

**MODELAMIENTO DE LOS CAUDALES DE ESCORRENTÍA PARA LAS  
CUENCAS DE LOS RÍOS SURATÁ Y TONA MEDIANTE EL MODELO  
CONCEPTUAL AGREGADO NAM**

**NELSON FERNEY LEÓN CARVAJAL  
TOMAS RENE ROMERO CAYACHOA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2006**

**MODELAMIENTO DE LOS CAUDALES DE ESCORRENTÍA PARA LAS  
CUENCAS DE LOS RÍOS SURATÁ Y TONA MEDIANTE EL MODELO  
CONCEPTUAL AGREGADO NAM**

**NELSON FERNEY LEÓN CARVAJAL  
TOMAS RENE ROMERO CAYACHOA**

**Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniero Civil**

**Director  
JORGE ALBERTO GUZMÁN JAIMES  
Ingeniero Civil M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2006**

*A mi familia*

*Y en especial a mis padres*

*Luis David León y Luz marina Carvajal*

*Por su infinito apoyo*

*Nelson F. León*

*A mi familia*  
*por su incondicional apoyo fuente de*  
*Todas mis fuerzas, a Dalia por su compañía en esta*  
*Etapas de mi vida*  
*Tomas R. Romero*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Universidad Industrial de Santander y en especial, a la Escuela de Ingeniería Civil, por brindarnos la oportunidad de realizar una excelente formación profesional.*

*Al Ingeniero Civil, M.Sc. Jorge Alberto Guzmán J., Director de proyecto, por su valiosa ayuda y orientación oportuna para la exitosa culminación del presente trabajo de grado.*

*Al Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático – GPH, por gran parte del aporte técnico, necesario para el desarrollo de esta investigación.*

*A los compañeros: Adriana Serrano, Giovanni Balaguera y Miguel Acosta, por colaboración en algunos apartes en desarrollo de este estudio.*

# CONTENIDO

<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b><u>1. CUENCA DEL RÍO SURATÁ</u></b> .....	<b>4</b>
1.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RIO SURATÁ .....	4
1.2 GENERALIDADES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS. ....	6
1.2.2 ESTACIONES DE MEDICIÓN DE CAUDALES .....	7
1.2.3 TIPOS DE ESTACIONES UTILIZADAS .....	8
<b><u>2. DATOS Y REGISTROS UTILIZADOS</u></b> .....	<b>10</b>
2.1 PRECIPITACIÓN .....	11
2.1.1 DATOS Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS EMPLEADAS .....	11
2.1.2 LONGITUD DE LOS REGISTROS UTILIZADOS .....	12
2.1.3 ESPACIALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN .....	14
2.1.4 SERIES DE PRECIPITACIÓN OBTENIDAS .....	16
2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	18
2.2.1 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (EPOT) ..	18
2.2.2 CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SEGÚN METODOLOGÍA FAO .....	19
2.2.3 COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO SURATÁ .....	23
2.2.4 DATOS Y ESTACIONES UTILIZADAS .....	23
2.2.5 CÁLCULO DE ETO POR ESTACIONES .....	25
2.2.6 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (EPOT) .....	26
2.2.7 SERIES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN OBTENIDAS .....	31
2.3 CAUDALES DE ESCORRENTÍA .....	32
2.3.1 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS UTILIZADAS .....	32
2.3.2 DATOS UTILIZADOS .....	33

2.3.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS UTILIZADOS .....	34
2.3.4	SERIES DE CAUDAL EMPLEADAS EN EL MODELAMIENTO.....	37
2.4	SERIES EMPLEADAS EN EL MODELAMIENTO.....	39
<b><u>3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA NAM.....</u></b>		<b>40</b>
3.1	MODELO NAM .....	43
3.2	ESTRUCTURA DEL MODELO. ....	45
<b><u>4. APLICACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....</u></b>		<b>54</b>
4.1	APLICACIÓN .....	54
4.2	CALIBRACIÓN.....	55
4.3	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	59
<b><u>CONCLUSIONES .....</u></b>		<b>64</b>
<b><u>RECOMENDACIONES.....</u></b>		<b>66</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>		<b>67</b>
<b><u>ANEXOS.....</u></b>		<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura1. 1 Sectorización de cuencas en Santander.....	4
Figura1. 2 Ubicación de la cuenca del Río Suratá .....	5
Figura 2. 1 Ubicación de las estaciones metereológicas dentro de la CSRL.....	13
Figura 2. 2 Espacialización de la precipitación en la CSRL .....	15
Figura 2. 3 Espacialización en las microcuencas.....	16
Figura 2. 4 Precipitación media diaria cuenca del Río Surata (Ene 70 – Jul 04) .....	17
Figura 2. 5 Precipitación media diaria microcuenca del Río Suratá (Ene 70 – Jul 04) .....	17
Figura 2. 6 Precipitación media diaria Cuenca del Río Tona (Ene 70 – Jul 04).....	17
Figura 2. 7 Ubicación de las estaciones utilizadas para el cálculo de ETo .....	25
Figura 2. 8 Serie de EPot cuenca del Río Suratá (ENE 86- DIC 00) .....	31
Figura 2. 9 Serie de EPot Microcuenca del Río Suratá (ENE 86- DIC 00).....	31
Figura 2. 10 Serie de EPot Microcuenca del Río Tona (ENE 86- DIC 00).....	32
Figura 2. 11 Serie de caudales estación Puente Tona (datos puros) (Oct 84- Jun03) .....	33
Figura 2. 12 Serie de caudales estación Majadas (datos puros) (Jul 91- Jul 05).....	34
Figura 2. 13 Ubicación en el plano de la estación Majadas y Puente Tona.....	35
Figura 2. 14 Caudales de escorrentía cuenca del Río Suratá (mm/día) .....	38
Figura 2. 15 Caudales de escorrentía microcuenca del Río Tona (mm/día).....	38
Figura 3. 1 Interacción de los procesos hidrológicos .....	40
Figura 3. 2 Estructura del modelo NAM .....	45
Figura 4. 1 Hidrográmas medidos, simulados Vs precipitación utilizados en la calibración, estación Majadas .....	57

Figura 4. 2 Hidrográmas de caudales Medidos y Simulados en la calibración, microcuenca para el río Surata.....	57
Figura 4. 3 Hidrográmas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a microcuenca para el río Tona, Estación Puente Tona .....	58
Figura 4. 4 Hidrográmas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación, estación Majadas. ....	60
Figura 4. 5 Hidrográmas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación, microcuenca en el caso de Surata .....	61
Figura 4. 6 Hidrográmas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación microcuenca en el caso de Tona, estación Puente Toana.....	61

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1 Instrumentos de lectura directa y registradores .....	7
Tabla 2. 1 Número y tipo de estaciones utilizadas .....	12
Tabla 2. 2 Estaciones utilizadas para el cálculo de Eto .....	24
Tabla 2. 3 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Suratá Bajo .....	28
Tabla 2. 4 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Suratá Alto .....	29
Tabla 2. 5 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Charta .....	28
Tabla 2. 6 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Vetás .....	28
Tabla 2. 7 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Tona .....	30
Tabla 2. 8 Información general de las estaciones Majadas y Puente Tona .....	33
Tabla 3. 1 Parámetros usados por el modelo NAM .....	53
Tabla 4. 1 periodos seleccionados para calibración .....	54
Tabla 4. 2 Parámetros calibrados por el modelo NAM .....	58
Tabla 4. 3 Periodos seleccionados para validación .....	59
Tabla 4. 4 Parámetros de validación .....	62
Tabla 4. 5 Comparación de caudales máximos y mínimos medidos y simulados .....	63

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. INFORMACIÓN GENERAL DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS ....	70
ANEXO 2. COBERTURA VEGETAL EN LA CUENCA DEL RÍO SURATA .....	73
ANEXO 3. SERIES DE TIEMPO DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICA.....	77
ANEXO 4. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE $ET_o$ .....	83
ANEXO 5. SERIES DE $ET_o$ . POR ESTACIONES .....	90
ANEXO 6 FACTORES DE CULTIVO $K_c$ . PARA DIFERENTES ETAPAS DE DESARROLLO .....	92
ANEXO 7. SERIES EMPLEADAS EN EL MODELAMIENTO .....	97

## RESUMEN

### TITULO:

MODELAMIENTO DE LOS CAUDALES DE ESCORRENTIA DE LAS CUENCAS DE LSO RÍOS SURATÁ Y TONA MEDIANTE EL MODELO CONCEPTUAL AGREGADO NAM \*

### AUTORES:

Nelson Ferney León Carvajal  
Tomas Rene Romero Cayachoa \*\*

### PALABRAS CLAVES:

Cuenca del Río Suratá; Modelo Hidrológico; NAM; Series de Tiempo; Precipitación-Escorrentía; Evapotranspiración; Calibración; Validación.

### DESCRIPCION:

El siguiente informe de investigación presenta la implementación del modelo NAM para la simulación de caudales de escorrentía aplicado a la cuenca del Río Suratá con resolución temporal diaria, el modelamiento de caudales se realizo a partir de la previa obtención de las series de tiempo de; precipitación evapotranspiración y caudal en mm/día, para un periodo común de registro.

El informe se consigna la información referente a; descripción y localización general de la cuenca en estudio, descripción de la metodología empleada para obtención de las series de tiempo de; precipitación, evapotranspiración y caudal empleadas en el modelamiento, estructura del modelo empleado, y por ultimo la aplicación, calibración y validación del modelo NAM.

En términos generales la aplicación del modelo, muestra un buena simulación con respecto a los caudales medidos, especialmente en los periodos de recesión donde se muestra una adecuada correspondencia entre el hidrograma medido y el modelado, de la misma manera los picos son simulados de manera acertada, especialmente en cuanto a el tiempo en el que este alcanza, en el caso de los valores pico se observa una sub estimados en buena parte de los hidrográmas. El modelo se aplico a nivel de cuenca, donde se obtuvo una adecuada correspondencia entre los mediciones y caudales modelados obteniéndose un coeficiente Nash – Sutcliffe de 0.79, de igual manera el modelo fue aplicado a nivel de microcuencas de los Ríos Suratá y Tona donde se obtuvieron valores del coeficiente de 0.65 y 0.5 respectivamente.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Guzmán Jaimes, Jorge Alberto.

## ABSTRACT

### TITLE:

DISCHARGE MODELING FOR SURATÁ AND TONA BASING USING NAM MODEL \*

### AUTHORS:

Nelson Ferney León Carvajal  
Tomas Rene Romero Cayachoa\*\*

### KEY WORDS:

Suratá river Basin; Hydrological Model; NAM; Time Series; Rainfall-Runoff; Evapotranspiration; Calibration; Validation.

### DESCRIPTION:

The following report of investigation presents the implementation of model NAM for the simulation of catchments run-off applied Suratá River with daily temporary resolution, the modeling of volumes was made from the previous obtaining of the series of time of precipitation, evapotranspiración and volumes in mm/day, for a cummun period of register.

In the report you Hill find information acording to: Description and general location of the river basin in study, description of the methodology used for obtaining of the series of time of precipitation, used evapotranspiración and volume in the modeling, structure of the used model, and finally the application, and prove of the NAM model.

In general terms the application of the model, shows a good simulation acording to the measured volumes, specially in the periods of recession where is a suitable correspondence between hydrograph measured and modeled one, in the same way the tips are simulated of guessed right way, specially as far as the time in which this it reaches, in the case of the values tip one is observed sub considered in good part of hydrograph. The model applied to river basin level, where a suitable correspondence between the modeled measurements and volumes was obtained obtaining a Nash coefficient - Sutcliffe of 0.79, of equal way it models was applied to level of microriver basins of Suratá and Tona where values of the coefficient of 0,65 and 0,5 were obtained respectively.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Guzmán Jaimes, Jorge Alberto.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de los recursos hídricos en nuestro medio ha tomado gran importancia en los últimos años debido a que el acelerado crecimiento de la población en el área metropolitana de Bucaramanga ha traído consigo una creciente demanda en el uso de agua potable, se requiere entonces que los fenómenos que determinan el ciclo hidrológico en nuestro medio sean adecuadamente comprendidos, para de esta manera hacer una correcta estimación del balancee hídrico, poder determinar acertadamente las fuentes de abastecimiento y el potencial hídrico explotable de manera sostenible que garanticen las demandas futuras.

De lo dicho anteriormente y debido a que actualmente en nuestro medio las fuentes de abastecimiento de agua potable provienen en su mayoría de captaciones superficiales, se deriva la importancia del estudio de las corrientes de escurrimiento superficial. Dentro del contexto local parte del estudio de una cuencas comprende la aplicación de modelos, conocidos como modelos de precipitación esorrentía (rainfall-runoff models), con el objeto de simular la conversión de precipitación en esorrentía, las razones por las cuales se recurre a la simulación de caudales son variadas, van desde el análisis para conocer el comportamiento de los procesos hidrológicos de una cuencas, hasta el desarrollo de otras mas complejas que permitan predecir el comportamiento de una corriente a largo plazo o ante eventos extremos. Otro de los propósitos al implementar un modelo, y el cual es propósito del presente estudio, es el de observar el comportamiento de una corriente, en este caso la del Río Suratá, al integrar otras variables de entrada como precipitación y evapotranspiración en un modelo, con el

fin de hacer una comparación de los caudales medidos respecto a los modelados en un punto cercano a la salida de la cuenca.

Una de las principales limitaciones a la hora de implementar un modelo, principalmente aquellos que se consideran complejos, es la limitación en cuanto a disponibilidad de información con variación temporal y espacial de los fenómenos hidrológicos que permitan una aplicación más acertada, otros como NAM, empleado en el desarrollo de la presente investigación, requieren de una moderada cantidad de datos de entrada y escala temporal que puede ser horaria o diaria, sin embargo en el entorno regional se tienen limitaciones en cuanto a mediciones, ya que se cuenta con un escaso número de estaciones que miden y registran los fenómenos hidrológicos de interés para el desarrollo de cualquier investigación en el área de la hidrología, sumado a esto tenemos las rudimentarias técnicas de medición y recolección de información, que repercuten en la fidelidad de la información disponible.

Para a la implementación del modelo NAM que permitiera alcanzar el objetivo ya planteado, se requirió al desarrollo de las siguientes tareas:

- Especializar de parte de la precipitación en el área de la CSRL.
- Obtener las de series de precipitación y evapotranspiración media diaria para la cuenca del Río Suratá y microcuencas que la conforman.
- Analizar las series de caudales de las estaciones Majadas y Puente Tona.
- Seleccionara los periodos de tiempo para la aplicación del modelo NAM.
- Calibrar y validar el modelo aplicado.

El documento que a continuación se presenta, describe en el primer capítulo a la localización general de la cuenca del Río Suratá y algunas generalidades de las estaciones hidrométricas y meteorológicas. En el segundo capítulo se expone la metodología empleada para la obtención de series de precipitación,

evapotranspiración y caudales con resolución temporal diaria en la cuenca del Río Suratá. El tercer capítulo se expone la estructura y operación del modelo NAM. El cuarto capítulo se refiere a la aplicación, calibración y validación del modelo, por último se presentan las conclusiones.

# 1. CUENCA DEL RÍO SURATÁ

## 1.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RIO SURATÁ

Según la sectorización de cuencas en el departamento de Santander propuesta por la CAS, (Corporación Autónoma Regional de Santander), la subcuenca del Río Suratá hace parte del conjunto de subcuencas que conforman la cuenca del Río Lebrija, de la cual también hacen parte las subcuencas; Río Lebrija Bajo, Río Cáchira del Espíritu Santo, Río Lebrija Medio, Río Cáchira Sur, Río Salamanca, Río Lebrija Alto, Río de Oro y Río Santa Cruz, figura1.1.

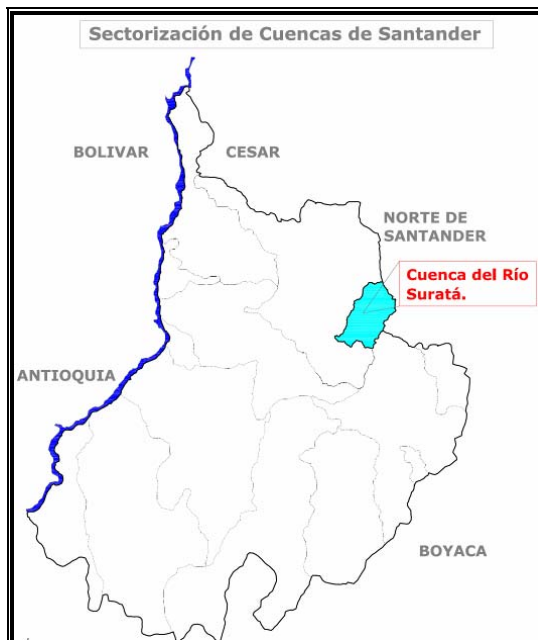
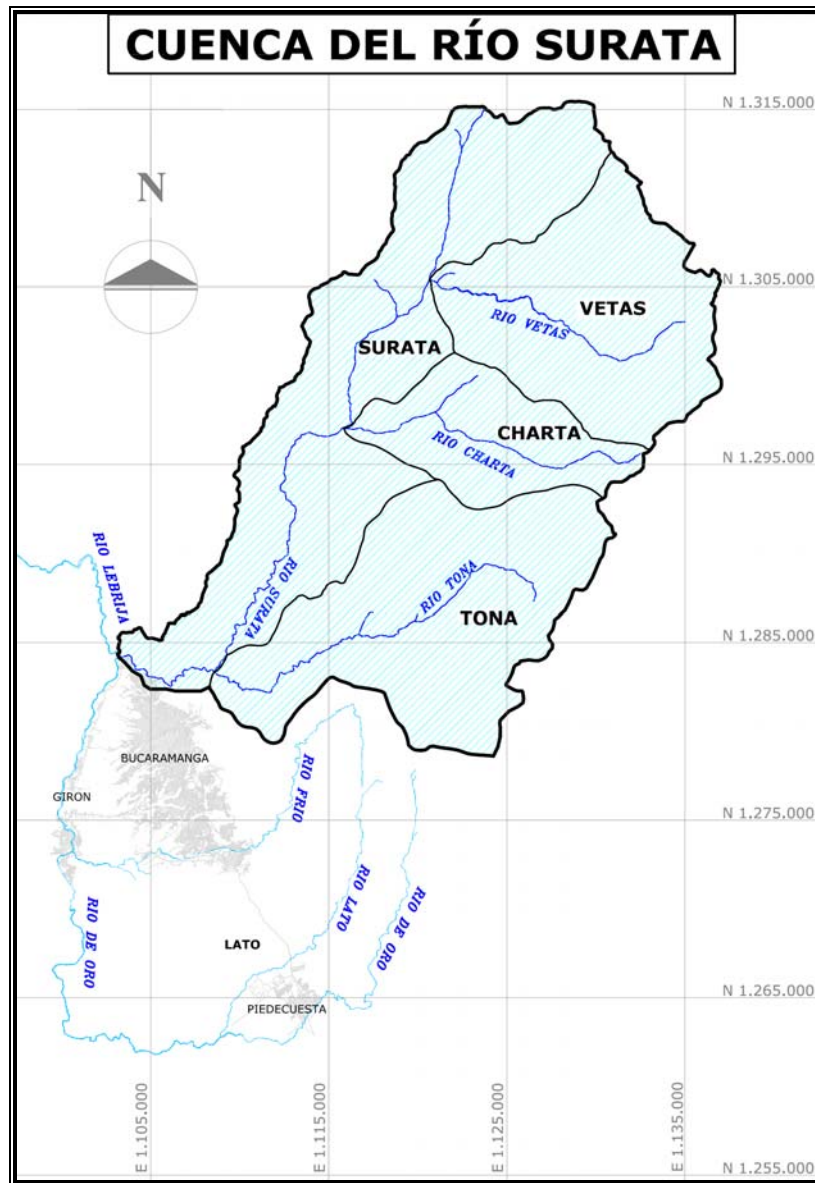


Figura1. 1 Sectorización de cuencas en Santander

Tomado de [www.CAS.gov.co](http://www.CAS.gov.co), y adaptada por los autores (2006)



**Figura1. 2 Ubicación de la cuenca del Río Suratá**

**Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y adaptada por los autores (2006)**

La cuenca del Río Suratá, figura 1.2, se ubica geográficamente al nororiente del departamento de Santander aproximadamente entre las coordenadas 1276800 - 1315700 N y 1103191 - 1137060 E, comprende un área de drenaje de 697 Km<sup>2</sup> una corriente principal de 50 Km. de longitud aproximada. El Río Suratá nace en la

parte alta de la cuenca en inmediaciones del alto de Cachiri y se desplaza con una trayectoria sur a lo largo de curso, su corriente principal se formada por la unión de los Ríos Suratá, Vetas y Charta, hacia la parte baja y a pocos kilómetros antes de la unión con el Río de Oro recibe las aguas del Río Tona. Desde el punto de vista político la cuenca del Río Suratá esta ubicada dentro de la provincia de Soto y comprende parte de los municipios de; Bucaramanga, Matanza, Tona, Charta, Vetas, California y Suratá en la siguiente proporción: Bucaramanga: 3.973 Has. ; Matanza: 7.054 Has.; Tona: 26.138 Has.; Charta: 11.361 Has.; Vetas: 8.085 Has.; California: 2.774 Has.; y Suratá: 10.315 Has.

## **1.2 GENERALIDADES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS.**

### **1.2.1 Estaciones meteorológicas**

Una red meteorológica hace referencia a un conjunto de estaciones meteorológicas en las que se encuentran una serie de instrumentos en los cuales se hacen observaciones, mediciones y/o se registra la información de los fenómenos atmosféricos necesarios para hacer la descripción del estado del tiempo y del clima en una región determinada, las estaciones meteorológicas en nuestro medio se clasifican en principal y ordinaria, dependiendo de la cantidad de variables y la técnica de registro de las mismas.

➤ **Estación meteorológica principal** Las estaciones de este tipo hacen observaciones de precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación solar, brillo solar, evaporación mediante tanque de evaporación, nubosidad y fenómenos especiales, cabe anotar que la mayoría de las observaciones de estas variables se hace mediante elementos registradores.

➤ **Estación meteorológica ordinaria:** este tipo de estación un poco menos sofisticada que la anterior relaciona principalmente las variables; temperatura del aire y precipitación, algunas de estas están dotadas de instrumentos adicionales tales como tanque de evaporación, heliógrafo y anemómetro y a diferencia de las anteriores, gran parte de sus mediciones se hacen mediante instrumentación de lectura directa. La Tabla 1.1 muestra algunos de los instrumentos de lectura directa y registradores que hacen parte de las estaciones meteorológicas.

**Tabla 1. 1 Instrumentos de lectura directa y registradores**

Tomado de [www.hidro\\_unal/9.com.co](http://www.hidro_unal/9.com.co)

<b>VARIABLE</b>	<b>Instrumento de Lectura Directa</b>	<b>Instrumento Registrador</b>
Temperatura del Aire	Termómetro	Termógrafo
Temperatura del Suelo	Geotermómetro	Geotermógrafo
Humedad Atmosférica	Psicrómetro	Hidrógrafo
Precipitación	Pluviómetro	Pluviógrafo
Velocidad del Viento	Anemómetro	Anemógrafo

### **1.2.2 Estaciones de medición de caudales**

La medición de caudales de una corriente de agua se hace de manera indirecta mediante la medición del nivel de agua en un punto del río que posea determinadas características que permita la integridad de los registros, estas observaciones se pueden hacer mediante dos tipos de estaciones, limnimétrica o limnigráfica, en la primera, mediante lecturas directas de reglas graduadas o miras, se mide el nivel del río a determinadas horas del día, generalmente a las 6:00 y 18:00 horas, en el segundo tipo de estación los registros del nivel de agua se hacen de manera continua mediante el limnógrafo, una vez obtenidos los registros de nivel de agua y mediante alguna metodología pueden ser transformados en caudales.

### **1.2.3 Tipos de estaciones utilizadas**

El conjunto de estaciones empleadas para el desarrollo del presente estudio corresponde a estaciones de tipo:

- Climatológica Principal (CP)
- Climatológica Ordinaria (CO)
- Sinóptica Principal (SP)
- Sinóptica Secundaria (SS)
- Pluviométrica (PM)
- Pluviográfica (PG)

En las estaciones anteriormente mencionadas se hacen observaciones de las variables meteorológicas, (precipitación, brillo solar, humedad relativa, recorrido del viento y temperatura), necesarias para el desarrollo del presente proyecto investigativo. Para la obtención de datos de caudales, en nuestro entorno se recurre a las observaciones hechas por medio de las estaciones de tipo limnimétricas (LM) y limnigráficas (LG), que como se menciona anteriormente relacionan nivel del río con caudal.

El manejo de las estaciones y recolección de información esta a cargo de algunas entidades nacionales y locales interesadas en el estudio de los fenómenos hidrológicos, esto con el fin de tomar la información registrada como base para el desarrollo de sus proyectos, entre las entidades que manejan la información hidrológica en nuestro medio están:

- Instituto de Ideología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

- Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB.
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB.
- Federación Nacional de Cafeteros, FNC.
- COLTABACO.
- URBANAS.

## 2. DATOS Y REGISTROS UTILIZADOS

Los datos utilizados para el modelamiento de los caudales de escorrentía del Río Suratá y que el modelo NAM requiere son; series de tiempo de las variables meteorológicas: precipitación, evapotranspiración y temperatura como variables de entrada, series de caudales para la calibración y validación del modelo y parámetros y condiciones iniciales propias del modelo. Las series históricas mencionadas corresponden a valores promedio diarios medidos expresados en mm/día de las variables meteorológicas en el área de la cuenca del Río Suratá, y series de caudal de las corrientes de los Ríos Suratá Tona en puntos cercanos a la salida de las cuencas.

Las series temporales de precipitación y evapotranspiración son obtenidas mediante espacialización de los valores medios diarios de estas variables, en unos puntos dentro y alrededor de la CSRL. Donde se ubican un conjunto de estaciones. Los valores de precipitación son medidos directamente en las estaciones pluviométricas (PM) y/o pluviográficas (PG), por otra parte la variable evapotranspiración no puede ser medida directamente, se requiere entonces que mediante alguna metodología sea estimada.

Las serie de tiempo de caudales requeridas para el modelamiento, al igual que las series de las variables meteorológicas son series con valores medios diarios en mm/día, estas series se obtiene de transformar, en un primer paso, el nivel medidos en el río a valores de caudal medio diario en unidades de  $m^3/s$  y posteriormente expresar este valor en mm/día.

En el desarrollo de los subcapítulos 2.1, 2.2, 2.3 referentes a precipitación evapotranspiración y caudales respectivamente, se hará referencia a los datos, estaciones, longitud de registros, fuente de origen de la información y procedimiento de obtención de cada una de las series requeridas para el modelamiento de caudales mediante NAM.

## **2.1 PRECIPITACIÓN**

El objetivo del presente apartado es describir el procedimiento realizado para obtención de las serie de precipitación media diaria en el área la cuenca del Río Surata y de las microcuencas Suratá y Tona con un periodo de registro continuo y lo mas amplio posible teniendo en cuenta las limitaciones causadas por datos faltantes y longitud de registro de cada una de las estaciones empleadas.

### **2.1.1 Datos y estaciones meteorológicas empleadas**

Los datos utilizados para el análisis de la precipitación fueron obtenidos de un conjunto de 50 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y alrededor del área de la CSRL y que se localizan como se muestra en la figura 2.1, a manera de contextualizar la información de las estaciones en la tabla 2.1 muestra el número y tipo estación meteorológica a cargo de cada entidad, y de cuales se obtuvo información.

En el anexo 1y la tabla 1 se resume la información referente a: código de la estación, nombre, ubicación espacial, ubicación geográfica, municipio y subcuenca de ubicación, fecha de instalación y posible suspensión, entidad que la administra, tipo de estación y estado en el que se encuentra cada una de las 50 estaciones empleadas, es de notar que en la tabla citada, la información de algunas

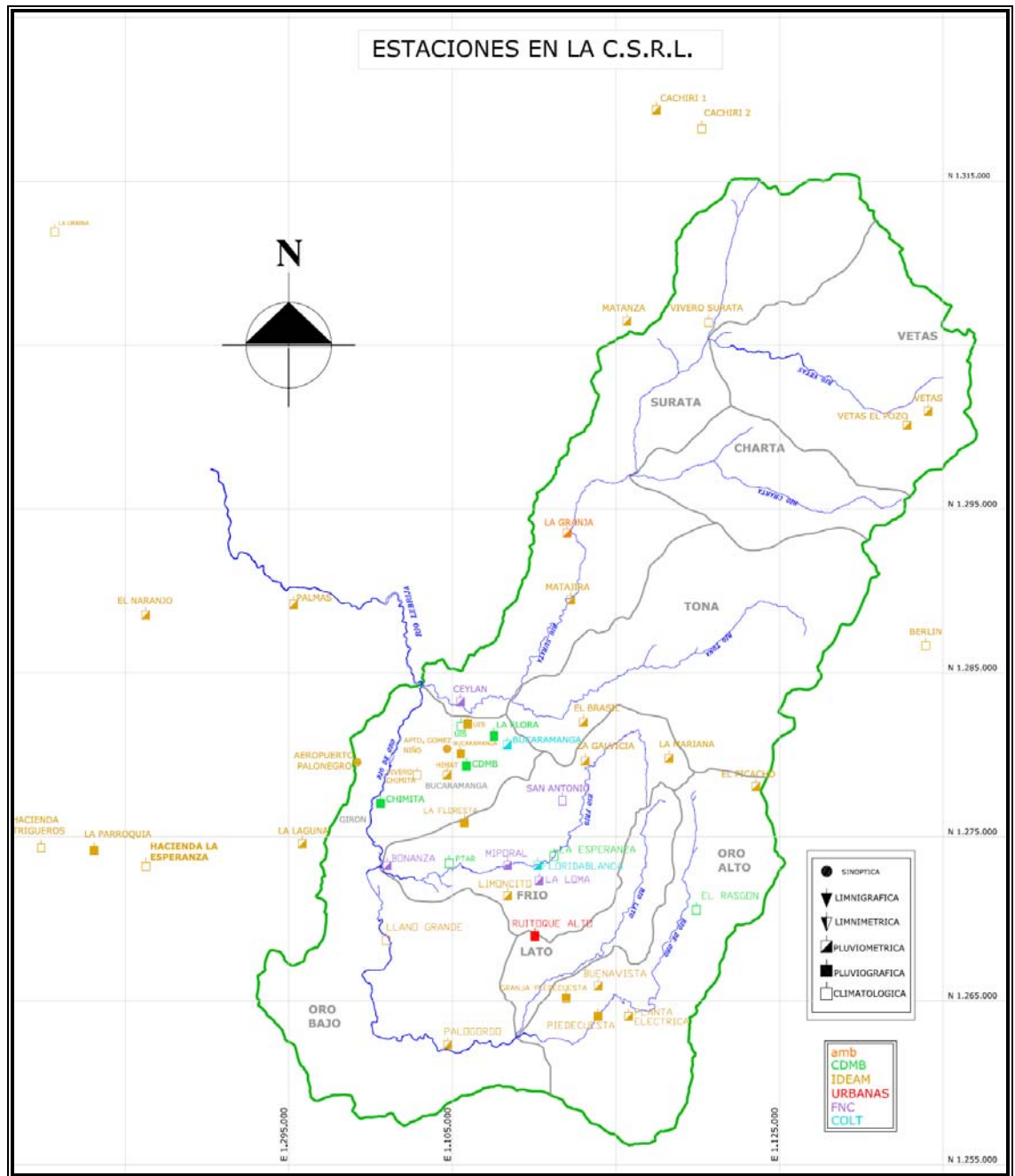
estaciones es incompleta, esto ante la imposibilidad de acceder a información mas completa y detallada.

