

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANTARIA
Y RECURSOS HIDRAULICOS
A NIVEL DE POST - GRADO



**ESTUDIO HIDROLOGICO PARA APROVECHAMIENTO
HIDROELECTRICO DEL RIO PANTASMA
SITIO ANTIOQUIA - NICARAGUA**

ESTUDIO ESPECIAL PRESENTADO A LA ESCUELA
REGIONAL DE INGENIERIA SANTARIA Y
RECURSOS HIDRAULICOS - ERIS -

POR LA INGENIERA:
Alina Haydeé Bonilla Blandón

COMO REQUISITO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE:

**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAЕ)
EN RECURSOS HIDRAULICOS**

Guatemala, Noviembre de 1996.

08
+ 9990
C.F.

DEDICATORIA

A DIOS

Por brindarme su protección y sabiduría

A MI HIJO

HUGO ANTONIO BRENES BONILLA

"Por ser lo más valioso de mi vida"

A MIS PADRES

ANTONIO CESAR BONILLA OBANDO

(q.p.e.d)

HAYDEE BLANDON DE BONILLA

Por darme la vida y su apoyo

A MIS HERMANOS

HAZEL, ANTONIO Y MARBELLI

A

VICTOR JOSE VALENCIA LEZAMA

Por su amor y apoyo incondicional

A MI PATRIA NICARAGUA

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar agradecimiento a los **Ings. Juan José Sandoval y Arturo Acajábón Mendoza**, por su valioso asesoramiento para el desarrollo de este estudio, así especialmente al **Ing. Juan Luis Guzmán**.

Al **Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD)**, por haberme proporcionado la oportunidad de superarme, especialmente a la **Lic. Neddy Zamora** por sus atenciones.

A mis **catedráticos** por su contribución en mi formación profesional y al personal administrativo de la **Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos**.

Al **Instituto Nicaraguense de Energía (I.N.E)**, por su colaboración para mi formación en el área de **Recursos Hidráulicos**, especialmente al **Ing. José Ley Lau**.

Al **Ing. Marta Lidia García**, por haberme brindado todo su apoyo y a mi familia.

A todas las personas que me brindaron su cariño y apoyo, especialmente a la **Sra. Eddel de Elgueta**.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

INDICE

1.0	INTRODUCCION	7
1.1	OBJETIVOS	9
	1.1.1 OBJETIVOS GENERALES	9
	1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	9
1.2	ANTECEDENTES	10
1.3	JUSTIFICACION	11
1.4	ALCANCES	12
1.5	LIMITACIONES	13
1.6	MARCO TEORICO	14
2.0	CAPITULO I: GENERALIDADES	
	2.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA	16
	2.2 DESCRIPCION DEL AREA DE LA CUENCA EN ESTUDIO	17
	2.2.1 SOCIO-ECONOMIA	18
	2.2.2 CLIMATOLOGIA Y VEGETACION	18
	2.2.3 GEOLOGIA	22
	2.2.4 SEDIMENTOS	23
3.0	CAPITULO II: RECOPIACION, SELECCION, ANALISIS Y CONSISTENCIA DE LA INFORMACION HIDROMETEOROLOGICA	
	3.1.0 RECOPIACION	25
	3.1.1 DATOS METEOROLOGICOS	25
	3.1.2 DATOS HIDROMETRICOS	26
	3.2.0 ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS SELECCIONADAS	27
	3.2.1 PRECIPITACION	27
	3.2.2 EVAPORACION REAL	28
	3.2.3 CAUDALES	29
	3.3.0 ANALISIS Y CONSISTENCIA DE DATOS	30
	3.3.1 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE PRECIPITACION	31
	3.3.2 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE EVAPORACION	32
	3.3.3 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE CAUDALES	33
4.0	CAPITULO III : HIDROLOGIA DE SUPERFICIE	
	4.1.0 CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO HBV	34
	4.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL MODELO	34

4.1.2	DEFINICION DE LOS PARAMETROS FISICOS DEL MODELO HBV	36
4.1.3	DATOS DE ENTRADA AL MODELO	42
4.2.0	APLICACION DEL MODELO	45
4.2.1	METODOLOGIA PARA LA APLICACION DEL MODELO A LA CUENCA EN ESTUDIO	45
4.2.2	ANALISIS DE LOS RESULTADOS	49
5.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1.0	CONCLUSIONES	55
5.2.0	RECOMENDACIONES	57

ANEXO 1

METODOLOGIA PARA EL CALCULO MANUAL DE LA ESCORRENTIA UTILIZANDO LOS PRINCIPIOS DEL MODELO HBV.

ILUSTRACIONES

APENDICE A

LISTA DE FIGURAS

1. Ubicación de la cuenca del Río Pantasma en la república de Nicaragua. Fig.No.1
2. Delimitación cartográfica de la cuenca hasta el sitio de cierre con las estaciones pluviométricas seleccionadas. Fig.No.2
3. Plano topográfico con curvas de nivel cada 5 metros del eje de presa. Fig.No.3
4. Mapa de Isoyetas medias anuales. Fig.No.4
5. Mapa de Isolinias de evaporación medias anuales. Fig.No.5
6. Cronograma del Estado de los registros de precipitación. Fig.No.6
7. Tabla con los datos rellenos de la estación Mancotal. Fig.No.7
8. Ubicación de las estaciones meterorológicas Fig. No.8
9. Análisis de Doble masa
- 9.1 Precipitación
 - Curva doble masa de las estaciones San Rafael del Norte y Santa Fé. Fig.No.9
 - Curva doble masa de las estaciones Los Horcones Y Santa Fe. Fig. No.10
 - Curva doble masa de las estaciones La Porra y Santa Fé. Fig.No.11
- 9.2 Evaporación
 - Curva doble masa de las estaciones Los Robles y Mancotal. Fig.No.12
 - Curva doble masa de las estaciones Los Robles y La Mascota. Fig. No.13
 - Curva doble masa de las estaciones La Mascota y Mancotal. Fig. No.14
- 9.3 Caudales
 - Curva doble masa de las estaciones Santa Fe y Antioquia. Fig.No.15
10. Precipitación media de la cuenca. Fig.No.16
11. Series de precipitación del período común (1980-1984) de las estaciones seleccionadas. Fig.No.17
12. Calibración del modelo HBV (período 1980-1984). Fig.No.18
13. Curva de duración de caudales con los datos históricos para el año 1981. Fig.No.19

14. Curvas de duración de caudales con los datos históricos y simulados para el año 1981.
Fig.No.20

APENDICE B
LISTA DE FOTOGRAFIAS

1. Caída aprovechable en el sitio de cierre.
2. Estación Hidrométrica Pantasma en Antioquia.

1.0 INTRODUCCIÓN

Parte relevante e importante de la factibilidad técnica de un proyecto con fines energéticos lo constituye el estudio hidrológico, base fundamental en la determinación de los parámetros técnicos para el dimensionamiento de las obras hidráulicas, las cuales inciden directamente en la evaluación económica del proyecto y por consiguiente en su rentabilidad.

Por lo anteriormente expuesto, es necesario realizar e impulsar trabajos de investigación como un aporte técnico para el desarrollo de proyectos con tales objetivos.

El estudio hidrológico propuesto es con el fin de valorar el recurso hídrico, elemento esencial para determinar el potencial hidroeléctrico de la cuenca del río Pantasma, específicamente en el sitio de Antioquia aprovechando el desnivel existente entre el sitio de cierre denominado con el mismo nombre, una caída de aproximadamente 75 metros y la Hacienda Sacramento, en el cual se consigue una diferencia de nivel de aproximadamente 250 mts en una longitud total de conducción relativamente corta de aproximadamente 1200 mts.

El estudio hidrológico contempla el análisis de consistencia y homogeneidad de las series seleccionadas, así como la aplicación del modelo HBV (incorporado en el sistema computarizado de modelación matemático MIKE-11) a la cuenca en estudio y la elaboración de la curva de duración de caudales con la serie histórica.

Además se presentan conclusiones y recomendaciones para el uso del potencial hídrico que posee la cuenca del río Pantasma.

An important and relevant part of the technical feasibility of a project with energy ends is the hydrological study, fundamental in the determination of the technical parameters for the measured hydraulic work which have a direct impact on the economic evaluation of the project and consequently on its profitability.

Due to the above, it is necessary to under take and promite research projects as a technical contribution for development projects with such objectives.

The proposed hydrological study is in order to evaluate the hydraulic resource, an essential element in determining the hydroelectric potential of the basin of the Pantasma River, specifically in the Antioquia site taking advantage the drop of approximately 75 meters and the Sacrament Estate, in which a procured a difference in level of approximately 250 mts is obtained in a total path of relatively lenght short of approximately 1200 mts.

The hydrological study envisages the soundness and homogeneity analysis of the series selected, as well as the application of HBV model (incorporated in the computerized system of mathematical modeling MIKE -11) to the basin in study and the elaboration of the curve of duration of flow with the historical series.

Furthermore conclusions and recommendations are presented for the use of the hydraulic potential that the basin of the Pantasma river possesses.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Conocer el potencial hidrológico para el aprovechamiento del Recurso Hidroeléctrico en la cuenca del Río Pantasma, mediante el análisis de sus características hidrológicas.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1.0 Analizar la consistencia y homogeneidad de los datos a utilizarse para la aplicación del modelo hidrológico HBV a la cuenca del río Pantasma con el fin de generar la serie de datos de caudal en el punto de aprovechamiento hidroeléctrico.
- 2.0 Estimar el caudal de diseño por medio de la elaboración de la curva de duración.
- 3.0 Proporcionar criterios para la elaboración de esquemas de las principales obras hidráulicas.

1.2 ANTECEDENTES

Para la elaboración del presente estudio se contó con la ayuda de la siguiente bibliografía:

En 1978, el gobierno de Nicaragua impulsó el programa de Pequeñas Plantas Hidroeléctricas(P.P.H), iniciando con aportes del PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), y posteriormente con ayuda del Gobierno de Suecia donde se realizó una evaluación.

El programa P.P.H, consideró que la implementación a corto plazo de proyectos de baja capacidad menores a los 6 Mw. se podrían desarrollar en Nicaragua con métodos estándares y de simples de construcción.

En 1983, la empresa CONSULTORA NACIONAL HIDROTECNICA, S.A. realizo el estudio denominado "ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DEL RIO PANTASMA".

En Octubre de 1995, la empresa GRUPO SARET de Costa Rica elaboró un Perfil General de Proyecto denominado "Proyecto Hidroeléctrico Pantasma".

En Mayo de 1995, la Empresa Nicaraguense de Electricidad (ENEL), a través de la División de Generación - Departamento de Estudios Hidroeléctrico elaboró un Perfil Técnico - Económico denominado "PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA PANTASMA".

1.3 JUSTIFICACION

El estudio hidrológico a realizarse nos permitirá conocer la disponibilidad del recurso hídrico en el sitio de Antioquia para fines energéticos. Al conocer la disponibilidad del recurso en el sitio será la base para el desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica en el río Pantasma, la cual ayudará a la economía del país y al mejoramiento del Sistema Interconectado Nacional, además se ha mantenido un constante crecimiento de la demanda y existen algunas plantas de generación que requieren grandes inversiones en reparación.

El presente estudio hidrológico podrá servir como una guía para desarrollar el potencial hidroeléctrico de los diferentes países de la región.

La cuenca del río Pantasma, posee características físicas que permitirán conjuntamente con los resultados de este estudio la definición de una pequeña central hidroeléctrica.

1.4 ALCANCES DEL ESTUDIO

Entre los alcances del estudio se encuentran:

1. La definición de las características climáticas en la cuenca del proyecto.
2. Selección y revisión de la información hidrometeorológica existente. Así como, la aplicación de un análisis de consistencia de datos mediante la utilización del módulo HIS el cual se encuentra incorporado dentro del sistema computarizado de modelación matemático MIKE-11.
3. Aplicación del Módulo Hidrológico HBV (incorporado dentro del sistema computarizado de modelación matemático MIKE-11) para conocer las características hidrológicas y respuesta de la cuenca en estudio; con el fin de determinar la serie de caudales medios diarios del río Pantasma en el sitio de Antioquia y elaboración de la curva de duración de caudales diarios.
4. Conclusiones y Recomendaciones de la información hidrológica disponible para su utilización.

1.5 LIMITACIONES

Los alcances del presente estudio se limitaron, debido al poco tiempo disponible para su realización; así mismo, se encontró que en la cuenca existe información hidrológica limitada.

1.6 MARCO TEORICO

En Nicaragua, la producción de energía eléctrica en su mayor parte depende de la generación termoeléctrica a base de derivados del petróleo, por esta razón la generación de la misma es altamente costosa, lo que a la vez hace que el sistema eléctrico sea deficiente por los altos costos de mantenimiento.

Como parte del estudio hidrológico se incluirán aspectos que son determinantes en la generación de energía eléctrica, como son los topográficos, hidrometeorológicos (datos pluviométricos e hidrométricos), uso del agua y caudales disponibles.

Los aspectos mencionados presentan diferentes comportamientos que a continuación se describen:

TOPOGRAFIA:

La topografía del terreno se dedujo de un plano topográfico con curvas de nivel cada 5 metros. (Ver figura No.3)

La topografía del sitio es determinante para la generación de energía eléctrica debido al desnivel existente entre el sitio de cierre y la posible ubicación de la casa de máquina en el río el Quebradón, en el cual se consigue una diferencia aproximada de 400 metros.

HIDROMETEOROLOGIA:

El clima es una variable importante ya que define los diferentes parámetros hidrometeorológicos como la precipitación, viento, temperatura en la cuenca y que dan como resultado la variación de caudales.

Para la calibración del modelo HBV, el cual es uno de los alcances del estudio, se hace necesario conocer el comportamiento de los parámetros arriba mencionados ya que juegan un gran papel y son indispensables para la simulación de la hidrología de la cuenca.

USO DEL AGUA:

El buen manejo del recurso hídrico puede mejorar las condiciones de vida de la población. Desde el punto de vista energético, se puede utilizar el agua para la producción de energía eléctrica sin perjudicar la calidad de la misma ya que se puede devolver tal como se recibe, sin deteriorar ni causar alteración alguna en su vida microscópica de la cual dependen vidas superiores.

DISPONIBILIDAD DE INFORMACION

Este aspecto comprende la disponibilidad de suficiente información y de buena calidad, ya que de ella depende la calibración del modelo HBV y por consiguiente la generación de la serie de caudales del río Pantasma para la determinación de las características hidrológicas de la cuenca.

2.0.0 CAPITULO I: GENERALIDADES

2.1.0 DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA

Nicaragua está ubicada geográficamente en el Istmo Centroamericano (Cartográficamente entre los $11^{\circ}00'$ y $15^{\circ}00'$ de latitud norte y $83^{\circ}30'$ y $87^{\circ}30'$ de longitud oeste), limitando con las Repúblicas: Al norte con Honduras, al sur con Costa Rica, al este con el Océano Atlántico y al oeste con el Océano Pacífico. Es la República más grande de Centroamérica y tiene una superficie aproximada de Ciento treinta mil Kilómetros Cuadrados con una población aproximada de cuatro millones ciento veinte y tres mil habitantes.

La precipitación promedio anual es aproximadamente 3500 milímetros en la Costa del Caribe, alcanzando hasta 5000 milímetros en la parte sur del país, descendiendo hacia el centro del mismo con precipitaciones entre 1250 y 2000 milímetros anuales. Luego en la zona del pacífico la precipitación promedio anual va de 1000 a 2000 milímetros. (Ver figura No.4)

El Río Pantasma, se encuentra al norte de Nicaragua, correspondiendo el tramo superior y medio como afluente del Río Coco, en una longitud aproximada de 5 kms.

La zona del sitio de interés se encuentra ubicada entre las coordenadas Norte $13^{\circ}17'$ y $13^{\circ}19'$; Este $86^{\circ}01'$ y $85^{\circ}38'$ (en coordenadas UTM 1468 Norte y 607 Este hasta 1470.5 Norte y 611.7 Este), delimitándose el parte agua desde el nacimiento del mismo río en la hojas cartográfica de nombre San Rafael del

Norte localizada al norte del Lago de Apanás, cerca de los poblados Antioquia, Sacramento hasta el valle de Santa Marta en el Municipio de San Rafael del Norte, en el extremo Sur-Este del Departamento de Jinotega, Nicaragua.

2.2.0 DESCRIPCION DEL AREA DE LA CUENCA EN ESTUDIO

El río Pantasma nace en el Maciso de Zamaria, cerca del Cerro Cuspire a unos 1500 m.s.n.m y su cauce desciende a 850 m.s.n.m, en un recorrido aproximado de 16 kilómetros hasta llegar al sitio de Antioquia; desde este punto forma un amplio arco para cambiar rumbo al norte, a la vez que desciende precipitadamente a unos 450 m.s.n.m. en un recorrido de 5.0 Kms.

La cuenca tiene un área de drenaje de 66.5Kms²; topográficamente presenta tres tramos bien definidos. El primer tramo corresponde desde la cabecera de la cuenca hasta el sitio denominado Antioquia, el cual es donde se ubica el punto de aprovechamiento hidroeléctrico.

El segundo tramo, comprende desde el sitio de antioquia hasta la Hacienda Sacramento con una longitud de 1.2 Kms. El último tramo corresponde desde la Hacienda Sacramento hasta llegar al río El Quebradón.

