



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



POTENCIAL HIDROELECTRICO DE LA PROVINCIA DE MISIONES

Informe Final



Aprovechamiento Salto Taruma, San Vicente, Misiones



Proyecto LHA 358
Informe LHA 02-358-16
Ezeiza, Marzo de 2016

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Emilio LECERTUA

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Lucas Storto

Ing. Matthias FISCHER (CEED)

Fátima Schoninger (CEED)

POTENCIAL HIDROELECTRICO DE LA PROVINCIA DE MISIONES

Informe Final

RESUMEN

Se presenta la información recopilada para proceder a la modelación hidrológica de todas las cuencas de la Provincia de Misiones. Se describe la implementación y calibración de la modelación hidrológica. Se presentan los caudales obtenidos con el modelo hidrológico para todas las cuencas. Se describe la metodología de evaluación del Potencial Hidroeléctrico Teórico y se la aplica a todas las cuencas.

Descriptores temáticos: Análisis de datos, modelación hidrológica, potencial hidroeléctrico teórico

Descriptores geográficos: Provincia de Misiones, Argentina

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	5
2	BASE DE DATOS	7
2.1	DATOS TOPOGRAFICOS	7
2.1.1	Curvas de Nivel	7
2.1.2	Secciones Transversales	8
2.1.3	Modelo Digital de Elevación	10
2.2	DATOS HIDROLÓGICOS	14
2.2.1	Red hidrográfica	14
2.2.2	Cuencas	15
2.2.3	Clima	17
2.2.4	Precipitaciones	18
2.2.5	Temperatura	30
2.2.6	Heliofanía	31
2.2.7	Viento	31
2.2.8	Humedad Relativa	34
2.2.9	Evapotranspiración	35
2.2.10	Hidrometría	36
2.3	SUELO	43
2.3.1	Usos del suelo	43
2.3.2	Tipos de suelo	47
2.3.3	Erosibilidad	47
2.4	APROVECHAMIENTOS EXISTENTES Y PROYECTADOS	50

3	MODELO HIDROLOGICO	53
3.1	Metodología	53
3.2	Preprocesamiento hidrológico	53
3.2.1	Selección del MDE del terreno	54
3.2.2	Relleno de Vacíos	54
3.2.3	Dirección del flujo	56
3.2.4	Acumulación del flujo	57
3.2.5	Definición de cauces	57
3.2.6	Segmentación de cauces	58
3.2.7	Delineación de cuencas	59
3.3	Esquemmatización	59
3.3.1	Cuencas	59
3.3.2	Modelo de balance vertical	62
3.4	Parámetros de la modelación hidrológica	64
3.4.1	Almacenamiento máximo	64
3.4.2	Infiltración máxima y percolaciones	65
3.4.3	Flujo de base	66
3.4.4	Escorrentía superficial	66
3.4.5	Evapotranspiración	67
3.5	Calibración	69
3.5.1	Criterios	69
3.5.2	Cuenca Piray Miní	70
3.5.3	Cuenca Piray Guazú	74
3.5.4	Cuenca Paranay Guazú	78
3.5.5	Cuenca Yabebiry	81
3.6	Explotación	85

4	CÁLCULO DE POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO	90
4.1	Metodología	90
4.2	Verificación	91
4.3	Análisis general	92
4.4	Análisis por cuenca	95
4.4.1	Cuenca del Uruguayí	95
4.4.2	Cuenca del Piray-Guazú	97
4.4.3	Cuenca del Yabotí	99
4.4.4	Cuenca del Piray Miní	101
5	CONCLUSIONES	103

1 INTRODUCCIÓN

La Provincia de Misiones presenta excedentes hídricos de significación, que pueden explotarse para producir hidroelectricidad. El objetivo del presente estudio es evaluar el Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto de todas las cuencas de la Provincia de Misiones, de modo de proveer las bases para el establecimiento de mini o microcentrales adaptadas a cada cuenca.

Los resultados de esta etapa de estudios permitirán identificar los emprendimientos potencialmente más interesantes. En una segunda etapa de estudios podría encararse el cálculo del Potencial Hidroeléctrico Técnico Aprovechable de los emprendimientos seleccionados.

El estudio comprende las siguientes tareas:

1. Identificación de las cuencas hidrográficas de la Provincia de Misiones y representación en un Sistema de Información Geográfica (GIS).
2. Construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno en base a datos del IGN y satelitales.
3. Construcción de la base de datos climáticos en base a registros disponibles en estaciones terrestres e información satelital.
4. Recopilación de información hidrométrica disponible sobre los cursos de agua (niveles, aforos).
5. Implementación y calibración de modelos hidrológicos continuos en el tiempo para cada una de las cuencas hidrográficas en base al software HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de EEUU.
6. Construcción de curvas de frecuencia mensuales de caudal para cada cuenca, en base a los resultados de los modelos, y para distintos puntos de cierre.
7. Cálculo del Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto para cada cuenca, para distintos puntos de cierre.

La organización del Informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se presentan los datos recopilados que se utilizan para la modelación hidrológica.
- En el capítulo 3 se describe la implementación y calibración del modelo hidrológico y se presentan las curvas de excedencia de caudales calculadas para todas las cuencas.
- En el capítulo 4 presenta la metodología para el cálculo del Potencial Hidroeléctrico Teórico y se la aplica a todas las cuencas.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones del estudio.

2 BASE DE DATOS

2.1 DATOS TOPOGRAFICOS

A continuación se indican los tipos de datos topográficos disponibles, y los utilizados para construir el Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno.