**Tabla 2. 1 Número y tipo de estaciones utilizadas**

ENTIDAD	NÚMERO DE ESTACIONES	TIPO DE ESTACIÓN					
		SP	SS	CO	CP	PG	PM
IDEAM	34	1	1	4	4	6	18
CDMB	7	0	0	3	1	3	0
FNC	5	0	0	1	0	0	4
COLT	2	0	0	0	0	0	2
AMB	1	0	0	0	0	0	1
URBANAS	1	0	0	0	0	1	0
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>

### 2.1.2 Longitud de los registros utilizados

Con base en la información de precipitación y la longitud de los registros de cada una de las estaciones se decidió que el periodo de obtención de la series de precipitación media diaria comprendería el periodo que va desde el 1 de enero de 1970 hasta el 30 de junio del 2004, se emplearon todas las estaciones que tienen registros comprendidos en este periodo, sin tener en cuenta la longitud de registro, particular de cada estación, la tabla 2 y figura 2 del anexo1, relaciona la información de longitud de registro y datos faltantes de cada una de las estaciones empleadas para la obtención de las serie de precipitación media diaria.



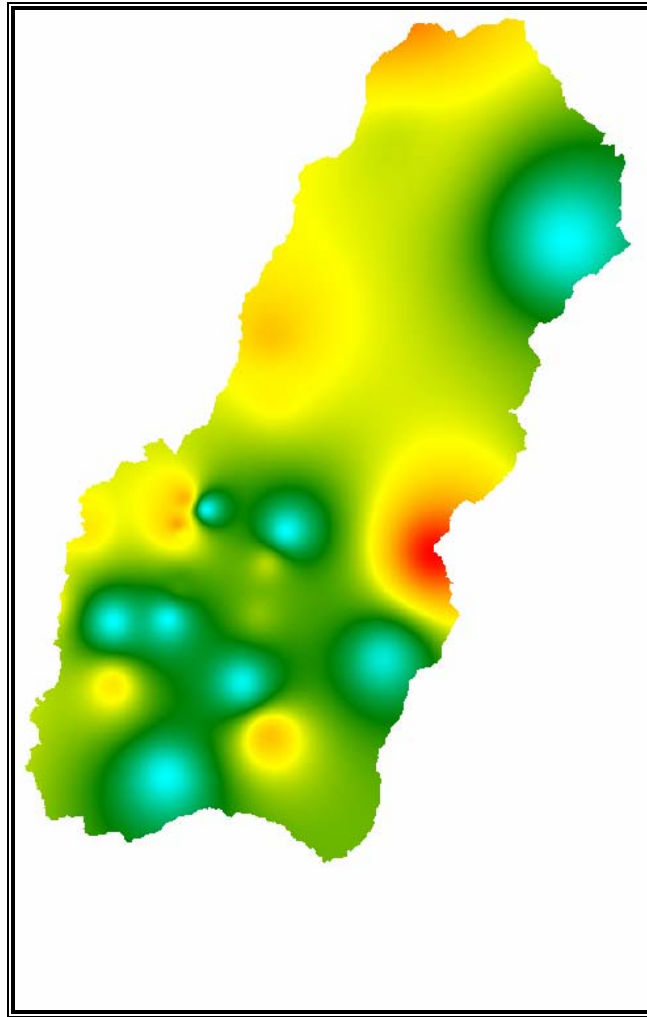
**Figura 2. 1** Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro de la CSRL  
**Fuente:** CERS (Guzmán et al, 2003), y adaptada por los autores

### **2.1.3 Espacialización de la precipitación**

Debido a que el propósito era obtener una serie de precipitación media diaria en el área de la cuenca se hace necesario hacer espacialización de la precipitación ,ya que sobre la cuenca del Río Suratá no se contaba con la suficiente cantidad de estaciones de registro se vio la necesidad de realizar la espacialización para la cuenca superior del río Lebrija con el objetivo de que una vez obtenida y mediante la ayuda del software Spell-map (Guzmán, 2003) se obtuviera una serie de precipitación para la cuenca del Río Surta y las microcuencas de los Río Surata y Tona.

Para realizar el proceso de espacialización de precipitación, se procedió en primera instancia a realizar un proceso de organización de los datos en forma matricial con la ayuda de la herramienta computacional Spell-SDM (Guzmán, 2006) en donde se anexaba al valor de precipitación el día y la estación de registro, y de esta manera generar una serie de archivos en formato txt.

Con los archivos generados por Spell, se procedió a realizar la espacialización mediante la implementación del software Surfer 8, el cual es un sistema que permite realizar mallas de distribución espacial (Grid de una variable mediante la interpolación de archivos de datos que contienen información en X, Y, Z). El método de interpolación dispuesto para realizar la espacialización debía ser tal que arrojara un valor de precipitación media multianual en CSRL que estuviera dentro del rango de valores ya establecido mediante estudios anteriores (Gómez, S, Colegial, J, 2003), a raíz de esto se opto por utilizar el método de Distancia Inversa al Cuadrado, con el que se obtuvieron valores de precipitación media multianual en la CSRL que estaban dentro del rango 1217-1288 mm/año, que fue el rango de referencia.



**Figura 2. 2** Espacialización de la precipitación en la CSRL

Una vez obtenida la precipitación especializada se procedió a determinar la precipitación media para tal fin se empleo el software spell-MAP y spell-AMO (Guzmán, 2006), lo que se hizo básicamente con este software fue una operación lógica entre mapas que consistía en multiplicara la grilla por la mascara de la Cuenca Superior del Río Lebrija, dando como resultado la figura 2.2 a continuación mostrada, la cual describe la precipitación especializada sobre la totalidad de la cuenca CSRL. De igual forma se procedió a multiplicar la mascara de la CSRL por cada una de las mascaras de las microcuencas del Río Suratá

Tona la figura 2.3, este procedimiento fue aplicado de igual manera para cada uno de los días del periodo comprendido entre enero de 1970 y junio de 2004.



**Figura 2. 3 Espacialización en las microcuencas**

**a) Espacialización en la microcuenca del río Surata.**

**b). Espacialización en la microcuenca del río Tona.**

#### **2.1.4 Series de precipitación obtenidas**

Hasta el momento se ha descrito el procedimiento de obtención de las series de precipitación media diaria en las microcuencas de los Río Suratá y Río Tona, el propósito era también obtener una serie de precipitación media diaria en la cuenca del Río Suratá, esta se obtuvo haciendo la ponderación con respecto al área de cada uno de los valores de precipitación, estos valores posteriormente fueron sumados dando como resultado un valor de precipitación media diaria en la cuenca del Río Suratá figura. 2.4, las series de precipitación obtenidas para las microcuencas se muestran en las figuras 2.5 y 2.6

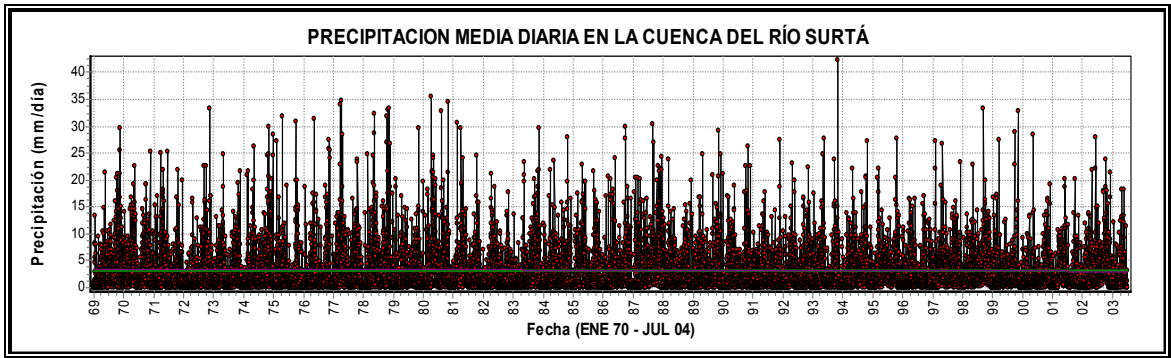


Figura 2. 4 Precipitación media diaria cuenca del Río Surata (Ene 70 – Jul 04)

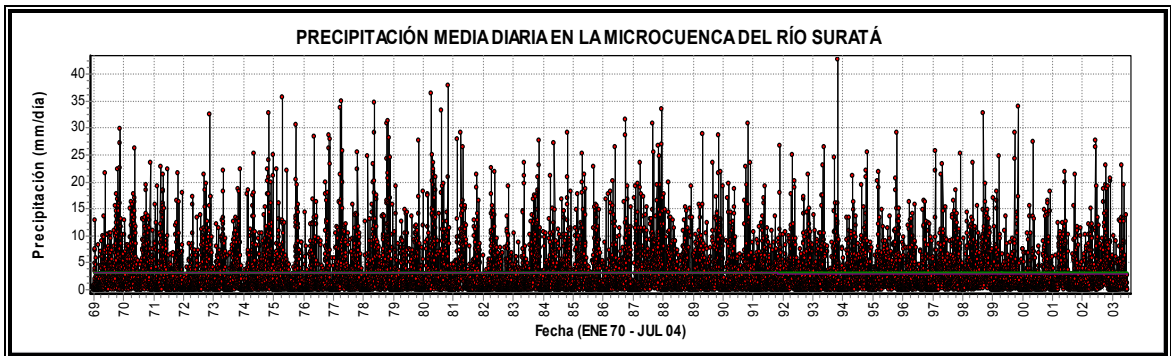


Figura 2. 5 Precipitación media diaria microcuenca del Río Suratá (Ene 70 – Jul 04)

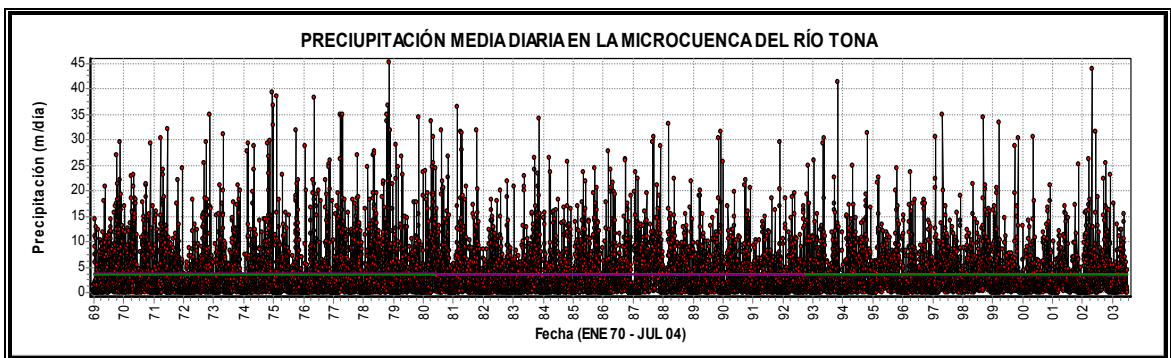


Figura 2. 6 Precipitación media diaria Cuenca del Río Tona (Ene 70 – Jul 04)

## **2.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN**

Los datos de evapotranspiración a los que hace referencia el presente estudio y que se requieren para el modelamiento mediante NAM como una de las variables de entrada, son series de evapotranspiración potencial (EPot) para la cuenca del Río Suratá y las microcuencas de los ríos Suratá y Tona, estas series al igual que las de precipitación, son series con valores de promedio de la variable con resolución temporal diaria expresada en (mm/día). El propósito del presente sub capitulo es describir el procedimiento de obtención de las series de evapotranspiración potencial utilizadas para modelar los caudales en la cuenca del río Suratá.

### **2.2.1 Metodología para el cálculo de evapotranspiración potencial (EPot)**

El procedimiento empleado para el cálculo de evapotranspiración fue una adaptación de la metodología de un documento publicado por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), y que se puede encontrar en Internet, y cuyo título es “Corp Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements –FAO Irrigation and drainage paper 56”. Esta metodología tiene por objetivo estimar valores de evapotranspiración real (ETr), que en un primer paso busca obtener valores de evapotranspiración de referencia (ETo), que mediante la aplicación de algunos coeficientes que incorporen características propias del tipo de suelo, tipo de cultivo y condiciones ambientales convertirla en evapotranspiración real, los términos referentes a evapotranspiración de referencia y evapotranspiración real se discutirán mas adelante.

### 2.2.2 Cálculo de evapotranspiración según metodología FAO

El procedimiento descrito en el documento de la FAO busca en primer lugar estimar valores de evapotranspiración de referencia  $ETo$ , la evapotranspiración de referencia es calculada para una superficie particular (de referencia), generalmente pasto verde de 8 a 15 cm. y de altura uniforme que proporcione sombra a la totalidad del suelo que cubre y que no tenga limitaciones de agua. El documento FAO define la superficie de referencia como: “**un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia única de superficie de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23**”, la evapotranspiración enfocada de esta manera se introdujo para hacer una descripción de la demanda evaporante de la atmósfera independiente del tipo de plantación, prácticas de manejo, etapa de desarrollo del cultivo y condiciones de humedad, de esta manera se entiende  $ETo$  como un parámetro climático que describe el poder evaporante de la atmósfera, ya que depende únicamente de los siguientes parámetros climáticos; brillo solar, humedad relativa, temperatura y recorrido del viento.

➤ **Ecuación FAO Penman-Monteith para el cálculo de  $ETo$**  la ecuación propuesta por al FAO para cálculo de  $ETo$ , es un sencilla representación de los fenómenos físicos y fisiológicos que gobiernan el fenómeno de evapotranspiración.

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 2732} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.1)$$

Donde:

**$ETo$ :** Evapotranspiración de referencia (mm. /día),

**$Rn$ :** Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

**$G$ :** Densidad de flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

- T:** Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $U_2$ :** Velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),
- $e_s$ :** Presión de vapor de saturación (KPa.),
- $e_a$ :** Presión de vapor real (KPa.),
- $(e_s - e_a)$ :** Déficit de presión de vapor de saturación (KPa.),
- $\Delta$ :** Pendiente de la curva de presión de vapor (KPa.  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), y
- $\gamma$ :** Constante psicrométrica (KPa.  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

La ecuación mostrada, es en esencia la ecuación que Penman derivó en 1948 para cálculo de evaporación desde una superficie libre de agua a partir de registros climatológicos, este método posteriormente fue extendido para calcular evapotranspiración desde superficies cultivadas incorporando las resistencias de cultivo y superficie aerodinámica. Los registros necesarios para el cálculo de  $ETo$  mediante la ecuación 2.1, son registros de las variables climatológicas; Temperatura aire, humedad relativa, velocidad del viento y horas reales de brillo solar, además se deben especificar otros datos como: altitud, y radiación solar neta diaria. En el anexo 2, del presente documento se presentan las tablas y ecuaciones empleadas para el cálculo de los parámetros de la ecuación FAO Penman –Monteith (Ec.2.1), para el cálculo de evapotranspiración de referencia.

➤ **Evapotranspiración Bajo condiciones estándar  $E_{Tc}$**  este tipo de evapotranspiración ocurre en donde los cultivos crecen en campos suficientemente extensos, óptimas condiciones de humedad, libres de enfermedades y en determinadas características que permitan la máxima tasa de evapotranspiración bajo las condiciones climáticas existentes.  $E_{Tc}$  puede ser obtenido mediante la ecuación Penman-Monteith, Ecuación 2.1 mostrada anteriormente, con base en registros climáticos e incorporando a la ecuación factores de resistencia del cultivo, albedo, propias de cada cultivo particular. La

Evapotranspiración en condiciones estándar o de cultivo es utilizada para determinar los coeficientes de cultivo  $K_c$  mediante la relación  $ET_c/ET_o$ , estos coeficientes son empleados para determinar  $ET_c$ , Ecuación 2.2, de varios cultivos que crecen en diferentes regiones.

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2.2)$$

➤ **Metodología para la determinación de la evapotranspiración del cultivo  $ET_c$**  la evapotranspiración del cultivo puede ser obtenida directamente mediante métodos de transferencia de masa o balance de energía o por un método de balance de agua en el suelo, como ya se dijo, también puede ser obtenida mediante la ecuación Penman-Monteith ajustando el albedo y la resistencia aerodinámica y de superficie a las características de crecimiento de un cultivo específico, debido a que la existe infamación sobre la resistencia de cultivo y de superficie es limitada la ecuación FAO Penman-Monteith es utilizada para el cálculo de  $ET_o$ .

Dentro de la metodología propuesta por la FAO para el cálculo de  $ET_c$  existe dos procedimientos, conocidos como procedimientos indirectos de cálculo de  $ET_c$ , en estas dos formulaciones  $ET_c$  se calcula mediante la Ecuación 2.2 y difieren en la manera de la aplicación del factor de cultivo  $K_c$ , el factor  $K_c$  representa las características de evaporación del suelo y de transpiración de cada cultivo particular, la primera metodología conocida como; **“aproximación del coeficiente simple de cultivo”** en la cual las condiciones de evaporación y transpiración están representadas por un único valor de  $K_c$ , la segunda metodología **“aproximación del coeficiente doble de cultivo”**, asume un valor de  $K_c$  de la siguiente forma;  $K_c = K_{cb} + K_e$  en donde  $K_{cb}$  describe las

características de transpiración del cultivo y  $K_e$  representa las condiciones de evaporación desde el suelo.

➤ **El coeficiente de cultivo  $K_c$**  el coeficiente de cultivo integra el efecto de las características que diferencian un campo cultivado típico de la grama de referencia la cual tiene una apariencia uniforme y una cobertura completa del terreno García, Otero (2005), basándose en lo anterior se puede afirmar que cada cultivo tiene un valor único de  $K_c$ , además de los parámetros ya mencionados que afectan el valor de  $K_c$  (evaporación del desde el Suelo y Transpiración) podemos encontrar los siguientes.

- Tipo de cultivo
- Clima
- Tipo de suelo
- Etapas de crecimiento del cultivo

Debido a que el propósito del presente estudio no es hacer una descripción detallada de la metodología y el procedimiento de cálculo empleado para el cálculo de evapotranspiración, se recomienda, en el caso en que se quiera profundizar en algunos conceptos referentes a evaporación, evapotranspiración y la metodología de la FAO, se recomienda consultar el documento FAO, anteriormente mencionado y el documento final del estudio realizado por García, Otero (2005) y cuyo título es; “*estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del Río Lebrija*”.

➤ **Selección del Factor de cultivo  $K_c$ .** Una de las variables de las cuales depende el valor de  $K_c$  es la etapa en que se encuentre el cultivo, en el anexo 6. se muestra una la tabla en donde se tabulan valores de  $K_c$  dependido de la etapa

de desarrollo en que se encuentre el cultivo, estos coeficientes o factores de cultivo son una tabulación propuesta por la FAO, podría considerarse un error la aplicación en nuestro medio de estos coeficientes ya que los propuestos por la FAO fueron obtenidos para unas características de entorno totalmente distintas, la justificación en la implementación de estos coeficientes no es otra diferente a la incapacidad de obtener en nuestro medio con tabulaciones de estos coeficientes ya que no se cuenta con los estudios apropiados que los permitan obtenerlos

### **2.2.3 Cobertura vegetal y Uso del suelo en la Cuenca del Río Suratá**

Para que la metodología de cálculo de evapotranspiración propuesta por la FAO sea aplicable a la cuenca del Río Suratá es necesario conocer el tipo de plantaciones y vegetación existente en el área de la cuenca con el fin de obtener el valor de los coeficientes de  $K_c$  mas adecuado a cada uno de los tipos de plantación, para tal fin se recurrió a los POAT's (Plan de Ordenamiento Ambiental) CDMB (2002) de cada una de las microcuencas, los cuales se muestran en el anexo 3. al final de este documento.

### **2.2.4 Datos y estaciones utilizadas**

Como se ha mencionado en repetidas ocasiones los datos necesarios para cálculo de evapotranspiración mediante la metodología ya descrita corresponden a series de tiempo de las variables climatológicas; horas de brillo solar, humedad relativa y recorrido del viento, estos parámetros son registrados por estaciones de tipo climatológica principal (CP) y climatológica secundaria (CS) en la figura 2.7, se muestra la ubicación en el plano de las estaciones utilizadas para el cálculo de  $ETo$ . Los datos de las variables climatológicas empleadas para el desarrollo de esta investigación corresponden a las series obtenidas por García y Otero (2005) después de un riguroso análisis de la información meteorológica

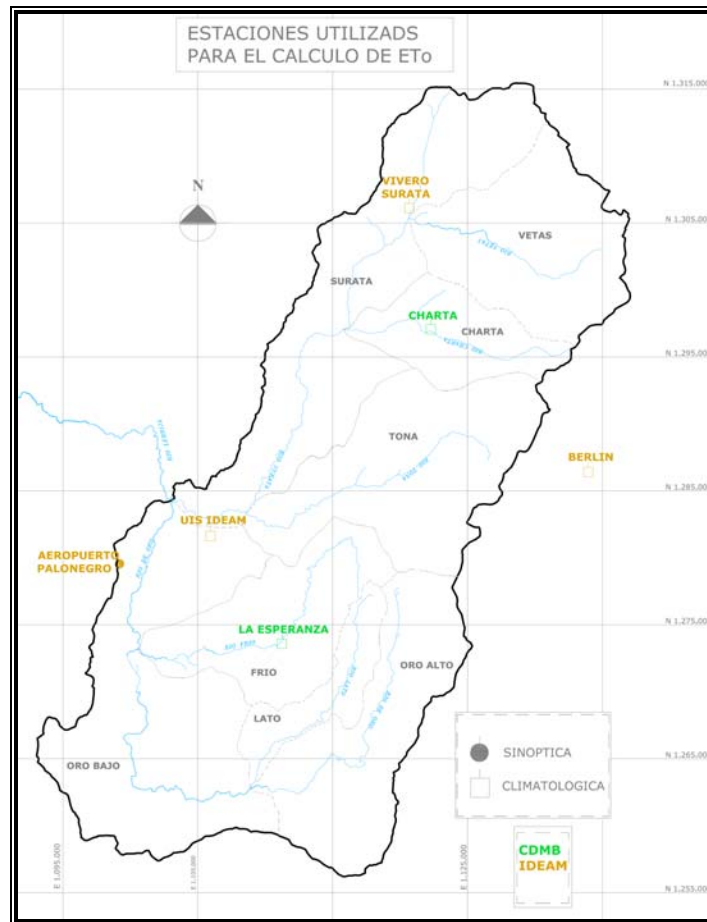
empleada por ellos en el desarrollo de su trabajo, tal procedimiento se describe en el capítulo 5 Pág. (136-181) del informe final de su estudio. La información empleada por los autores mencionados hace parte de los registros de las estaciones administradas por el IDEAM y la CDMB. Tabla 2.2.

**Tabla 2. 2 Estaciones utilizadas para el cálculo de Eto**

Tomado de García Otero, (2005)

ESTACIONES IDEAM						
NOMBRE	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ALTITUD (msnm)	TIPO	COORDENADAS	
					N	E
BERLIN	07° 11'	72° 52'	3214	CO	1133000.00	1286700.00
PALONEGRO	07° 08'	73° 11'	1189	SP	1098742.90	1279868.90
UIS	07° 08'	73° 07'	1018	CP	1105933.60	1281632.70
VIVERO SURATÁ	07° 21'	73° 00'	1725	CO	1120400.00	1306100.00
ESTACIONES CDMB						
NOMBRE	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ALTITUD (msnm)	TIPO	COORDENADAS	
					N	E
CHARTA	07° 17'	72° 58'	1950	CO	1122280.61	1297072.88
LA ESPERANZA	07° 04'	73° 04'	1000	CO	1111228.36	1273581.60

Las series de tiempo de los parámetros climatológicos empleadas y que afectan el cálculo de ETo mediante la metodología propuesta, corresponden a registros de horas reales de brillo solar totales mensuales, recorrido del viento (Km./ mes), humedad relativa promedio mensual (%) y temperatura media mensual (°C). En el anexo 5, al final del presente documento, se presentan las series temporales de las cuatro variables climatológicas para cada una de las estaciones seleccionadas, estas series de tiempo tienen un periodo de registro comprendido entre Enero del año 1986 y Diciembre del año 2000. En este punto es necesario aclarar que los valores de las variables corresponden a valores promedio mensuales, por lo tanto más adelante, en el subcapítulo 2.2.6 que a continuación se expone con más detalle la razón por la cual se utilizaron estos registros.



**Figura 2. 7 Ubicación de las estaciones utilizadas para el cálculo de ETo**  
**Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y adaptada por los autores (2006)**

### **2.2.5 Cálculo de ETo por estaciones**

Con los registros de las variables mostrados anteriormente y aplicando la ecuación FAO Penman-Monthiet ecuación 2.2.1 se obtuvo una serie de evapotranspiración de referencia en (mm/día) para cada una de las estaciones anexo 2. En este punto es necesario hacer una aclaración, en un principio se contaba con registros de horas reales de brillo solar totales mensuales, recorrido del viento en (Km./mes), humedad relativa promedio mensual (%) y temperatura media mensual (°C), con base en estos registros y aplicando la ecuación FAO Penman- Monthiet se obtuvieron valores de ETo medios diarios medidos en

mm/día, estos valores se obtuvieron transformando las horas de brillo totales mensuales, en horas de brillo totales diarias, el recorrido mensual del viento se transformo a valores en Km./h y para el caso de la humedad y temperatura se asumió como valor promedio día el valor promedio del mes correspondiente, además en los parámetros correspondientes a: radiación extra terrestre (Ra) y horas posibles de insolación (N) se tomaron valores para el 15<sup>vo</sup> día de cada mes ya que los valores calculados de estas variables para latitudes menores a 55° (N o S) presentan errores alrededor del 1%, ver tabla1 y 2 anexo 4. Las transformaciones a valores promedio diario de las variables climatológicas empleadas, en realidad no tienen ninguna justificación diferente a la imposibilidad por parte de los autores al acceso de información con resolución temporal diaria de cada una de las variables climatológicas.

Una vez obtenidas las series de ETo de cada una de las estaciones y con ayuda del software surfer 8 se procedió a la especialización de ETo aplicando la misma metodología utilizada en la especialización de la precipitación, con ayuda de el software spell-map y spell-AMO se obtuvo la serie de evapotranspiración media diaria en mm/día para la cuenca del Río Suratá, como se menciona la evapotranspiración se calculó para el 15<sup>vo</sup> día de cada mes como representativa de todo el mes.

### **2.2.6 Cálculo de la evapotranspiración potencial (Epot)**

Como se menciona al principio de este capítulo los datos de evapotranspiración necesarios para el modelamiento de caudales mediante NAM son datos de evapotranspiración potencial, aunque en la metodología de la FAO no expone una definición de lo que es evapotranspiración potencial es claro que de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.2.2 los conceptos de evapotranspiración potencial

y evapotranspiración del cultivo son equivalentes, con la única diferencia que la evapotranspiración del cultivo toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- El crecimiento del cultivo se asume normal
- No se contempla el contenido de sales disueltas en el agua contenida en el suelo.
- El cultivo se considera cubierto casi en su totalidad
- El cultivo no presenta enfermedades de plagas
- La fertilidad del suelo es alta

Para el cálculo de de evapotranspiración del cultivo  $ET_c$  se procedió aplicando el coeficiente simple de cultivo de de la siguiente manera.

$$ET_c = K_c * ET_c$$

La metodología de cálculo de  $ET_c$ . sugiere la implementación de los factores simples de cultivo, tales factores fueron obtenidos mediante la adaptación de los coeficientes propuestos por la FAO, (ver tabla anexo 6) , al uso del suelo, tipo de cultivo y vegetación según la sectorización propuesta por la CDMB (POAT's 2002). En las tablas que a continuación se muestran (2.3–2.7), se presentan los factores simples de cultivo empleados para cada uno de los tipos de plantación, dichos factores se encuentra tabulada a nivel de microcuencas, estos factores fueron aplicadas de la siguiente manera; se hizo una ponderación del coeficiente de cultivo  $K_c$  con respecto al área, es decir se multiplico el valor de  $K_c$  por la porción de área representada por ese factor de cultivo  $K_c$ ., por ultimo estos valores parciales fueron sumados en primer lugar a nivel de microcuencas y en ultima instancia para la cuenca del Río Suratá en su totalidad.