La parte más conveniente para determinar el potencial hidroeléctrico de la cuenca comprende desde el sitio de Antioquia hasta llegar al río El Quebradón donde se logra una caída de más de 400 metros entre estos puntos.

2.2.1 SOCIO-ECONOMIA

El proyecto se localiza en una zona donde existen cooperativas agrícolas formadas por excombatientes de fuerzas irregulares armadas del País, los cuales son los propietarios titulados de la tierra. Los habitantes de la región se dedican a la siembra de hortalizas principalmente, las cuales trasladan hacia la ciudad de Jinotega para el comercio nacional, ya que considerando el acceso a la zona desde la ciudad de Managua, capital de Nicaragua hasta el Departamento de Jinotega existe una carretera asfaltada en buenas condiciones.

Desde Mancotal hasta Las Quebradas existe un camino de tierra en regulares condiciones igual hasta el sitio de Antioquia.

Además cuentan con una escuela que imparte hasta segundo grado, un puesto de salud en Mancotal y los agricultores cuentan con asesoría técnica.

No existe en la zona servicio eléctrico, ni agua potable, ni estructuras sanitarias, teléfono y hospedaje.

2.2.2 CLIMATOLOGIA Y VEGETACION

La cuenca presenta un alto porcentaje de cobertura vegetal, entre bosques altos y densos que se encuentran en la parte alta de la cuenca, cafetales de sombra con protección de árboles altos, pastizales y malezas ubicados en la parte baja de la misma utilizándose para el pastoreo.

El clima puede clasificarse como Húmedo Sub-Tropical con una precipitación media anual que desciende entre 1500 a 1250 mm. del este hacia el oeste, observándose dos períodos de estaciones (seco y lluvioso).

La temperatura promedio es 22° centígrados; predominado los vientos del este los cuales combinados con el sistema de montaña que rodean la cuenca, dan lugar a que la precipitación sea de tipo orográficos.

PROCESO DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



COBERTURA VEGETAL AGUAS ARRIBA DE LA CUENCA



COBERTURA VEGETAL AGUAS ABAJO DE LA CUENCA

2.2.3 GEOLOGIA^(Ref.1)

La región circundante al sitio está cubierta de rocas terciarias que forman núcleos montañosos y espinazos alargados separados por pequeños valles.

En la región predominan los piroclastos intercalados con lavas del tipo basáltico y andesítico; así mismo, aglomerados volcánicos se encuentran dentro de la caldera.

El sitio de estudio se encuentra ubicado dentro de las tierras altas del interior de Nicaragua, en el flanco Sureste de una antigua caldera volcánica colapsada de nombre SANTA MARIA DE PANTASMA.

El sitio de Antioquia consta de un basamento formado de basalto negro, que presenta propiedades físicas y mecánicas tanto para material de fundación como para material de construcción.

Estatigráficamente el basalto es sobreyacido por una toba lítica soldada, rosada y por una andesita gris clara. Los espesores de dichas rocas se desconocen.

Existe una depresión formada por suelos residuales limo-arcillosos de color café, que por su espesor la podrán haber rellenado por deslave de los suelos circundantes.

Esta depresión probablemente fue surcada por un lecho antiguo del río, por lo que no se descarta la aparición de pequeños lentes de aluviales.

Dicha aseveración no se puede asegurar ya que no existen estudios precisos de la actividad geológica del sitio de Antioquia.

2.2.4 SEDIMENTOS

No existe ningún estudio del transporte de sedimentos del sitio de Antioquia que den una base de la cantidad de sedimentos que transporta el río en esa zona.



**ASPECTO DEL TIPO DE ROCA EN EL SITIO DE APROVECHAMIENTO
HIDROELECTRICO**

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

3.0.0 CAPITULO II : RECOPIACION, SELECCION, ANALISIS Y CONSISTENCIA DE LA INFORMACION HIDROMETEOROLOGICA

3.1.0 RECOPIACION

Para realizar el estudio hidrológico se necesitó de la recopilación de la información hidrometeorológica, la cual consiste en datos de precipitación diaria, evaporación mensual y caudales continuos de las estaciones relacionadas con la cuenca del río Pantasma. Una descripción de la información hidrometeorológica se enuncian a continuación en los siguientes ácapites:

3.1.1 Datos Meteorológicos

a) Precipitación

Los datos disponibles de precipitación con registros diarios corresponden a las estaciones de:

Código (*)	Nombre de la Estación	Período de Registro
045040	SANTA FE	1980 - 1984
055001	CORINTO FINCA	1951 - 1992
055006	LOS ROBLES	1953 - 1991
055019	MANCOTAL	1962 - 1992
055041	LOS HORCONES	1971 - 1992
055044	LA PORRA	1971 - 1987
069021	SN RAFAEL DEL NORTE	1951 - 1992
069037	LA CONCORDIA	1962 - 1991

En la figura No.8 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas.

b) Evaporación

Los datos disponibles de evaporación con registros mensuales que corresponde a las estaciones de :

Codigo(*)	Nombre de la Estación	Periodo de Registro
055006	LOS ROBLES	1953 - 1991
055019	MANCOTAL	1969 - 1988
055020	JINOTEGA	1969 - 1989
055045	LA MASCOTA	1971 - 1983

3.1.2 Datos Hidrométricos

Los datos hidrométricos con que se cuentan son de la estación de Antioquía en Pantasma, ubicada en el punto de aprovechamiento hidroeléctrico. La estación Antioquia en Pantasma cuenta (medición limnigráfica) con registros continuos de nivel y aforo desde el año 1980 hasta 1984.

(*) El código corresponde a la nomenclatura de los archivos de datos estructurados bajo un sistema de banco de datos del Plan Maestro de Energía del Instituto Nicaraguense de Energía (I.N.E), elaborado por el Consorcio IECO-LAHMEYER en 1980

3.2.0 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS SELECCIONADAS

No toda la información disponible nos servirá para la realización del estudio; por lo tanto, se realizó una selección de la misma tomando en cuenta la participación directa de las estaciones y usando los criterios para cada tipo de información hidrometeorológica (Precipitación, Evaporación y Caudal).

3.2.1 Precipitación

Las siguientes estaciones de precipitación fueron seleccionadas utilizando el criterio de proximidad a la cuenca y que por el Método de Thiessen tienen participación directa en la representación espacial de la lluvia en la cuenca del estudio.

Código (*)	Nombre de la Estación	Período de Registro
045040	SANTA FE	1980 - 1984
055041	LOS HORCONES	1971 - 1992
055044	LA PORRA	1971 - 1987
069021	SAN RAFAEL DEL NORTE	1951 - 1992

La estación Santa Fe se encuentra localizada en el centro de la cuenca; la estación Los Horcones se encuentra al sur-oeste del sitio de aprovechamiento y a 13 Kms. del mismo aproximadamente; la estación La Porra está al sur del sitio de aprovechamiento y a 5 Kms. de este, así la estación San Rafael está localizada al sur-oeste del sitio de cierre, aproximadamente a 18 kilómetros del sitio de cierre en Antioquía.

En el área de estudio(66.5Kms²),existen otras estaciones meteorológicas situadas fuera de la cuenca del río Pantasma, las cuales no fueron tomadas en consideración, debido a que éstas no inciden en la determinación de los polígonos de Thiessen por encontrarse lejanas de la cuenca.

3.2.2 Evaporación Real

La evaporación real es la evaporación medida directamente por el Tanque Clase "A". En la cuenca en estudio no existen estaciones medidoras de evaporación real, por lo tanto, para encontrar la evaporación media de la cuenca fue necesario realizar un análisis de comparación(ver acápite 3.1.1;sección b) entre las estaciones cercanas a la cuenca considerando sus condiciones climatológicas y morfológicas para tener la estación que representaría la evaporación media de la misma.

Dentro del análisis, se escogieron dos estaciones LOS ROBLES Y MANCOTAL, de lo cual resultó que la estación MANCOTAL era la que puede representar la evaporación media de la cuenca tomando en cuenta el criterio de la altura, ya que dicha estación se encuentra a la misma altura que la altura media de la cuenca igual a 960 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

Sin embargo, la estación MANCOTAL presenta datos faltantes en los años 1969, 1970, 1979, 1987 y 1988.

Para solucionar lo anterior y obtener una serie continua de evaporación real de la estación MANCOTAL, se seleccionó como estación base la estación LOS ROBLES por ser sus registros homogéneos y estar cercana a la estación (se encuentra ubicada a 15 Kms. del sitio de aprovechamiento), para ser utilizada en el relleno de los datos de la estación Mancotal, la que se encuentra a 8 Kms. del mismo sitio.

Para el relleno de los datos se utilizó el Programa "FILIN"^(Ref.2), el cual está incorporado al sistema de banco de datos del Plan Maestro de Energía del I.N.E. Ver figura No.7. "Datos rellenos de la estación Mancotal"

3.1.2.3 Caudales

Como se mencionó anteriormente, la información hidrométrica ó de caudales que se tiene disponible es la de la estación Antioquia en Pantasma, localizada en el sitio de cierre que en sentido general en el período de 1980-1982 tiene registros completos.

3.3 ANALISIS Y CONSISTENCIA DE DATOS

El análisis y consistencia de los datos hidrometeorológico es un aspecto determinante para realizar un estudio hidrológico en etapas finales, que a su vez sirve de fundamento para conocer, desarrollar, conservar y controlar los recursos hídricos.

Los errores e inconsistencias en las series hidrometeorológicas afectan sensiblemente la calidad de los estudios que utilizan dicha información, ya que los mismos pueden generar conclusiones y recomendaciones erróneas; por consiguiente, el realizar análisis y consistencia de los datos hacen que la serie tenga una confiabilidad que permita aumentar la precisión y realismo en las estimaciones de los proyectos.

El objetivo de realizar este análisis, es para proporcionar un diagnóstico rápido de los posibles errores(mecánicos y humanos) o inconsistencias en las series climáticas de las estaciones ubicadas en la cuenca del Río Pantoasma, ya que dicha información será utilizada en la aplicación del Modelo HBV a la misma.

En el análisis de la información seleccionada, se utilizó el módulo del "Sistema de Información Hidrológico" (HIS) incorporado al MIKE-11, elaborado por el Instituto Hidráulico Danés (DHI) como una herramienta para el procesamiento, análisis y presentación de la información hidrometeorológicas de las series de tiempo.

3.3.1 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE PRECIPITACION

Para comprobar la consistencia de los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en los alrededores de la cuenca en estudio, se ha recurrido al análisis de las curvas de doble masa incluido en el módulo HIS.

El análisis de las curvas doble masa es una técnica para la verificación de la homogeneidad y corrección de los registros de lluvia de las estaciones.

La línea recta en la gráfica representa la homogeneidad de las estaciones relacionadas (Estación base y Estación satélite); un cambio de pendiente en la recta de ajuste representa una variabilidad en la cantidad de precipitación recogida en la estación cuya serie se comprueba.

En la figura 10 se muestra la curva doble masa entre la estación San Rafael(satélite) y Santa Fe(base).

La gráfica nos indica que a partir de 1982 hasta 1985, dichas estaciones no tienen una consistencia de datos entre sí, pero esto no causa ningún efecto con respecto a la homogeneidad de las mismas.

En la figura 11 se muestra la curva doble masa entre la estación Los Horcones(satélite) y Santa Fe(base); de la cual podemos deducir que los datos de las estaciones referidas son homogéneas o sea confiables, ya que no se presentan cambios mayores en la línea.

En la figura 12 se muestra la curva doble masa entre la estación La Porra(satélite) y Santa Fe(base); de la cual podemos deducir lo descrito anteriormente con respecto a las estaciones Los Horcones y Santa Fe.

3.3.2 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE EVAPORACION REAL

Como mencionamos anteriormente, no existe una estación medidora de evaporación real en la cuenca, por lo que se realizó un análisis de comparación de las estaciones cercanas a la cuenca por medio de la curva doble masa para conocer la homogeneidad de las series de las mismas, sin olvidar el criterio de la altura de las mismas para escoger la estación medidora.

Para el análisis de homogeneidad se uso el mismo criterio de validación de las estaciones de precipitación.

La figura 12 muestra la curva doble masa entre las estaciones Los Mancotal (base) y Los Robles(satélite). La línea de la figura no presenta cambios significativos lo que significa que ambas estaciones presentan una buena homogeneidad y consistencia.

En las figuras 13 y 14 se muestran las curvas entre las estaciones Los Robles(base)-La Mascota(satélite) y La Mascota(satélite)-Mancotal(base). En ambas figuras se aprecia que existe homogeneidad entre las estaciones; pero, la altura de las estaciones satélites es mayor que la altura media de la cuenca, por ende no pueden escogerse como representativas de la evaporación real de la cuenca.

3.3.3 VERIFICACION DE ESTADISTICAS DE CAUDALES

Partiendo de la hipótesis de que el régimen hidrológico en la cuenca de Pantasma es homogéneo y suponiendo que la regulación interanual (no existe almacenaje de agua de una año hacia otro) es despreciable, se procedió a verificar si los datos de caudal medidos corresponden a los datos de lluvia registrados para un período.

Por medio de la utilización del módulo HIS y tomando el área de la cuenca (66.5 Kms².) se convirtieron los caudales medidos en la estación Antioquia en Pantasma de metros cúbicos por segundo a escorrentía en milímetros; de esta manera se procedió a trazar la curva doble masa de las estaciones Santa Fe (estación medidora de precipitación) y la estación Antioquia, observándose una relación consistente entre precipitación y escorrentía entre el período de 1980-1983; a partir del año 1984 se observa un quiebre significativo en la curva causado por la falta de información a partir de esa fecha.

4.0 CAPITULO III: HIDROLOGIA DE SUPERFICIE

Un caudal natural de un río es el que no se altera debido a usos o regulación por embalses. Los caudales pueden ser definido de acuerdo al período de tiempo en Caudales medios diarios, Caudales medios mensuales y Caudales medios anuales.

En la cuenca en estudio existe solo una estación medidora de caudal llamada "Antioquia en Pantasma", la cual registra datos continuos de caudal.

4.1.0 CALIBRACION DEL MODELO HIDROLOGICO HBV. (Ref.3)

4.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL MODELO

El modelo HBV fue desarrollado en el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI), en el año 1976.

Una versión del modelo se encuentra incorporado al Sistema de Modelación MIKE-11, el cual es un modelo determinístico (no entra en juego las probabilidades), conceptual (se basa en concepto del ciclo hidrológico) y semi-distribuido (las variables y parámetros son valores representativos de todas las subcuenca, para conformar la cuenca como una unidad).

Para un mayor grado de detalle en la simulación en cuencas grandes es conveniente la subdivisión de la misma en subcuencas; de tal manera que se tenga un modelo que responda a las condiciones que mejor se asemejan a las

características reales de la cuenca, lo que permite realizar una mejor operación en cuanto a su desarrollo (Uso de la cuenca, Ciclo hidrológico, Tendencias).

Otros aspectos a considerar son la consistencia y homogeneidad de las series hidrometeorológicas de las estaciones que se encuentran dentro y cercana a la cuenca, así como las características físicas de la misma.

Algunos parámetros como el área de la cuenca, altura, series hidrometeorológicas y precipitación media de la cuenca, describen la característica y clima de la cuenca; por lo que, dentro de lo posible deben permanecer intactos durante la calibración del modelo.

La división de la cuenca en subcuencas permite tener varios valores para un mismo parámetro dentro de la cuenca total; sin embargo, la variación de esos valores entre subcuencas son relativamente variables. Otros parámetros como el contenido de humedad, la percolación y escorrentía pueden ser evaluados de los datos físicos de la cuenca, pero los valores finales deben ser ajustados mediante la calibración del modelo.

Los valores principales obtenidos de la calibración del modelo son valores de escorrentía forma continua, información de las fases del ciclo hidrológico, tales como: variación de la evapotranspiración real, el flujo de aguas subterránea, contenido de humedad del suelo y los distintos valores característicos que componen el hidrograma como: el caudal pico y los valores de los diferentes puntos que componen la curva de descenso o recesión y el flujo base en donde

el caudal del río es suministrado exclusivamente por el almacenamiento subterráneo de la cuenca.

4.1.2 DEFINICION DE LOS PARAMETROS FISICOS DEL MODELO HBV

El modelo HBV en su conjunto tiene una serie de parámetros físicos que logran la simulación del ciclo hidrológico y, a la vez la definición de las características hidrológicas de la cuenca en estudio como la humedad del suelo, la evapotranspiración, el caudal superficial y el caudal base.

Los parámetros se encuentran definidos dentro de las diferentes rutinas de simulación que conforman el modelo, las cuales se enuncian a continuación:

- a) **Rutina para el Cálculo de la Humedad del Suelo y Evapotranspiración**
 1. **Factor de Campo(F_c):** Es un parámetro empírico que representa la mayor capacidad de almacenamiento en el suelo. El factor de campo se expresa en milímetros.
 2. **Beta(B) :** Es un parámetro empírico adimensional en forma de exponente, que regula a través de la subrutina, la contribución relativa a la escorrentía por cada milímetro de lluvia, dependiendo del déficit de humedad del suelo.

