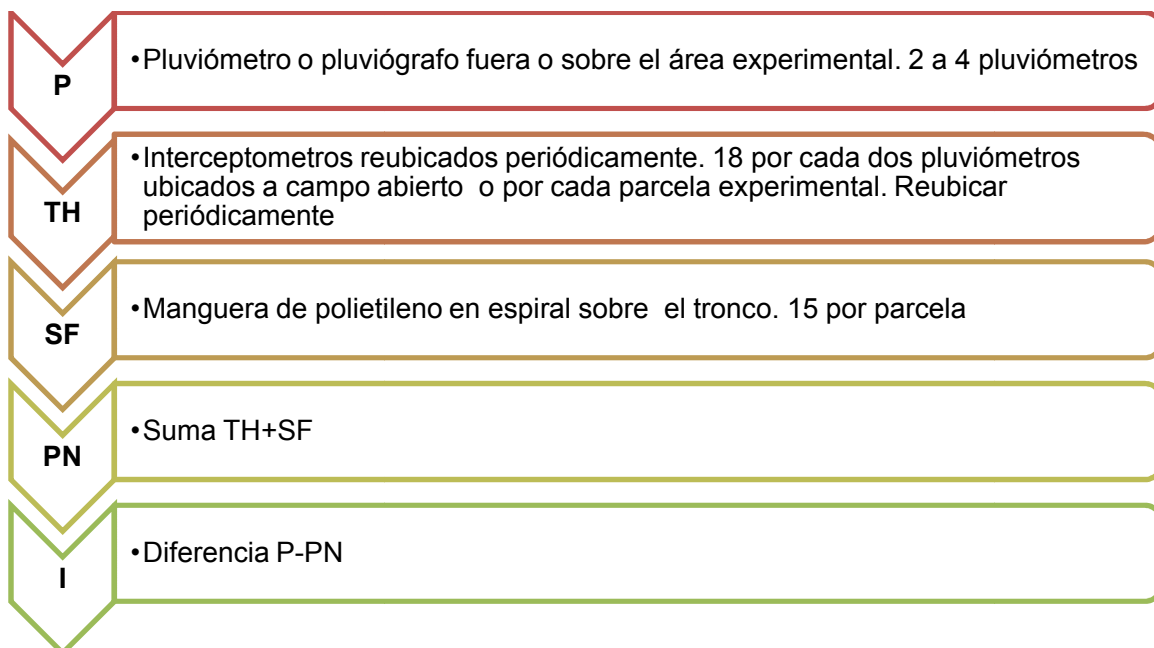
$V_R$ : Volumen de agua recolectada ( $l$ )

$A_c$ : Área de proyección de la copa ( $m^2$ )

Si se desea una mayor precisión en la medición del flujo cortical lo deseable sería realizar la medición de esta variable en cada uno de las especies pertenecientes a la cobertura vegetal (árboles en el caso de bosque), y llevar todo el volumen recolectado a un gran tanque de almacenamiento. Posteriormente este volumen se convierte en lámina dividiéndolo por el área de la zona de estudio.

En la Figura 4-42 se presenta un resumen de las variables y técnicas de medición convencionales para su registro.

**Figura 4-42:** Resumen de técnicas de medición de variables del proceso de interceptación



### Revisión de la calidad y análisis de las mediciones

Antes de pasar a la etapa de modelación es necesario realizar un análisis de la información registrada valiéndose de técnicas estadísticas con la intención de identificar anomalías en las series registradas o errores de medición.

Para las variables meteorológicas es importante reconocer el rango de las mediciones obtenidos, y compararlos con los valores obtenidos de la media climática seleccionada en la investigación preliminar, con la intención de identificar valores por fuera de dichos

rangos y relacionarlos con fenómenos climáticos propios de la zona de estudio. De encontrarse vacíos en las series de tiempo registradas, será recomendable utilizar técnicas para complementar dichas serie. Dentro de estas técnicas se destacan los promedios aritméticos, ponderaciones, correlaciones lineales y las curvas de doubles masas, siempre valiéndose de información de estaciones vecinas.

Se recomienda iniciar con un análisis de estadística descriptiva de los flujos de agua, calculando medias, varianzas, coeficientes de asimetría y de varianza, curtosis y el rango de las mediciones. Es importante realizar estos cálculos después de cada evento, para los análisis espaciales, y al terminar la etapa de experimentación, con los resultados obtenidos de los análisis preliminares, para entender la naturaleza temporal del proceso. Con la intención de reconocer el comportamiento de las mediciones se recomienda construir diagramas de cajas y patillas (BOX-PLOT) e histogramas de frecuencias, para reconocer posibles eventos extremos, donde se encuentran concentradas las mediciones y su posible distribución de probabilidad (Normal, exponencial, gumbel, etc).

Si se tienen varias parcelas experimentales, ya sea dentro de la misma cobertura o en diferentes, se puede aplicar una prueba ANOVA para distinguir diferencias significativas entre parcelas. El análisis de varianza se deriva de la partición de la variabilidad total en las partes que la componen. ANOVA establece que la variabilidad total en los datos, medida por la suma de los cuadrados total, puede ser dividida en una suma de los cuadrados de la diferencia entre los promedios de los tratamientos y el gran promedio total más una suma de los cuadrados de la diferencia de las observaciones entre tratamientos del promedio del tratamiento. ANOVA, nos da la herramienta para distinguir si un factor afecta la respuesta en promedio.