**Tabla 2. 3 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Charta**

Tomado de García Otero 2005

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	AREA		Kc Pon
			Ha	%	
CONSTRUCCIONES	INFRAESTRUCTURA URBANA	Residencial,comercial,servicios	17.4	0.22	1.0
TIERRAS AGROPECUARIAS	MISCELANEOS	Maíz, hortalizas, arracacha, frijol	89.08	1.13	0.98
	CULTIVOS PERMANENTES	Mora, caña panelera, café y otros	103.47	1.31	1.06
	POTREROS ABIERTOS	Pastos naturales	3481.72	44.05	1.15
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOAGRICOLA	Café con sombra	16.1	0.2	1.1
	SILVOPASTORIL	Potreros arbolados	506.37	6.41	0.95
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Bosque secundario	1034.52	13.09	1.0
		Rastrojos	668.49	8.46	1.05
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas y latifoliadas	957.38	12.11	1.0
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	MATORRALES Y PAJONALES	Matorrales y pajonales páramo	1029.2	13.02	1.15

**Tabla 2. 4 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Vetas**

Tomado de García Otero 2005

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	AREA		Kc pon
			Ha	%	
CONSTRUCCIONES	INFRAESTRUCTURA URBANA	Zona Urbana	11.3	0.07	1.0
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRICOLAS	Cultivos Transitorios	197.5	1.27	0.76
		Potreros Abiertos	Pastos Naturales	1452.9	9.3
	TIERRAS MIXTAS O MISCELANEAS	Pastos Mejorados	2128.9	13.66	1.15
		Cultivos y Pastos	449.2	2.88	1.16
		Pastos con rastrojos	125.1	0.8	1.1
		Cultivos mixtos	62.7	0.4	1.08
		Rastrojos pastos y cultivos	459.5	2.95	1.06
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOPASTORIL	Potreros arbolados	1277.6	8.2	0.95
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Secundario	2794.4	17.9	1
		Rastrojos	951.7	6.1	1
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas	132.2	0.85	1
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	MATORRAL	Paramuno	794.9	5.1	1.15
	HERBACEAS	Pajonales	2675.4	17.16	1.15

**Tabla 2. 5 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Suratá Bajo**

Tomado de García Otero 2005

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	AREA		Kc pon
			Ha	%	
URBANO ÁREAS DECLARADAS PROTEGIDAS	URBANO Y EXPANSIÓN URBANA (POT Bucaramanga)	Residencial, comercial e institucional	200.45	1.61	1.0
	DMI	Zona de recuperación para la preservación	312.06	2.51	1.0
		Zona rural de recuperación para la producción agroforestal	4.91	0.04	1.0
		Zona urbana de recuperación para la producción	66.26	0.53	1.0
		Zona urbana de producción	291.5	2.34	1.0
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVO AGRICOLA	Cultivos mixtos	1246	10.02	1.08
	POTRERO ABIERTO	Pastos naturales	4252.47	34.19	1.15
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOAGRICOLA	Café con sombra	87.63	0.7	1.1
	SILVOPASTORIL	Potreros arbolados	63.8	0.51	0.95
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Bosque secundario	1613.72	12.97	1.0
		Rastrojos	2762.19	22.21	1.06
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas y eucaliptos	303.8	2.44	1.0
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	HERBÁCEAS	Pajonales	1200.31	9.65	1.15
ERIALES	MINERIA	Explotaciones a cielo abierto – calizas	33.02	0.27	1.0

**Tabla 2. 6 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Suratá Alto**

Tomado de García Otero 2005

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	AREA		Kc pon
			Has	%	
CONSTRUCCIONES	INFRAESTRUCTURA URBANA	Zona urbana	25.4	0.18	1.0
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRICOLAS	Cultivos transitorios	28.5	0.21	1.12
		Cultivos permanentes	24.39	0.18	1.05
	POTREROS ABIERTOS	Pastos naturales	1366	9.9	1.15
		Pastos mejorados	1058.8	7.7	1.15
	TIERRAS MIXTAS O MISCELANEAS		Cultivos y pastos	2977	21.1
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOPASTORIL	Potreros con cercas vivas	229.7	1.67	1.15

		Potreros arbolados	979.76	7.12	0.95
	SILVOAGRICOLA	Cultivos permanentes y/o semi permanentes con sombrío	535.23	3.9	1.05
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Secundario	3678.9	26.7	1.0
		Rastrojos	662	4.81	1.05
	BOSQUE PLANTADO		942.6	6.9	1.0
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	HERBACEAS	Pajonales	797.2	5.8	1.15

**Tabla 2. 7 Coeficientes de cultivo Kc. microcuenca Tona**

Tomado de García Otero 2005

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	AREA		Kc pon
			Ha	%	
CONSTRUCCIONES	INFRAESTRUCTURA URBANA	Zona Urbana	9.98	0.1	1.0
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRICOLAS	Cultivos Transitorios	226.59	1.2	1.13
		Cultivos Permanentes	239.83	1.2	0.95
	POTREROS ABIERTOS	Pastos Naturales	2307.28	11.9	1.15
		Pastos Mejorados	370.12	1.9	1.15
	TIERRAS MIXTAS O MISCELANEAS	Cultivos y Pastos	3123.08	16.1	0.82
		rastrojos y cultivos	1025.42	5.3	1.05
		potreros arbolados	2001.64	10.3	0.95
	SILVOAGRICOLA	Cultivos permanentes y/o Semi permanentes con sombrío	396.91	2	1.05
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Secundario	4495.63	23.2	1
		Rastrojos	1985.07	10.2	1.05
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas y latí foliadas	982.66	5.1	1
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	MATORRAL	Paramuno	489.61	2.5	1.15
	HERBACEAS	Pajonales	1721.26	8.9	1.15

### 2.2.7 Series de evapotranspiración obtenidas

Las series de evapotranspiración potencial obtenidas para el periodo (1986 – 2000) para La cuenca del Río Suratá y las microcuencas se muestran a continuación:

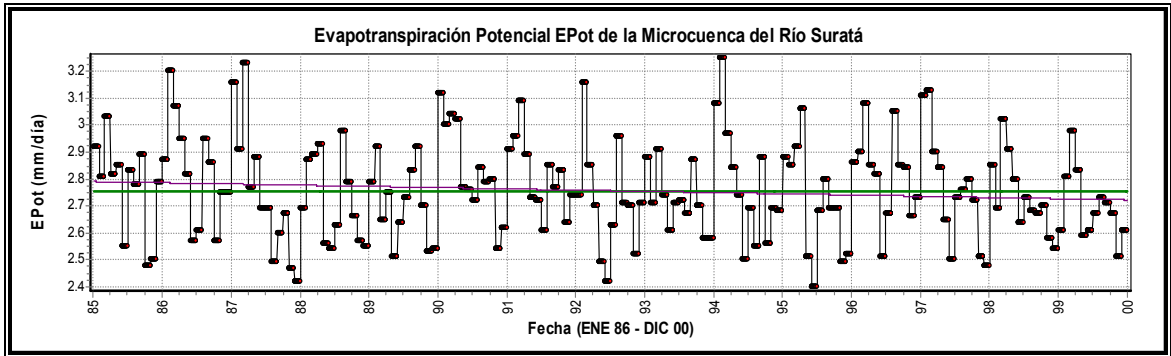


Figura 2. 8 Serie de EPot cuenca del Río Suratá (ENE 86- DIC 00)

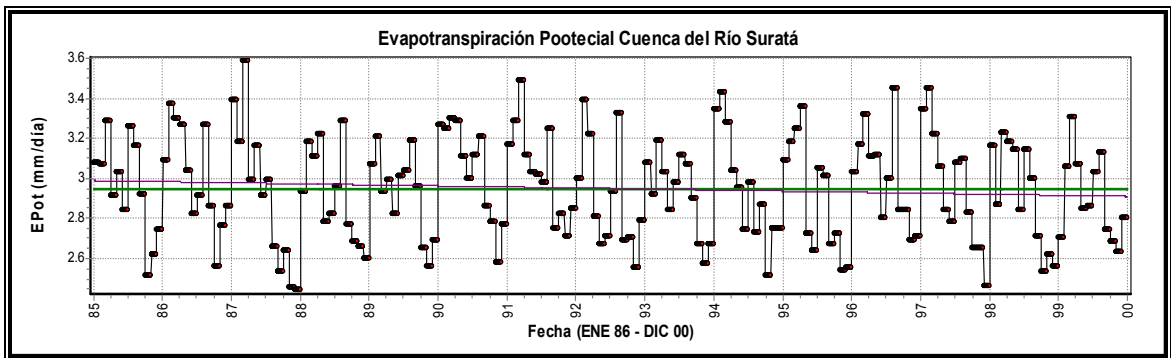
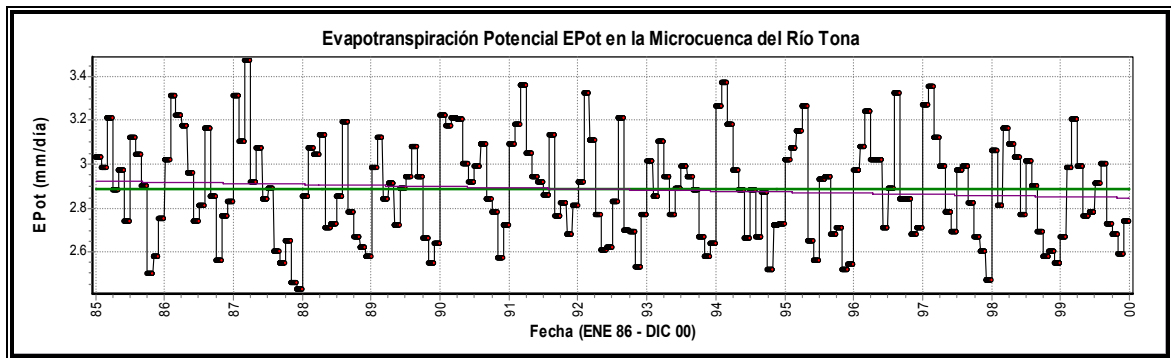


Figura 2. 9 Serie de EPot Microcuenca del Río Suratá (ENE 86- DIC 00)



**Figura 2. 10 Serie de EPot Microcuenca del Río Tona (ENE 86- DIC 00)**

## **2.3 CAUDALES DE ESCORRENTÍA**

Como se menciona al principio de este documento el objetivo que se persigue en el presente estudio es hacer una comparación de los caudales de escorrentía generados mediante el modelo NAM, con respecto a los medidos en el punto de salida de la cuenca y microcuencas en estudio, de esta manera se hace necesaria una descripción de las características de las estaciones y periodos de registro empleados.

### **2.3.1 Estaciones hidrométricas utilizadas**

Las estaciones hidrométricas utilizadas fueron las estaciones: Majadas, de tipo limnigráfica (LG) , se ubica aguas abajo de la confluencia de los Ríos Suratá y Tona, y kilómetros antes del punto de salida de la cuenca en la que escurren las aguas de las microcuencas que la conforman (Surata, Charta, Vetas y Tona), a su vez la estación Puente Tona de tipo limnimétrica (LM), se ubica sobre la corriente del Río Tona pocos kilómetros antes de la confluencia de los ríos Suratá y Tona y mide los niveles del Río Tona en un punto cercano a la salida de la

cuenca. En la tabla 2.8 y la figura 2.13 se muestra la información general y ubicación en el plano de las estaciones Majadas y Puente Tona.

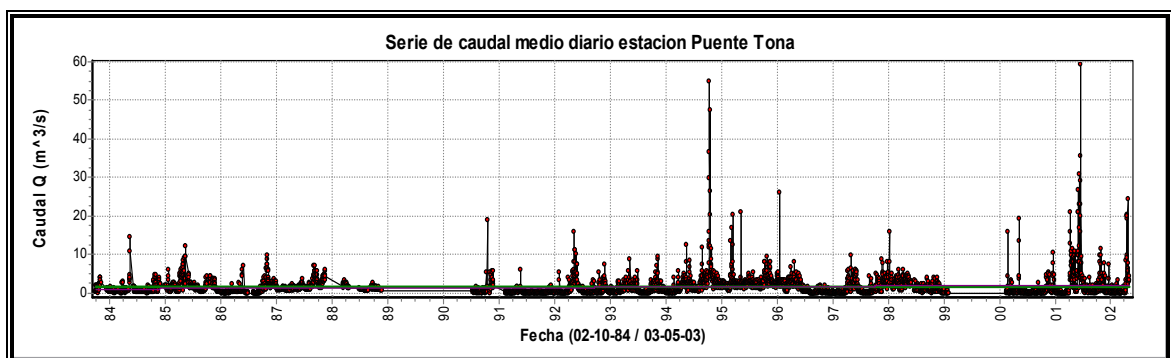
**Tabla 2. 8 Información general de las estaciones Majadas y Puente Tona**

**Fuente: Quiroga y Fernández, (2003)**

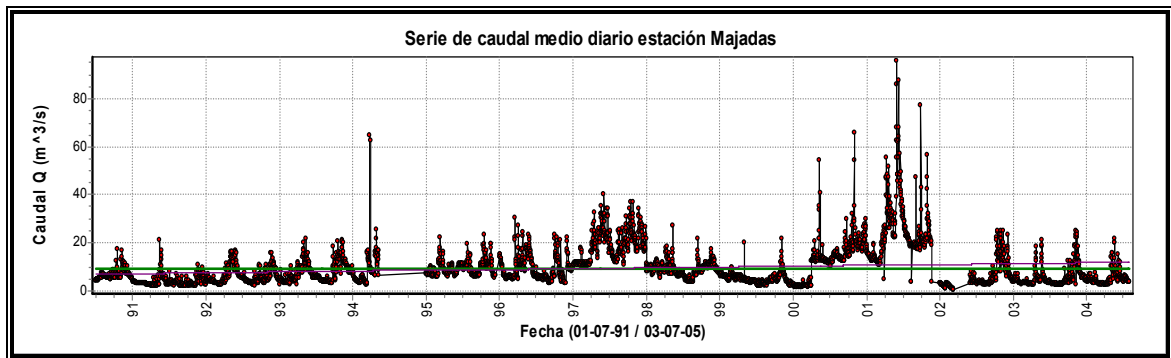
Estación	Tipo	Coordenadas		Elevación (msnm)	Periodo de Registro	Entidad	Información	Corriente
		Norte	Este					
Majadas	LG	1283470	1107761.38	700	01-07-91 / 31-07-05	AMB	Diaria	Río Suratá
Puente Tona	LM	1283520	1107706	760	01-10-84 / 31-12-00	CDMB	Diaria	Río Tona

### 2.3.2 Datos utilizados

Los datos utilizados corresponden a valores de caudal medidos en  $m^3/s$  de las estaciones Majadas y Puente Tona, con un periodo de registro de aproximadamente 11 años para la estación Majadas y 26 años para la estación Puente Tona, en las figuras 2.11 y 2.12 se muestran las series de tiempo con datos puros de caudales en  $m^3/s$  las estaciones empleadas.



**Figura 2. 11 Serie de caudales estación Puente Tona (datos puros) (Oct 84- Jun03)**

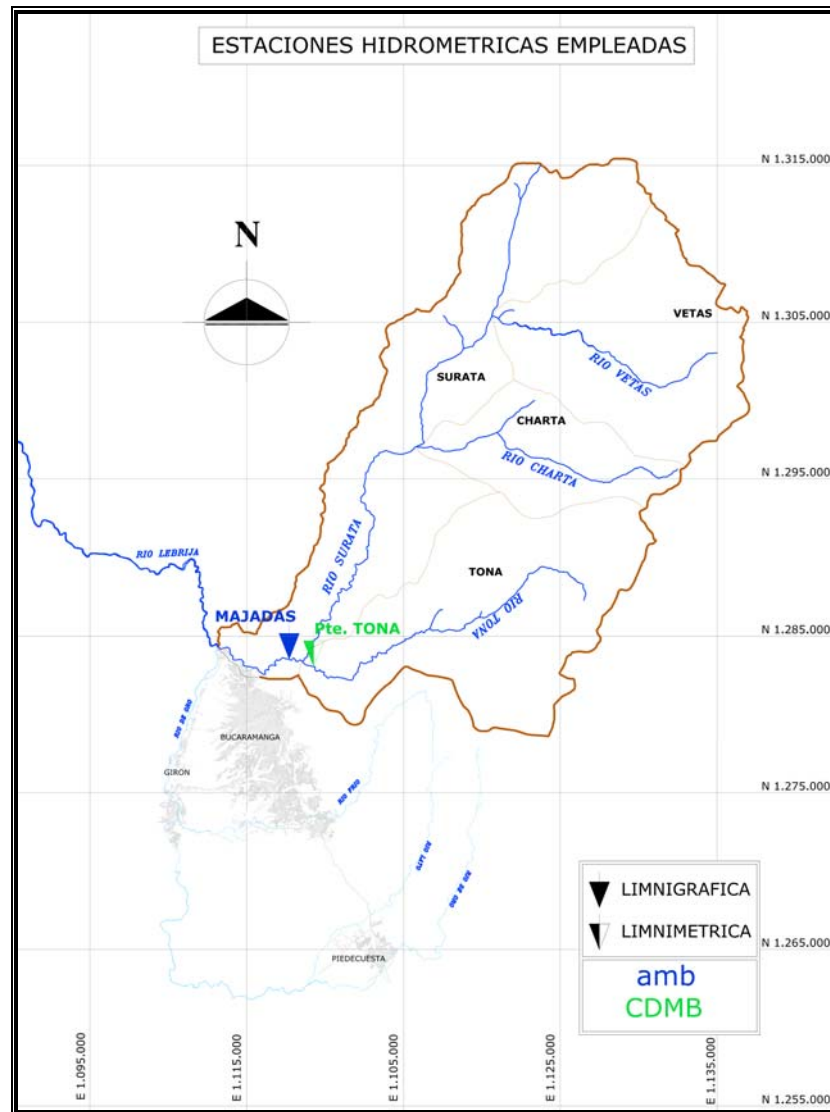


**Figura 2. 12 Serie de caudales estación Majadas (datos puros) (Jul 91- Jul 05)**

### **2.3.3 Análisis de los datos utilizados**

Un primer paso a la hora de hacer un análisis de series de tiempo es determinar la estacionaridad de la series, la estacionaridad esta directamente relacionada con la homogeneidad y consistencia, la no homogeneidad de una serie se presenta cuando esta no describe un comportamiento uniforme a lo largo del periodo de registro, este comportamiento es identificable mediante algunos parámetros estadísticos como; cambios en la media y en la varianza, la no homogeneidad en las series de tiempo se debe a cambios naturales o procesos antrópicos que modifiquen el medio ambiente circundante al sitio de recolección de datos, en contraste la inconsistencia de una serie se presenta debido a errores sistemáticos, los cuales son inducidos por lecturas deficientes por parte del observador o fallas en los instrumentos de medición.

En este punto referente al análisis de series de caudal no se hará un riguroso estudio de las series de tiempo debido principalmente a la incapacidad en la obtención de meta datos de las estaciones Puente Tona y Majadas que permitieran hacer un adecuado análisis de las series de caudal, se advertirán en cambio variaciones en los parámetros estadísticos como media y varianza.



**Figura 2. 13 Ubicación en el plano de la estación Majadas y Puente Tona**  
**Fuente: CERS (Guzmán et al, 2003) y adaptada por los autores (2006)**

➤ **Estación Puente Tona** en la estación Puente Tona pose un periodo de registro que va desde el mes de octubre del año 84 hasta Junio de 2005, se observaron dos periodos con datos faltantes comprendidos por; un primer periodo que comprende la casi totalidad del año 1999, un segundo que va desde comienzos del año 88 y mediados del año 90 , un análisis de la serie arrojo un total de 7609 datos de los cuales 1251 correspondientes 16.44 % de datos

faltantes, además de lo ya dicho se observaron posibles inconsistencias en algunos registros de la serie en los cuales el caudal de esta estación excedía el valor de caudal medido en la estación Majadas medido aguas abajo, esto desde el punto de vista físico es imposible ya que la estación Majadas registra niveles del río en un punto cercano de la salida de la cuenca.

➤ **Estación Majadas** para esta estación se cuenta con un periodo de registro de 24 años comprendido entre Julio del año 91 y Julio de 2005, haciendo una análisis de esta serie se observó un periodo de registro de datos faltantes, este periodo esta comprendido por gran parte del año 94 a partir del segundo trimestre del año, la estación majadas cuenta con 5145 registros de los cuales aproximadamente el 7.7% (397), se registran como datos faltantes, mediante la inspección visual de la serie se detecto una posible inconsistencia en el periodo que va desde comienzos del año 2000 hasta finales del año 2002, en donde se ve claramente que el valor de caudal en este periodo esta por encima de la tendencia mostrada en periodos anteriores y posteriores da la misma serie, es mas según Blanco y Gualdron (2006) los caudales en este punto son superiores a los medidos aguas debajo de la estación majadas y que esta a la salida de la CSRL.

Un análisis de la media y la varianza mediante el F-test spell-stat (Guzmán, 2003) de los valores de caudal de las series anteriormente descritas muestran una tendencia significativa en ambos parámetros, de esta manera puede decirse que la serie no es estacionaria, según Blanco y Gualdron (2006) la propuesta es no eliminar la tendencia lineal de los registros con el fin de conservar características particulares de la serie, por esta razón se emplearon datos puros para el modelamiento.

### 2.3.4 Series de caudal empleadas en el modelamiento

Al igual que las variables meteorológicas empleadas para modelar caudales mediante NAM y según la resolución temporal con la que se trabajó, las series de caudales son valores promedio de la variable medida en mm/día, de esta manera había la necesidad de: en primer lugar obtener una serie de caudales que permitiera el modelado de la microcuenca del Río Suratá por separado, esto se hizo haciendo la sustracción de las series de caudales de la estación Majadas y Puente Tona para un periodo común de registro, para el modelamiento de cuenca, y microcuenca del Río Tona son las series de las estaciones Majadas y Puente Tona respectivamente.

Una vez obtenidas las series de tiempo que se emplearían en el modelamiento, había la necesidad de transformar los caudales registrados en m<sup>3</sup>/s a valores de caudal en mm/día esto se hizo aplicando un factor de conversión ecuación 2.3, a cada una de las respectivas series de caudales de escorrentía:

$$Q(\text{mm} / \text{día}) = Q(\text{m}^3 / \text{s}) * \frac{1}{A(\text{m}^2)} * \frac{86400(\text{s})}{1(\text{día})} * \frac{1000(\text{mm})}{1(\text{m})} \quad (2.3)$$

Donde:

A : es el área de la cuenca, para nuestro caso particular se tienen las siguientes áreas:

- Cuenca del Río Suratá: 697 **Has.**
- Microcuenca del Río Suratá: 484.32 **Has.**
- Microcuenca del Río Tona: 212.679 **Has.**

Las series obtenidas aplicando el procedimiento descrito anteriormente se muestran a continuación:

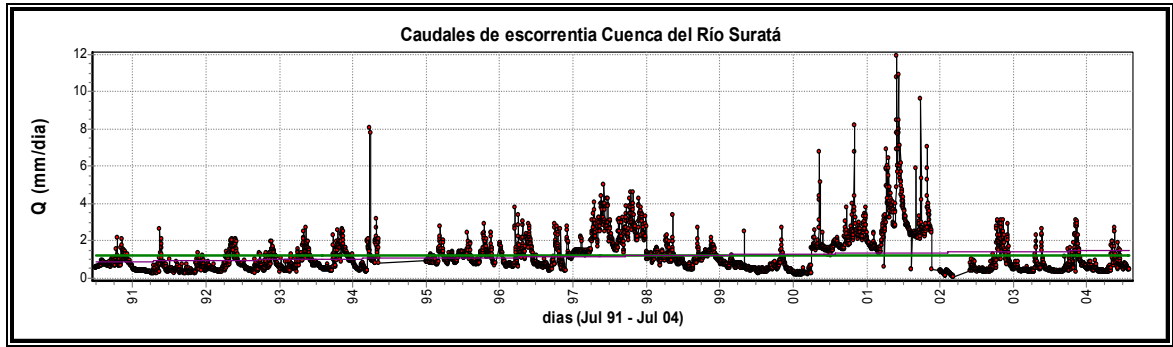


Figura 2. 14 Caudales de escorrentía cuenca del Río Suratá (mm/día)

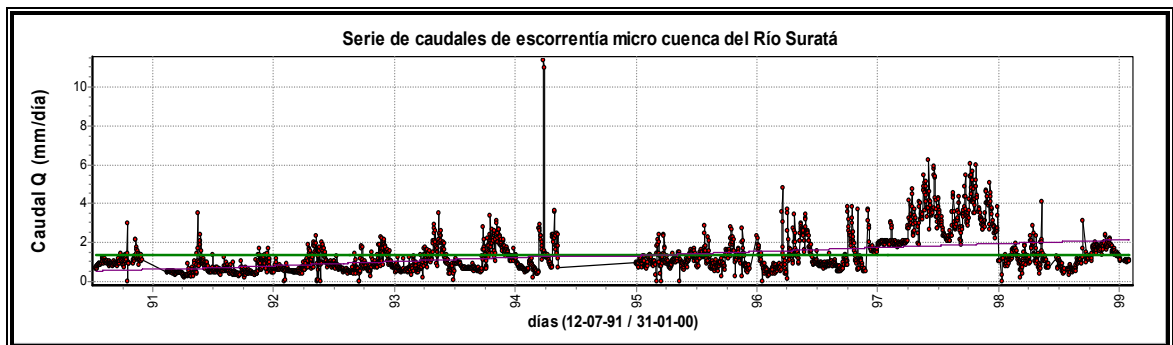


Figura 2.15 Caudales de escorrentía microcuenca del Río Suratá (mm/día)

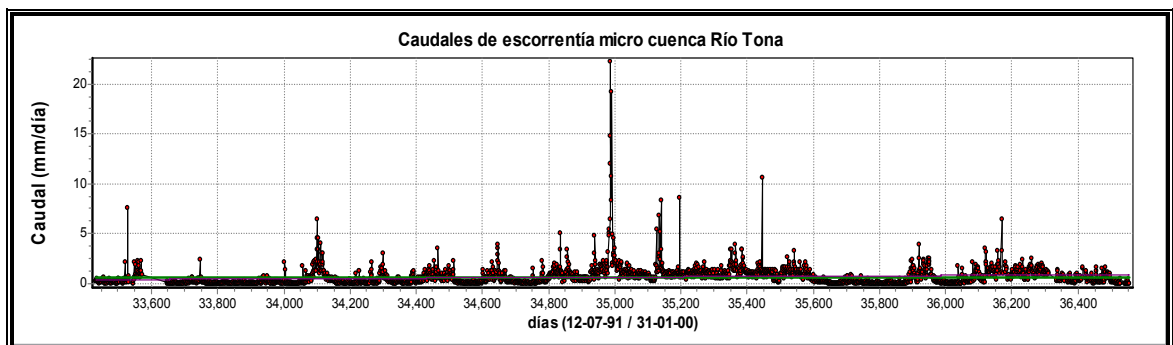


Figura 2. 15 Caudales de escorrentía microcuenca del Río Tona (mm/día)

## **2.4 SERIES EMPLEADAS EN EL MODELAMIENTO.**

En los sub capítulos anteriores se describió la manera en que se obtuvieron las series de tiempo de las variables hidrológicas requeridas para el modelamiento mediante NAM, las series de las variables hidrológicas correspondientes a precipitación, evapotranspiración y caudales, para la cuenca del Río Suratá y las microcuencas del Río Suratá y Río Tona, estas series se muestran al final de cada uno de los sub capítulos correspondientes.

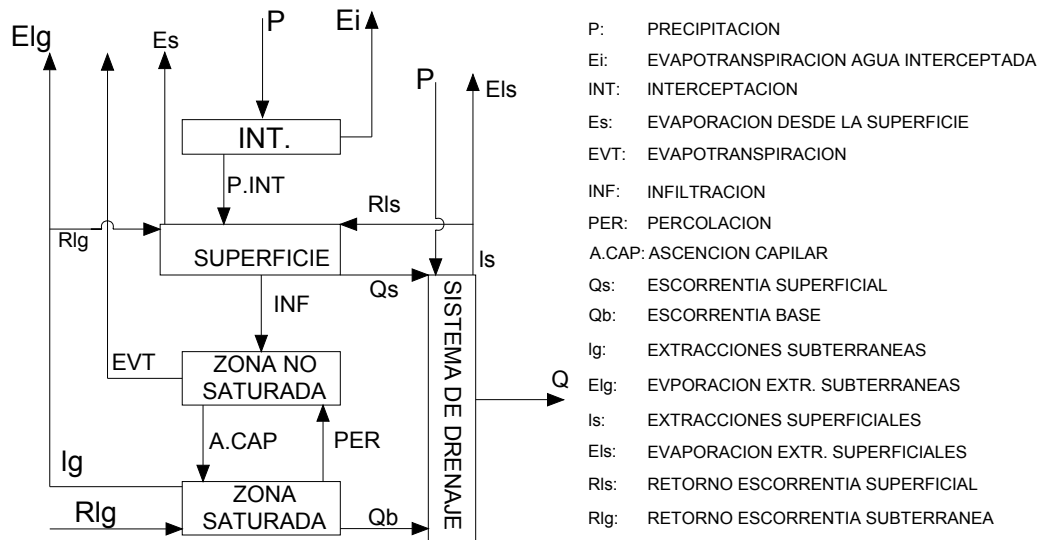
Una vez obtenidas las series de precipitación, evapotranspiración y caudal para la cuenca y microcuencas, el paso siguiente consistía en buscar dos periodos de tiempo común a las tres variables, estos periodos de tiempo debían ser continuos, es decir sin ningún dato faltante, y lo mas amplios posibles que permitieran hacer una adecuada calibración y posterior validación del modelo.

Los periodos de registro de los cuales se habla en el párrafo anterior fueron determinados mediante un análisis visual en el cual se encontró que la limitante en cuanto a longitud y continuidad de registro eran las series de caudales, esto debido a que a estas series no se les hizo ningún análisis que permitiera detectar y corregir inconsistencias ni tampoco hacer un llenado de datos faltantes.

En el anexo G. de este documento se muestran las series de cada una de las variables hidrológicas (precipitación, evapotranspiración y caudales), empleadas para los periodos de calibración y validación del modelo, aplicado la cuenca en conjunto y microcuencas que la conforman.

### 3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA NAM

La aplicación del modelo precipitación escorrentía para las cuencas, puede definirse como una serie de procedimientos, que en conjunto describen los procesos que se dan en la cuenca y que luego son medidos en forma agregada. El modelo debe entenderse, no solo como la aplicación de un conjunto de operaciones de conversión precipitación escorrentía, sino como un conjunto de investigaciones e ideas que describen la componente superficial, zona no saturada y zona saturada. (Beven, 2003)



**Figura 3. 1 Interacción de los procesos hidrológicos**  
**Fuente: CERS (Guzmán et al, 2005).**

Un modelo es la representación teórica mediante formulas matemáticas que simulan el comportamiento de un sistema real. Por ende un modelo hidrológico

conceptual precipitación-escorrentía, simula el comportamiento de la escorrentía superficial de una cuenca ante un evento de lluvia.

