

REPÚBLICA DEL PARAGUAY



UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"

Autorizada a Funcionar por Decreto Nº 9.350. Persona Jurídica por Decreto Nº 11.079. Ley Nº 663 que Faculta a otorgar Títulos y Diplomas, Erigida Canónicamente por Decreto Nº 1.826, del 2-II-65 de la Sagrada Congregación de Seminarios y Estudios Universitarios

Campus Universitario de Asunción

Por cuanto *Rosa del Rocío Aseretto*

ha sido aprobado en todas las asignaturas de la carrera de

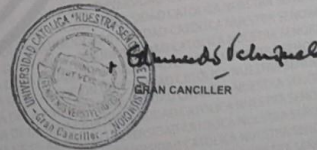
Ingeniería Ambiental en el año 2018 en la

Facultad de Ciencias y Tecnología

se le otorga el presente título que lo acredita como

Ingeniera Ambiental

Asunción, 15 de febrero de 2019



Datto
Egresado

B Nº 23493



B N° 23493

UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE ARCHIVO CENTRAL

La legalización del presente título corresponde a Rosa del Rocío Aseritto
 _____, inscripto en el Registro N° 55838 del Folio N° 50
 del Libro de Diplomas de Grados N° 7 de la Universidad Católica "Nuestra Señora de la
 Asunción".

Las firmas que anteceden son auténticas y corresponden a:

Gran Canciller: Mario Edmundo Velázquez M.
 Rector: Dr. Mg. José Guzmán Wickert M.
 Secretario General: Abog. Tulo G. Benítez C.

Asunción, 12 de marzo de 2019.
Abog. Gabriel Benítez C.
 Secretario General



Viceministerio de Educación Superior y Ciencias

MEC
MEC

B109831

El presente título de INGENIERÍA
 Corresponde a ASERITTO, ROSA DEL ROCÍO
 Cédula de Identidad N° 3646144
 Resolución VES N° 20562 de Fecha 06/03/2019

14198276417048704444903071150713110



Andrea
 Andrea Carolina Estigarribia
 Departamento de Registro de Títulos de
 Grado y Posgrado - DRT
 Viceministerio de Educación Superior y Ciencias

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIAS
 SECRETARÍA GENERAL
 DIRECCIÓN DE CERTIFICACIÓN ACADÉMICA
 DEPARTAMENTO DE LEGALIZACIONES

CERTIFICO QUE: La firma y sello que dice:
Andrea Estigarribia
 JES

Guarda similitud con la registrada en esta oficina
 NOTA: Esta legalización no juzga el contenido del presente documento

Asunción: 12 MAR 2019

REGISTRO MEC
 Lic. Pedro L. A. Palacios O.
 Jefe
 Departamento de Legalizaciones
 Dirección de Certificación Académica





Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”
Facultad de Ciencias y Tecnología
Ingeniería Ambiental

Tesis de Grado

**“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos:
Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de
pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”**

Alumna: Rosa Del Rocío Aseretto

Asesores: Ing. Roger Monte Domecq Serrati
Ing. Roberto Takahashi, M.S.

Asunción, Paraguay

2018

Resumen

Este trabajo forma parte del Proyecto CONACYT-UCA “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY” (14-INV-280), ejecutada por el Centro de Tecnología Apropiada (CTA) de la Universidad Católica de Asunción, cuyo objetivo es; establecer un sistema de pronóstico de niveles y caudales del Río Paraguay mediante la implementación de modelos: hidrológico en las cuencas interiores e hidráulico en el cauce del río Paraguay, calibrados y validados para el tramo de la cuenca media del Río Paraguay, en territorio Paraguayo.

El Modelo Hidrológico HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) fue seleccionado para modelar las cuencas de los ríos: Ypané y Jejuí, para generar hidrogramas aportantes al río Paraguay, con fines de una ulterior modelación hidrodinámica del río con fines de previsión de niveles y caudales para diferentes pronósticos de tiempo.

Se utilizó el modelo digital de elevación para la delimitación de las cuencas estudiadas con el apoyo de sistemas de información geográfica mediante QGIS; para el origen y composición de los suelos en las áreas estudiadas se utilizó la información generada por el PRUT, los datos hidroclimáticos de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) – DINAC y los datos hidrométricos de la ANNP.

Se trabajó con un modelo continuo, el SMA (soil Moisture Accounting model) o modelo de contabilidad de la humedad del suelo, que simula el comportamiento del río tanto en climas húmedo como en seco. Para la distribución de la lluvia se utilizó el método del inverso de las distancias, mientras que para la Evapotranspiración se calculó con el método de Penman-Monteith.

Teniendo en cuenta la escasez de datos en las cuencas estudiadas y que no se realizan mediciones diarias de niveles en la actualidad, se recurrió a los datos de niveles históricos de la ANNP, como también a métodos empíricos para obtener los caudales sintéticos y poder generar las curvas Altura- Caudal (HQ), que fueron utilizadas para calibrar los modelos.

Se realizó la calibración teniendo mejores resultados en épocas de crecida, la misma se realizó para la cuenca del Río Ypané desde el año 1974 hasta 1987 y para la cuenca del Río Jejuí se calibro desde el año 1978 hasta el año 1991.

Palabras claves: Modelo hidrológico, HEC-HMS, SMA, Cuenca del río Ypané, Cuenca del río Jejuí, Curva altura- caudal.

Abstract

This paper presents the implementation of the HEC-HMS Hydrological Model ("Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System") to the river basins: Ypané and Jejuí, to generate hydrographic flows to the Paraguay River, for the purpose of a further hydrodynamic modeling of the river for forecasting levels and flows for different hydroclimatic scenarios (forecasts).

The Digital Elevation Model was used for the delimitation of the basins studied with the support of geographic information systems based on QGis. For the origin and composition of the soils in the study areas, the information generated by the PRUT was used, the hydroclimatic data of the Direction of Meteorology and Hydrology (DMH) -DINAC and the hydrometric data of the ANNP.

Soil Moisture Accounting (SMA) was used as the main method to determine the infiltration rate in the soil, which is the main tool for making a continuous model. For the distribution of rain, the inverse of the distances was used, while for the Evapotranspiration it was calculated with the Penman-Monteith method.

Taking into account the scarcity of data in the basins studied, we used historical data, such as empirical methods to obtain synthetic flows and generate the height-flow (HQ) curves, which were used to calibrate the models.

Calibration was performed with better results in times of flood, it was performed for the Ypané River basin from 1974 to 1987 and for the Jejuí River basin it was calibrated from 1978 to 1991.

This work is part of the CONACYT-UCA Project "DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A PRONOSIS SYSTEM OF LEVELS AND FLOWS OF THE PARAGUAY RIVER" (14-INV-280), executed by the Center for Applied Technology (CTA) of the Catholic University of Asunción, whose objective is; establish a system for

forecasting the levels and flows of the Paraguay River through the implementation of hydrological models in the interior and hydraulic basins of the Paraguay River, calibrated and validated for the section of the middle basin of the Paraguay River, in the Paraguayan territory.

Keywords: Hydrological model, HEC-HMS, SMA, Ypané river basin, Jejuí river basin, Height-Flow curve

Dedicatoria.

Agradezco a Dios por guiarme siempre.

A mi madre por su apoyo incondicional y por su ayuda en todo lo que necesité.

A mis compañeros y amigos que acompañaron todo el proceso.

Agradecimientos

A mis asesores; al Ing. Roger Monte Domecq y al Ing. Roberto Takahashi, por la disponibilidad de tiempo, predisposición, incentivo y orientación en todo momento durante la realización de este trabajo

Al equipo del Proyecto “Desarrollo e implementación de un sistema de pronóstico de niveles y caudales del río Paraguay”; por brindarme la oportunidad de participar en él, y por facilitar los datos y recursos necesarios para la elaboración de este trabajo.

Al Ing. Alberto Grissetti y al Ing. Benito Pereira por los materiales ofrecidos que contribuyeron en la investigación.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	VI
Agradecimientos	VII
Índice de tablas	XI
Índice de Figuras.....	XII
SIGLAS	XIV
Capítulo 1-Presentación.....	17
1.1. Introducción	17
1.2. El Problema a Investigar.....	19
1.3. Justificación del Problema a Investigar.	22
1.4 Objetivos.....	23
1.4.1. Objetivo general.....	23
1.4.2. Objetivos específicos	23
1.5 Área de Estudio.....	24
1.5.1. Cuenca del río Ypané:.....	24
1.5.2. Cuenca del Río Jejuí:	25
1.5.3. Uso del agua.....	28
CAPITULO 2 – MARCO TEORICO.....	Error! Bookmark not defined.
2.1 Ciclo Hidrológico.	31
2.2. Concepto de Cuenca.	32
2.2.1 Caracterización Fisiográfica de Cuencas Hidrográficas.....	33
2.3 Modelación Hidrológica.	34
2.3.1 Clasificación de los Modelos Hidrológicos.	34
2.4 Modelo hidrológico HMS –Hidrologic Model System	35
2.4.1 HMS como modelo continuo	38
CAPITULO 3: MATERIALES Y METODOS.....	40
3.1 Herramientas y datos utilizados.....	40
3.1.2 Datos Espaciales.	40
3.1.3 Datos de Series de Tiempo.	41
3.1.4 Datos de estudio de suelo.....	44
3.2 Descripción de los métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS.	45
3.2.1 Cálculos realizados por el SMA.	48

3.2.2 Cálculo del Caudal Base	49
3.2.3 Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark.	49
3.2.4 Cálculo de Tránsito de Hidrograma.....	53
3.3 Distribución de la Precipitación.....	54
3.4. Estimación de caudales sintéticos.....	55
3.4.1 Hidrogramas sintéticos	56
3. 5 Evapotranspiración.	56
3.6. Caracterización de la cuenca.....	57
3.6.1 Área del Proyecto.....	57
3.6.2 Topografía.....	59
3.6.3 Tipo y Uso de Suelo.....	61
3.6.4 División en subcuencas.....	65
3.6.5 Modelo conceptual del sistema en HEC-HMS.	66
3.7. Estimación de parámetros.	68
3.7.1 Parámetros del Soil Moisture Accounting.	69
3.7.1.1 Retenciones por la vegetación	69
3.7.1.2 Retenciones de superficie	70
3.7.1.3 Capas Superficiales del SMA	71
3.7.1.4 Capas Subterráneas del SMA.	74
3.7.1.5 Promedio Mensual de Evapotranspiración:	75
3.7.1.6 Parámetros del Hidrograma Unitario de Clark.	76
3.7.1.7 Parámetros del Reservorio Lineal.....	78
3.7.1.8 Parámetros del modelo Muskingum Cunge (8 puntos).	78
3.8. Distribución de la Precipitación.....	80
3.9. Estimación de caudales sintéticos.....	82
3.10. Evaluación de los parámetros estimados.	84
3.11. Calibración del modelo.....	87
3.11.1 Análisis de cada subcuenca.....	90
3.11.2 Primera Etapa de Calibración.	95
3.11.4 Optimización Automática	97
CAPÍTULO 4 – PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
4.1 Resultados de la calibración	99
4.2 Parámetros ajustados.....	102
CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	111

5.1 Conclusiones.....	111
5.2 Recomendaciones.....	112
CAPITULO 6 - ANEXOS	113
6.1. Valores calculados para las Retenciones por la vegetación (Canopy).....	115
6.2. Valores estimados para las retenciones de superficie:.....	116
6.3 Valores estimados para los parámetros de las capas superficiales.	118
6.4 Valores estimados para las capas subterráneas:.....	122
6.5 Método área pendiente.....	124
6.6. Evapotranspiración	130
6.7. Parámetros del Muskingum Cunge (8 puntos).	134
7. BIBLIOGRAFÍA	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla: 1. Estaciones Meteorológicas utilizadas. Fuente: Dirección de Meteorología e Hidrología.	43
Tabla: 2 . Coeficiente corrector de la fórmula de Kirpich.	51
Tabla: 3. Características del suelo de la cuenca del río Ypané. Fuente: PRUT.....	63
Tabla: 4. Características del suelo de la cuenca del rio Jejuí. Fuente: PRUT.	64
Tabla: 5. Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal.....	69
(Almacenamiento e intercepción). Fuente: Vélez et al, 2009.....	69
Tabla: 6. Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal(almacenamiento e intercepción). Fuente: Vélez et al, 2009.	69
Tabla 7: criterio de estimación de máxima infiltración según textura y pendiente del suelo.	71
Tabla: 8. Texturas de suelos. Fuente: PRUT.	71
Tabla 9: Textura de suelos. Fuente: PRUT.....	73
Tabla: 10. Promedio mensual deEvapotranspiración. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla: 11. Estimación de Tiempo de concentración.....	77
Tabla: 12. Estimación del Tiempo de Concentración.....	78
Tabla: 14. Parámetros solicitados del método Muskingum-Cunge.	79
Tabla: 15. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación 6. Fuente: Chow, 1959.....	80
Tabla: 16. Centroides para cada subcuencas. Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla: 17. Centroides para cada subcuencas. Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla: 19. Textura por subcuenca del Río Ypané.....	91
Tabla: 20. Textura por subcuenca del Río Jejuí.	92
Tabla: 21. Parámetros sensibles del modelo.....	97
Tabla: 22. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané.....	102
Tabla: 23. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané.....	102
Tabla: 24. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané.....	103
Tabla: 25. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané.....	104
Tabla: 26. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí.....	104
Tabla: 27. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí.....	105
Tabla: 28. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí.	106
Tabla: 29. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura: 1. Delimitación de las cuencas de los Ríos Ypané y Jejuí. Fuente: Elaboración Propia.....	17
Figura: 2. Evolución espacial y temporal del bosque Atlántico en la región Oriental (Últimos 60 años). Fuente: MAG-GTZ	18
Figura: 3. Cuenca del Río Paraguay.	20
Figura: 4. Cuencas de los afluentes modelados (ríos Ápa, Aquidabán, Ypané, Aguaray-Guazú y Jejuí). Fuente: Proyecto CMMAH, MOPC	21
Figura: 6. Cuenca del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia en QGis.	26
Figura: 7. Mapa de origen de suelos de la cuenca del Río Jejuí. Fuente: Atlas de Potencial Hidroenergético del Paraguay, Itaipu.2011	28
Figura: 8. Extracciones de agua por sector, total 2.413 millones de m ³ en el año 2012. Fuente: FAO.	29
Figura: 9. Extracciones de agua por origen, total 2.413 millones de m ³ en 2012. Fuente: FAO	30
Figura: 10. Fuente de agua en superficie equipada para el riego. Fuente: FAO.....	30
Figura: 11. Ciclo Hidrológico. Fuente: XXIII Congreso Nacional del Agua- Resistencia, Argentina.	31
Figura: 12 Separación de la precipitación efectiva. Fuente: Manual HEC-HMS.	36
Figura: 13. Transformación de la Precipitación Efectiva en Escorrentía Directa. Fuente: Manual HEC-HMS	37
.....	37
Figura: 14. Suma del Caudal Base a la Escorrentía Directa. Fuente: Manual HEC-HMS.	37
Figura: 15. Tránsito de hidrograma. Fuente: Manual HEC-HMS.....	38
Figura: 16. Esquema conceptual del modelo. Fuente: XXIII Congreso Nacional del Agua- Resistencia, Argentina.	39
Figura: 18. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Ypané. Fuente: DMH	41
Figura: 19. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Jejuí. Fuente: DMH	42
Figura: 22. Mapas de suelos. Fuente: PRUT.	45
Figura: 23. Esquema del Modelo Soil Moisture Accounting. Fuente: User's Manual	46
Figura: 24. HU Clark para distintos valores de K (ASCE, 1997). Fuente: Fattorelli & Fernández.	52
Figura: 25. Sección transversal de 8 puntos. Fuente: Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS.	54
Figura: 27. Delimitación de la cuenca del río Ypané. Fuente: elaboración propia.	59
Figura: 28. Pendiente en ArcGis. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura: 29. Pendiente en QGis. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura: 31. Mapa taxonómico de la cuenca del Río Jejuí. Fuente: Atlas de Potencial Hidroenergético del Paraguay. Itaipu.2011	64
Figura: 32. División en subcuencas. Fuente: Elaboración propia	65
Figura: 33. División en subcuencas. Fuente: elaboración propia.	66
Figura: 34. Modelo conceptual de la Cuenca del río Ypané en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.....	67

Figura: 35. Modelo conceptual de la Cuenca del río Jejuí en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura: 36: Trayectoria del flujo más largo. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura: 37. Área trapezoidal del canal.	83
Figura: 38. Simulación de la cuenca del Río Ypané, periodo 1976-1984.	85
Figura: 40. Caudales generados por el método área pendiente. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura: 41. Caudales generados por el método área pendiente. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura: 42. Hidrograma de la Subcuenca W100- textura Arenosa/ Franco Arenosa.	93
Figura: 43. Hidrograma de la subcuenca W160.	93
Figura: 44. Hidrograma de la subcuenca W1020	94
Figura: 46. Simulación de la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura: 47. Simulación de la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura: 48. Simulación de la cuenca del Río Ypané, luego de calibrar.	99
Figura: 49. Coeficiente Nash (R^2) para los caudales simulados-observados Río Ypané. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura: 50. Simulación río Jejuí luego de calibrar el modelo.	101
Figura: 51. Coeficiente Nash (R^2) de los caudales simulados-observados del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura: 52. División en subcuencas del Proyecto 14-INV- 280. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura: 53. Hidrogramas de salida de las cuencas modeladas en el proyecto.	108
Figura: 54. Comparación de los hidrogramas en DSS obtenidos en la cuenca del Río Ypané.	109
Figura: 55. Porcentaje de arcilla para una subcuenca del río Jejuí. Fuente: SoilGrids ...	122
Figura: 56. Ubicación de la estación hidrométrica Belén. Fuente: Google Earth.	126
Figura: 57. Ubicación de la estación hidrométrica Ruta 3. Fuente: Google Earth.	129

SIGLAS

DSS: Data Storage System (Sistema de Almacenamiento de Datos).

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de Alimentos y Agricultura).

HEC: Hydrologic Engineering Center (Centro de Ingeniería Hidrológica).

HMS: Hydrologic Modeling System (Sistema de Modelación Hidrológica).

Hr: horas.

km: kilómetros

m: metros.

m³/s: metros cúbicos por segundo.

m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar.

mm: milímetros.

PRUT: Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra.

R: Coeficiente de Almacenamiento (HU Clark).

R²: Coeficiente de Determinación.

SEAM: Secretaria de Ambiente.

SMA: Soil Moisture Accounting (Contabilidad de la Humedad del Suelo).

SWC: Soil Water Characteristics.

ANNP: Administración Nacional de Navegación y Puertos

Tc: Tiempo de concentración.

CC: Capacidad de campo.

S: saturación

PM: Punto de marchitamiento

AS: Almacenamiento del suelo

AT: Almacenamiento de tensión

CH: Conductividad hidráulica

MO: Materia orgánica

S: Sub cuenca.

Capítulo 1-Presentación.

1.1. Introducción

El Paraguay es un país con una enorme riqueza hídrica, tanto en aguas superficiales como en subterráneas, con un magnifico régimen pluvial, con condiciones climáticas muy propicias y con apreciable potencial de desarrollo por su disponibilidad de recursos naturales. La región paraguaya más afortunada en términos hídricos es el oriente, comprendido entre los ríos Paraná al oriente y el Paraguay al occidente, puesto que coinciden láminas considerables de lluvia anual, con abundancia de aguas superficiales (Crespo et al., 2000).

Dos de los principales afluentes del Río Paraguay, en su tramo medio, son estudiados y modelados hidrológicamente; la cuenca del Río Ypané y la cuenca del Río Jejuí Guazú. El área de la cuenca del río Ypané es de 10.266 km² y el río Jejuí cuenta con un área de 22.719 km²; el aporte de caudales de las cuencas estudiadas, entre Concepción y Asunción es del 20% del total, por lo que se considera de gran importancia el comportamiento de hidrológico de las mismas para el desarrollo de un sistema de pronóstico.

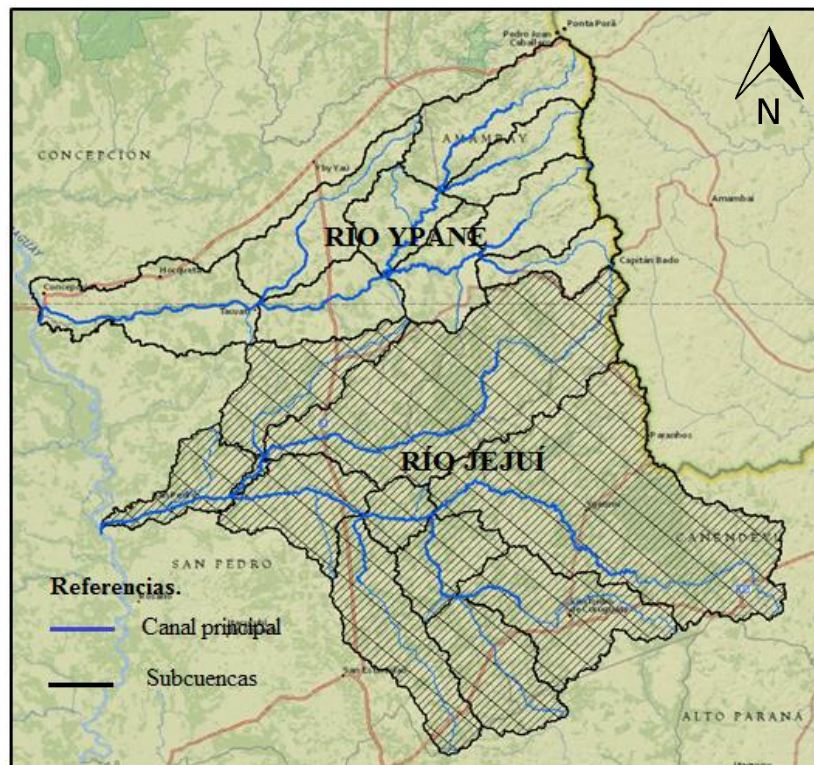


Figura: 1. Delimitación de las cuencas de los Ríos Ypané y Jejuí. **Fuente:** Elaboración Propia

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Las cuencas estudiadas se vieron afectadas por la deforestación, teniendo en cuenta las imágenes satelitales desde los años 1974 hasta la actualidad, y que el uso predominante del suelo es la agricultura, lo que favorece a la escorrentía superficial en días de lluvia intensa, al tener poca intercepción de la precipitación en los bosques remanentes.

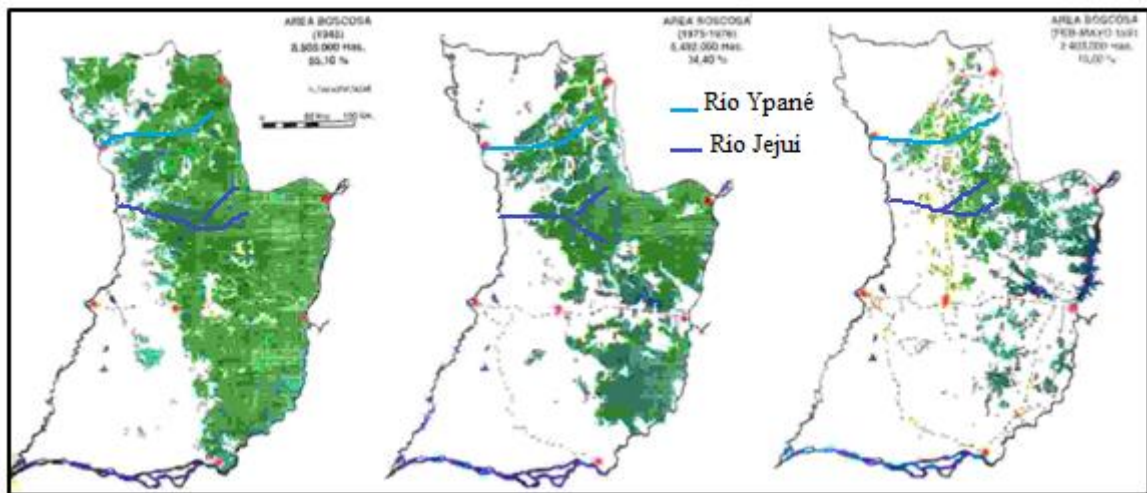


Figura: 2. Evolución espacial y temporal del bosque Atlántico en la región Oriental (Últimos 60 años).

Fuente: MAG-GTZ

La modelación hidrológica busca representar matemáticamente los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos, transformando la precipitación en caudal. Para ello son necesarios los datos meteorológicos y climatológicos, las características físicas y topográficas de la zona, así como, hidrológicos. Se realizará la simulación y calibración buscando el ajuste con la realidad (Collischonn y Tucci, 2001).

Para la implementación del modelo hidrológico de simulación continua, se seleccionó el programa HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”). El sistema de modelado hidrológico está diseñado para simular los procesos de precipitación y escorrentía de las cuencas de drenaje dendríticas. Está diseñado para ser aplicado en una amplia gama de áreas geográficas para resolver la mayor cantidad posible de problemas.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Dentro del programa HEC-HMS existen diferentes métodos para representar la pérdida de agua por medio de la infiltración dentro del área de una subcuenca. Entre ellos se encuentran Deficit and constant loss, Exponential loss, Green and Ampt loss, Gridded déficit constant loss, entre otros, y el Soil Moisture Accounting (SMA), que es utilizado en el presente estudio.

Este trabajo forma parte del Proyecto CONACYT-UCA “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY” (14-INV-280), ejecutada por el Centro de Tecnología Aplicada (CTA) de la Universidad Católica de Asunción, con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología CONACYT.

1.2. El Problema a Investigar

En el área de los recursos hídricos, se puede notar la falta de información actualizada, sobre los niveles y caudales de los principales afluentes del Río Paraguay, que a su vez podrían utilizarse para generar pronósticos de crecidas e inundaciones que eventualmente puedan ocurrir, como también un sistema de alerta temprana en base a los datos obtenidos. En este caso se seleccionaron dos de los principales cauces afluentes al Río Paraguay en su margen izquierda localizados al norte de Asunción: los ríos Ypané y Jejuí, localizados en la zona norte de la región oriental y en la zona media de la cuenca del Río Paraguay.

De acuerdo a varios estudios realizados en el Río Paraguay, las lluvias que ocurren en su cuenca media generan caudales por encima de los niveles normales en la zona al sur de Asunción y por tanto es necesario caracterizar la respuesta de las sub cuencas que drenan al Río Paraguay en su tramo medio, los cuales contribuyen al regimen generado por las lluvias estacionales del Pantanal.

La cuenca media del Río Paraguay, comprendido entre la confluencia del río Apa e Itá Pyta Punta en las cercanías de Asunción, el Río Paraguay, caracterizado por una pendiente de 6 cm/km, los principales tributarios son los ríos Aquidaban, Ypané y Jejuy que proveen cerca del 20 % de la descarga de caudal total del Río Paraguay en este tramo y que juegan un papel

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

importante en la regulación del nivel de agua (ya sea “compensando” o “adicionándose” a los picos provenientes del Alto Río Paraguay.

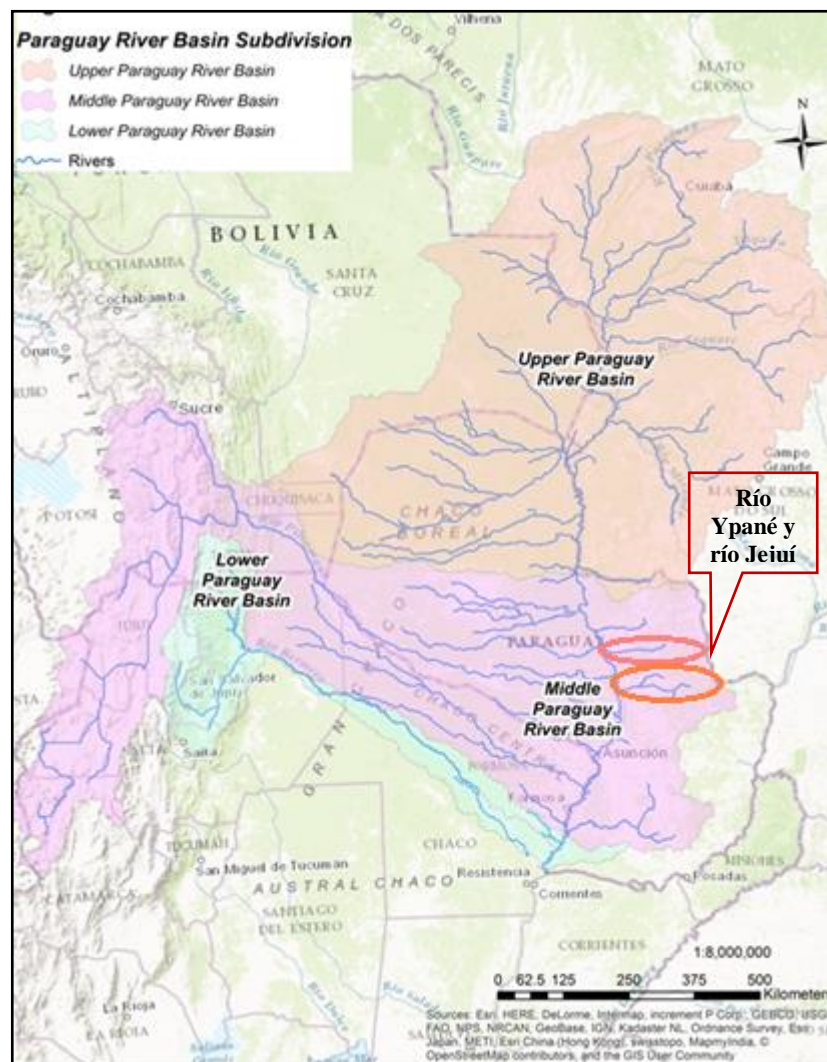


Figura: 3. Cuenca del Río Paraguay.

Como antecedentes de estudios anteriores se puede mencionar al proyecto Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico (CMMAH) desarrollado por la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) para el MOPC de Paraguay, con el apoyo del Gobierno de Francia. En dicho proyecto se instalaron estaciones remotas de medición hidrometeorológicas en varias sub cuencas del Río Paraguay, figura 3 y se efectuó una modelación hidrológica de

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

las sub cuencas para un sistema de predicción hidrológica a través de un modelado hidrodinámico del Río Paraguay. A partir del conocimiento del caudal del río, el modelo permite calcular el nivel de este río en toda su largura.



Figura: 4. Cuencas de los afluentes modelados (ríos Ápa, Aquidabán, Ypané, Aguaray-Guazú y Jejuí).
Fuente: Proyecto CMAAH, MOPC

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1.3. Justificación del Problema a Investigar.

A fin de poder proveer datos de entrada a un modelo hidráulico del río Paraguay, se hace necesario conocer los aportes laterales en su cuenca media, coincidente con la región oriental de Paraguay. A ese efecto se procede a caracterizar y modelar hidrológicamente dos de las sub cuencas de la margen izquierda del Río Paraguay en territorio nacional, seleccionándose en este estudio a las cuencas de los ríos Ypané y Jejuí. (Proyecto Conacyt-UCA-14-INV-280)

Se cuenta con la referencia que en las cuencas de los ríos Paraguay y Paraná se observaron grandes variaciones de caudal después del año 1970, esto puede ser consecuencia de las modificaciones antrópicas ocurridas dentro de toda esa área a lo largo de los años. (Müller, 1998 y Galdino, 1997).

De acuerdo a la bibliografía consultada, los modelos hidrológicos permiten prever con varios días de anticipación el caudal de los afluentes principales del Río Paraguay (Ríos Ypané y Jejuí), conociendo los datos de nivel y de lluvia en tiempo real. Como ya se indicó, existen antecedentes de la Cooperación Francesa, que conectado a una red de medidas de nivel de agua y de precipitaciones en las cuencas; y asociado a los modelos hidrológicos de los afluentes principales, el modelo podrá ser utilizado en tiempo real para anticipar las variaciones de nivel del río en sus distintos tramos. (Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay, 2005).

Existiendo la necesidad de implementación de políticas sustentables para el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos (Ley 3239/1997), los estudios hidrológicos sobre estas cuencas, son importantes para conocer su comportamiento en cuanto a la variabilidad de caudales en función a los periodos secos y húmedos; Conocer su verdadera disponibilidad en el tiempo para diversos usos (Balances Hídricos, ley 3239/2007), su utilización, aprovechamiento y protección de las fuentes de agua, atendiendo a la complejidad de las cuencas seleccionadas. Actualmente en una de ellas, la ANDE está licitando la construcción

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

de una pequeña Central Hidroeléctrica, sobre el río Ypané, aproximadamente a unos 24 Km aguas arriba de su desembocadura en el Río Paraguay, ubicada en la ciudad de Belén, del Departamento de Concepción, la misma tendrá una capacidad de potencia instalada de 12MW a 18 MW, que será construida con inversión privada con la fiscalización de la ANDE. (PR/OCI/198/17-08-2016). Teniendo en cuenta que el sector eléctrico es de suma importancia en el desarrollo del Paraguay, con una previsión crecimiento de la demanda de 9,5% en los próximos 4 años. Según estudios realizados por la ANDE y la UNIFEI (Universidad Federal de Itajubá), la demanda es en torno a los 2500 MW en el año 2013, representa un 20% de la oferta de energía eléctrica producida actualmente en el país.

Este trabajo es una investigación del tipo exploratorio, con un enfoque cualitativo y cuantitativo.

La investigación contribuyó al Proyecto UCA-CONACYT “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY”. (14-INV-280), ya que la modelación de estas cuencas se utilizarán para obtener los hidrogramas en la confluencia con el Río Paraguay para vincular con la modelación hidrodinámica del Río Paraguay.

1.4 Objetivos**1.4.1. Objetivo general.**

Implementación del modelo hidrológico en las cuencas, para la obtención de hidrogramas a ser utilizados en un modelo hidrodinámico del Río Paraguay, de forma semioperativa para la realización de pronósticos hidrológicos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterización física de las cuencas de los ríos Ypané y Jejuí
- Análisis de datos de entrada para la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.
- Simular y calibrar el modelo hidrológico HEC-HMS.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1.5 Área de Estudio

1.5.1. Cuenca del río Ypané:

Se extiende de este a oeste en la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil (la cordillera de Amambay como límite natural), al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Aquidabán y al sur con la cuenca del Río Jejuí Guazú.

Abarca en parte a los departamentos de Concepción, San Pedro y Amambay.

La **superficie** de su cuenca es de 10.266 Km² y la **longitud** del curso principal es de 282 km. aproximadamente, desembocando en la margen izquierda del río Paraguay a la altura del km. 692 contando desde la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná y a unos 8 km. aguas abajo del Puerto de Concepción.

Entre los numerosos afluentes del río Ypané se citan como principales el río Ypané-mi de 60 km. de longitud, el Guazú cuyo curso tiene una extensión de 72 km. y el Cagatá de 84 km.

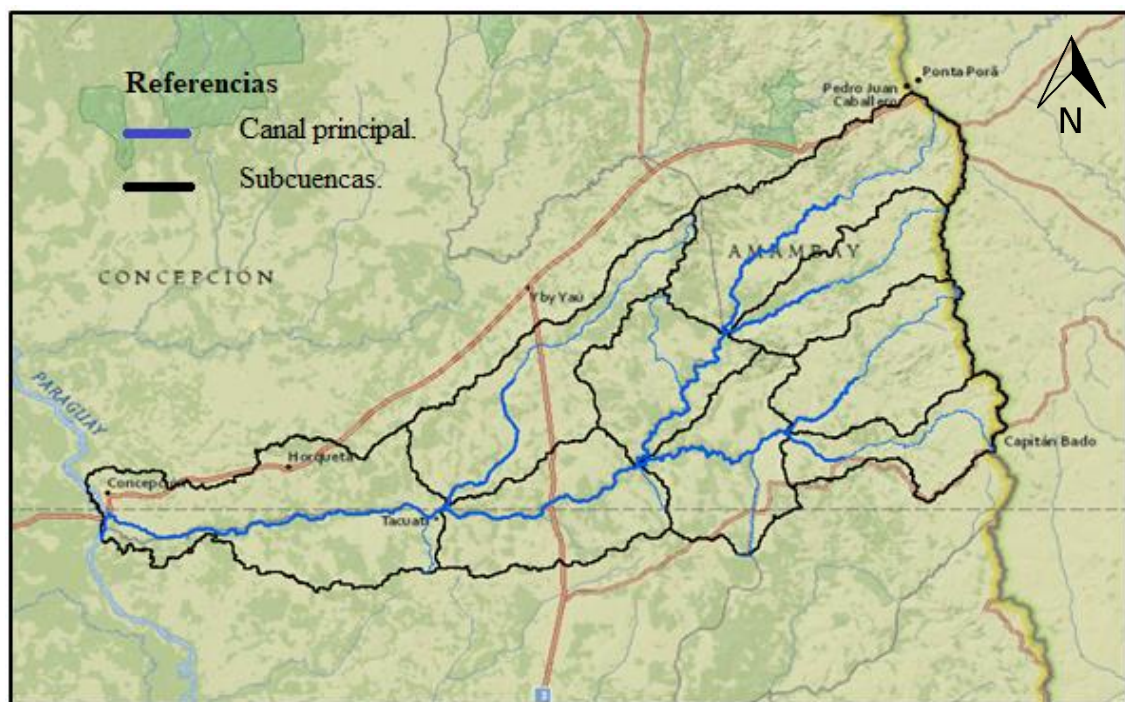


Figura: 5. Cuenca del Río Ypané. **Fuente:** Elaboración propia con QGIS.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

El **clima** regional de la cuenca puede clasificarse como tropical. En general, las temperaturas son elevadas en la mayor parte del año y las precipitaciones son más frecuentes en épocas de verano. Según la DMH.

El **viento** predominante de la cuenca es el norte que proviene del Brasil, es cálido y húmedo y generalmente anticipa lluvias, según la DMH.