### **Preparación de datos para modelación**

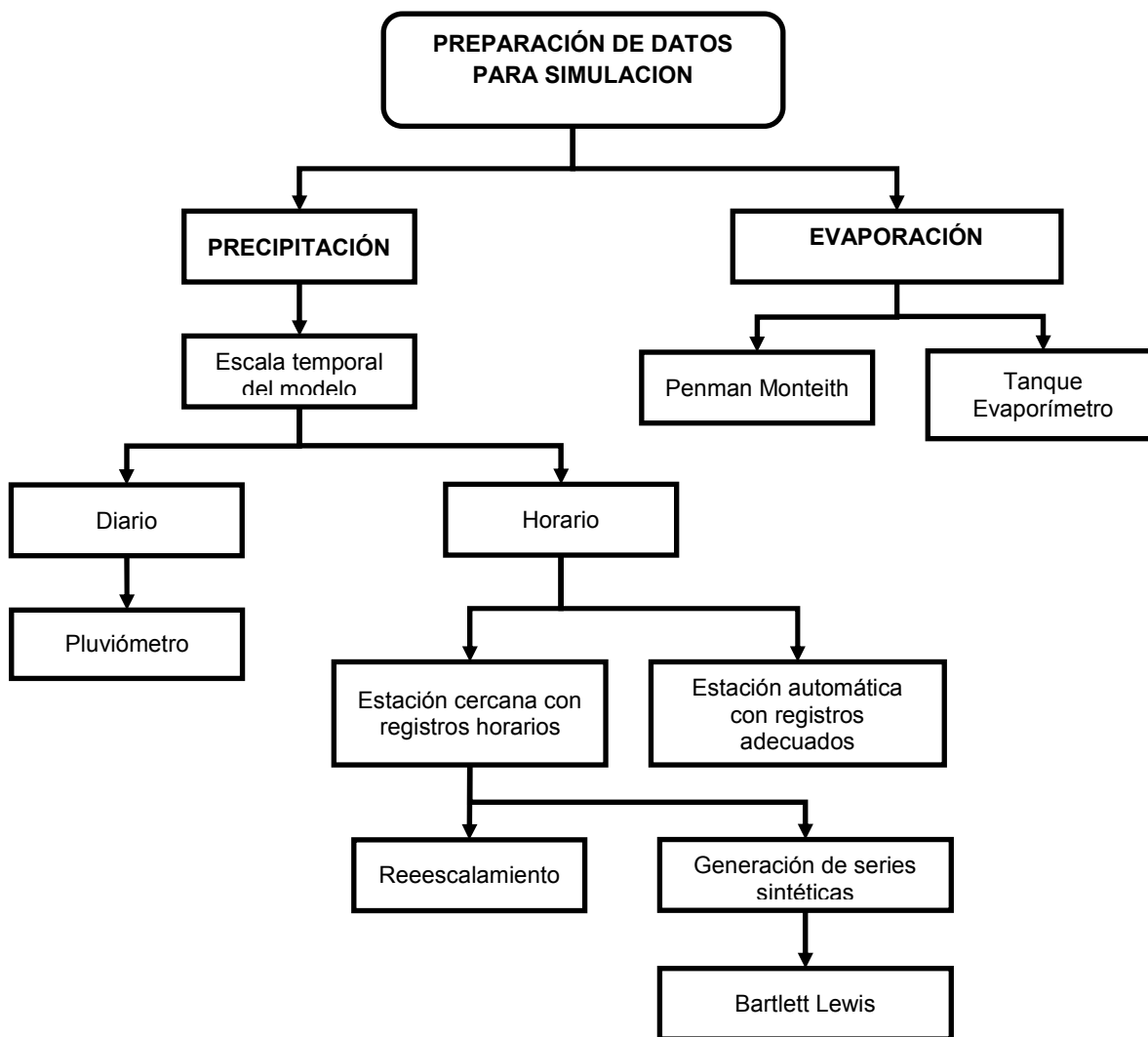
Antes de iniciar la etapa de aplicación del modelo matemático es necesario reconocer las escalas temporales a las cuales se ha medido la información hidrometeorológica, debido a que los modelos planteados para el cálculo de la interceptación, se dedujeron para ciertas escalas de tiempo las cuales se deben cumplir para ser consistentes en su aplicación. En el caso del modelo de Rutter (1971) y sus modificaciones (Valente *et al*, 1997) se debe trabajar con tasas de precipitación y evaporación a escala horaria. Si solo se tienen valores diarios de precipitación será necesario valerse de técnicas de desagregación

como el modelo de Bartlett-Lewis, el cual se basa en la teoría de arribos poissonianos (Casado & Bartual, 1998). La utilización de esta técnica también dependerá de los recursos disponibles para la investigación, ya que el registro horario estará condicionado por los instrumentos instalados.