Los modelos hidrológicos se dividen en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos o conceptuales (numéricos o matemáticos), el primero es una representación física del prototipo, más simple en estructura pero con propiedades que reúnen las del prototipo, y los abstractos que representan el sistema en forma matemática (ecuaciones que relacionan variables de entradas y salidas) por medio de similitudes de carácter hidrológico y flujo de canales.

Los modelos físicos son caros y de aplicabilidad limitada, debido a que requieren de una información muy completa y muy detallada de la hidrografía, la geología, la topografía, etc. de la zona de estudio correspondiente, información que en nuestro caso es muy difícil de conseguir ya que nuestras zonas de estudio no presenta una adecuada instrumentación que nos pueda llevar a tener datos suficientes para una modelación física correcta. Por el contrario, los modelos formales están rápidamente disponibles, son altamente flexibles, y comparativamente económicos para utilizar debido a que las variables utilizadas para la simulación pueden ser indirectas, cualitativas o cuantitativas con una precisión relativamente baja.

Los modelos numéricos nos permiten a posteriori, comparando sus resultados con resultados experimentales u observaciones, verificar la adaptación de dicho algoritmo y proporcionar valores de variables no medidas experimentalmente (Sánchez, 2004).

A su vez, los modelos físicos y los conceptuales se pueden dividir en modelos de tipo distribuido, semi-distribuido y agregados. Los modelos distribuidos permiten

representar el cambio de las variables hidrológicas en el espacio, al igual que las características del suelo y subsuelo, para una representación mas precisa de la composición física de la cuenca de estudio.

Los modelos semi-distribuidos al igual que los distribuidos permiten la representación espacial de las diferentes características físicas de la cuenca, pero permite utilizar algunas variables como homogéneas en toda la extensión de la zona de estudio. Este tipo de modelos es muy utilizado en nuestro medio debido a que existen pocos estudios de las zonas y podemos realizar aproximaciones de las variables menos monitoreadas y poder homogenizarla en toda la zona, por último los modelos agregados toman las variables hidrogeológicas como homogéneas en toda la zona de estudio y se desprecia la variabilidad espacial de las componentes hidrológicas y del suelo.

El modelo conceptual hidrológico debe brindar información sobre los diferentes procesos que transforman y regulan la respuesta hídrica así como su origen y movimiento en un espacio de control determinado. Estos “procesos de transformación”, están condicionados o dependen de factores climáticos, meteorológicos, geomorfológico, litológico, estructurales, químicos, vegetación, suelos, red de drenajes, etc., lo anterior obliga un trabajo interdisciplinario que permita el conocimiento de dichos temas en el planteamiento del modelo conceptual. (Guzmán et al, 2003).

En el presente estudio se utilizara el modelo conceptual agregado NAM, ya que este tipo de modelo por su naturaleza es de de fácil aplicación y requiere una poca cantidad de datos de entrada, el modelo establece unas ecuaciones de balance representadas por tanques de almacenamiento que son desarrolladas en el

lenguaje computacional y fácilmente aplicadas por medio de una computadora digital.

### 3.1 MODELO NAM

Los conceptos referentes a generalidades y estructura del modelo, que se exponen a continuación, son una traducción del documento “**NAM Simplified Spreadsheet Version Instruction Manual**”, que es el manual de instrucción, (sin publicar), de la version NAM-ihe.xls., (de Laat, 1999)

EL modelo NAM ha sido desarrollado en el Instituto Hidráulico Danés (DHI) y es parte de MIKE 11, un paquete de software para la simulación de crecientes, transporte de sedimentos, calidad de las agua en la desembocadura de los ríos, sistemas de irrigación y cuerpos de aguas similares.

NAM es una abreviación de “Nedbor Afstromings Model” que significa modelo de precipitación – escorrentía (DHI, 1999). Este modelo fue desarrollado por la sección de hidrología del Instituto de Hidrodinámica e Ingeniería Hidráulica de la Universidad Técnica de Dinamarca. El modelo hidrológico NAM modela los procesos de precipitación y escorrentía a escala de cuenca, en el cual mediante un conjunto de funciones matemáticas se describe en una forma cuantitativa el comportamiento de la fase terrestre del ciclo hidrológico. El modelo NAM en su forma original puede considerarse como determinístico, agregado, conceptual con una entrada moderada de datos. NAM simula los procesos de precipitación – escorrentía considerando el contenido de agua en cuatro almacenamientos

diferentes y mutuamente interrelacionados que representan las distintas componentes físicas de la cuenca. Estos almacenamientos son:

- Almacenamiento de nieve.
- Almacenamiento superficial.
- Zona de raíces o almacenamiento inferior.
- Almacenamiento subterráneo.

Los datos básicos de entrada requeridos para el modelo NAM son:

- Parámetros del modelo.
- Condiciones iniciales.
- Datos meteorológicos.
- Caudales para la calibración y validación del modelo.

Los datos meteorológicos básicos son:

- Precipitación.
- Evapotranspiración potencial.
- Temperatura, en caso de que se vaya a tener en cuenta la componente de nieve.

La presente extensión NAM-gph una versión adaptada, desarrollada por el grupo de predicción y modelamiento hidroclimático GPH (Guzmán, Niño, 2005), de la versión NAM-ihe.xls. (P.J.M. de Laat, 1999), Algunos componentes tales como nivel freático, almacenamiento y ascenso capilar no han sido incluidos en el modelo simplificado.



El modelo NAM al ser considerado originalmente como un modelo agregado trata la cuenca como una unidad, es decir, que los parámetros y las variables empleadas en su funcionamiento representan valores promedios para la totalidad de la cuenca. Las diferentes variables y los parámetros que hacen parte del modelo NAM son:

- **Precipitación P:** puede ser un valor diario, horario, etc. Dado en mm. (Para el presente proyecto se tomo la precipitación con resolución diaria en mm/día.)
  
- **Evapotranspiración potencial E<sub>pot</sub>:** Al igual que la precipitación los valores pueden estar dados en resolución diaria, horaria, etc. Dado en mm. (Tomada con resolución diaria en mm/día.)
  
- **Temperatura Temp:** Esta solo es necesaria si se presentan temperaturas inferiores a cero, en este caso entraría a funcionar el almacenamiento de nieve.
  
- **Almacenamiento de nieve S<sub>s</sub>:** La precipitación es retenida en el tanque de nieve solo si la temperatura, Temp, es inferior a cero, mientras que para temperaturas mayores a cero su paso por el tanque se realiza directamente hacia el tanque superficial.

$$\begin{array}{l}
 \text{Si} \quad \quad \quad \text{Temp}_{i-1} < 0 \quad \Rightarrow \quad Ss_i = Ss_{i-1} + P_{i-1} \\
 \text{Si} \quad \quad \quad \text{Temp}_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad Ss_i = Ss_{i-1} - P_{i-1}
 \end{array}
 \quad 3.1$$

➤ **Almacenamiento superficial U:** La humedad interceptada por la vegetación, el agua retenida en las depresiones y en la parte cultivada superior del suelo es representada por el tanque superficial, donde  $U_{max}$  da el límite superior para la cantidad de agua en el almacenamiento superficial.

$$Si \quad Temp_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad U_i = U_{i-1} + P_{i-1} - Ep_{i-1} - QIF_{i-1} - Pn_{i-1} + Ps_{i-1} \quad 3.2$$

$$Si \quad Temp_{i-1} < 0 \quad \Rightarrow \quad U_i = U_{i-1} - Ep_{i-1} - QIF_{i-1} - Pn_{i-1}$$

➤ **Almacenamiento inferior o zona de raíces L:** La humedad del suelo en la zona de raíces, corresponde a la capa del suelo bajo, la superficie de la cual la vegetación puede extraer agua por transpiración, es representado como la zona de almacenamiento inferior;  $L_{max}$  corresponde al límite superior para la cantidad de agua en este tanque. La humedad en el tanque inferior,  $L$ , esta expuesta a pérdidas por transpiración, y también controla la cantidad de agua que entra al almacenamiento subterráneo como recarga. Es un valor muy sensible en la optimización del modelo ya que controla varios de los procesos que se dan al interior de la estructura de NAM.

$$L_i = L_{i-1} + DL_{i-1} - Ea_{i-1} \quad 3.3$$

➤ **Contribución del almacenamiento de nieve al sistema Ps.**

Toma el valor mínimo entre:

$S_s$ , y

$$Si \quad Temp_{i-1} > 0 \quad \Rightarrow \quad C_{melt} \times Temp \quad 3.4$$

$$Si \quad Temp_{i-1} < 0 \quad \Rightarrow \quad 0$$

➤ **Evapotranspiración potencial calculada Ep.**

Toma el valor mínimo entre:

$$\frac{U + P_s + P}{E_{pot}} \quad \text{y} \quad 3.5$$

➤ **Aporte de flujo subsuperficial QIF:** La contribución del flujo subsuperficial, QIF se supone proporcional a la U y varía linealmente con la humedad contenida en la zona de almacenamiento inferior; toma el valor mínimo entre:

$$\frac{U + P_s - E_p + P}{\quad} \quad \text{y} \quad 3.6$$

$$\text{Si } \frac{L}{L_{\max}} > CLIF \Rightarrow \frac{CQIF \times U \times \left( \frac{L}{L_{\max}} - CLIF \right)}{1 - CLIF} \quad 3.7$$

$$\text{Si } \frac{L}{L_{\max}} \leq CLIF \Rightarrow 0$$

Donde:

CQIF, es el coeficiente para el flujo subsuperficial.

CLIF, es el valor límite de la zona de raíces para el flujo subsuperficial

$$(0 \leq CLIF \leq 1)$$

➤ **Exceso de agua Pn:** Este se presenta cuando se excede el almacenamiento superficial, toma el valor máximo entre:

$$0 \quad \text{y}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Si } Temp > 0 &\Rightarrow U + P + Ps - Ep - QIF - U_{\max} & 3.8 \\
 \text{Si } Temp < 0 &\Rightarrow U - Ep - QIF - U_{\max}
 \end{aligned}$$

➤ **Flujo superficial QOF:** Cuando el almacenamiento superficial es excedido,  $U \geq U_{\max}$ , el exceso de agua,  $P_n$  aporta al flujo superficial como también a la infiltración. QOF representa la parte de  $P_n$  que contribuye al flujo superficial. Esta es asumida como proporcional a  $P_n$  y varía linealmente con el contenido de humedad en el suelo,  $L$ , en la zona de almacenamiento inferior.

Toma el valor mínimo entre:

$$\begin{aligned}
 &U + Ps - Ep + P && \text{y} \\
 \text{Si } \frac{L}{L_{\max}} > CLOF &\Rightarrow \frac{P_n \times CQOF \times \left( \frac{L}{L_{\max}} - CLOF \right)}{1 - CLOF} & 3.9 \\
 \text{Si } \frac{L}{L_{\max}} < CLOF &\Rightarrow 0
 \end{aligned}$$

Donde:

CQOF, es el coeficiente de escorrentía de flujo superficial ( $0 \leq CQOF \leq 1$ ).

CLOF, es el valor límite para que se produzca flujo superficial

$$(0 \leq CLOF \leq 1).$$

La parte de precipitación neta que no se escurre como flujo superficial se infiltra hacia la zona de almacenamiento inferior que representa la zona de raíces. Una parte,  $DL$ , de la cantidad de infiltración,  $(P_n - QOF)$  incrementa el contenido de humedad,  $L$  en la zona de almacenamiento inferior. La cantidad restante de la

humedad infiltrada, G percola en profundidad y recarga el almacenamiento subterráneo.

➤ **Evapotranspiración actual  $E_a$ :** Las demandas de evapotranspiración son asumidas inicialmente por la tasa potencial del almacenamiento. Si el contenido de humedad U, en el almacenamiento superficial es inferior al requerido, se asume que la parte restante es drenada por la actividad de las raíces desde el tanque inferior y a una tasa actual  $E_a$ , donde  $E_a$  es proporcional a la evapotranspiración potencial,  $E_p$ . El algoritmo usa el valor mínimo entre:

$$E_a = E_p \frac{L}{L_{\max}} \quad \text{y} \quad E_{pot} - E_p \quad 3.10$$

Aporte al almacenamiento subterráneo G.

El algoritmo utiliza la siguiente condición:

$$\begin{aligned} \text{Si } \frac{L}{L_{\max}} > CLG &\Rightarrow \frac{(P_n - QOF) \times \left( \frac{L}{L_{\max}} - CLG \right)}{1 - CLG} \\ \text{Si } \frac{L}{L_{\max}} < CLG &\Rightarrow 0 \end{aligned} \quad 3.11$$

Donde:

CLG, es el valor limite para que se produzca la recarga del almacenamiento subterráneo.

➤ **Infiltración en la zona de raíces DL:** La cantidad de infiltración que aporta humedad a la zona de raíces es calculada de la siguiente forma. El algoritmo toma el valor máximo entre:

$$P_n - QOF - G \quad \text{y} \quad 3.12$$

$$0$$

➤ **Salida resultante de la unión del flujo superficial y subsuperficial QR1.**

Para el cálculo de las salidas se utiliza una simplificación de tránsito por tanque lineal de la siguiente forma:

$$QR1 = QR1_{i-1} \times e^{-\frac{1}{CK1}} + (QOF + QIF) \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CK1}}\right) \quad 3.13$$

Donde:

CK1, es la constante para el tránsito del flujo superficial y subsuperficial.

➤ **Componente superior del flujo subterráneo BFU1.**

$$BFU1_i = BFU1_{i-1} \times \left( e^{-\frac{1}{CKBFU}} \right) + \left( G \times (1 - CBFL) \times \left(1 - e^{-\frac{1}{CKBFU}}\right) \right) \quad 3.14$$

Donde:

CKBFU, es la constante de tiempo para el flujo subterráneo superior.

➤ **Componente inferior del flujo subterráneo BFL1.**

$$BFL1_i = BFL1_{i-1} \times \left( e^{-\frac{1}{CKBFL}} \right) + \left( G \times CBFL \times \left( 1 - e^{-\frac{1}{CKBFL}} \right) \right) \quad 3.15$$

Donde:

CKBFL, es la constante de tiempo para el flujo subterráneo inferior.

➤ **Flujo total QR2:** Es la salida final del modelo, en donde se integran los distintos aportes hechos por los almacenamientos.

$$QR2_i = QR2_{i-1} \times \left( e^{-\frac{1}{CK2}} \right) + \left( QR1 \times BFU1 \times BFL1 \times \left( 1 - e^{-\frac{1}{CK2}} \right) \right) \quad 3.16$$

Donde:

CK2, es la constante de transito del flujo total.

En la tabla 3.1 se presenta una descripción general de los parámetros que hacen parte de las funciones del modelo NAM.

**Tabla 3. 1 Parámetros usados por el modelo NAM**

**Tomado de: NAM Simplified Spreadsheet Version Instruction Manual**

PARÁMETRO	RANGO	DESCRIPCIÓN
Lmax	> 0	Máximo contenido de agua en la zona de almacenamiento inferior. Lmax puede ser interpretado como el máximo contenido de agua en la zona de raíces disponible para transpiración por la vegetación. (mm).
Umax	> 0	Máximo contenido de agua en el almacenamiento superficial. Este contiene el agua almacenada en depresiones, además de la interceptación y el agua contenida en una capa superior de suelo de pocos centímetros. (mm); una primera estimación puede ser 0.1Lmax.
Cmelt	> 0	Coefficiente de derretimiento de nieve.
CQOF	0 – 1	Coefficiente de escorrentía de flujo superficial. Este parámetro determina la distribución del exceso de precipitación en flujo superficial e infiltración. Valores pequeños en cuencas planas y altos para cuencas con suelo con poca permeabilidad.
CLOF	0 – 1	Valor limite para el flujo superficial. El flujo superficial solo se produce cuando la humedad relativa contenida en el almacenamiento inferior supera el valor de CLOF.
CQIF	0 – 1	Constante para el flujo subsuperficial. CQIF determina junto con U la cantidad de flujo subsuperficial. En cuencas con topografía plana el valor es muy cercano a cero.
CLIF	0 – 1	Valor limite para el flujo subsuperficial (interflow). Este flujo se genera si la humedad relativa en el almacenamiento inferior es mayor a CLIF.
CLG	0 – 1	Valor limite para la recarga. La recarga del almacenamiento de agua subterránea se produce solo si la humedad relativa en el almacenamiento inferior es mayor que CLG.
CBFL	0 – 1	Coefficiente de flujo de agua subterránea.
Constantes de tiempo para el flujo.		
CK1	> 0	Constante para el transito del flujo superficial y subsuperficial. El transito de estos flujos se produce a través de un tanque lineal con constante CK1.
CK2	> 0	Constante de transito del flujo total. Su transito se realiza a través de un tanque lineal con constante CK2
CKBFU	> 0	Constante de tiempo para el flujo subterráneo superior.
CKBFL	> 0	Constante de tiempo para el flujo subterráneo inferior.

## 4. APLICACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se ha desarrollado la aplicación del modelo hidrológico a efecto de evaluar la respuesta hídrica de las microcuencas de los ríos Surata y Tona. La aplicación de este modelo se ha basado en las investigaciones realizadas en las cuencas anteriormente mencionadas y tratan de incorporar los diferentes procesos hidrológicos presentes en la cuenca.

### 4.1 APLICACIÓN

La forma en la que el modelo NAM fue aplicado en las Microcuencas de los ríos Surata y Tona, se realizó asumiendo dos consideraciones: en la primera, se aplicó el modelo a nivel de cuenca y en la segunda se aplicó a nivel de microcuenca; es decir se obtuvieron series independientes para cada una de las microcuencas, como se describe en el aparte 2.3.4.

Los periodos de tiempo elegidos de acuerdo a las características expuestas en el aparte 2.4 se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 4. 1 periodos seleccionados para calibración**

PERIODO	Cuenca	Microcuenca	
	Río Suratá	Río Suratá	Río Tona
Periodo de Calibración	07-03-93 / 07-03-95	16-05-93 / 07-03-95	16-05-93 / 07-03-95

## 4.2 CALIBRACIÓN

El proceso de calibración de un modelo consiste en generar un ajuste en ciertos parámetros, con el fin de lograr que los resultados del modelo sean lo más parecidos a los valores en el punto de control.

NAM esta basado en ecuaciones físicas y ecuaciones semi-empíricas. De esta forma algunos parámetros del modelo pueden ser inicialmente evaluados de las condiciones físicas de la cuenca, pero estos deben ser mejorados por procesos de calibración, teniendo en cuenta las salidas del modelo (KEITH J. BEVEN ,2003).

La calibración se realizo observando el comportamiento del modelo al variar los valores de los parámetros utilizando herramientas estadísticas (Nash-Sutcliffe), que se incorporan en la versión desarrollada por el grupo de predicción y modelamiento hidroclicmático GPH (Guzmán y Niño, 2005).

Los parámetros para la calibración, son aquellos elementos del ciclo hidrológico que están incluidos en el modelo y que se pretenden ajustar comparando la respuesta del modelo con los datos reales de caudal medidos directamente en las estaciones. los parámetros para la calibración contenidos en el modelo NAM, están descritos con mas detalles en el capitulo 3 en la tabla 3.1.

Los datos de control para el modelo aplicado en la cuenca corresponden a los datos de la serie de caudales medios diarios obtenidas como se indico en el subcapitulo 2.4 perteneciente a los periodos de registro mostrados en la tabla 4.1 y cuyas series se muestran en el anexo 2.

Con el propósito de evaluar la correlación existente entre los caudales reales y los simulados por el modelo, a efecto de realizar el proceso de calibración se utilizó el coeficiente de Nash – Sutcliffe, (1970), que es una función de error dada por la expresión:

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_j)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2}$$

4.1

Donde:

$Q_i$  = Caudales reales medidos en la estación de aforo.

$Q_j$  = Caudales calculados por el modelo.

$\bar{Q}_i$  = Valor del caudal promedio medido en la estación de aforo.

$N$  = Numero Total de Datos.

El ajuste de los datos será mejor en cuanto el coeficiente de Nash – Sutcliffe se acerque a 1, para valores negativos el ajuste es muy malo. El valor del coeficiente obtenido por el proceso de calibración del modelo para la consideración en la que se utilizaron los datos de la estación Majadas fue de 0.79 y a nivel de microcuencas, para el caso de Surata el coeficiente de correlación fue del orden de 0.65, de igual forma, para el caso de Tona el coeficiente de correlación fue del orden de 0.5.

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los Hidrográmas de los caudales medidos y los simulados para el periodo de calibración del modelo a nivel de cuenca y microcuencas.

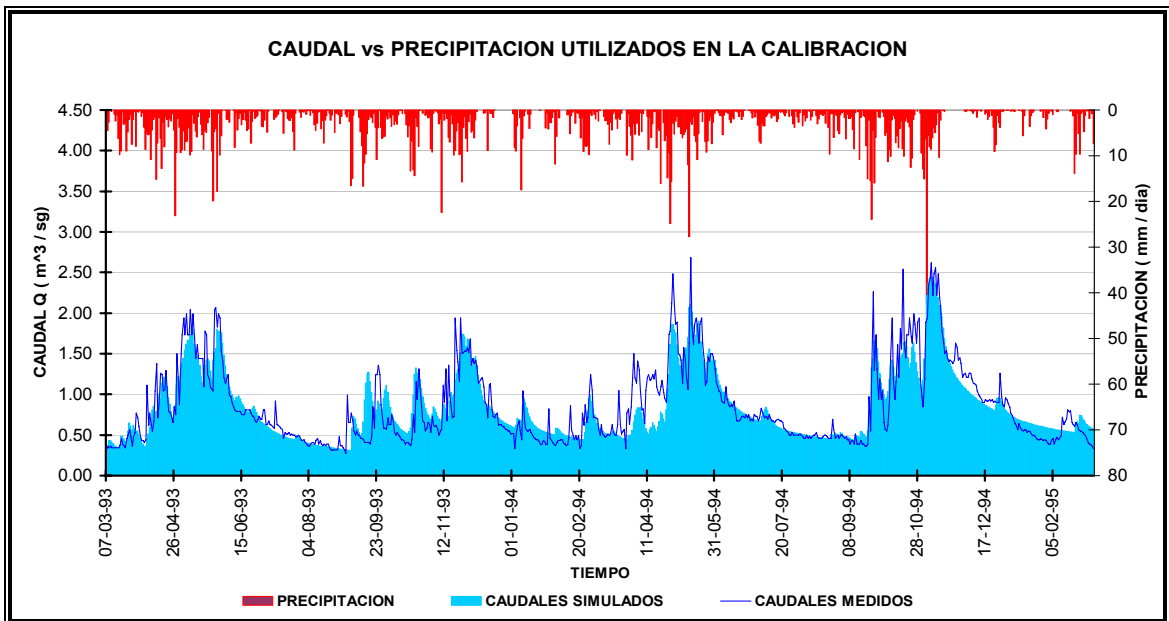


Figura 4. 1 Hidrográmas medidos, simulados Vs precipitación utilizados en la calibración, estación Majadas

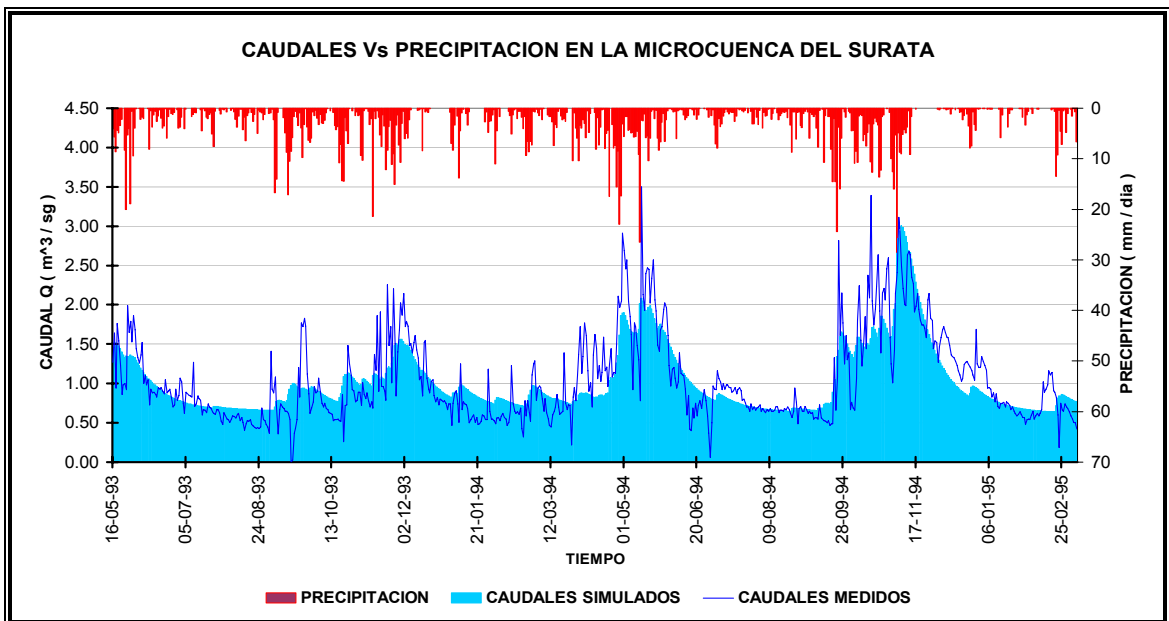


Figura 4. 2 Hidrográmas de caudales Medidos y Simulados en la calibración, microcuenca para el río Surata

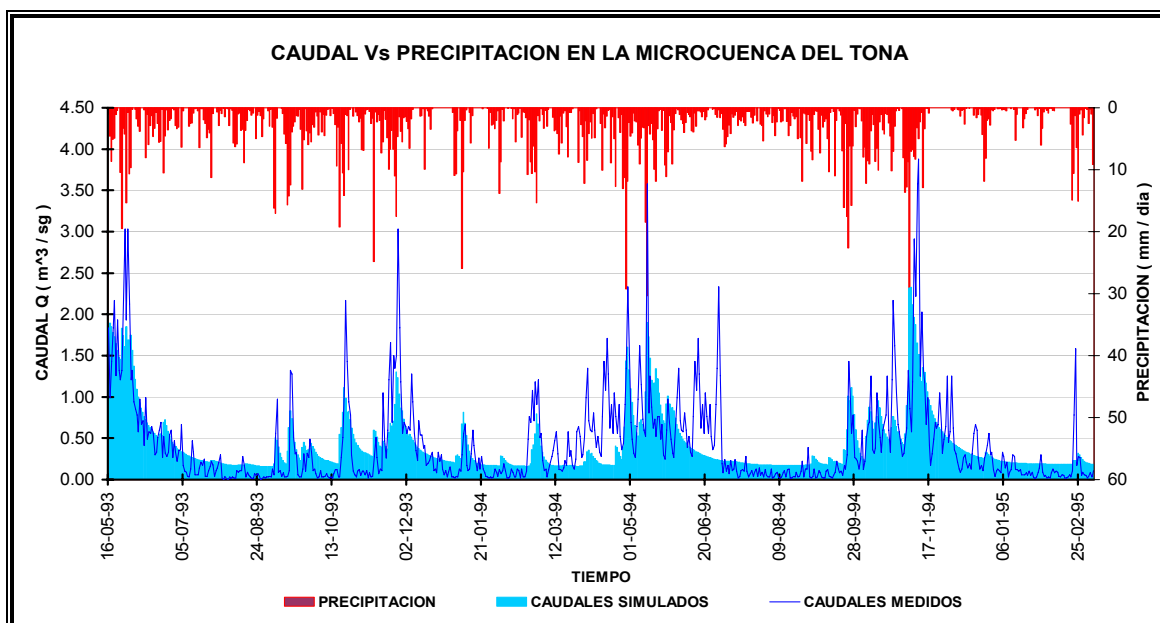


Figura 4. 3 Hidrográmas de caudales Medidos y Simulados en la calibración a microcuenca para el río Tona, Estación Puente Tona

A continuación se muestran los parámetros del modelo NAM resultantes de la calibración.

Tabla 4. 2 Parámetros calibrados por el modelo NAM

PARÁMETRO	ENTRADA	CALIBRACIÓN		
		Cuenca		Microcuencas
		C. Suratá	Suratá	Tona
$L_{max}$	120	12,7	582,33	141,214
$U_{max}$	12	2,8	3,211	12,2408
$C_{melt}$	0,2	0	0	0
<b>CQOF</b>	0,3	0,0378	0,0006	0,1147
<b>CQIF</b>	0,025	0,285	0,0035	0,00223
<b>CBFL</b>	0,2	0,695	0,00034	0,8697
<b>CLIF</b>	0	0	1,298	0,01164
<b>CLOF</b>	0,6	0,565	1,092	0,00039
<b>CLG</b>	0,2	0,00012	0,0052	0,9657
<b>CK<sub>1</sub></b>	2	3,292	5837,8	0,7464
<b>CK<sub>2</sub></b>	2	0,7924	0,9632	2,2797
<b>CKBFU</b>	10	31,254	17,54	16,72
<b>CKBFL</b>	150	433,38	55990,8	11014,9

VALORES INICIALES.				
<b>S<sub>s</sub></b>	0	0	0	0
<b>U</b>	0	0	0	0
<b>L</b>	110	14	40	125
<b>QR<sub>1</sub></b>	0,3	0,001	0,31	0,69
<b>BFU<sub>1</sub></b>	0,3	0,27	0,96	1,77
<b>BFL<sub>1</sub></b>	0,3	0,122	0,35	0,15
<b>QR<sub>2</sub></b>	0,6	0,32	1,27	1,84

### 4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO.

En el proceso de validación, se tienen en cuenta los ajustes de los parámetros arrojados en la calibración y simplemente se hacen coincidir con los parámetros de la validación y se compara el ajuste obtenido.

El proceso de validación se desarrollo utilizando series con periodos diferentes a los utilizados en la calibración del modelo; al igual que en la calibración, la mayor limitante para obtener un buen periodo de datos aptos para la validación fue la carencia de longitudes extensas de registro en los que no se presentaran datos faltantes. La tabla 4.3 muestra la longitud y el periodo de registro de las series utilizadas para la validación del modelo.