3. **Limite de evaporación(LP):** Es un parámetro empírico, definido como el valor de humedad del suelo por encima del cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial. El limite de evaporación se expresa en milímetros. (Ver metodología en el acápite 4.2.1, sección b).

b) **Rutina para el cálculo de la generación de esorrentía.**

La rutina de generación de esorrentía es la que transforma el exceso de agua de la rutina humedad del suelo en esorrentía para la cuenca. El modelo divide en dos almacenamientos(superior e inferior), el aporte de la rutina humedad del suelo para la ejecución de la transformación que da origen a las características que componen el hidrograma. En la página siguiente se muestra la estructura completa del modelo. Esta representa el esquema de simulación de la fase del ciclo hidrológico en la superficie de la tierra (relación entre el almacenamiento superior e inferior).

4. **Almacenamiento Superior(Suz):** Tomando el tiempo de pérdida; en el almacenamiento superior se almacena la cantidad de agua que cae como precipitación y se convierte en retención superficial y humedad del suelo. Las componentes del hidrograma generadas por el esquema del modelo son los siguientes:

- 4.a) **Caudal Superficial(Q_0 y Q_1):** Conformado por parámetros empíricos donde la suma de Q_0 y Q_1 conforman el caudal superficial, el cual, es el caudal que se produce cuando la cuenca

alcanza su capacidad de campo. Se expresa en mm/día y se definen como:

$$Q_0 = K_0 (Suz - UZL_0)$$

$$Q_1 = K_1 (Suz - UZL_1)$$

donde:

K_0 y K_1 : Son coeficientes de los puntos que definen la parte superior del hidrograma y toman un valor menor que la unidad.

$(Suz - UZL_0)$: Representan la disminución, en forma de gradiente, del volumen almacenado durante un mismo intervalo de tiempo. Expresado en milímetros.

4.b) Caudal subsuperficial (Q_2 y Q_3): Conformado por parámetros empíricos donde la suma de los Q_2 y Q_3 , definen el caudal subsuperficial que se produce cuando "una porción de agua se infiltra a través de la superficie de la tierra moviéndose lentamente en las capas superiores del suelo"(*). Se expresa en mm/día y se definen como:

$$Q_2 = K_2 (Suz - UZL_2)$$

$$Q_3 = K_3 (Suz)$$

donde:

K_2 y K_3 : Representan los coeficientes de los puntos que definen la curva de recesión del hidrograma.

$UZL2$: Representa la disminución, en forma de gradiente, del volumen de agua almacenado durante un mismo intervalo de tiempo. Expresado en milímetros.

5. **Percolación(PERC):** Es el movimiento del agua dentro del suelo. Se relaciona intimamente con la infiltración, puesto que la misma no puede darse libremente sino cuando la percolación ha removido el agua de las capas superiores del suelo(**). Representado en el modelo como el descenso del agua del almacenamiento superior al almacenamiento inferior, dándose así la disminución del volumen en los niveles superiores. Se expresa en milímetros.

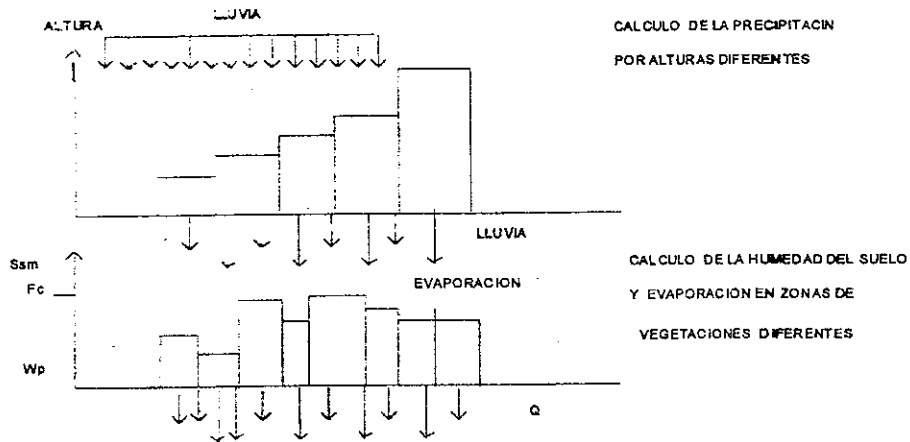
8. **Almacenamiento Inferior(SIz):** Este almacenamiento representa el agua subterránea en la cuenca y contribuye a la generación del caudal base y por consiguiente a la forma del hidrograma en su parte más baja. El parámetro K_4 , junto con el valor del caudal de agua subterráneo definen el caudal base o la escorrentia directa del suelo.

9. **MAXBAS** : Es el parámetro empírico que define el número de horas o días durante el cual el flujo es tardado. De otra forma, el valor de **MAXBAS** se relaciona con el período de concentración de avenidas máxima.

(*)Referido de Linsley-Kohler-Paulus. **HIDROLOGIA PARA INGENIEROS**. "Características del Hidrograma"

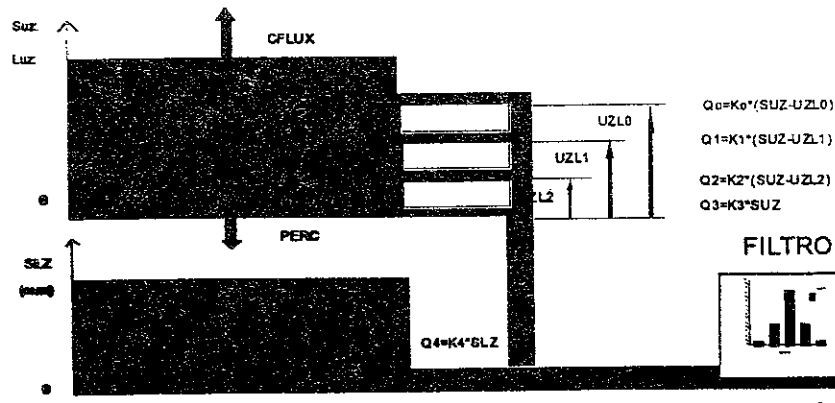
(**)Referido de Linsley-Kohler-Paulus. **HIDROLOGIA PARA INGENIEROS**. "Relaciones entre Precipitación - Escorrentía"

ESTRUCTURA BASICA DEL MODELO HBV



CALCULO DE LA PRECIPITACION
POR ALTURAS DIFERENTES

CALCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO
Y EVAPORACION EN ZONAS DE
VEGETACIONES DIFERENTES



$$Q_0 = K_0 \cdot (SUZ - UZL_0)$$

$$Q_1 = K_1 \cdot (SUZ - UZL_1)$$

$$Q_2 = K_2 \cdot (SUZ - UZL_2)$$

$$Q_3 = K_3 \cdot SUZ$$

FILTRO

MAXBAS

HBV
ESCORRENTIA

SIMBOLOS

- Ssm = almacenamiento de humedad de suelo
- Fc = Capacidad de Campo
- SUZ = Almacenamiento en la Zona Superior
- LUZ = Límite de la Contribución Q_0 a la Escorrentia
- SZ = Almacenamiento en la Zona Inferior
- Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 = Contribuciones a la Escorrentia
- K_0, K_1, K_2, K_4 = Coeficientes de Retención

4.1.3 DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Para la calibración se requiere información de lluvia diaria u horaria, dependiendo de la información disponible y del objetivo de su aplicación, área de drenaje y, para el cálculo del contenido de humedad del suelo se necesita determinar la evapotranspiración potencial utilizando series mensuales de evaporación real. En el último caso es necesario ajustar los datos de evaporación real antes de entrarlos al modelo.

Los datos de caudal sólo se utilizan para validar la calibración del modelo. De 5 a 10 años de datos son necesarios para llevar a cabo el procedimiento de calibración diaria; sin embargo, si se desea mayor precisión (Análisis de Crecidas) se puede llevar a cabo una calibración horaria con períodos de 6 a 8 meses ya que en este caso se utiliza un modelo de simulación continua.

Se recomienda mantener fuera de la calibración unos cuantos años, si es diaria y unos cuantos meses, si es horaria; para validar la calibración con un período independiente.

El modelo requiere de la precipitación media de la cuenca, que implica; si se tienen distintas estaciones de medición, asignarles un valor ponderado o peso considerando las condiciones climatológicas y topográficas del área y utilizando el método geométrico de: Los polígonos de Thiessen.

La información climatológica también puede ser corregida por elevación, siempre y cuando se disponga de una buena relación entre el dato climatológico y la elevación.

El modelo HBV es calibrado por un procedimiento de prueba y error mediante el cual los parámetros son ajustados para mejorar la correspondencia entre el hidrograma simulado y el registrado.

Para ajustar el modelo se utilizan varios criterios principales:

- 1- Análisis de los hidrogramas observados y simulados para establecer el balance hidrológico proporcionado por los parámetros Factor de campo, Beta, Limite de evaporación y Factor de Corrección de la precipitación(PCORR)si es necesario. Además, el análisis se puede complementar con los gráficos de volúmenes acumulados que en cierta manera brindan la información de balance hidrológico.
- 2- Análisis en mayor detalle de la forma del hidrograma para distintos eventos en una serie de tiempo mediante los menús de los sistemas de almacenamiento que comprenden los parámetros K's y UZLO's.
3. Análisis gráfico de las distintas componentes del hidrograma asociado a los eventos de precipitación.
4. Validación del modelo para eventos que no se tomaron dentro de la calibración.

5. Análisis de diversas interrelaciones como por ejemplo: Humedad - Precipitación, Caudal vs Humedad, Caudal Superficial vs Precipitación y Caudal base vs Humedad.

El modelo HBV ha sido aplicado con buenos resultados en países centroamericanos tales como Guatemala, Honduras y Panamá, así como en otros países localizadas en regiones con clima y geografía diferentes.

Entre algunas aplicaciones que tiene el modelo HBV se encuentran:

- ◆ Determinación del potencial hídrico de una cuenca para distintos usos.
- ◆ Pronóstico de caudales en tiempo real
- ◆ Control de la calidad de los datos meteorológicos
- ◆ Extender registros de caudal
- ◆ Rellenar datos faltantes
- ◆ Determinar crecidas de diseño
- ◆ Estudio de balance de agua
- ◆ Determinación de Tendencias Hidrológicas con respecto al manejo de la cuenca.

4.2.0 APLICACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA DE PANTASMA EN SITIO DE ANTIOQUIA

La cuenca de Pantasma hasta el sitio de aprovechamiento hidroeléctrico de nombre Antioquia es de aproximadamente de 66.5 Km², es relativamente pequeña, razón por la cual no ameritó dividirla en varias subcuenca o zonas de vegetación.

4.2.1 METODOLOGIA PARA LA APLICACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA EN ESTUDIO

Para iniciar la aplicación de la cuenca se procedió a utilizar la siguiente metodología:

Basado en la análisis y consistencia de los datos se procedió a tomar un período común entre las estaciones seleccionadas de precipitación diaria, evaporación real y caudal para la calibración del modelo. El período común comprende entre Mayo de 1980 a Mayo de 1984.

a) Estimación de la Precipitación Media

La estimación de la precipitación media se calculó mediante el método de los polígonos de Thiessen, ya que es un método práctico donde sólo es necesario tener definido en un plano la cuenca con las estaciones cercanas a la misma para trazar los polígonos y asignándoles un peso a las estaciones seleccionadas tomando en cuenta el área de influencia de las mismas y teniendo una estación

de control, en nuestro caso es la estación Santa Fe. La sumatoria de los pesos tiene que ser igual a 1.00

La estimación de los pesos que se introdujeron en el modelo, el cual tiene un menú específico para tal efecto, se muestran en la tabla siguiente:

Santa Fe	San Rafael	Los Horcones	La porra
0.85	0.03	0.06	0.06

b) Estimación de la Evaporación Potencial

Se tienen diferentes apreciaciones en cuanto a la determinación de la evaporación potencial y su interrelación en el ciclo hidrológico. Por ejemplo Van Bavel(1966)^(Ref.4) la define como "la evapotranspiración que ocurre cuando la presión de vapor de la superficie evaporante está en el punto de saturación".

El modelo hidrológico HBV utiliza valores de evaporación potencial para calcular la evapotranspiración real. La evapotranspiración real, el modelo la calcula de la siguiente manera:

- a) Se dice que la evaporación actual es igual a la evapotranspiración real cuando el contenido de humedad del suelo es mayor o igual que el límite de evapotranspiración potencial(L_p) tomando en cuenta el factor de campo(F_c). ($L_p * F_c$)

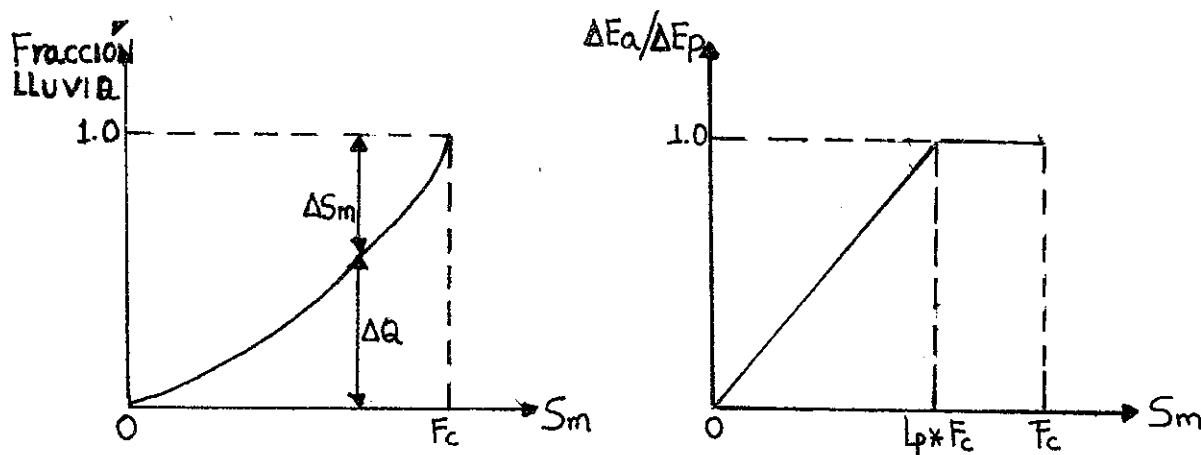
$$S_m < L_p * F_c \text{ entonces } E_{act} = E_{pot}$$

- b) En otro caso, cuando el contenido de humedad es menor o igual que el límite de evapotranspiración potencial tomando en cuenta el factor de campo ($l_p * f_c$), la evaporación actual es igual a:

$$E_{act} = S_m / (L_p * F_c) * E_{pot}$$

El contenido de humedad puede ser menor cuando la precipitación no fue lo suficiente para que se produjera la infiltración en el suelo. Por lo tanto el modelo calcula la evaporación actual.

Mediante la siguiente gráfica se puede visualizar como el modelo se representa el cálculo la evapotranspiración real o actual.



De conformidad con estudio realizado en zonas con características climatológicas y morfológicas similares a la de la cuenca en estudios^(*), se obtiene un coeficiente de 0.7 para transformar los datos de evaporación real de la estación Mancotal a evaporación potencial. Sin embargo, se puede utilizar otros métodos para calcular la evaporación potencial.

Para aplicar el modelo teniendo los datos de entrada que necesita; además, se debe tomar en cuenta las condiciones iniciales (valor de humedad del suelo (S_m), valor de almacenamiento superior (S_{uz}) y almacenamiento inferior (S_{lz}), los cuales se asumen de acuerdo al período donde se comienza la calibración; por ejemplo, es de esperar estados de humedad muy bajos al final del verano.

El modelo contempla en base a impulsos de precipitación, la rutina de generación de esorrentía, la cual da origen a las formas de la curva de recesión del hidrograma.

Es importante conocer que para calibrar el modelo eficientemente es necesario entender sus más fundamentales características así como cual va a ser la reacción del modelo al variar ciertos parámetros.

Se recomienda realizar el primer ensayo con los parámetros iniciales establecidos por el modelo.

(*) HYDROLOGICAL STUDY, FINAL REPORT. RIO VIEJO MASTER PLAN. VOLUMEN 3. 31 DE OCTUBRE DE 1994

4.2.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los valores finales aplicados para desarrollar la simulación del comportamiento de la esorrentía con los datos históricos de la estación Antioquia en Pantasma; así como para conocer las características hidrológicas de la cuenca en estudio son:

$$FC = 100 \text{ mm}$$

$$LP = 1.00$$

$$BETA = 0.50$$

$$PERC = 3.5 \text{ mm/dia}$$

$$K_0 = 0.150 \text{ 1/dia}$$

$$K_1 = 0.050 \text{ 1/dia}$$

$$K_2 = 0.100 \text{ 1/dia}$$

$$K_3 = 0.100 \text{ 1/dia}$$

$$K_4 = 0.020 \text{ 1/dia}$$

$$UZ_{10} = 70 \text{ mm}$$

$$UZ_{11} = 20 \text{ mm}$$

$$UZ_{12} = 10 \text{ mm}$$

Condiciones Iniciales

$$S_m = 65 \text{ mm}$$

$$S_{uz} = 10 \text{ mm}$$

$$S_{lz} = 28 \text{ mm}$$

$$MAXBAS = 2.0 \text{ HORAS}$$

En la figura No.18 (parte superior); permite observar el grado de aproximación de los caudales simulados con respecto a los caudales observados (caudales históricos), en donde la calibración resulta ser satisfactoria.