La **evapotranspiración** media está en el rango de 1.301-1.450mm/año., según el estudio del Inventario de los Recursos Hydroenergéticos de las Cuencas Hydrográficas de los Ríos Afluentes del Paraguay y del Paraná de la Región oriental del Paraguay realizado en el marco del convenio N° 4500020686/2011, refrendado por Itaipu Binacional y la Fundación Parque Tecnológico Itaipu-Paraguay.

Geológicamente la cuenca se desarrolla sobre la Formación Misiones, que se compone de rocas sedimentarias del tipo areniscas arcillosas rojas, con granulometría media a gruesa, porosidad y permeabilidad media a alta, con estratificación entrecruzada. La Formación Coronel Oviedo, que está constituida por diamictitas, lutitas y areniscas. En menor proporción sobre la Suite Magmática Alto Paraná, donde abundan los derrames de lava basáltica de edad cretácica y sobre sedimentos cuaternarios, constituidos por areniscas, de graduación media a gruesa con gravillas dispersas, intercaladas con lutitas; existen también capas de areniscas arcillosas.(Manual de Geología del Paraguay, 2006)

Con respecto a la **biodiversidad** de la cuenca la misma se encuentra dentro de las eco regiones Selva Central y Litoral Central; la topografía varía desde ondulada hasta muy accidentada. Se observan las siguientes comunidades naturales: lagos, lagunas, esteros, bosques en suelos saturados, ríos, arroyos, nacientes de aguas, saltos, bosques altos, medios, cerrados, sábanas, roquedales y acantilados. Con respecto a la fauna de la zona, muchas especies ya están extinguidas y otras corren riesgo de extinción.

1.5.2. Cuenca del Río Jejuí:

Se extiende de este a oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Ypané y

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

al sur con la cuenca del Río Manduvirá. El Río Jejuí Guazú desemboca en el río Paraguay hacia su margen izquierda en el km. 571 contando a partir de la confluencia de los ríos Paraguay-Paraná, a unos 34 km. aguas arriba de Puerto Rosario.

La **superficie** de la cuenca del Río Jejuí Guazú es de aproximadamente 22.719 km² (equivale al 14,2 % de la Región Oriental y al 5,6 % del país).

La **longitud** de su curso tiene una extensión aproximada de 263 km. y está alimentado por dos grandes afluentes en su margen derecha: río Jejuí-mí y el río Aguararay-Guazú. A su vez cada uno de estos afluentes recibe las aguas de numerosos riachos y arroyos.

Los afluentes más importantes en su margen izquierda son: río Curuguaty arroyo Capiibary.

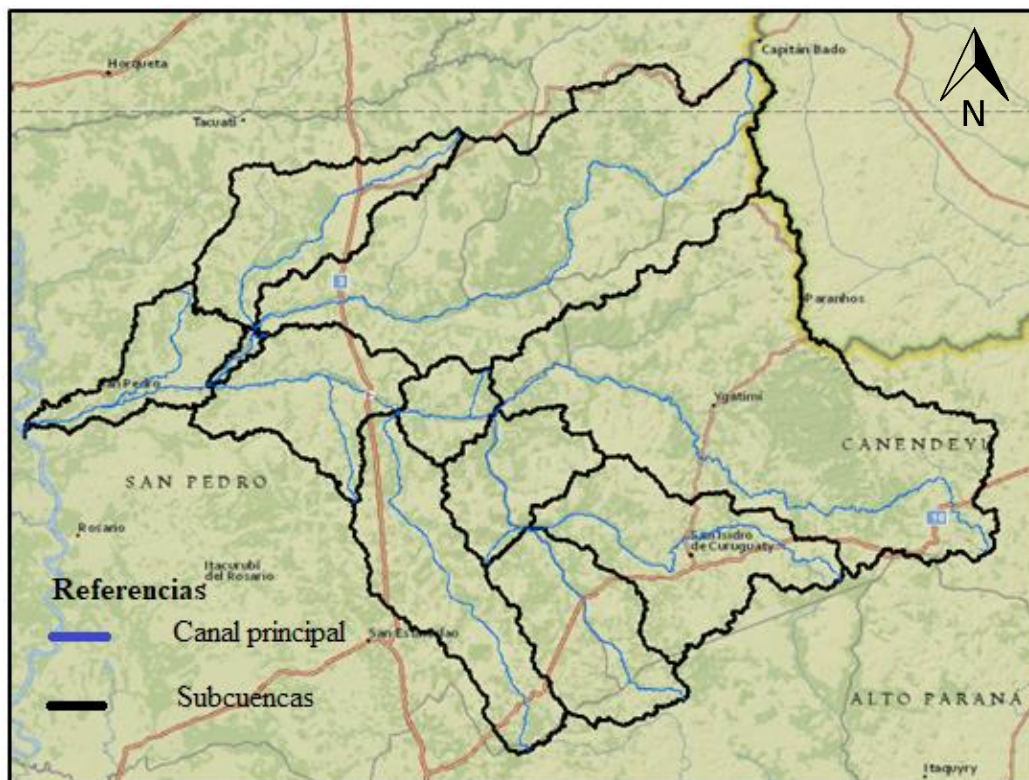


Figura: 6. Cuenca del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia en QGIS.

El **clima** regional corresponde al clima tropical cálido.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

La **evapotranspiración** media en la cuenca se encuentra dentro del rango 1.156-1.350 mm/año, según el estudio del Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las Cuencas Hidrográficas de los Ríos Afluentes del Paraguay y del Paraná de la Región oriental del Paraguay realizado en el marco del convenio N° 4500020686/2011, refrendado por Itaipu Binacional y la Fundación Parque Tecnológico Itaipu-Paraguay.

En cuanto a la **producción mineral** de acuerdo a informes del Vice Ministerio de Minas y Energías en la zona se explota la arcilla para su posterior industrialización, como así también basaltos, areniscas y cuarcita en la zona de Canindeyú. En la zona alta de la cuenca (Amambay) existen indicios de la presencia de oro, hierro y manganeso.

Geológicamente la cuenca se desarrolla sobre la Formación Misiones, que se compone de rocas sedimentarias del tipo areniscas arcillosas rojas, con granulometría media a gruesa, porosidad y permeabilidad media a alta, con estratificación entrecruzada. También se encuentra sobre el Grupo Independencia, que está constituido por una sucesión de siltitas, lutitas, arenisca de grano fino y calcáreo; en las cercanías de San Estanislao afloran capas de areniscas de granulometría media, intercalada con lutitas. En menor porcentaje se presentan sedimentos cuaternarios, constituidos por areniscas, de graduación media a gruesa con gravillas dispersas, intercaladas con lutitas; existen también capas de areniscas arcillosas. (Manual de Geología del Paraguay, 2006)

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

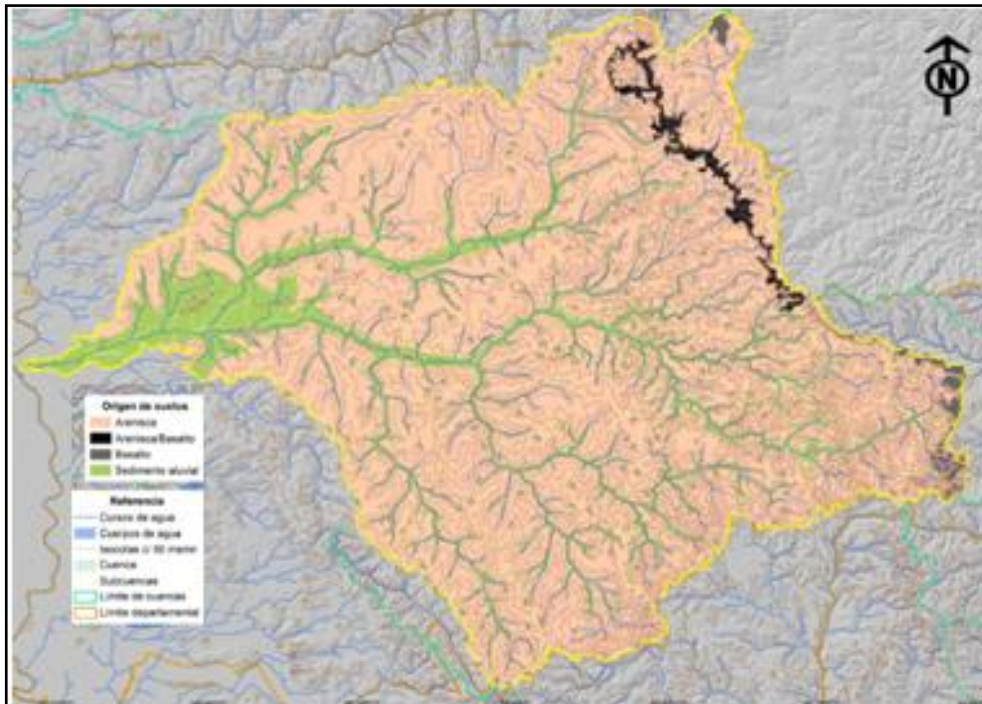


Figura: 7. Mapa de origen de suelos de la cuenca del Río Jejuí. **Fuente:** Atlas de Potencial Hidroenergético del Paraguay, Itaipu.2011

Con respecto a la **biodiversidad** de la cuenca la misma se encuentra dentro de las eco regiones Selva Central y Litoral Central. Se observan las siguientes comunidades naturales: lagos, lagunas, esteros, bosques en suelos saturados, ríos, arroyos, nacientes de aguas, saltos, bosques altos, medios, cerrados, sábanas, roquedales y acantilados. Con respecto a la fauna de la zona, muchas especies ya están extinguidas y otras corren riesgo de extinción

1.5.3. Uso del agua.

Nuestro país es uno de los territorios con mayor abundancia de agua en Latinoamérica. Es por ello que la disponibilidad del agua en Paraguay es superior a la disponibilidad media en los demás continentes y ocupa el tercer lugar en Latinoamérica, luego de Guayana y Surinam. Esta disponibilidad es de aproximadamente $63.000\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$. (Recursos Hídricos del Paraguay, SEAM).

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

La extracción hídrica total nacional para el 2012 alcanzó los 2.413 km³, destacando el sector agrícola con una extracción estimada de 1.897 km³ (de los cuales 0.297 km³ corresponden a la ganadería), equivalente al 79 por ciento del total de las extracciones, la extracción municipal alcanzó los 0.362 km³, o el 15 por ciento del total, y la industria (en el departamento Central, ya que no se disponen datos del resto del país) alcanzó una extracción de 0.154 km³, o el 6 por ciento del total de las extracciones (Figura 8).

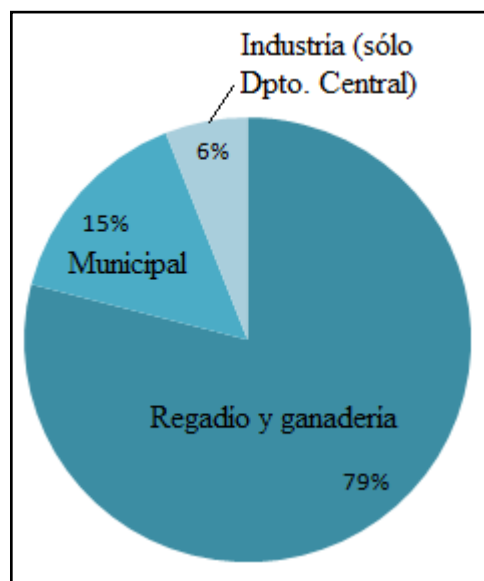


Figura: 8.Extracciones de agua por sector, total 2.413 millones de m³ en el año 2012. **Fuente:** FAO.

Del total hídrico extraído, 1.969 km³ (82 por ciento) proviene de aguas superficiales, y 0.444 km³ (18 por ciento) de aguas subterráneas (Figura 8). El arroz se riega con agua superficial. Hay una prevalencia del suministro de agua potable por medio de agua subterránea, el 80 por ciento del abastecimiento de comunidades en el interior del país es con agua subterránea. Esto genera una fuerte presión sobre los acuíferos, con el consecuente peligro de contaminación que estos pozos representan, (en ocasiones construidos por el mismo Estado, sin cumplir los requerimientos técnicos y legales). El caso más crítico es el acuífero Patiño, ubicado en la zona del departamento central con la mayor densidad demográfica. El uso industrial proviene de agua subterránea en su gran mayoría. (FAO, 2014)

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

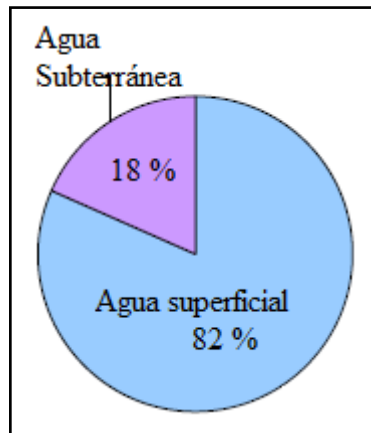


Figura: 9. Extracciones de agua por origen, total 2.413 millones de m³ en 2012. **Fuente:** FAO

En últimos años los sistemas de riego han ido en aumento, para poder mitigar las sequías que han afectado fuertemente la economía nacional. Los principales sistemas de riego están en los departamentos de Misiones, Itapúa, Alto Paraná, San Pedro, Chaco Central y el Departamento Central.

En 2012, se estima que la superficie con infraestructura para riego es de 136 170 ha de la cual la superficie efectivamente regada está en torno al 100 por ciento, son obras que una vez instaladas se aprovechan al máximo (Figura 9). La superficie regada en 1998 se estimaba en 67 000 ha. (FAO, 2014).



Figura: 10. Fuente de agua en superficie equipada para el riego. **Fuente:** FAO

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CAPITULO 2 – MARCO TEORICO.**2.1 Ciclo Hidrológico.**

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se evapora de los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmosfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Chow, 1964).

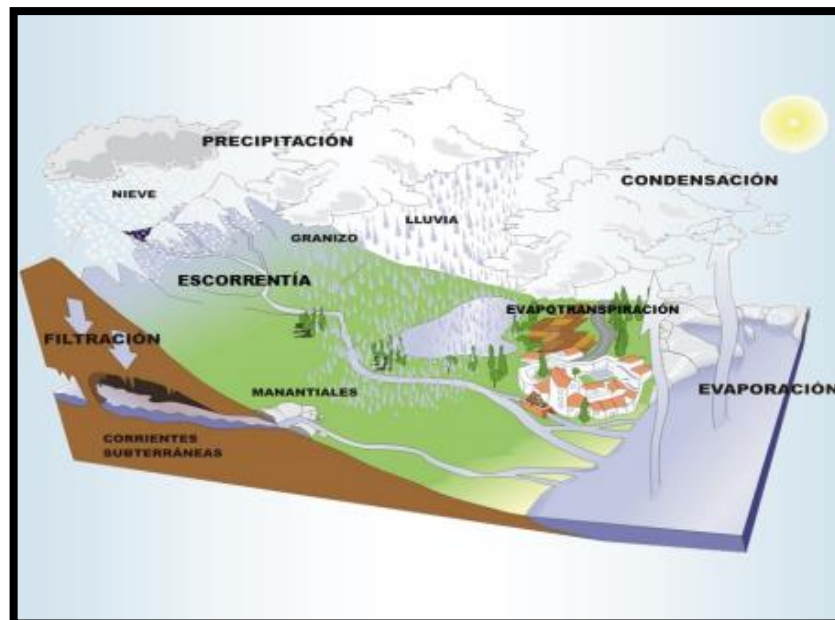


Figura: 11. Ciclo Hidrológico. **Fuente:** XXIII Congreso Nacional del Agua- Resistencia, Argentina.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Cerca del 96.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos. Del resto, el 1,7% se encuentra en los hielos polares, el 1,7% en manantiales subterráneos y solamente el 0,1% en los sistemas de agua superficial y atmosférica. Solamente el 0,006% del agua dulce está en los ríos. El agua biológica. Fijada en los tejidos de las plantas y animales, representa cerca del 0,003% de toda el agua dulce, equivalente a la mitad del agua de los ríos (Chow, 1964).

A pesar de que el contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, intensas cantidades de agua pasan a través de ellos. La evaporación desde la superficie terrestre consume el 61% de esta precipitación, el restante 39% conforma escorrentía hacia los océanos, principalmente como agua superficial. La evaporación desde los océanos constituye cerca del 90% de la humedad atmosférica. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global de agua da una visión dinámica del ciclo hidrológico (Chow, 1964).

La hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima tales como la topografía, la geología y la vegetación. También, a medida que la civilización progresa, las actividades humanas invaden gradualmente el medio ambiente natural del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos (Chow, 1964).

2.2. Concepto de Cuenca.

La cuenca hidrográfica es un área de captación natural del agua de precipitación de la lluvia que hace converger los escurrimientos hacia un único punto de salida. Este punto de salida es la desembocadura de la cuenca. (Tucci, 2004).

Una cuenca hidrográfica está compuesta por un conjunto de superficies vertientes constituidas por la superficie del suelo y de una red de drenaje formada por los cursos de agua que confluyen hasta llegar a un lecho único en el punto de salida. (Tucci, 2004).

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

2.2.1 Caracterización Fisiográfica de Cuencas Hidrográficas.

Los datos fisiográficos los datos que se pueden extraer de mapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales. Básicamente son áreas, largos, declives y cobertura del suelo obtenidos directamente o expresados por índices (Tucci, 2004).

Algunas características e índices son presentados a continuación, según Tucci, 2004:

1) Área de la cuenca: Es esencial para precisar la eventual generación de escurrimiento de la cuenca hidrográfica, una vez que su valor multiplicado por la lámina de la lluvia precipitada define el volumen de agua recibido por la cuenca. Es obtenida a través de la proyección vertical de la línea del divisor de aguas sobre el plano horizontal (Tucci, 2004). El área de la cuenca es expresada en hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados (km²) y puede ser obtenida por planimetrage de mapas o por cálculos a partir de mapas digitalizados utilizando herramientas computacionales de SIG (Sistemas de Informaciones Geográficas) (Tucci, 2004).

2) Largo del río principal (L): es determinado a partir del perfil longitudinal del curso de agua midiéndose el largo del trecho entre la naciente más distante y el punto de interés o exutorio (Tucci, 2004).

3) Perfil longitudinal: los perfiles longitudinales son obtenidos en mapas planialtimétricos y representan la variación de niveles a lo largo de la extensión del río principal (Tucci, 2004).

4) Declividades: la declividad es muy importante para la modelación del escurrimiento una vez que la velocidad de flujo depende de esta variable. Puede ser determinada por varios métodos. En general consiste en la razón entre la diferencia de las altitudes de los puntos extremos de un curso de agua y la extensión de este curso de agua, y puede ser expresada en % o m/m (Paiva y Paiva, 2001). La diferencia entre la elevación máxima y la elevación mínima resulta en la amplitud altimétrica de la cuenca. Esta es la manera más simple de calcular el declive, aunque, para ríos que recorren relieves muy diferenciados es necesario realizar algunas correcciones.

• **Declividad del río principal “S10/85”:** este método consiste en la obtención de las altitudes a 10 y 85% del largo del río hasta el punto deseado, en este caso la estación

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

fluviométrica. Por tanto, son ignorados los trechos de la naciente, generalmente con declives más altos, y el trecho final, generalmente con declividad más baja (Paiva y Paiva, 2001). Determinadas estas altitudes se divide la diferencia entre ellas por 75% del largo del río hasta la estación. Así obtenemos la declividad del trecho donde valores elevados corresponden a ondas de crecientes más altas y rápidas (Paiva y Paiva, 2001).

2.3 Modelación Hidrológica.

El objetivo de analizar un sistema hidrológico, es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es un acercamiento al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan entradas y las salidas (Chow, 1964).

Un modelo hidrológico representa de forma simplificada los procesos del ciclo hidrológico dentro de un área delimitada, llamada cuenca hidrográfica. Los modelos hidrológicos simulan un sistema a través de ecuaciones matemáticas, con datos de entradas relativos a las variables hidrológicas y como se comportan dentro de la cuenca hidrográfica, devolviendo un resultado como salida (Ponce, 1989).

2.3.1 Clasificación de los Modelos Hidrológicos.

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema (Ponce, 1994).

Según Ponce, (1994) pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

- Determinísticos: son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

- Probabilísticos: por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.
- Conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.
- Paramétricos: o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

De acuerdo a Chow et al (1994), los modelos Determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en:

- Modelos agregados: el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones.
- Modelos distribuidos: considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.

De acuerdo a la escala temporal, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

- Modelos de eventos aislados: son de corto plazo, diseñados para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.
- Modelos de procesos continuos: toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, sub-superficiales y subterráneos. El objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca.
- Modelos de simulación mixta: intentan representar ambas escalas temporales en una forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad.

Desde esta perspectiva, el modelo que se describirá en este trabajo puede ser clasificado como un modelo matemático conceptual, agregado, de simulación continua.

2.4 Modelo hidrológico HMS –Hydrologic Model System

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

El HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”), fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU y es un programa gratuito.

Fue diseñado para simular procesos de lluvia-escorrentamiento en sistemas dendríticos de cuencas, obteniendo la respuesta hidrológica de la misma, que pueden ser utilizadas para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

-Componentes del sistema:

1. Modelo de la Cuenca: elementos de la cuenca, conectividad y parámetros de escorrentía.
2. Modelo Meteorológico: información sobre precipitación y evapotranspiración.
3. Especificaciones de Control: tiempos de inicio/detención y paso temporal de las simulaciones.

Las fases de trabajo del programa son:

- a) Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escorrentía directa.

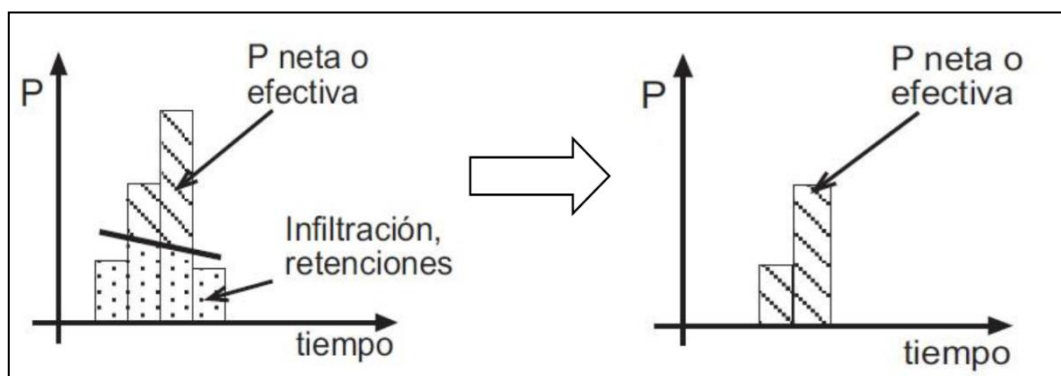


Figura: 12 Separación de la precipitación efectiva. **Fuente:** Manual HEC-HMS.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

b) Cálculo del escurrimiento directo producido por la precipitación neta.

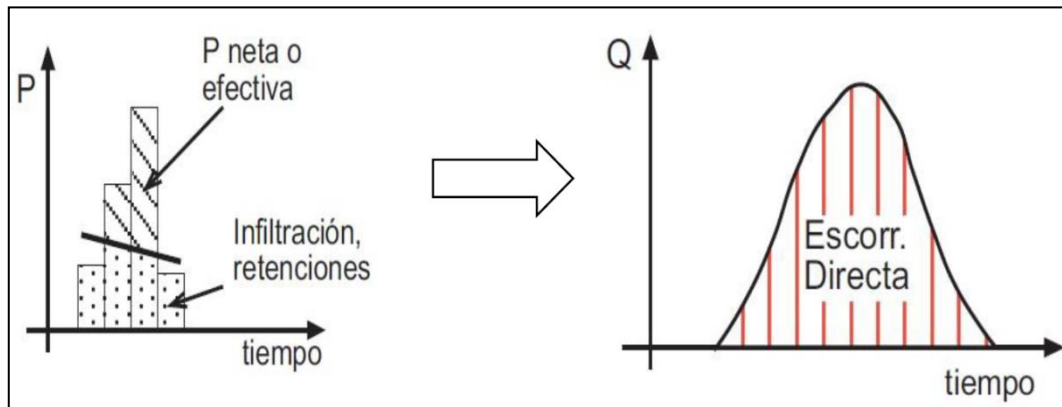


Figura: 13.Transformación de la Precipitación Efectiva en Escorrentía Directa. **Fuente:** Manual HEC-HMS

c) Suma de la escorrentía directa y de la escorrentía base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.

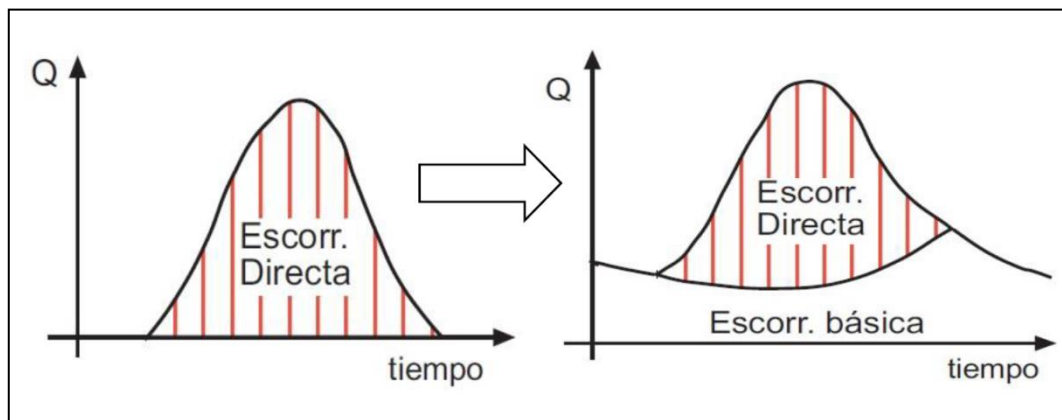


Figura: 14.Suma del Caudal Base a la Escorrentía Directa. **Fuente:** Manual HEC-HMS.

d) Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.(Transito de hidrograma)

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

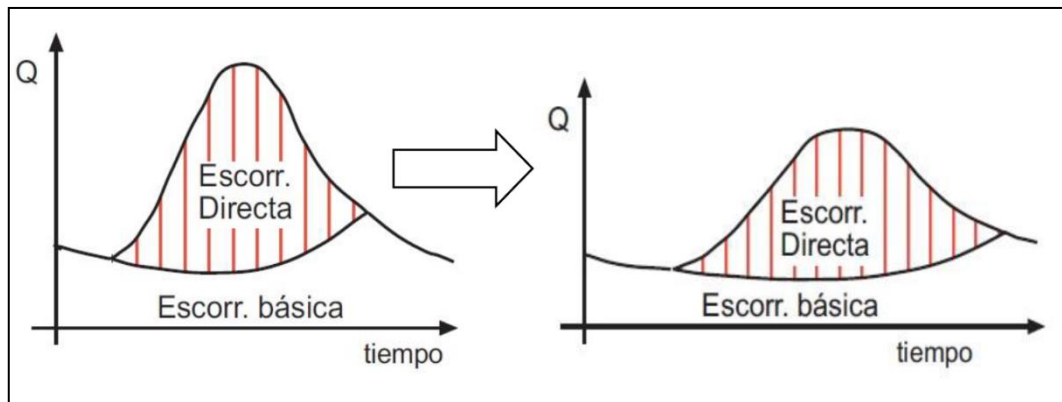


Figura: 15. Tránsito de hidrograma. **Fuente:** Manual HEC-HMS.

Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca o en algún punto de interés.

2.4.1 HMS como modelo continuo.

Un **modelo continuo** intenta simular la evolución de todo el proceso hidrológico. Calcula qué parte de las precipitaciones quedan retenidas superficialmente (intercepción en la vegetación y charcos), qué parte se infiltra en el suelo y qué parte genera escorrentía superficial. Pasada la precipitación debe considerar si la que se almacenó en el suelo se evapotranspira o si se infiltra hacia los acuíferos.

Finalmente, desde éstos puede perderse hacia una circulación profunda (fuera del alcance del modelo) o alimentar los cauces. Los modelos continuos trabajan periodos de meses hasta varios años.

Para ello, al caracterizar la subcuenca, y como método de cálculo de pérdidas (Loss), debemos utilizar uno de los dos métodos siguientes:

-Deficit and Constant: Es un método para una simulación cuasi-continua que considera solamente el almacenamiento en el suelo como un depósito único en el que se infiltra el agua que no produce escorrentía directa. En periodos de no precipitación se producirá evapotranspiración utilizando esa agua.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

-Soil Moisture Accounting (SMA) (“Contador de la humedad del suelo”): Es el método sugerido para utilizar HMS como modelo continuo. Tiene en cuenta cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada: vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero 1 (superficial) y acuífero 2 (más profundo).

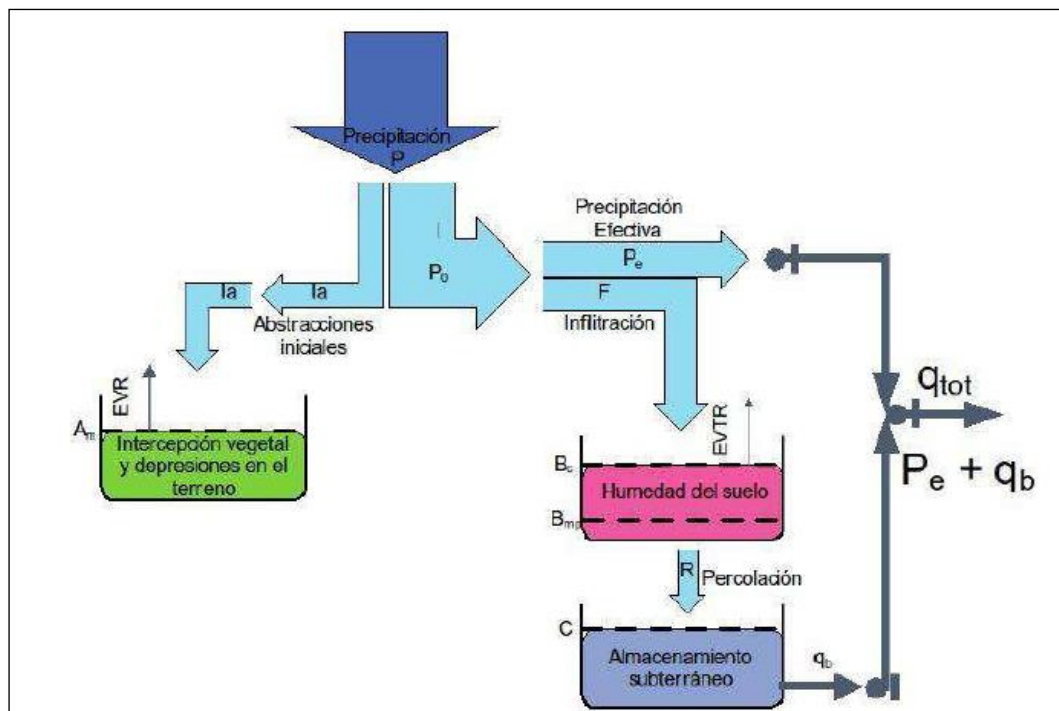


Figura: 16. Esquema conceptual del modelo. **Fuente:** XXIII Congreso Nacional del Agua- Resistencia, Argentina.

El modelo es una herramienta que relaciona algo desconocido (la salida) con algo conocido (la entrada). En el caso de los modelos incluidos en el sistema de modelación hidrológica HEC-HMS, la entrada conocida es la precipitación y la salida desconocida es el hidrograma. Los modelos físicos son representaciones a escala reducida de sistemas del mundo real. El modelo físico de una cuenca puede ser una gran superficie de agua para representar la entrada de precipitación. La superficie puede ser alterada para simular diferentes usos del terreno, tipos de suelo, pendientes, etc. y la intensidad de lluvia puede controlarse. El escurrimiento puede medirse directamente en el modelo.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CAPITULO 3: MATERIALES Y METODOS.

3.1 Herramientas y datos utilizados.

3.1.1 Software Utilizados.

-**HEC-HMS**: Software principal, utilizado para modelar la respuesta de las cuencas en estudio, a los eventos de precipitación registrados a lo largo del tiempo.

-**HEC-DSS**: Es una base de datos que ofrece el Centro de Ingeniería Hidrológica, para facilitar la carga de datos de series de tiempo.

-**SOIL GRIDS**: Es un sistema de mapeo automatizado del suelo basado en métodos de predicción espacial de vanguardia, ofrece una colección de mapas del mundo de propiedades y clases de suelos actualizables a resoluciones espaciales de 1 km / 250 m producidas mediante mapas automatizados de suelos basados en algoritmos de aprendizaje automático. Los datos de SoilGrids están disponibles públicamente bajo la licencia Open Data Base.

-**SOIL WATER CHARACTERISTICS**: A partir de los contenidos de arena y arcilla, provee las relaciones del contenido hídrico y tensión (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación) y conductividad hidráulica saturada (Ksat) y no saturada, según la clasificación de tipo de suelos del USDA.

-**QGIS**: Es un sistema de información geográfica de uso libre, que permite trabajar con mapas e información geográfica en general, y además tiene múltiples aplicaciones para el área de la hidrología.

3.1.2 Datos Espaciales.

Se utilizó el modelo de elevación digital gratuito ASTER GDEM (de las cuencas del río Ypané y del Río Jejuí), disponible a través del sitio en internet de la NASA.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

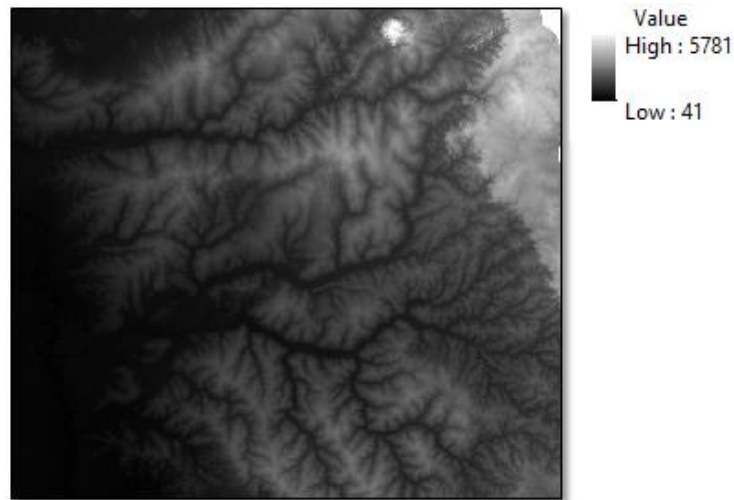


Figura: 17. Modelo de Elevación Digital ASTER GDEM de las cuencas.

3.1.3 Datos de Series de Tiempo.

Se dispone de datos de cinco estaciones meteorológicas e hidrométricas distribuidas en las dos cuencas de estudio. Los datos utilizados para la preparación de las series de lluvias provienen de la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC.

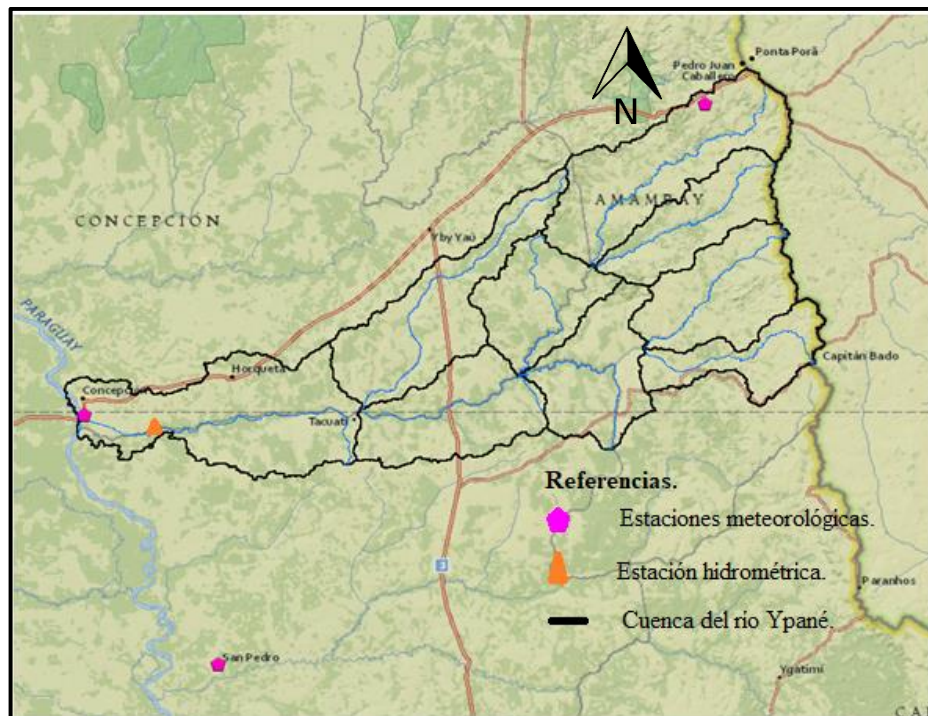


Figura: 18. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Ypané. Fuente: DMH

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

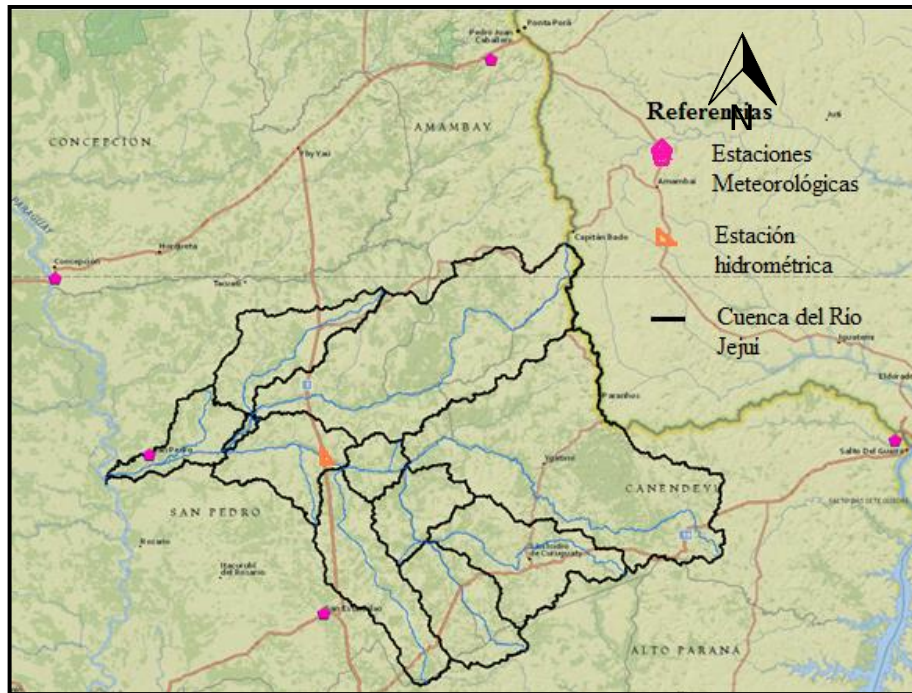


Figura: 19. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Jejuí. Fuente: DMH

También se obtuvieron los datos históricos de niveles de las estaciones: de Belén y del Cruce ruta 3 del Anuario Hidrográfico, que fueron utilizados para la estimación de sus respectivas curvas de descarga altura-caudal (H-Q). El anuario hidrográfico dispone un registro de lecturas, desde el 01/01/1974 hasta el 31/12/1991, que corresponden a la ANNP (Administración Nacional de Aduanas y Puertos).