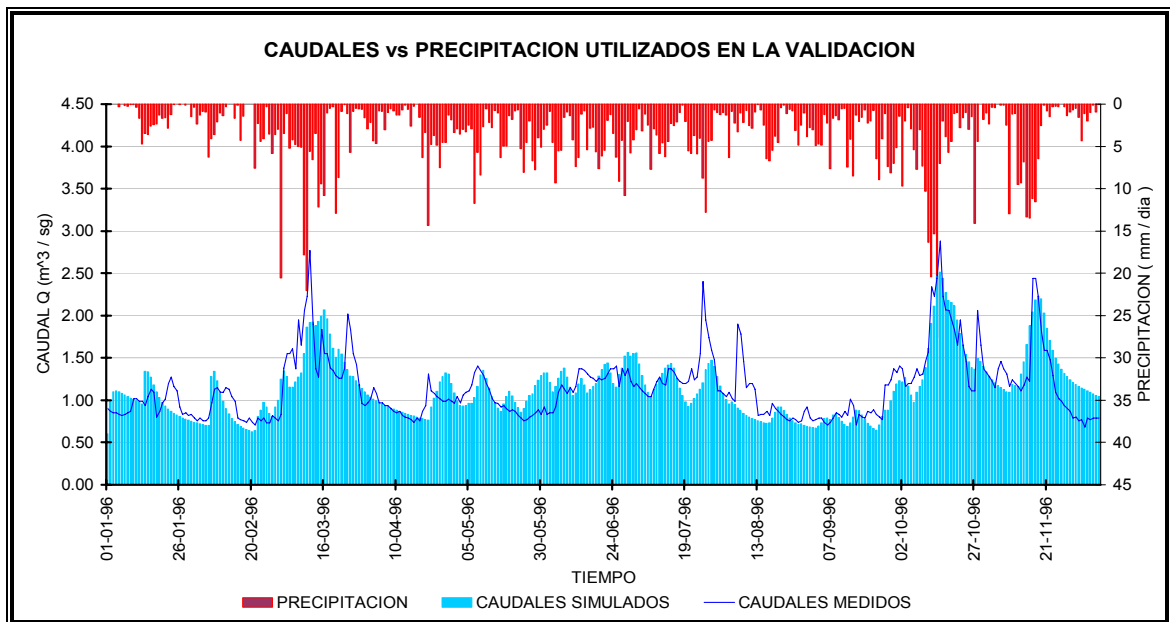
El control de la validación se realizara de la misma manera que en la calibración utilizando el coeficiente de Nash – Sutcliffe.

**Tabla 4. 3 Periodos seleccionados para validación**

PERIODO	Cuenca	Microcuenca	
	Río Suratá	Río Suratá	Río Tona
Periodo de Validación	01-01-96 / 09-12-96	01-01-96 / 09-12-96	01-01-96 / 09-12-96

Los datos de validación para el modelo aplicado en la cuenca corresponden a los datos de la serie de caudales medios diarios obtenidas como se indico en el subcapitulo 2.4 perteneciente a los periodos de registro mostrados en la tabla 4.3 y cuyas series se muestran en el anexo 3.

A continuación se hace una relación entre los caudales medidos, simulados y la precipitación.



**Figura 4. 4 Hidrogramas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación, estación Majadas.**

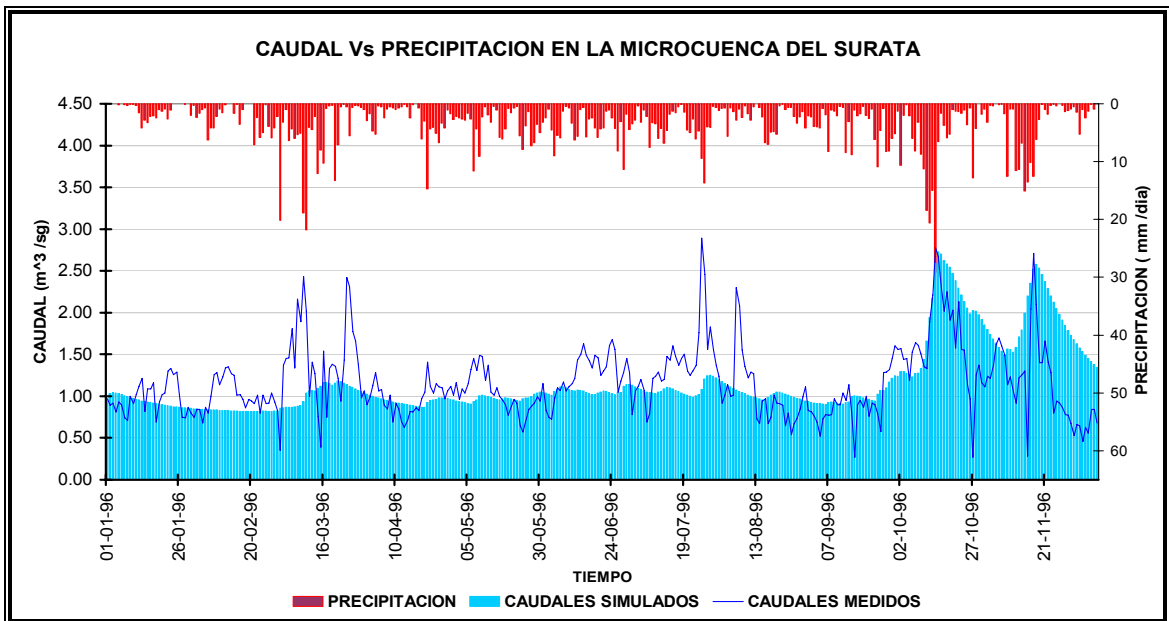


Figura 4. 5 Hidrográmas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación, microcuenca en el caso de Surata

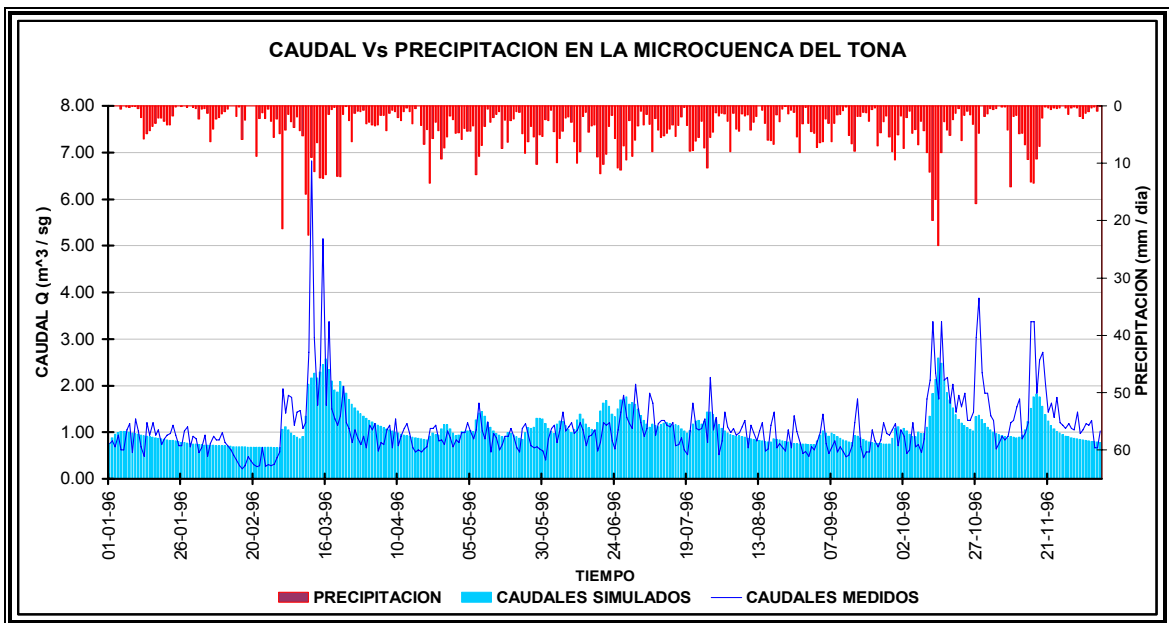


Figura 4. 6 Hidrográmas medidos, simulados vs Precipitación utilizados para la validación microcuenca en el caso de Tona, estación Puente Tona.

El ajuste del coeficiente de Nash – Sutcliffe obtenido para el periodo de la validación a nivel de cuenca fue de 0.55, de la misma forma, para el análisis hecho a las micros cuencas, el coeficiente de Nash – Sutcliffe arrojado en el caso de Surata, fue de -0.208 en tanto que para la microcuenca del Tona fue de 0.40.

A continuación se muestran Los parámetros del modelo NAM utilizados en la validación

**Tabla 4. 4 Parámetros de validación**

PARÁMETRO	ENTRADA	VALIDACIÓN	VALIDACIÓN	
		Cuenca	Microcuencas	
		C. Suratá	Suratá	Tona
<b>L<sub>max</sub></b>	120	12.7	582.33	141.214
<b>U<sub>max</sub></b>	12	2.8	3.211	12.2408
<b>C<sub>melt</sub></b>	0.2	0	0	0
<b>CQOF</b>	0.3	0.0378	0.0006	0.1147
<b>CQIF</b>	0.025	0.285	0.0035	0.00223
<b>CBFL</b>	0.2	0.695	0.00034	0.8697
<b>CLIF</b>	0	0	1.298	0.01164
<b>CLOF</b>	0.6	0.565	1.092	0.00039
<b>CLG</b>	0.2	0.00012	0.0052	0.9657
<b>CK<sub>1</sub></b>	2	3.292	5837.8	0.7464
<b>CK<sub>2</sub></b>	2	0.7924	0.9632	2.2797
<b>CKBFU</b>	10	31.254	17.54	16.72
<b>CKBFL</b>	150	433.38	55990.8	11014.9
<b>VALORES INICIALES.</b>				
<b>S<sub>s</sub></b>	0	0	0	0
<b>U</b>	0	0	0	0
<b>L</b>	110	110	40	219
<b>QR<sub>1</sub></b>	0.3	0	0.51	0
<b>BFU<sub>1</sub></b>	0.3	0.67	0.28	0.5
<b>BFL<sub>1</sub></b>	0.3	0.51	0.29	0.65
<b>QR<sub>2</sub></b>	0.6	0.6	0.97	0.75

En la tabla 4.5 se muestra la comparación entre los datos de caudales medidos y los simulados por el modelo.

**Tabla 4. 5 Comparación de caudales máximos y mínimos medidos y simulados**

	Cuenca Río Suratá		Microcuenca Río Suratá		Microcuenca Río Tona	
	Medidos	Simulados	Medidos	Simulados	Medidos	Simulados
<b>Máximo</b>	0.68	0.60	0.06	0.64	0.01	0.16
<b>Mínimo</b>	2.88	2.51	3.50	3.00	3.88	2.33
<b>Medio</b>	1.14	1.14	1.19	1.13	0.47	0.44

## CONCLUSIONES

- Se aplicó el modelo a nivel de cuenca y microcuenca, encontrándose una mayor correspondencia entre los hidrográmas medidos y simulados para la aplicación a escala de cuenca, donde se obtuvo un coeficiente Nash – Sutcliffe de 0.79 que en contraste con los obtenidos en las microcuencas Surata y Tona fueron de 0.5 y 0.46 respectivamente, lo que nos indica que es un excelente ajuste, si se tiene en cuenta las limitaciones de las series de caudal adoptadas y la resolución temporal de los parámetros climatológicos para el cálculo de evapotranspiración.
- En el proceso de validación se encuentra que no hay una adecuada relación entre los hidrográmas medidos y simulados para la microcuenca del río Surata en donde se obtuvo un valor del parámetro Nash – Sutcliffe de -0.2, se considera que la no correspondencia de los hidrográmas medidos y simulados para este caso se debe principalmente a problemas de homogeneidad y consistencia de la serie de caudales empleada en el proceso de validación, ya que esta serie presenta una acumulación de errores por ser obtenida como una sustracción de los valores de caudal de la estación Puente Tona a los datos de caudal de la estación Majadas, los cuales no cuentan con ningún tipo de corrección por carecer de un registro de metadatos.

- La aplicación del modelo a escala de cuenca y en el caso de la microcuenca del río Tona se considera valida por presentar una aceptable relación entre los valores del coeficiente Nash - Sutcliffe obtenidos en el proceso de validación y calibración del modelo, los cuales fueron de 0.7 y 0.8 respectivamente. Se cree que la obtención de estos resultados es debido a la bondad los datos que fueron empleados en los periodos seleccionados para la validación y calibración.
  
- Se piensa que el buen ajuste del coeficiente Nash – Sutcliffe de 0.79 en el caso del modelo aplicado a escala de cuenca se debe a que la serie de caudales empleada fue la serie de la estación Majadas de la cual se espera una alta fidelidad de los registros de caudal por ser esta una estación de tipo limnigráfica que se encuentra ubicada sobre un lecho rocoso que haría poco variables la sección transversal de la corriente en periodos secos y húmedos.
  
- El modelo hidrológico aplicado en los tres casos (cuenca y microcuencas) modela de una mejor manera los periodos de recesión, donde se muestra una aceptable relación entre la precipitación y los caudales tanto medidos como simulados, por el contrario, en el caso de los picos su valor es subestimado, pero cabe anotar que el tiempo en que este alcanza es modelado adecuadamente.

## RECOMENDACIONES

La gran limitante en el desarrollo del presente estudio fue la baja calidad, cantidad, inconsistencia y no-homogeneidad de algunos de los datos hidroclimáticos, principalmente series de caudales, por ende se recomienda:

- La implementación de una red hidroclimática adecuada para las microcuencas de los ríos Surata y especialmente en el área de la microcuenca del río Tona, ya que en esta zona se cuenta con un limitado número de estaciones que a su vez presentan una deficiente calidad de la información.
- Se recomienda que para la obtención de mejores resultados, en el futuro las entidades a cargo del manejo de las estaciones realicen revisiones periódicas a los instrumentos de observación y medición con el fin de reducir los errores sistemáticos que se presentan en los registros y tener un adecuado registro de meta datos.
- Para el desarrollo futuro de proyectos relacionados con el presente, se recomienda utilizar datos de las variables climatológicas con resolución temporal adecuada y no valores acumulados de escala de tiempo mayor con el fin de obtener unos mejores resultados en cuanto a los valores de Evapotranspiración se refiere.

## BIBLIOGRAFÍA

- APARARICIO, F., 1987. Fundamentos de hidrología de superficie., Noriega editores Limusa. p. 27-35.
- ARENAS, J., Ruiz, J., 2005. Estudio de la variación del régimen de lluvias en la cuenca superior del Río Lebrija (C.S.R.L). Tesis de Grado UIS.
- CORPORACION AUTONAOMA PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA, CDMB. (2002) Estudio Plan de Ordenamiento Ambiental de la microcuenca del río Charta, área de jurisdicción de la C.D.M.B. Bucaramanga.
  - Estudio plan de ordenamiento ambiental de la microcuenca del Río Suratá Bajo, área de jurisdicción de la C.D.M.B. Bucaramanga, 2002.
  - Estudio plan de ordenamiento ambiental de la microcuenca del Río Suratá alto. Bucaramanga, 2002.
  - Estudio plan de ordenamiento ambiental de la microcuenca del Río Tona. Bucaramanga, 2002.
  - Estudio plan de ordenamiento ambiental de la microcuenca del Río Vetás. Bucaramanga, 2002.

- AZA, Z., Vargas, M., 2005. Modelamiento estadístico las series de tiempo de la cuenca superior del Río Lebrija. Tesis de Grado UIS.
- DE LAAT, P.J.M., 1999. NAM – Nedbor Afstromings Model. Simplified spreadsheet version. Instruction Manual. IHE
- Enviromental and Water Resources Institute of the American Society of Civil engineers, (Task Committee on Standarization of Reference Evapotranspiration) Final Report January, 2005.
- Food and agriculture organization of the united nations, (Allen et al., 1998). Crop evapotranspiration-Guideline for computing crop water requirements.
- GARCIA, S., Otero, J., 2005. Estimación de la Evapotranspiración real en la Cuenca Superior del Río Lebrija. Tesis de Grado UIS.
- Golden Software. 1999. SURFER v 8.0
- GUZMAN, J.A., Chu, Ma, 2002, SPELL Stat. Software para el análisis de series de tiempo. Sin publicar.
- GUZMAN, J.A., 2006, SPELL SDM. No publicado.
- GUZMAN, J.A., 2005, SPELL-map. V1.0.0.3. Software para el manejo de DEM. Sin publicar.
- GUZMAN, J.A., 2006, SPELL AMO. No publicado.
- GUZMAN, J, Gómez, S., Colegial, D., Anaya, A., Niño E., 2005. Cuenca Experimental del Río Sucio (CERS). Sin publicar.
- GUZMAN, J., Niño, E.V; 2005, NAM-gph v.1.0, software para el modelamiento hidrológico. Sin publicar.
- HAM, J., Equations for calculating referente Corp ET from hourly weather data. departament of Agronomy, Kansas State University.

- KEITH. J. BEVEN; 2003, Rainfall-runoff modelling, Wiley.
- SERRANO, A., BALAGUERA, G., 2006. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L.). Tesis de Grado UIS
- Nash & Sutcliffe, 1970.

**ANEXOS 1. Información general de las estaciones meteorológicas**

Estaciones meteorológicas ubicadas en la CSRL,

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD ° ' "	LONGITUD msnm	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN (Año/mes)	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
2319503	Aeropuerto Gómez Niño	07 08 00	73 0800	1,104,682	1,280,367	Bucaramanga	1940 / 06	1974/07	De Oro	931	IDEAM	SS	NA
2319513	Aeropuerto Palonegro	07 07 34	73 10 59	1,099,190	1,279,557	Lebrija	1974 / 08		De Oro	1189	IDEAM	SP	AC
3701502	Berlín	07 11 14	72 52 06	1,133,945	1,286,396	Tona	1968 / 05		Jordán	3214	IDEAM	CP	AC
319083	Bucaramanga IDEAM	07 07 42	73 07 33	1,105,512	1,279,816	Bucaramanga	1996 / 10		Suratá	1025	IDEAM	PG	AC
2319033	Buenavista	07 00 00	73 03 00	1,113,922	1,265,639	Piedecuesta	1967 / 10	1971 / 09	Lato	1020	IDEAM	PM	NA
2319020	Cachiri 1	07 29 00	73 01 00	1,117,481	1,319,110	Suratá	1959 / 10	1972 / 08	Cachiri	1967	IDEAM	PM	NA
2319520	Cachiri 2	07 28 22	72 59 30	1,120,243	1,317,948	Suratá	1971 / 06		Cachiri	1850	IDEAM	CO	AC
2319060	El Pantano	06 40 44	73 13 38	1,094,399	1,230,084	Girón	1967 / 11		Q. La Angula	1280	IDEAM	PM	AC
2319030	El Picacho	07 06 36	72 57 45	1,123,563	1,277,828	Tona	1967 / 07		Tona	3310	IDEAM	PM	AC
2319070	Granja Piedecuesta	06 59 36	73 04 04	1,111,958	1,264,897	Piedecuesta	1970 / 07		Lato	1000	IDEAM	PG	AC
2406502	Hacienda la esperanza	07 04 00	73 18 00	1,086,281	1,272,959	Lebrija	1974 / 10	1986 / 02	Sogamoso	520	IDEAM	CP	NA
2406503	Hacienda Trigueros	07 04 37	73 21 29	1,079,864	1,274,085	Girón	1996 / 03		Sogamoso	400	IDEAM	CP	AC
2319080	HIMAT	07 07 00	73 08 00	1,104,686	1,278,524	Bucaramanga	1984 / 06	1989 / 05	De Oro	1010	IDEAM	PM	NA
2319059	La Floresta	07 05 25	73 07 26	1,105,735	1,275,607	Bucaramanga	1978 / 06		Q. La Iglesia	925	IDEAM	PG	AC
2319040	La Galvicia	07 07 27	73 03 25	1,113,124	1,279,371	Floridablanca	1968 / 01		Tona	1779	IDEAM	PM	AC
2319026	La Laguna	07 04 44	73 12 49	1,095,824	1,274,328	Lebrija	1967 / 05		Q. La Angula	1050	IDEAM	PM	AC
2319506	La Mariana	07 07 32	73 00 38	1,118,252	1,279,542	Tona	1968 / 10	1975 / 10	Suratá	2250	IDEAM	PM	NA
2406007	La Parroquia	07 04 31	73 19 44	1,083,087	1,273,906	Girón	1959 / 09	1965 / 06	Q. Agua blanca	267	IDEAM	PG	AC
2319508	La Urbina	07 2500	73 21 00	1,080,694	1,311,661	Lebrija	1968 / 05	1976 / 06	Lebrija	410	IDEAM	CO	NA
2319027	Limoncito	07 03 00	73 06 00	1,108,384	1,271,157	Floridablanca	1967 / 05	1971 / 09	Frio	820	IDEAM	PM	NA
2319511	Llanogrande	07 01 32	73 10 02	1,100,961	1,268,438	Girón	1971 / 07		De Oro	777	IDEAM	CO	AC
2319034	Matajira	07 12 47	73 03 53	1,112,243	1,289,201	Matanza	1967 / 10		Suratá	996	IDEAM	PM	AC
2319012	Matanza	07 22 00	73 02 00	1,115,671	1,306,201	Matanza	1958 / 05	1971 / 10	Suratá	1570	IDEAM	PM	NA
2319038	Palmas	07 12 40	73 13 05	1,095,305	1,288,951	Lebrija	1967 / 11		Q. Honda	855	IDEAM	PM	AC
2319028	Palogordo	06 58 04	73 07 58	1,104,708	1,262,055	Girón	1967 / 06		De Oro	950	IDEAM	PM	AC
2319043	Piedecuesta	06 59 00	73 03 00	1,113,926	1,263,796	Piedecuesta	1969 / 01	1971 / 01	Lato	1000	IDEAM	PG	NA
2319010	Planta Electrica	06 59 00	73 02 00	1,115,768	1,263,800	Piedecuesta	1958 / 03	1971 / 09	Q. El Rasgón	1000	IDEAM	PM	NA
2319504	UIS IDEAM	07 08 41	73 07 19	1,105,937	1,281,629	Bucaramanga	1957 / 01		Tona	1018	IDEAM	PG	AC
2319016	Vetas	07 19 00	72 52 00	1,134,091	1,300,716	California	1958 / 07	1972 / 07	Vetas	3100	IDEAM	PM	NA
2319045	Vetas el Pozo	07 18 32	72 52 42	1,132,805	1,299,852	Vetas	1971 / 03		Vetas	3220	IDEAM	PM	AC
2319505	Vivero Chimita	07 07 00	73 09 00	1,102,845	1,278,520	Bucaramanga	1968 / 08	1971 / 06	Suratá	830	IDEAM	CP	NA
2319509	Vivero Suratá	07 21 57	72 59 17	1,120,671	1,306,120	Suratá	1968 / 09		Suratá	1725	IDEAM	CO	AC
2319041	El Brasil	07 08 44	73 03 28	1,113,013	1,281,730	Tona	1968 / 07	1971 / 11	Tona	1090	IDEAM	PM	NA
2319044	El Naranjo	07 12 19	73 18 00	1,086,255	1,288,290	Lebrija	1971 / 04		Q. San Benito	825	IDEAM	PM	AC
CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
2319072	CDMB	07 07 18	73 07 21	1,105,857	1,279,070	Bucaramanga	1972 / 01		Lebrija	950	CDMB	PG	AC
	Chimita	07 06 04	73 10 13	1,100,617	1,276,796					684	CDMB	PG	AC
2319739	El Rasgón	07 02 31	72 59 44	1,119,914	1,270,294	Piedecuesta	1985 / 05		Q. El Rasgón	1950	CDMB	CO	AC
2319521	La Esperanza	07 04 19	73 04 27	1,111,228	1,273,582	Floridablanca	1979 / 09		Lebrija	1020	CDMB	CO	AC
2319073	La Flora	07 08 17	73 06 27	1,107,543	1,280,894	Bucaramanga	1972 / 01		Lebrija	1100	CDMB	PG	AC
2319739	PTAR	07 04 04	73 07 57	1,104,803	1,273,129	Piedecuesta	1985/05		Q. El Rasgón	760	CDMB	CO	AC
	UIS CDMB	07 08 36	73 07 31	1,105,545	1,281,485	Bucaramanga			Tona	989	CDMB	CP	AC

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
	La Granja	07 15	73 04 00	1,112,019	1,293,287	Suratá	1982 / 05		Suratá	1240	AMB	PM	

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
2319061	Bonanza	07 04 00	73 10 00	1,101,014	1,272,986	Girón	1967 / 11		De Oro	1250	FNC	PM	AC
2319065	Ceylan	07 09 26	73 07 33	1,105,505	1,282,998	Bucaramanga	1968 / 01		Suratá	1300	FNC	PM	
2319063	La Loma	07 04 00	73 05 00	1,110,222	1,273,006	Floridablanca	1967 / 12		De Oro	1400	FNC	PM	
2319064	Miporal	07 04 00	73 06 00	1,108,381	1,273,001	Floridablanca	1967 / 06		De Oro	1237	FNC	PM	
	San Antonio	07 06 08	73 04 11	1,111,733	1,276,956	Floridablanca	1991 / 01		Frió	1480	FNC	CO	

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
2319004	Bucaramanga	07 08 00	73 06 00	1,108,365	1,280,375	Bucaramanga	1953 / 01		De Oro	1018	COLT	PM	AC
2319017	Floridablanca	07 04 00	73 05 00	1,110,222	1,273,005	Floridablanca	1958 / 10		De Oro	860	COLT	PM	

CÓDIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	E	N	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN	FECHA SUSPENSIÓN	SUBCUENCA	ALTITUD	ENTIDAD	TIPO EST	ESTADO
	Ruitoque Alto	07 01 40	73 05 06	1,110,038	1,268,702					1297	URBANAS	PG	AC

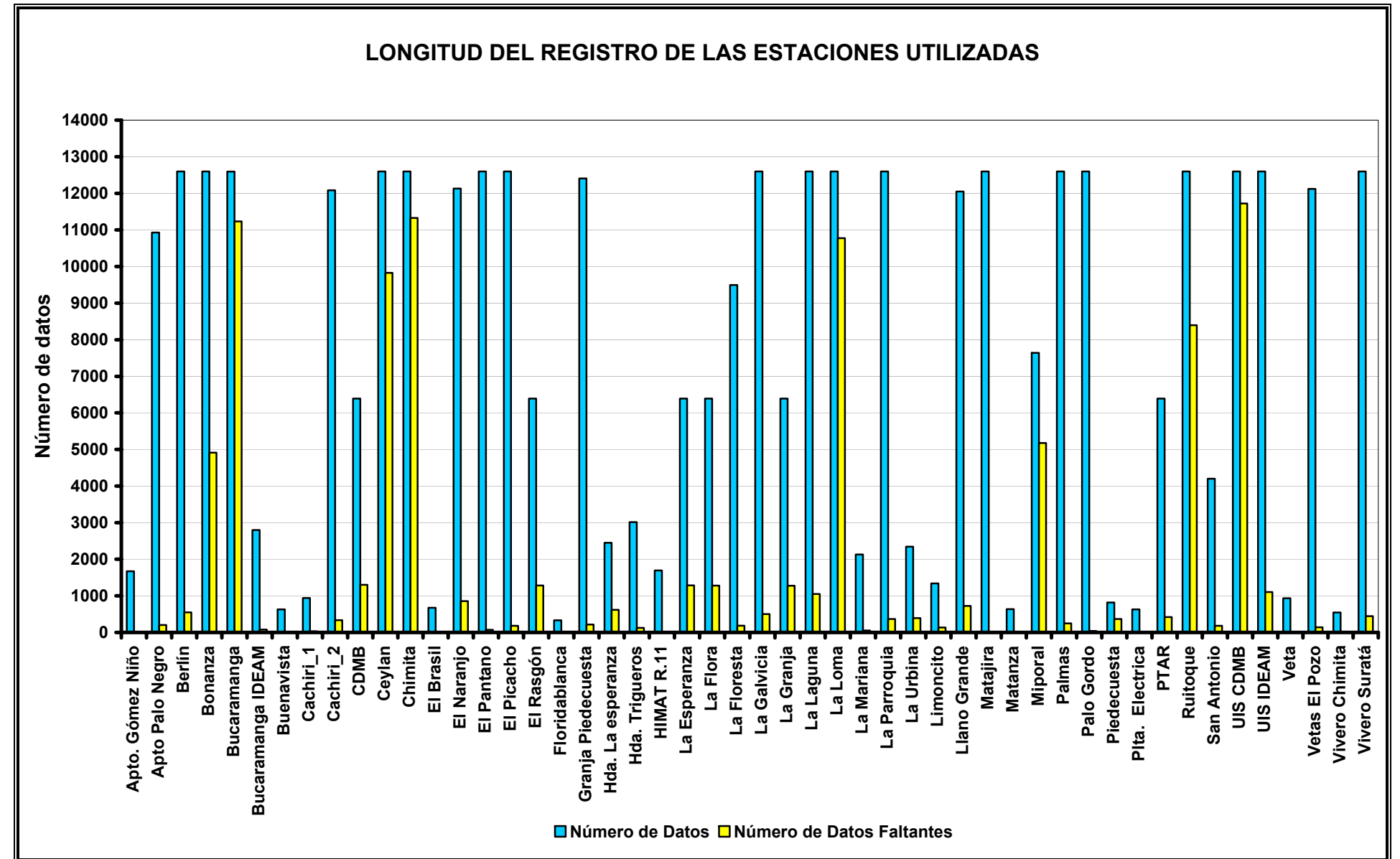
**SP:** Estación sinóptica principal  
**SS:** Estación sinóptica secundaria  
**CO:** Estación climatológica corriente  
**CP:** Estación climatológica principal  
**PG:** Estación de observación de precipitación tipo pluviográfica  
**PM:** Estación de observación de precipitación tipo pluviométrica  
**NA:** Estación no activa  
**AC:** Estación Activa

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales  
**CDMB:** Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga  
**AMB:** Acueducto Metropolitano de Bucaramanga  
**FNC:** federación Nacional de Cafeteros