De las variables presentadas en la Figura 4-41 se resaltan las temperaturas máximas y mínimas, la cuales son utilizadas en la estimación de la evaporación potencial mediante la ecuación de Penman Monteith. La humedad relativa, la insolación o sus equivalente en radiación, y la velocidad del viento, mejoran la estimación de esta variable al introducir un mayor número de efectos del ambiente en el proceso, pero de no tenerse la capacidad de instalación de estos instrumentos o la estación cercana al experimento no los tiene, se pueden estimar a través de expresiones matemáticas que relacionan las condiciones latitudinales y altitudinales con estas variables. También tiene en cuenta la época del año para efectos del cálculo de radiaciones. Los investigadores que han propuesto los modelos dinámicos de interceptación de lluvias (Rutter *et al*, 1971; Gash J. , 1979; Gash *et al*, 1995; Valente *et al*, 1997) han encontrado resultados consistentes en las salidas utilizando la ecuación de Penman Monteith. Con la intención de ser más precisos en esta aproximación es importante tener información relacionada con las características alométricas del cultivo para el cálculo de la resistencia aerodinámica (alto, ancho, área de la copa, diámetro a la altura de pecho, etc). Como se mencionó anteriormente las dos variables de forzamiento de los modelos de interceptación de lluvias son la precipitación incidente y la evaporación potencial que se puede presentar dese las coberturas vegetales, por lo que en la Figura 4-43 se presenta una guía de los posibles pasos a seguir para preparar los datos que se utilizaran en la implementación de dichos modelo. En el caso de la precipitación se observan dos caminos en función de la escala temporal del modelo que se desee implementar. El primer caso es para los modelos que funcionan con registros horarios donde las mediciones de los pluviómetros son adecuados para ser utilizados. Para los modelos que funcionan a escala horaria se puede presentar que las mediciones de la estación automática posterior de ser agregados de horarios a diarios, no sean iguales a los medidos por los pluviómetros, es decir, no coinciden las medidas de la estación automática y las del pluviómetro. Cuando sucede lo anterior se sugiere desagregar la serie diaria utilizado la técnica de Bartlett Lewis. El otro caso que no implica implementar una técnica de desagregación es cuando los registros agregados de

precipitación de escala horaria a diaria son similares a los medidos por los pluviómetros instalados sobre la cobertura o en un área despejada cercana.

**Figura 4-43:** Proceso de preparación de datos para su implementación en modelo dinámicos de interceptación de lluvias



#### 4.3.2. Protocolo de modelación del proceso de interceptación de lluvia

Buscando generar una guía la cual se pueda seguir cuando se desee modelar el proceso físico de interceptación de lluvia por coberturas vegetales, se han adaptado los protocolos de modelación planteados por Domínguez (2007) y por Camacho & Diazgranados (2003). En la Figura 4-44 se presenta una propuesta de protocolo de modelacion posterior a la verificación de la calidad y homogeneidad series registradas.

Es preciso que para este momento de la investigación se haya definido el programa de computador en el cual se van a escribir los algoritmos que representarán los fenómenos estudiados. Esta elección debe obedecer a la complejidad de los modelos que se desean implementar, los tiempos computacionales y el conocimiento previo del investigador en temas de programación.

### **Estudio y verificación del modelo matemático**

Esta etapa de modelación se inicia con ejercicios controlados ingresando señales que sean de fácil reconocimiento por el modelo y que su salida ya haya sido estudiada previamente con la intención de realizar comparaciones y verificar el buen funcionamiento del código. Respecto los parámetros se sugieren utilizar los citados en la bibliografía. Como ejercicio controlado se replicó la modelación realizada por Rutter *et al* (1971) en Pino con las tasas de precipitación utilizadas por este investigador, y se verificó que la curva de almacenamiento en el follaje fuera similar.