Algunos aspectos de gran relevancia, son considerados con mas detalle a continuación:

- a) Para el caso de la cuenca del río Pantasma, se puede observar en la figura No.18 que los caudales corresponden a la precipitación registrada para el período lo que nos muestra, que hay una relación entre precipitación y escorrentía.(ver análisis doble masa, acápite 3.3.3)

- b) Los picos del hidrograma y la recesión del flujo, básicamente son producidos por la precipitación; además podemos notar que el comportamiento de la cuenca es similar en todos los períodos a lo largo del tiempo, lo que demuestra que los valores asumidos para la calibración del modelo son aceptables, y se pueden tomar como parámetros de las características hidrológicas de la cuenca. No hay que omitir que el hidrograma simulado se adelanta un poco al hidrograma observado, para este efecto, se variaron los valores de factor de campo, límite de evaporación y beta, no variando en nada el comportamiento de los mismos, por lo que se concluye que lo mas probable es que exista infiltración en la zona, ya que al existir una caída en el sitio de aprovechamiento, puede ser una zona karstica; asimismo relacionándolo con el tiempo de concentración, la cuenca tiene una respuesta rápida al producirse una

- c) El período de concentración de la cuenca, se determinó con la formula empirica que considera las características morfológicas (pendiente, tamaño de la cuenca)^(Ref. 5)

$$t_c = \left(0.87 * \frac{L^3}{h} \right)^{0.385}$$

en donde:

t_c = tiempo de concentración

L = longitud del cauce principal en Kms.

h = desnivel del punto más alto de la cuenca al punto de cierre.

$$t_c = \left(\frac{0.87 * 16.8^3}{745} \right)^{0.385} = 1.93 \text{ h.}$$

El valor de MAXBAS adoptado para la cuenca de Pantasma es de 2 horas.

- d) El valor de factor de campo (F_c) representa la mayor cantidad de almacenamiento de agua en el suelo de la cuenca. Este valor junto al de los parámetros BETA, LP y PCORR simulan el volumen de escorrentía. Los valores de las condiciones iniciales están en función del período tomado para la calibración (1980-1984).
- e) Los valores de los parámetros de escorrentía (K_0 , K_1 , K_2 , K_3 y K_4) estimados, dan la forma del hidrograma distribuyendo la escorrentía generada en el tiempo.

Tomando el concepto de que la escorrentía es la cantidad de lluvia no absorbida por el suelo, los parámetros de escorrentía del modelo se pueden relacionar con el coeficiente de escorrentía anual de la cuenca de la siguiente manera:

1. Calcular el coeficiente de escorrentía anual para todo el período (1980 - 1984).
2. Se espera que en una adecuada simulación, la sumatoria de los parámetros de escorrentía anuales del modelo sean aproximadamente igual al coeficiente total de escorrentía de la cuenca para obtener un modelo mas acorde a la realidad.

En nuestro caso específico, el valor del coeficiente de escorrentía de la cuenca es igual a 0.38; mientras que la suma de los parámetros de escorrentía estimados para la simulación del modelo, es 0.37, por lo que se considera que los valores estimados de los K's en el modelo son aceptables, y podría considerarse que tengan mayor utilidad desde el punto de vista hidráulico, ya que son reales. (Ver figura No.17 de la serie de precipitación).

- f) Con respecto a los valores de evaporación real, que fueron afectados por el coeficiente de 0.7 (Ver acápite 4.2.1. sección b); esta afectación, no hubiera variado la calibración si ésta hubiera sido realizada con los valores propios medidos; lo que se puede visualizar, que los valores que intervienen en el cálculo de la evapotranspiración real en el modelo (LP,FC, SM) son aceptables y la evaporación real es aproximadamente igual a la evaporación potencial en la cuenca.
- g) Con los datos históricos y los simulados de caudales, se procedió a elaborar la curva de duración de caudales del año 1981 para cada serie de datos (fig. No.20), en la que se puede observar que ambas curvas no poseen una variación significativa lo que conlleva a validar los datos de caudal generados por el modelo, y conocer el potencial hídrico de la cuenca, el cual es capaz de generar aproximadamente 2.5 Mw.

Como es conocido, la curva de duración de caudales es una herramienta muy útil en la hidrología ya que nos proporciona parámetros importantes para el diseño de las diferente obras hidráulicas como son: Volúmen de almacenamiento y El valor del caudal de diseño sostenido en el tiempo.

5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Para la calibración del modelo, es deseable tener por lo menos cinco años de registros de datos diarios; pero como los resultados obtenidos son consistentes en su comportamiento, aunque no se llega a una serie de cinco años se considera que la calibración es aceptable. El caudal medio del período (1980-1984) de los datos históricos tiene un valor de 3.8 m³/segundo y el valor del caudal medio de los datos simulados es 3.6 m³/seg.
2. De la curva de duración de caudales (Ver fig. No.19) se concluye:
 - a) El caudal de diseño ha utilizarse para el propósito de generación de energía eléctrica es aproximadamente 4 m³/seg.
 - b) Sin almacenamiento, a filo de agua, el caudal sostenido debe ser de aproximadamente 1.5 m³/segundo.
 - c) Mediante la construcción de un embalse con capacidad aproximada de 38 millones de metros cúbicos (mmc) se puede mantener un caudal de operación a lo largo del año de 4 m³/segundo, ya que la cuenca presenta un comportamiento no variable a lo largo del tiempo.

3. Mediante el valor del caudal de diseño obtenido a través de la curva de duración ($4 \text{ m}^3/\text{segundo}$), una altura de caída en el punto de aprovechamiento de 75 metros y tomando un valor de eficiencia de las turbinas equivalente a 0.90 y del generador de 0.95; se puede obtener un valor de potencia media a generar disponible, de 2.5 Mw.
4. Con la calibración del modelo, y el conocimiento del potencial hídrico de la cuenca, se puede realizar un estudio hidrodinámico que permita conocer a detalle el grado de infiltración de la zona, así como la variación de los caudales y niveles, ante la construcción de una obra hidráulica en el sitio. Con la aplicación de estas dos herramientas se puede adquirir un conocimiento de la zona en sí, pudiéndose relacionar con otras zonas con características hidrológicas similares a la zona en estudio, y tener una visión general del aprovechamiento integral del recurso hídrico para fines energéticos.
5. Al tener realizada la calibración, se puede obtener información de los aportes de escorrentía en diversos puntos aguas arriba del sitio considerado en estudio a través de los caudales específicos, lo cual permitirá aprovechar el recurso en otros usos.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Elaborar curva área - capacidad para determinar la altura de la presa que proporcionará el volumen de almacenamiento requerido.
2. Debido a que la serie de información de datos de caudales es muy corta (5 años), se recomienda la continuación de la operación y mantenimiento de la estación Antioquia en Pantasma con el objetivo de recolectar y procesar la información para obtener series más representativas de la variación del ciclo hidrológico de la cuenca.
3. Continuar los estudios a nivel de Factibilidad que contemple un análisis de caudales extremos así como un estudio geológico más detallado del área de interés que permitan establecer algunos parámetros de diseño de las estructuras que contempla una pequeña central hidroeléctrica. Dichos parámetros pueden ser la dimensiones de las estructuras de desvío y evacuación, permeabilidad del suelo, la capacidad de soporte de la fundación de la presa, la necesidad de anclaje de las estructuras, así como conocer para la karticidad(paso de las aguas subterráneas a través del medio poroso)del sitio.

También se recomienda un estudio de sedimentos del cauce del río; así como de impacto ambiental para conocer las causas y beneficios que implicaría la construcción de un embalse en la zona de interés para futuras inversiones, ya que el potencial hídrico del río permite la instalación de

una mini-central hidroeléctrica con una potencia media de generación de 2.3 Mw, la cual estaría en capacidad de cubrir una población de 2,300 vivienda con una dotación de 500 Watts/vivienda⁽⁶⁾.

LISTA DE REFERENCIAS

- (1) ESTUDIO DEL SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL - 1971 y
ESTUDIO GENERAL DE LAS CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DEL SITIO
DE ANTIOQUIA Y SACRAMENTO . Instituto Nicaraguense de Energía
1980 -1981

- (2) Instituto Nicaraguense de energía
PLAN MAESTRO DE DESARROLLO ELECTRICO. 1977 - 2000. Nicaragua
Volúmen 3.1
Consortio IECO - LAHMEYER
Managua Nicaragua 1980

- (3) Danish Hidraulic Institut
REFERENCE AND USER MANUAL H B V - MIKE 11
25 de Mayo de 1993

- (4) Carlos J. Grassi
FUNDAMENTO DEL RIEGO
CIDIAT - Venezuela, 1993

- (5) Proyecto hidrometeorológico Centroamericano (P.H.C.A)
MANUAL HIDROLOGICO
Segunda Edición. 1970

- (6) Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)
Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI)
Quito - Julio 1981
MINICENTRALES HIDROELECTRICAS - MANUAL PARA LA TOMA DE
DECISIONES.

A N E X O

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

METODOLOGIA PARA EL CALCULO MANUAL DE LA ESCORRENTIA UTILIZANDO LOS PRINCIPIOS DEL MODELO HBV

Debido a la sencillez del proceso de cálculo de las operaciones que realiza el modelo HBV para conocer la estructura y comportamiento del mismo; a continuación se plantea dicho proceso.

Como primer paso: Se asume que existe una sola cuenca
Intervalo de MAXBAS = 24 horas
 $K2 = K3 = 0$ y $UZL1 = UZL2 = 0$; esto permitirá solamente el cálculo de Q_0 y Q_1 en la zona superior.

RUTINA DE LA HUMEDAD DEL SUELO

- 1a. Calcular milimetro por milimetro la contribución de la lluvia a la escorrentía(DQ) de acuerdo a:

$$DQ = (S_m / F_c)^b * dP \text{ cuando } dP > 0$$

Observe que el modelo HBV añade la precipitación milimetro a milimetro.

- 1b. Sumar la contribución DQ continuamente de acuerdo a la expresión:

$$dS_{uz} = dS_{uz} + DQ$$

- 1c. Corregir la humedad del suelo (S_{sm})

$$S_{sm} = S_{sm} + (dP - DQ)$$

Utilizar el nuevo valor de S_{sm} de "1a" si usted está añadiendo la precipitación milimetro a milimetro hasta que toda la precipitación haya sido colocada en los cálculos. Si toda la precipitación se colocó de una sola vez, entonces continúe.

- 2a. Calcular la evapotranspiración real

$$E_{act} = E_{pot} \quad \text{cuando } S_{sm} > L_p * F_c$$

$$E_{act} = S_{sm} / (L_p * F_c) * E_{pot} \quad \text{cuando } S_{sm} \leq L_p * F_c$$

2b. Corregir la humedad del suelo de acuerdo a:

$$S_{sm} = S_{sm} - E_{act}$$

FUNCION DE RESPUESTA

3. Añada la contribución de escorrentía de la rutina del suelo a la zona de almacenamiento superior (Suz)

$$S_{uz} = S_{uz} + dS_{uz}$$

4a. Calcule la percolación (PERC) de la zona superior a la zona inferior

$$\text{Percolación} = \text{PERC} \quad \text{cuando } S_{uz} > \text{PERC}$$

$$\text{Percolación} = S_{uz} \quad \text{cuando } S_{uz} \leq \text{PERC}$$

4b. Corriga el almacenamiento en la zona superior

$$S_{uz} = S_{uz} - \text{PERC}$$

4c. Añada la percolación a la zona inferior

$$S_{lz} = S_{lz} + \text{PERC}$$

5a. Calcule la escorrentía desde la zona superior

$$Q_0 = K_0 * (S_{uz} - UZL_0) \quad \text{cuando } S_{uz} > UZL_0$$

$$Q_1 = K_1 * S_{uz}$$

$$S_{uz} = S_{uz} - Q_0 - Q_1$$

5b. Calcule la escorrentía desde la zona inferior

$$Q_4 = K_4 * Slz$$

$$Slz = Slz - Q_4 = Slz * (1 - Q_4)$$

6. Sume las componentes de la escorrentía

$$Q_{gen} = Q_0 + Q_1 + Q_4$$

y convierta los milímetros a m^3/seg :