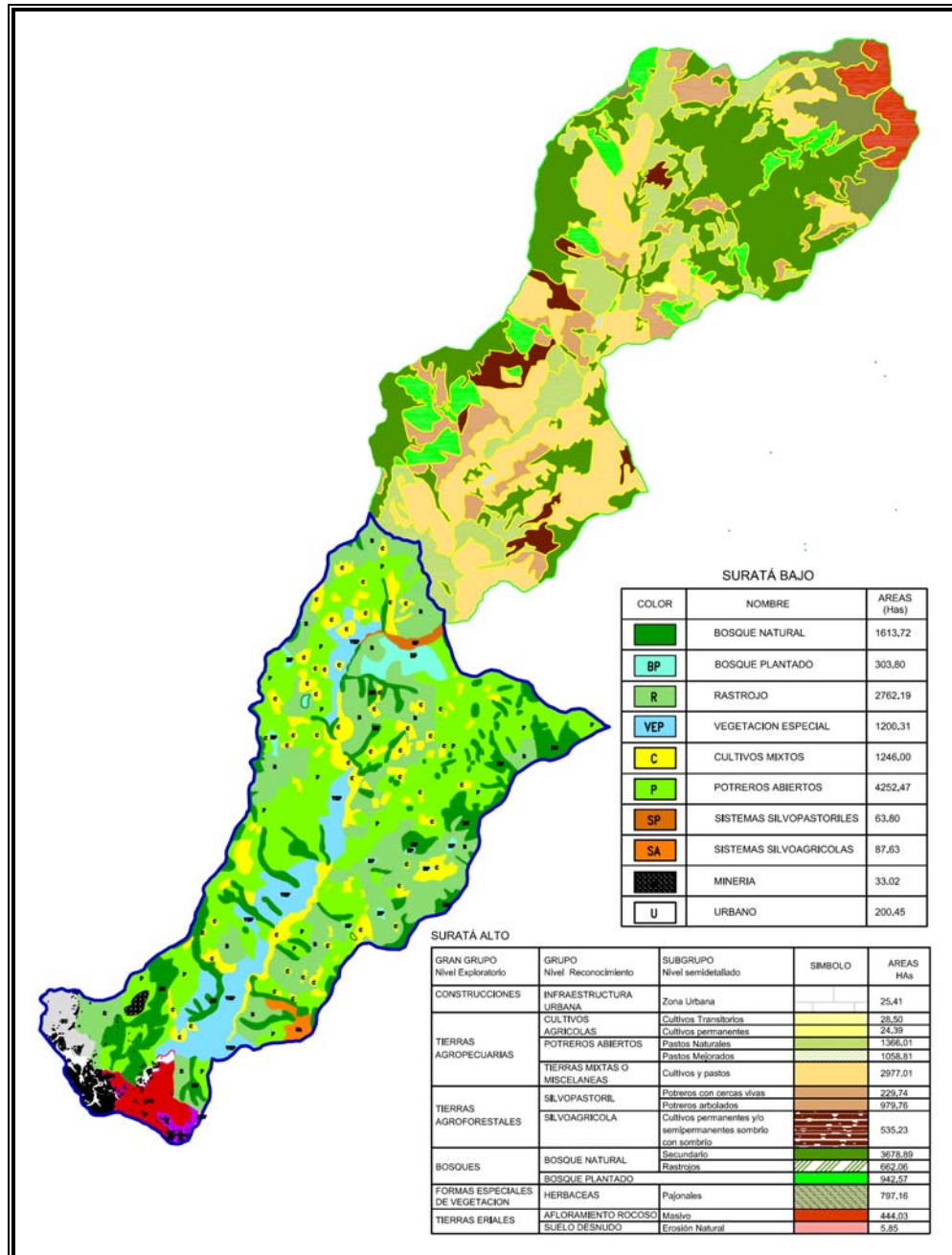
Relación entre longitud de registro y datos faltantes

ESTACIÓN	LONGITUD DEL REGISTRO	DATOS FALTANTES	% DATOS FALTANTES
Apto. Gómez Niño	1671	11	0.66
Apto Palo Negro	10927	202	1.85
Berlín	12600	547	4.34
Bonanza	12600	4913	38.99
Bucaramanga	12597	11231	89.16
Bucaramanga IDEAM	2799	77	2.75
Buenvista	631	0	0.00
Cachiri_1	943	30	3.18
Cachiri_2	12081	337	2.79
CDMB	6391	1303	20.39
Ceylan	12600	9829	78.01
Chimita	12600	11329	89.91
El Brasil	673	0	0.00
El Naranjo	12130	856	7.06
El Pantano	12600	71	0.56
El Picacho	12600	182	1.44
El Rasgón	6391	1283	20.08
Floridablanca	334	0	0.00
Granja Piedecuesta	12404	217	1.75
Hda. La esperanza	2450	620	25.31
Hda. Trigueros	3013	127	4.22
HIMAT R.11	1694	0	0.00
La Esperanza	6391	1288	20.15
La Flora	6391	1282	20.06
La Floresta	9497	185	1.95
La Galvicia	12600	501	3.98
La Granja	6391	1279	20.01
La Laguna	12600	1051	8.34
La Loma	12600	10773	85.50
La Mariana	2130	51	2.39
La Parroquia	12600	367	2.91
La Urbina	2343	392	16.73
Limoncito	1339	134	10.01
Llano Grande	12049	724	6.01
Matajira	12600	3	0.02
Matanza	637	3	0.47
Miporal	7639	5176	67.76
Palmas	12600	245	1.94
Palo Gordo	12600	39	0.31
Piedecuesta	820	365	44.51
Plta. Electrica	631	11	1.74
PTAR	6391	422	6.60
Ruitoque	12600	8395	66.63
San Antonio	4199	182	4.33
UIS CDMB	12600	11722	93.03
UIS IDEAM	12600	1106	8.78
Veta	937	0	0.00
Vetas El Pozo	12122	142	1.17
Vivero Chimita	546	21	3.85
Vivero Suratá	12600	447	3.55

Longitud de registros por estaciones.

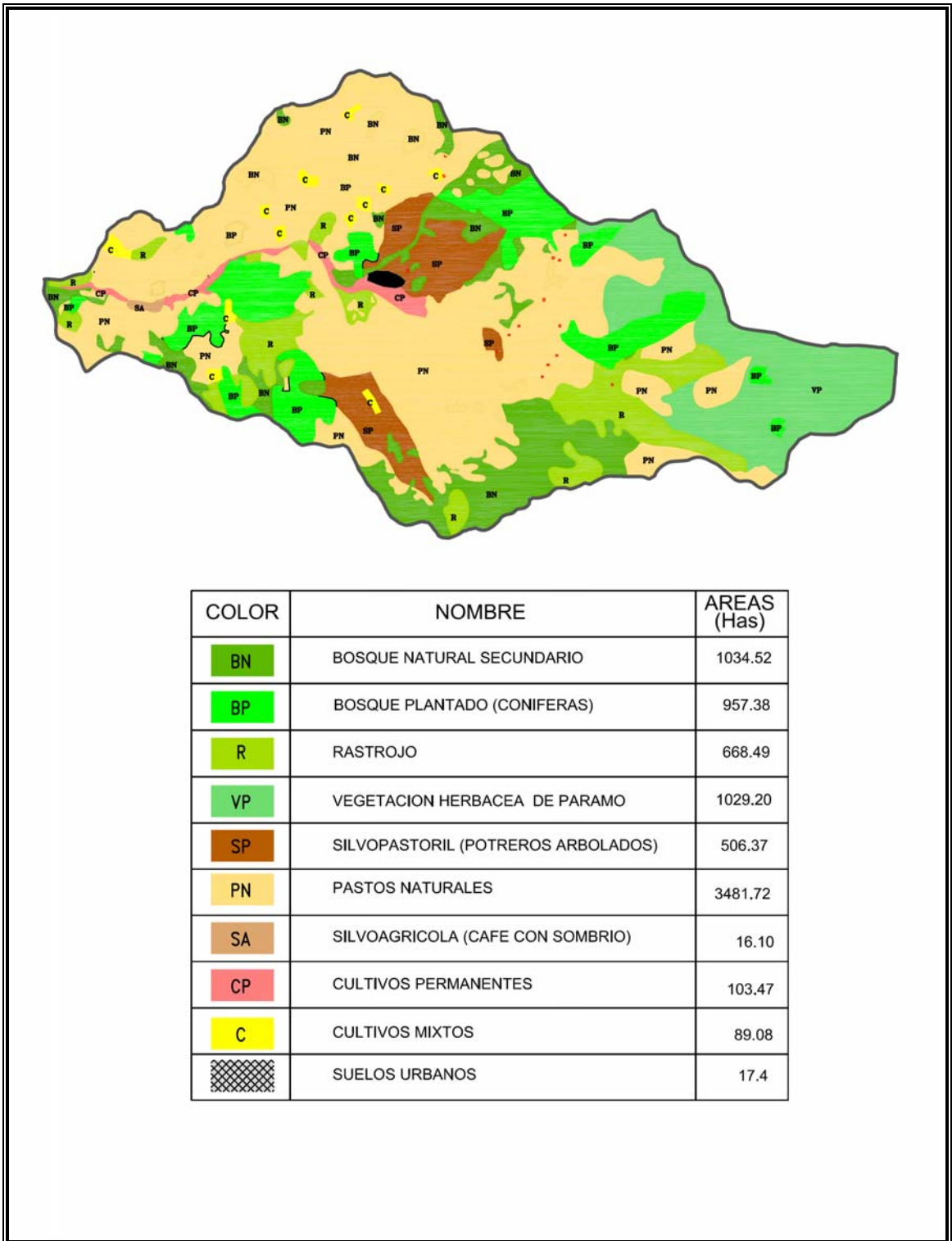


## ANEXO 2. Cobertura vegetal en la cuenca del Río Suratá



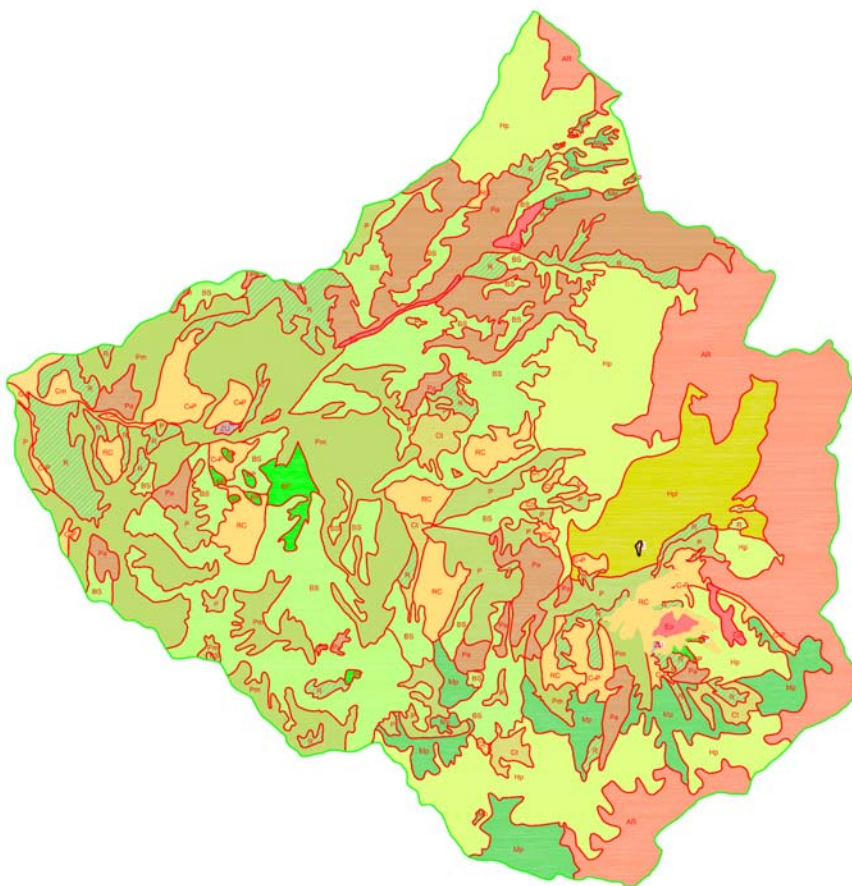
Cobertura vegetal microcuenca del Río Suratá

Fuente: POAT Suratá Alto, Suratá Bajo CDBM (2002)



**Cobertura vegetal microcuencia Vetas**

**Fuente: POAT Charta CDBM (2002)**

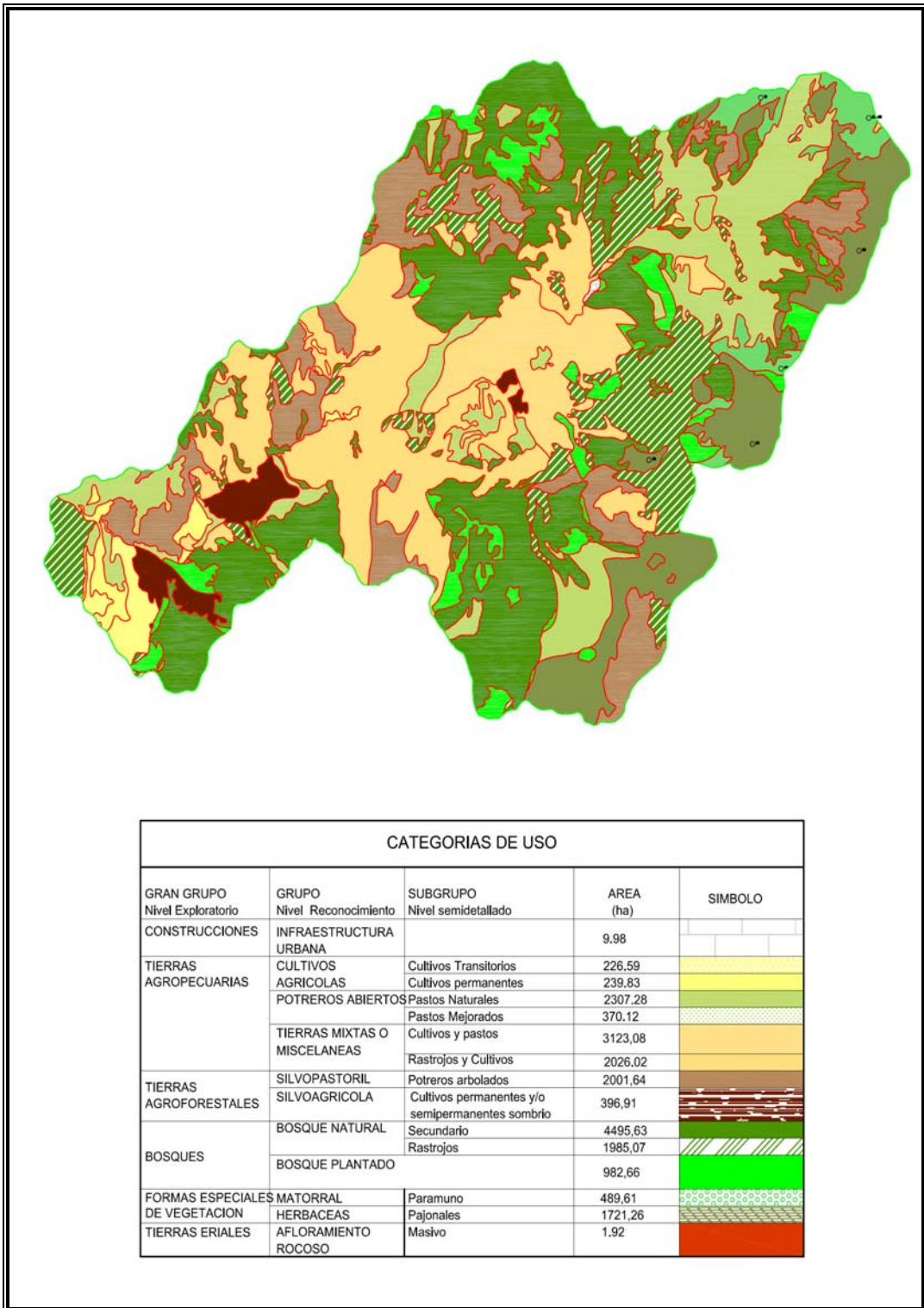


### CATEGORIAS DE USO

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel semidetallado	SIMBOLO	AREA (has.)	
CONSTRUCCIONES	INFRAESTRUCTURA URBANA		ZU	11.3	
TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRICOLAS	Cultivos Transitorios	Ct	197.5	
		POTREROS ABIERTOS	Pastos Naturales	P	778.5
		Pastos Mejorados	Pm	2128.9	
		Pajonales intervenidos	Hpl	664.4	
	TIERRAS MIXTAS O MISCELANEAS		Cultivos mixtos	Cm	62.7
			Cultivos y pastos	C-P	449.2
			Rastrojos y cultivos	RC	584.6
TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOPASTORIL	Potreros arbolados	Pa	1508.5	
BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Secundario	BS	2563.5	
		Rastrojos	R	951.7	
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas	BP	132.2	
FORMAS ESPECIALES DE VEGETACION	MATORRAL	Paramuno	Mp	794.9	
	HERBACEAS	Pajonales	Hp	2675.4	
TIERRAS ERIALES	AFLORAMIENTO ROCOSO	Masivo	AR	1973.1	
	SUELO DESNUDO	Erosion Provocada	Ep	102.5	

Cobertura vegetal microcuenca del Río Charta

Fuente: POAT Vetas CDBM (2002)

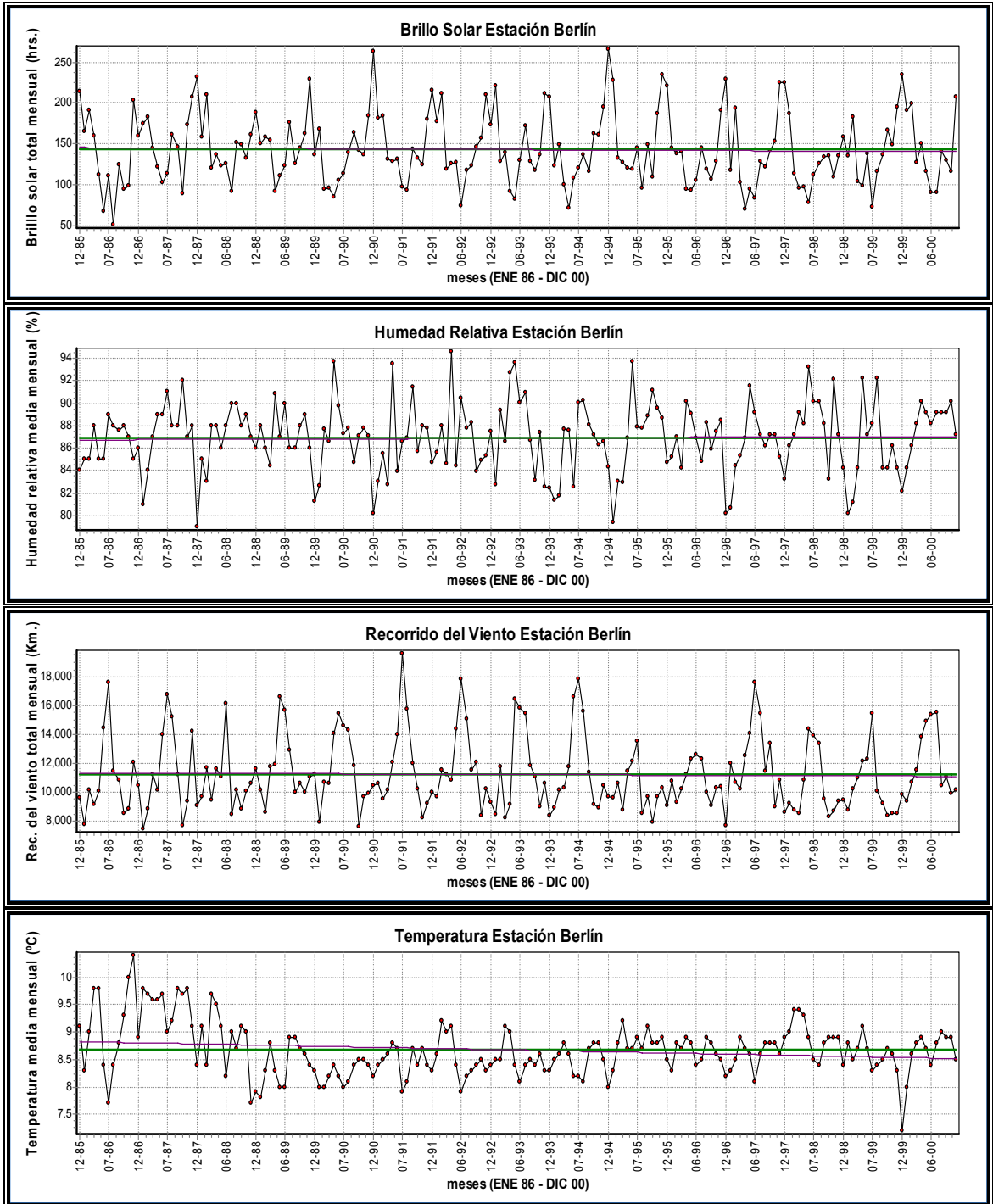


**Cobertura vegetal microcuena del Río Tona**

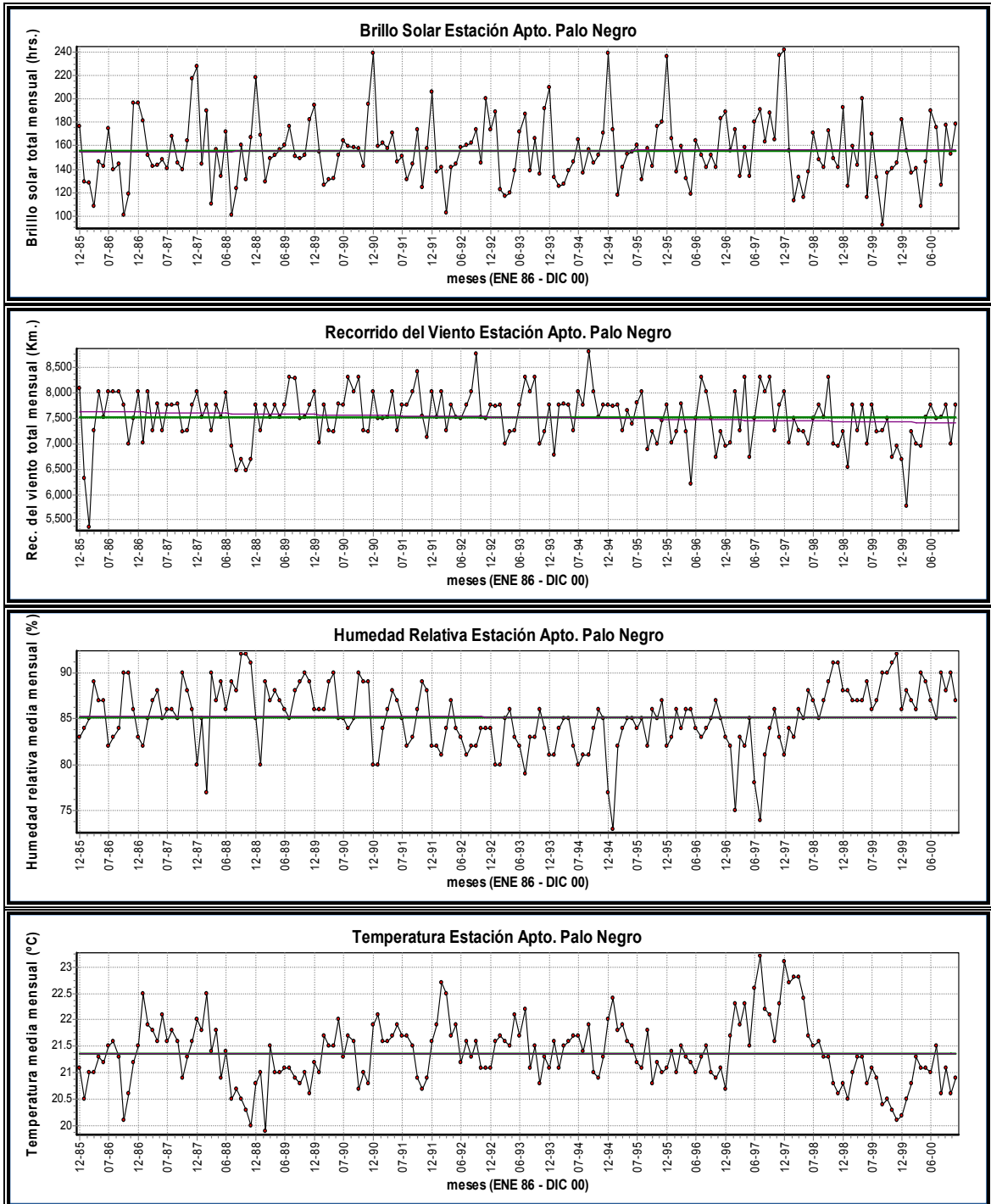
**Fuente: POAT Tona CDBM (2002)**

### ANEXO 3. Series de tiempo de las variables climatológicas empleadas

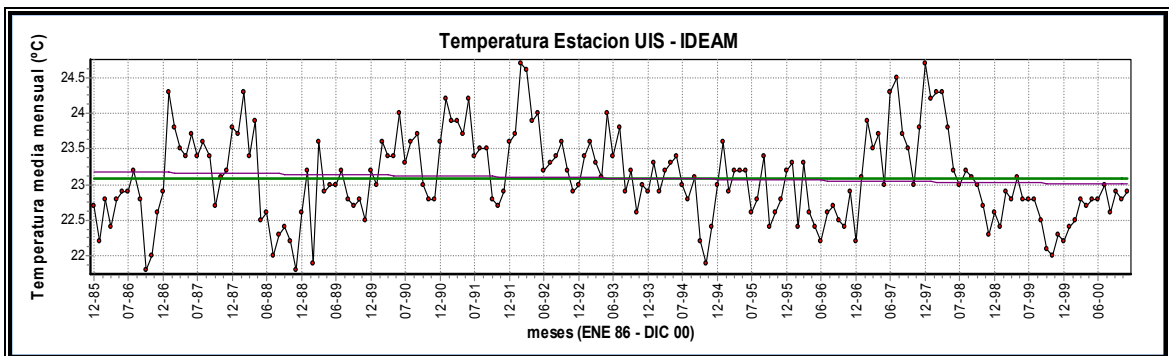
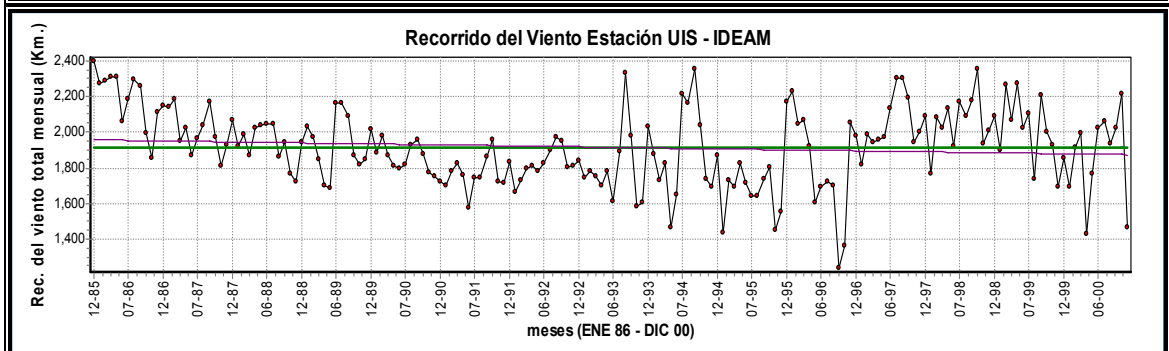
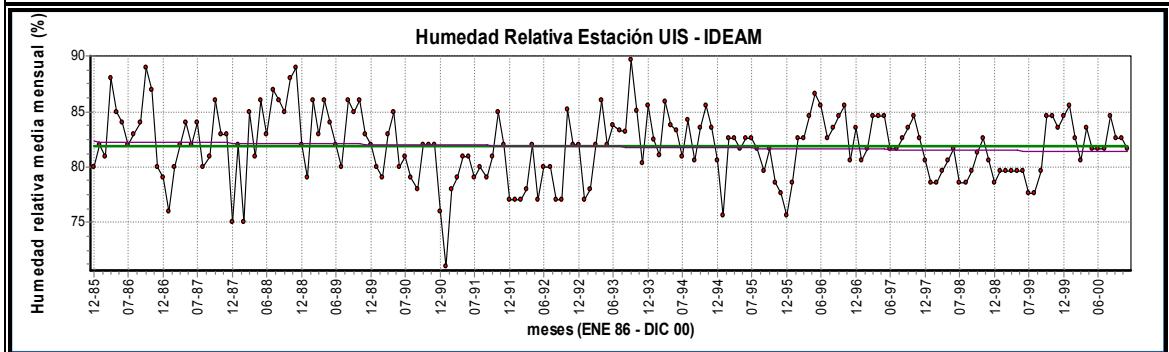
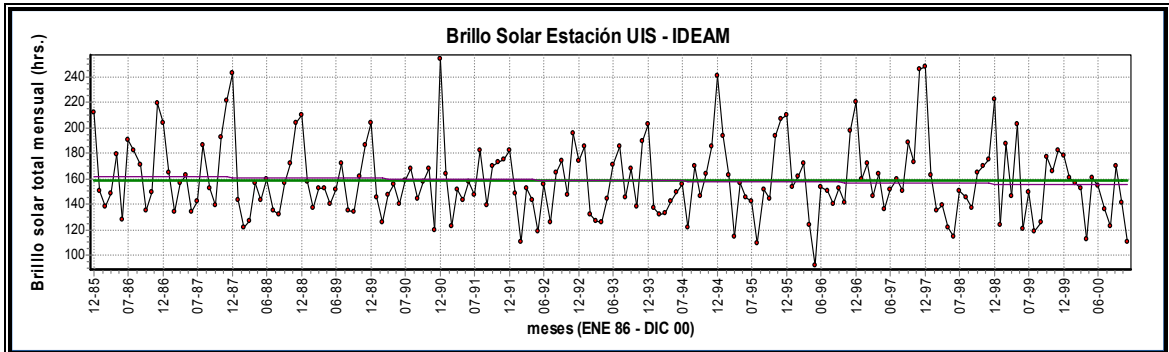
#### Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación Berlín