-Datos diarios de precipitación.

Los datos diarios de precipitación de las cinco estaciones utilizadas para este trabajo provienen de la DMH.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

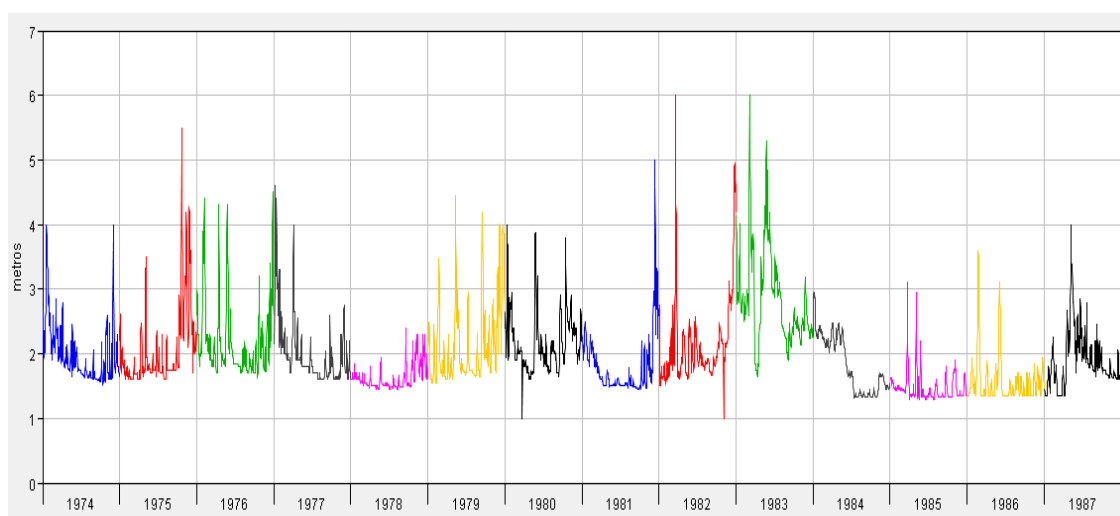
Ingeniería Ambiental

Tabla: 1. Estaciones Meteorológicas utilizadas. **Fuente:** Dirección de Meteorología e Hidrología.

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	LATITUD SUR	LONGITUD OESTE
86134	Concepción	Concepción	23°26' 29,51	57°25' 48,67
86185	San Pedro	San Pedro	24°5' 6,85	57°5' 15,17
86097	PJC	Amambay	22°38' 25,00	55°49' 57,81
86192	San Estanislao	San Pedro	24°40' 1,00	56°26' 53,29
86210	Salto del Guaira	Canindeyú	24°1' 57,27	54°21' 13,81

-Datos históricos de niveles diarios.

Los datos históricos de niveles diarios utilizados para la cuenca del Río Ypané corresponden a la Estación Belén; fueron seleccionados los años con menos errores de lectura o transcripción y se tomó desde el 01/01/1974 hasta el 31/05/1987.

**Figura: 20.** Niveles históricos del Río Ypané en DSS. **Fuente:** Elaboración propia con datos de la ANNP.

Para la cuenca del Río Jejuí se utilizaron los datos correspondientes a la Estación Cruce Ruta 3, solo se utilizaron los años que disponían de registros completos, y se seleccionó desde el 19/08/1982 al 31/12/1991.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

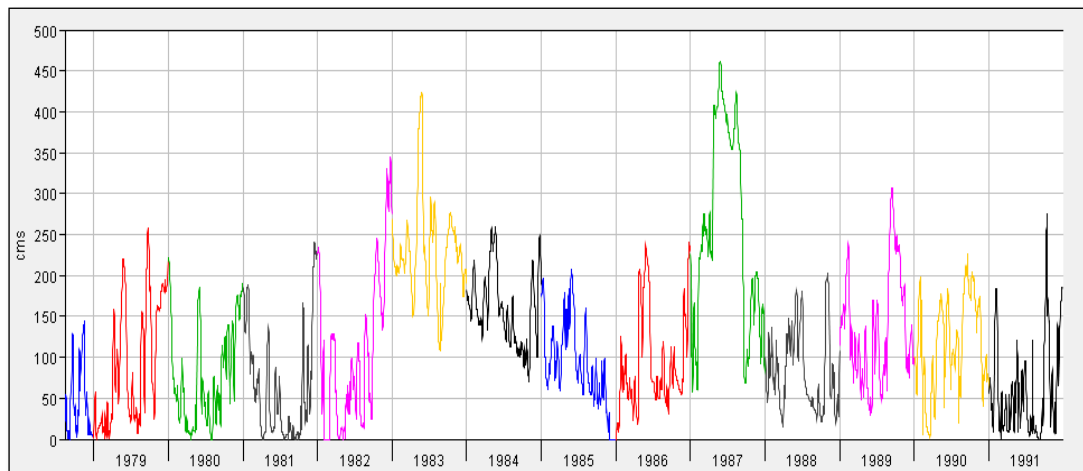


Figura: 21. Niveles históricos del Rio Jejuí en DSS. **Fuente:** Elaboración propia con datos de la ANNP.

3.1.4 Datos de estudio de suelo.

Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT):

Es un estudio de reconocimiento de suelos y determinación de su capacidad de uso en la Región Oriental del Paraguay, a efectos de sentar las bases para la planificación racional del uso y manejo sustentable de este recurso y la promoción de su ordenamiento territorial. (PRUT, 1995)

El Estudio de Suelos de la Región Oriental del Paraguay se llevó a cabo a través del uso de ampliaciones de imágenes satelitales a escala 1: 100.000, cuyo procesamiento y cartografía digital fue realizado por "Earth Satellite Corporation", de Rockville, Md., EEUU, a partir del "Landsat Thematic Mapper" (TM) conteniendo las bandas TM 3, 7 Y 4, en órdenes azul, verde y rojo-; cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1: 100.000; trabajo de campo consistente en la descripción de perfiles de suelos de toda la región Oriental y toma de muestras de suelos; análisis laboratoriales de las muestras de suelos recolectadas e interpretación y procesamiento de toda la información recolectada. (PRUT, 1995)

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

También se caracterizó el clima, la fisiografía-geomorfología y uso actual de la tierra. En esta forma, se generaron los mapas de suelos, que contienen información sobre el tipo de cada área en particular, material parental, pendiente del terreno, drenaje, pedregosidad y rocosidad. Además, cada tipo de suelos se presenta descrito según sus características morfológicas y taxonómicas.

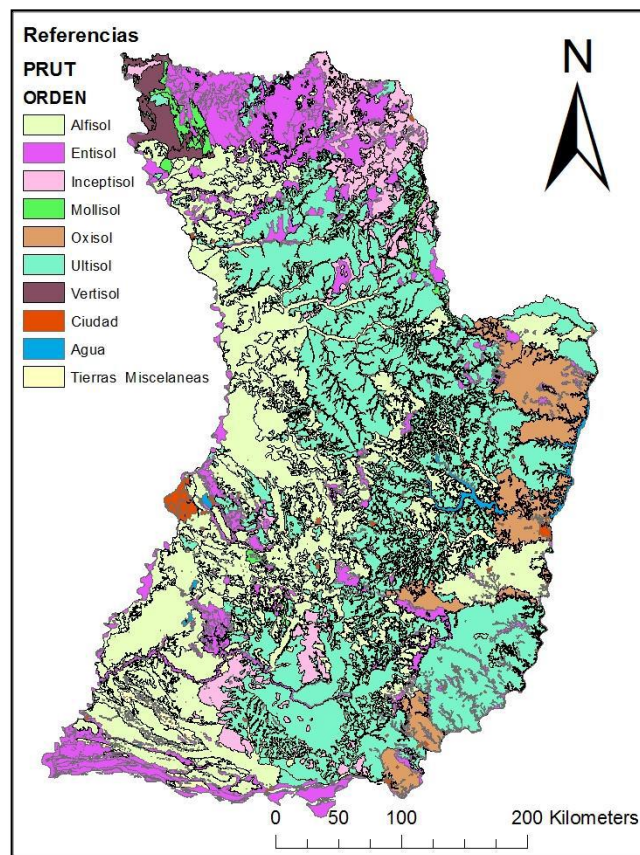


Figura: 22. Mapas de suelos. **Fuente:** PRUT.

3.2 Descripción de los métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

El método SMA es la principal herramienta que dispone el HMS, para realizar el modelo de un modo continuo. Este procedimiento considera cinco capas de retención y almacenamiento de agua.

En la siguiente figura se puede observar el proceso de las cinco capas, que representan el movimiento del agua, sobre el suelo:

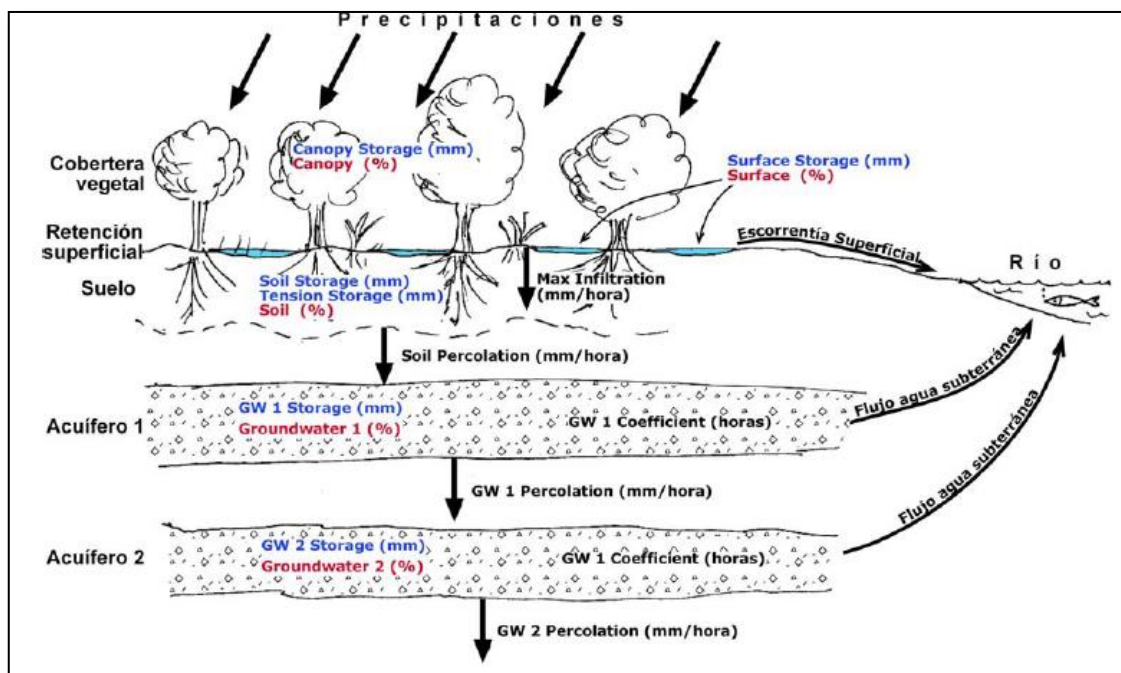


Figura: 23.Esquema del Modelo Soil Moisture Accounting. **Fuente:** User’s Manual

a) Interceptación en la cubierta vegetal (Interception Canopy): Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. La única entrada son las precipitaciones y la única salida la evapotranspiración (ET). HMS coloca aquí las primeras precipitaciones hasta que se alcance la capacidad máxima.

b) Almacenamiento en depresiones superficiales (Surface depression storage): Es el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

La **entrada** son las precipitaciones que no han sido interceptadas por la vegetación y que exceden la capacidad de infiltración. Las **salidas** son inicialmente la infiltración y la ET. Posteriormente, si el volumen almacenado supera el máximo establecido, pasará a la escorrentía superficial.

c) Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage): La entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas son la ET y la percolación hacia el acuífero subyacente.

HMS distingue dos zonas dentro del suelo:

c1) Zona superior (Upper zone): Parte del suelo que puede perder agua por ET o por percolación. Corresponde al agua gravífica, que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por la gravedad.

c2) Zona de tensión (Tension zone): Parte del agua contenida en el suelo que se pierde solamente por ET. Corresponde al agua adherida a las partículas del suelo; las raíces pueden utilizarla, pero no puede moverse. La ET primero toma agua de la Upper zone, y posteriormente de la Tension zone.

d) Almacenamiento en los acuíferos (Ground wáter storage): El modelo distingue dos niveles:

Un acuífero más superficial, “**GW 1**”; que recibe directamente la percolación del agua gravífica que no ha sido atrapada por la ET y que ha excedido la capacidad de almacenamiento del suelo. Desde este acuífero más superficial, el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea (que puede alimentar el caudal base de los ríos) o percolar hacia un acuífero más profundo “**GW2**”; Análogamente, desde este acuífero el agua puede incorporarse a la escorrentía subterránea o percolar aún más profundamente; en este caso el modelo considera esta agua perdida, sale del sistema y no es considerada.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Los coeficientes GW1 y GW2, son el tiempo de retardo que debe transcurrir para que el agua almacenada en cada uno de los niveles acuíferos salga lateralmente y alimente al cauce como caudal base.

3.2.1 Cálculos realizados por el SMA.

Cuando comienza la precipitación, primero se completa la capacidad de **retención de la vegetación** (hasta alcanzar lo especificado en Max. Almacenamiento). La ET tomará agua de este nivel antes que de los otros.

El agua que no es retenida por la vegetación pasa a la superficie del terreno. Desde esta **retención superficial** comienza la infiltración sin que se pueda superar la capacidad de la Max. Infiltración. La ET tomará agua de esta retención superficial si no la encuentra en el nivel anterior (Canopy). Si a pesar de la infiltración y de la ET, se excede el máximo almacenamiento superficial, el agua sobrante pasa a la escorrentía superficial.

El agua infiltrada llega al **suelo**; cuando el agua almacenada en el suelo supere el máximo almacenamiento de tensión, comenzará la percolación hacia el acuífero superficial; es decir, no es necesario que se exceda el valor máximo asignado al suelo, sino que en cuanto exista agua gravífica, puede comenzar a percolar, sin superar el valor máximo en la tasa de infiltración del suelo.

El agua percolada desde el suelo, alimenta el **acuífero superficial** (GW 1) hasta su capacidad máxima establecida, y desde ese acuífero el agua pasa al acuífero inferior (GW 2) sin que el flujo pueda sobrepasar el máximo indicado, y análogamente, desde el acuífero profundo se pierde agua por percolación sin superar el límite indicado.

Desde ambos niveles de los acuíferos puede salir un flujo lateral que alimentará el caudal base del hidrograma final resultante.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

3.2.2 Cálculo del Caudal Base

La elección del método a utilizar, está condicionada por el modelo SMA, y es el método Reservoirio Lineal que supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales.

El método simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial a través de reservorios.

-Contenido inicial de agua subterránea (GW Initial): Es el caudal inicial, en el momento que el modelo comienza a trabajar.

-Coeficiente de agua subterránea (GW Coefficient): Es el coeficiente de almacenamiento de agua subterránea. El acuífero actúa como un lago o embalse, que recibe y suelta agua, también el acuífero atenúa el caudal y lo retrasa, como en cualquier procedimiento de tránsito de caudales. Este parámetro en horas informa al modelo el tiempo de respuesta de este depósito intermedio que es el acuífero.

-Reservorios de agua subterránea (GW Reservoirs): Simula cada acuífero como un número de depósitos en cadena que provocan la atenuación del caudal que se comenta más arriba. Por omisión aparece 1, que corresponde a la mínima atenuación. Se toma dos reservorios

3.2.3 Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark.

El método de transformación utilizado es el método del hidrograma unitario de Clark, el cual representa dos procesos críticos en la transformación de la precipitación neta en caudal. La traslación: el movimiento del exceso de agua desde su origen a través de la cuenca hasta la salida de la misma y la atenuación: reducción de la magnitud de la descarga como exceso almacenado a través de la cuenca. El método consiste en transitar la precipitación neta a través de la cuenca en un intervalo de tiempo y regular este tránsito por medio de un reservorio lineal.(Feldman, 2000).

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

El Hidrograma Unitario de Clark, es estimado con fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca de estudio como; el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc. Para el caso del HU de Clark del HEC-HMS, el programa construye una curva de Tiempo vs. Área y la utiliza para desarrollar la translación del Hidrograma resultante de una precipitación.

El modelo usa dos parámetros y la relación tiempo-área para definir el hidrograma unitario. Los parámetros son: el **tiempo de concentración, TC** definido como; el tiempo que una partícula de agua tarda en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de descarga, y un segundo parámetro, el coeficiente de almacenamiento R, unidades de tiempo, que tiene en cuenta el efecto de almacenamiento en la red de cauces de la cuenca. (Fattorelli & Fernández, 2002).

Para el TC se optó por la Fórmula de Kirpich (1940), que fue recogida en el libro “Hidrología Aplicada”, de V.T. Chow, fue calibrada con base en los datos registrados en 7 cuencas rurales de Tennessee, en Estados Unidos. Las cuencas consideradas presentaban una superficie inferior a 50 hectáreas y cauces bien definidos, con pendientes que oscilaban entre 3 % y 10 %. Su expresión original, en unidades métricas, es la siguiente:

$$Tc = 0,06626 \times \frac{L^{0,77}}{J^{0,385}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde;

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L : Longitud del curso de agua principal, expresada en km.

J : Pendiente media del curso de agua principal.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Para su utilización en cuencas con características diferentes a las utilizadas en el proceso de calibrado, se puede tener en cuenta lo indicado al respecto por D.A. Chin en su libro “Water Resources Engineering”, en el que se incluyen algunos coeficientes correctores, que se resumen en la tabla.

Tabla: 2 .Coeficiente corrector de la fórmula de Kirpich.

Campo de aplicación	Coeficiente corrector
Superficies pavimentadas	0,4
Canales de hormigón	0,2
Cuencas naturales	2,0

Teniendo en cuenta la información reflejada en la tabla anterior, la expresión final de la fórmula de Kirpich, aplicada a cuencas naturales, resulta de multiplicar 0,06626 por el coeficiente corrector 2,0:

$$T_c = 0,13252 \times \frac{J^{0,77}}{L^{0,385}} \quad \text{Ecuación 2}$$

T_c: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del curso de agua principal, expresada en km.

J: Pendiente media del curso de agua principal.

Para el coeficiente de almacenamiento, se ha investigado para obtener una ecuación práctica de R. En estudios realizados en cuencas aforadas por el Cuerpo de Ingenieros HEC (1982) se establece la siguiente ecuación:

$$\frac{R}{R+T_c} = K \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

T_c : Tiempo de concentración, en horas.

R: Coeficiente de almacenamiento, en horas.

K: Parámetro, cuyo valor se sitúa en un rango de variación comprendido entre 0,1 y 0,9, correspondiendo este último valor a zonas con poca pendiente y con uso agrícola.

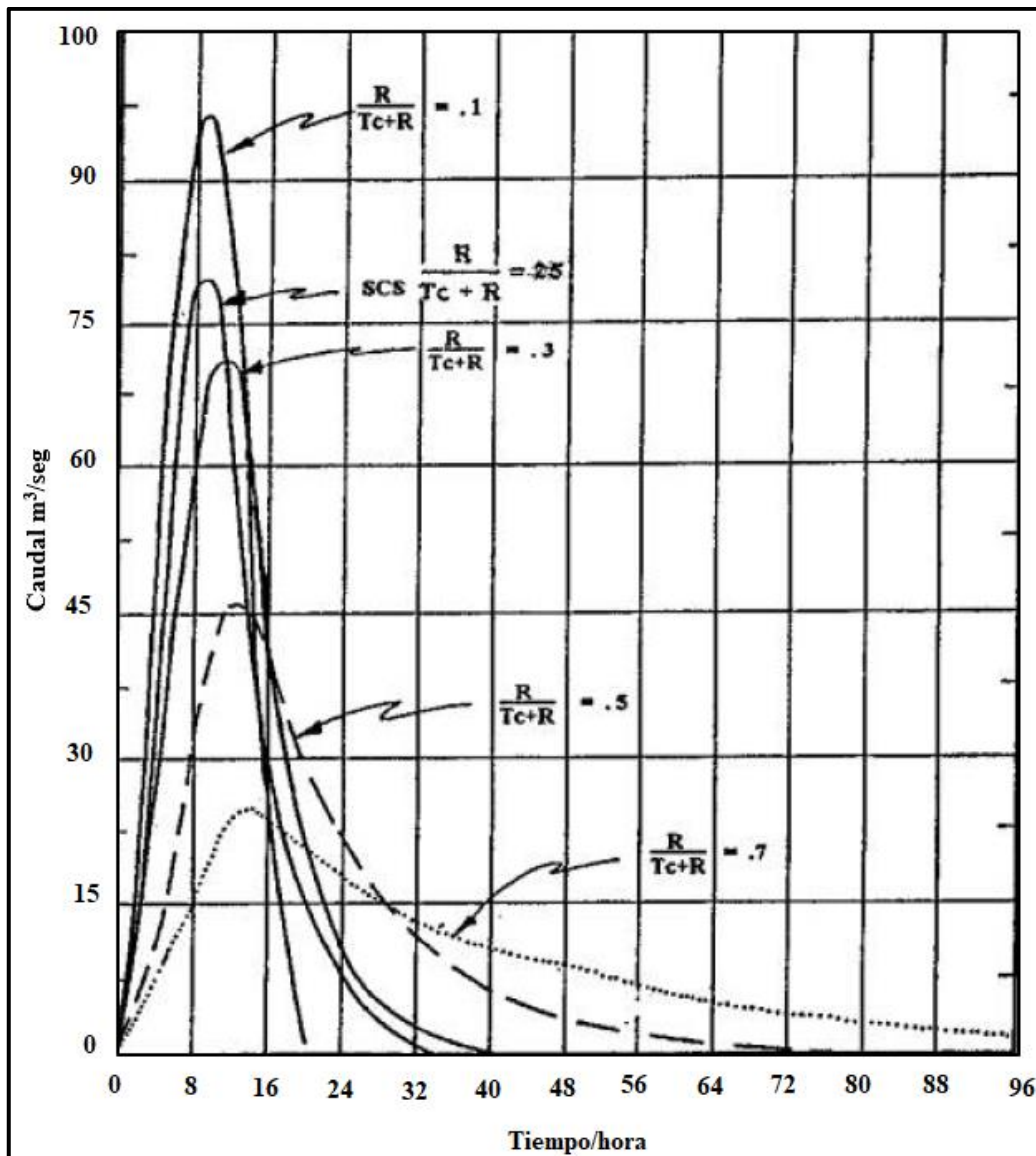


Figura: 24. HU Clark para distintos valores de K (ASCE, 1997). **Fuente:** Fattorelli & Fernández.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

3.2.4 Cálculo de Tránsito de Hidrograma.

Se optó por el modelo Muskingum – Cunge, que es una técnica de coeficientes no lineales que tiene en cuenta la difusión y amortiguación del hidrograma basado en propiedades físicas del canal y el hidrograma de entrada al tramo.

El modelo consta de dos formas:

-Configuración Estándar: utilizada cuando se tiene la descripción de una sección transversal representativa del canal, o simplemente se selecciona una forma predeterminada y sencilla (rectangular, trapezoidal, triangular, etc.).

- **Configuración de la Sección Transversal del canal dado por 8 puntos:** con esta configuración mostrada en la figura 22, los puntos 3 y 6 representan las orillas izquierda y derecha del canal, respectivamente. Los puntos 4 y 5 se encuentran entre el canal. Los puntos 1 y 2 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado izquierdo, mientras que los puntos 7 y 8 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado derecho.

Para este trabajo se utilizó la configuración de la sección transversal del canal dado por 8 puntos.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

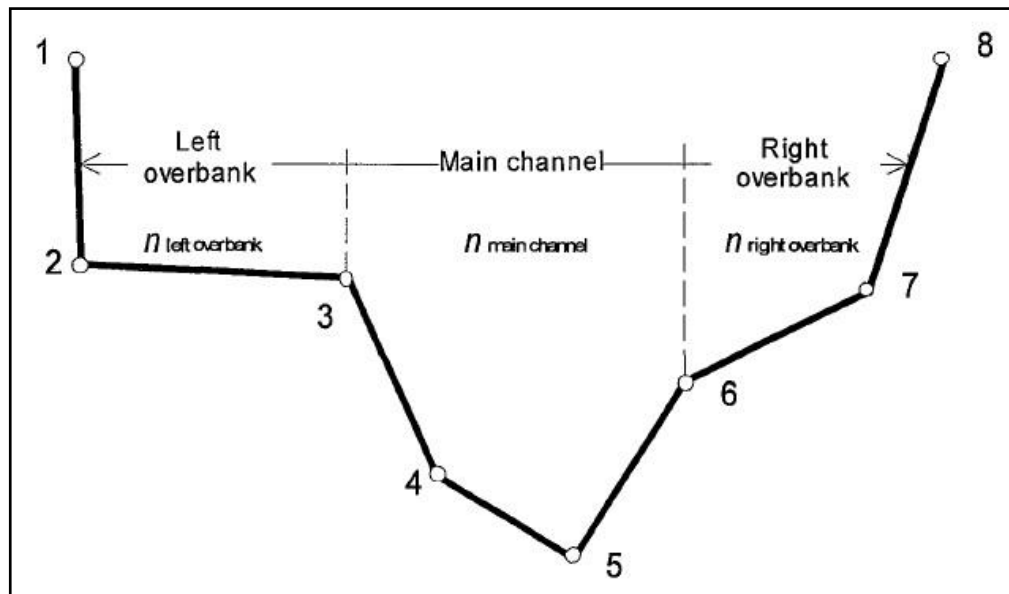


Figura: 25. Sección transversal de 8 puntos. **Fuente:** Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS.

3.3 Distribución de la Precipitación.

Dentro de cualquier estudio hidrológico es necesario conocer cuál es la precipitación total y/o acumulada en la cuenca y no en puntos determinados que es la información que nos dan los pluviómetros. Para conocer esta precipitación areal disponemos de una serie de pluviómetros distribuidos por la cuenca (con mayor o menor homogeneidad) que son únicamente una muestra de la precipitación que recibe la cuenca.

Se disponen de varios métodos para realizar el cálculo de la distribución de la precipitación en las cuencas, para este trabajo se utilizó el inverso de la distancia; es un método local, que usa la información procedente de los pluviómetros más cercanos, por el cual el valor estimado se calcula a partir de los valores de las estaciones más cercanas, dando distintos peso a cada una de ellas según la distancia a la que se encuentren del punto estimado, de forma que a mayor distancia de una estación al punto de interpolación menor será su peso. Esta metodología es la recomendada por el HEC cuando las simulaciones se realizan para procesos operativos de predicción.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

En general, la expresión que se utiliza para emplear este método es la siguiente:

$$Z_s = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^\alpha}} \quad (\alpha > 0) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde;

d: Distancia del centroide de la cuenca a la estación más cercana.

Z_i: Es el valor de precipitación observado en la estación meteorológica.

3.4. Estimación de caudales sintéticos.

La realización de mediciones de velocidad para determinar los caudales de descarga no siempre se puede realizar, por lo mismo se opta por utilizar el **Método Área Pendiente**, que para el caso en el que ocurren grandes eventos de crecidas, puede estimar el flujo a través de métodos indirectos, tomando mediciones; de los niveles después de los eventos, áreas de las secciones transversales, la pendiente de los canales. Luego introducir estos parámetros en la ecuación de Manning para estimar el flujo.

La ecuación de Manning es;

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde;

Q: Caudal en m³/s.

R: Radio Hidráulico.

S: Pendiente del canal en condiciones de flujo uniforme.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

n: Coeficiente de Rugosidad de Manning.

A: Área de la sección transversal en m².

En la mayoría de los cursos hídricos menores, el coeficiente de rugosidad de Manning se encuentra entre 0,010 y 0,750. Si los valores estimados de n, A, R, y S son razonables, la ecuación de Manning puede ser utilizada para estimar el caudal de descarga que ha ocurrido durante un periodo de aguas altas. (W.J. and Lewis, 2003).

3.4.1 Hidrogramas sintéticos

El hidrograma unitario desarrollado a partir de datos de lluvia y de caudal, o mediante el uso de modelos de lluvia - caudal y optimización de parámetros, se aplica cuando en el punto de cierre de la cuenca se dispone de datos de caudales de una creciente y en la cuenca misma, datos de la precipitación que la desencadenaron. Es muy frecuente no contar con datos de caudal, por tal motivo se genera un hidrograma de una creciente máxima a esperar en un sitio, para luego con el mismo, realizar el diseño de una estructura o verificar una existente. En estos casos, se utilizan hidrogramas sintéticos calculados con modelos, como los modelos de Clark, SCS. (Fattorelli & Fernández, 2002)

3. 5 Evapotranspiración.

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie de suelo y la transpiración de la vegetación. Los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor mediante el viento. Además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. (Chow, 1994)

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Numerosas fórmulas nos permiten evaluar la ETP con una aproximación suficiente para muchos estudios hidrológicos. Para este trabajo se utilizó el método de Thornthwaite, los datos necesarios son; de temperatura y de la latitud por una tabla se obtiene el n° teórico de horas de sol.

$$ETP \text{ (mm/mes)} = 16 \left(\frac{1}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(10 \frac{T_a}{I}\right)^a \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

l = duración del día (Hr)

N = n° de días en un mes

T_a = temperatura del aire media mensual (°C)

$a = (6,75 \times 10^{-7} I^3) - (7,71 \times 10^{-5} I^2) + (1,79 \times 10^{-2} I) + 0,49$

$I = \sum_1^{12} i$ para los 12 meses.

$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514}$

3.6. Caracterización de la cuenca.

Se realizó la caracterización de las dos cuencas estudiadas mediante el análisis de las características fisiográficas; como el área, topografía, tipo y uso de suelo; y las características físicas del cauce principal; pendiente, longitud.

3.6.1 Área del Proyecto.

Se considera la cuenca del Río Ypané, con una **superficie** de 9.950 Km² aproximadamente y **la longitud** del curso principal es de 282 km.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

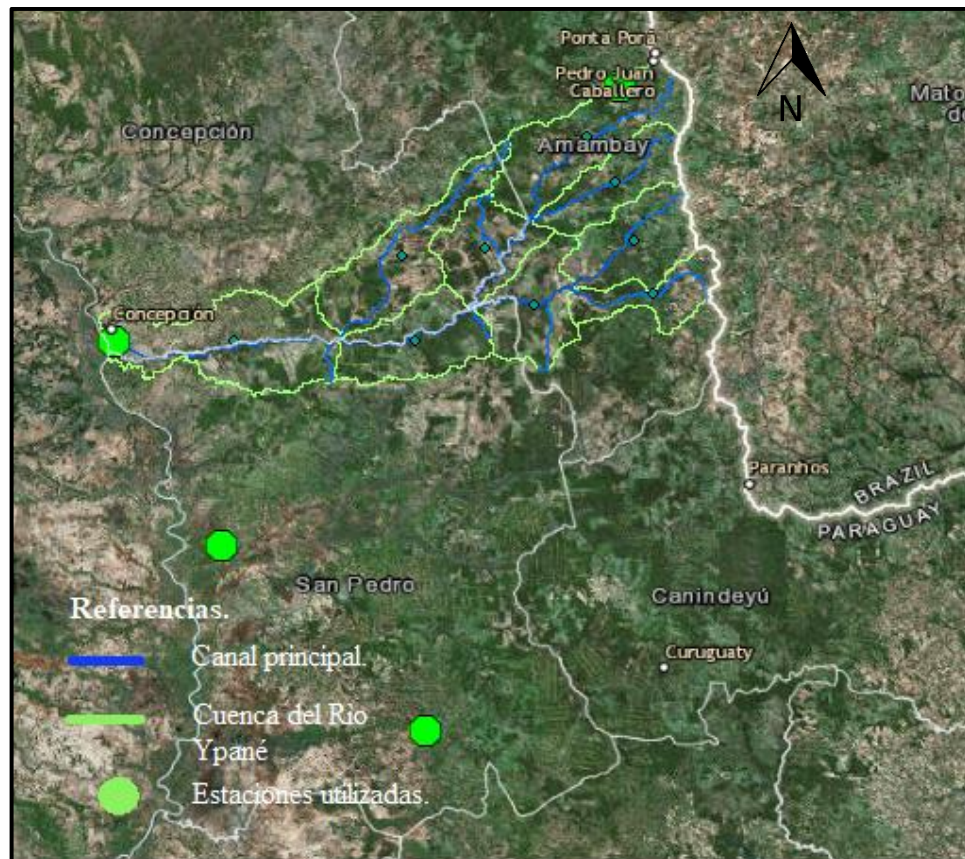


Figura: 26. Delimitación de la cuenca del río Ypané. **Fuente:** Elaboración propia.

Para la cuenca del Río Jejuí se consideró una superficie de 20.098,513 Km²aproximadamente y la longitud del curso principal tiene una extensión aproximada de 263 km.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

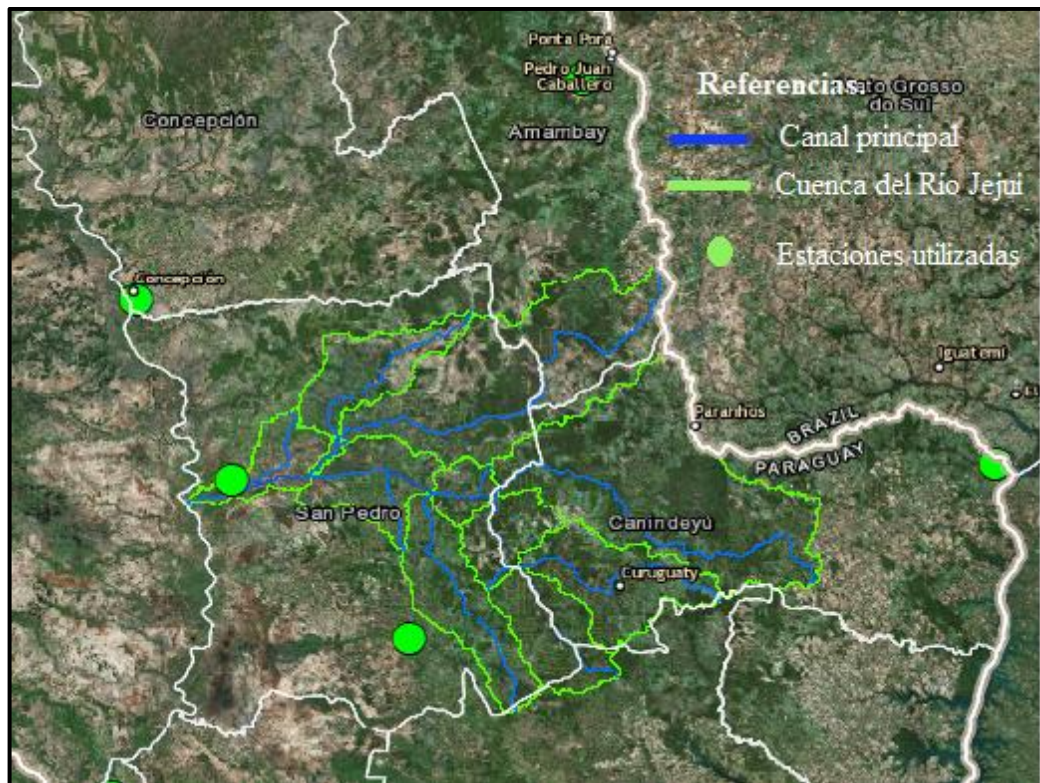


Figura: 27. Delimitación de la cuenca del río Ypané. **Fuente:** elaboración propia.