2.1.1 Curvas de Nivel

Se contó con curvas de nivel cada 25 m, descargadas del sitio oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN)¹. Las cotas de dichas curvas están referidas al cero IGN, y se encuentran georreferenciadas en el sistema UTM21S. En la Figura 2.1.1 se presentan esas curvas de nivel para toda la Provincia de Misiones. Se observa que la densidad de curvas de nivel es menor al sureste de la provincia, indicando que se trata de una zona más llana, por lo que la resolución de 25 m resulta en una representación topográfica relativamente pobre para esa zona.

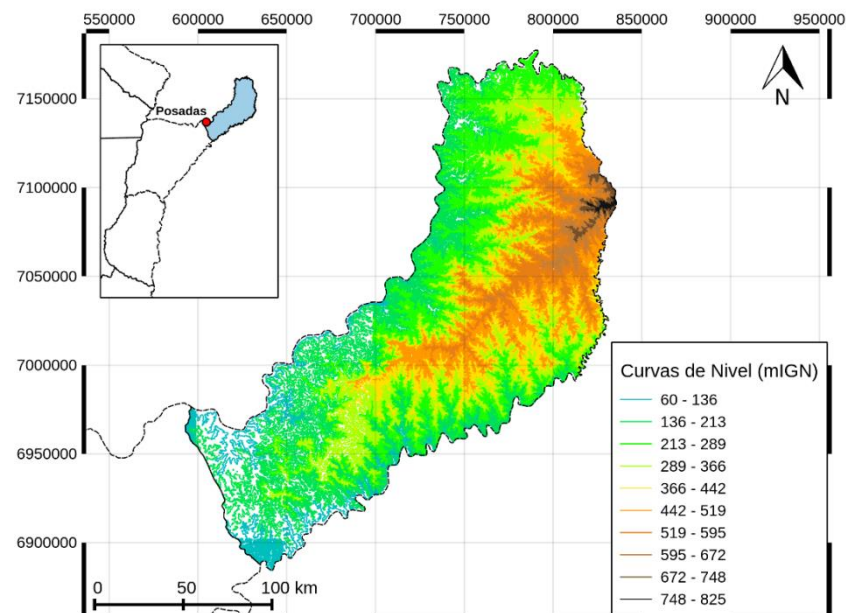
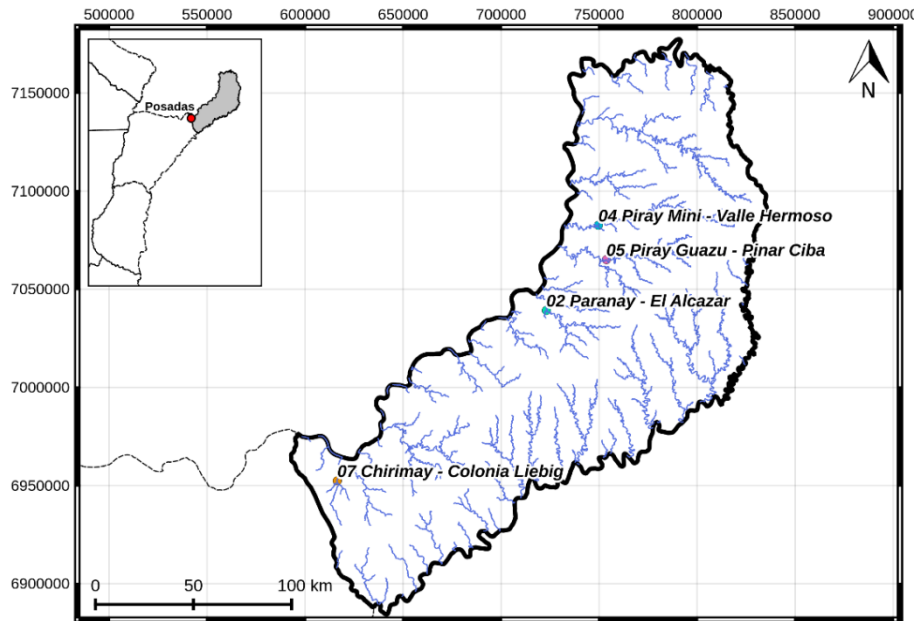


Figura 2.1.1 Curvas de Nivel IGN (cada 25m)

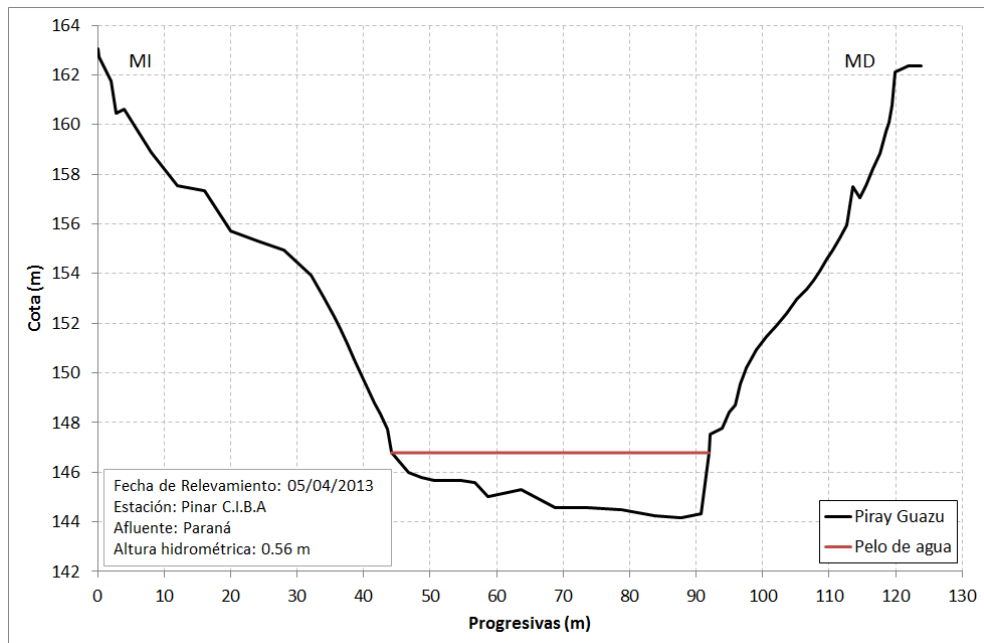
¹ Curvas de nivel IGN, Agosto 2015 (http://www.ign.gob.ar/archivos/sig250/CURVAS_DE_NIVEL.zip)