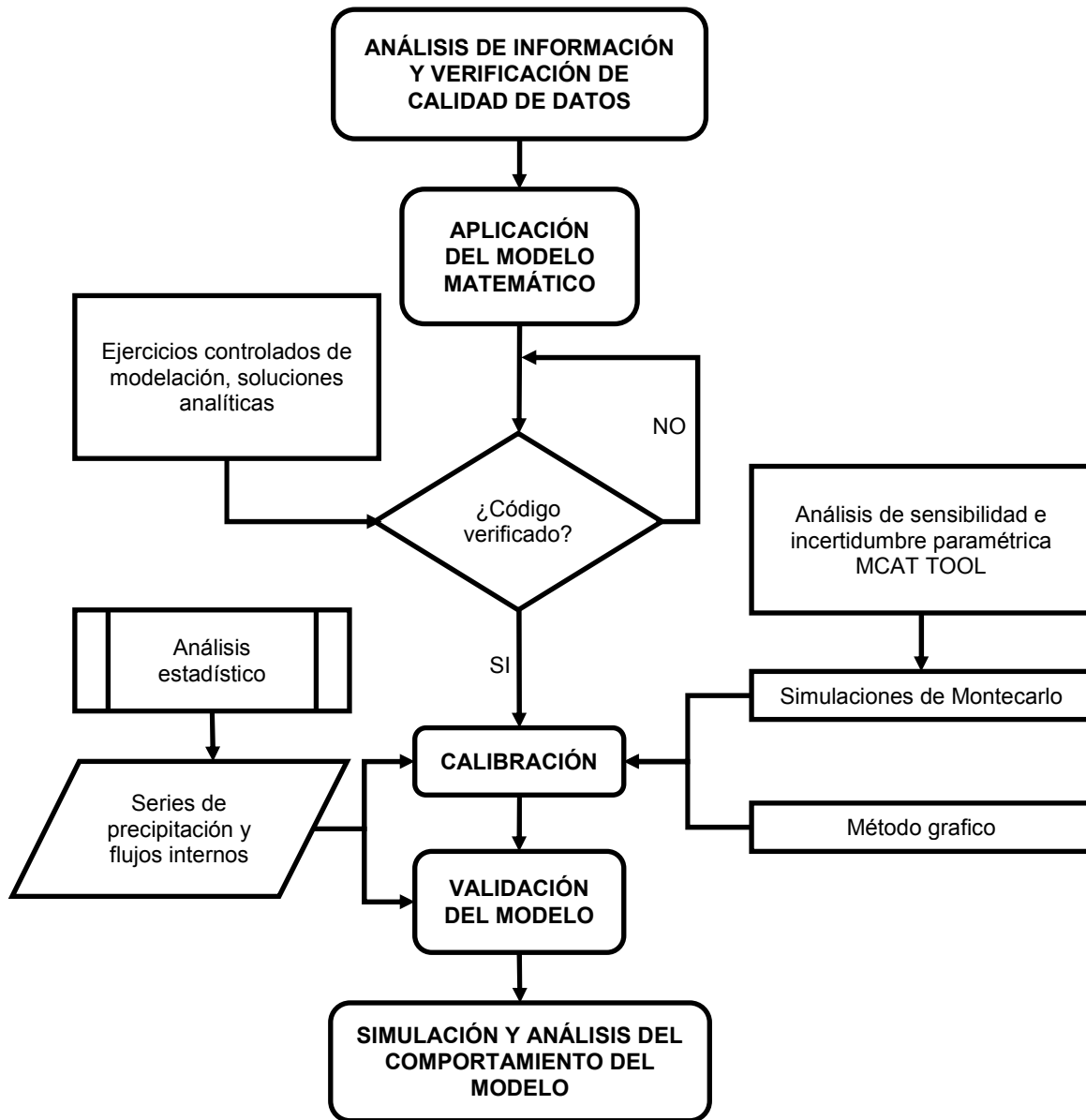
### **Calibración del modelo matemático**

Con la verificación del funcionamiento óptimo del modelo, se procede a su calibración, la cual se define como la estimación de los parámetros que permiten que los datos observados y los modelados, sean representados mediante un modelo matemático. Cuando se lleva a cabo un proceso de modelación, en todos los fenómenos, no es posible que un modelo sea capaz de representar el fenómeno a cabalidad. Lo anterior se debe a diferentes fuentes de incertidumbre que impiden al modelador encontrar un modelo que represente en detalle un proceso físico. Camacho & DíazGranados (2003) destacan los factores externos (aspectos ambientales, políticos, sociales y tecnológicos), la incertidumbre en las entradas (INPUT), la incertidumbre en la estructura del modelo (Entendimiento incompleto o descripciones simplificadas) e incertidumbre paramétrica.

Para realizar la calibración de parámetros existen diferentes técnicas con diversos grados de complejidad. En este ejercicio se presentan dos; un método gráfico el cual permite identificar parámetros de una forma sencilla a través de expresiones analíticas y otra más elaborada basada en las simulaciones de Montecarlo, las cuales se basan en la generación de números aleatorios con cierta distribución de probabilidad. El rango de generación de los números aleatorios depende de la física del proceso y de los estudios

precedentes donde se hayan propuesto ciertos rangos donde cada parámetro represente el fenómeno.

**Figura 4-44:** Protocolo de modelación propuesto para simular el proceso de interceptación de lluvias por coberturas vegetales



Adaptado de Domínguez (2007) y Camacho & Diazgranados (2003).

Posterior a esto se alimenta el modelo realizando cálculos determinísticos con dichas entradas, y se escogen los valores que minimicen o maximicen la función o funciones objetivo propuestas (Análisis multiobjetivo).

En general la calibración se realiza con una fracción de los datos. Se recomienda que para la calibración de los modelos del proceso de interceptación se tome el 50% de los registros escogidos de forma aleatoria, buscando evitar que los parámetros se sesguen a la estacionariedad debida a la influencia de la ZCIT en el régimen hidrológico.

Es recomendable soportar la decisión de la selección de los parámetros del modelo mediante análisis de sensibilidad e identificabilidad paramétrica. Para tal efecto se sugiere utilizar MCAT TOOL, complemento de MATLAB® que permite realizar estos análisis y adicionalmente verifica bandas de incertidumbre y predictibilidad del modelo.

La calibración utilizando técnicas robustas basada en métodos estocásticos no deben ser un limitante para investigadores y académicos que no estén relacionados con estas, por lo que la estimación de parámetros a través del método grafico es una buena aproximación. Es importante que el método grafico tiene en su estructura interna un fundamento físico y suposiciones que han sido comprobada por los investigadores con resultados consistentes en las salidas del modelo.