3.6.2 Topografía.

La pendiente depende de la topografía del lugar y del área de la cuenca. Es un factor físico que controla el tiempo del flujo sobre el terreno y tiene influencia directa en las crecidas. La pendiente media de la cuenca tiene una relación estrecha con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

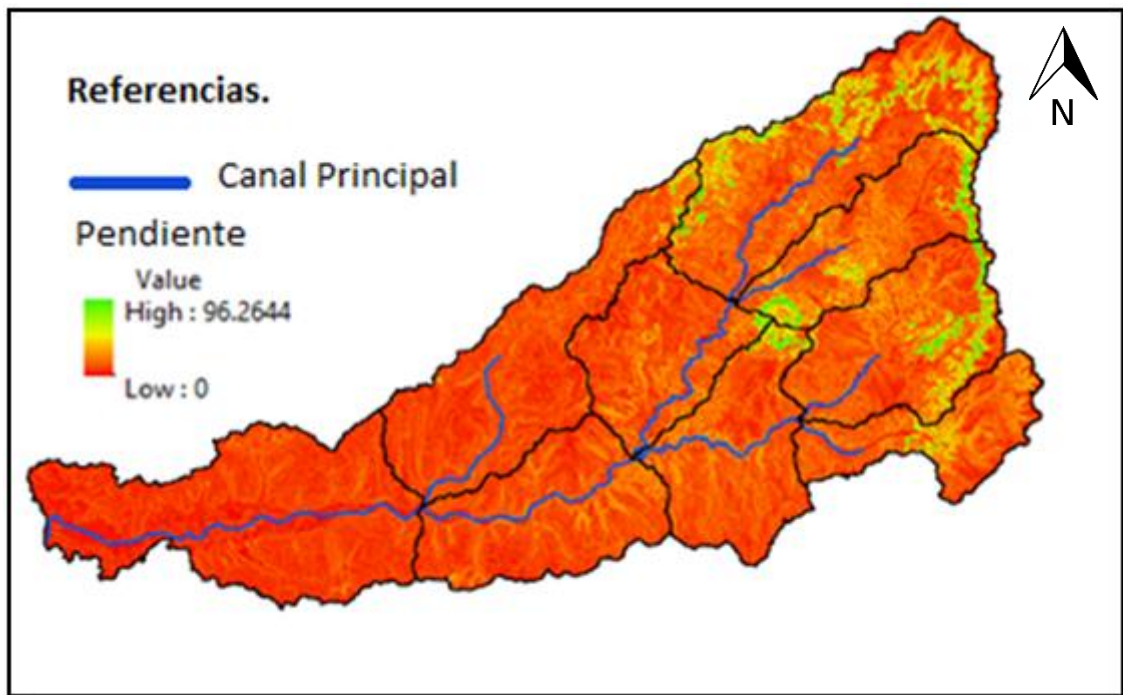


Figura: 28. Pendiente en ArcGis. **Fuente:** Elaboración propia.

El rango de pendiente predominante en la Cuenca del Río Ypane es de 2– 6%.
La altitud máxima de la Cuenca es de 597 m.s.n.m y la mínima de 63 m.s.n.m.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

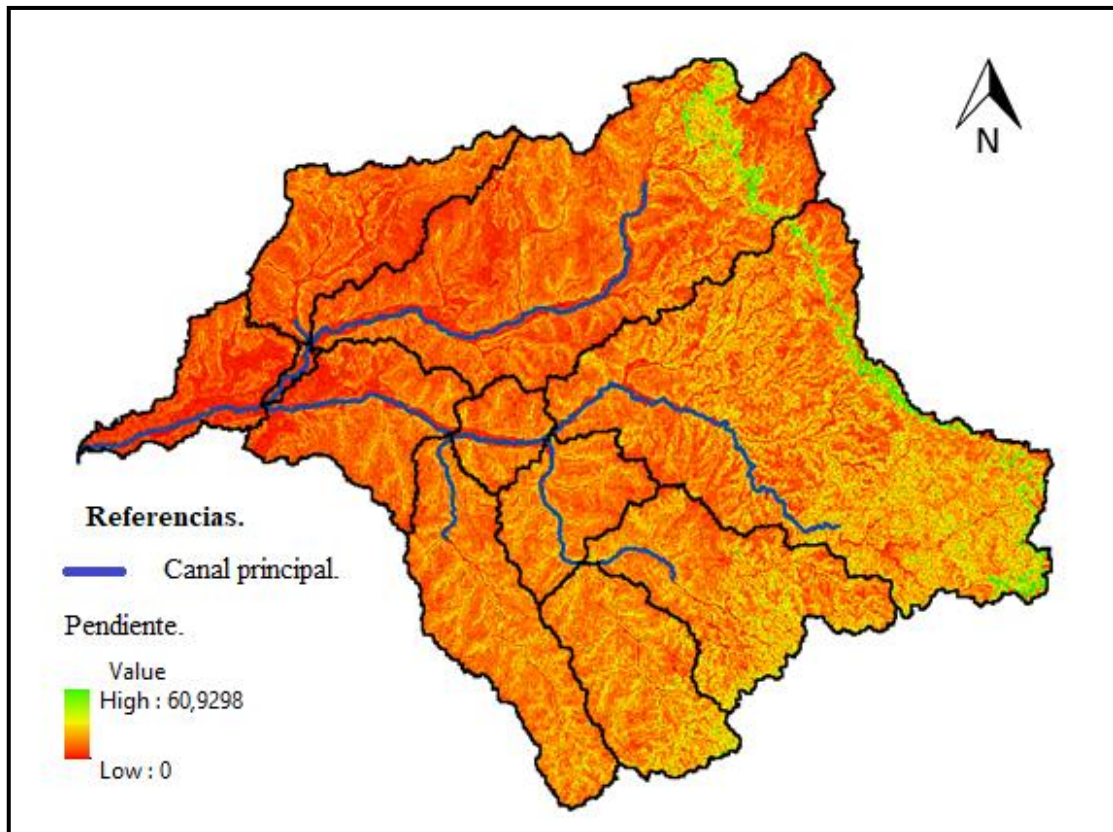


Figura: 29.Pendiente en QGIS. Fuente: Elaboración propia.

El rango de pendiente en la cuenca del Río Jejuí es de 0,97- 3%.

La altitud máxima es de 830 m.s.n.m y la mínima es de 46 m.s.n.m.

3.6.3 Tipo y Uso de Suelo.

Mediante la clasificación de los suelos realizada por el PRUT, se establecieron ciertas características como el espesor, materia orgánica (MO), Orden, Suborden, Grandes Grupos y Subgrupos.

Los **suelos** predominantes en la región de la **Cuenca del Río Ypané**, son del tipo **ultisol (47,62%)**, los cuales se desarrollan en condiciones de clima cálido y tropical. Sus horizontes

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

sub superficiales son, por lo general, de color rojo o amarillo, como resultado de las acumulaciones de óxidos de hierro.

Otros tipos de suelo son; el **inceptisol (27,76 %)** caracterizados por ser suelos incipientes de baja o media evolución cuyos perfiles se forman rápidamente como resultado de la alteración de la roca madre; el **entisol (12,52%)** el cual representa a suelos poco evolucionados, sus propiedades están muy determinadas por el material original. Se localizan sobre depósitos recientes naturales o antrópicos y en menor porcentaje **molisol**, se caracterizan por un horizonte de espesor, superficie oscura. Este horizonte superficial fértil, conocido como un epipedónmólico. Tienen la materia profunda, alta carga orgánica, enriquecida con nutrientes del suelo de la superficie, por lo general entre 60 a 80 cm de espesor.

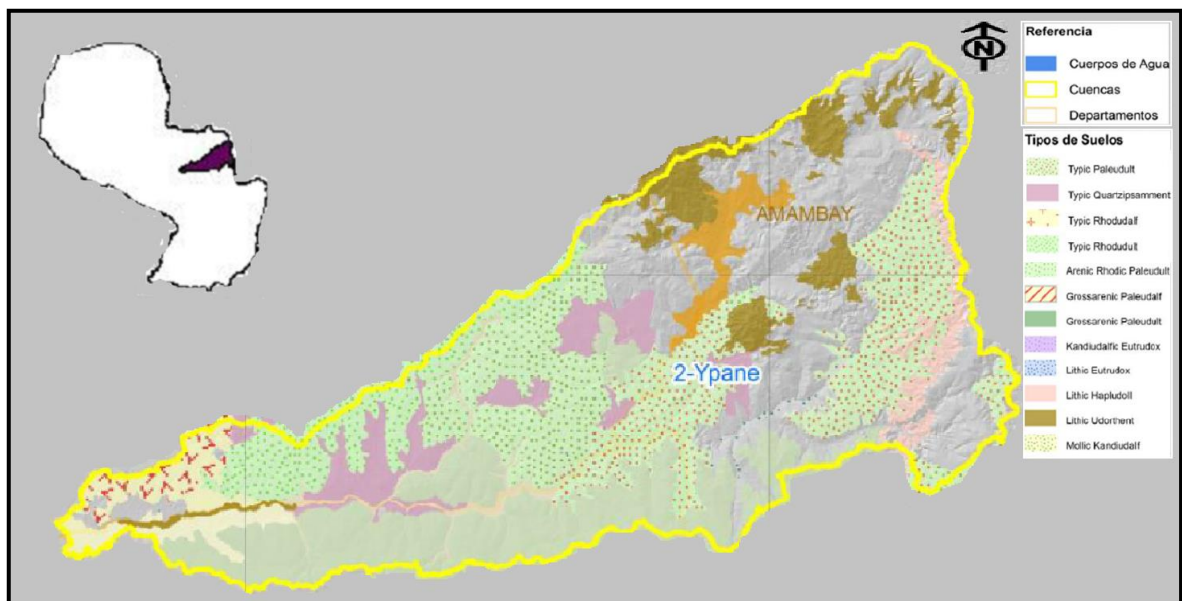


Figura: 30. Mapa taxonómico de la cuenca del Río Ypané. **Fuente:** Atlas de Potencial Hidroenergético del Paraguay. Itaipu.2011.

Las características que se utilizaron para la estimación de varios parámetros de entrada al modelo HMS, que están asociados directamente al Orden Taxonómico son los siguientes:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla:3. Características del suelo de la cuenca del río Ypané. **Fuente:**PRUT

ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	TEXTURA
Alfisol	Udalf	Paleudalf	Mollic Paleudalf	Franco arenosa
Entisol	Orthent	Udorthent	Lithic Udorthent	Franco arenosa
	Psamment	Quartzipsamment	Typic Quartzipsamment	Arenosa
Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric Dystrochrept	Arenosa franca
				Arenosa
				Arcillosa muy fina
Ultisol	Udult	Paleudult	Arenic Rhodic Paleudult	Arenosa
			Franco arenosa	
	Typic Paleudult	Rhodudult	Typic Rhodudult	Arenosa franca
				Franco arenosa
Mollisol	Udolt	Hapludoll	Lithic Hapludoll	Franco arenosa

Los **suelos** que predominan en la región de la **Cuenca del Río Jejuí** son; del tipo **ultisol (58,40%)**, los cuales se desarrollan en condiciones de clima cálido y tropical. Sus horizontes sub superficiales son, por lo general, de color rojo o amarillo, como resultado de las acumulaciones de óxidos de hierro. Otros tipos de suelo, son el **alfisol (32,10 %)** que es propio de regiones húmedas. Sus características principales son: horizonte superficial de gris a pardo, contenido en bases medio o alto y zona de acumulación de arcillas. El inceptisol y entisol se encuentran en porcentajes muy bajos.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

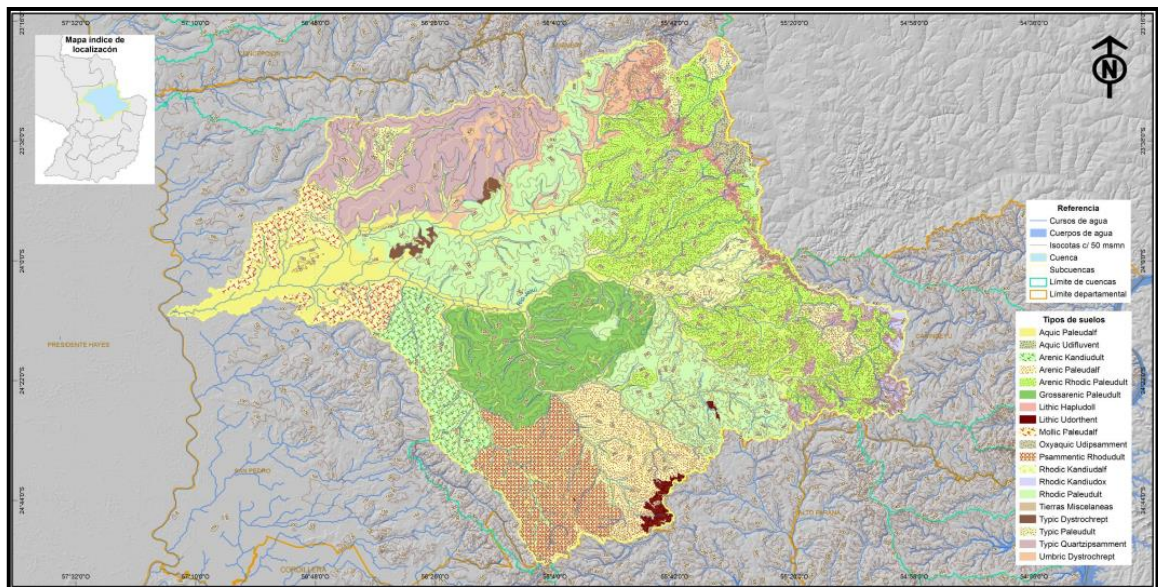


Figura: 31. Mapa taxonómico de la cuenca del Río Jejuí. **Fuente:** Atlas de Potencial Hidroenergético del Paraguay. Itaipu. 2011

Las características que se utilizaron para la estimación de varios parámetros de entrada al modelo HMS, que están asociados directamente al Orden Taxonómico son los siguientes:

Tabla: 4. Características del suelo de la cuenca del río Jejuí. **Fuente:** PRUT.

ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	TEXTURA
Alfisol	Udalf	Paleudalf	Mollic Paleudalf	Franco arenosa
			Aquic Paleudalf	Franco Gruesa
			Aquic Paleudalf	Franco arenosa
Entisol	Typic Quartzipsamment	Quartzipsamment	Typic Quartzipsamment	Arenosa Franca
Inceptisol		Dystrochrept	Typic Dystrochrept	Arenosa Franca
Ultisol	Udult	Paleudult	Grossarenic Paleudult	Franco Arenosa
		Kandiudult	Arenic Kandiudult	Arenosa
		Paleudult	Rhodic Paleudult	Franco Gruesa
		Quartzipsamment	Grossarenic Paleudult	Arenosa

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

3.6.4 División en subcuencas.

Dada la delimitación de la cuenca, la red de drenaje y la topografía, se usó como criterio principal la discretización agrupada, teniendo en cuenta el orden de los ríos, se ha determinado la subdivisión de la cuenca del **Río Ypané**; en nueve subcuencas cuyas superficies se encuentran en el rango de 639 – 1.662 km²;

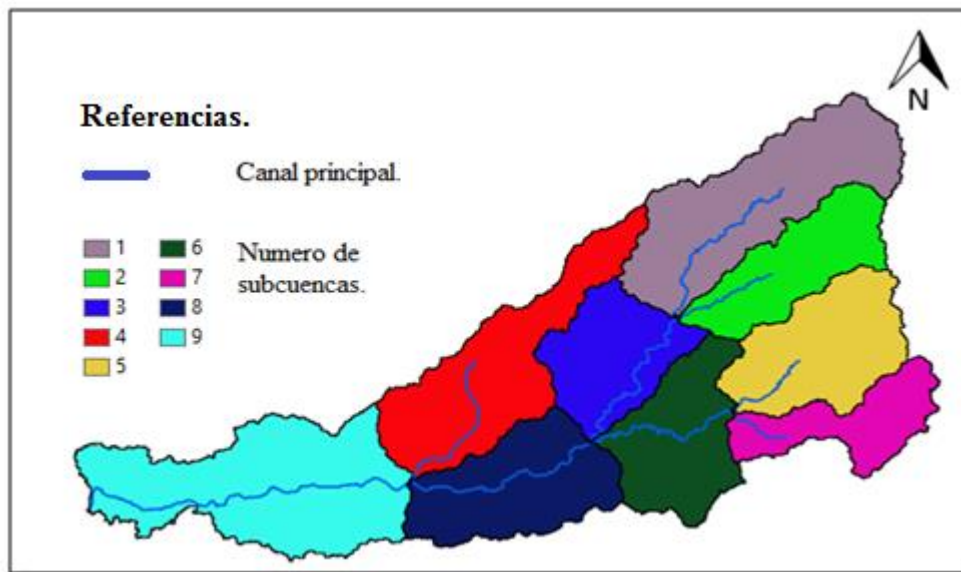


Figura: 32.División en subcuencas. **Fuente:** Elaboración propia

La cuenca del **Río Jejuí** se subdividió en once subcuencas, con un rango de superficie de 62,289 a 4.907 km².

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

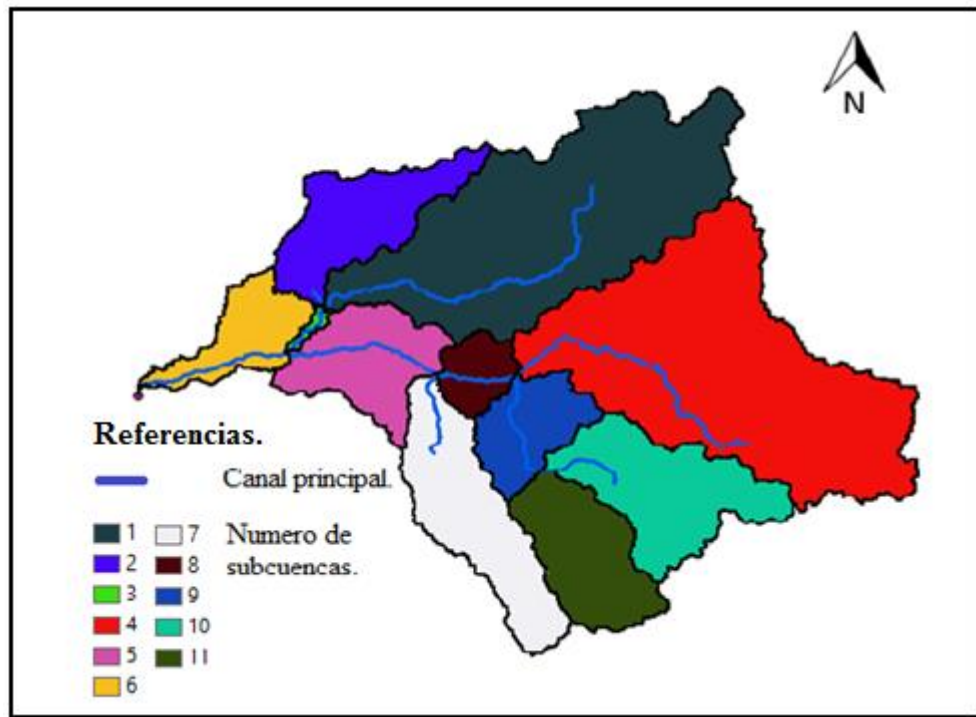


Figura: 33.División en subcuencas. Fuente: elaboración propia.

En cada una de las cuencas existe un único punto de salida del agua que generará los correspondientes hidrogramas de caudal.

3.6.5 Modelo conceptual del sistema en HEC-HMS.

Se generó el modelo conceptual que se representa en las Figuras 31 y 32. Determinando las características fisiográficas esenciales de los sistemas, área de las subcuencas y longitud de los tramos de los cauces de ríos.

En el modelo conceptual se indican los elementos por los cuales estará compuesto el sistema:

-Subcuenca: representa a cada unidad de subcuenca en donde se ingresa los parámetros asociados al modelo de pérdidas, transformación y caudal base.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

-**Junction**: representa a los nodos del sistema real y son utilizados para sumar los hidrogramas generados en dos subcuencas sucesivas.

-**Reach**: representa el tramo de un cauce en donde se introducirán los parámetros asociados al modelo de tránsito de hidrogramas. Este elemento une dos nodos consecutivos.

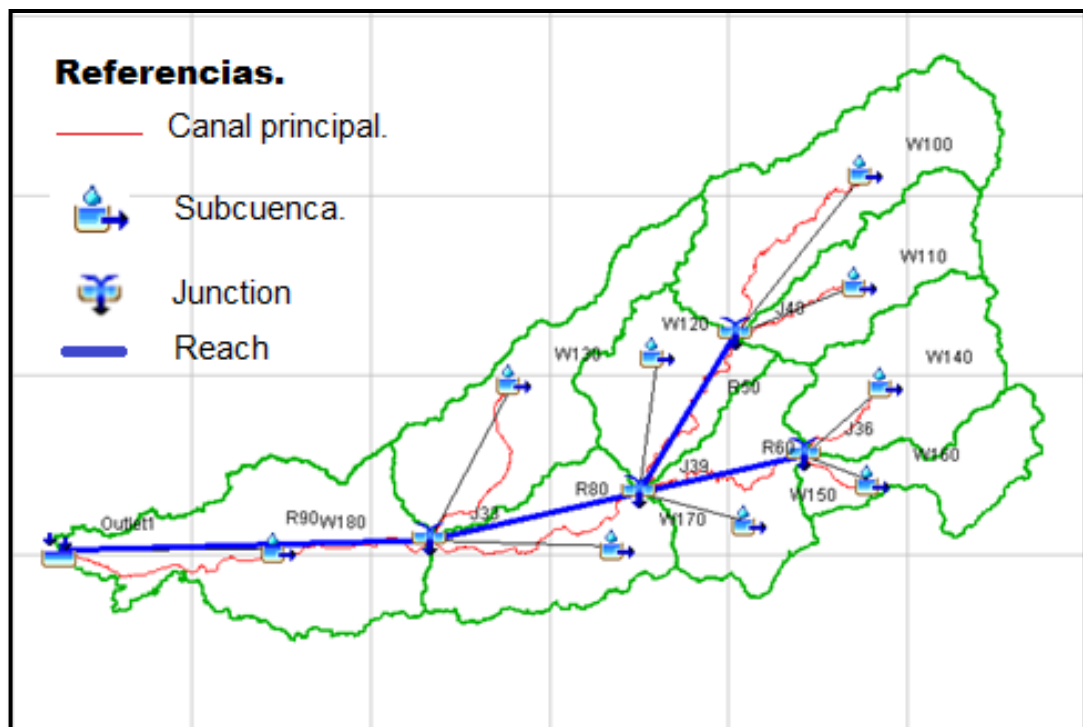


Figura: 34.Modelo conceptual de la Cuenca del río Ypané en HEC-HMS. **Fuente:** Elaboración propia

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

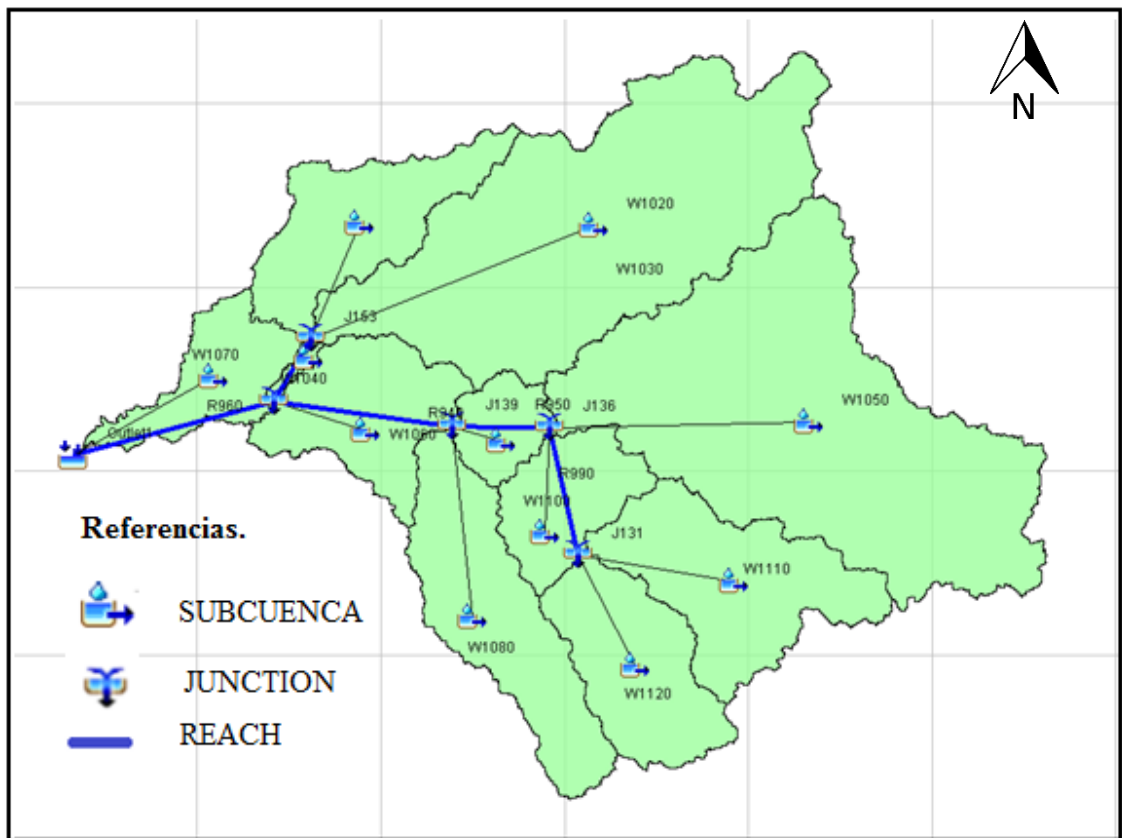


Figura: 35. Modelo conceptual de la Cuenca del río Jejuí en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.

3.7. Estimación de parámetros.

La estimación de los parámetros de entrada al modelo se realizó, siguiendo algunos criterios empíricos, aplicados a diversos estudios similares, por lo que cabe aclarar que los valores obtenidos son sometidos posteriormente a un proceso de ajustes manual y automático.

Para la modelación de los procesos hidrológicos que se desarrollan en cada subcuenca hay que establecer los valores de 18 parámetros: 12 pertenecientes al modelo SMA; 2 pertenecientes al modelo de Clark; y 4 pertenecientes al modelo de depósitos lineales utilizados para representar el flujo base, a los que hay que añadir otros 5 valores, correspondientes a los contenidos iniciales de los depósitos de almacenamiento de agua que intervienen en el modelo SMA.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Como base para la estimación de algunos parámetros, fue necesaria la aplicación del Soil Water Characteristics, SoilGrids; el uso de diversas fuentes de información bibliográficas, y fórmulas desarrolladas empíricamente.

3.7.1 Parámetros del Soil Moisture Accounting.

3.7.1.1 Retenciones por la vegetación (Canopy): Para determinar las abstracciones iniciales de la intercepción por cobertura vegetal (hojas, tallos y troncos) y almacenamiento en depresiones, debido a que no se cuenta con mayor información al respecto de la cuenca de estudio, se utilizaron como base los valores de almacenamiento e intercepción propuestos por Vélez et al,(2009).

Mediante inspección visual de las imágenes satelitales disponibles a través de Google Earth, se obtuvo el porcentaje de superficie ocupada por la vegetación (Zonas boscosas) y el uso del suelo (Zonas agrícolas) en el conjunto de cada subcuenca; posteriormente se utilizaron los valores indicados en las tablas 5 y 6 para determinar un valor ponderado para cada subcuenca.

En la Tabla 5, se muestran los valores asignados de almacenamiento e intercepción para el caso de estudio.

Tabla: 5. Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal (Almacenamiento e intercepción). **Fuente:** Vélez et al, 2009

Descripción	Almacenamiento (mm)	Intercepción (mm)
Bosque	4,5	9
Pastos o hierbas	6	3
Suelos desnudos	1	0
Urbano alta densidad	5	1
Urbano baja densidad	3	2
Agua	0	0

Tabla: 6. Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal (almacenamiento e intercepción). **Fuente:** Vélez et al, 2009.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tipo de vegetación	Almacenamiento (mm)	Intercepción (mm)
Bosque perenne de hoja delgada	4	9
Bosque caducifolio de hoja ancha	4.5	12
Bosque de sabana	4	4
Prado	4	3
Tierra de cultivo	6	3
Urbano	2	0
Cultivos/vegetación natural	6	4
Agua	0	0

Para este trabajo se optó solo por tener en cuenta; la retención en zonas agrícolas (3 mm) y zonas boscosas (9 mm). Las tablas con los valores calculados se encuentran en **ANEXO 6.1**

3.7.1.2 Retenciones de superficie (Surface): Según el criterio de Francés y Múnera, (2008), “que establece que los terrenos completamente horizontales pueden almacenar hasta 10 mm de lluvia, y se reduce con una tasa constante de 1,3 mm por cada unidad porcentual, hasta llegar a ser nulo para pendientes mayores al 8%.” Fueron determinadas las abstracciones por irregularidades del terreno que generan charcos, relacionadas directamente con la pendiente del terreno.

Máxima Tasa de Infiltración: En vista a que este parámetro depende de la textura del suelo y del grado de pronunciación de la pendiente, se utilizará el criterio de Gaete y Vergara, especificado en el “Manual de diseño de Sistemas de Riego Tecnificado” (2001).

Este criterio de estimación fue seleccionado porque permite estimar la Capacidad de Infiltración en función a la textura del suelo, y posteriormente aplicar un factor de corrección en función a la pendiente de la superficie (Tabla: 7). Sin embargo, es importante tener en cuenta que la tasa máxima de infiltración también depende de otros factores que son ignorados, como el uso de suelo, que en este caso es predominantemente agrícola.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Dentro de la clasificación “agrícola”, la capacidad de infiltración también puede variar en función al tipo de cultivo y a la cantidad de materia orgánica presente en los campos.

Tabla 7: criterio de estimación de máxima infiltración según textura y pendiente del suelo.

Textura	Capacidad de infiltración	Pendiente	Coefic. De disminución
Franco arenosa	12	<5	0
Arenosa franca	30	5 a 8	20
Arenosa	20	9 a 12	40
Arcilla muy fina	2,5	13-20	60
		>20	75

Los valores calculados para las cuencas estudiadas se encuentran en **ANEXO 6.2**

3.7.1.3 Capas Superficiales del SMA: los parámetros solicitados por el método de contabilidad de humedad del suelo (Soil Moisture Accounting) fueron posibles estimar; con los datos de textura de suelo, materia orgánica (datos del PRUT y SoilGrids), y la utilización del software Soil Water Characteristics (SWC).

Los datos disponibles de textura, materia orgánica y espesor se dan como sigue:

- **Para la Cuenca del Río Ypané**

Tabla: 8. Texturas de suelos. Fuente: PRUT.

W	ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	TEXTURA	ESPESOR	MO
100	Entisol	Orthent	Udorthent	Lithic Udorthent	Franco arenosa	500	1,7
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric Dystrochrept	Arenosa franca	500	2
110	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric Dystrochrept	Arenosa	500	2
	Utiisol	Udult	Paludult	Typic paleudult	Arenosa franca	500	2,5
	Entisol	Orthent	Udorthent	Lithic Udorthent	Franco arenosa	500	1,7

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

120	Ultisol	Udult	Paleudult	Arenic RhodicPaleudult	Arenosa	600	2,5
				TypicPaleudult	Arenosa franca	500	2,5
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	UmbricDystrochrept	Arenosa franca	500	2
130	Ultisol	Udult	Paleudult	Arenic Rhodic Paleudult	Franco arenosa	700	1,5
		Typic paleudult	Rhodudult	Typic Rhodudult	Franco fina	500	3
	Entisol	Psamment	Quartzipsamment	Typic Quartzipsamment	Arenosa	600	1,5
140	Utilsol	Udult	Paludult	Typic paleudult	Arenosa franca	500	2,5
	Mollisol	Udolt	Hapludoll	Lithic Hapludoll	Franco arenosa	500	3
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric dystrochrept	Arenosa franca	600	2
150	Ultisol	Udult	Paludult	Typicpaleudult	Franco arenosa	600	2,5
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric dystrochrept	Arenosa franca	500	2
160	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbric dystrochrept	Arcillosa muy fina	180	3
	Ultisol	Udult	Paleudult	Rhodic paleudult	Franco arenosa	700	1,2
				Typic paleudult	Arenosa franca	500	2,5
170	Ultisol	Udult	Paleudult	Typic Rhodudult	Franco fina	600	1,2
			Paleudult	Arenic Rhodic Paleudult	Franco arenosa	700	1,2
180	Ultisol	TypicPaleudult	Rhodudult	Typic Rhodudult	Franco fina	500	3
		Udult	Paleudult	Rhodic Paleudult	Franco arenosa	700	1,2
	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Mollic Paleudalf	Franco arenosa	650	1,5

- Para la Cuenca del Río Jejuí

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla 9: Textura de suelos. **Fuente:** PRUT

W	ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	TEXTURA	M O (%)	ESPE SOR
1070	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Mollic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
1030	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Francosa Gruesa	1,2	600
	Ultisol	Udult	Paleudult	Rhodic Paleudult	Francosa arenosa	2	500
1040	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
1020	Inceptisol		Dystrochrept	Umbric Dystrochrept	Arenosa franca	2	180
	Ultisol	Udult	Paleudult	Rhodic Paleudult	Francosa gruesa	1,5	700
	Entisol	Typic Quartzipsarment	Quartzipsarment	Typic Quartzipsarment	Arenosa franca	1,5	250
	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquicpaleudalf	Franco arenosa	1,2	500
1080	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
	Ultisol		Rhodudult	Psammentic Rhodudult	Arenosa franca	1,2	500
1050	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
	Ultisol	Udult	Paleudult	Arenic Rhodic Paleudult	Francosa gruesa	1,5	650
1110	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
	Ultisol	Udult	Paleudult	Rhodic Paleudult	Francosagruesa	1,5	700
1120	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Arenic Paleudalf	Arenosa	1,2	700
	Ultisol		Rhodudult	Psammentic Rhodudult	Arenosa Franca	1,2	600
1100	Ultisol	Udult	Paleudult	Grossarenic Paleudult	Arenosa	2,5	550
1060	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
	Inceptisol		Dystrochrept	Typic Dystrochrept	Arenosa franca	2,5	500
	Ultisol	Udult	Kandiudult	Arenic Kandiudult	Arenosa	1,2	750

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1090	Alfisol	Udalf	Paleudalf	Aquic Paleudalf	Franco arenosa	1,2	500
	Ultisol	Udult	Paleudult	Grossarenic Paleudult	Franco arenosa	2	500

Con el **SWC** se estima la conductividad hidráulica del suelo, la capacidad de campo y la saturación del suelo, mediante el porcentaje de arcilla, arena y la materia orgánica de cada tipo de suelo.

En ausencia de mejor información, la “Máxima Tasa de Percolación del Suelo (mm/hr)” solicitada por el SMA, es asumida como igual a la Conductividad Hidráulica vertical de la superficie del suelo.

Por otra parte, los parámetros “almacenamiento del suelo (mm)” y “zona de tensión (mm)” son asumidos como la saturación y la capacidad de campo (proporcionados por el SWC), respectivamente.

Siguiendo esta metodología se obtienen los valores para cada tipo de suelo de ambas cuencas. **ANEXO 6.3**

3.7.1.4 Capas Subterráneas del SMA.

Las capas subterráneas del subsuelo requieren 6 (seis) parámetros, 3 (tres) parámetros incorporados al primer acuífero y 3 al segundo. Los parámetros estimados son la Capacidad de Almacenamiento (mm) y el Coeficiente (Hr) de respuesta de los dos acuíferos. Estos valores se estiman a partir del uso del SoilGrids que nos da los porcentajes de arena y arcilla, para espesores de 1 metro (1000 mm.) para el almacenamiento subterráneo 1(GW1) y 2 metros (2000mm.) para el almacenamiento subterráneo (GW2), luego con el SWC se estima la conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitamiento y saturación.

Según definiciones:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Capacidad de campo: Se refiere al contenido de agua en el suelo cuando, toda el agua gravífica del suelo saturado ha sido drenado.

Punto permanente de marchitez: Se refiere al contenido de agua de un suelo, cuando ha perdido toda su agua a causa del cultivo o plantas y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo.

Capacidad disponible de agua: Es la cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas y se encuentra entre la Capacidad de Campo y el Punto Permanente de Marchitez. Esta definición se refiere desde el punto de vista agronómico.

En el modelo hidrológico, sin embargo, la capacidad de almacenamiento del suelo es definida como capacidad de absorber el agua de lluvia generando poco o ninguna escorrentía superficial. En consecuencia de esto, la mejor estimativa de la capacidad de almacenamiento para el modelo hidrológico es la diferencia, para el mismo tipo de suelo, entre el contenido de humedad de suelo saturado y el punto de marchitez permanente

Siguiendo esta metodología se obtienen los valores para el GW1 y GW2 de acuerdo al tipo de suelo, para las cuencas estudiadas. **ANEXO 6.4**

3.7.1.5 Promedio Mensual de Evapotranspiración:

Como se mencionó anteriormente el método seleccionado para obtener los promedios mensuales es el de Thornthwaite (EEUU, 1948).

Los datos de temperatura del aire fueron obtenidos de las estaciones de: San Pedro, San Estanislao y Concepción, a partir de los cuales se elaboraron los promedios correspondientes a cada mes. **ANEXO 6.6**

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 10. Promedio mensual de Evapotranspiración. **Fuente:** Elaboración propia.

EVT San Pedro		EVT Santaní		EVP	
Enero	176,9	Enero	183,1	Enero	185,23
Febrero	142,6	Febrero	139,4	Febrero	162,37
Marzo	123,8	Marzo	118,6	Marzo	129,02
Abril	81,3	Abril	88,3	Abril	86,46
Mayo	60,7	Mayo	55,3	Mayo	62,91
Junio	45,4	Junio	44	Junio	44,13
Julio	43,3	Julio	46,5	Julio	45,65
Agosto	36	Agosto	36,1	Agosto	39,29
Septiembre	70,3	Septiembre	74,1	Septiembre	80,74
Octubre	102,4	Octubre	112,3	Octubre	115,62
Noviembre	135,2	Noviembre	146,3	Noviembre	145,58
Diciembre	180,1	Diciembre	188,8	Diciembre	187,83

3.7.1.6 Parámetros del Hidrograma Unitario de Clark.

Como se mencionó, se utilizó la fórmula empírica de Kirpich (1940), teniendo en cuenta la trayectoria de flujo más larga en cada subcuenca y la pendiente media asociada a dicha trayectoria, la pendiente calculada y utilizada es la pendiente 10/85

Utilizando la ecuación 3, tenemos que el coeficiente R tiene un valor de 2,8 y k tiene un valor de 0,73.