2.1.2 Secciones Transversales

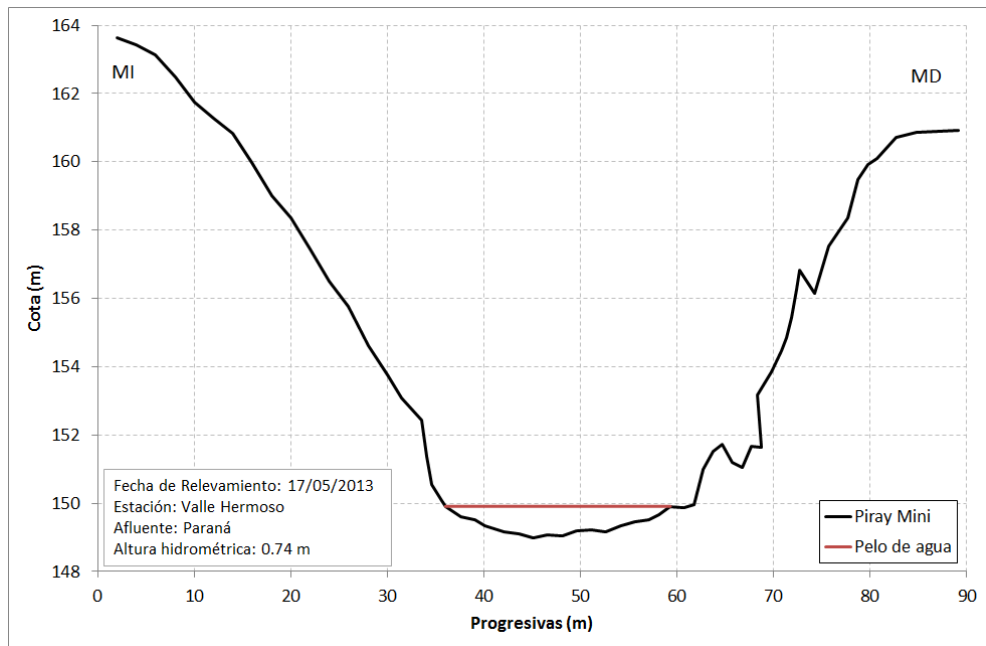
Se dispuso de datos de relevamiento de algunas secciones transversales aisladas correspondientes a cuatro arroyos, provistas por EVARSA, las cuales se representan en la Figura 2.1.2, donde también se indica su ubicación.