### **Validación del modelo matemático**

La validación del modelo se realiza con los parámetros identificados en la etapa de calibración, y se estudia la agregación de los valores modelados con los observados en campo. Lo anterior se hace con el fin de constatar que el modelo es capaz de representar el fenómeno que se esté estudiado. Se realiza con los datos que no se utilizan en la etapa de calibración, es decir el 50% restante. Con la intención de cuantificar las diferencias entre valores simulados y los registrados se sugiere se realicen análisis de estadística descriptiva de los dos grupos de datos de salida y se comparen.

Otros valores que pueden compararse para conocer la capacidad predictiva del modelo son el porcentaje de cada variable hidrológica respecto la precipitación incógnita, la cantidad de agua total para el período de análisis de cada variable, y las diferencias entre los simulados y los registrados acumulados. Además es recomendable se estimen los estadísticos objetivos de minimización en la etapa de calibración, con la intención de reconocer la consistencia del modelo en sus salidas.

Si se han calibrado y validado varios modelos, las medidas de eficiencia (funciones objetivo) serán útiles para evaluar cual tuvo el mejor desempeño y mayor consistencia en las salidas del proceso físico. Para realizar una inspección más rápida de la agregación de los modelos con las mediciones, se recomienda realizar gráficos de cada variable con la precipitación neta y diagramas de barras por eventos, con la intención de identificar las similitudes entre los observados y los simulados. También graficar los acumulados en el tiempo para distinguir las diferencias entre las diferentes salidas al final del periodo de validación.

### **Simulación del proceso de interceptación**

Ya identificados los parámetros óptimos del modelo y validado el funcionamiento del mismo a través de comparaciones entre los valores registrados y los simulados, se podrá proceder a la implementación de los mismos.

La implementación del modelo obedecerá al objeto de estudio y los posibles escenarios de simulación planteados por los investigadores, como los que se presentan a continuación:

- Calculo de balances hídricos
- Cuantificación de efectos de las coberturas vegetales en la hidrología de cuencas urbanas
- Efectos de fenómenos macroclimáticos en los flujos de agua que se presentan dentro de las coberturas vegetales
- Efecto del cambio de coberturas vegetales en el balance hídrico e identificación de aumentos o disminuciones en los diferentes componentes del ciclo hidrológico.
- Cambios en patrones de recirculación global al modificar las características de las coberturas vegetales
- Identificación de coberturas vegetales que minimicen caudales picos en cuencas hidrográficas por el efecto de la interceptación de lluvias.
- Para el caso de cultivo, es posible realizar una cuantificación mas precisa de las necesidades hídricas de cultivo, en función de su etapa de crecimiento y sus distancias de siembra.

La posibilidad de simular alguno o varios de los escenarios antes planteados dependerá de la información disponible, la escala de medición, la longitud de la serie y las investigaciones anteriores con fines o coberturas vegetales similares.

En el caso de tenerse solo registros de precipitación en el área de estudio, el investigador podrá realizar una aproximación a la estimación de los flujos de agua que resultando del proceso de interceptación valiéndose de los valores de los parámetros reportados en la literatura para coberturas con características similares. La evaporación potencial se puede estimar con la información meteorológica de la estación climática más cercana o con características (altura, cobertura, régimen de precipitación, temperaturas medias) similares.

Con la implementación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia se podrán calcular los diferentes flujos internos dentro de la estructura vegetal analizada, para al final conocer la cantidad de agua que alcanza el suelo. Estos modelos se pueden acoplar a otros que caractericen fenómenos de infiltración, movimiento de agua en la zona vadosa, o de reinterceptación de lluvias por el suelo forestal.

### **Análisis post-simulación**

Ya obtenidas las salidas de la simulación de los modelos de interceptación de lluvias bajo alguno de los escenarios antes mencionados, es posible realizar análisis estadísticos respecto las salidas, realizar cálculo de porcentajes de cada variable hidrológica respecto la precipitación incidente, calcular las cantidades de agua de cada variables al finalizar el periodo de análisis, y analizar el efecto de la interceptación y su relevancia en los flujos de agua que se presentan en una cuenca.

### **4.3.3. Discusión**

Posterior a la búsqueda de publicaciones relacionadas con temas de interceptación en el país, se evidenció una heterogeneidad en las metodologías utilizadas para registrar las variables hidrometeorológicas. Este fue el punto de partida para la propuesta presentada en este documento, y que reúne las etapas de medición y posterior uso de esta información en la implementación de modelos matemáticos.

Se propuso entonces una secuencia de pasos para que el proceso fuera claro y secuencial, iniciando con la definición del objeto del estudio, la selección del área a estudiar, la caracterización de la cobertura vegetal y la instrumentación. Es importante entonces realizar una caracterización adecuada de las coberturas vegetales, identificando sus características dasométricas. Una de las entradas más sensibles de los modelos de interceptación de lluvias es la fracción de vacíos ( $c$ ), la cual se estima mediante métodos fotográficos, siendo necesario entonces, que se haga un muestreo representativo.