Para la Cuenca del Río Ypané tenemos:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

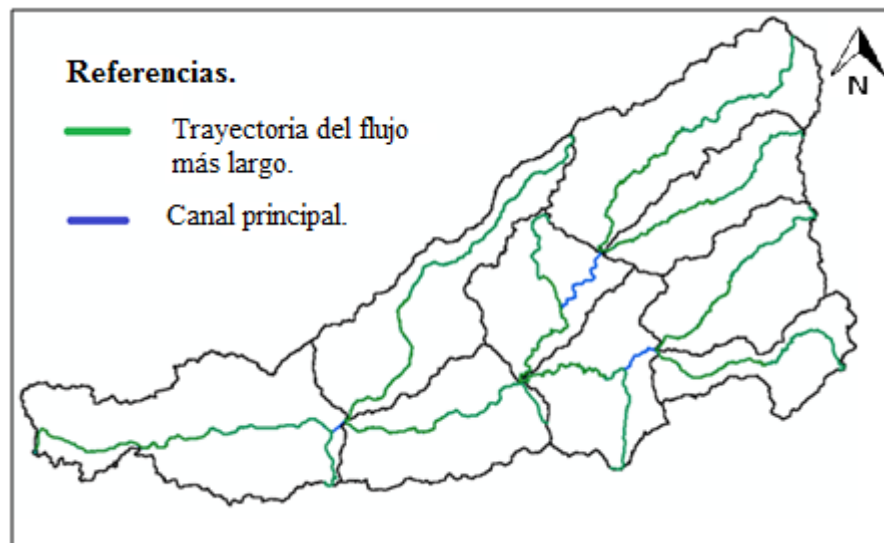


Figura: 36: Trayectoria del flujo más largo. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla: 11. Estimación de Tiempo de concentración.

W	L	S	$S^{0.385}$	$L^{0.77}$	TC	$R(TC^{*2.8})$
180	102108.58	0.002	0.09	25.49	37.16	104.05
130	73305.20	0.002	0.09	20.21	29.94	83.83
170	66507.68	0.003	0.10	18.88	23.83	66.73
120	113468.11	0.002	0.10	27.44	37.61	105.32
150	67260.35	0.007	0.14	19.03	17.44	48.83
100	71453.99	0.005	0.13	19.85	19.92	55.77
110	71491.85	0.003	0.11	19.86	23.55	65.95
140	69847.67	0.004	0.11	19.54	22.68	63.50
160	111168.59	0.002	0.09	27.05	39.45	110.47

Para la cuenca del Río Jejuí tenemos;

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 12. Estimación del Tiempo de Concentración.

W	S	$S^{0.385}$	L	$L^{0.77}$	TC	R (TC*2.8)
1070	0.001	0.06	79.10	28.95	64.43	193.30
1030	0.002	0.08	95.43	33.45	52.24	156.72
1040	0.001	0.06	26.80	12.58	29.05	87.15
1020	0.002	0.09	209.55	61.29	92.79	278.37
1080	0.001	0.07	117.87	39.35	73.08	219.24
1050	0.001	0.06	197.62	58.59	135.05	405.14
1110	0.001	0.06	112.98	38.09	81.33	244.00
1120	0.001	0.07	73.18	27.26	48.95	146.86
1100	0.002	0.09	52.44	21.09	29.96	89.89
1060	0.001	0.08	71.88	26.89	46.05	138.16
1090	0.003	0.10	36.02	15.79	20.85	62.54

3.7.1.7 Parámetros del Reservorio Lineal.

Teniendo en cuenta la ausencia de datos, los coeficientes de los acuíferos solicitados en este método serán asumidos como iguales a los coeficientes determinados para el método de pérdidas.

3.7.1.8 Parámetros del modelo Muskingum Cunge (8 puntos).

Se establecieron áreas transversales de los ríos por medio de Google Earth, utilizando la herramienta; mostrar perfil de elevación, para caracterizar los 8 puntos del modelo Muskingum cunge. Esta metodología se siguió para cada tramo de ambas cuencas.

En la **cuenca del Río Ypané** tenemos que la profundidad de canal asumida fue de 2 metros, para el primer canal colector aguas arriba, aumentando progresivamente en los siguientes tramos, alcanzando los 6 metros para el último canal aguas abajo.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 13. Parámetros solicitados del método Muskingum-Cunge.

Río Ypané					
Tramo	Longitud	Pendiente media	Manning Canal	Manning Lado Derecho	Manning Lado Izquierdo
1	333	0,00003	0,04	0,04	0,035
2	128	0,00002	0,04	0,04	0,035
3	315	0,000012	0,04	0,35	0,35
4	300	0,000029	0,04	0,1	0,1

Para la **cuenca del Río Jejuí** se obtuvo una profundidad mínima del canal de 5 metros; aumentando en los siguientes tramos hasta alcanzar una profundidad máxima de 9 metros.

Las Secciones transversales de los tramos se encuentran en el ANEXO 6.6.

Tabla: 14. Parámetros solicitados del método Muskingum-Cunge.

Río Jejuí					
Tramo	Longitud	Pendiente media	Manning Canal	Manning Lado Derecho	Manning Lado Izquierdo
1	260	0,00047	0,04	0,04	0,04
2	232	0,000314	0,04	0,08	0,08
3	347,6	0,000395	0,04	0,08	0,08
4	263	0,000365	0,04	0,04	0,035
5	132	0,000404	0,04	0,04	0,04

A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, Cowan desarrolló un procedimiento para estimar el valor de n. Mediante este procedimiento, el valor de n puede calcularse por

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$$

Ecuación 7

Donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse al n_1 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales. n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerarlas obstrucciones, n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo, y m_5 es un factor de corrección

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

de los efectos por meandro en el canal. Los apropiados de n_0 a n_4 y m_5 pueden seleccionarse en la **Tabla: 15**, de acuerdo con las condiciones dadas (Chow, 1959)

Tabla: 15. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación 6. Fuente: Chow, 1959.

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variación de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	n_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

3.8. Distribución de la Precipitación.

La precipitación media en una zona o en una cuenca es motivo de considerable interés en el diseño hidrológico y su correcta evaluación es muy importante en la modelación de los procesos de lluvia y escorrentía, tanto en modelos de pronóstico como en diseño.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Según sean las necesidades del estudio, puede usarse el valor de la precipitación media anual, mensual, diaria o de una tormenta distribuida sobre un área. En el caso de tormentas individuales y con el uso, hoy generalizado, de modelos matemáticos de lluvia-caudal, es frecuente usar el método de asignar un peso a cada estación.(Fattorelli&Fernández, 2002).

El método seleccionado en el programa HEC-HMS fue el Inverso de la Distancia, ya que es el recomendado para modelos de simulación operativa; tiene la ventaja que al tener estaciones con datos históricos faltantes al momento de la simulación, utiliza todas las estaciones que se encuentren en el radio de influencia de 150 metros (radio adoptado para las dos cuencas). Se tomó ese radio para que se incluyan todas las estaciones, ya que el propio método se encarga de establecer un peso inversamente proporcional a la distancia de cada estación.

Para la estimación de la precipitación por subcuenca por el método del inverso de la distancia; la distancia es calculada a partir del centroide de la subcuenca hasta cada pluviómetro que ingresa en el radio de influencia establecido.

Tabla: 16. Centroides para cada subcuencas. **Fuente:** Elaboración propia

CENTROIDE		
W	Latitud	Longitud
180	-23,44358836430	-57,05197606900
170	-23,44105961830	-56,48104179210
160	-23,29198908350	-55,73360889130
150	-23,33140853890	-56,11130618280
140	-23,12882483000	-55,79188031670
130	-23,17361976720	-56,52492252260
120	-23,14844708390	-56,26458976390
110	-22,93940320420	-55,85419916350
100	-22,79781156370	-55,94067471090

La siguiente tabla corresponde a los centroides de la Cuenca del río Jejuí,

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 17. Centroides para cada subcuencas. **Fuente:** Elaboración propia

W	Latitud	Longitud
1020	-23,69369768640	-56,04900002490
1030	-23,69212377730	-56,59845365710
1040	-24,00011201820	-56,74497638690
1050	-24,11204253700	-55,54264610230
1060	-24,09808385890	-56,58061519370
1070	-24,02222256420	-56,94084279220
1080	-24,53256915230	-56,26597408070
1090	-24,12734763690	-56,26361336620
1100	-24,28371434980	-56,10858605150
1110	-24,45637875200	-55,71507797810
1120	-24,64109547530	-55,94394499280

3.9. Estimación de caudales sintéticos

Como se mencionó anteriormente se utilizó el método Área Pendiente (Ecuación 4) para estimar los caudales de ambas cuencas y obtener la curva altura- caudal (H-Q).

Para las características geométricas de la sección transversal del canal se estimo de la siguiente manera;

- **Área:** se seleccionó el área trapezoidal, por ser el que mejor caracteriza el canal. (Figura: 29);

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

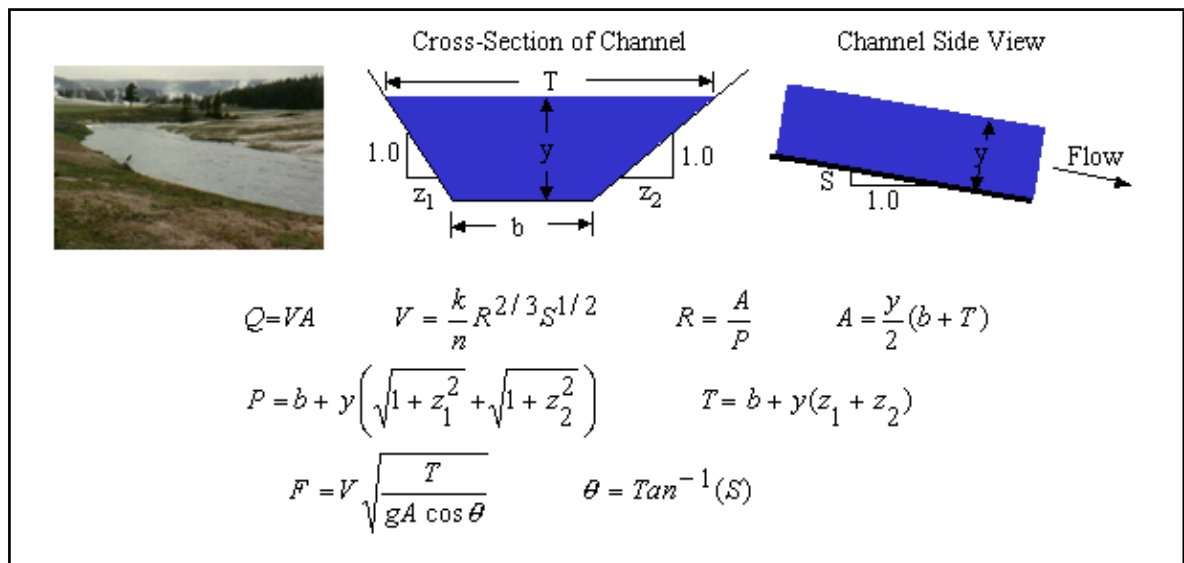


Figura: 37. Área trapezoidal del canal.

-Ancho del canal; se obtuvo por medio de inspección visual de imágenes satelitales Google Earth. **ANEXO 6.5**

-La rugosidad de Manning fue extraída del libro, Hidráulica de canales abiertos, (Chow, 2004). Para las cuencas estudiadas se utilizó la rugosidad de Manning $n= 0,035$, Tabla 15.

-Excel; Los caudales sintéticos medios se estimaron mediante la optimización de los parámetros en la ecuación de Manning teniendo en cuenta la sección en el lugar de medición de los niveles en régimen permanente, y tomando como datos de control los caudales obtenidos en el Proyecto: “Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay (RHPY)”, (Tabla: 20). Los cálculos se encuentran en **Anexo 6.5**

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 18. Caudales sintéticos del Rio Ypané.

	Sintético RHPY	Sintético Tesis
Mes	Q1	Q2
Enero	63,37	78,63
Febrero	62,43	72,31
Marzo	64,91	70,26
Abril	69,37	59,08
Mayo	78,31	85,69
Junio	77,40	63,45
Julio	69,74	53,35
Agosto	57,37	48,65
Septiembre	57,20	53,42
Octubre	70,80	63,56
Noviembre	73,71	71,91
Diciembre	65,60	89,94
Caudal promedio	67,52	67,52

3.10. Evaluación de los parámetros estimados.

Los modelos continuos por su diseño tienen numerosos parámetros, la mayoría de los cuales se deben evaluar por calibración basado en registros históricos de lluvia – caudal o de temperaturas – caudal.

Se realiza una primera simulación en el periodo asignado para los ajustes de parámetros. Para la cuenca del Ypané se simuló desde 1976 hasta 1984 y en la cuenca del Río Jejuí se simuló desde 1983 hasta 1991 con datos históricos del Anuario Hidrológico de la ANNP, se seleccionaron estos periodos de acuerdo a la consistencia de los datos.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

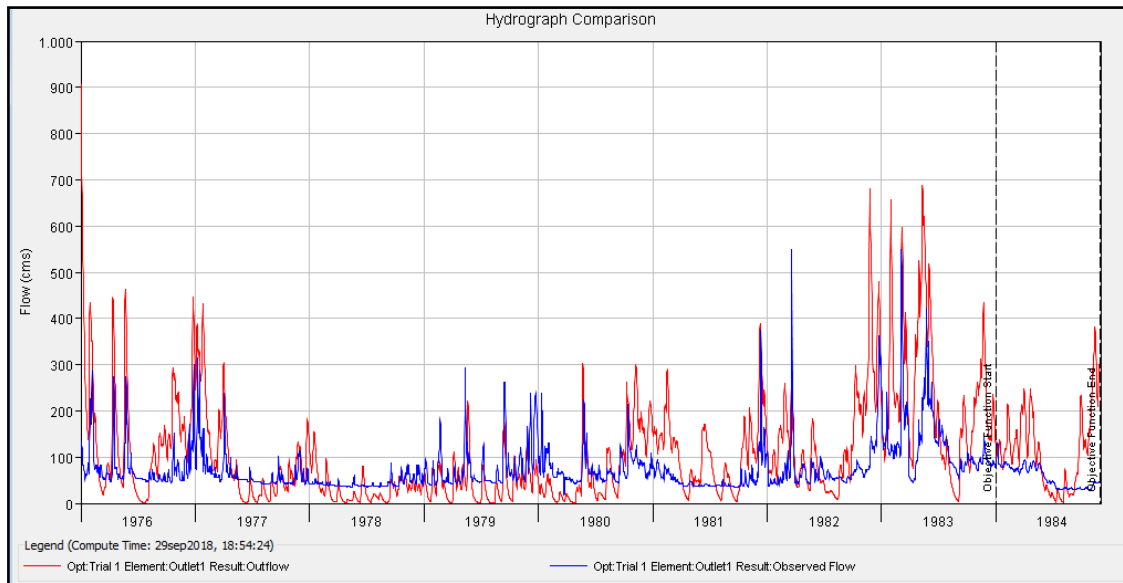


Figura: 38. Simulación de la cuenca del Río Ypané, periodo 1976-1984.

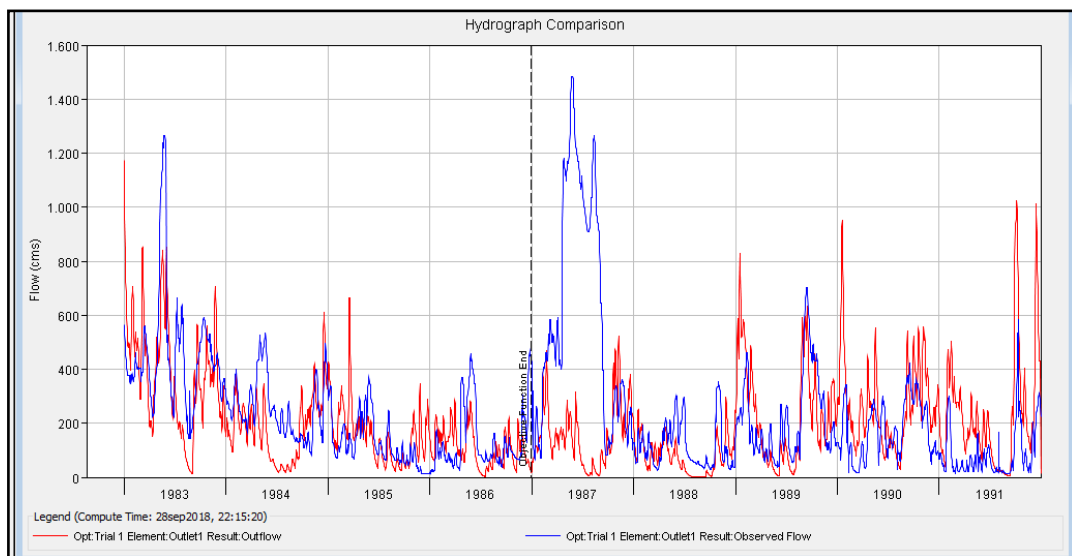


Figura: 39. Simulación de la cuenca del Río Jejuí, periodo 1983-1991.

Se observa en ambos hidrogramas, que existe una sobre estimación, ya que se tienen picos mayores al del observado, la sobre estimación se encuentra en el rango de 310 - 358,5 m³/seg.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

En cuanto al volumen total escurrido, tenemos una diferencia porcentual con respecto al hidrograma sintético (observado) de 17,96 % o de 675 mm, para el Río Jejuí y para el Río Ypané 49,37% o 1099 mm.

Considerando solo la forma del hidrograma simulado, se tienen periodos donde coincide con el hidrograma observado, por lo que el modelo acompaña al hidrograma observado.

Hay que tener en cuenta que los caudales observados son caudales sintéticos, elaborados con datos históricos, ya que no se cuenta con datos actuales de medición de caudales y niveles.

Es frecuente tratar con cuencas o áreas con escasas o ninguna información, donde la matemática y sobre todo la estadística desarrollada basada en el análisis de buenas series históricas de lluvias y/o caudales, se deben sustituir por métodos eficaces, que usan pocos datos y las razones del hidrólogo. Estos métodos tienen mucho de ciencia y técnica, pero para obtener resultados “sensatos” se requiere de mucho de arte (Loague et al, 1985).

“En la estimación de caudales de diseño en cuencas sin aforos el analista, usará ecuaciones y modelos que sólo incluyen parámetros que puedan obtenerse de datos físicos de la cuenca o de extrapolación de cuencas vecinas con datos. Frecuentemente, la solución es el resultado de una combinación de ambos factores”. (Fattorelli & Fernández).

Los parámetros de los modelos sintéticos de lluvia - caudal están basados en datos físicos de las cuencas. En el caso de tránsito de crecientes se deben usar métodos como Puls Modificado, basado en la estimación del coeficiente de Manning y la relación de almacenamiento en canal contra descarga, determinada con secciones transversales y perfil del cauce. (Fattorelli & Fernández).

En la calibración de toda la cuenca se deben controlar entre hidrogramas observados y calculados lo siguiente:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

- Coincidencia de tiempos, de caudales máximos, de volúmenes y de la forma general del hidrograma. Resulta generalmente difícil obtener todas estas coincidencias simultáneamente, por lo tanto se debe priorizar una u otra según sea el objetivo del estudio.
- Tiempo en que se produce el pico en operaciones en tiempo real.
- Caudales máximos en diseños de canales y estructuras de paso.
- Volúmenes y forma del hidrograma en diseño o verificación del volumen de crecientes de embalses.

La calidad y densidad de estaciones, es factor fundamental en la calibración.

Durante la calibración, se presentan errores de volumen, ligados a malas estimaciones de la lluvia o de los parámetros de pérdidas en el suelo, o de ambos. Estos pueden ser:

- Errores en el pico relacionados con falsas estimaciones de áreas impermeables, de tiempos de concentración o coeficientes de almacenamiento de la cuenca.
- Errores en los tiempos relacionados con la distribución temporal de la lluvia o falsas estimaciones de la pérdida inicial.
- Errores en los tránsitos debidos a incorrectas estimaciones de los coeficientes de descarga (rugosidad) o valores no adecuados del almacenamiento en métodos hidrológicos (Muskingum).

3.11. Calibración del modelo.

La calibración de los modelos hidrológicos es un proceso iterativo en que los valores de los parámetros son modificados y sus efectos en los resultados son evaluados repetitivamente, hasta que el hidrograma calculado represente el hidrograma observado con buena precisión. Para ello, se utiliza la evaluación visual, verificando si los caudales calculados y observados tienen valores próximos en los máximos y mínimos, si la recesión del hidrograma está bien representada, si el valor del pico máximo está próximo al observado y si los picos de caudal calculado y observado están próximos. Adicionalmente, se utilizan las funciones objetivo, que procuran identificar la calidad del ajuste de hidrogramas (Tucci, 1998).

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

La experiencia con los modelos hidrológicos, concentrados o distribuidos, prueba que ninguna técnica de calibración y que ningún modelo llega a una perfecta co relación entre los valores calculados y observados. Existen errores en los valores calculados, en la estructura del modelo y en los parámetros obtenidos en la calibración (Haan, 1989) que resultan en una gran incerteza en los resultados calculados por el modelo.

En la calibración manual, el ajuste se evalúa considerando el análisis visual de los hidrogramas y verificando con los valores de la función objetivo siguiente:

Coefficiente Nash (R^2): tiene un valor máximo igual a 1, que corresponde a un ajuste perfecto entre caudales simulados y observados. El valor de R^2 está fuertemente influenciado por errores de caudales máximas, por esto, cuando es próximo a 1, el modelo está obteniendo un buen ajuste para los picos altos. El desempeño de un modelo es considerado adecuado y bueno si el valor de R^2 supera 0,75, y es considerado aceptable si el valor de R^2 queda entre 0,36 y 0,75 (Gotschalk y Motovilov, 2000).

Los periodos de calibración del modelo fueron seleccionados de acuerdo a la consistencia de los datos de precipitación y nivel hidrométrico disponible de las estaciones utilizadas. Para la cuenca del Río Ypané se tiene desde el 01/01/1974 hasta el 31/05/1987, para la cuenca del Río Jejuí se tiene desde el 13/08/1978 hasta el 31/12/1991, no presentan ausencia de datos en las estaciones utilizadas. Por lo tanto, los periodos seleccionados para trabajar en el HEC-HMS fueron los siguientes:

En la cuenca del Río Ypané se calibro: 1976-1984

En la cuenca del Río Jejuí se calibro: 1982-1985

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

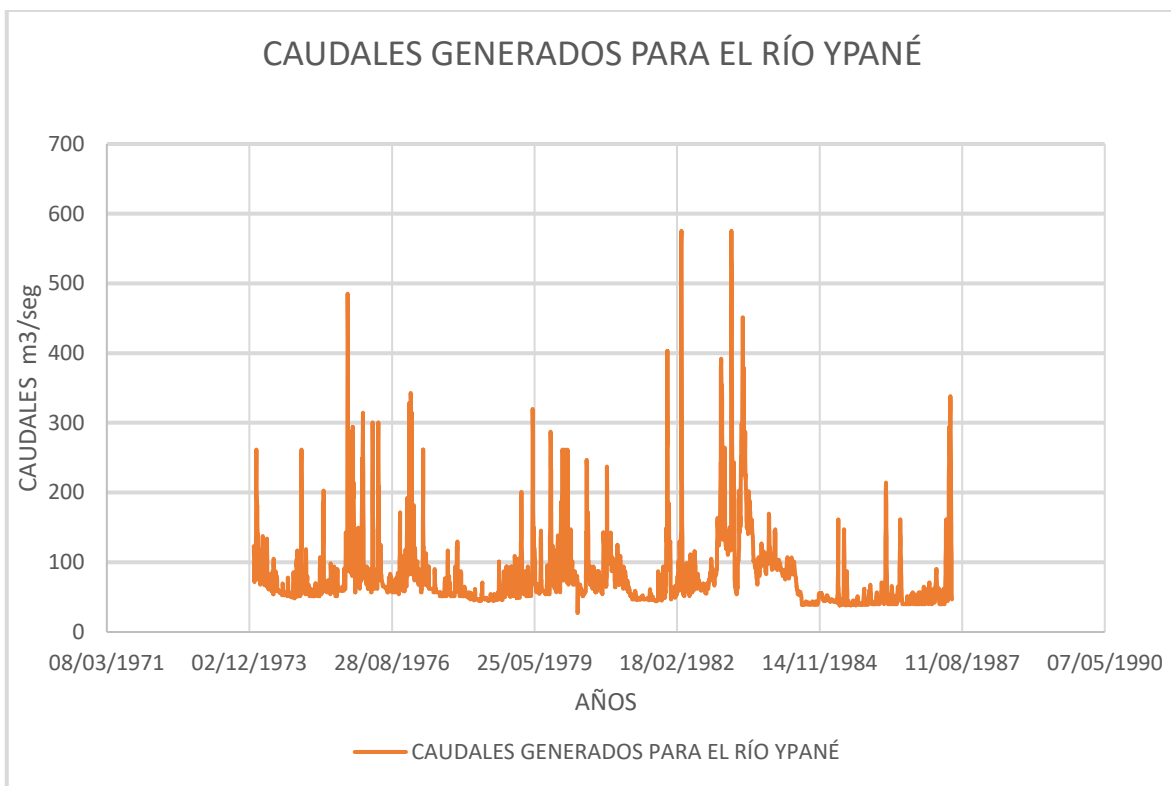


Figura: 40. Caudales generados por el método área pendiente. **Fuente:** Elaboración propia.

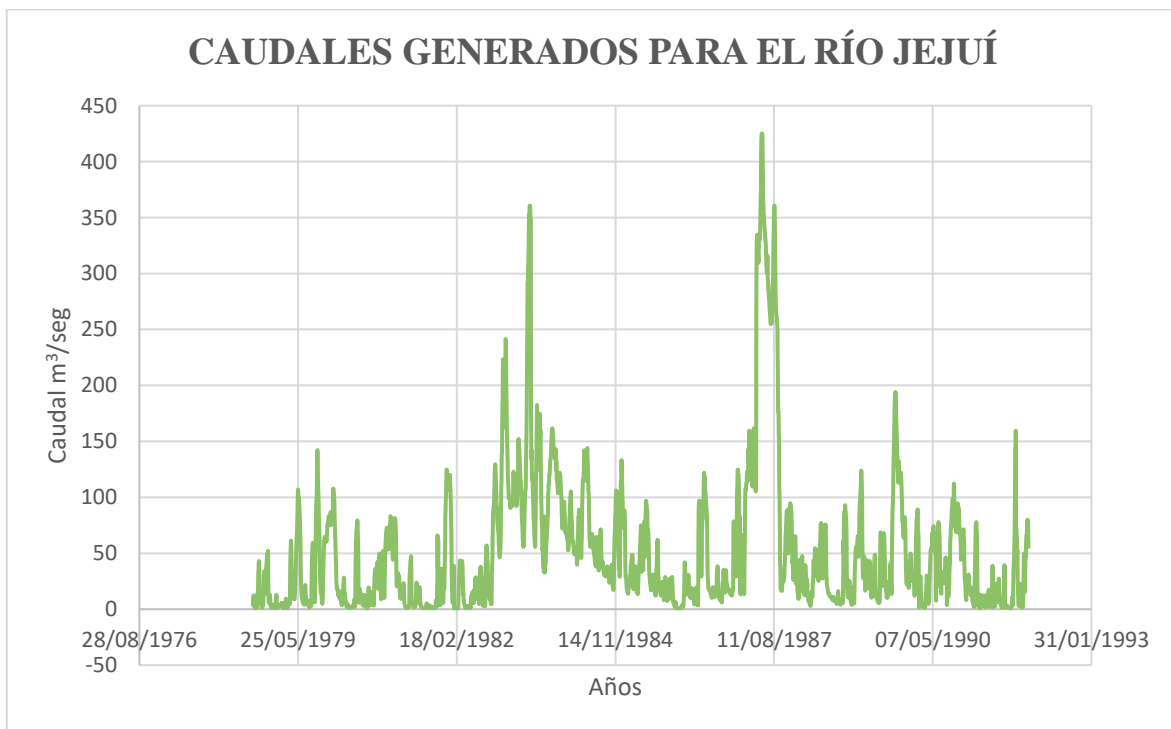


Figura: 41. Caudales generados por el método área pendiente. **Fuente:** Elaboración propia.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

En este trabajo, se realizó un análisis previo a la modificación de los parámetros. El análisis consiste en relacionar las características físicas de cada subcuenca con el hidrograma generado en cada una de ellas, lo cual permite tener una idea aproximada de cuál debería ser su comportamiento hidrológico relativo en lo referente al agua escurrida.

3.11.1 Análisis de las subcuencas teniendo en cuenta la textura del suelo.

Se analizó el hidrograma de la primera simulación por subcuencas para comprobar que el comportamiento hidrológico, concuerde con las características físicas, como textura de suelo y pendiente.

Teniendo en cuenta la textura:

Los suelos **arenosos/franco arenosos** en su superficie deberían generar hidrogramas con escorrentía superficial menor y caudal base mayor al de las subcuencas de texturas finas.

Los suelos de texturas finas como; la **arcillosa fina** tienen poca incidencia en el caudal base, debido a la baja infiltración de estos suelos.

En cuanto a la pendiente; se considera que cuanto mayor es la pendiente, generará escorrentía superficial, en este estudio ambas subcuencas no poseen pendientes medias relativamente altas (>7 %).

En las siguientes tablas se encuentran las texturas y pendientes de las cuencas estudiadas;

Para la cuenca del Río Ypané tenemos;

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 19. Textura por subcuenca del Río Ypané

W	Textura	Pendiente
100	Franco arenosa	6,3
	Arenosa franca	
110	Arenosa	6,4
	Arenosa franca	
	Franco arenosa	
120	Arenosa	4
	Arenosa franca	
130	Franco arenosa	3,4
	Francosa fina	
	Arenosa	
140	Franco arenosa	6,1
	Arenosa franca	
150	Franco arenosa	4,5
	Arenosa franca	
160	Arcillosa muy fina	5
	Franco arenosa	
	Arenosa franca	
170	Francosa fina	3,3
	Franco arenosa	
180	Francosa fina	2,1
	Franco arenosa	

Para la cuenca del Río Jejuí se obtuvo;

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 20. Textura por subcuenca del Río Jejuí.

W	Textura	Pendiente
1020	Arenosa franca	1,9
	Francosa gruesa	
	Franco arenosa	
1030	Francosa gruesa	1,49
	Francosa arenosa	
1040	Franco arenosa	0,8
1050	Franco arenosa	2,8
	Francosa gruesa	
1060	Franco arenosa	1.5
	Arenosa franca	
	Arenosa	
1070	Franco arenosa	0,95
1080	Franco arenosa	2,2
	Arenosa franca	
1090	Franco arenosa	1,7
1100	Arenosa	2
1110	Franco arenosa	2,6
	Francosa gruesa	
1120	Arenosa	2,7
	Arenosa franca	

Como en la cuenca del **Río Ypané** existe una preponderancia de la textura arenosa/ Franco arenosa se toma la subcuenca W100 y para la textura arcillosa fina se toma la subcuenca W160; para realizar el análisis de los hidrogramas.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

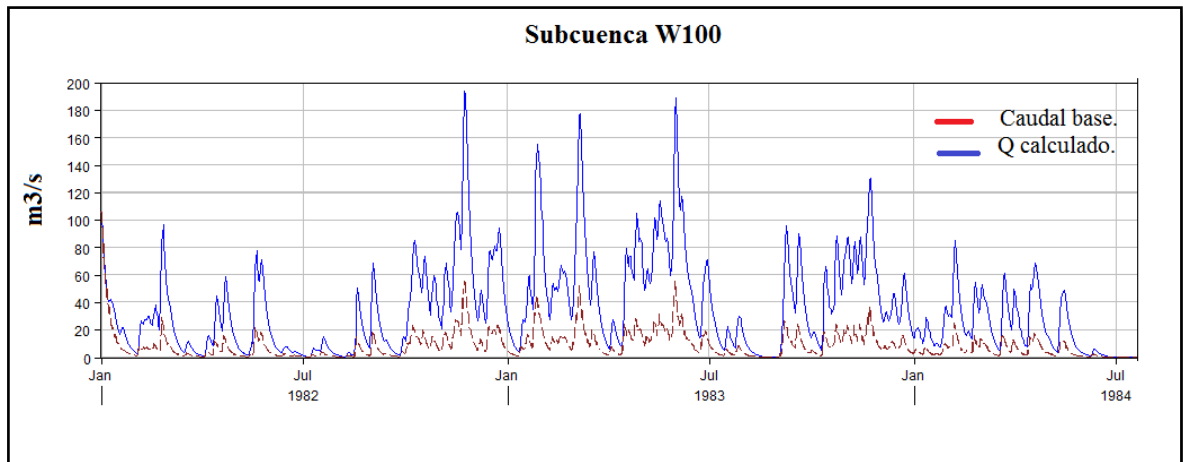


Figura: 42. Hidrograma de la Subcuenca W100- textura Arenosa/ Franco Arenosa.

Hidrograma de la subcuenca con textura arcillosa fina

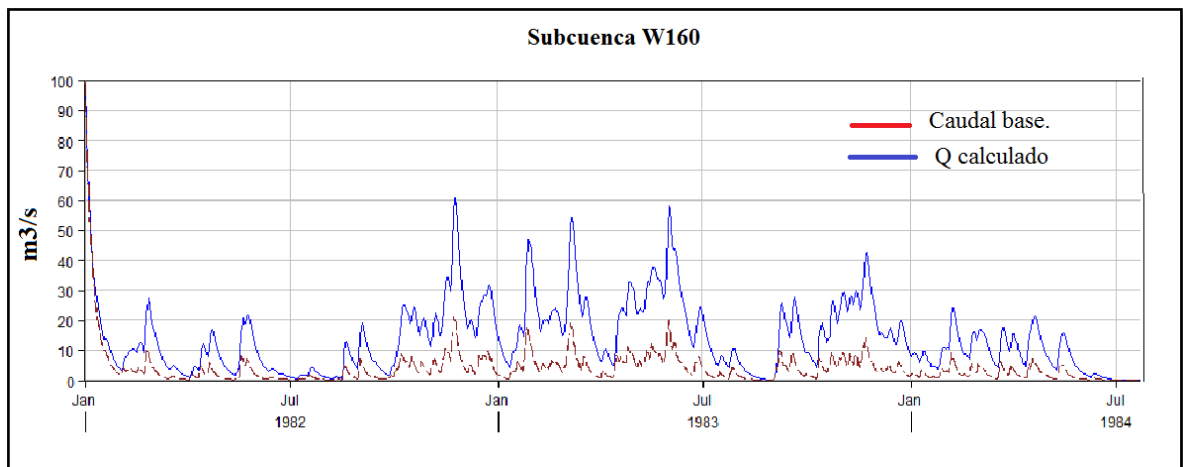


Figura: 43. Hidrograma de la subcuenca W160.

Observando la tabla 20 que corresponde a **la cuenca del río Jejuí**, existe una preponderancia de la textura del suelo; arenosa franca/ franco arenosa por lo que se hace el estudio de dos subcuencas con estas texturas de suelo.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

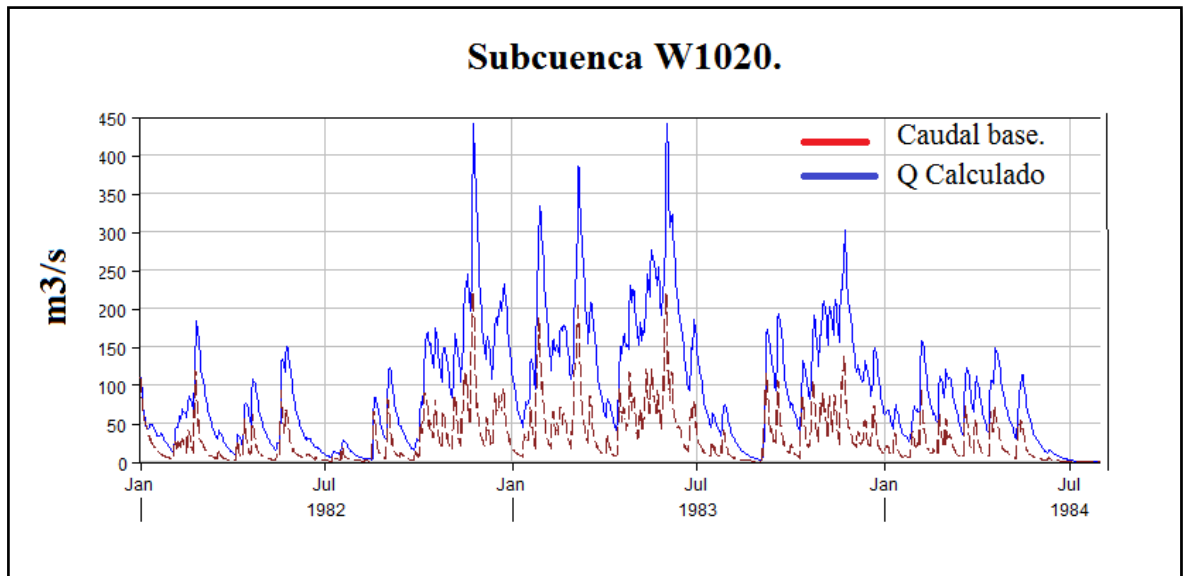


Figura: 44. Hidrograma de la subcuenca W1020. Cuenca del río Jejuí.