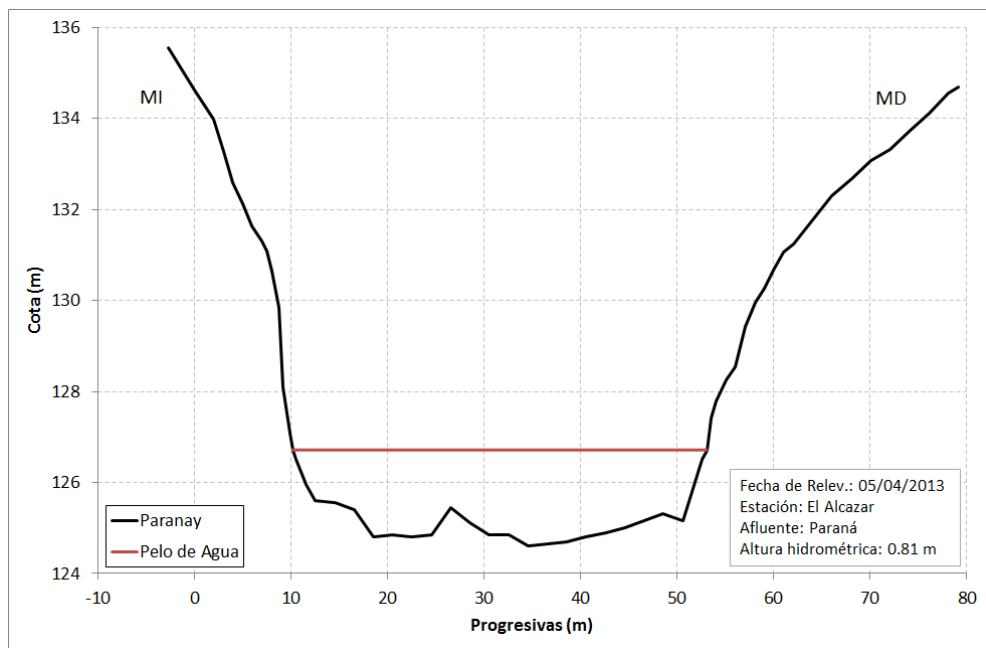
a) Ubicación de secciones



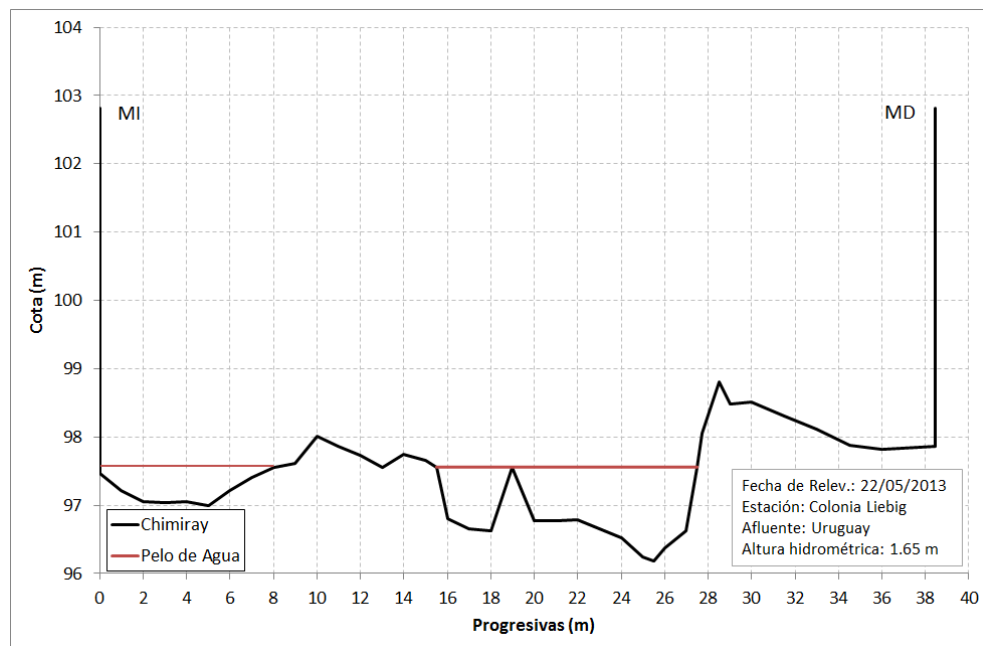
b) Piray Guazú (05)



c) Piray Mini (04)



d) Pararay (02)



e) Chimiray (07)

Figura 2.1.2 Secciones transversales de arroyos

2.1.3 Modelo Digital de Elevación

Para la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno se dispuso de tres fuentes, a saber:

- Curvas de nivel del IGN, ya mostradas en la sección 2.1.1.
- MDE de la misión SRTM procesado por el IGN².
- MDE de la misión SRTM de la NASA³.

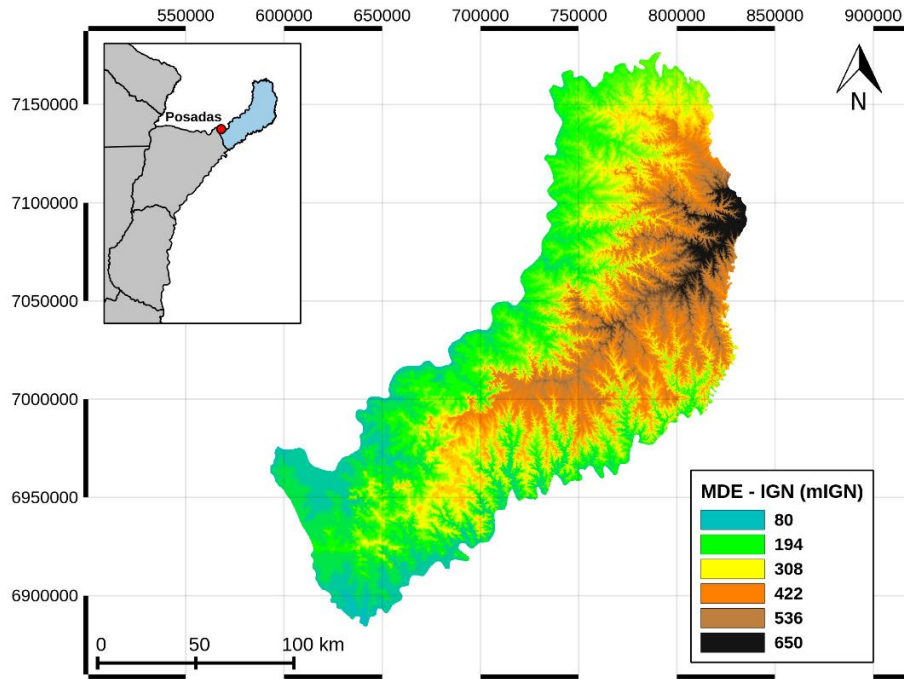
En la Figura 2.1.3a se muestra el MDE elaborado a partir de la interpolación de las curvas de nivel IGN (MDE IGN).

La Figura 2.1.3b presenta el MDE del SRTM procesado por IGN (SRTM-AR). El paso espacial es de 45m. Según consta en la documentación del IGN, tiene un procesamiento de relleno de vacíos, filtrado espacial, enmascarado de límites e inclusión de datos de lagos. Respecto de la red de puntos fijos del IGN (138 puntos en la Provincia de Misiones), el desvío estándar es de +2.83 m.