Las variables de forzamiento son la precipitación incidente y la evaporación potencial desde las coberturas vegetales. Esta última variable se recomienda se estime utilizando la ecuación de Penman Monteith, la cual ha arrojado resultados satisfactorios en otras investigaciones. Se hace entonces necesario que al menos se registren las temperaturas máximas y mínimas, pero de ser posible medir un mayor número de variables, esto mejorara la estimación de la evaporación. En el caso de la precipitación incidente su medición *in situ* evita los efectos de variabilidad espacial, que en algunos casos se convierten en sobre o subestimaciones de las pérdidas por interceptación.

Es importante conocer con anterioridad el modelo matemático que se va a implementar, esto guiará el registro de variables y permitirá obtener valores que sean utilizables en la fase de simulación del proceso de interceptación

La metodología de modelación propuesta es una guía donde se presentan los pasos que se recomienda seguir para entender y simular el proceso de interceptación por coberturas vegetales, siendo relevante la etapa de medición de variables hidrometeorológicas, ya que de la confiabilidad de estos registros dependerá la adecuada interpretación de este proceso físico.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

La presente investigación se desarrolló en varias etapas, según la estrategia metodológica seguida: una revisión de los modelos dinámicos de interceptación de lluvias, la contextualización de las investigaciones referentes al tema de interceptación en el territorio nacional, la implementación de dichos modelos en un estudio de caso, y por último, se presentó una propuesta metodológica para la modelación del proceso de interceptación de lluvias. De las discusiones presentadas en el capítulo 4, se plantean las siguientes conclusiones.

- En Colombia se han realizado estudios de interceptación de lluvias en diferentes tipos de coberturas vegetales, pero solo en aproximadamente el 20% se han implementado modelos matemáticos para describir el proceso físico. A lo anterior se suma que no existe homogeneidad en las metodologías para la medición de variables del proceso de interceptación con fines de modelación, lo que dificulta la interpretación y comparación de resultados entre investigaciones.
- Los resultados de esta investigación y los presentados por Téllez (2003) y Tobón (1999), destacan que la interceptación se encuentra en el rango mencionado por Gerrits (2006) del 10-50% de la precipitación incidente, siendo entonces la cobertura vegetal un regulador de flujos y protector del suelo a efectos causados por eventos extremos. De la implementación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvia en esta investigación, se provee evidencia empírica adicional que el efecto de las coberturas vegetales influye considerablemente en los demás componentes del ciclo hidrológico.
- El proceso de interceptación es dinámico y dependiente de factores como las condiciones meteorológicas locales, las características de la precipitación incidente (duración e intensidad) y las características de la cobertura interceptora, por lo que la

implementación de modelos matemáticos que tengan en cuenta estos efectos se hace necesario para un entendimiento adecuado del proceso.

- En general los modelos matemáticos implementados en esta investigación fueron apropiados para representar el proceso de interceptación de lluvias, presentándose ajustes adecuados entre los valores simulados y registrados. Entre los modelos implementados, los analíticos tuvieron un mejor ajuste en comparación a los físicos. Además de esto, la posibilidad de trabajar en una escala temporal diaria facilita el registro de variables hidrometeorológicas.
- Respecto las técnicas utilizadas en la etapa de calibración se concluye que las simulaciones de Montecarlo ofrecen un soporte más robusto para la estimación de parámetros, pero en caso de que no se pueda utilizar esta técnica, el método gráfico es una aproximación aceptable.
- Para los modelos matemáticos implementados (Rutter Sparse y Gash Sparse) se analizó el comportamiento de los parámetros implícitos en la estructura matemática de los mismos a través de la herramienta MCAT de Matlab y se encontró que el parámetro de capacidad de almacenamiento del follaje ( $S = 1.08mm$ ), es identificable y sensible, en cambio la capacidad de almacenamiento de las ramas y el tronco ( $S_t = 0.0079$ ) resulto ser no identificable e insensible, es decir que en el rango paramétrico cualquier valor podrá minimizar la diferencia entre valores registrados y simulados, y además los efectos al hacer un cambio de este parámetro no son muy grandes sobre las salidas del modelo.
- Si se compararan los valores de los parámetros de capacidad, el del follaje llega a ser cien veces mayor al de las ramas, razón por la que esta estructura intercepta la mayor cantidad de precipitación incidente y el flujo cortical no supera el 1% de los flujos de agua en el proceso de interceptación. Lo anterior se confirma con los registros experimentales para esta variable, donde respecto la precipitación neta llega ser solo el 0.5% de este componente, lo que respalda que algunos investigadores desprecien su estimación.
- De los diferentes escenarios planteados el que estuvo más cercano fue el de Gash Sparse con parámetros estimados con la técnica de simulaciones de Montecarlo (**GSC**).
- Con la validación de los modelos dinámicos de interceptación de lluvias, es posible iniciar con la etapa de simulación de escenarios. Lo anterior debe estar sustentado por

un registro juicioso de las variables hidrometeorológicas y un periodo de seguimiento que sea suficiente para caracterizar el proceso.