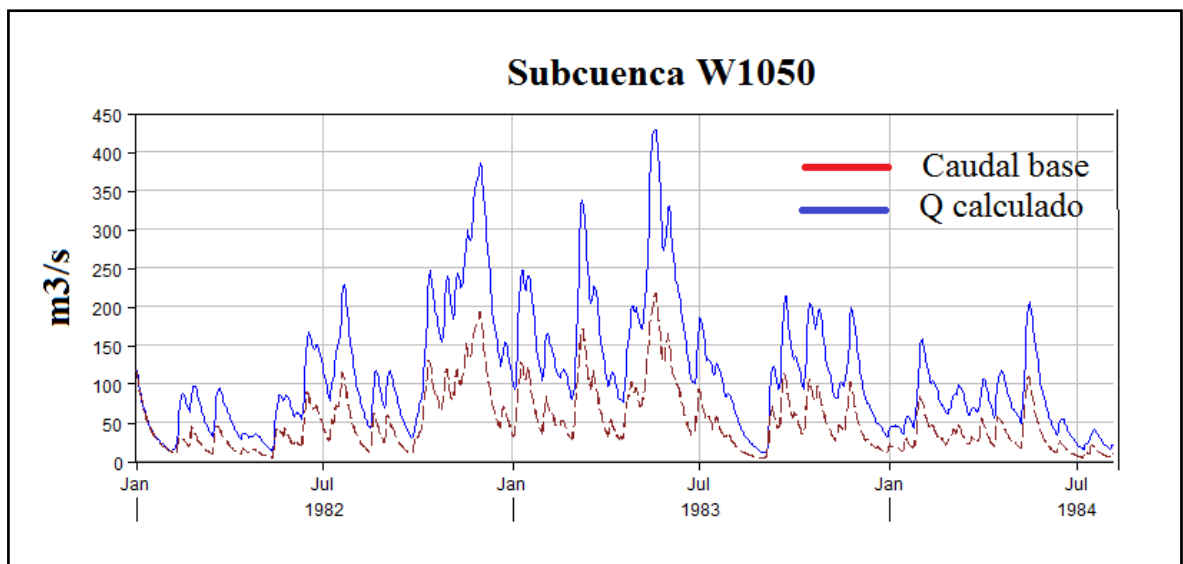


Figura: 45. Hidrograma de la subcuenca W1050. Cuenca del río Jejuí

El caudal está constituido en dos partes; el caudal base o flujo base que proviene del agua subterránea y la escorrentía directa, que proviene de las últimas lluvias. No todas las

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

corrientes reciben aporte de agua subterránea, ni todas las precipitaciones provocan escorrentía directa. Sólo las precipitaciones intensas y prolongadas, producen aumentos significativos en la escorrentía.

Las corrientes en cuencas con suelos permeables, y que reciben gran aporte de agua subterránea, muestran caudales altos sostenidos a lo largo del año, con una relación baja entre caudales de avenidas (crecidas) y caudales medios. Las corrientes en cuencas con suelos de baja permeabilidad y que más bien almacenan el agua de los acuíferos, presentan relaciones altas entre caudales pico y promedio con caudales muy bajos en crecidas.

Debido a la alta permeabilidad de los suelos, hay una percolación rápida; como se observa en los hidrogramas de cada subcuenca, existe una alta infiltración en las capas subterráneas, por lo que se tiene caudales base sobreestimados, que deben ser ajustados primeramente, teniendo en cuenta que hay que aumentar la permeabilidad de las subcuencas, como los almacenamientos superficiales y analizar la percolación en las dos capas subterráneas.

3.11.2 Primera Etapa de Calibración.

Teniendo en cuenta la primera simulación realizada, que arrojó un resultado de sobre estimación de caudales picos y volumen total escurrido, el modelo fue sometido a una calibración manual.

Se aumentó el coeficiente de almacenamiento en todas las subcuencas para amortiguar los picos excesivos obtenidos en la simulación inicial, como también, el tiempo de concentración.

Se obtuvo el siguiente resultado para la cuenca del Jejuí

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

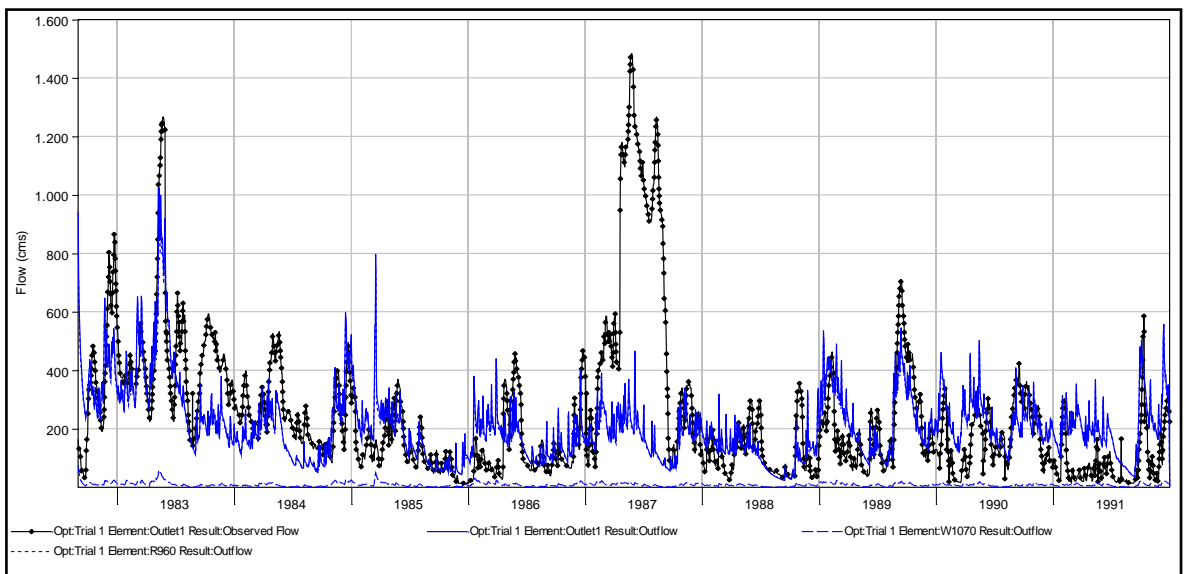


Figura: 46. Simulación de la cuenca del río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

El Volumen Total Observado de descarga para este periodo es de 905,7 mm con un pico máximo de 1266,8 m³/s, mientras que el modelo estimó un Volumen Total de descarga o de salida de 871,8 mm con un pico máximo de 999,5 m³/s.

Para la cuenca del Río Ypané los resultados se observan en la figura 44.

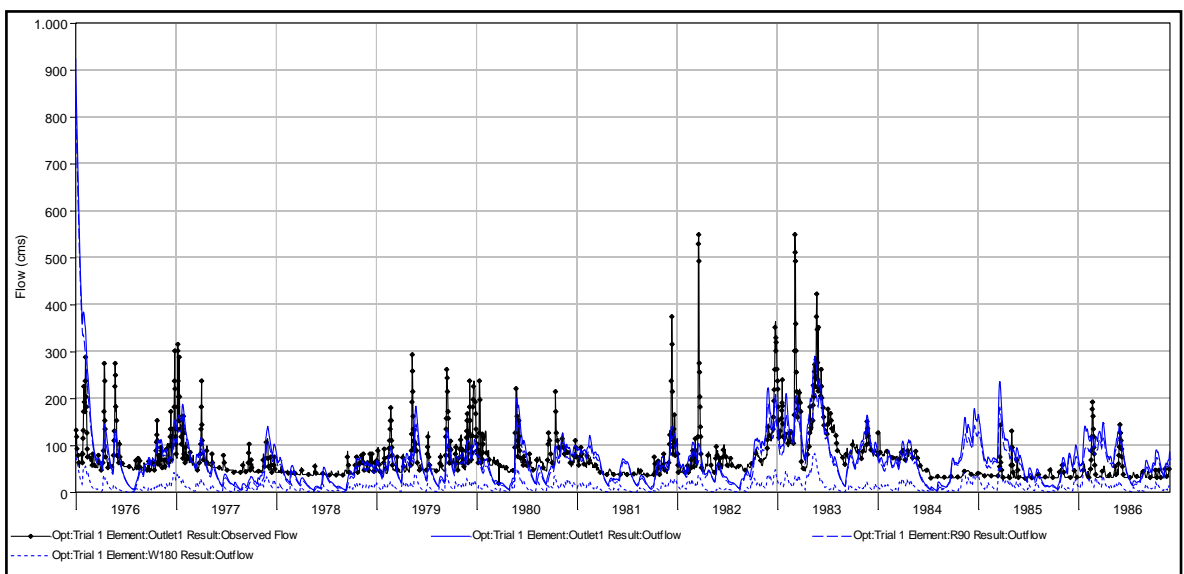


Figura: 47. Simulación de la cuenca del río Ypané. Fuente: Elaboración propia.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

El Volumen Total Observado descargado para este periodo es de 905,7 mm con un pico máximo de 1266,8 m³/s, mientras que el modelo estimó un Volumen Total de descarga de 871,8 mm con un pico máximo de 993,5 m³/s.

3.11.3 Análisis de sensibilidad.

Evaluar la respuesta de los parámetros de manera individual es indispensable si se desea juzgar con mayor criterio la respuesta del modelo en las áreas de estudio. Por lo que se realiza el análisis de sensibilidad de los parámetros. El mismo consiste en variar individualmente los parámetros, manteniendo constante los restantes, a fin de evaluar la respuesta del modelo.

En una primera etapa se procedió a realizar la calibración manual (prueba y error) de los parámetros, con el objetivo de evaluar la influencia de cada parámetro en el hidrograma de salida del modelo. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla: 23, la cual describe los parámetros más sensibles. A continuación, se procedió a realizar una calibración semiautomática, para lo cual se utilizó el módulo “optimization trial” del HEC-HMS. En esta sección se debe elegir un método de búsqueda, una tolerancia, el número máximo de iteraciones y una función objetivo (Feldman, 2000).

Tabla: 21. Parámetros sensibles del modelo.

	PARAMETROS	DESCRIPCIÓN
LOSS	Almacenamiento de suelo (mm)	Cambia la altura de los picos
		Cambia precipitación efectiva
	Infiltración del suelo (mm/hr)	Cambia precipitación efectiva
	Percolación del almacenamiento 1 (mm/hr)	Cambia la altura de los picos
	Coefficiente del almacenamiento 1 (hr)	Cambia el volumen del caudal base
TRANSFORM	Tiempo de concentración (hr)	Cambia la recesión del hidrograma
	Coefficiente de almacenamiento (hr)	Cambia la altura de los picos

3.11.4 Optimización Automática.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

La calibración automática se fundamenta en Funciones Objetivos y Algoritmos de Ajuste. El HEC-HMS ofrece una diversidad de funciones y algoritmos para el mismo.

La optimización de los parámetros se realizó utilizando la Función Objetivo Error Medio Cuadrático Ponderado (USACE, 1998), compara todas las ordenadas, las diferencias de cuadrados y pesa las diferencias cuadradas. El peso asignado a cada ordenada es proporcional a la magnitud de la ordenada. Esta función es una medida implícita de comparación de las magnitudes de los picos, volúmenes y tiempos de pico de los dos hidrogramas (el observado y el estimado). Manual de referencia técnica, HEC.

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \left(\frac{q_o(i) + q_o(\text{mean})}{2q_o(\text{mean})} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde;

Z: Función Objetivo.

NQ: N° de instantes en el que se calcula la diferencia entre ordenadas en el hidrograma.

q_o(i): Caudales Observados en el instante i.

q_s(i): Caudales Simulados en el instante i.

q (mean): valor medio de los caudales observados en los diferentes instantes.

En la búsqueda y aproximación de los valores óptimos de cada uno de los parámetros se empleó el método del gradiente-univariante, el cual hace sucesivas correcciones a los parámetros estimados: si x_k representa el parámetro estimado con la función objetivo (x_k) en la iteración k , la búsqueda define un nuevo estimado x_{k+1} en la iteración $k+1$ como:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$

En el cual Δx^k es la corrección del parámetro. El propósito es seleccionar Δx^k para que el valor estimado del parámetro logre minimizar o maximizar la función objetivo. Generalmente esto no se logra en la primera iteración, por lo que la ecuación se aplica repetidas veces.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CAPÍTULO 4 – PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados de la calibración

Después de realizar los ajustes manuales y automáticos a los parámetros del modelo, teniendo en cuenta los análisis hechos, a continuación se presentan los resultados de las simulaciones y calibraciones.

Para la cuenca del Río Ypané en la Figura: 47 se observa la simulación de los caudales calibrados con un pico máximo de 300 m³/s; el volumen total escurrido de 2554,04 mm y para el sintético simulado se tiene un pico máximo de 548,5 m³/s, y el volumen total escurrido de 2338,37 mm, se tiene una diferencia porcentual de 9,22 % (se sobre estima el volumen).

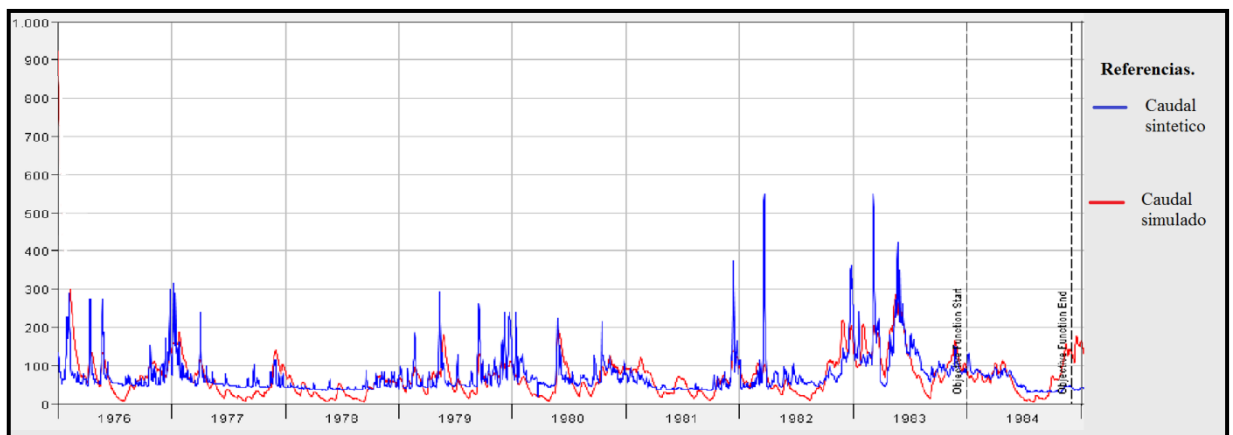


Figura: 48. Simulación de la cuenca del Río Ypané, luego de calibrar.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

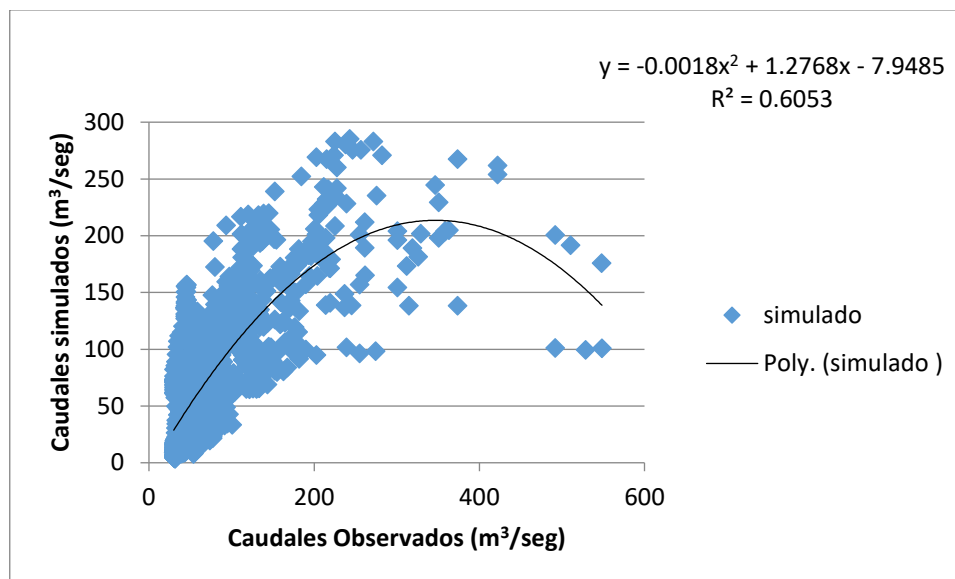


Figura: 49. Coeficiente Nash (R^2) para los caudales simulados-observados Río Ypané. **Fuente:** Elaboración propia

Se observa en la figura 47 que en años de crecida replica mejor el modelo, pero en los picos se tiene sub estimación ya que no acompaña al hidrograma sintético, por lo que se podría decir, que la calibración es aceptable, según el coeficiente de Nash; hay que tener en cuenta que al ser un método empírico, el método área pendiente tiene sus limitaciones.

Algunas de las limitaciones son;

- La sección transversal estimada no es la correcta.
- La cota cero del nivel es estimada.
- Al igualar la ecuación de Manning con la pendiente de la superficie del agua con la pendiente del lecho del río se asume una condición de flujo permanente diario, lo cual no representa apropiadamente los eventos de crecidas.

Para la cuenca del Río Jejuí:

Para la cuenca del Río Jejuí se observa en la Figura: 48 la simulación de los caudales calibrados con un Pico Máximo de 993,5 m³/s, y un Volumen Total Escurrido de 2689,32 mm. En otras palabras, el modelo sub-estima el Pico Máximo en un -33% y sub-estima el

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Volumen Total Escurrido en un 16,15%. Observando la figura 50 se puede decir que la calibración fue aceptable, según el coeficiente de Nash.

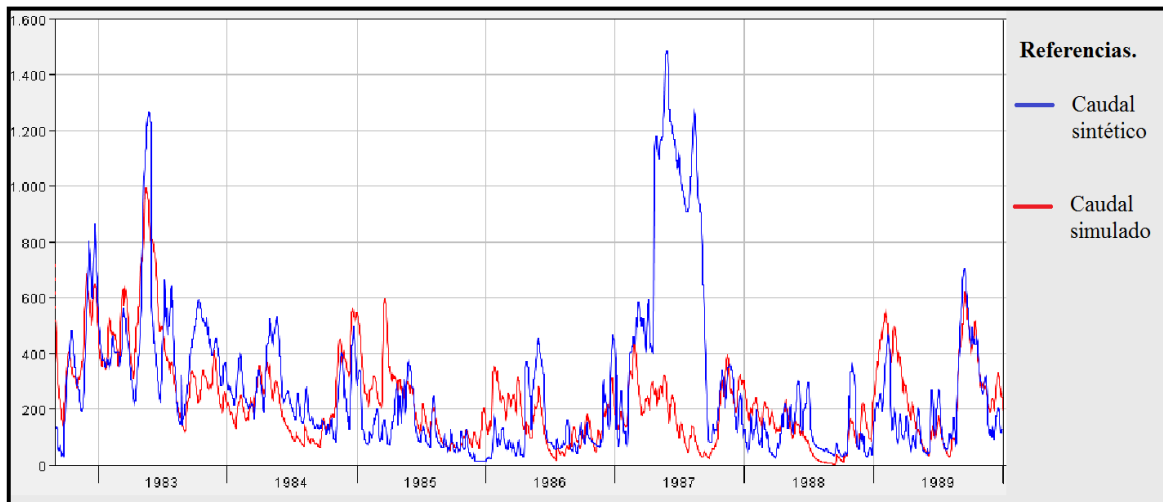


Figura: 50. Simulación río Jejuí luego de calibrar el modelo.

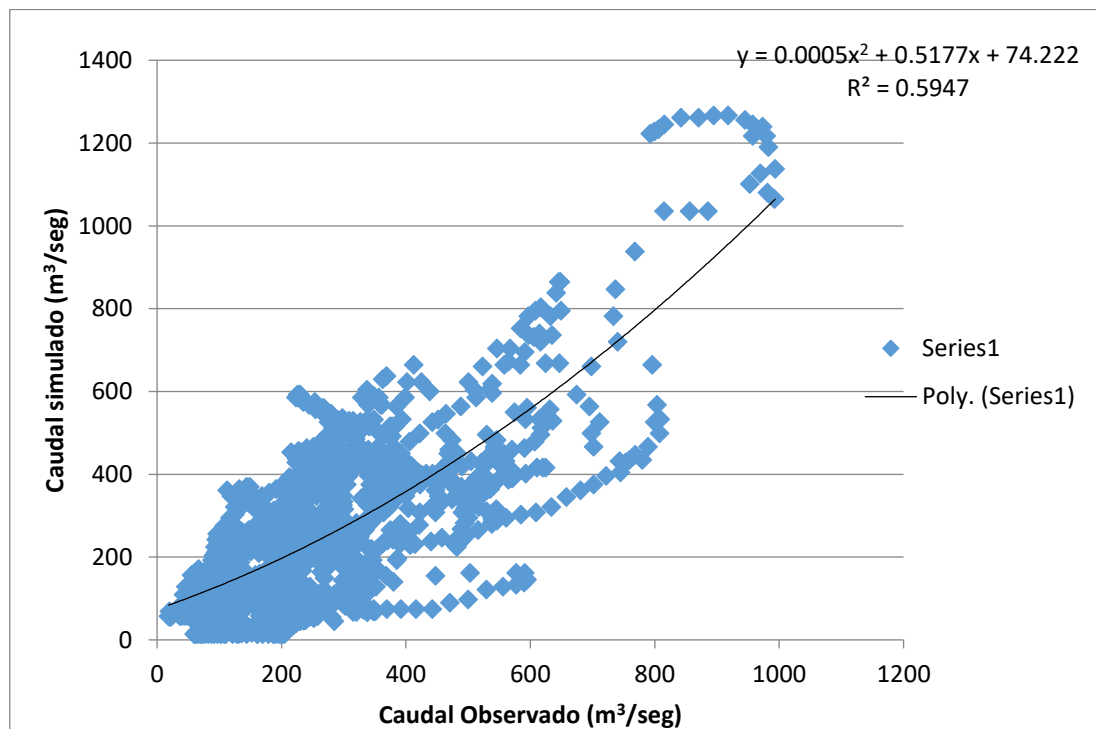


Figura: 51. Coeficiente Nash (R^2) de los caudales simulados-observados del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

En el hidrograma sintético estimado se tiene picos que se deben a los niveles registrados en el Anuario Hidrográfico de la ANNP, que se utilizó para calcular los caudales sintéticos.

4.2 Parámetros calibrados.

Las condiciones iniciales en los parámetros de retención por vegetación (canopy), retención superficial (surface), almacenamiento en el suelo (loss), se tomó como valor inicial cero, por lo que al calibrar los valores estimados no se realizaron modificaciones.

En las siguientes tablas se encuentran los parámetros iniciales - calibrados para la **cuenca del Río Ypané**

Tabla: 22. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané

Parámetros de Capas Superficiales										
W	Máx. ret. veg.(mm)		Máx. ret. sup. (mm)		Máx. Alm. Suelo (mm)		Max. Alm. tens.(mm)		Máx. Inf. Suelo(mm/hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
100	5.4	8,11	5.28	2,35	239	230,2	48	162,0	14,8	14.51
110	6.47	14,62	4.08	2,72	256	288,5	52	42.1	9,06	8.477
120	7.2	16,215	27	17,64	237	229,8	48	69.8	32,7	32.15
130	5.4	11.852	12.8	12.80	269	264,7	66	64.9	15,8	10.05
140	5.4	5.47	5.64	5,64	260	258,9	51	51.3	10,9	9.677
150	6.6	9.887	19.2	12.29	223	212,3		57,8		7,96
160	5.4	8.119	11.7	5.98	180	173,6	49	47.1	12.7	7.50
170	6.6	7.97	12	11.29	278	277,9	66	65	6.5	9.51
180	4.2	4.243	12	11.76	440	423,8	66	55.5	4.9	4.9

Tabla: 23. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané

Parámetros capas subterráneas												
W	Alm 1 (mm)		Alm 1 coef (Hr)		Alm1 perc (mm/hr)		Alm 2 (mm)		Alm 2 coef (Hr)		Alm 2 perc. (mm/hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
100	38	11.3	82	185.4	5.4	5.4	68	29.6	186	188.6	4.7	4.8
110	35	25.3	66	100.4	6.5	9.8	62	27	191	290.7	6.6	14.6

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1 2 0	38	24.9	142	141.5	3.1	4.7	77	33.5	212.5	321.8	3.2	4.8
1 3 0	33	14.4	88	89.3	4.6	15.6	54	50.3	247.5	251.0	3.4	3.5
1 4 0	34	21.8	82	124,2	5.3	5.3	75	48.0	190	192,4	4.6	4.6
1 5 0	35	22.4	105	108.5	4.1	4.1	66	28.8	186	188,5	4.7	4.8
1 6 0	32	94.8	89	90	5	5.4	67	43	206	465.4	4.3	6.5
1 7 0	39	16.9	106	107.5	3.9	3.9	65	19.2	219	222	3.9	3.9
1 8 0	33	31.0	87	88.2	5	5.07	56	35.9	139.9	141.2	6.1	6.1

Tabla: 24. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané

Parámetros del caudal base								
W	Alm 1 (m ³ /seg)		Alm 1 coef (hr)		Alm 2(m ³ /seg)		Alm 2 coef (hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
100	38	55.951	382	863,73	68	67	486	736.12
110	35	35	366	371.47	62	62	491	498
120	38	38	442	448	77	77	512	519
130	33	33	388	393,78	54	54	547	555,1
140	34	33.32	382	575.82	75	74.89	489	496.31
150	35	35	407	413.06	66	66	486	493.23
160	32	32	389	394.81	67	67	506	513,53
170	39	39	406	412	65	65	519	526.69
180	33	33	87	293.62	56	56	139	314.31

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 25. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Ypané

Parámetros del Tiempo de concentración				
W	TC (Hr)		Tc coef. (Hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
100	51.37	115.76	143.8	326.71
110	40.44	91.881	113.24	114.07
120	32	32.473	89.52	135.08
130	52.38	119.01	246.67	373.68
140	37.46	56.638	104.9	355.35
150	38.18	38.924	106.91	107.36
160	28.5	43.158	79.81	120.50
170	52.8	119.96	147.85	333.96
180	37	0.0166667	104	236.33

Los parámetros iniciales- calibrados en la **cuenca del Río Jejuí** son los siguientes:

Tabla: 26. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí

Parámetros de Capas Superficiales										
W	Máx. ret. veg.(mm)		Máx. retsup. (mm)		Máx. Almac. Suelo (mm)		Max. Alm. tens.(mm)		Máx. Inf.. Suelo(mm/hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
1020	5.4	11.9	18.8	18.8	176.12	594.4	42.4	27.76	11.62	7.79
1030	4.8	4.8	12.3	12.32	240.56	541.26	58.7	58.58	8.23	9.46
1040	5.7	12.82	12	20.778	206.5	357.12	47.7	20.81	42.359	39.868
1050	6.3	4.5	13.8	31.11	245.82	246.95	56.6	35.7	7.99	7.52
1060	4.8	5.47	15.7	15.7	243.87	237.14	39.4	88.65	16	15.85
1070	5.4	5.29	12	8.35	207.5	305.02	48.8	65.934	14.69	8.68
1080	4.98	11.25	17.2	25.28	205.9	450.43	43.1	66.91	21.57	24.8
1090	6.3	13.739	12	11.294	211.1	211.71	50.4	49.21	7.76	7.3
1100	5.58	14.43	20	19.6	244.2	362.78	32.7	31.4	25.13	24.17
1110	4.8	7.29	138	6.13	257.72	387.91	58.8	40.24	8.09	7.56
1120	4.86	16.4	22	9.58	273.96	269.76	37.8	65.5	25.13	25.48

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Tabla: 27.Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí

Parámetros capas subterráneas												
W	Alm 1(m ³ /seg)		Alm 1 coef		Alm1 perc (mm/hr)		Alm 2(m ³ /seg)		Alm 2 coef		Alm 2 perc. (mm/hr)	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicia	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
1020	36	80.58	87	85.45	4.92	3.27	76	170.37	250	127.93	3.42	3.21
1030	28.4	28.2	92.3	348.02	4.66	6.93	55.6	73.55	197	130.32	4.34	2.97
1040	39.7	34.31	111	80.99	3.89	3.66	55.6	73.55	324	325.86	2.67	2.7
1050	38.8	65.59	186	278.78	2.31	0.68	77.6	114.2	428	283.33	2.01	2.06
1060	25.5	14.97	49.9	72.61	8.8	1.94	46.6	43.86	89.2	89.2	9.86	9.78
1070	32.9	31.29	88.5	89.77	4.77	1.6	60.8	57.22	191	194.16	4.41	4.47
1080	26.8	26.65	104	233.33	4.04	3.95	47.7	55.07	214	320.39	3.91	5.71
1090	30.3	23.1	126	326.8	3.38	4.95	60.6	57	267	269	3.2	5
1100	39.4	17.16	106	158.7	4.2	2.96	77.6	49.68	212	318.39	4.16	6.24
1110	39.5	37.17	258	387.45	1.68	3.71	79	50.581	595	1337.6	1.46	3.29

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1												
1	27.72	26.09	121	122	3.47	3.51	60.6	38.8	332	321.16	2.53	2.56
2												
0												

Tabla: 28. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí.

Parámetros del caudal base								
W	Alm 1 (m ³ /seg)		Alm 1 coef (Hr)		Alm 2 (m ³ /seg)		Alm 2 coef (Hr)	
	Estimado	Ajustado	Estimado	Ajustado	Estimado	Ajustado	Estimado	Ajustado
1020	33.88	31.25	293.72	293.72	55.62	52.35	337.62	342.63
1030	17.82	16.77	207.71	317.59	35.59	33.5	665.55	1002.9
1040	37.365	34.464	39.99	26.131	54.58	51.37	96.08	77.83
1050	24.35	22.91	629.77	1423.4	37.07	35.35	345.63	347.82
1060	24	22.13	0.009	0.009	43.86	41.28	201.59	204.53
1070	29.51	27.78	89.83	91.63	57.22	23.85	194.16	196.99
1080	17.15	15.827	351.64	351.64	44.89	42.25	294.12	294.55
1090	28	25.826	74	72.52	57	53.648	251	246.09
1100	25.227	23.269	232.63	183.55	69.64	65.552	286.68	183.55
1110	47.55	30.45	572.65	1897	42.81	24.41	532.45	1203
1120	17.748	16.37	184.19	278.96	26.39	24.846	337.62	511.23

Tabla: 29. Parámetros iniciales –calibrados en la Cuenca del Río Jejuí

Parámetros del Tiempo de concentración				
W	TC (Hr)		Tc coef. (Hr)	
	Estimado	Ajustado	Estimado	Ajustado
1020	92.79	209.66	278.37	615.99
1030	52.24	118.7	156.72	348.02
1040	29.05	43.998	87.15	198.02
1050	135.05	301.75	405.14	912.13
1060	46.05	69.74	138.16	311.90
1070	64.43	65.43	193.30	437.06
1080	73.08	165.25	219.24	739.94
1090	20.85	20.85	65.54	140.72
1100	29.96	67.60	89.89	304.85
1110	81.33	178.35	244	241.01
1120	48.95	110.68	146.86	497.51

4.3. Comparación de los resultados obtenidos: Proyecto-Tesis

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Como se mencionó anteriormente, este trabajo forma parte del Proyecto UCA-CONACYT, INV 280 por lo que se realizó una comparación de los hidrogramas de las cuencas del río Ypané y del Río Jejuí, teniendo en cuenta que para el proyecto se consideró tres subcuencas para el Río Ypané y siete subcuencas para el Río Jejuí, como se puede observar en la figura: 49.

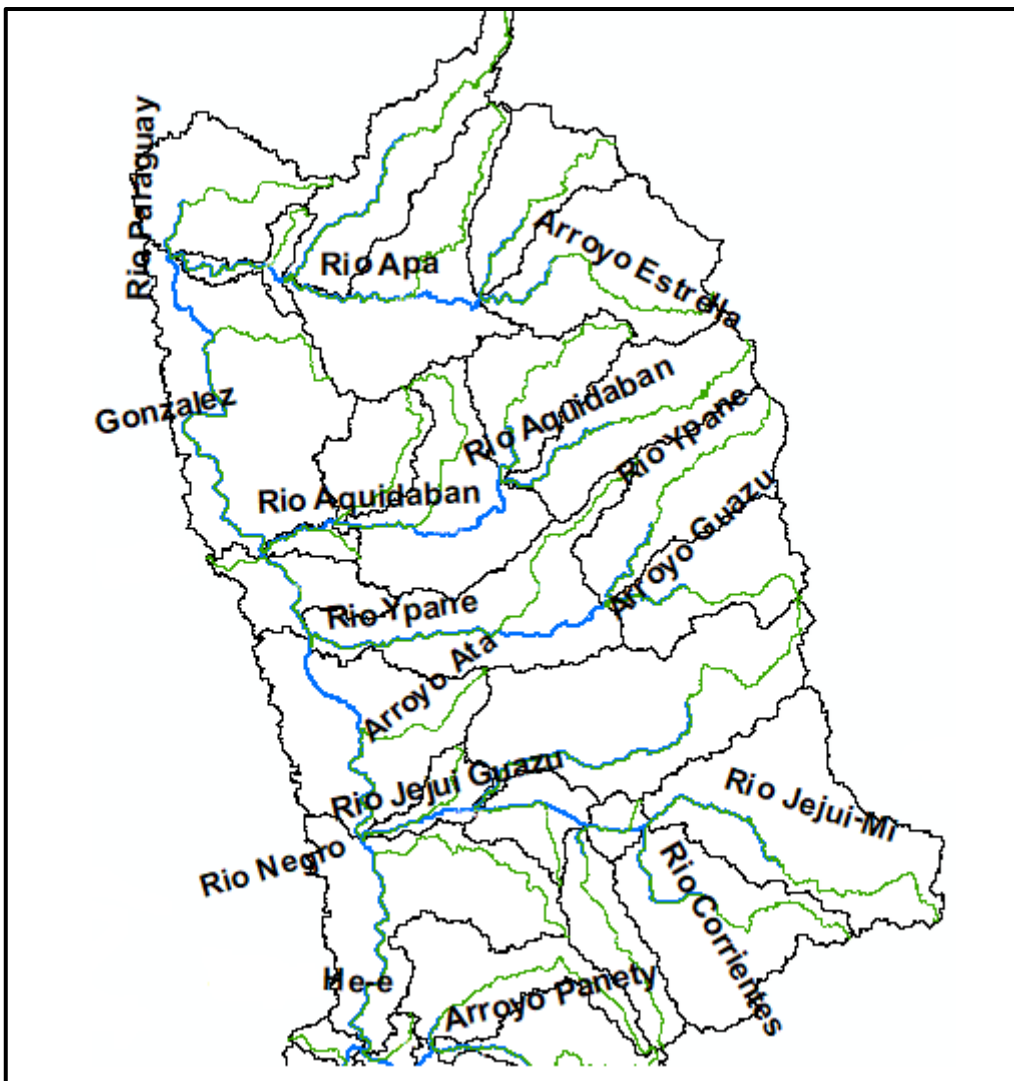


Figura: 52. División en subcuencas del Proyecto 14-INV- 280. **Fuente:** Elaboración propia.

Las cuencas modeladas en el proyecto fueron: el Río Apa, Río Aguidabán, Río Ypané, Río Jejuí y Río Manduvirá. Los hidrogramas de salida calibrado son los que se observan en la figura 50

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

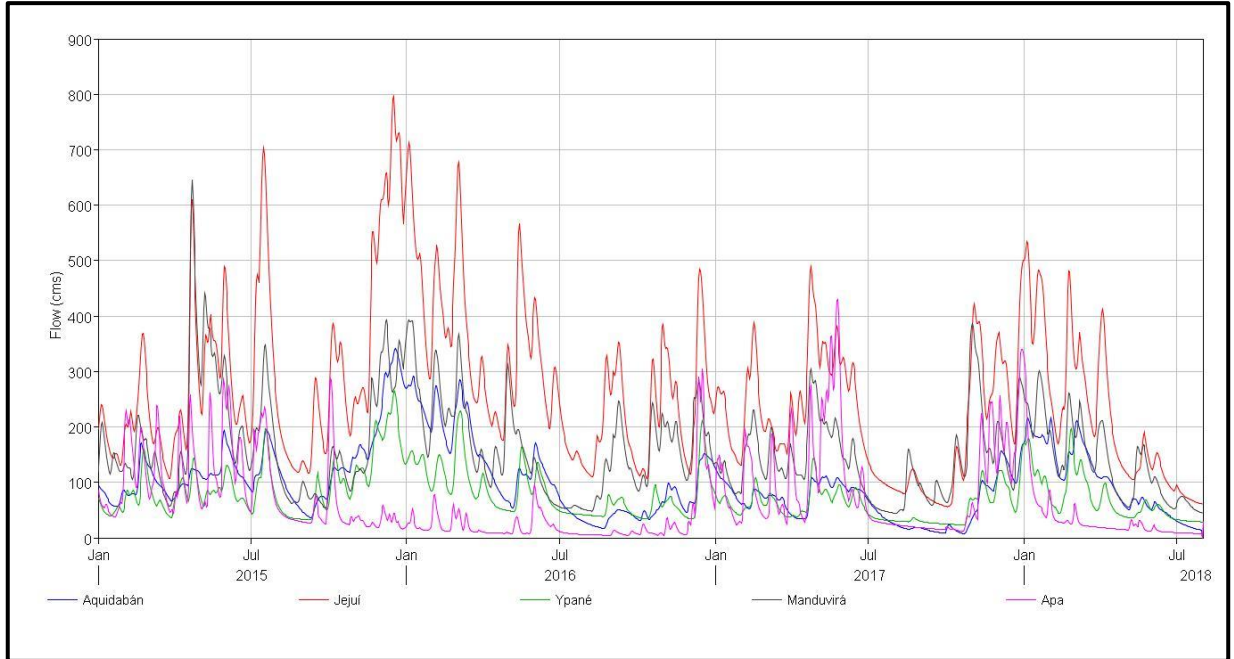


Figura: 53. Hidrogramas de salida de las cuencas modeladas en el proyecto.