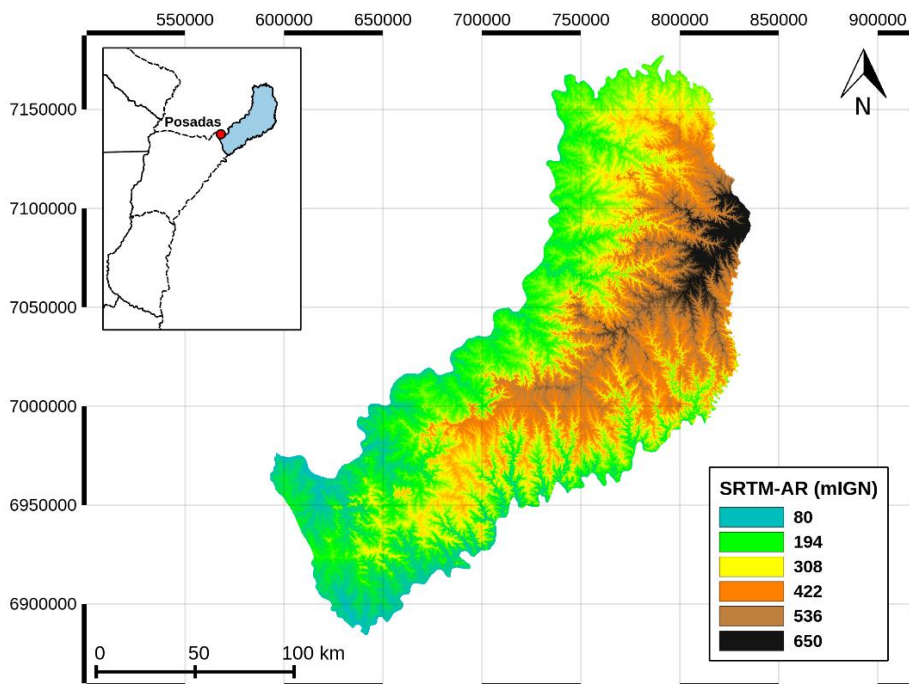
Por último, en la Figura 2.1.3c se muestra el MDE de la NASA (SRTM 4.1), con un paso espacial de 90m, recortado para la Provincia de Misiones.

² SRTM-AR (<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>)

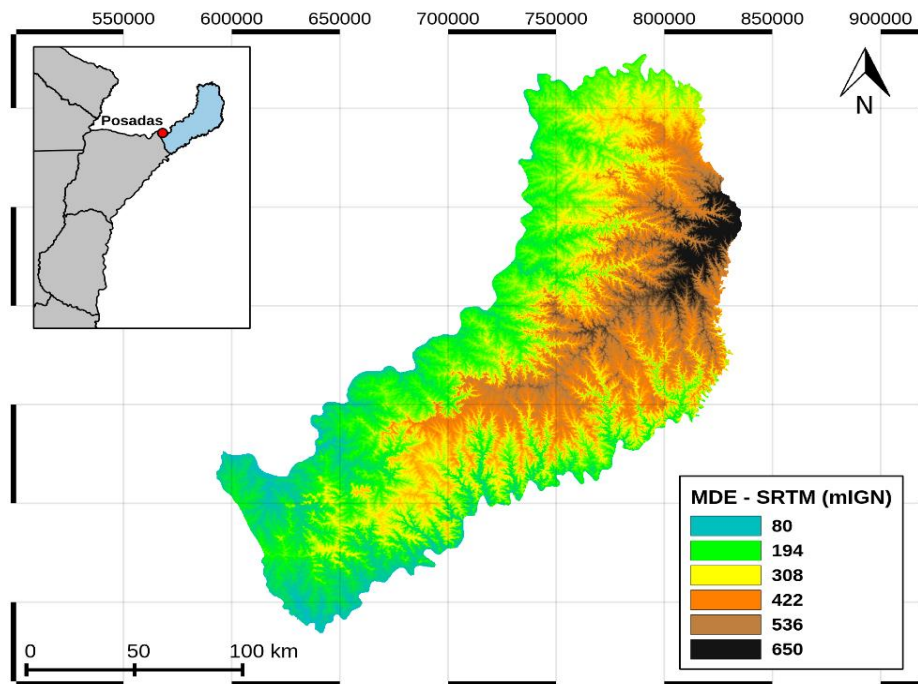
³ CGIAR-CSI SRTM 90M DEM Digital Elevation Database (srtm.csi.cgiar.org)