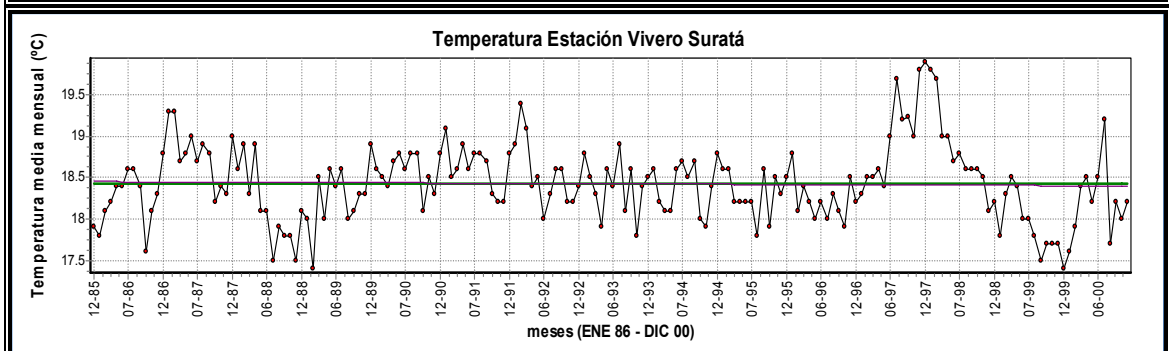
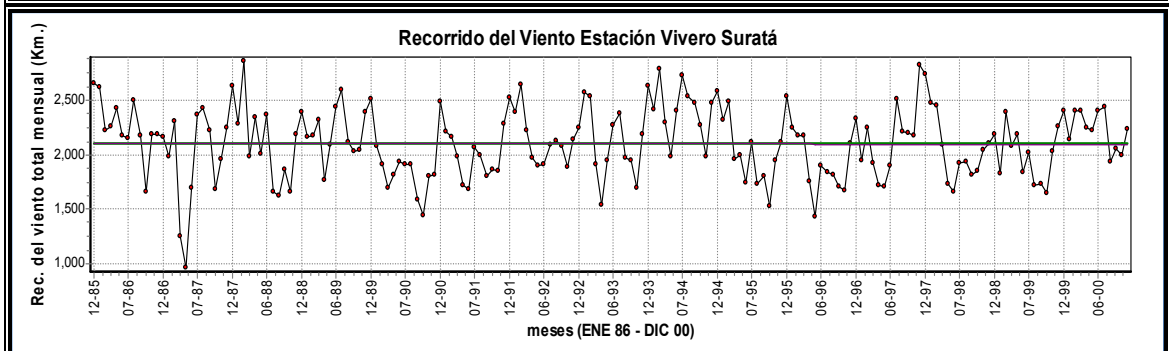
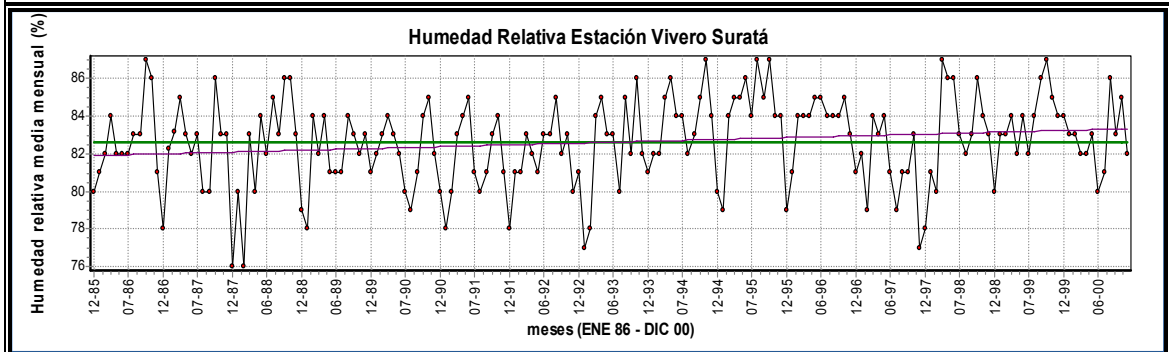
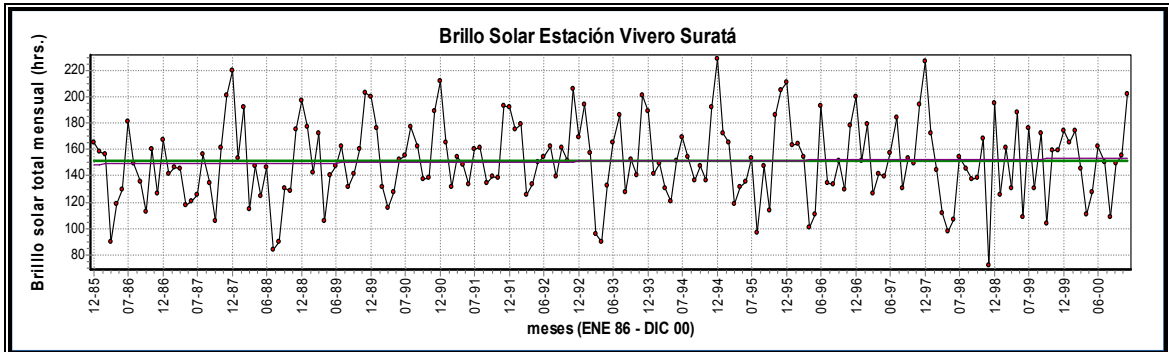
## Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación Palo Negro



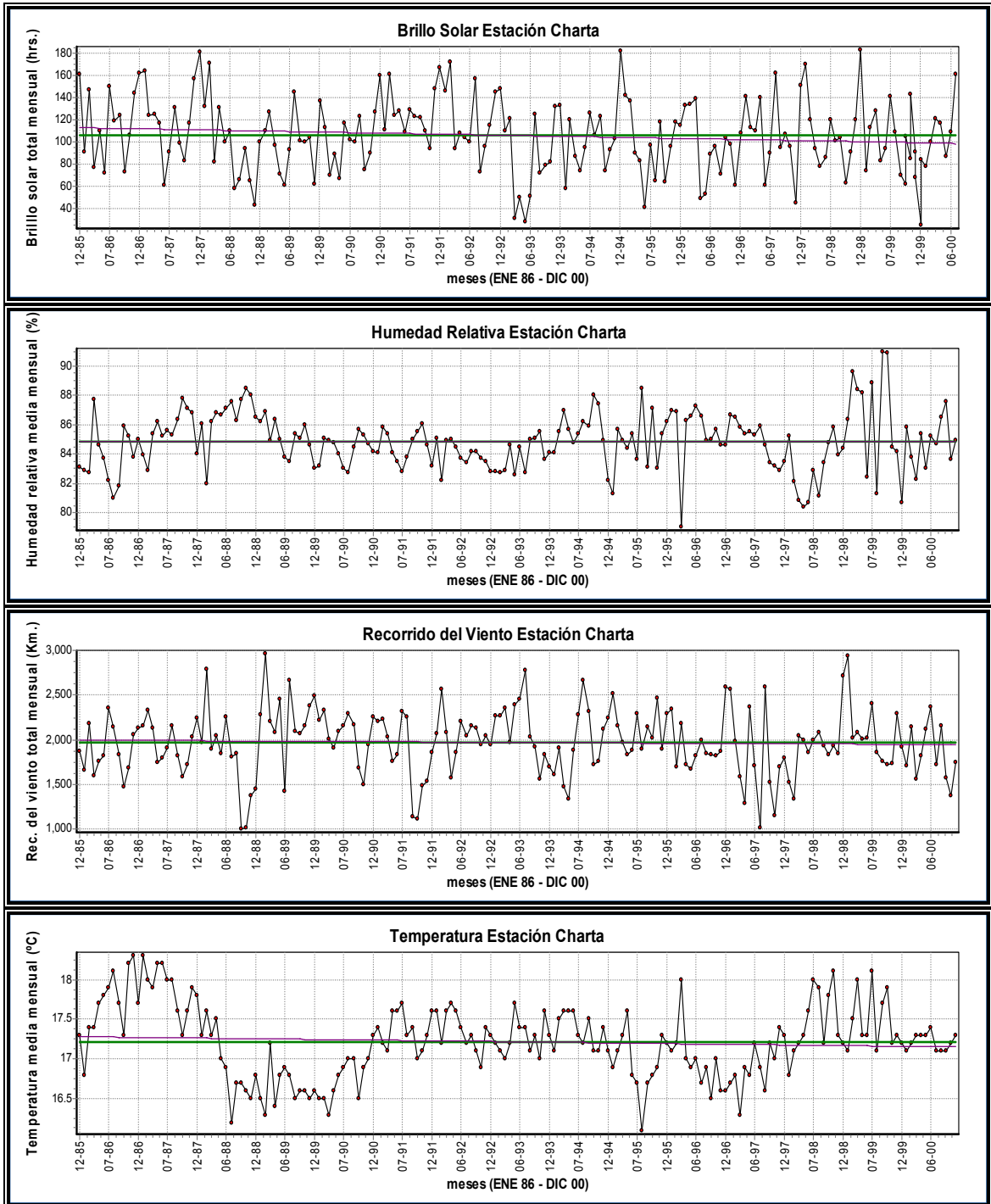
**Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación UIS-IDEAM**



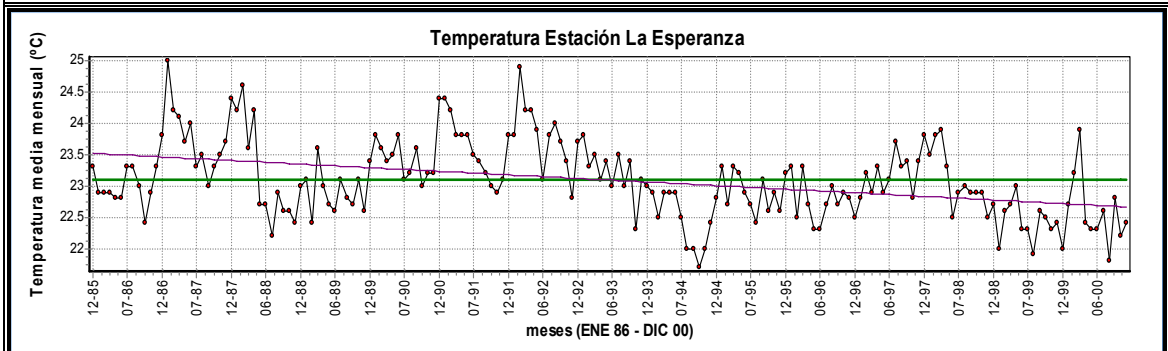
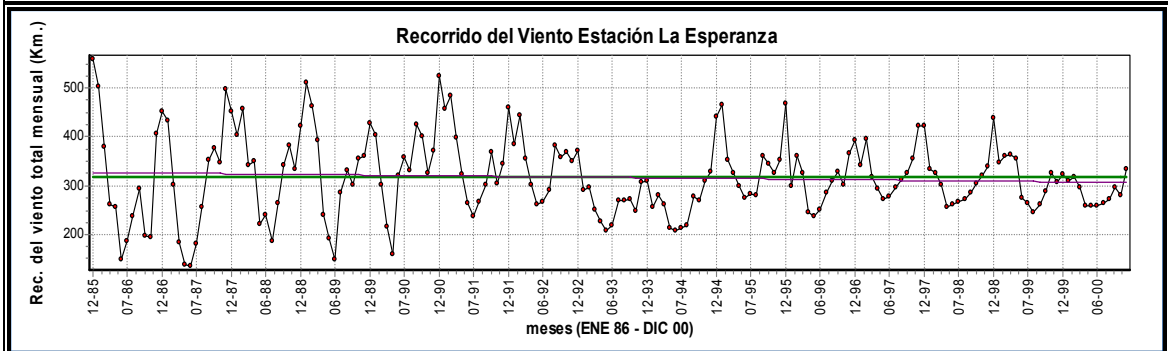
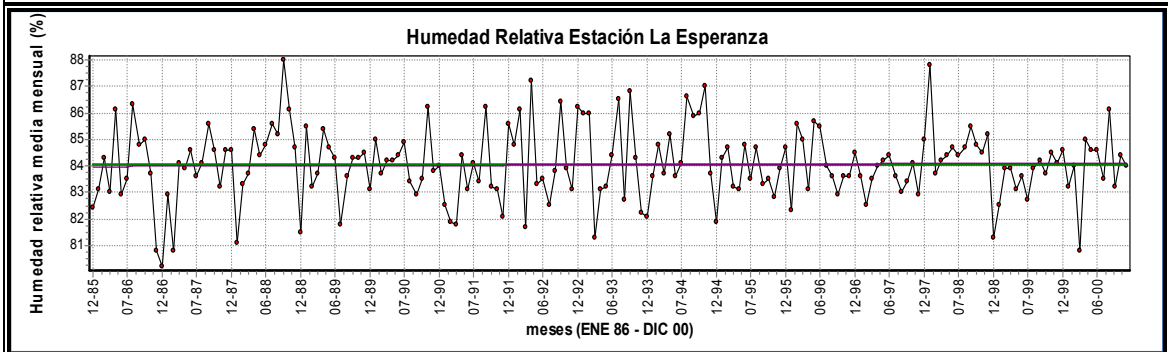
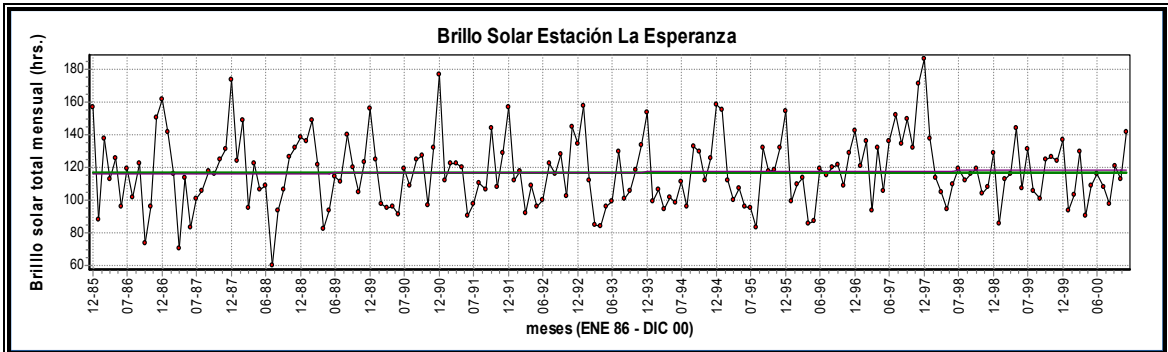
**Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación Vivero Surata**



**Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación Charta**



**Serie de tiempo de las variables climatológicas para la estación La Esperanza**



## ANEXO 4. Parámetros para el cálculo de ETo mediante la ecuación FAO Penman-Monteith

Horas medias de sol (N) para diferentes latitudes

LATITUD °	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
70	0	6.6	11	15.6	21.3	24	24	17.6	12.8	8.3	2.3	0
68	2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24	22.3	17	12.7	8.7	4.1	0
66	3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22	20.3	16.4	12.7	9	5.2	1.9
64	5	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16	12.6	9.3	6	3.7
62	5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8
60	6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6
58	6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2
56	7.3	9.3	11.5	13.9	16	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7
54	7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1
52	8	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5
50	8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9
48	8.6	10	11.6	13.4	15	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9	8.2
46	8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14	12.3	10.7	9.2	8.5
44	9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7
42	9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9
40	9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2
38	9.6	10.6	11.7	13	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11	9.9	9.4
36	9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6
34	10	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7
32	10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9
30	10.3	11	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1
28	10.4	11	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13	12.2	11.3	10.6	10.2
26	10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
24	10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5
22	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7
20	10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11	10.8
18	11	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9
16	11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1
14	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
12	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
10	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
8	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12	11.8	11.6	11.5
6	11.7	11.8	12	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12	11.9	11.7	11.7
4	11.8	11.9	12	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12	11.9	11.8	11.8
2	11.9	11.9	12	12	12.1	12.1	12.1	12.1	12	12	11.9	11.9
0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Radiación extraterrestre diaria (Ra) a diferentes latitudes para el 15<sup>vo</sup> día del mes (valores en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)**

LATITUD °	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
70	0	2.6	10.4	23	35.2	42.5	39.4	28	14.9	4.9	0.1	0
68	0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42	38.9	28.6	16.1	6	0.7	0
66	0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1
64	1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30	18.4	8.5	2.4	0.6
62	2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3
60	3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2
58	4.3	9.6	17.7	28.4	37	41.3	39.4	32	21.7	12.1	5.5	3.1
56	5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2
54	6.5	12	20	30	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2
52	7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9	6.4
50	8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5
48	10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7
46	11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9
44	12.5	18	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1
42	13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4
40	15	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30	22.5	16.3	13.6
38	16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37	30.7	23.6	17.5	14.8
36	17.5	22.6	29	35.7	40	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1
34	18.7	23.7	29.9	36.1	40	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3
32	19.9	24.8	30.7	36.5	40	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5
30	21.1	25.8	31.4	36.8	40	41.2	40.6	38	33.4	27.6	22.2	19.8
28	22.3	26.8	32.2	37.1	40	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21
26	23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2
24	24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3
22	25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40	39.6	38.4	35.4	31	26.6	24.5
20	26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6
18	27.9	31.5	35.2	38	39	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8
16	28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9
14	29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38	36.7	33.9	30.6	28.9
12	30.9	33.8	36.5	38	38	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9
4	36.6	36.4	37.6	37.4	36	35	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9
2	35.4	37	37.8	37.1	35.4	34.2	36.6	36.1	37.3	37	35.6	34.8
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

Los valores para Ra en el 15<sup>vo</sup> día del mes ofrecen una buena estimación (error < 1 %) de Ra promediado para todos los días dentro del mes. Únicamente para latitudes altas, mayores que 55° (N o S), durante los meses de invierno las desviaciones pueden ser más del 1%.

- **Radiación solar (Rs):**

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Donde:

Rs: Radiación solar o de onda corta [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ],

n: Duración real de la insolación [horas],

N: Duración máxima posible de la insolación [horas],

n/N: Duración relativa de la insolación,

Ra: Radiación extraterrestre [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]. Ver tabla de este mismo Anexo.

As: Constante de regresión, expresa la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la tierra en días nublados ( $n=0$ ), y

$a_s + b_s$ : Fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la tierra en días despejados ( $n=N$ ).

La evaporación equivalente correspondiente en mm/día se obtiene multiplicando Rs por 0.408. Donde no estén disponibles datos reales de radiación solar y no se hayan aplicado procedimientos de calibración para mejorar los parámetros  $a_s$  y  $b_s$ , se recomienda utilizar  $a_s = 0.25$  y  $b_s = 0.50$ .

- **Radiación solar neta o radiación neta de onda corta (Rns)**

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s$$

Donde:

Rns: Radiación solar neta o de onda corta [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ],

$\alpha$ : Albedo o coeficiente de reflexión del dosel (adimensional), y

Rs: Aadiación solar entrante [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].

Tabla  $\sigma T_K^4$  (ley Stefan-Boltzmann) a diferentes temperaturas (T)  
 Con  $\sigma = 4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y  $T_K = T [^{\circ}\text{C}] + 273.16$

T (°C)	(MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T (°C)	(MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T (°C)	(MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
1.0	27.70	17.0	34.75	33.0	43.08
1.5	27.90	17.5	34.99	33.5	43.36
2.0	28.11	18.0	35.24	34.0	43.64
2.5	28.31	18.5	35.48	34.5	43.93
3.0	28.52	19.0	35.72	35.0	44.21
3.5	28.72	19.5	35.97	35.5	44.50
4.0	28.93	20.0	36.21	36.0	44.79
4.5	29.14	20.5	36.46	36.5	45.08
5.0	29.35	21.0	36.71	37.0	45.37
5.5	29.56	21.5	36.96	37.5	45.67
6.0	29.78	22.0	37.21	38.0	45.96
6.5	29.99	22.5	37.47	38.5	46.26
7.0	30.21	23.0	37.72	39.0	46.56
7.5	30.42	23.5	37.98	39.5	46.85
8.0	30.64	24.0	38.23	40.0	47.15
8.5	30.86	24.5	38.49	40.5	47.46
9.0	31.08	25.0	38.75	41.0	47.76
9.5	31.30	25.5	39.01	41.5	48.06
10.0	31.52	26.0	39.27	42.0	48.37
10.5	31.74	26.5	39.53	42.5	48.68
11.0	31.97	27.0	39.80	43.0	48.99

11.5	32.19	27.5	40.06	43.5	49.30
12.0	32.42	28.0	40.33	44.0	49.61
12.5	32.65	28.5	40.60	44.5	49.92
13.0	32.88	29.0	40.87	45.0	50.24
13.5	33.11	29.5	41.14	45.5	50.56
14.0	33.34	30.0	41.41	46.0	50.87
14.5	33.57	30.5	41.69	46.5	51.19
15.0	33.81	31.0	41.96	47.0	51.51
15.5	34.04	31.5	42.24	47.5	51.84
16.0	34.28	32.0	42.52	48.0	52.16

- **Radiación solar de cielo despejado (R<sub>so</sub>)** Este parámetro, válido cuando n = N, es requerido para calcular la radiación neta de onda larga. Cuando no están disponibles valores calibrados de a<sub>s</sub> y b<sub>s</sub>:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

Donde:

z es la elevación sobre el nivel del mar (m).

- **Radiación neta de onda larga (R<sub>nl</sub>)**

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max K^4} + T_{\min K^4}}{2} \right] \left( 0.34 - .014 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

Donde:

**R<sub>nl</sub>**: Radiación neta saliente de onda larga [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>],

**σ**: : constante de Stefan-Boltzmann (σ = 4.903 10<sup>-9</sup> MJ K<sup>-4</sup> m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),

**T<sub>max K</sub>**: temperatura máxima absoluta durante un período de 24 horas [K],

**T<sub>min</sub> K:** temperatura mínima absoluta durante un período de 24 horas [K],

**E<sub>a</sub>:** Presión de vapor real [kPa],

**R<sub>s</sub>/R<sub>so</sub>:** Radiación relativa de onda corta ( $R_s/R_{so} \leq 1.0$ ),

**R<sub>s</sub>:** Radiación solar medida o calculada (Ecuación 3.24) [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ], y

**R<sub>so</sub>:** Radiación calculada para un cielo despejado [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].

En la tabla 3 del presente anexo, se pueden observar valores para  $\sigma T_K^4$  para diferentes temperaturas del aire.

- **Radiación neta (R<sub>n</sub>)** Diferencia entre la radiación incidente neta de onda corta y la radiación emitida neta de onda larga. Entonces,

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

- **Flujo de calor del suelo (G)** Para períodos mensuales, al igual que algunos de los parámetros se utilizarán valores promedio obtenidos a partir de los mensuales dividiendo en el número de días de cada mes :

$$G_{\text{mensual}, i} = 0.14 (T_{\text{mensual}, i} - T_{\text{mensual}, i-1})$$

Donde:

$T_{\text{mensual}, i}$  temperatura media del mes  $i$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$T_{\text{mensual}, i-1}$  temperatura media del mes anterior [ $^{\circ}\text{C}$ ],

- **Presión de vapor de saturación media (e<sub>s</sub>)** Se calcula mediante la expresión:

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$  es la presión de vapor de saturación (kPa) a determinada temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ )

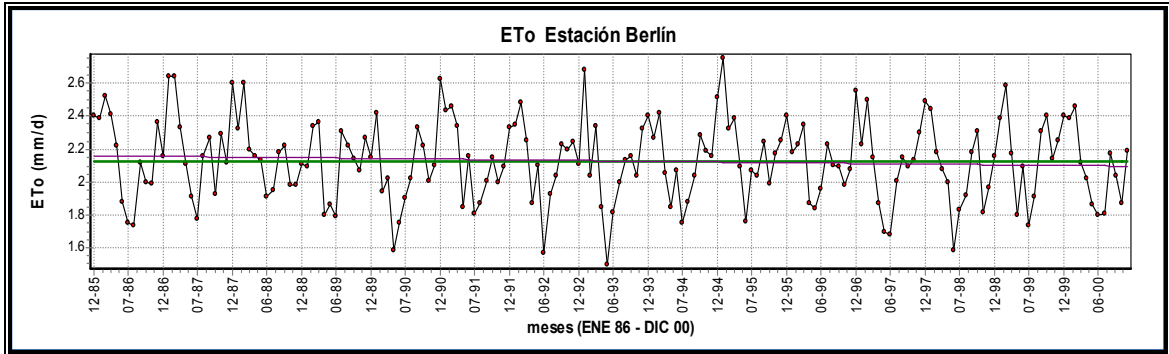
- **Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\Delta$ )**

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} = \frac{4098 [e^{\circ}(T)]}{(T + 237.3)^2}$$

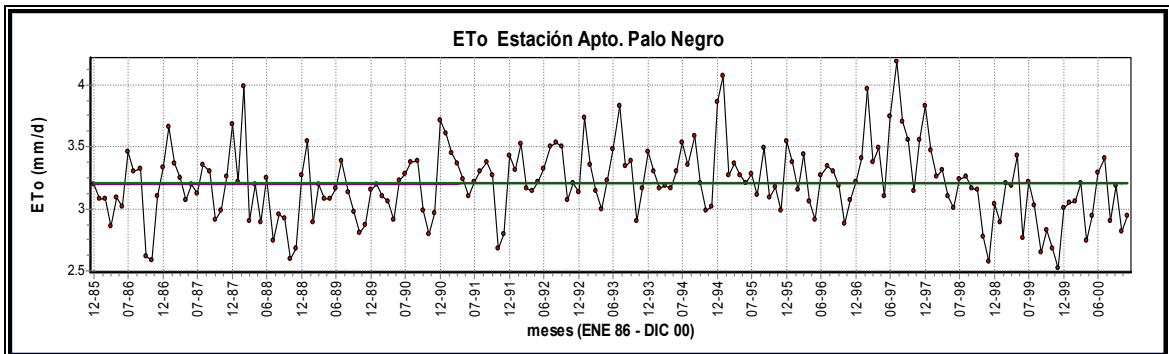
Donde:

$\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) a una temperatura dada del aire  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

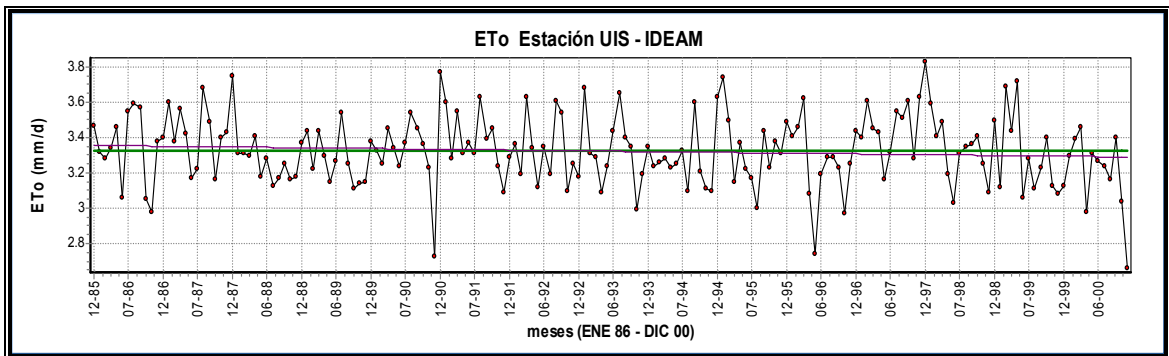
## ANEXO 5. Series de ETo por estaciones.