Los caudales aportantes de cada subcuenca son los siguientes, y el porcentaje de aporte sobre el total en Asunción = 21.3 %

	Apa	Aquidabán	Ypané	Jejuí	Manduvira
Aporte (%)	23.73	12.92	12.19	29.70	21.46

Los hidrogramas de salidas de las cuencas estudiadas en esta tesis con las cuencas del proyecto son las siguientes;

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

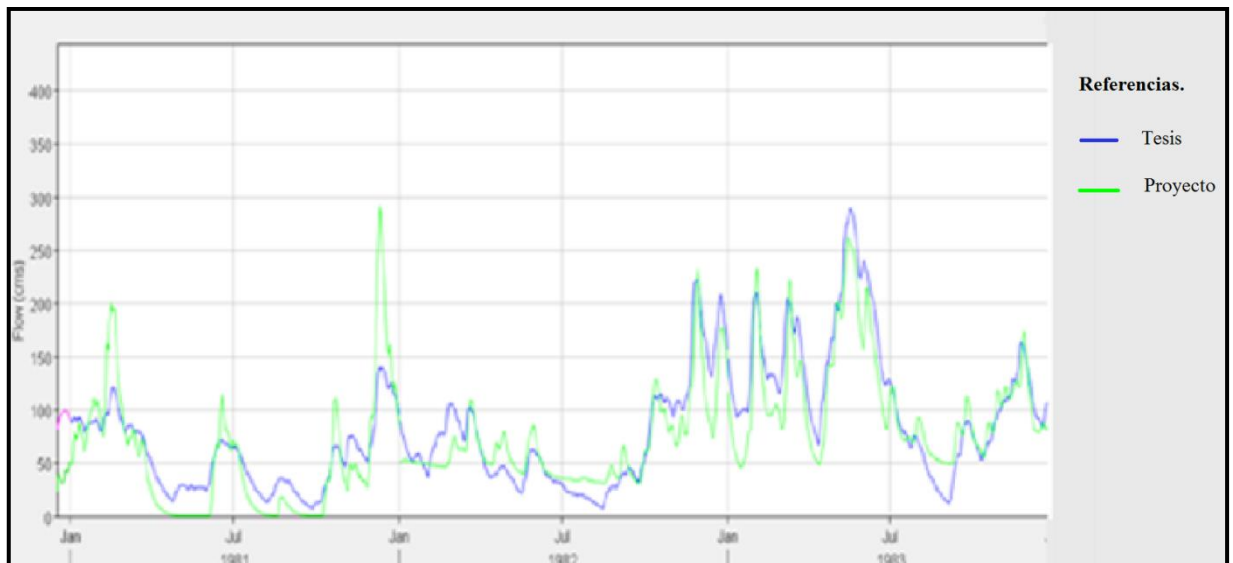


Figura: 54. Comparación de los hidrogramas en DSS obtenidos en la cuenca del Río Ypané

Como se observa en la Figura 51 en partes replica la forma del hidrograma, y en partes existe una sobre estimación, se debe tener en cuenta que en el modelo del proyecto; la subdivisión fue de tres subcuencas, las estaciones utilizadas fueron dos (PJC y Concepción), la distribución de la precipitación utilizada en el modelo fue hietograma especificado y el método de distribución fue por polígonos de Tiessen.

En la tesis se subdividió en nueve subcuencas, se utilizaron cuatro estaciones y el método de distribución de la precipitación es inverso de las distancias.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

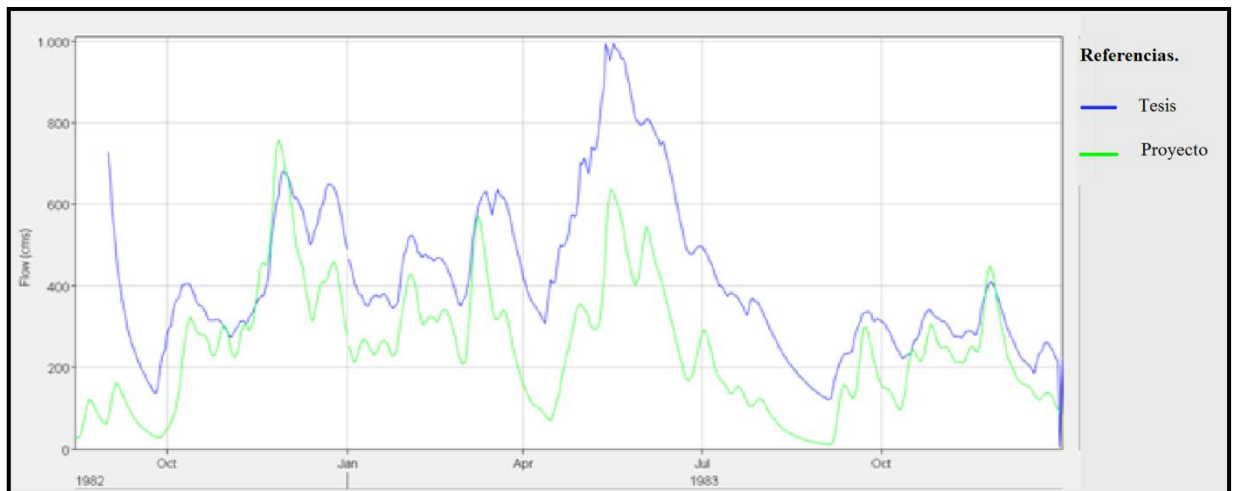


Figura: 55. Comparación de los hidrogramas en DSS obtenidos en la cuenca del Río Jejuí.

Ambos hidrogramas tienen la misma forma, el de la tesis está sobreestimado, comparando con el hidrograma del proyecto, se podría deber a las estaciones utilizadas, ya que para el proyecto se tuvieron cuatro (4) estaciones y para la tesis cinco (5) estaciones, la distribución de la precipitación como se mencionó anteriormente para el proyecto se utilizó hidrograma especificado y el método de distribución fue por polígonos de Thiessen y en la tesis el método de distribución de la precipitación fue el inverso de las distancias. La subdivisión en subcuencas en el proyecto fue de siete subcuencas y en la tesis se subdividió en once subcuencas.

Comparando los resultados obtenidos en el estudio (Tesis) y el Proyecto (CONACYT) se concluye que los resultados son similares arrojando diferencias en función a las estaciones meteorológicas utilizadas, como a los métodos de distribución de la precipitación y a la subdivisión de las cuencas.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS**5.1 Conclusiones.**

En este trabajo de investigación de implementación del modelo hidrológico HEC-HMS tuvo un resultado aceptable, a pesar de las limitaciones de datos, por lo que se realizó la selección de los datos de niveles históricos, ya que en algunos años en la serie de tiempo se encuentran incompletos y/o los datos presentan valores incoherentes (valores negativos), para obtener una curva Altura- Caudal con el menor error posible.

Como se puede observar el modelo replica en épocas de crecidas; y en estiaje acompaña, la forma del hidrograma simulado, se puede decir que se tuvo un resultado aceptable con una bondad de ajuste para el Río Ypané de $R^2= 6,05$ y para el Río Jejuí $R^2= 0,594$, según el coeficiente Nash. Lo que significaría que el modelo puede ser utilizado para predicciones de eventuales crecidas, mediante la simulación del cambio de estado del régimen hidrológico y que está sujeto a una posterior calibración teniendo en cuenta caudales deben ser medidos.

Además, la investigación contribuyó al proyecto UCA-CONACYT “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY”, con las metodologías empíricas utilizadas que fueron aplicadas al proyecto como a este trabajo.

Podría ser útil para ser implementado como una herramienta para el monitoreo y previsión de crecidas, teniendo en cuenta la sucesión de eventos extremos en los últimos años

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

5.2 Recomendaciones.

En este Trabajo de investigación se ha planteado un modelo hidrológico semi distribuido que ofrece una perspectiva para afrontar el estudio hidrológico de eventos en cuencas a partir de sus propiedades físicas y geomorfológicas, por lo que surgen algunas recomendaciones que podrían mejorar la aplicación de este modelo;

- Se insta a aumentar las estaciones pluviométricas, e hidrométricas en las cuencas con mayor aporte al Río Paraguay. Principalmente estaciones Hidrométricas, ya que no se cuenta con registros de niveles actualizados. Esto facilitaría el trabajo de calibración, de un modelo hidrológico; se tendrían resultados más exactos.
- Se recomienda que las lecturas sean automáticas para evitar los errores; de tipeo, datos faltantes o datos inconsistentes, con lo cual se disminuiría la incertidumbre al momento de analizar la información.
- Se sugiere realizar un análisis del uso agrícola en las cuencas estudiadas para conocer con exactitud el nivel de retención y escurrimiento de agua. A pesar de contar en la cuenca del río Jejuí con la reserva del Mbaracayú con un área de 61.979 ha y que el 60% de su superficie esté ocupada por vegetación, el uso preponderante de la tierra es el cultivo.
- Por último, se recomienda la incentivación a elaborar más trabajos aplicando herramientas de la hidroinformática para la caracterización hidrológica de las cuencas a nivel nacional.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CAPITULO 6 - ANEXOS**Características hidrológicas de las cuencas estudiadas:**

CUENCA DEL RÍO YPANÉ						
SUBCUENCAS			TRAYECTORIA DE FLUJO MÁS LARGA			
NOMBRE	ÁREA	PEND. MEDIA (%)	LONG (m)	PEND. MEDIA	COTA MIN.	COTA MÁX
W100	1539	6,62	102108.5	0,001972	194	660
W110	845	6,81	73305.2	0,001892	192	646
W120	847	6,09	66507.7	0,002867	150	437
W130	1340	3,42	113468.1	0,002315	111	741
W140	1051	6,14	67260.3	0,001943	184	627
W150	942	4,58	71491.8	0,002089	150	391
W160	639	5,07	71453.9	0,00446	184	556
W170	1075	3,39	69847.6	0,000859	111	360
W180	1662	2,1	111168.5	0,000624	63	282

CUENCA DEL RÍO JEJUÍ						
SUBCUENCAS			TRAYECTORIA DE FLUJO MÁS LARGA			
NOMBRE	ÁREA (KM2)	PEND. MEDIA (%)	LONG (m)	PEND. MEDIA	COTA MIN.	COTA MÁX
W1020	40907,9	1,95	209545.1	0,001788	90	589
W1030	1329,8	1,50	95426.9	0,001649	90	397
W1040	62,853	0,80	26796.6	0,000597	79	135
W1050	5587,7	2,85	197620.8	0,0006	107	442
W1060	1231,9	1,49	71878.8	0,001298	79	258
W1070	811,85	0,94	79099.9	0,000657	59	119
W1080	1738,6	2,26	117873.1	0,001052	96	395
W1090	446	1,79	36017.2	0,002554	96	252
W1100	869,41	2,14	52444.9	0,00211	108	322
W1110	1785,3	2,66	112982.7	0,000732	123	318
W1120	1327,9	2,73	73180.0	0,001148	124	327

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

CUENCA DEL RÍO JEJUI: PRECIPITACIÓN ANUAL (AÑO 1980)							
MES	CONCEPCIÓN	PJC	SDG	SANTANI	SAN PEDRO	PROM. MENSUAL TOTAL (MM)	VOLUMEN TOTAL PRECIPIT. HM ³
ENERO	107,7	0	123	123	0	353,7	807,76
FEBRERO	36,5	0	174,4	174,4	0	385,3	879,93
MARZO	54,2	0	80,1	0	0	134,3	306,71
ABRIL	49,5	0	23,1	0	0	72,6	165,80
MAYO	301,8	0	189,2	0	0	491	1121,32
JUNIO	73,2	0	62	0	0	135,2	308,76
JULIO	22,7	30,1	48,9	0	0	101,7	232,26
AGOSTO	112,7	57,6	68,9	0	0	239,2	546,27
SEPTIEMBRE	84,7	106	191,9	191,9	0	574,5	1312,02
OCTUBRE	181,3	191,6	285,9	285,9	0	944,7	2157,46
NOVIEMBRE	183,1	134,8	65,6	65,6	0	449,1	1025,63
DICIEMBRE	111,4	170,2	134,4	143,8	0	559,8	1278,44

0: sin registro de precipitación

CUENCA DEL RÍO YPANÉ: PRECIPITACIÓN ANUAL (AÑO 1980)					
MES	CONCEPCIÓN	PJC	SAN PEDRO	PROM. MENSUAL TOTAL (MM)	VOLUMEN TOTAL PRECIPIT. HM ³
ENERO	106,9	0	0	106,9	244,13
FEBRERO	38,1	0	0	38,1	87,01
MARZO	35,6	0	0	35,6	81,30
ABRIL	60,2	0	0	60,2	137,48
MAYO	302,9	0	0	302,9	691,75
JUNIO	70	0	0	70	159,86
JULIO	110,9	62	0	172,9	394,86
AGOSTO	60,4	61,5	0	121,9	278,39
SEPTIEMBRE	184,7	127,8	0	312,5	713,67
OCTUBRE	77,7	193	0	270,7	618,21
NOVIEMBRE	178,4	129,7	0	308,1	703,62
DICIEMBRE	61,9	94,8	0	156,7	357,86

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

6.1. Valores calculados para las Retenciones por la vegetación (Canopy)

Uso de suelo (Canopy) Río Ypané						
Año 2018				Año 1984		
Subcuenca	Bosques	Agrícola	mm	Bosques	Agrícola	mm
100	0,4	0,6	5,4	0,98	0,02	8,9
110	0,4	0,6	5,4	0,8	0,2	7,8
120	0,7	0,3	7,2	0,8	0,2	7,8
130	0,4	0,6	5,4	0,95	0,05	8,7
140	0,4	0,6	5,4	0,75	0,15	7,2
150	0,6	0,4	6,6	0,8	0,2	7,8
160	0,4	0,6	5,4	0,8	0,2	7,8
170	0,6	0,4	6,6	0,9	0,1	8,4
180	0,3	0,5	4,2	0,9	0,1	8,4

Uso de suelo (canopy) Río Jejuí						
Año 2018				Año 1987		
Subcuenca	Bosques	Agrícola	mm	Bosques	Agrícola	mm
1070	0,4	0,6	5,4	0,5	0,5	6,3
1030	0,3	0,7	4,8	0,55	0,45	7,05
1040	0,45	0,55	5,7	0,6	0,4	7,05
1020	0,4	0,6	5,4	0,6	0,4	7,2
1080	0,33	0,67	4,98	0,5	0,5	6,51
1050	0,55	0,45	6,3	0,7	0,3	7,65
1110	0,35	0,55	4,8	0,6	0,4	7,05
1120	0,31	0,69	4,86	0,5	0,5	6,57
1100	0,48	0,42	5,58	0,6	0,4	6,66
1060	0,3	0,7	4,8	0,45	0,55	6,15
1090	0,55	0,45	6,3	0,6	0,4	6,75

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

6.2. Valores estimados para las retenciones de superficie:

W	Textura Río Ypané	Pendiente (%)
100	Franco arenosa	6,6
	Arenosa franca	
110	Arenosa	6,8
	Arenosa franca	
	Franco arenosa	
120	Arenosa	4
	Arenosa franca	
130	Franco arenosa	3,4
	Francosa fina	
	Arenosa	
140	Franco arenosa	6,1
	Arenosa franca	
150	Franco arenosa	4,5
	Arenosa franca	
160	Arcillosa muy fina	5
	Franco arenosa	
	Arenosa franca	
170	Francosa fina	3,3
	Franco arenosa	
180	Francosa fina	2,1
	Franco arenosa	

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

SURFACE RIO YPANÉ			
W	Textura	Mm	mm
100	Franco arenosa	2,4	5,28
	Arenosa franca	6	
110	Arenosa	4	4,08
	Arenosa franca	6	
	Franco arenosa	2,4	
120	Arenosa	20	27
	Arenosa franca	30	
	Arenosa franca	30	
130	Franco arenosa	12	12,8
	Francosa fina	12	
	Arenosa	20	
140	Arenosa franca	6	5,64
	Franco arenosa	2,4	
	Arenosa franca	6	
150	Franco arenosa	12	19,2
	Arenosa franca	30	
160	Arcillosa muy fina	2,5	11,7
	Franco arenosa	12	
	Arenosa franca	30	
170	Francosa fina	12	12
	Franco arenosa	12	
180	Francosa fina	12	12
	Franco arenosa	12	
	Franco arenosa	12	

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

SURFACE RIO JEJÚ			
W	Textura	mm	mm
1070	Franco arenosa	12	12
1030	Francosa gruesa	15	12,3
	Francosa arenosa	12	
1040	Franco arenosa	12	12
1020	Arenosa franca	25	18,7
	Francosa gruesa	15	
	Arenosa franca	25	
	Franco arenosa	12	
1080	Franco arenosa	12	17,2
	Arenosa franca	25	
1050	Franco arenosa	12	13,8
	Francosa gruesa	15	
1110	Franco arenosa	12	13,8
	Francosa gruesa	15	
1120	Arenosa	20	22
	Arenosa franca	25	
1100	Arenosa	20	20
1060	Franco arenosa	12	15,7
	Arenosa franca	25	
	Arenosa	20	
1090	Franco arenosa	12	12
	Franco arenosa	12	

6.3 Valores estimados para los parámetros de las capas superficiales.

RIO YPANE

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

W	Orden	Suborden	Gran grupo	Subgrupo	Textura	%	Espesor	MO	IMP %		arena	arcilla
100	Entisol	Orthent	Udorthent	Lithicudorthent	Franco arenosa	0,2	500	1,7	20	16	55	20
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arenosa franca	0,8	500	2	35		70	15
110	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arenosa	0,6	500	2	35	10	60	15
	Urtisol	Udult	Paludult	Typicpaleudult	Arenosa franca	0,2	500	2,5	20		70	15
	Entisol	Orthent	Udorthent	Lithicudorthent	Franco arenosa	0,2	500	1,7	20		55	20
120	Ultisol	Udult	Paleudult	Arenicrhodicpaleudult	Arenosa	0,3	600	2,5	20	9	60	15
				Typicpaleudult	Arenosa franca	0,3	500	2,5	20		70	15
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arenosa franca	0,4	500	2	35		70	15
130	Ultisol	Udult	Paleudult	Arenicrhodicpaleudult	Franco arenosa	0,5	700	1,5	20	8	55	20
		Typicpaleudult	Rhodudult	Typicrhodudult	Franco fina	0,4	500	3	30		64	24
	Entisol	Psamment	Quartzipsamment	Typicquartzipsamment	Arenosa	0,1	600	1,5	20		60	15
140	Urtisol	Udult	Paludult	Typicpaleudult	Arenosa franca	0,6	500	2,5	20	8	70	15
	Mollisol	Udolt	Hapludoll	Lithichapludoll	Franco arenosa	0,1	500	3	20		55	20
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arenosa franca	0,3	600	2	35		70	15
150	Ultisol	Udult	Paludult	Typicpaleudult	Franco arenosa	0,6	600	2,5	20	13	55	20
	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arenosa franca	0,4	500	2	35		70	15
160	Inceptisol	Ochrept	Dystrochrept	Umbricdystrochrept	Arcillosa muy fina	0,6	180	3	35	10	50	40
	Ultisol	Udult	Paleudult	Rhodicpaleudult	Franco arenosa	0,1	700	1,2	20		55	20
				Typicpaleudult	Arenosa franca	0,3	500	2,5	20		70	15
170	Ultisol	Udult	Paleudult	Typicrhodudult	Franco fina	0,5	600	1,2	30	13	64	24
			Paleudult	Arenicrhodicpaleudult	Franco arenosa	0,5	700	1,2	20		55	20
180	Ultisol	TypicPaleudult	Rhodudult	Typicrhodudult	Franco fina	0,3	500	3	25	7	64	24
		Udult	Paleudult	Rhodicpaleudult	Franco arenosa	0,4	700	1,2	20		55	20
	Alfisol		Udalf	Paleudalf	Mollicpaleudalf	Franco arenosa	0,3	650	1,5		20	55

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

W	DATOS				SWC				SMA					
	Espesor	M O	Are na	Arc illa	S	CC	CH	PM.	AS	AT	CH	AS	AT	CH
100	500	1,7	55	20	42,6	24,1	15,98	13	213	51,33	15,98	213,4	42,37	29,62
	500	2	70	15	42,7	18,8	33,03	10,5	213,5	40,13	33,03			
110	500	2	60	15	43,2	20,8	28,39	10,5	216	44,92	28,39	216	45,72	27,17
	500	2,5	70	15	43,8	19,4	34,71	10,9	219	42,48	34,71			
	500	1,7	55	20	42,6	24,1	15,98	13,2	213	51,33	15,98			
120	600	2,5	60	15	44,5	21,5	30,45	10,9	267	57,40	30,45	231,2	46,02	32,76
	500	2,5	70	15	43,8	19,4	34,71	10,9	219	42,48	34,71			
	500	2	70	15	42,7	18,8	33,03	10,5	213,5	40,13	33,03			
130	700	1,5	55	20	42,1	23,8	15,45	13	294,7	70,13	15,45	260,35	62,98	15,81
	500	3	64	24	43,9	26	13,61	16,4	219,5	57,07	13,61			
	600	1,5	60	15	42	20,2	26,42	10,1	252	50,90	26,42			
140	500	2,5	70	15	43,8	19,4	34,71	10,9	219	42,48	34,71	231,01	45,76	32,70
	500	3	55	20	45,5	25,6	19,68	14,1	227,5	58,24	19,68			
	600	2	70	15	42,7	18,8	33,04	10,5	256,2	48,16	33,04			
150	600	2,5	55	20	44,4	25	18,2	13,7	266,4	66,6	18,2	245,24	56,01	24,13
	500	2	70	15	42,7	18,8	33,03	10,5	213,5	40,13	33,03			
160	180	3	50	40	44,8	36,4	1,48	25,1	80,64	29,35	1,48	143,13	37,18	12,77
	700	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	290,5	68,26	14,69			
	500	2,5	70	15	43,8	19,4	34,71	10,9	219	42,48	34,71			
170	600	1,2	64	24	40,8	24	11,19	11,19	244,8	58,75	11,19	267,65	63,50	12,94
	700	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	290,5	68,26	14,69			
180	500	3	64	24	43,9	26	13,61	16,4	219,5	57,07	13,61	418,0	63,69	14,59
	700	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	290,5	68,26	14,69			
	650	1,5	55	20	42,1	23,8	15,45	13	273,6	65,12	15,45			

Para la cuenca del Río Jejuí se tiene:

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

RIO JEJUI														
W	DATOS				SWC					SMA				
	Espesor	MO	Are na	Arci lla	S	CC	CH	PM.	AS	AT	CH	AS	AT	CH
1070	500	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	22,1	207,5	48,76	207,5	48,8	14,69
1030	600	1,2	60	20	41,1	22,5	15,97	12,8	22,1	246,6	55,48	240,56	58,7	8,23
	500	2	55	20	43	24,3	16,51	13,3	22,1	215	52,24			
1040	500	1,2	57	20	41,3	23,1	15,19	12,8	22,1	206,5	47,70	206,5	47,7	15,19
1020	180	2	70	15	42,7	18,8	33,03	10,5	22,1	76,86	14,44	176,12	42,4	11,62
	700	1,5	60	20	41,8	22,9	16,67	13	22,1	292,6	67,0			
	250	1,5	70	15	41,6	18,1	31,41	10,1	22,1	104	18,82			
	500	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	22,1	207,5	48,76			
1080	500	1,2	57	20	41,3	23,1	15,19	12,8	22,1	206,5	47,70	205,9	43,1	21,57
	500	1,2	70	15	41	17,7	30,47	9,8	22,1	205	36,2			
1050	500	1,2	56	20	41,4	23,3	14,94	12,8	22,1	207	48,23	245,82	56,6	7,99
	650	1,5	60	20	41,8	22,9	16,67	13	22,1	271,7	62,21			
1110	500	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	22,1	207,5	48,76	257,72	58,8	8,09
	700	1,5	62	20	41,6	22,5	17,17	13	22,1	291,2	65,52			
1120	700	1,2	86	10	41,8	11,6	63,44	6,6	22,1	292,6	33,94	273,96	37,8	25,13
	600	1,2	70	15	41	17,7	30,47	9,8	22,1	246	43,54			
1100	550	2,5	86	10	44,4	13,4	67,69	8	22,1	244,2	32,72	244,2	32,7	67,69
1060	500	1,2	57	20	41,3	23,1	15,19	12,8	22,1	206,5	47,70	243,875	39,4	16,00
	500	2,5	81	11	44,2	15	57,92	8,6	22,1	221	33,15			
	750	1,2	92	5	43,5	7,6	110,35	3,5	22,1	326,25	24,79			
1090	500	1,2	55	20	41,5	23,5	14,69	12,8	22,1	207,5	48,76	211,1	50,4	7,765
	500	2	55	20	43,3	24,4	16,79	13,4	22,1	216,5	52,82			

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

6.4 Valores estimados para las capas subterráneas:

Los porcentajes de arena y arcilla se obtuvieron de SoilGrids (soilgrids.org), para el almacenamiento 1 se tomó 1 (un) metro de profundidad y para el almacenamiento 2 se tomó 2 (dos) metros de profundidad.

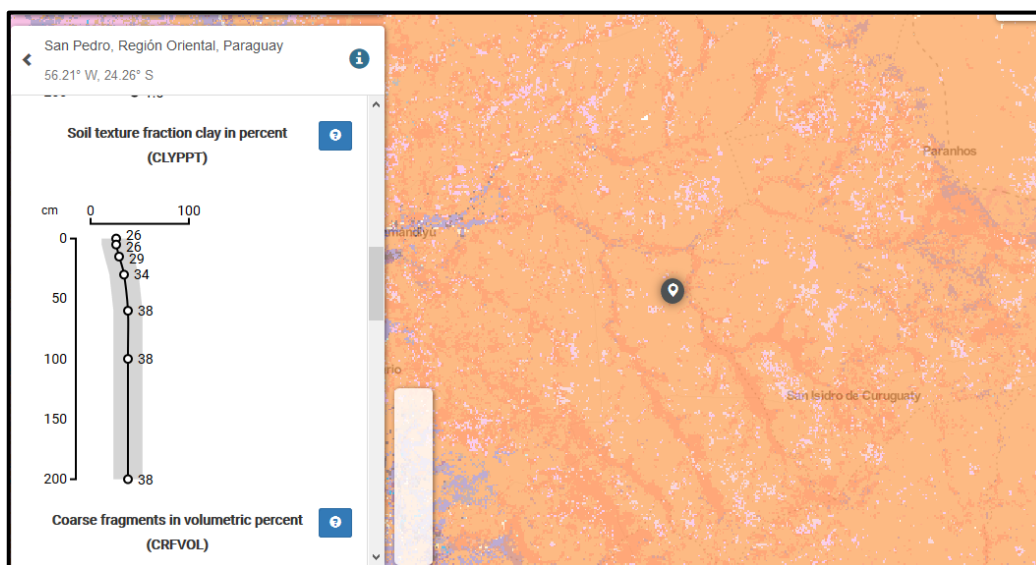


Figura: 55. Porcentaje de arcilla para una subcuenca del río Jejuí. **Fuente:** SoilGrids

Los valores estimados para la **cuenca del Río Ypané** son los siguientes:

		GW1	180	130	170	150	120	100	110	140	160
SWC	Saturación	42.6	40.6	41.5	43.9	44.1	43.7	42.6	43.3	44.4	
	Cap. de campo	30.1	28.2	29.8	32	33.2	30.7	28.7	30.3	31.7	
	Cond hidráulica	4.88	4.61	3.92	4.12	3.11	5.35	6.48	5.26	4.98	
	CC – PM	0.077	0.063	0.094	0.08	0.086	0.087	0.081	0.079	0.071	
	Punto de march.	22.4	20	20.4	24	24.6	22	20.6	22.4	24.6	
	Humedad		13.7	20.4							
DATOS	MO	1.2	1.2	1.2	2.5	2.5	2	2	2.5	3	
	Arena	48	65	58	53	52	55	58	58	55	
	Arcilla	30	31	32	33	35	31	29	31	32	
	Espesor	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
SMA	Alm del suelo	426	406	415	439	441	437	426	433	444	
	Almac. De tensión	128	114	124	140	146	134	122	131	141	
	Cond Hidráulica	5	4.61	3.92	4.12	3.11	5.35	6.48	5.26	4.98	
	Alm.	33	26	39	35	38	38	35	34	32	
	Coef.	87	88	106	107	142	82	66	82	89	

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

GW2		180	130	170	150	120	100	110	140	160
SWC	Saturación	42.4	42.2	42.5	44	44.2	44	42.7	43.4	44.3
	Cap. de campo	29	30	30	31.5	33.3	31.5	28.9	31	32.2
	Cond hidráulica	6.06	3.41	3.88	4.73	3.16	4.73	6.47	4.59	4.3
	Punto de march.	22.4	24.6	22.4	24	24.6	23.8	21.6	22.4	24.6
DATOS	MO	1.2	1.2	1.2	2.5	2.5	2.5	2	2.5	3
	Arena	48	53	50	53	51	53	57	57	55
	Arcilla	28	31	32	32	35	32	29	32	33
	Espesor	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
SMA	Alm. del suelo	848	844	850	880	884	880	854	868	886
	Alm. De tensión	245.92	253.2	255	277	294.37	277.2	246.80	269.08	285.29
	Cond Hidráulica	6.06	3.41	3.88	4.73	4.16	4.73	4.47	4.59	4.3
	Coef.	139.93	247.51	219.1	186	212.5	186.04	191.05	189.10	206.04
	Alm.	56	46	65	66	77	68	62	75	67

 Para la **cuenca del Río Jejuí** se obtuvieron los siguientes valores:

W	DATOS				SWC					SMA				
	Espesor	MO	Sa nd	Cl ay	S	CC	CH	PM	H	AS	AT	CH	A	Coef.
1070	1000	1,2	52	32	42,2	30,6	3,89	22,8	20,4	422	129,13	4,77	32,9	88,5
1030	1000	2	55	32	43	30,8	4,36	24,2	20,4	430	132,44	4,66	28,4	92,3
1040	1000	1,2	46	34	43,2	32,5	3,03	23,3	23,9	432	140,4	3,89	39,7	111,1
1020	1000	1,2	48	32	42,8	31,2	3,87	22,8	23,9	428	133,53	4,92	36,0	87,0
1080	1000	1,2	55	33	41,9	30,8	3,4	24,4	23,9	419	129,05	4,04	26,8	103,7
1050	1000	1,5	51	37	43,1	33,8	2,01	24,8	23,9	431	145,67	2,31	38,8	186,6
1110	1000	1,5	50	39	43,4	35,1	1,46	26	23,9	434	152,33	1,68	39,5	258,3
1120	1000	1,2	55	34	42	31,4	2,95	24,8	21,6	420	131,88	3,47	27,72	121,0
1100	1000	2,5	51	33	44,3	32,3	4,2	23,4	24,4	443	143,08	4,2	39,4	105,5
1060	1000	2,5	55	27	43,9	28,6	8,8	22,8	24,4	439	125,55	8,8	25,5	49,9
1090	1000	2	57	34	42,7	31,7	3,2	24,6	21,6	427	135,35	3,38	30,3	126,3

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

GW2 RIO JEJUI														
W	DATOS				SWC					SMA				
	ESPE SOR	M O	SAN D	CL AY	S	C C	C H	P M	H	A S	A T	C H	A	COE F
1070	2000	1, 2	52	31	42, 2	30	4,4 1	22, 8	23, 9	844	253,2	4,4 1	60, 8	191, 4
1030	2000	2	56	32	42, 8	30, 7	4,3 4	24, 2	23, 9	856	262,79	4,3 4	55, 6	197, 2
1040	2000	1, 2	46	35	43, 3	33, 1	2,6 7	26, 4	23, 9	866	286,65	2,6 7	58, 0	324, 3
1020	2000	1, 2	48	33	42, 8	31, 7	3,4 2	24, 8	23, 9	856	271,35	3,4 2	59, 1	250, 3
1080	2000	1, 2	56	32	41, 8	30, 1	3,9 1	24, 4	23, 9	836	251,64	3,9 1	47, 7	213, 8
1050	2000	1, 5	51	37	43, 1	33, 8	2,0 1	26, 6	23, 9	862	291,36	2,0 1	62, 1	428, 9
1110	2000	1, 5	50	39	43, 4	35, 1	1,4 6	23, 28	23, 9	868	304,67	1,4 6	61, 6	594, 5
1120	2000	1, 2	55	35	42, 1	32	2,5 3	24, 8	24, 24	842	269,44	2,5 3	60, 6	332, 8
1100	2000	2, 5	52	33	44, 1	32, 2	4,1 6	24, 6	24, 4	882	284,00	4,1 6	67, 0	212, 0
1060	2000	2, 5	55	26	44	28, 1	9,8 6	24, 28	24, 4	880	247,28	9,8 6	0,9	89,2
1090	2000	2	57	34	42, 7	31, 7	3,2	24, 6	24	854	270,72	3,2	60, 6	266, 9

6.5 Método área pendiente.**Datos utilizados:****Parámetros Sección
Transversal**

Velocidad

Manning

$$V = \frac{A R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

Caudal

$$Q = A * V$$

Área/Perímetro

Radio Hidráulico

Mojado

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Área	Rectangular	Niveles Bajos	<1m
	Trapezoidal	Niveles Altos	>1m
n de Manning canal	0,003		
n de Manning márgenes	0,03		
Z Talud margen izquierda	33		
Z Talud margen derecha	33		
Pendiente longitudinal del cauce	0,0012		
Ancho Cauce	Google Earth		

Cuenca del Río Ypané:

Tabla de valores utilizados para el método área pendiente.

Ancho	b	56	
Rugosidad	n	0,035	
Talud	z1	13	
Talud	z2	13	
Corrección regla		5,900857831	cm
Delta h		9,272019609	cm
Longitud		100000	cm
Pendiente	S	0,0000927	
Referencia		Parámetro a Calibrar	

Imagen satelital (Google Earth) de la ubicación de la estación Hidrométrica Belén y el del ancho del canal tomado en el mismo lugar.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental



Figura: 56. Ubicación de la estación hidrométrica Belén. **Fuente:** Google Earth.

Caudales obtenidos con el método área pendiente (Q1), comparados con los caudales obtenidos por el RHPY (Q2).

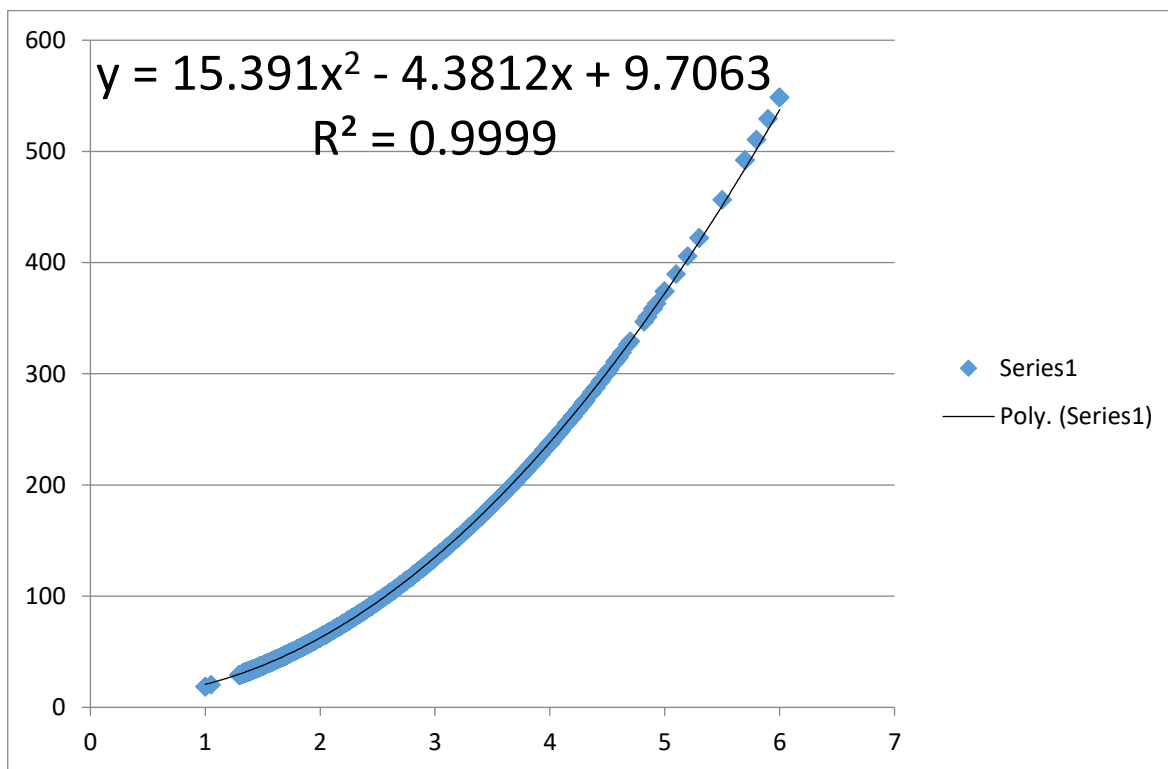
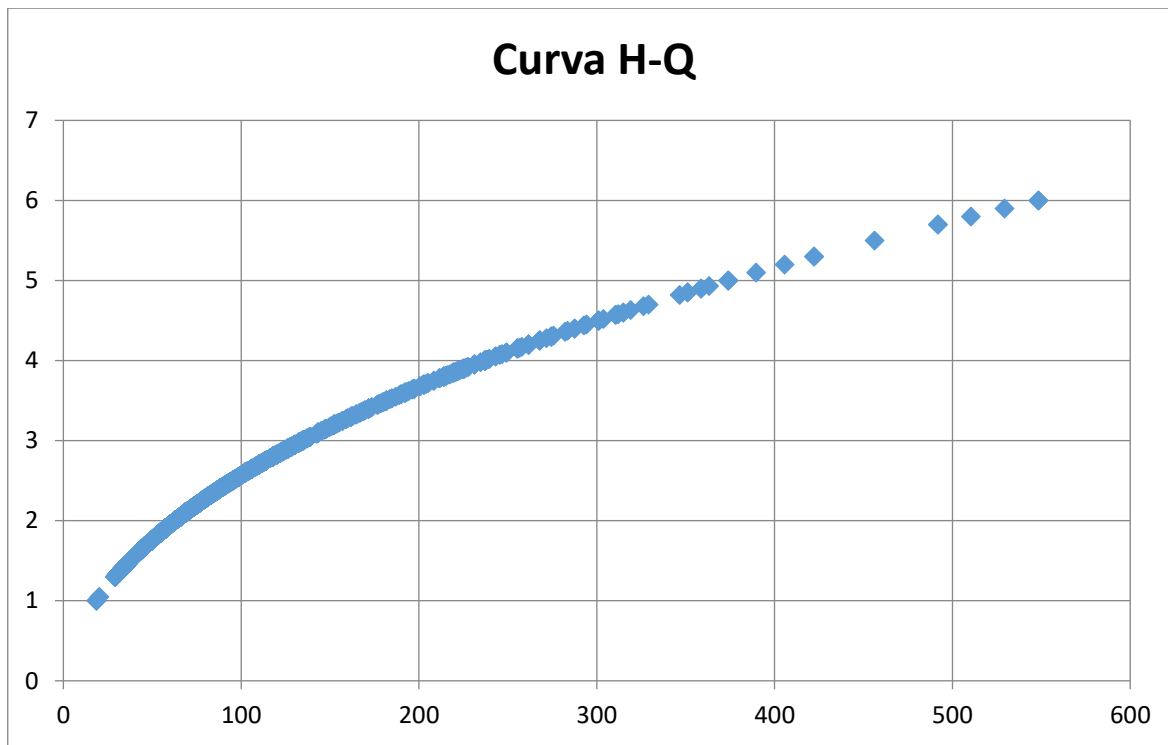
MES	Sintético RHPY Q1	Sintético Tesis Q2
ENERO	63,37	78,63
FEBRERO	62,43	72,31
MARZO	64,91	70,26
ABRIL	69,37	59,08
MAYO	78,31	85,69
JUNIO	77,40	63,45
JULIO	69,74	53,35
AGOSTO	57,37	48,65
SEPTIEMBRE	57,20	53,42
OCTUBRE	70,80	63,56
NOVIEMBRE	73,71	71,91
DICIEMBRE	65,60	89,94
CAUDALES	67,52	67,52

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Curvas H-Q obtenidas;



“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Cuenca del Río Jejuí:

Tabla de valores utilizados para el método área pendiente.