a) IGN



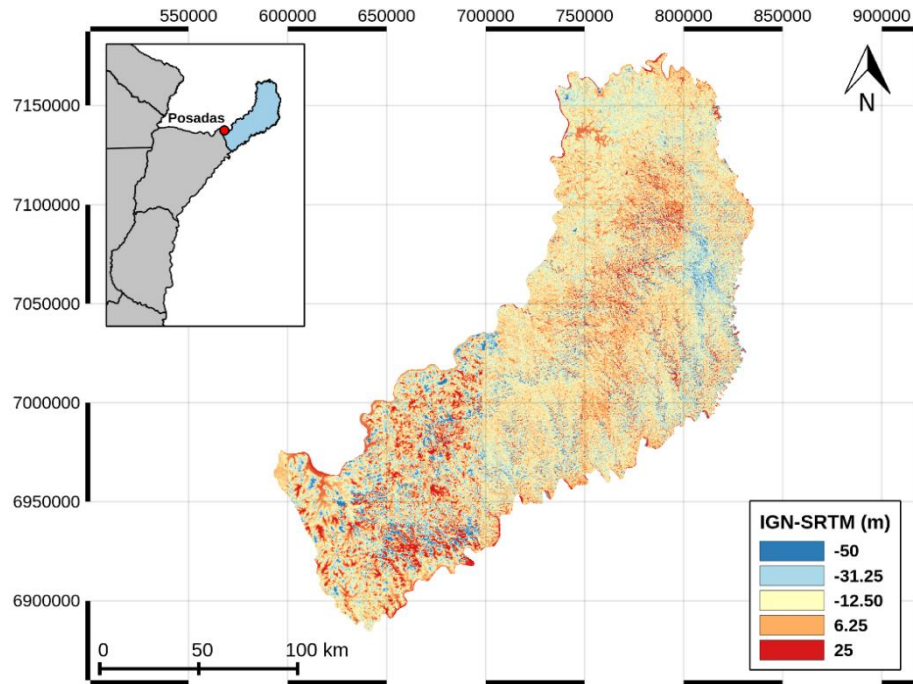
b) SRTM - AR



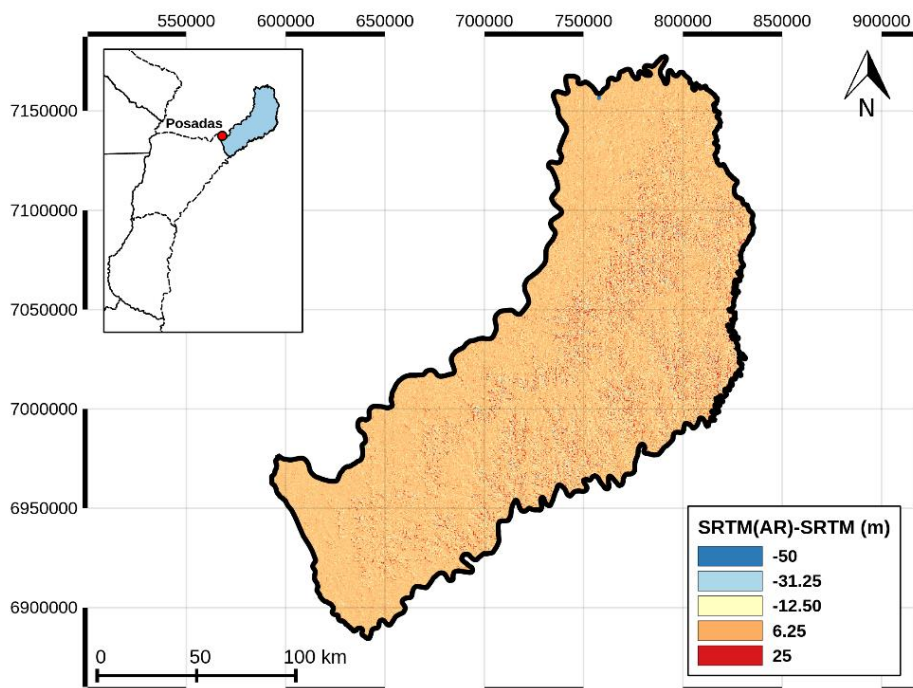
c) SRTM 4.1

Figura 2.1.3. MDE del terreno de acuerdo a distintas fuentes.

La Figura 2.1.4 presenta las diferencias entre los MDE, tomando como referencia el SRTM 4.1. Se observan diferencias relativamente pequeñas para el SRTM-AR, lo cual era de esperarse al provenir ambos de la misma fuente de datos. En el caso del resultante de las curvas de nivel del IGN, las mayores diferencias se dan al sudoeste de la provincia, en la zona llana, donde esas curvas no tienen una resolución suficiente como para representar correctamente la topografía, tal como se había indicado. Las diferencias que se dan en el noreste de Misiones se deben a que, por tratarse de un relieve de altas pendientes, pequeños corrimientos horizontales (por problemas de georreferenciación) pueden producir importantes diferencias en la vertical.



a) Diferencias entre IGN y SRTM 4.1



b) Diferencias entre SRTM-AR y SRTM 4.1

Figura 2.1.4. Diferencias entre MDEs.

2.2 DATOS HIDROLÓGICOS

2.2.1 Red hidrográfica

La Figura 2.2.1 presenta un detalle de la red hidrográfica de la Provincia Misiones⁴, identificándose los ríos hacia los cuales drenan los arroyos interiores.

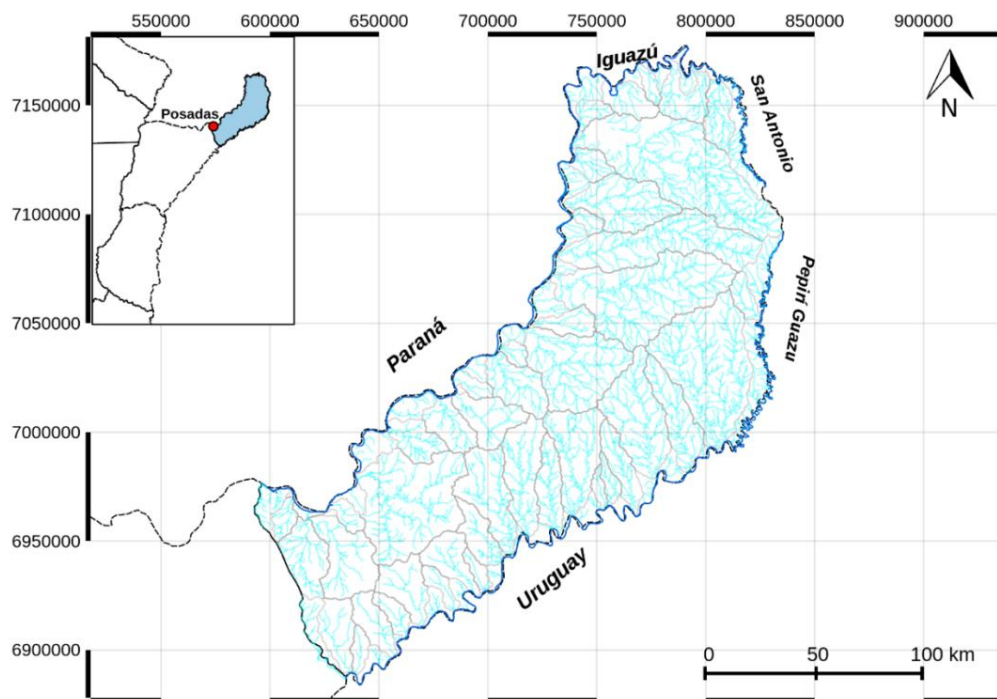


Figura 2.2.1. Red hidrográfica de la Provincia de Misiones

⁴ IGN, cursos de agua, Agosto 2015.

(http://www.ign.gob.ar/archivos/sig250/001_Cursos_De_Agua.zip)

2.2.2 Cuencas

Se determinaron las Cuencas hídricas de la Provincia de Misiones a partir de los MDE del terreno. Si bien, como se mostró anteriormente, existen diferencias altimétricas entre los MDE, en el trazado de las cuencas los resultados son consistentes entre sí, independientemente del MDE empleado.