$$Q_{comp} = Q_{gen} * AREA / 86.4 \quad \text{cuando el AREA es dada en Km}^2$$

VERIFICACION DEL BALANCE DE AGUA

7. Realice un balance de agua

$$P - Eat - Q_{gen} = d (S_{sm} + S_{uz} + Slz)$$

8. Continúe con el próximo día

$$dS_{uz} = 0 \text{ e inicie el cálculo de la parte primera (1a)}$$

APENDICE A
LISTA DE ILUSTRACIONES

REPUBLICA DE NICARAGUA

LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

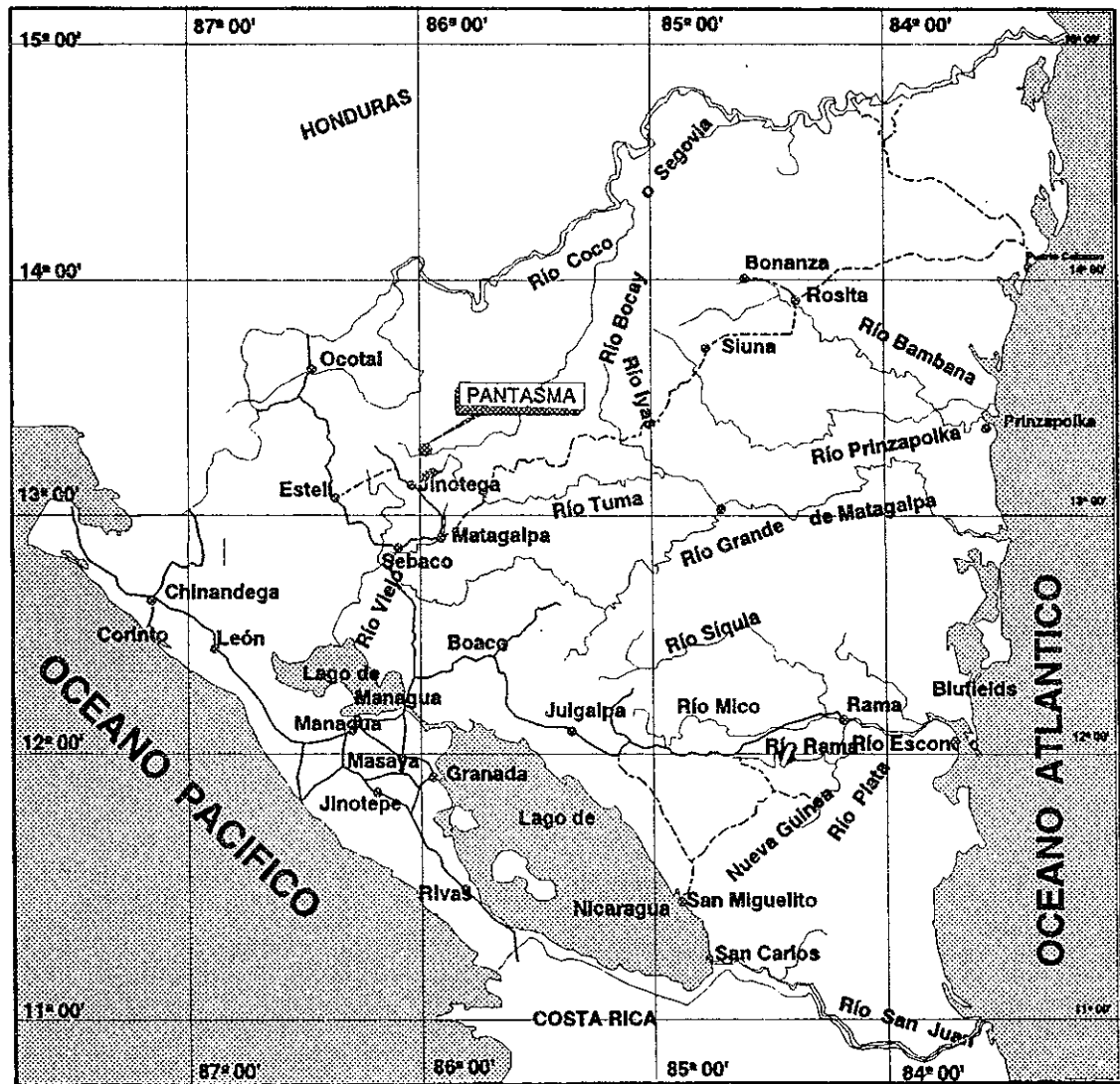
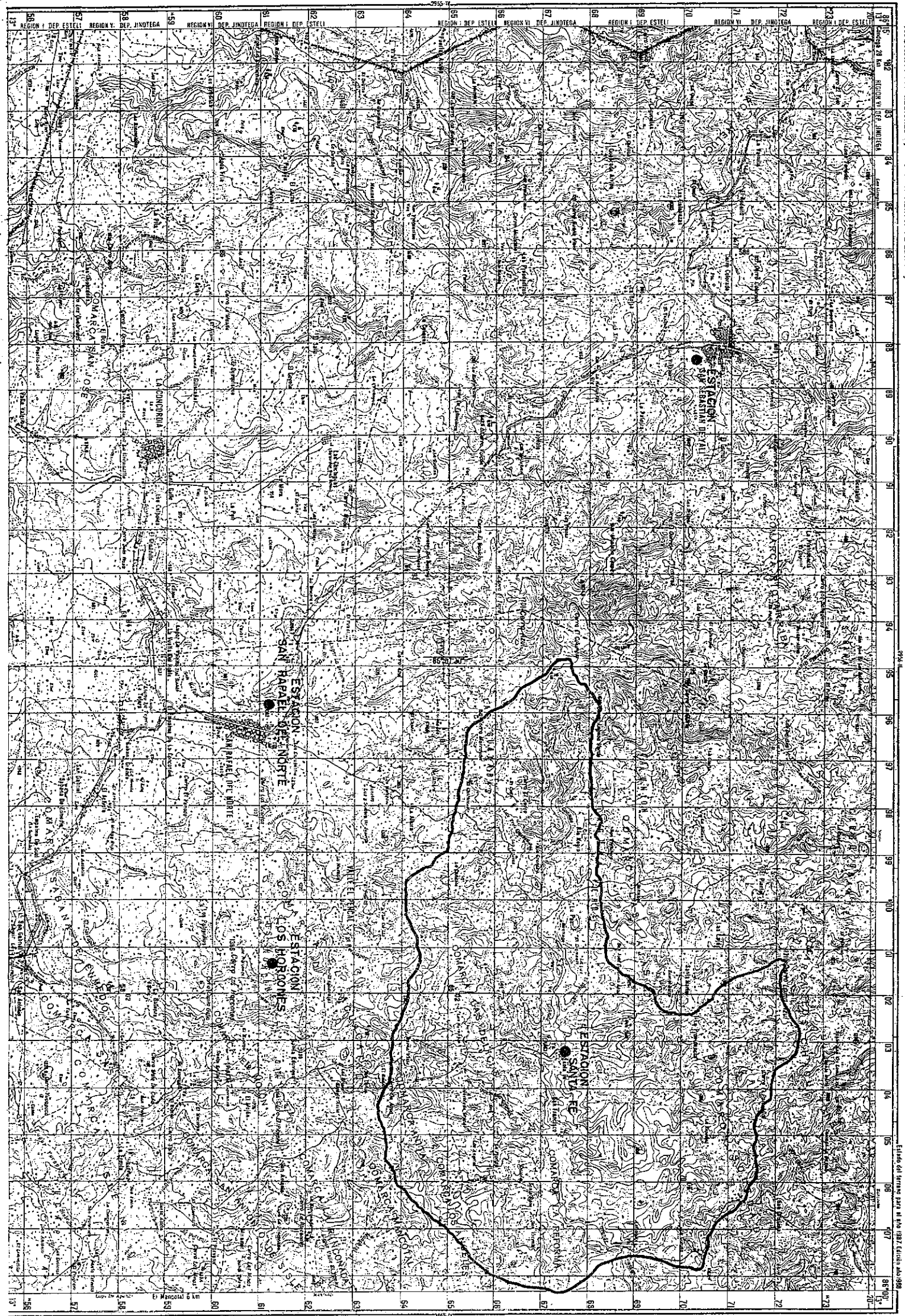
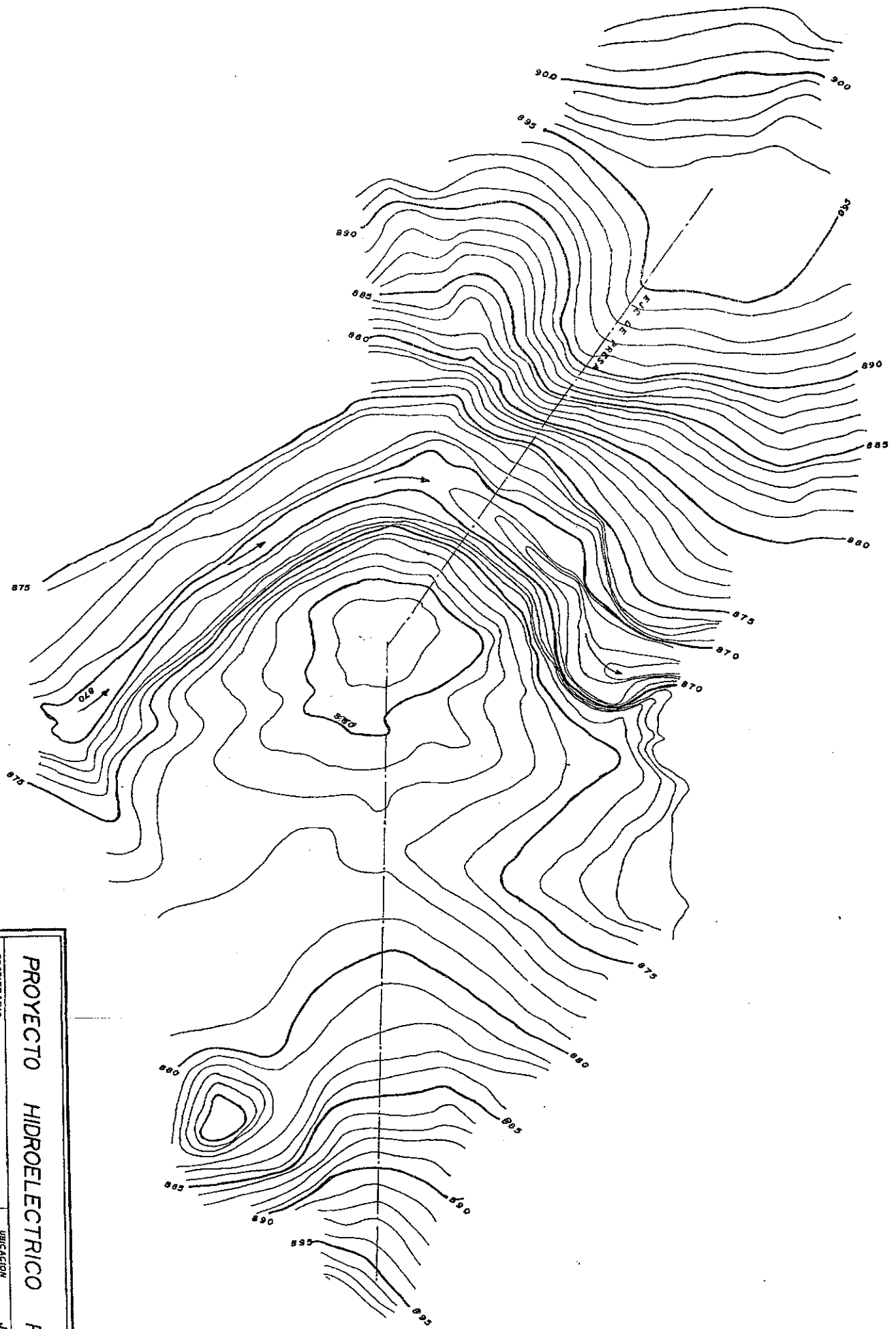


FIGURA No. 1

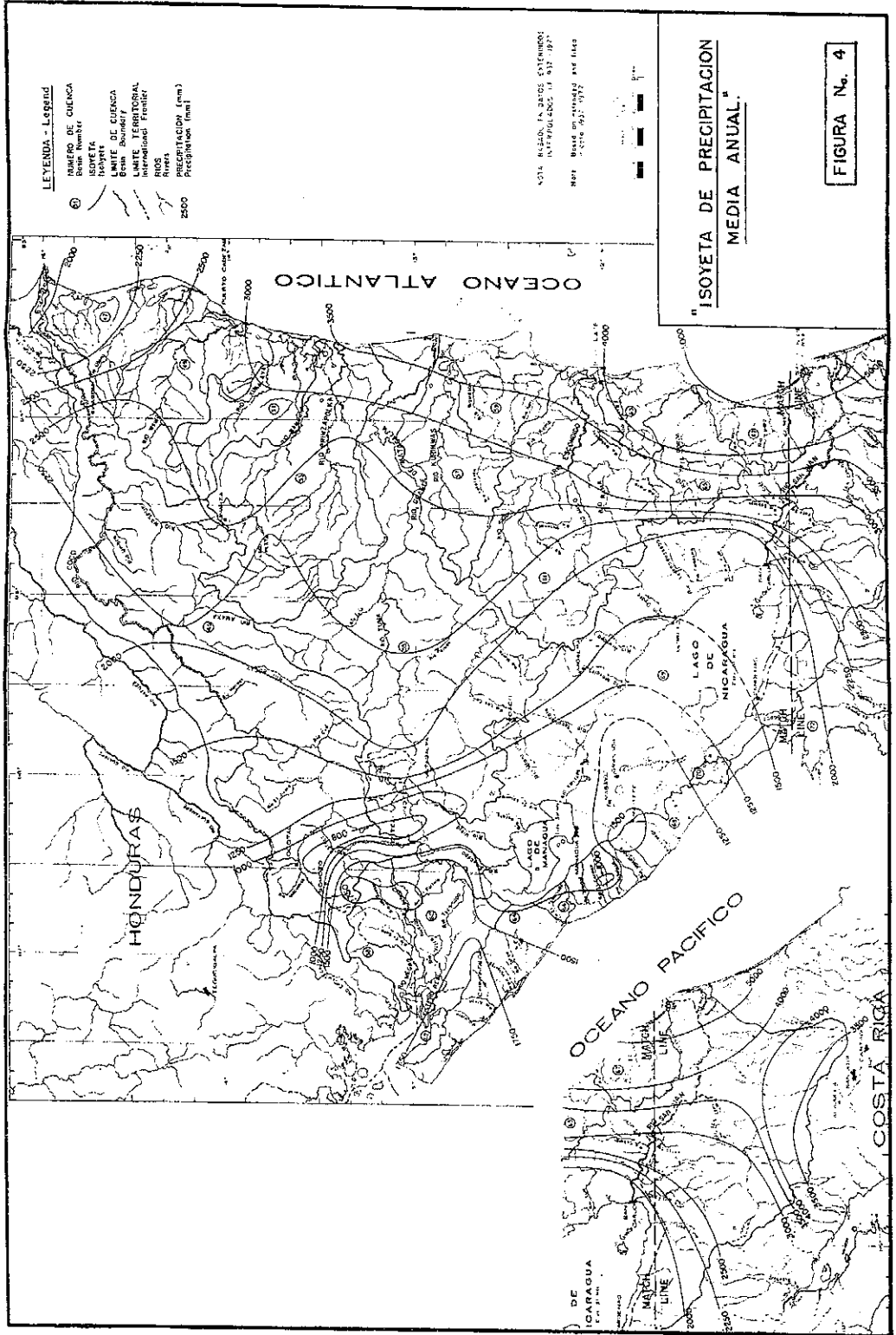


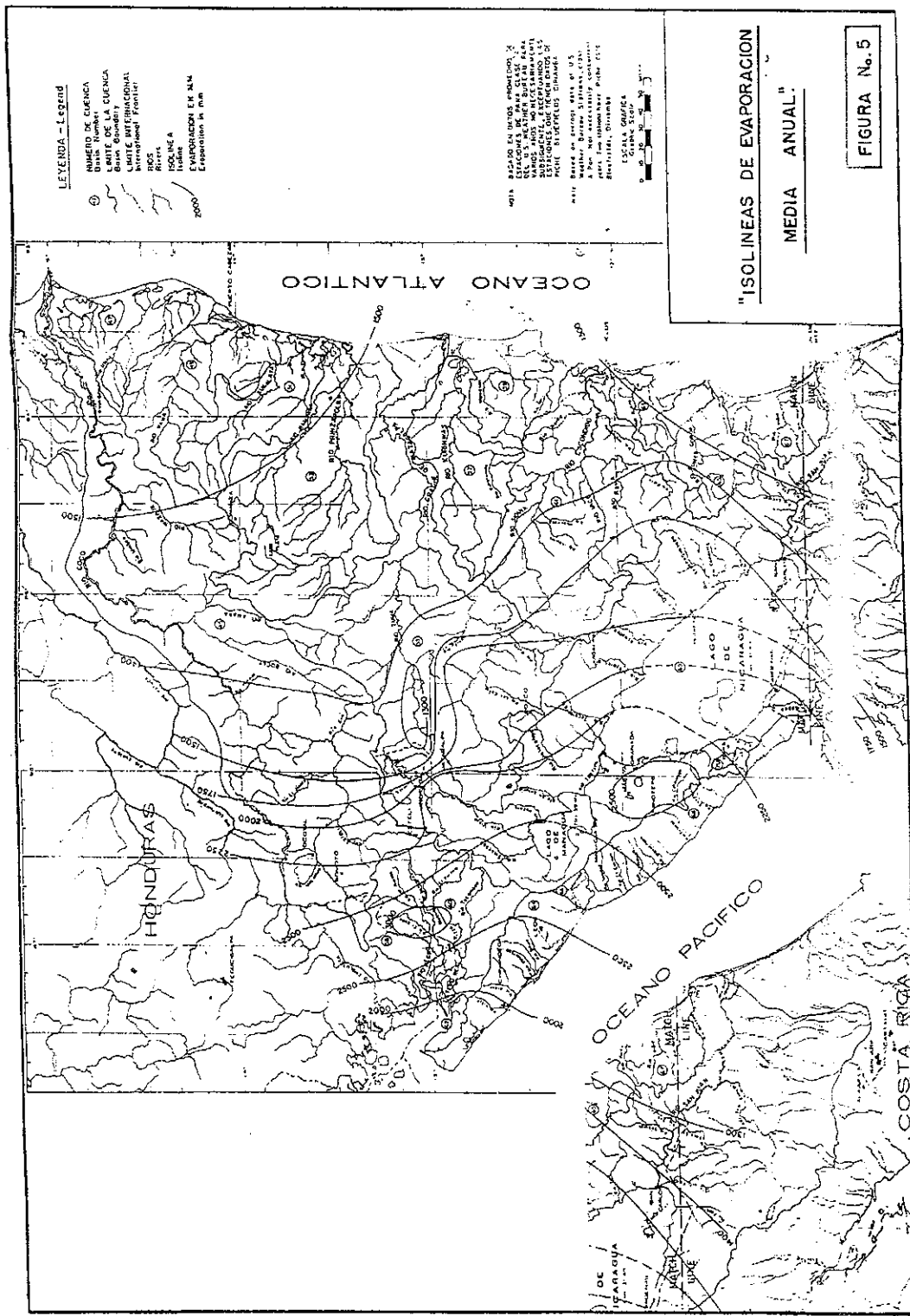
ESTACION
LA PORRA

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



PROYECTO HIDROELECTRICO PANTASMA	
PROPIETARIO	UBICACION
	JINOTEGA NICARAGUA
ESCALA	TOPOGRAFO EVERARDO BETETA
1 500	
FECHA	DIBUJO
ENERO, 1996	FIGURA 3





LEYENDA - Legend

① NÚMERO DE CUENCA
Drain Number

--- LÍMITE DE LA CUENCA
Drain Boundary

--- FRONTERA INTERNACIONAL
International Frontier

REG.
Road

ISOLINEA
Isohyet

EVAPORACION EN M.M.
Evaporation in mm

NOTA: ESTUDIO EN UNO DE LOS SERVICIOS DE
LA U.S. NATIONAL SURFACE AREA
STATION, MANAGUA, NICARAGUA, EN
CONFORMIDAD CON EL PROGRAMA DE
ESTUDIOS DE LA ORGANIZACIÓN DE
AMÉRICA CENTRAL.