Ancho		100	
Rugosidad		0,03	
Talud		20	
Talud		20	
Corrección regla	38,3425493		cm
Delta h		40	cm
Longitud		100000	cm
Pendiente		0,0004000	
Referencia		Parámetro a Calibrar	

Imagen satelital (Google Earth) de la ubicación de la estación Hidrométrica Ruta 3 y del ancho del canal tomado en el mismo lugar.



“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

Figura: 57. Ubicación de la estación hidrométrica Ruta 3. **Fuente:** Google Earth.

Caudales obtenidos con el método área pendiente (Q1), comparados con los caudales obtenidos por el RHPY (Q2).

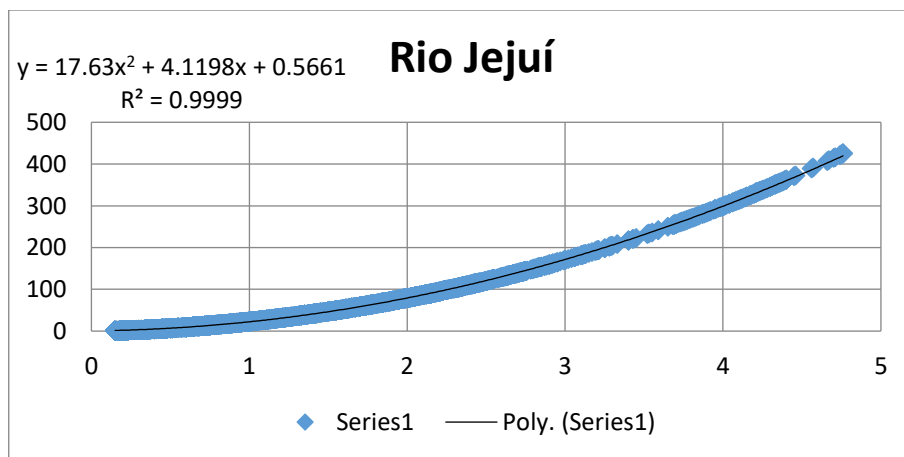
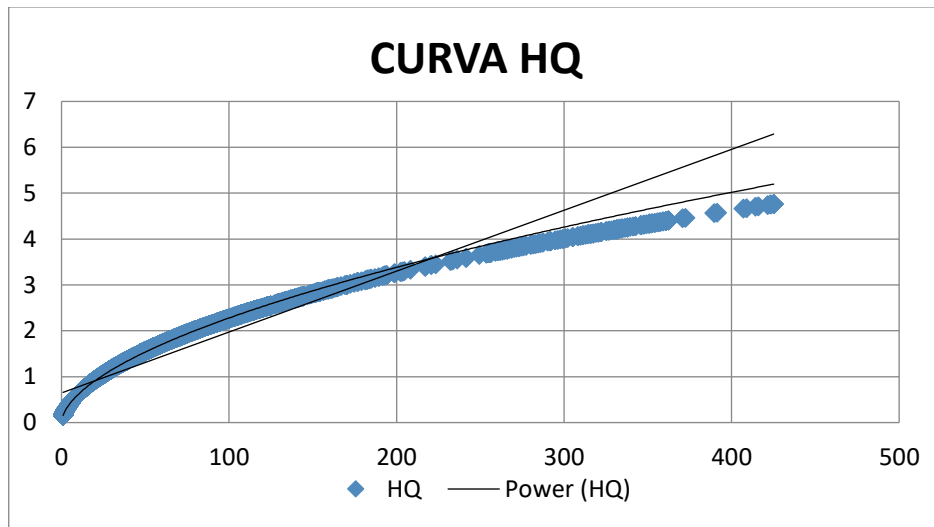
IPH MEN		TESIS
Años	Qmed	Qmed
1978	65,2071731	76,48
1979	145,87353	260,66
1980	113,062635	176,87
1981	97,7562625	146,83
1982	185,736977	192,19
1983	454,798944	345,65
1984	256,792166	232,25
1985	127,501235	163,78
1986	138,173799	228,06
1987	607,71496	260,31
1988	114,211116	162,05
1989	221,155038	154,87
1990	176,162085	203,45
1991	88,9805276	189,68
Caudales	199,509032	199,509286

Curvas H-Q obtenidas;

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental



6.6. Evapotranspiración

SAN PEDRO												
Nº DE DIAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEM BRE	OCTUB RE	NOVIE MBRE	DICIEM BRE
1	23,6	31,3	29	29,1	25,6	23,2	15,2	22,5	26,5	16,1	28,2	29,7
2	23,4	31,3	30	24,2	26	21,1	15,4	19,4	23,3	20,1	24	26,6
3	26	29,7	29,4	23,3	25,2	18,2	21,1	17,4	21,2	21,7	22,7	23,2
4	28,8	24,2	23,5	22,5	22,5	18,4	25,2	17,7	16	20,2	20,1	27,9
5	29,2	27,1	23,2	22,4	20,3	18,7	24,5	22,2	23,2	17,1	21,5	31,1
6	32,1	27,6	26,4	23	17,4	19,8	23,6	24,1	25,4	19,3	25,7	24,2
7	29,9	27,5	31,4	25,1	18,4	20,9	22,4	24,1	26,3	21,7	25,2	26,5

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

8	29,5	25,6	31,3	24,7	18,3	20	17	25,8	23,2	23,1	27,3	28,8
9	28,2	26	31,3	25,5	20,1	21,9	21,3	12,7	24	26,1	28,9	28,5
10	30,3	28,3	29,7	26,1	22,8	20,3	21,7	11,4	25,9	21,6	30,1	25,4
11	27,2	25,3	24,4	28,2	25,1	21,3	21,9	10,6	27,3	23,1	23,9	25,3
12	27,1	26,7	27,1	22	21,4	21,2	20,9	16,1	26,3	21,8	22,1	25,4
13	26,8	28,2	22,5	19,1	20,4	21,2	22,1	15,8	25,7	24,8	23,8	26,7
14	28,5	24,1	23,5	16,3	22	20,4	22,1	8,9	20,9	22,3	27,5	28,2
15	28	27	23,3	17,2	22,6	16,5	20,2	8,4	17,8	21,9	30,1	29,1
16	28,3	26,1	23	18	14,2	19,6	17,3	12,7	14,9	23,2	21,6	29,8
17	28,6	28,2	23,6	18,2	13,9	19,4	20,4	13,2	13,2	23,5	23,1	29,7
18	28,9	28,1	24	17,1	17,9	21,6	23	17,6	13,6	22,4	28	29,4
19	27,6	26,9	24,2	19,4	21,7	18,5	15,4	21,8	16,1	23,3	27,5	27,5
20	26,2	25,9	21,4	20,3	17,7	14,3	12,8	24,4	25,7	26,8	24,3	26,2
21	26,9	26,2	23,3	21,8	19,4	11,8	12,4	25,2	29,1	27,1	25,5	27,5
22	28,1	27,6	23,3	21,5	18,8	12,3	8,6	25,4	18,1	23,3	24,9	30,3
23	31,5	27,7	25,9	22	16	15,8	5,5	12,5	12,7	29,2	25,9	30,7
24	30	28,3	23,3	21,4	16,4	14,8	6,4	9,3	13	24,4	26,9	28,4
25	23	28	24,7	21	19,1	14,9	7,4	8,8	12,4	24,2	28,2	28,2
26	23,7	25,5	24,7	23,1	19,3	14,1	12,4	8,1	18,7	24,9	27,2	30,2
27	25,5	23,9	20,1	24,5	23	17,2	16,6	6,4	24,5	23,7	28,7	31,1
28	26,6	26,6	20,3	25,3	24,6	21,8	19,8	9,5	23,1	23,2	27,4	28
29	28,6	758,9	21,9	25,1	24,9	21,3	21,5	14,8	23,2	27,4	22,7	27,3
30	31,2		24,9	25	16	18,3	21,5	19,4	16	25,4	25,7	26,5
31	30,5		27,1	672,4	17,7	558,8	21,5	25,2	627,3	27,4	768,7	27,4
	863,8		781,7		628,7		557,1	511,4		720,3		864,8
T med ia	27,86	27,10	25,22	22,41	20,28	18,63	17,9	16,50	20,91	23,24	25,62	27,90
I	13,476 1983	12,9229 471	11,58 512	9,692 28506	8,330 69449	7,323 9272 1	6,93 7142 42	6,09398 73	8,725 20057	10,23 55956	11,86 95363	13,499 8253
Hde sol	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
Nº DE DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
ETP	176,9	142,6	123	81,3	60,7	45,4	43,4	36,0	70,3	102,4	135,4	180,1

SANTANI												
Nº DE DIAS	ENERO	FEBRE RO	MARZ O	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST O	SETIE MBRE	OCTU BRE	NOVIE MBRE	DICIE MBRE

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

1	22	30,1	27,6	27,5	25,6	21,6	14,8	25	28,1	17,4	28,2	27,6
2	23,1	29,9	29,4	25,7	26,9	20,4	15,7	20,5	21,7	23	24,4	27,4
3	25,4	26,7	28,4	23,3	27,8	19,3	19,7	18,8	20,9	22,9	24	25,2
4	28,5	24,4	22,4	22,2	20,4	18,1	23,6	17,5	19,1	21,1	23,8	27,7
5	29,6	27,6	22,3	21,7	20	20,8	29,2	22	22,8	23,4	22	30,4
6	30,1	28,4	23,3	21,1	16,8	20,6	25,9	24,5	24,3	20,7	25,1	24,8
7	29	28	26,9	23	16,2	26,4	26,4	24,7	24,3	22,5	24,7	26
8	29,3	28,3	28	23,8	16,2	21,1	16	25,5	24,1	22,9	27,4	28,7
9	28,9	26,2	29,3	24,5	20,8	22	19,1	12,1	26,9	25,3	29,5	28,5
10	31,3	27,1	25,3	26,6	22,4	19,8	21,4	11,2	26,8	22,1	30,1	28,7
11	29,3	25,1	25,5	27,4	23,4	20,5	22,8	10,3	29	23,9	24,2	29,3
12	29,7	26	27	23,1	21,7	23,1	23,3	16	28,7	22,7	22,3	27,7
13	28,5	26,1	21,9	19,5	20,7	20,5	19,1	14,5	28,7	25,2	25,1	27,5
14	27,9	22,1	23	20,1	20,7	18,8	21,1	8,9	22,1	22,5	30,3	30
15	27,6	26,6	23,8	20,2	21,6	14,7	19,8	8	16,8	22,7	28,6	30,7
16	27,6	25,4	23,1	19,9	14,2	18,9	28,2	14,1	15,7	22,9	22,8	31,9
17	29,2	28,3	26,2	19,7	13,9	18,7	20,2	14,8	13	24,3	24,7	30,8
18	29,1	27,9	23,7	19,7	17	20,5	24,8	17,8	13,4	25,9	30	29,7
19	27,7	26,7	24,9	21	20,8	18,9	13,6	21,1	16	25,6	26,3	27,5
20	26,4	27,2	22,9	21,9	16,9	16,4	11,9	23,6	28,5	28,5	24,7	28,1
21	29,5	26,2	23,4	21	18,1	11,7	11,5	26	29,5	23,9	26,6	27,9
22	27,2	27,6	22,2	21,7	17,1	12,3	6,8	25,5	17,5	23,3	26,5	26,9
23	26,4	28,5	23,3	22,2	16,4	12,3	5,3	12,2	12,1	29,3	26,3	29,2
24	31,3	28,7	25,3	22	16,7	14,3	7,1	8,9	12,9	22,7	26	29,9
25	24,6	27	28,3	24,9	18,4	14	8,1	8,4	13,1	24,2	27,9	30,2
26	25,8	24,9	24,1	25,6	18,5	13,8	13	7,8	18,9	26,1	29,5	30,5
27	30	24,4	22,9	26,4	20,5	16,7	17,9	6	22,6	23,8	30,1	32,7
28	27,8	25,7	20,5	28	24,4	22,1	19,9	9,6	22,7	23,1	29,1	29,8
29	29,8	751,1	22,1	25	23,9	20,4	22,5	15,6	25,7	31,1	24,3	30,3
30	29,6		26,5	25,7	15,1	17,9	23	20,8	16,1	25	25,4	28,3
31	29,9		26,1	694,4	17,8	556,6	24,4	25,8	642	27,8	789,9	25,2
	872,1		769,6		610,9		576,1	517,5		745,8		889,1
T MEDIA	28,13	26,83	24,83	23,15	19,71	18,55	18,58	16,69	21,4	24,06	26,33	28,68
I	13,67 27278	12,72 23859	11,31 47017	10,17 6418	7,976 20998	7,280 31619	7,298 46605	6,204 37566	9,036 6168	10,78 91714	12,36 86418	14,07 82617
Horas de sol	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13
Nº DE DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
ETP	183,1	139,4	118,6	88,3	55,3	44,0	46,5	36,1	74,1	112,3	146,3	188,8

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	24,6	32,5	30,2	29,3	24,6	24,4	16,8	25,3	28,5	16,8	28,3	31,5
2	23,9	31,2	31,6	24,2	27,4	20,7	16,1	21	26,1	20,1	24	26,5
3	26,5	29,7	30,9	24,9	27,3	19,2	22,9	17,4	23	23,6	23	25,2
4	29,7	25	23,5	23,2	25,1	17,8	26,5	18,7	20	20,9	21,1	28,4
5	30,9	28,4	24,2	22,5	21,1	18,7	25,5	23,1	22,9	18,2	22,7	31,7
6	30,8	29,4	28	23,5	17,9	19,8	24,7	24,9	25,2	20,6	25,7	25
7	31,2	27,6	31,2	23,7	17,6	19,9	24,1	25,9	27,7	23,2	25,8	26,1
8	31	27,8	31,6	24,5	17,6	21,2	19,9	25,8	23,9	24,7	28	28,5
9	25,9	27,7	32	25,6	17,9	22,8	20,9	12,8	24,9	27	29,9	28,5
10	28,1	29,3	31,3	25,4	21,6	10,5	21,3	12,4	27,4	22,5	30,7	26,1
11	27,9	25,8	25,8	27,9	24,3	21,8	23,6	10,6	28,6	23,3	25	26,3
12	26,2	27,3	29,1	22,8	24,1	21,9	20,6	19,5	29	24,2	22,4	26,1
13	26,9	28	22,4	20,1	22,2	22,7	22,1	17,1	27,5	23,1	24,8	26,6
14	28,7	28	24,4	17,9	23,7	21,6	22,9	9,8	22,4	22	28,2	28,5
15	28,6	26,7	23,7	18,1	25,5	18,3	20,5	8,7	18,4	24,4	32,4	28,7
16	28,6	28,5	23,1	19,1	15,1	20,3	18,4	13	15,7	25,3	21,3	29,6
17	29,2	32,9	22,4	19,3	15	20,5	21,6	13,9	13,8	24,4	24,1	29,5
18	29	29,1	23,5	19	19,4	22	25,5	17,3	14,7	24,7	28,9	28,9
19	28,7	28,7	24,9	20,4	22,2	19,7	16,1	22,1	18	27,9	27,9	27,1
20	26,3	26,3	21,7	20,8	17,8	14,8	13,6	25,5	27,4	28,5	24,4	28,2
21	28	27,2	23,4	21,9	19,7	11,9	12,7	27,7	30,1	23,4	25,1	27,7
22	28,6	28,2	23,8	21,7	19,3	12,7	9,4	28,4	18,5	30,1	25,8	28,4
23	29,8	28,5	25,2	22,9	16,4	16,5	7,5	13,3	14,6	26,4	26,2	28,2
24	30,5	29,7	24,5	22,2	17,4	14,9	7,2	10,5	14,6	24,7	27	29,5
25	24,7	28,3	24	22,1	18,4	15	8,1	9,2	13,2	26,1	29,3	29,8
26	25,6	26,6	23,6	23,9	19,1	14,6	11	8,7	18,4	24,7	29	30,4
27	24,6	25,4	21	25,8	22,7	16,6	15,5	7,3	25,3	24	29,7	32,3
28	27,5	28,1	20,4	26,8	25,6	23,4	21,1	10,2	26	28,7	28	28,9
29	30,7	791,9	22,3	27,3	25,3	21,5	20,7	14,1	24,3	27,4	24,3	26,8
30	30,4		24,6	26,1	16,8	18,8	20	19,7	16,5	27,7	26,1	26,9
31	31,1		26,2	692,9	17,8	564,5	22,8	27,7	666,6	27,7	789,1	28
	874,2		794,5		645,9		579,6	541,6		756,3		873,9
T _{media(Ta)}	28,2	28,28	25,63	23,10	20,84	18,82	18,70	17,47	22,22	24,40	26,30	28,19

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

I	13,7 2260 503	13,783 1681	11,873 5333	10,1 4315 5	8,6781 6793	7,43 7329 94	7,36 5702 46	6,6470 2472	9,56598 977	11,019 9767	12,34968 12	13,71547 59
Horas de sol	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
Nº DE DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EV T	185,23	162,37	129,02	86,46	62,91	44,13	45,63	39,29	80,74	115,62	145,58	187,83

6.7. Parámetros del Muskingum Cunge (8 puntos).

Secciones transversales del canal:

Río Ypané					
Tramo	Longitud	Pendiente media	Manning Canal	Manning L.D.	Maning L.I.
R50	333	0.00003	0.04	0.04	0.035
R60	128	0.00002	0.04	0.04	0.035
R80	315	0.000012	0.04	0.35	0.35
R90	300	0.000029	0.04	0.1	0.1

R90	
0	158
64	126
149	117
174.5	94
187.25	94
200	117
230	126
300	158

Long 33m

R80	
0	147
68	145
143	144
166	143
177	143
203	144
235	145
315	147

Long 42 m

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

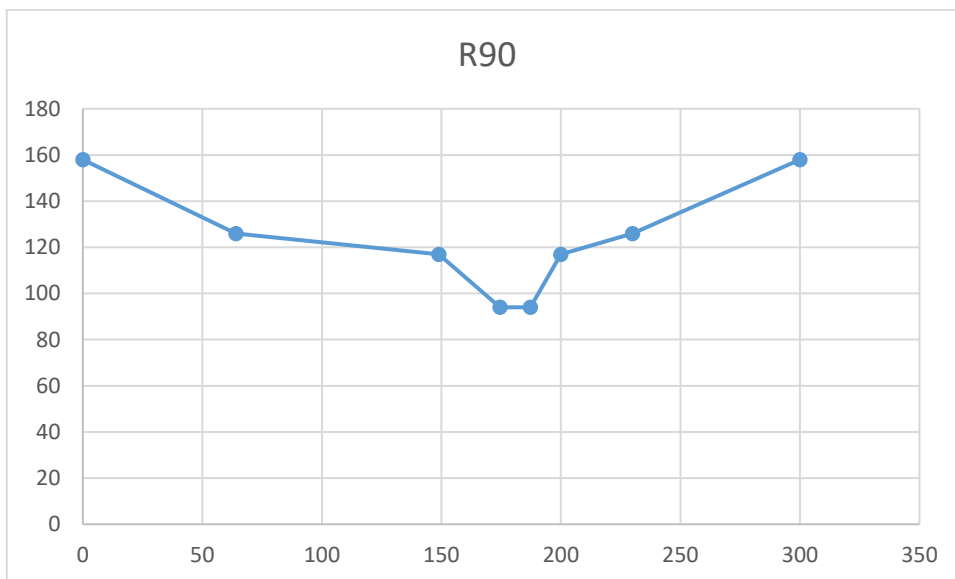
R60	
0	156
25	153
62.4	151
64	150
78	150
80.4	151
103	153
128	155

Long 18m

R50	
0	147
62	145
147	144
166	143
178	143
190	144
261	145
333	147

Long: 43m

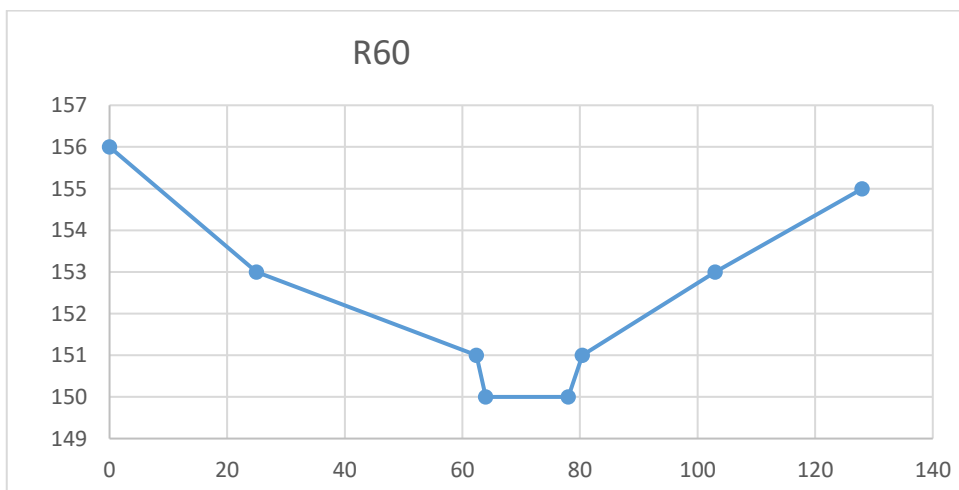
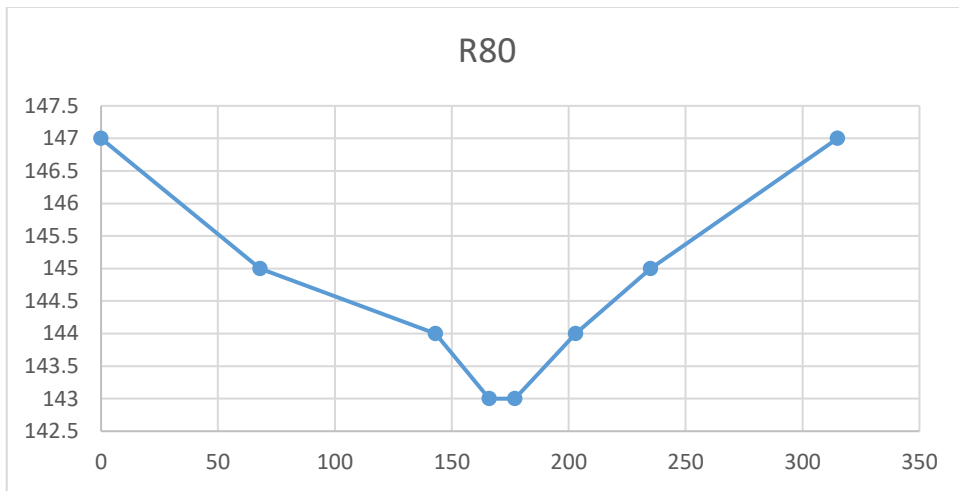
Lon: Longitud del ancho del canal del río Ypané en cada tramo.



“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

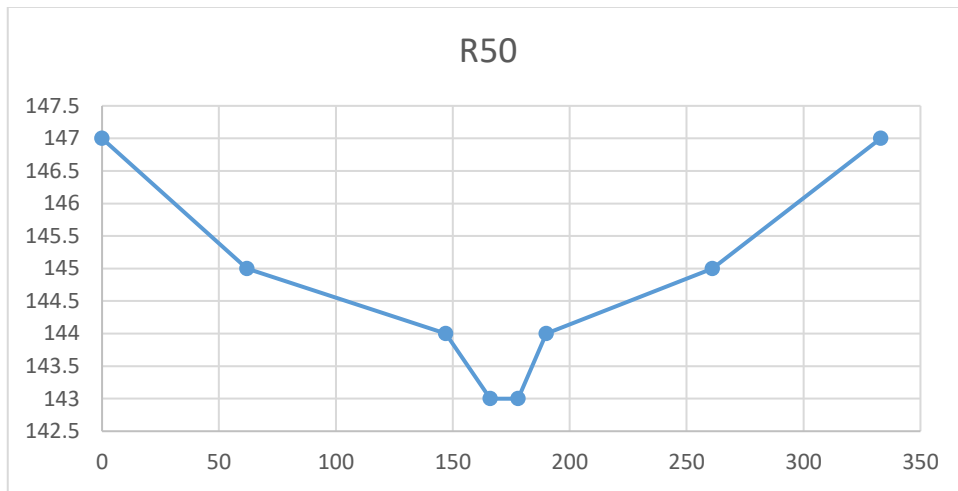
Ingeniería Ambiental



“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental



Río Jejuí					
Tramo	Longitud (m)	Pendiente media	Manning Canal	Manning L.D.	Maning L.I.
990	132	0,00047	0.04	0.04	0.04
960	263	0,000314	0.04	0.04	0.035
950	347,6	0,000395	0.04	0.08	0.08
940	232	0,000365	0.04	0.08	0.08
930	260	0,000404	0.04	0.04	0.04

R990	
0	198
20	184
45	158
55,66	116
66,994	116
77	158
107	184
132	204

Lon 32 m

R960	
0	117
50	106
87	102
124	86
161	86
198	102
238	106
263	117

Lon 148 m

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental

R950	
0	220
100	195
185	182
200	110
232,6	110
247,6	182
297,6	195
347,6	220

Lon 62.6 m

R940	
0	205
50	185
83	130
108	95
133	95
166	130
202	185
232	210

Lon 116 m

R930	
0	96,6
50	96
130	95
143,53	90
157,06	90
170,6	95
240	96
260	98

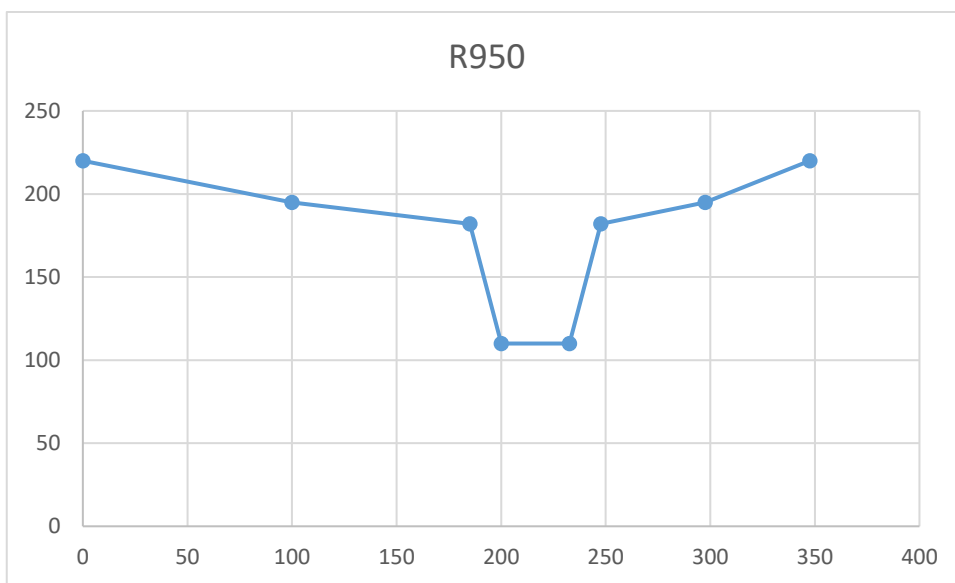
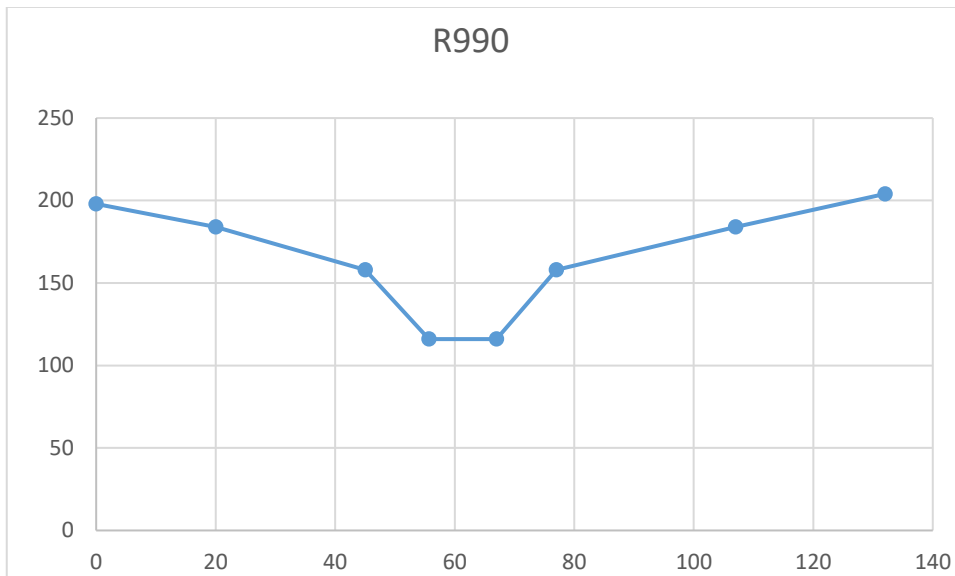
Lon 40.6 m

Lon: Longitud del ancho del canal del río Jejuí en el tramo.

“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

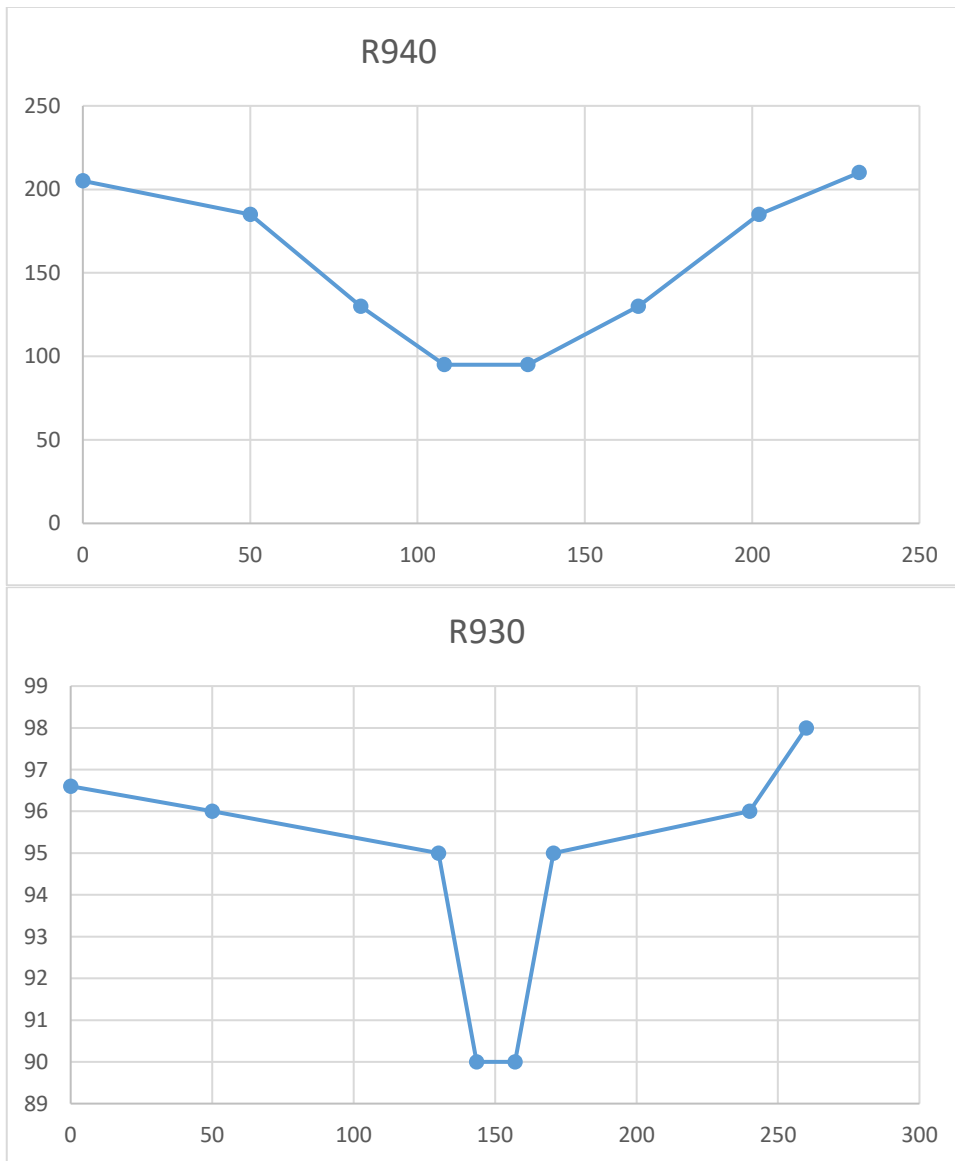
Ingeniería Ambiental



“Modelación Hidrológica de las cuencas de los Ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay”

Segundo Semestre 2018

Ingeniería Ambiental



7. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F.J. Fundamentos de Hidrología de Superficie – 1ra Edición. México, Editorial LIMUSA, 1992. ISBN 968-18-3014-8.
- Banco Mundial & MAG - Paraguay. (1995). Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra. Asunción - Paraguay.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill Interamericana.
- Collischonn, W., & Tassi, R. (2008). Introduzindo Hidrologia (5ta. ed.). Porto Alegre - Brasil: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH-UFRGS.
- Congreso Nacional del Agua Resistencia, (2011). Chaco, Argentina
- Dávila, Virginia (2011) modelación distribuida con Tetis, dentro del marco del Proyecto comparación de Modelos distribuidos del NWS de EEUU aplicado en la “región de Oklahoma”. Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- FAO, 2016. Sitio web AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). Diseño Hidrológico. Edición digital publicada en la biblioteca virtual de la WASA-GN. ISBN:978-987-05-2738-2.
- Francés, F., & Múnera, J. (2008). Modelación hidrológica distribuida de la cuenca de los ríos saja-besaya con el modelo tetis v.7.2, para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias - Colombia.
- Gobierno de Cantabria. (2004). Plan de Investigación Integral para la Caracterización y Diagnóstico Ambiental en los Sistemas Acuáticos de Cantabria - Anejo N°2 Descripción y Características del Programa HEC-HMS. Estudio de Recursos Hídricos, Santander - España.
- Gottschalk, L.; Motovilov, Y. Macro-scale hydrological modelling - scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World', 2000,

Tokyo. Anais...Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000.

- ITAIPU-FPTI (2011). Proyecto: Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas Hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay (RHPY).Atlas Potencial Hidroenergético del Paraguay, Vol. 1 y Vol. 2
- ITAIPU-FPTI (2011). Proyecto: “Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay RHPY)”. Recopilación De datos Hidrometeorológicos.
- Kirpich, Jun (1940). Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds.
- Ley N° 3.239 de los Recursos Hídricos del Paraguay
- Ministerio de Obras Públicas (MOPC, 2002). Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico. Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay.
- Plan maestro de generación y transmisión.(2014). Administración Nacional de Electricidad. Dirección de Planificación General y Política Empresarial (DP). División de Estudios Energéticos (DEE).Departamento de Estudios de Generación y Transmisión (DP/DEG)
- Pereira, B. (2015). Implementación del Modelo Hidrológico HEC-HMS en la Cuenca del Río Carapa. Tesis de Grado de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Asunción - Paraguay.
- Ponce, V.M. (1989). “Engineering Hydrology”. Prentice Hall.
- Sánchez, F.J. (2012). Manual Elemental (HEC-HMS). Departamento de Geología – Universidad de Salamanca, España.
- Saxton, K.E, Rawes W.J. (2006). "Soil Water Characteristics EstimatesbyTexture and OrganicMatterfor Hydrologic Solutions".
- Viessman, W. J. & Lewis, G. L. (2003) 5ta. Edición, Introduction to Hydrology.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. (2009). HEC Data Storage System User´s Manual. Versión 2.0.

- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. Version 4.