- En la metodología propuesta en este documento se hace hincapié en los instrumentos, métodos y escalas de medición de variables adecuados para la caracterización y posterior modelación del proceso físico de interceptación.
- Se presenta una ruta metodológica que tiene en cuenta a los modelos matemáticos y la disponibilidad de recursos, buscando guiar el desarrollo de la investigación, presentando alternativas en función de estos dos factores.
- La presente investigación es un insumo que se espera se convierta en un texto de consulta para investigadores que deseen conocer en una manera más detallada el proceso de interceptación, y que con la metodología propuesta, se tenga un punto de partida para entender, caracterizar, registrar y modelar el proceso de interceptación en el país.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda se simulen los siguientes escenarios, ya entendido el proceso de interceptación y aprovechando las herramientas computacionales desarrolladas en esta investigación:

- Se recomienda se simulen escenarios donde se incluyan los efectos de la variabilidad climática a diferentes escalas temporales (intraanual, interanual e interdecadal) buscando entender y cuantificar el efecto de la cobertura vegetal sobre el ciclo hidrológico. Estos resultados podrían permitir entender la amortiguación de tormentas de diferentes intensidades (bajas y altas).
- También como escenarios de simulación están los que estudian el efecto del cambio climático en la distribución de flujos de agua dentro de las cuencas hidrográficas, destacando los posibles aumentos o disminuciones en la oferta hídrica.
- A lo anteriores escenarios se suman aquellos donde se realicen cambios en la cobertura vegetal, como por ejemplo, la sabanización de la cuenca a amazónica, o en dirección contraria la reforestación de zonas susceptibles a inundación y erosión.
- Una extensión de estos modelos es su acople a procesos de reinterceptación por el suelo forestal y el movimiento del agua en el suelo. La caracterización del proceso podría describir todos los flujos presentes en un ecosistema, entendiendo la interacción suelo-planta-atmósfera de forma detallada.

- Otra entrada importante al volumen de control estudiado en el proceso de interceptación, y que se recomienda acoplar a estos modelos matemáticos, es la precipitación horizontal o la neblina, la cual en ecosistemas de bosque alto andino y páramos genera importantes aportes de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. Para tener una medición de esta variable, se podría instalar una serie de neblinómetros que registre la cantidad de agua que es transportada y que puede ser interceptada por las estructuras vegetales.
- Estos modelos matemáticos se pueden utilizar en los balances hídricos de los sistemas agroforestales, donde se realizaría una estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos y de las tasas de recirculación de agua a la atmósfera.
- La variabilidad espacial del flujo de translocación se debe considerar en futuros estudios buscando encontrar un valor que sea más representativo que la media aritmética.
- Se recomienda que además del proceso físico que caracteriza estos modelos, se ligue con el lavado foliar, el cual es un aporte a la planta que no se ha considerado de forma explícita en los balances de nutrientes.
- En estudios de hidrología urbana, sería un aporte importante conocer como en función del tipo de cobertura vegetal presente en la cuenca será posible reducir los volúmenes de escorrentía.
- Para conocer en detalle las interacciones dentro de los ecosistemas se debe promover la medición de las variables implícitas dentro del proceso de interceptación, tanto dentro como fuera de la cobertura, ya que los valores serán diferentes debido a los microclimas característicos en cada uno. Se recomienda el uso de sensores de humedad del dosel que permitan cuantificar las capacidades de almacenamiento de agua por parte del follaje. También se recomienda se estudie con más detalle la distribución de la radiación en los diferentes estratos de la cobertura vegetal, ya que de esta variable dependerán los procesos de evaporación que según los modelos se suponen constantes en la cobertura, pero que en la realidad son diferenciales, condicionados por los coeficientes de extinción de la luz, la arquitectura y densidad del follaje.
- El realizar la medición de todas las variables del proceso de interceptación a escalas horarias caracterizará mejor este proceso dinámico, permitiendo identificar el amortiguamiento que genera la cobertura vegetal dentro de un evento de precipitación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. N° 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje 56. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. FAO.
- Beven, K. J., & Binley, A. M. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* , 6, 279-298.
- Bo, Z., Islam, S., & Elthair, E. (1994). Aggregation-disaggregation properties of a stochastic model. *Water Resources Research* , 30 (12), 3423-3435.
- Bui EN, B. J. (1992). Stemflow, rain, throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum. *Soil Science Society of America Journal* (56), 242-247.
- Calder, L. (1986). A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology* , 89, 65-71.
- Camacho, L., & DíazGranados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad de agua en ríos-Caso río Bogotá. *Seminario Internacional " la Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos* , 73-82.
- Casado, S., & Bartual, R. (1998). Desagregación de lluvias para aplicaciones en simulación de sistemas de recursos hidráulicos. *Revista de Obras Publicas, Ciencia y Tecnología de la Ingeniería Civil* , 3.378, 25-35.
- Castillo, F., & Castellvi, F. (2001). *Agrometeorología*. Mexico D.F: Grupo Mundi-Prensa.