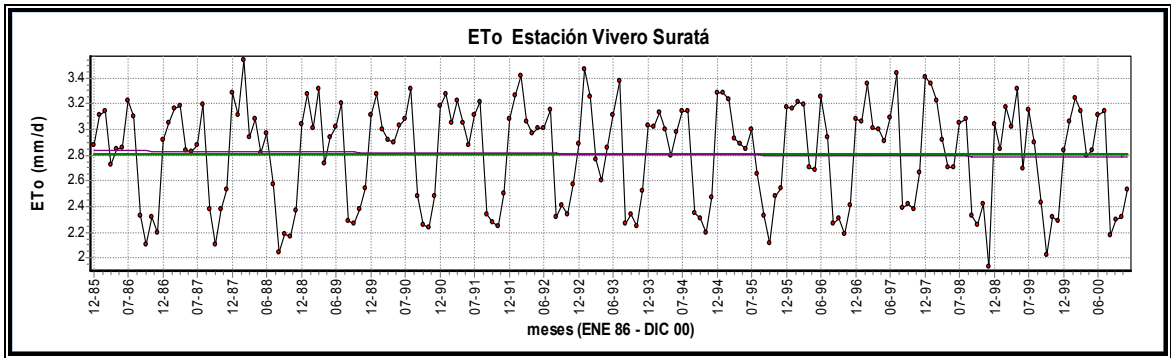
Serie de ETo estación Berlín



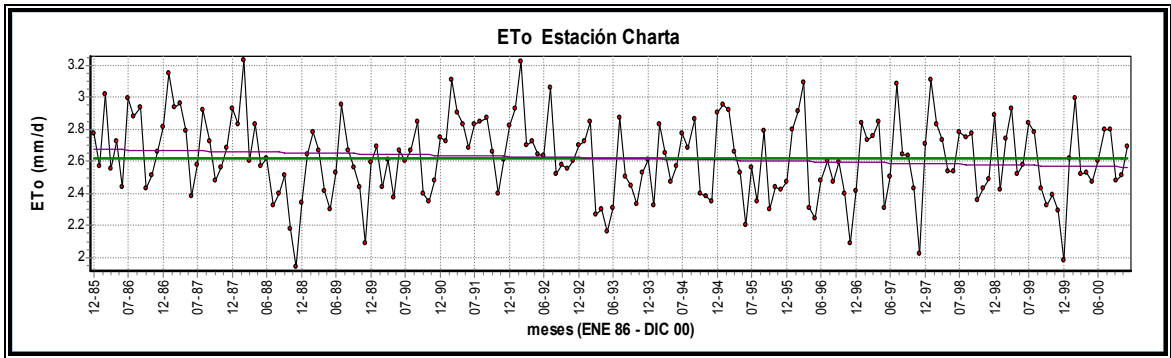
Serie de ETo estación Palo Negro



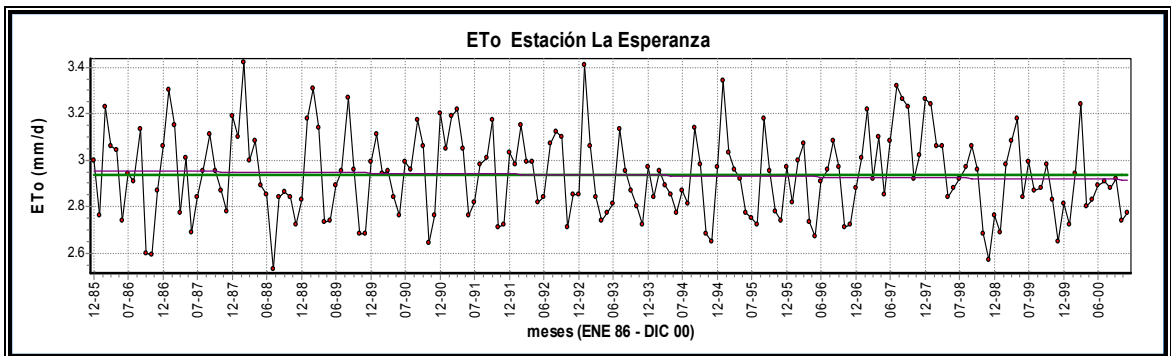
Serie de ETo estación UIS-IDEAM



**Serie de ETo estación Vivero Surata**



**Serie de ETo estación Charta**



**Serie de ETo estación La Esperanza**

## ANEXO 6 Factores de Cultivo Kc. para diferentes etapas de desarrollo.

Coeficientes de cultivo Kc y alturas medias de planta para cultivos bien manejados y sin estrés de humedad para climas subhúmedos ( $RH_{min} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2$  m/s) para utilizar con la ETo de FAO Penman-Monteith

Cultivo	Kc.ini	Kc. mid	Kc. end	Máxima altura de cultivo, h (m)
<b>a. Verduras Pequeñas</b>	<b>0.7</b>	<b>1.05</b>	<b>0.95</b>	
Brócoli		1.05	0.95	0.3
Repollo, Col		1.05	0.95	0.4
Zanahorias		1.05	0.95	0.3
Coliflor		1.05	0.95	0.4
Apio		1.05	1.00	0.6
Ajo		1.00	0.70	0.3
Lechuga		1.00	0.95	0.3
Cebolla				
- junca (larga)		1.00	1.00	0.3
- cabezona		1.05	0.80	0.5
Espinaca		1.00	0.95	0.3
Rábano		0.90	0.85	0.3
<b>b. Verduras – Familia Solanum (Solanaceae)</b>	<b>0.6</b>	<b>1.15</b>	<b>0.80</b>	
Berenjena		1.05	0.90	0.8
Pimiento		1.05	0.90	0.7
Tomate		1.15	0.70- 0.90	0.6
<b>c. Verduras – Familia Cucurbit (Cucurbitaceae)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Pepino	0.6	1.00	0.75	0.3
Calabaza		1.00	0.80	0.4
Calabacín		0.95	0.75	0.3
Melón		1.05	0.75	0.4
Sandía	0.4	1.00	0.75	0.4

<b>d. Raíces y Tubérculos</b>		<b>0.5</b>	<b>1.10</b>	<b>0.95</b>	
Yuca					
	- año 1	0.3	0.80	0.30	1.0
	- año 2	0.3	1.10	0.50	1.5
Papa			1.15	0.75	0.6
Batata			1.15	0.65	0.4
Nabo			1.10	0.95	0.6
Remolacha		0.35	1.20	0.70	0.5
<b>e. Legumbres (<i>Leguminosae</i>)</b>		<b>0.4</b>	<b>1.15</b>	<b>0.55</b>	
Fríjol, verde		0.5	1.05	0.90	0.4
Fríjol, seco		0.4	1.15	0.35	0.4
Haba					
	- Fresca	0.5	1.15 <sup>2</sup>	1.10	0.8
	- Seca	0.5	1.15	0.30	0.8
Garbanzo		0.4	1.15	0.35	0.8
Judías			1.05	0.60- 0.35	0.4
Lenteja			1.10	0.30	0.5
Guisante					
	- Fresco	0.5	1.15	1.10	0.5
	- Seco		1.15	0.30	0.5
Soja			1.15	0.50	0.5-1.0
<b>f. Verduras Perennes (con inactividad invernal y suelo inicialmente desnudo o con mulch)</b>		<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Alcachofa		0.5	1.00	0.95	0.7
Espárrago		0.5	0.95	0.30	0.2-0.8
Menta		0.60	1.15	1.10	0.6-0.8
Fresas		0.40	0.85	0.75	0.2
<b>g. Cultivos de Fibra</b>					
Algodón			1.15- 1.20	0.70- 0.50	1.2-1.5
Lino			1.10	0.25	1.2
Sisal			0.4-0.7	0.4-0.7	1.5
<b>h. Oleaginosas</b>		<b>0.35</b>	<b>1.15</b>	<b>0.35</b>	

Girasol		1.0-1.15	0.35	2.0	
<b>i. Cereales</b>	<b>0.3</b>	<b>1.15</b>	<b>0.4</b>		
Cebada		1.15	0.25	1	
Avena		1.15	0.25	1	
Trigo		1.15	0.25-0.4	1	
Maíz		1.20	0.60- 0.35	2	
Millo		1.00	0.30	1.5	
Sorgo		1.00- 1.10	0.55	1-2	
Arroz	1.05	1.20	0.90- 0.60	1	
<b>j. Forrajeras</b>					
Heno de alfalfa					
	- efectos promedio de corte	0.40	0.95	0.90	0.7
	- períodos individuales de corte	0.40	1.20	1.15	0.7
	- para semilla	0.40	0.50	0.50	0.7
Heno de Bermuda					
	- efectos promedio de corte	0.55	1.00	0.85	0.35
	- para semilla	0.35	0.90	0.65	0.4
Heno de trébol, Berseem					
	- efectos promedio de corte	0.40	0.90	0.85	0.6
	- períodos individuales de corte	0.40	1.15	1.10	0.6
Heno de pasto Rye					
	- efectos promedio de corte	0.95	1.05	1.00	0.3
Heno de pasto Sudan (anual)					
	- efectos promedio de corte	0.50	0.90	0.85	1.2
	- períodos individuales de corte	0.50	1.15	1.10	1.2
Hierba para pastoreo					
	- Pastoreo rotativo	0.40	0.85- 1.05	0.85	0.15- 0.30
	- Pastoreo extensivo	0.30	0.75	0.75	0.10
Pasto para césped					
	- temporada fría	0.90	0.95	0.95	0.10

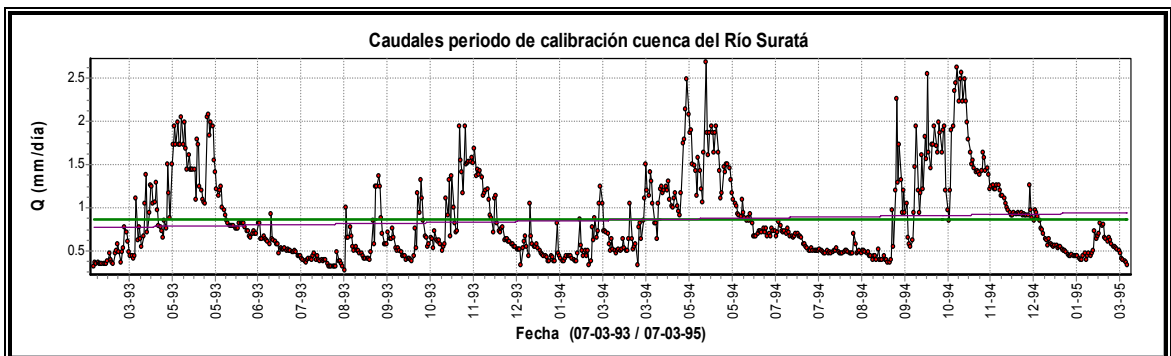
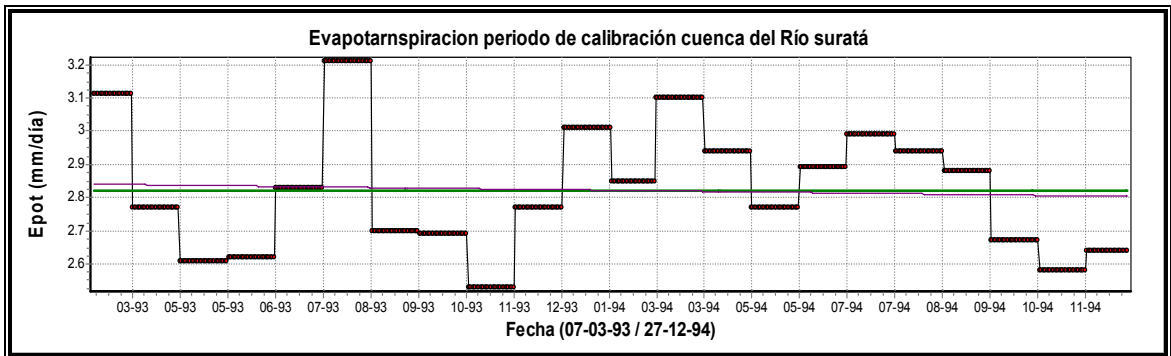
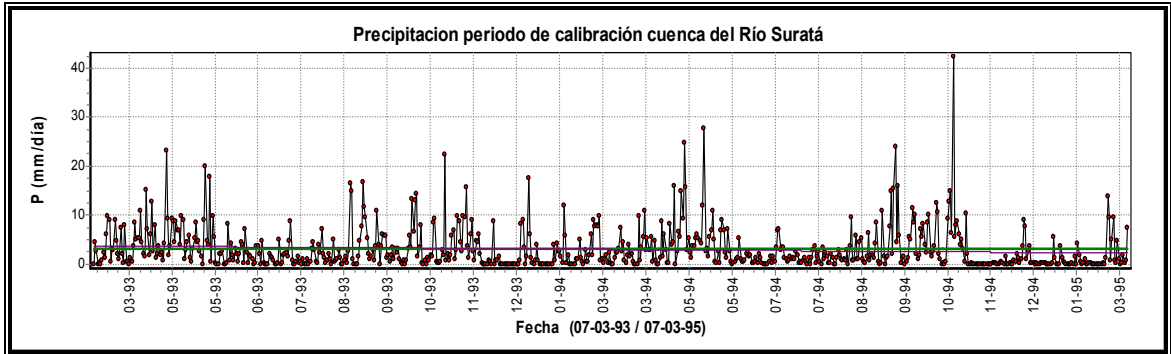
	- temporada cálida	0.80	0.85	0.85	0.10
<b>k. Caña de Azúcar</b>		<b>0.40</b>	<b>1.25</b>	<b>0.75</b>	<b>3</b>
<b>I. Árboles y frutas tropicales</b>					
Banano					
	- 1 <sup>er</sup> año	0.50	1.10	1.00	3
	- 2 <sup>do</sup> año	1.00	1.20	1.10	4
Cacao		1.00	1.05	1.05	3
Café					
	- suelo desnudo	0.90	0.95	0.95	2-3
	- suelo con maleza	1.05	1.10	1.10	2-3
Palma de dátiles		0.90	0.95	0.95	8
Palmera		0.95	1.00	1.00	8
Piña					
	- suelo desnudo	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
	- suelo con pasto	0.50	0.50	0.50	0.6-1.2
Árbol del caucho		0.95	1.00	1.00	10
Te					
	- sin sombra	0.95	1.00	1.00	1.5
	- con sombra	1.10	1.15	1.15	2
<b>m. Uvas y Bayas</b>					
Bayas (arbusto)		0.30	1.05	0.50	1.5
Uvas					
	- Pasa	0.30	0.85	0.45	2
	- Vino	0.30	0.70	0.45	1.5-2
Lúpulo		0.3	1.05	0.85	5
<b>n. Árboles frutales</b>					
Almendro, sin terreno cubierto		0.40	0.90	0.65	5
Manzanos, Cerezos, Peras					
	- suelo desnudo, con heladas	0.45	0.95	0.70	4
	- suelo desnudo, sin heladas	0.60	0.95	0.75	4
	- suelo cubierto, con heladas	0.50	1.20	0.95	4
	- suelo cubierto, sin heladas	0.80	1.20	0.85	4
Albaricoque, Durazno, Ciruelo					
	- suelo desnudo, con heladas	0.45	0.90	0.65	3

	- suelo desnudo, sin heladas	0.55	0.90	0.65	3
	- suelo cubierto, con heladas	0.50	1.15	0.90	3
	- suelo cubierto, sin heladas	0.80	1.15	0.85	3
Aguacate, suelo desnudo		0.60	0.85	0.75	3
Cítricos, suelo desnudo					
	- 70% dosel	0.70	0.65	0.70	4
	- 50% dosel	0.65	0.60	0.65	3
	- 20% dosel	0.50	0.45	0.55	2
Cítricos, suelo cubierto o con maleza					
	- 70% dosel	0.75	0.70	0.75	4
	- 50% dosel	0.80	0.80	0.80	3
	- 20% dosel	0.85	0.85	0.85	2
Árboles de Coníferas		1.00	1.00	1.00	10
Kiwi		0.40	1.05	1.05	3
Olivos (40 a 60% del terreno cubierto por el dosel)		0.65	0.70	0.70	3-5
Pistachos, suelo desnudo		0.40	1.10	0.45	3-5
Huerto de nuez		0.50	1.10	0.6518	4-5
<b>o. Humedales – clima templado</b>					
Juncales, con heladas		0.30	1.20	0.30	2
Juncales, sin heladas		0.60	1.20	0.60	2
Vegetación corta, sin heladas		1.05	1.10	1.10	0.3
Pantano de junco, agua estancada		1.00	1.20	1.00	1-3
Pantano de junco, suelo húmedo		0.90	1.20	0.70	1-3
<b>p. Especial</b>					
Sup. Libre de Agua, < 2 m profundidad o en climas subhúmedos o trópicos			1.05	1.05	
Sup. Libre de Agua, > 5 m profundidad, libre de turbiedad, clima templado			0.6525	1.2525	

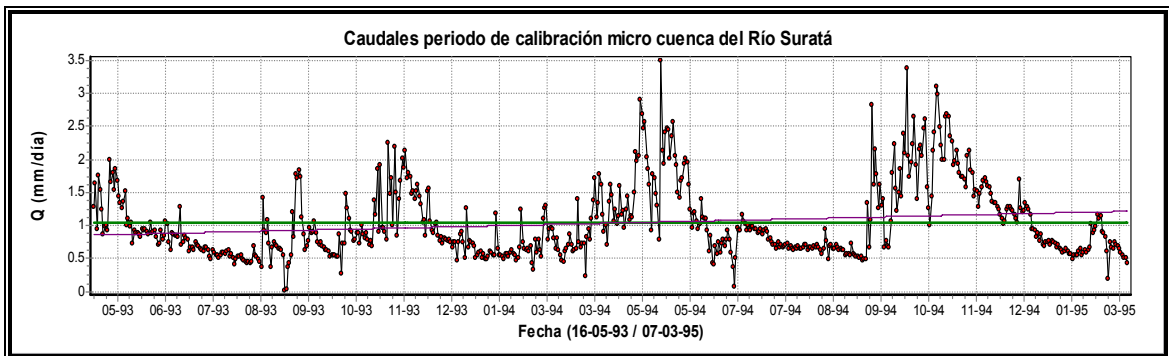
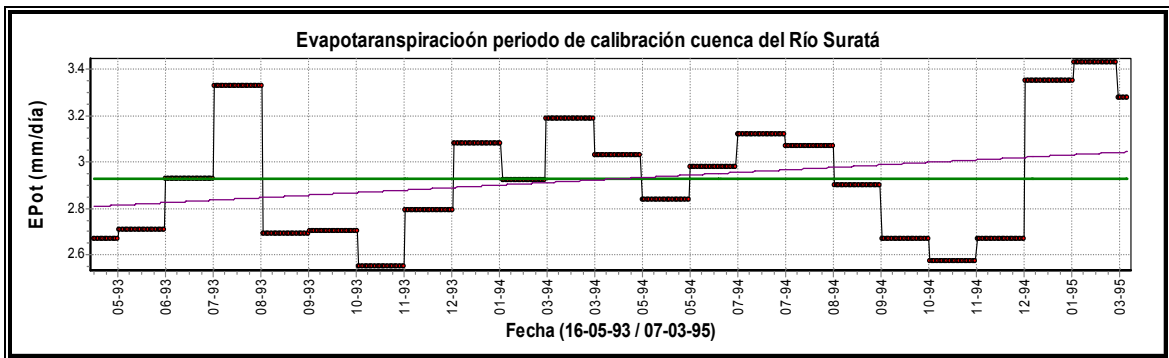
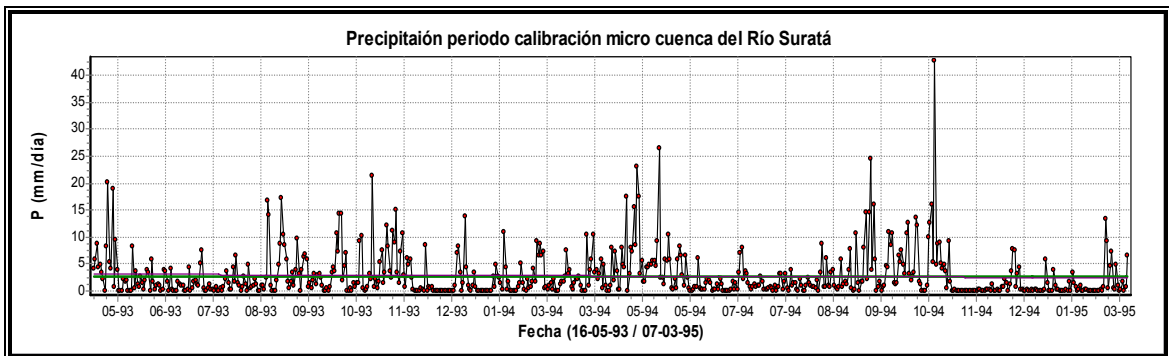
**Fuente: Tomado García y Otero, (2005)**

## ANEXO 7. Series empleadas en el modelamiento.

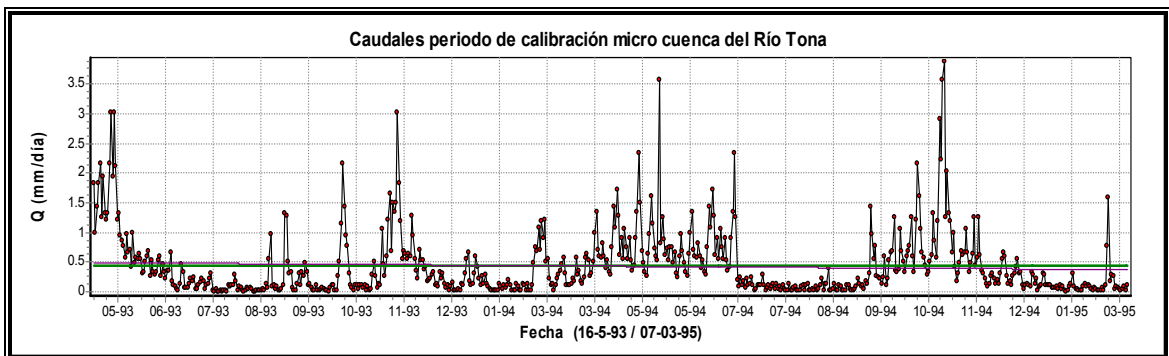
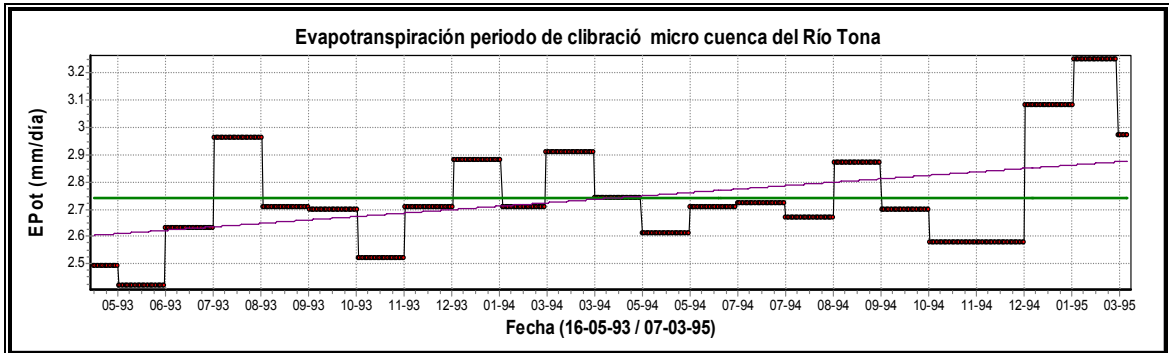
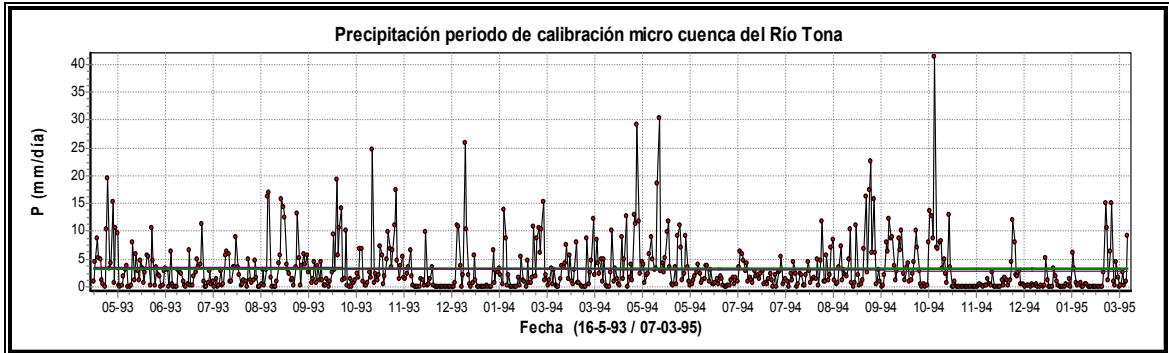
### Series empleadas en el periodo de calibración para la cuenca del Río Suratá



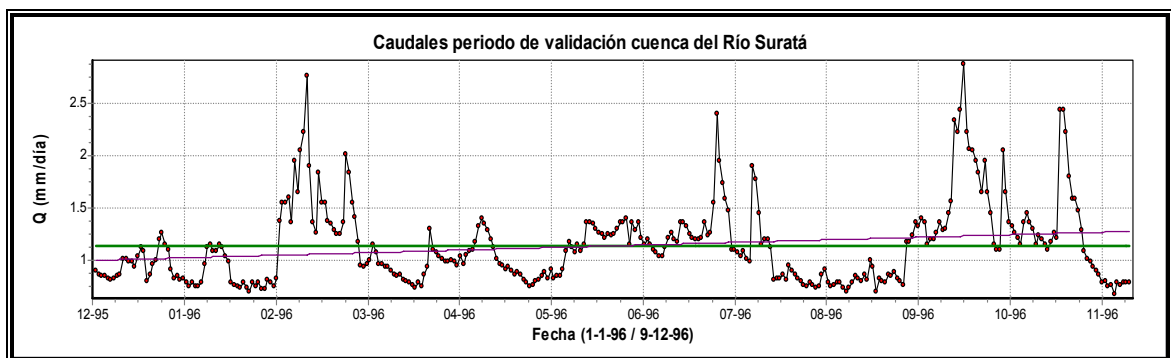
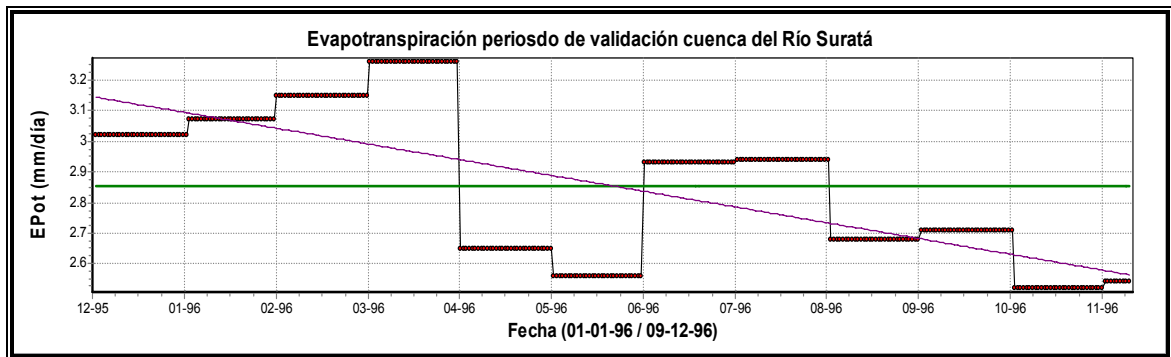
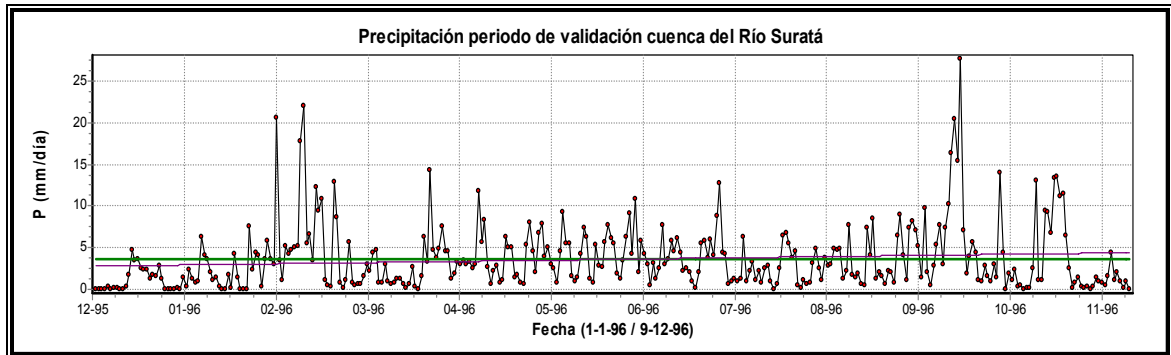
### Series empleadas en el periodo de calibración para la microcuenca del Río Suratá



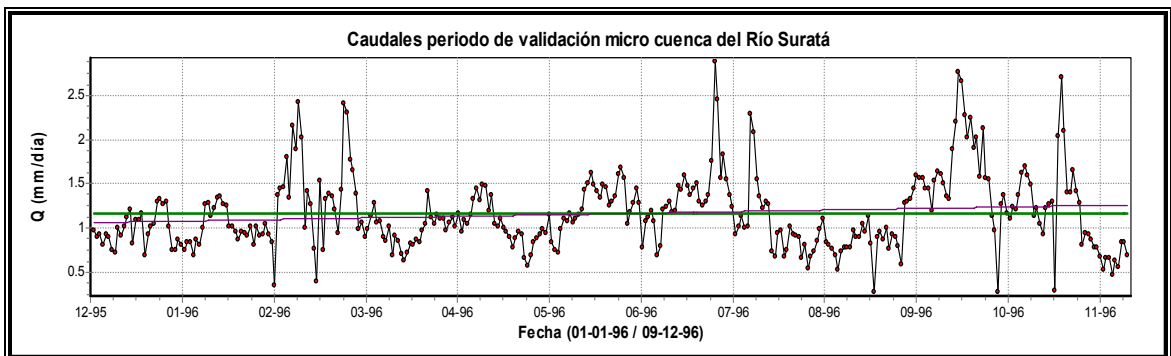
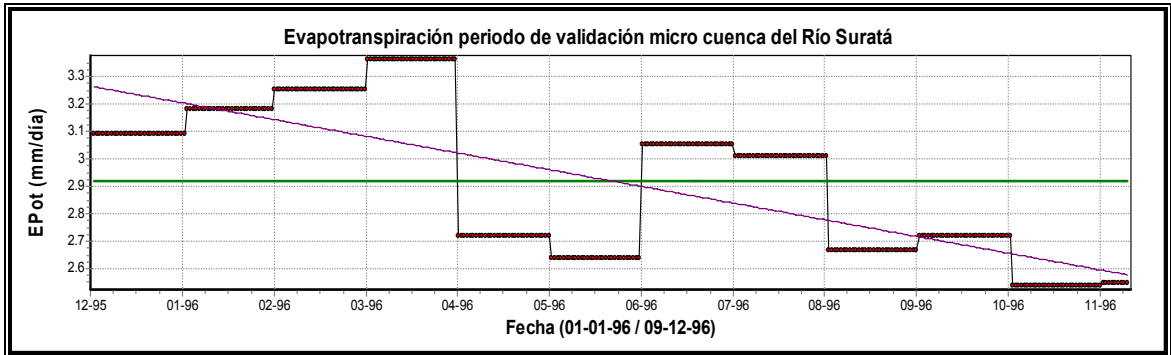
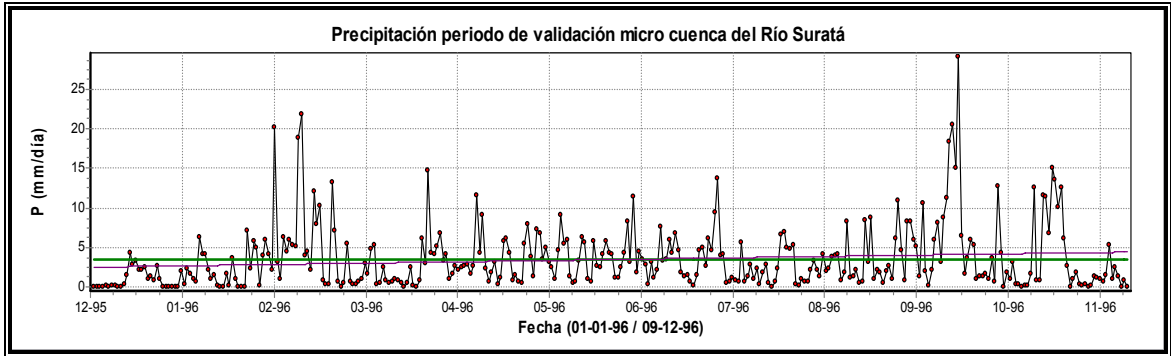
## Series empleadas en el periodo de calibración para la cuenca del Río Tona



### Series empleadas en el periodo de validación para la cuenca del Río Suratá



### Series empleadas en el periodo de validación para la microcuenca del Río Suratá



## Series empleadas en el periodo de validación para la microcuenca del Río Tona