En la Figura 2.2.2 se muestran las 45 cuencas (tres de ellas sin nombre) con un área mayor a 100 km² que surgen a partir del SRTM 4.1. No se discriminaron cuencas con áreas menores a dicho valor por considerarse que su contribución al potencial hidroeléctrico es despreciable, y por ubicarse próximas a los cuerpos receptores (en la Figura 2.2.1 se muestran como regiones en blanco).

En lo que respecta a la descarga, 21 lo hacen sobre el río Paraná, 19 sobre el Uruguay, 4 sobre el Iguazú y 1 sobre el Pepirí Guazú. En la Tabla 2.2.1 se indica el área de cada cuenca y su cuerpo receptor.

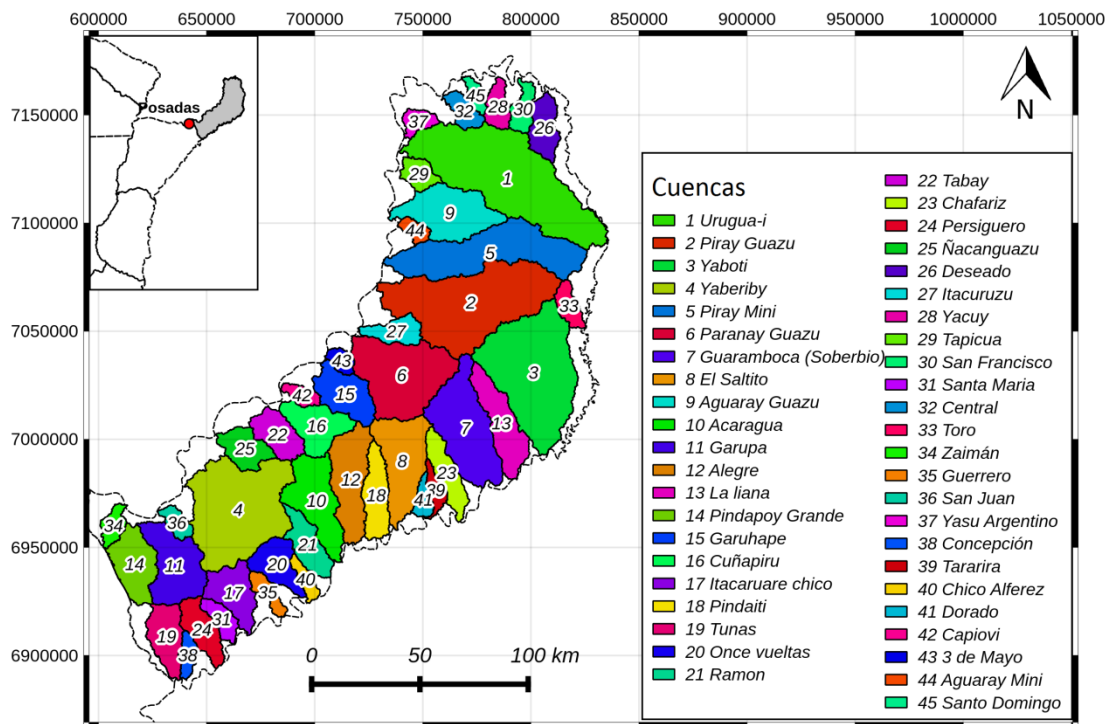


Figura 2.2.2. Principales cuencas de la Provincia de Misiones.

Tabla 2.2.1. Principales cuencas de la Provincia de Misiones.

	Nombre	Area (km²)	Cuerpo receptor
01	Urugua-í	2.528	Paraná
02	Piray Guazú	2.135	Paraná
03	Yabotí	1.997	Uruguay
04	Yabebiry	1.869	Paraná
05	Piray Miní	1.459	Paraná
06	Paranay Guazú	1.311	Paraná
07	Guaramboca (Soberbio)	1.153	Uruguay
08	El Saltito	857	Uruguay
09	Aguaray Guazú	853	Paraná
10	Acaraguá	774	Uruguay
11	Garupá	764	Paraná
12	Alegre	757	Uruguay
13	La liana	608	Uruguay
14	Pindapoy Grande	554	Paraná
15	Garuhape	509	Paraná
16	Cuñapirú	508	Paraná
17	Itacaruaré chico	477	Uruguay
18	Pindaití	430	Uruguay
19	Tunas	424	Uruguay
20	Once vueltas	391	Uruguay
21	Ramón	374	Uruguay
22	Tabay	373	Paraná
23	Chafariz	361	Uruguay
24	Persiguero	354	Uruguay
25	Ñacan Guazú	338	Paraná
26	Deseado	325	Iguazú
27	Itacuruzu	258	Paraná
28	Yacuy	205	Iguazú
29	Tapicua	195	Paraná
30	San Francisco	195	Iguazú
31	Santa María	185	Uruguay
32	Central	185	Iguazú
33	Toro	179	Pepirí Guazú
34	Zaimán	154	Paraná
35	Guerrero	151	Uruguay
36	San Juan	143	Paraná
37	Yasu Argentino	142	Paraná
38	Concepción	132	Uruguay
39	Tararira	130	Uruguay
40	Chico Alferez	128	Uruguay
41	Dorado	121	Paraná
42	Capioví	121	Uruguay
43	3 de Mayo	112	Paraná

2.2.3 Clima

La Provincia de Misiones tiene un clima Subtropical sin estación seca. Una característica es que presenta en su geografía cordones serranos en su parte central y norte. Estas elevaciones permiten que las temperaturas se ubiquen en valores más bajos a los que les correspondería de acuerdo a la latitud. Es por ello que la temperatura de las localidades ubicadas en zonas serranas difiere respecto de la de la ciudad de Posadas, que se encuentra al sur de estas localidades. Cabe destacar que el extremo sudoeste de la provincia es el más bajo y el que registra mayor temperatura⁵.