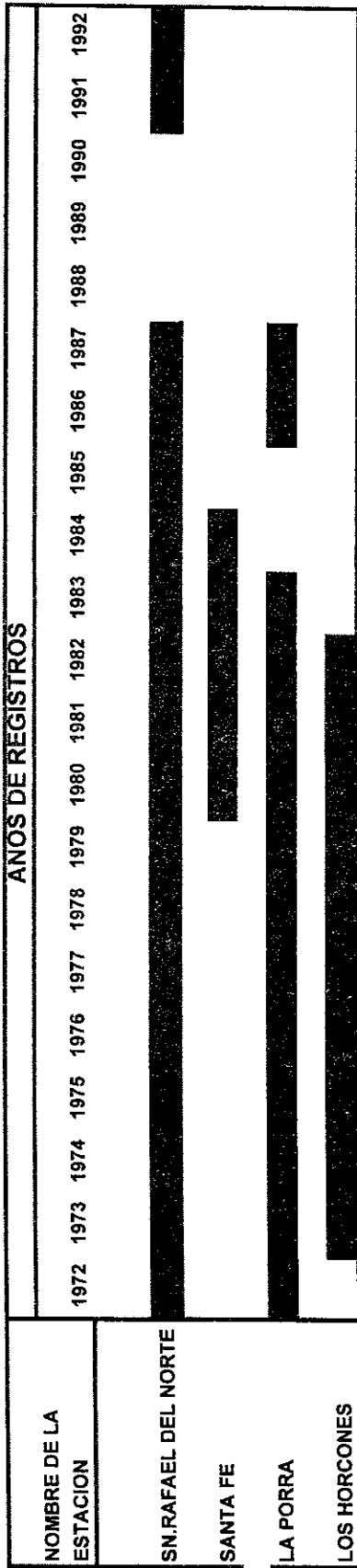
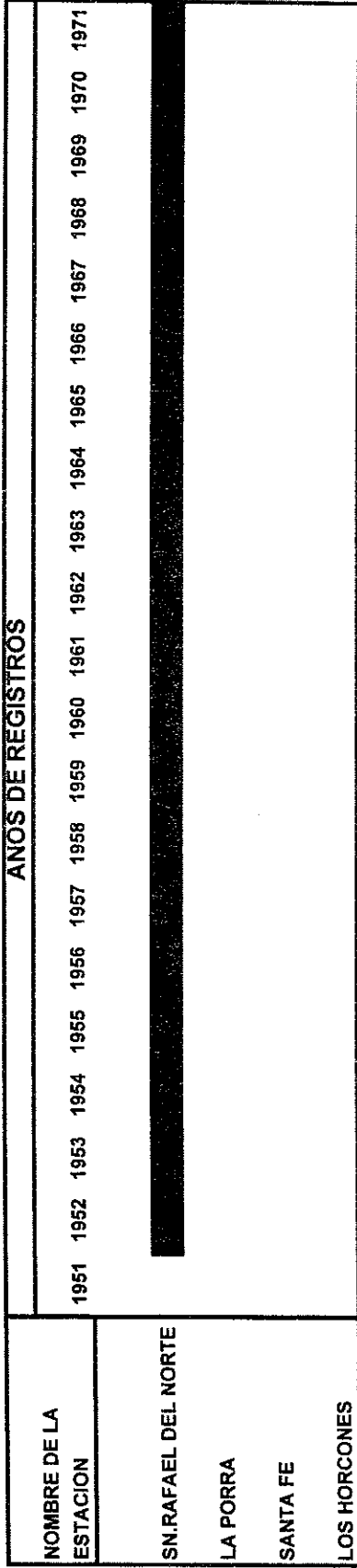
NOTA: ESTUDIO EN UNO DE LOS SERVICIOS DE
LA U.S. NATIONAL SURFACE AREA
STATION, MANAGUA, NICARAGUA, EN
CONFORMIDAD CON EL PROGRAMA DE
ESTUDIOS DE LA ORGANIZACIÓN DE
AMÉRICA CENTRAL.

ESCALA GRÁFICA
Graphic Scale

**"ISOLINEAS DE EVAPORACION
MEDIA ANUAL"**

FIGURA No. 5

**CRONOGRAMA DEL ESTADO DE LOS REGISTROS DE PRECIPITACION MENSUAL
DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS**



SIMBOLOGIA

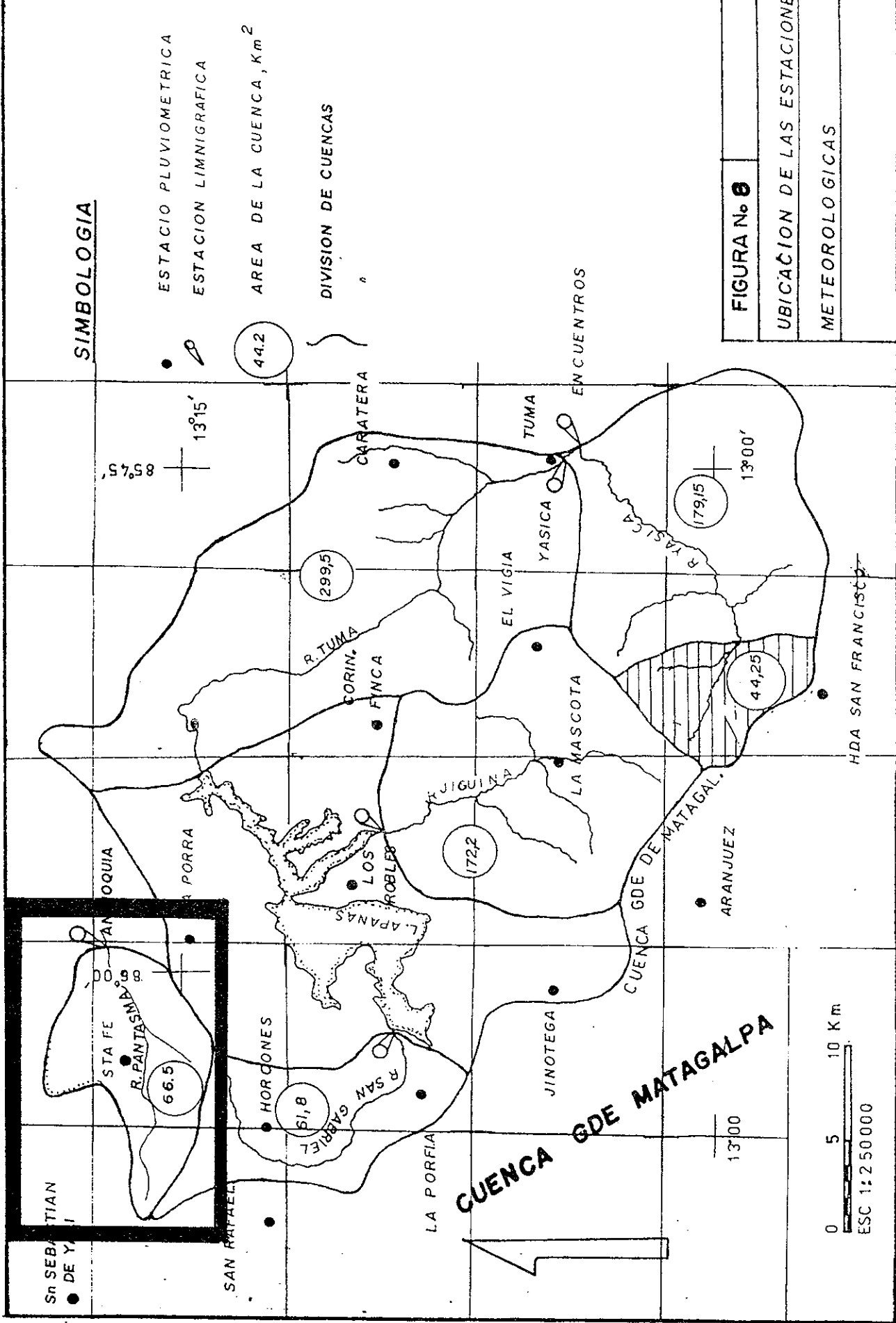
[Barra negra] AÑOS CON REGISTROS

Figura No.6

**EVAPORACION DE TANQUE (MENSUAL)
DATOS RELLENADOS DE LA ESTACION MANCOTAL**

ANOS	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL
1969	157.70	118.2	113.9	120.7	115.8	115.9	100.8	97.8	103.4	101.0	129.0	150.0
1970	158.00	115.0	106.0	109.0	95.0	119.0	100.0	93.0	106.0	90.0	146.0	155.0
1971	156.00	123.0	106.0	128.0	117.0	113.0	103.0	100.0	91.0	118.0	167.0	175.0
1972	123.00	142.0	114.0	105.0	114.0	128.0	103.0	79.0	99.0	126.0	185.0	195.0
1973	161.00	117.0	114.0	128.0	111.0	109.0	107.0	88.0	97.0	102.0	131.0	159.0
1974	136.00	131.0	125.0	126.0	113.0	97.0	107.0	104.0	92.0	97.0	146.0	174.0
1975	165.00	138.0	127.0	105.0	104.0	114.0	102.4	106.0	81.0	102.0	140.0	145.0
1976	123.00	116.0	102.0	130.0	115.0	120.0	92.0	96.0	106.0	119.0	135.0	162.0
1977	132.00	108.0	125.0	116.0	116.0	119.0	115.0	95.0	109.0	113.0	142.0	172.0
1978	170.00	121.0	130.0	111.0	117.0	119.0	99.0	90.0	112.0	125.0	136.0	193.0
1979	152.20	118.6	111.1	116.9	111.5	111.4	94.1	65.0	86.0	104.0	135.0	159.0
1980	155.00	88.0	106.0	103.0	111.0	90.0	83.0	83.0	121.0	101.0	152.0	104.0
1981	128.00	92.0	101.0	108.0	107.0	100.0	109.0	86.0	93.0	105.0	148.0	162.0
1982	141.00	123.0	97.0	123.0	108.0	120.0	98.0	82.0	97.0	109.0	191.0	182.0
1983	197.00	142.0	103.0	109.0	115.0	111.0	94.0	109.0	102.0	109.0	160.0	183.0
1984	159.00	131.0	113.0	107.0	120.0	145.0	110.0	93.0	109.0	105.0	160.0	161.0
1985	166.00	111.0	104.0	137.0	121.0	125.0	94.0	96.0	113.0	135.0	175.0	190.0
1986	186.00	111.0	107.0	127.0	109.0	106.0	94.0	107.0	116.0	138.0	180.0	199.0
1987	148.60	115.0	102.5	116.4	109.7	113.3	100.3	95.8	99.5	106.1	152.3	165.7
1988	150.90	120.9	111.3	113.9	110.5	107.0	96.0	104.0	99.1	106.1	151.8	162.8
1989	149.50	113.2	108.9	115.7	112.5	114.0	100.0	92.5	101.2	110.4	152.1	166.1
1990	152.00	118.2	110.7	115.8	110.1	106.1	88.6	59.2	101.4	110.9	153.2	166.2
MEDIA	153.6	118.2	109.8	115.9	112.0	113.7	100.0	94.0	101.3	107.6	151.9	165.9
STDA	18.0	13.1	8.8	9.3	5.5	11.1	7.3	12.4	9.5	11.7	17.0	19.9

Figura No.7



SIMBOLOGIA

● ESTACION PLUVIOMETRICA
 P ESTACION LIMNIGRAFICA

44.2 AREA DE LA CUENCA, Km²

DIVISION DE CUENCAS

FIGURA No. 8

UBICACION DE LAS ESTACIONES

METEOROLOGICAS

San Sebastian
 DE Y...

LA PORFIA

SAN RAFAEL

HORCONES

R. SAN GABRIEL

61,8

L. APANAS

LA PORFIA

CUENCA GDE MATAGALPA

R. JIGUINA

1722

JINOTEGA

LA MASCOTA

CUENCA GDE DE MATAGAL.

ARANJUEZ

13°00'

0 5 10 KM
 ESC 1:250000

85°45'

13°15'

44.2

299,5

CARATERA

CORIN.
FINCA

EL VIGIA

TUMA

ENCUENTROS

YASICA

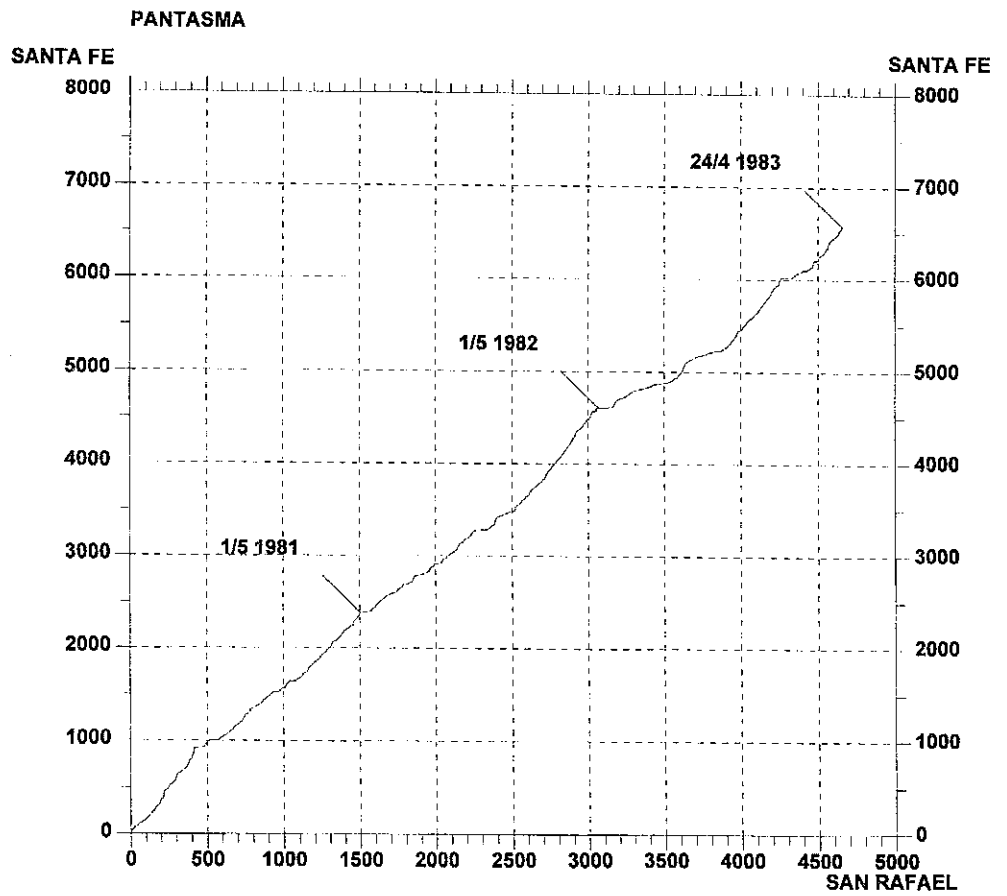
179,15

13°00'

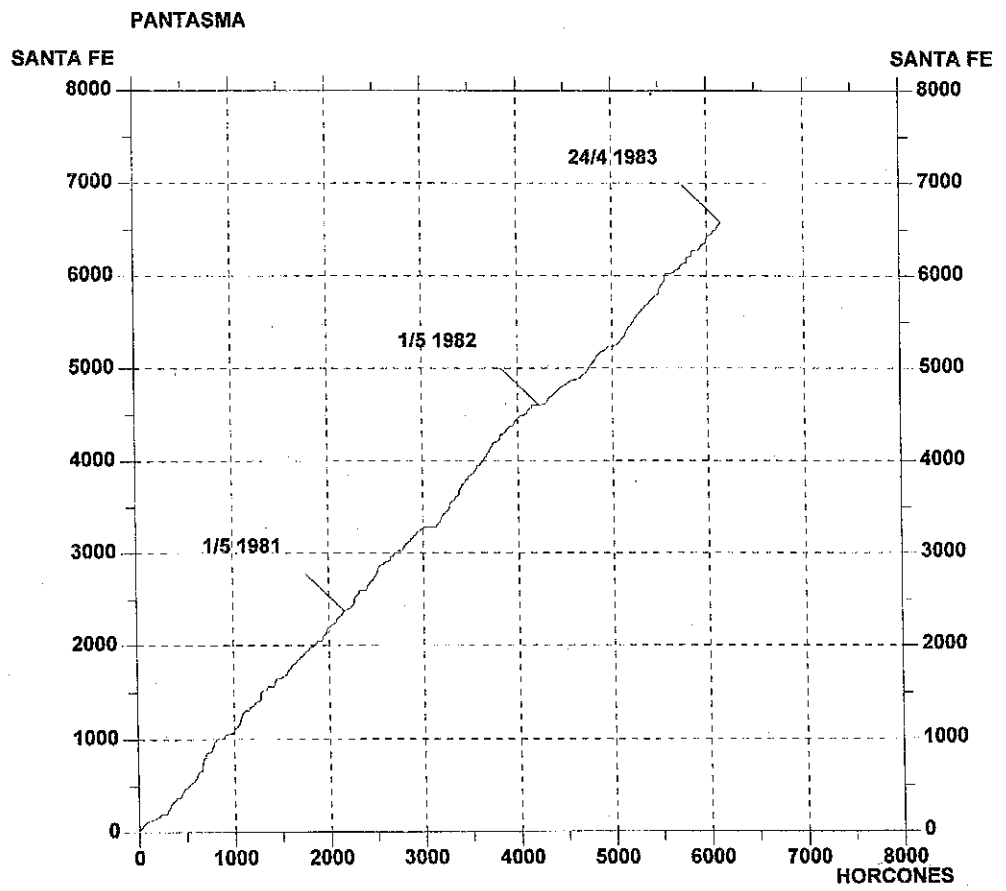
44,25

HDA SAN FRANCISCO

**ANALISIS DOBLE MASA
SERIES DE PRECIPITACION**

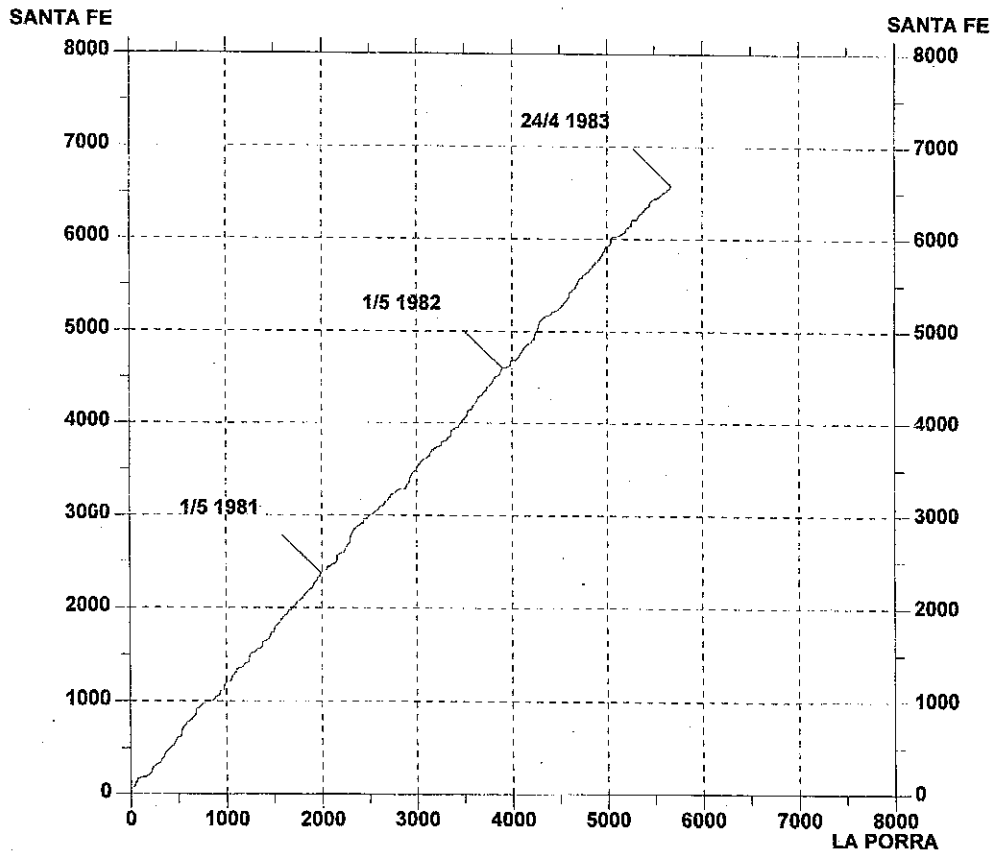


Analisis de Doble Masa Estaciones Precipitación San Rafael del Norte - Santa Fe	MIKE 11 Figura No. 9
---	--------------------------------