- Chavez, B., & Jaramillo, A. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de Café (*Coffea Arabica* L.) al sol y bajo Sombra. *Cenicafé* , 50 (2), 97-105.
- Chow, V., Maidment, R., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGrawHill.
- 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.
- David, J., Valente, F., & Gash, J. (2005). *Evaporation of intercepted rainfall* (Vol. Chapter 43). In: Anderson, M. (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons. Ltd.
- Domínguez, E. (2007). *Notas de Clase de la asignatura Procesos Estocásticos Aplicados a la Hidrología*. Bogotá D.C.: Universidad Pontificia Javeriana.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* , 105, 43–55.
- Gash, Lloyd, & Lachaud. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology* , 170, 79-86.
- Gash, Muzylo, Llorens, Valente, Keizer, & Domingo. (2009). Review: A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology* (370), 191–206.
- Gerrits, M. (2006). Measuring forest floor interception in a beech forest in Luxembuourg. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* , 3, 2323 – 2341.
- Gerrits, M. (2010). *The role of interception in the hydrological cycle*. Netherlands, Delft: VSSD.
- Giraldo, J., & Jaramillo, A. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrientes en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo. *Cenicafé* 55 , 1, 52-68.
- Giraldo, L. (2002). *Memorias: Hidrología Forestal (Influencia de los Bosques)*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Departamento de Ciencias Forestales.

- González, J. (2000). Monitoring cloud interception in a tropical montane cloud forest of the South western Colombian Andes. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling* , 1 (1), 97-117.
- Hernandez, L. (2007). *Tesis de Maestría: Medición y análisis de la interceptación de lluvia en un bosque de Encino: aplicación a la microcuenca la barreta*. Queretaro, Mexico: Universidad Autonoma de Queretaro, Facultad de Ingeniería.
- Jaramillo, A. (2003). La lluvia y el transporte de nutrientes dentro de ecosistemas de Bosque y cafetal. *Cenicafe* , 54 (2), 134-144.
- Jaramillo, A., & Chavez. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de Café (*Coffea Arabica* L.) al sol y Bajo Sombra. *Cenicafé* , 50 (2), 97-105.
- Jaramillo, A. (2003). La lluvia y el transporte de nutrientes dentro de ecosistemas de Bosque y cafetal. *Cenicafe* , 54 (2), 134-144.
- Jaramillo, A. (2005). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones. *Revista Academica Colombiana de Ciencias* , 29 (112), 371-382.
- Jarvis, A. (2000). Measuring and modelling the impact of land-use change in tropical Hillsides: The Role of Cloud Interception to Epiphytes. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling* , 118-148.
- Koutsoyiannis, D., & Onof, C. (2005). *HYETOS A computer program for stochastic disaggregation of fine-scale rainfall*. National Technical University of Athens, Faculty of Civil Engineering, Department of Water Resources and Environmental Engineering.
- León, J., Gonzáles, M., & Gallardo, J. (2010). • Distribución del agua lluvia en tres bosques altoandinos de la cordillera central de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* , 63 (1), 5319-5336.
- Llorens & Domingo. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology* , 35, 37-54.

- Llorens P, P. R. (1997). Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology* (199), 331-345.
- Madsen, H. V. (2007). *Model Calibration Guideline*. Hørsholm, Denmark.: Harmonised modeling tools for integrated basin management (Harmoni-CA).
- Martínez, J. (2001). *Tesis (Ingeniero Agrónomo): Hidrología del bosque húmedo tropical*. Bogotá D.C : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, Alfomega.
- Monteith, J. (1985). Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. *Advances in Evaporation ASAE* , 4-12.
- Rutter, J, & Morton, A. (1977). A predictive model of rainfall interception in forests. III: Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology* (14), 567-688.
- Rutter, J., Morton, A., & Robins, P. (1975). "A predictive model of rainfall interception in forests". II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology* , 12, 367–380.
- Rutter, Kershaw, Robins, & Morton. (1971). "A predictive model of rainfall interception in forests". I. A derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* , 9, 367–384.
- Shannon, R. E. (1988). *Simulación de sistemas diseño, desarrollo e implementación*. México: Trillas.
- Silva, G. (1998). *Hidrología Básica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- Téllez, P. (2003). *Simulación del ciclo hidrológico en tres tipos de uso del suelo de la Amazonía colombiana*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Tobón. (1989). *Evaluación de pérdidas por interceptación de la precipitación en tres coberturas vegetales: Cupressus lusitánica Mill, Pinus patula y bosque natural secundario*. Medellín: Tesis Ingeniería Forestal. Universidad Nacional de Colombia.
- Tobón, C. (1999). *Monitoring and modelling hydrological fluxes in support of nutrient cycling studies in Amazonian rain forest ecosystems*. Amsterdam, Netherlands: Tropenbos Series 17.
- Tobón, C., Bouten, W., & Sevinj, 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, 40–57.
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55 (TR-55)* . United States Department of Agriculture: Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.(Second Edition ed.).
- Valente, David, & Gash. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology* (190), 141–162.
- Van Dijk, A., & Bruijnzeel, L. (2001). Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. MOdel description. *Journal of Hydrology* (247), 230-238.
- Velasquez, S., & Jaramillo, A. (2009). Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera Colombiana. *CENICAFE* , 60 (2), 148-160.
- Veneklaas, E., & Van Ek, R. (1990). Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia. *Hydrological Processes* , 4, 311-326.
- Wagener, Lees, & Wheeler. (2001). *MONTE-CARLO ANALYSIS TOOLBOX USER MANUAL*. London, UK: Imperial College of Science Technology and Medicine.
- Xiao, Q., McPerson, E., Ustin, S., & Grismer, M. (2000). A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research* , 105. 173–188.