	Analisis de Doble Masa Estaciones Precipitación Los Horcones - Santa Fe
MIKE 11	
Figura No. 10	

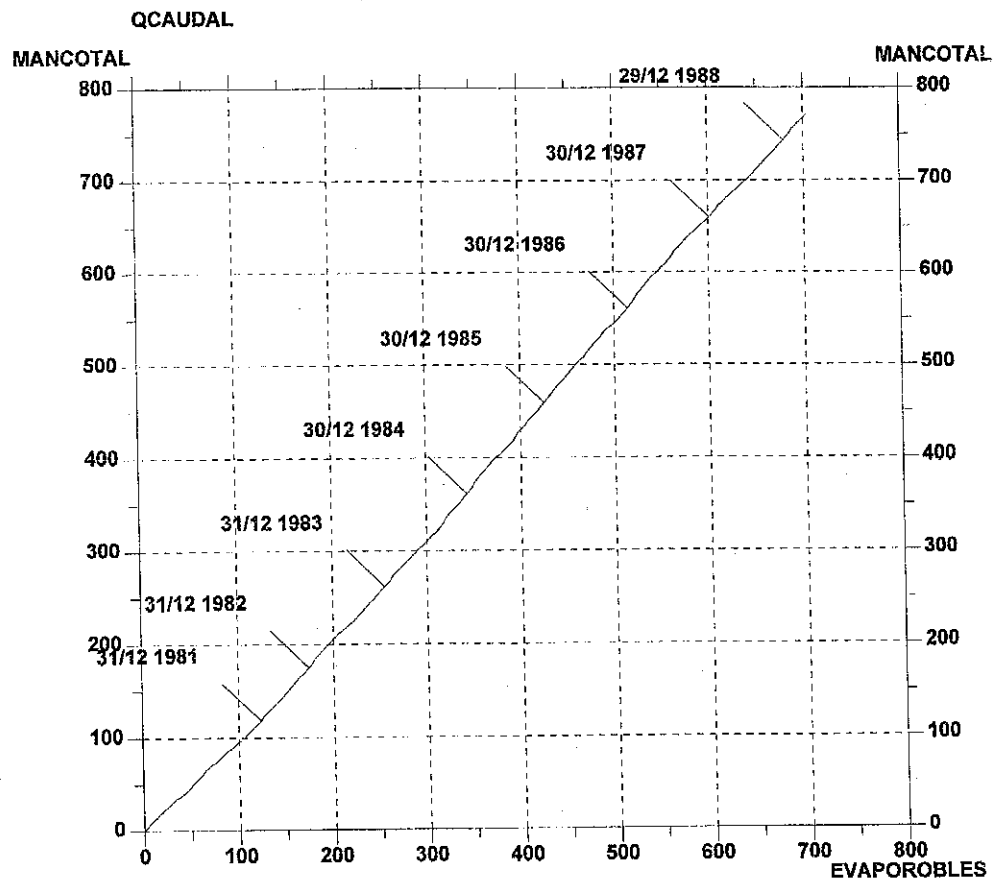
PANTASMA



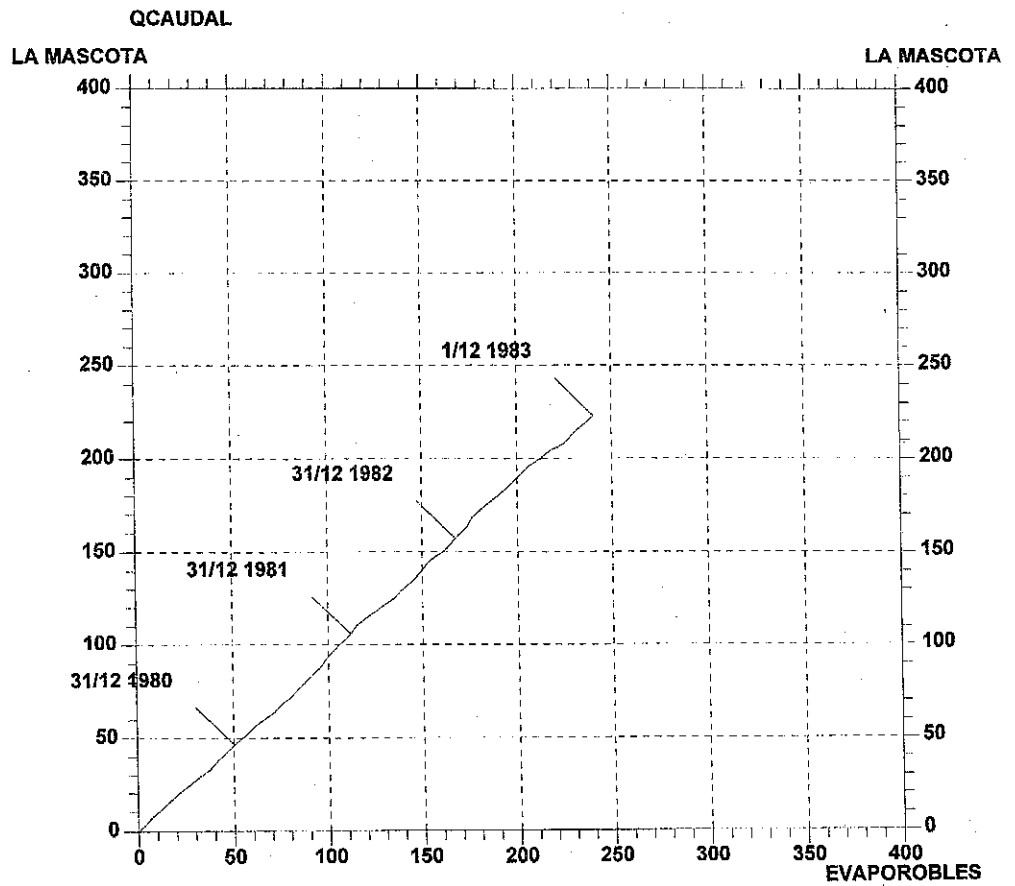
	Análisis de Doble Masa Estaciones Precipitación La Porra - Santa Fe
	MIKE 11 Figura No. 11

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

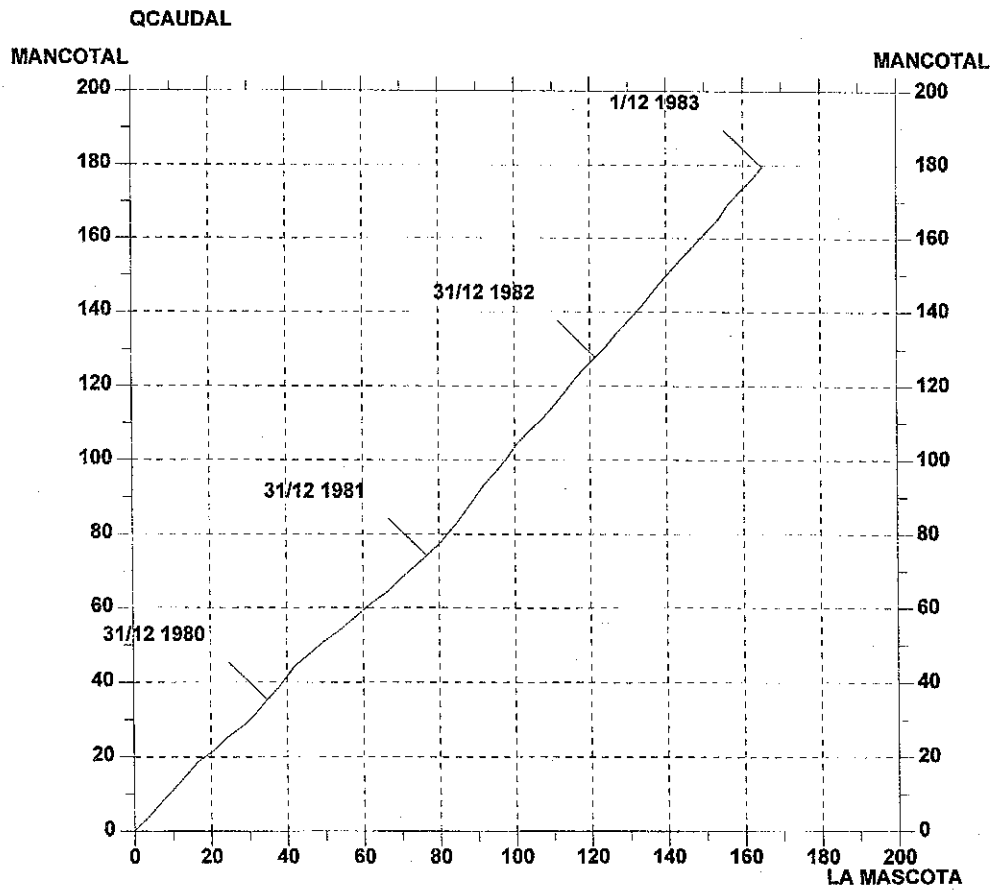
**ANALISIS DOBLE MASA
SERIES DE EVAPORACION**



<p>Analisis de Doble Masa Estaciones Evaporación Los Robles - Mancotal</p>	<p>MIKE 11</p> <p>Figura No. 12</p>
---	--

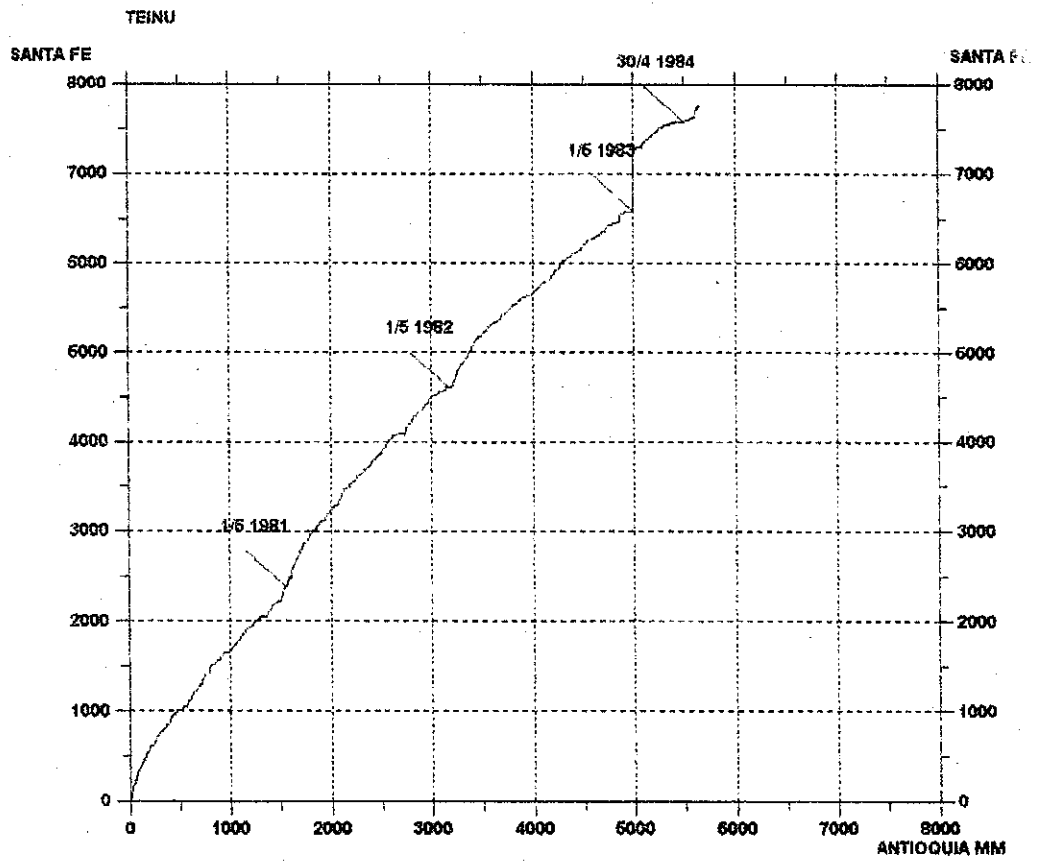


Analisis de Doble Masa Estaciones Evaporación Los Robles - Mascota	
MIKE 11 Figura No.13	



	Analisis de Doble Masa Estaciones Evaporación Mancotal - Mascota
MIKE 11	
Figura No. 14	

**ANALISIS DOBLE MASA
SANTA FE Y ANTIOQUIA**

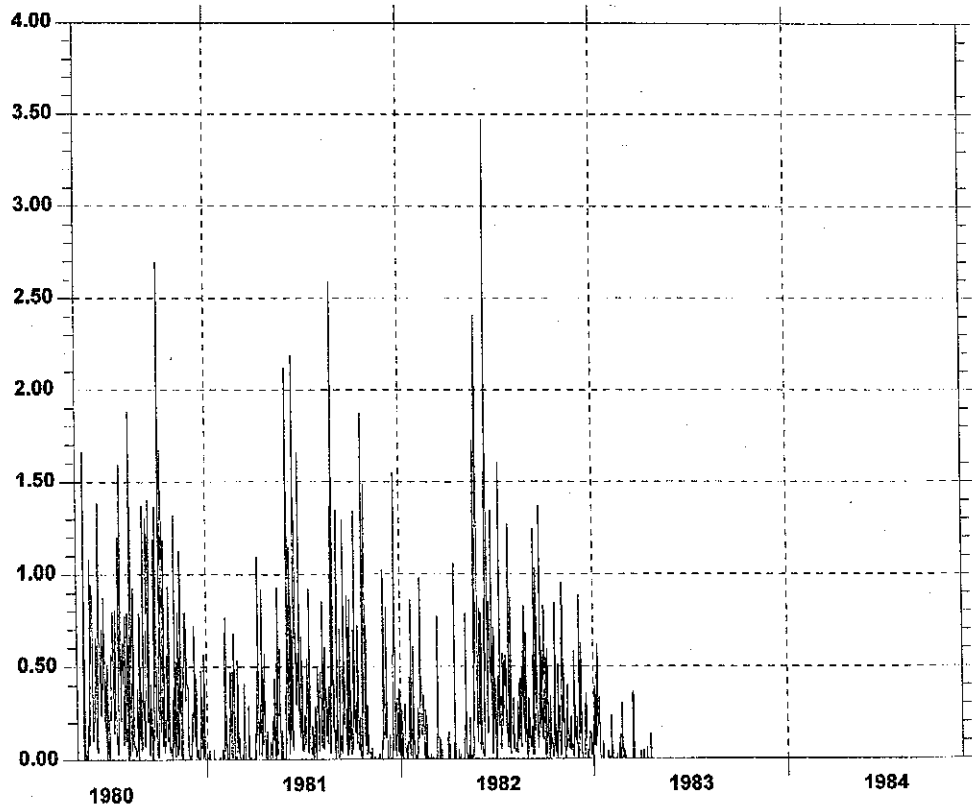


Curva Doble Masa
Estaciones Antioquia (mm) y Santa fe
Estudio Especial

MIKE 11

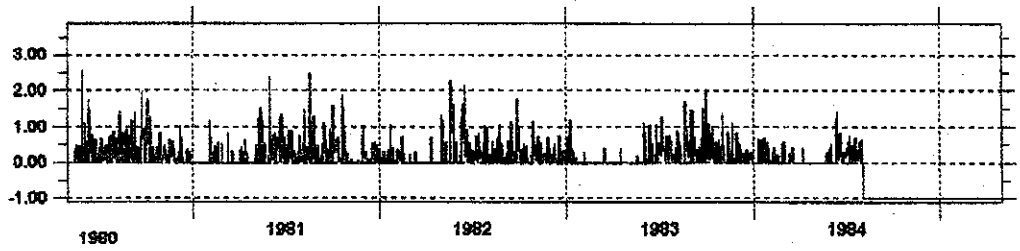
Figura No 15

ESTUD.ESPEC.
rainfall

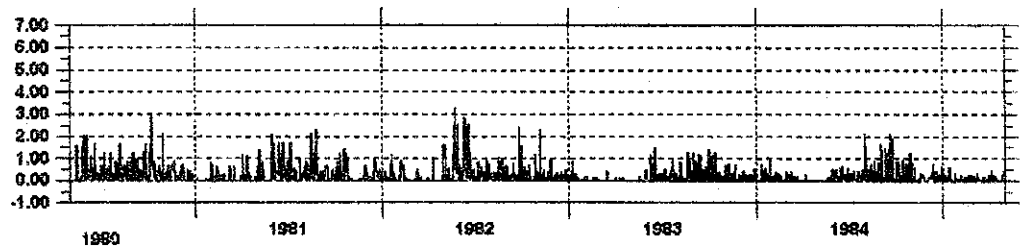


PRECIPITACION MEDIA DE LA CUENCA DEL RIO PANTASMA. NICARAGUA	
MIKE 11	
Figura No.16	

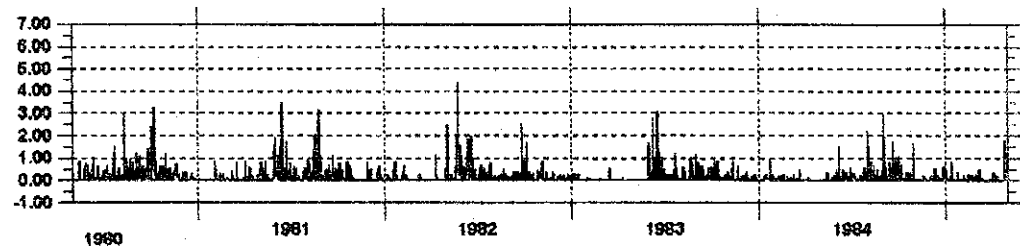
LA PORRA



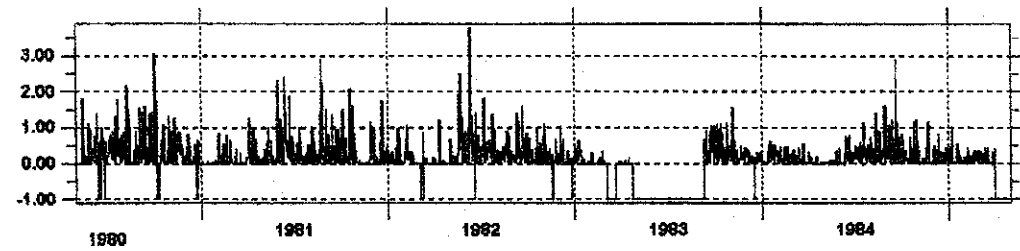
LOS HORCONES



SAN RAFAEL



SANTA FE

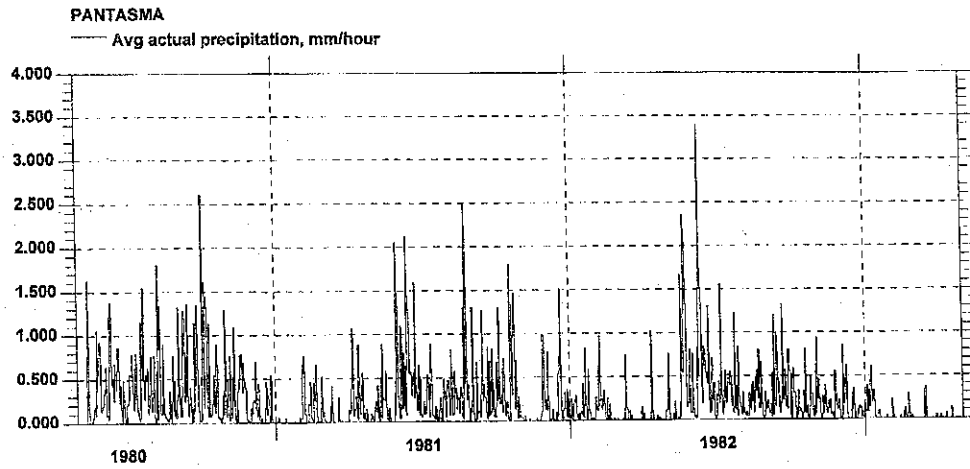
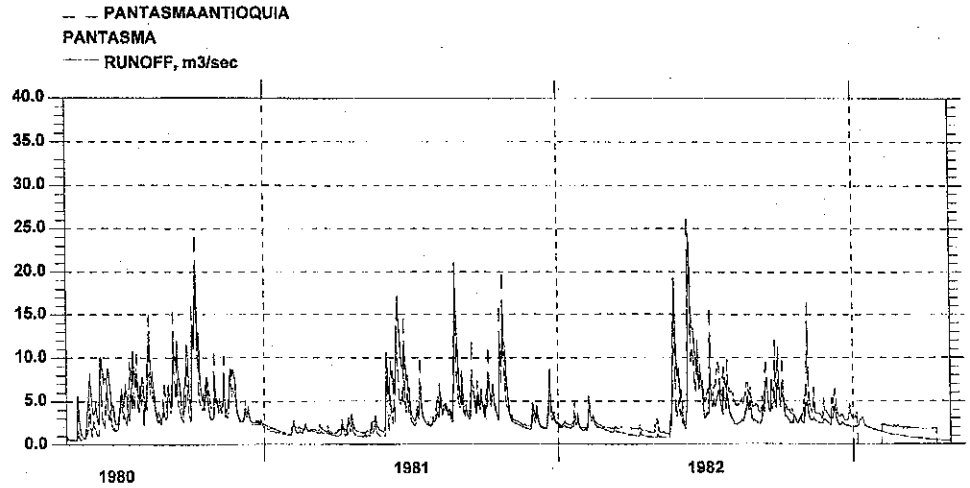


Registros de Precipitación
Estaciones de Santa Fe, San Rafael, La Porra y Los Horcones
Estudio Especial

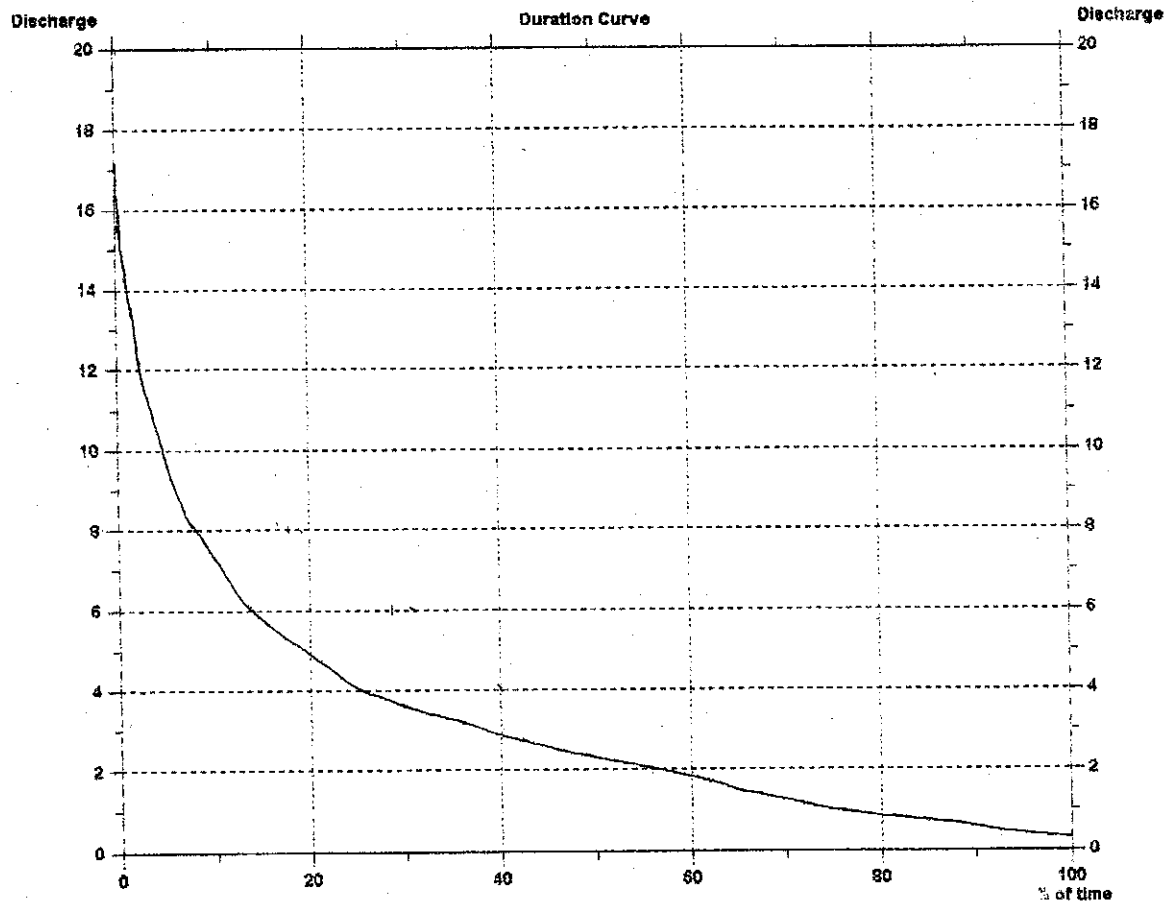
MIKE 11

Figura No 17

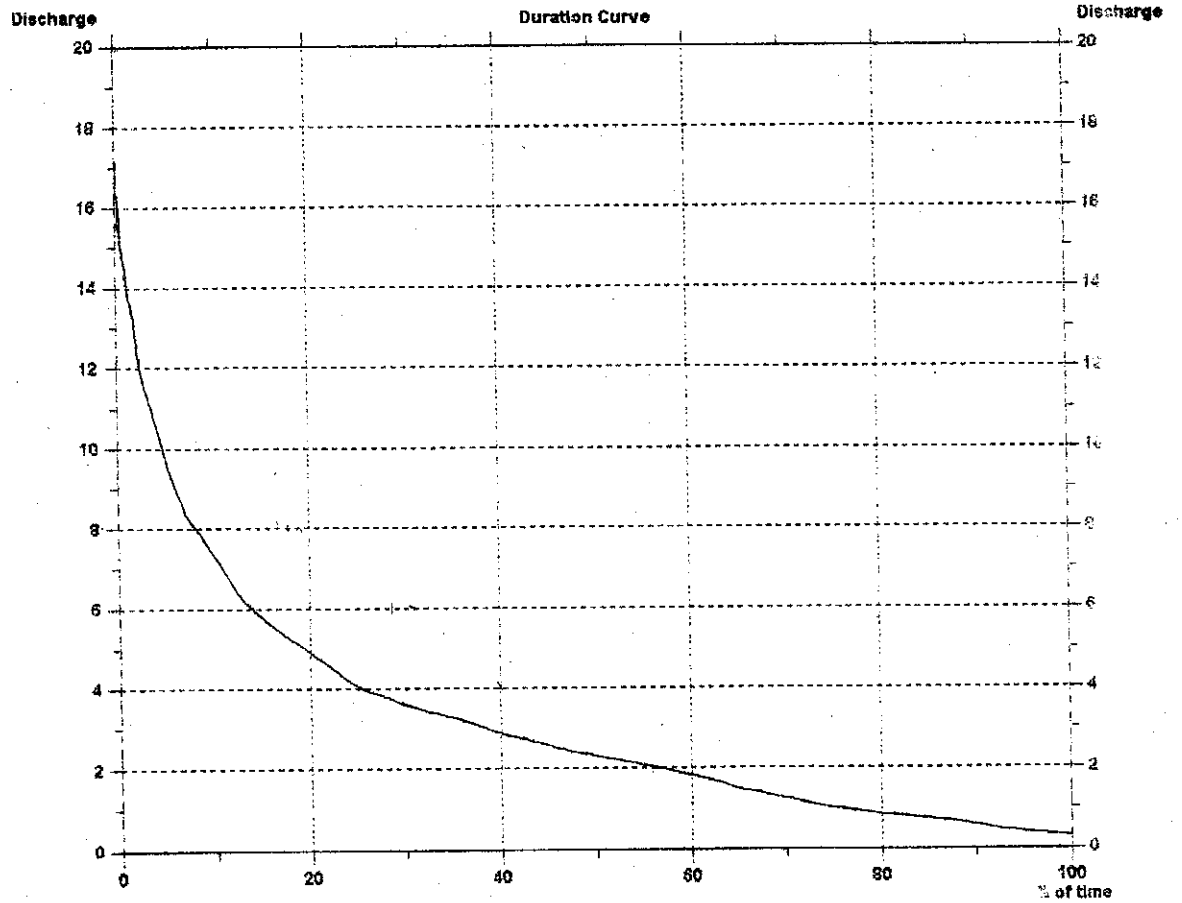
PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



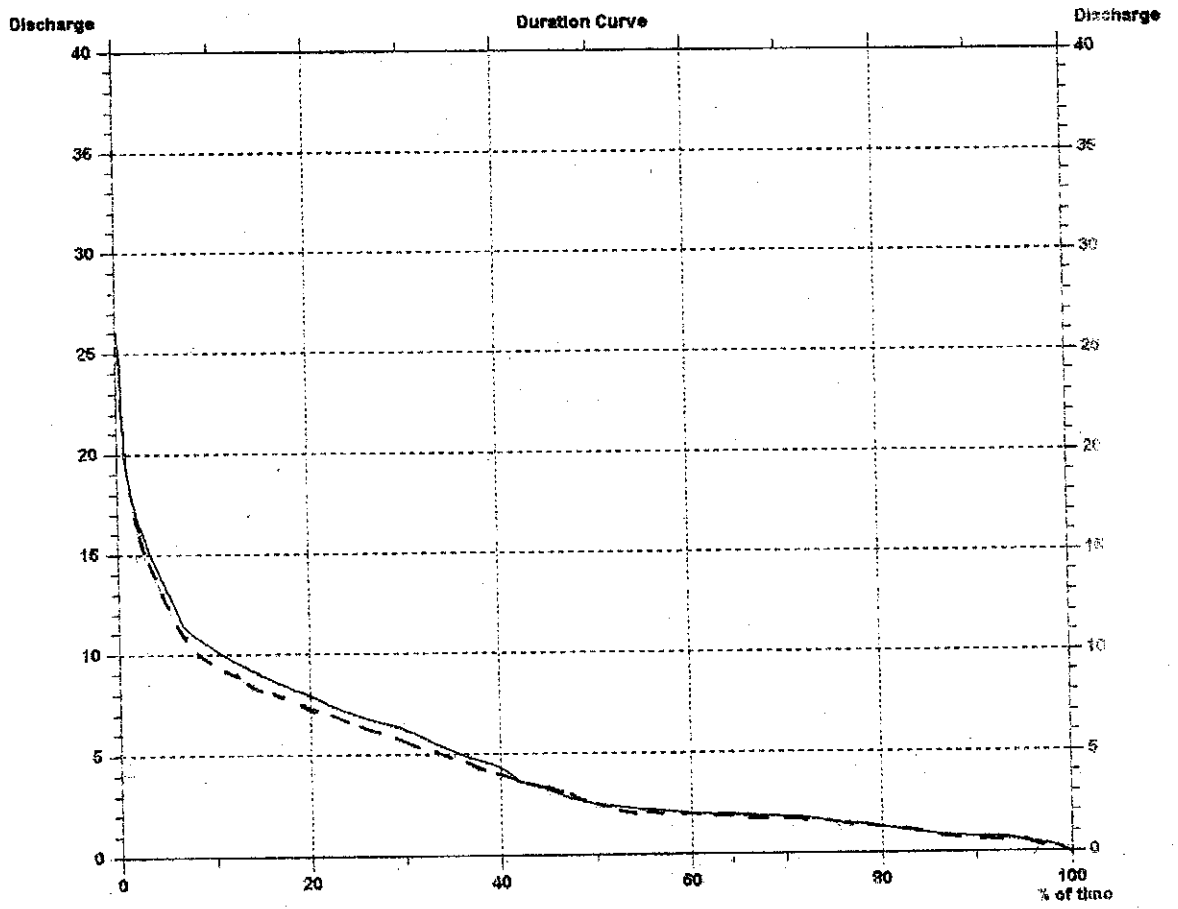
	Calibración Modelo HBV(Caudales históricos y simulados) Precipitación Media de la Cuenca Cuenca del Río Pantoasma	
	HBV Figura No.10	



	<p>Curva de Duración Estudio Especial</p>
	<p>MIKE 11 Gráfica No. 19</p>



	Curva de Duración Estudio Especial		MIKE 11
			Gráfica No. 19



--- Simulados

	<p>Curva de Duración Caudales Históricos y Simulados Estudio Especial</p>	
		<p>MIKE 11 Gráfica No 2.0</p>

APENDICE B
LISTA DE FOTOGRAFIAS

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
biblioteca Central



**CAIDA APROVECHABLE EN EL SITIO DE APROVECHAMIENTO
HIDROELECTRICO**



ESTACION HIDROMETRICA ANTIOQUIA EN PANTASMA