De acuerdo al Gran Atlas de Misiones⁶, las precipitaciones acumuladas anuales en esta región (Figura 2.2.3) tienen un máximo marcado por la isohieta de 2.000 mm, ubicada en la región Este, disminuyendo hacia el Oeste hasta llegar a los 1.600 mm medios anuales como mínimo, cerca de la frontera con la Provincia de Corrientes. Hacia el norte también disminuye, con 1.700 mm en las cuencas que descargan al río Iguazú. El régimen anual de precipitaciones es similar en toda la provincia, con un período más seco durante el invierno (meses de julio y agosto) y máximos en los meses de abril y octubre.

Las temperaturas medias anuales muestran un gradiente decreciente en la dirección Noreste-Sudoeste, con un máximo de 26°C cerca de la frontera con Corrientes y un mínimo de 22°C cercano a la localidad de Bernardo de Irigoyen, donde las alturas llegan hasta los 800 metros, mostrando la influencia de la orografía en la temperatura (ver Figura 2.1.1).

La temperatura media anual de Posadas es de 21,2°, en Iguazú de 20,7°, en Oberá de 20,8° y en Bernardo de Irigoyen de 18,3°. Las temperaturas más altas de verano se ubican entre 35° y 40°. Una marca histórica fue la anotada en Posadas en enero de 1986 con 42°, en tanto que a fines del año 85 las localidades de Cerro Azul y Montecarlo registraron 41,4° de máxima. En invierno las pocas invasiones de aire polar pueden llegar a provocar heladas, con temperaturas mínimas levemente por debajo de 0°. Existen antecedentes de caída de nieve, sin acumulación, en las serranías de la provincia. En invierno de 1975 se produjo una importante nevada, con acumulación en la localidad de Bernardo de Irigoyen, ubicada en el extremo centro-este de Misiones. Esta localidad, por su altura por sobre el nivel del mar (815 mts), es una de las más frías de la provincia en invierno.

Los vientos dominantes provienen del ESE en el sur de la provincia, y del NE en el norte de la misma. Los promedios de presión atmosférica reducidos a nivel del mar se acercan a los 1.013 hpa.

⁵ <http://www.mineria.gob.ar/estudios/irn/misiones/m-1.asp>

⁶ Gran Atlas de Misiones, Instituto Provincial de Estadísticas y Censos (IPEC), 2012.

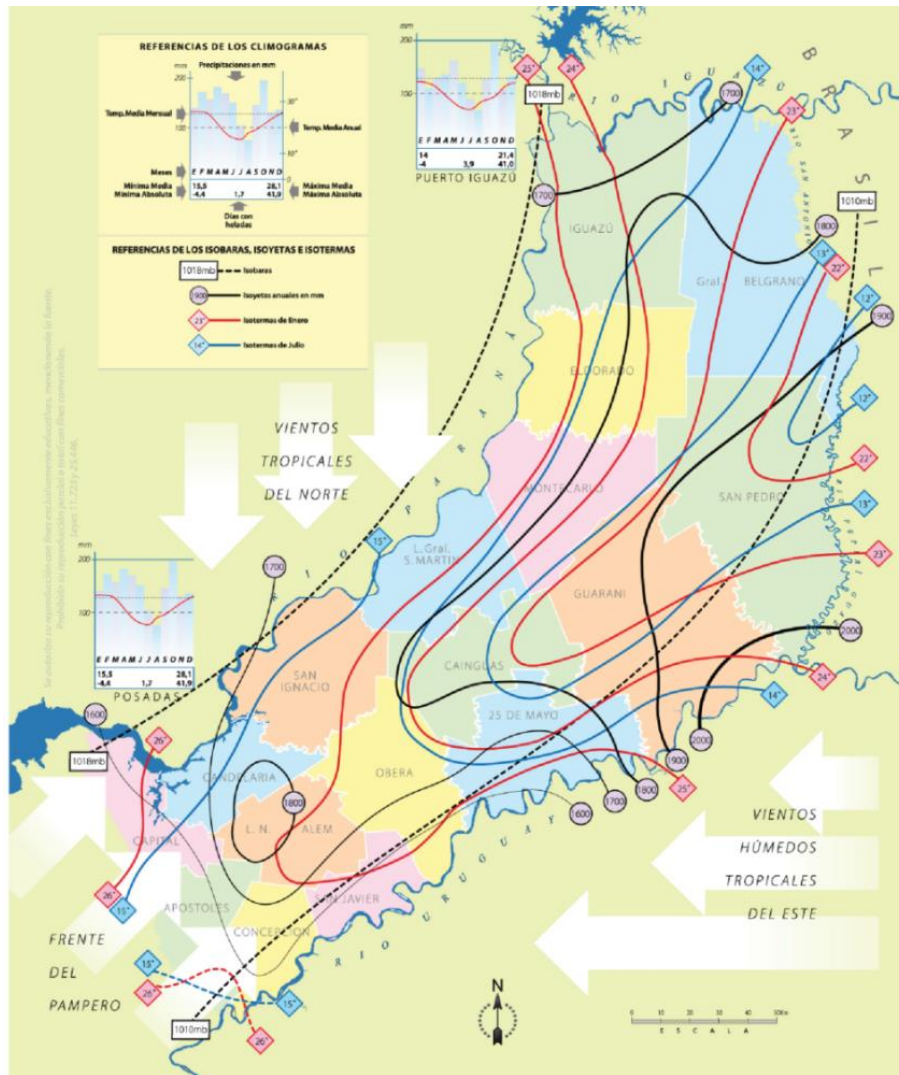
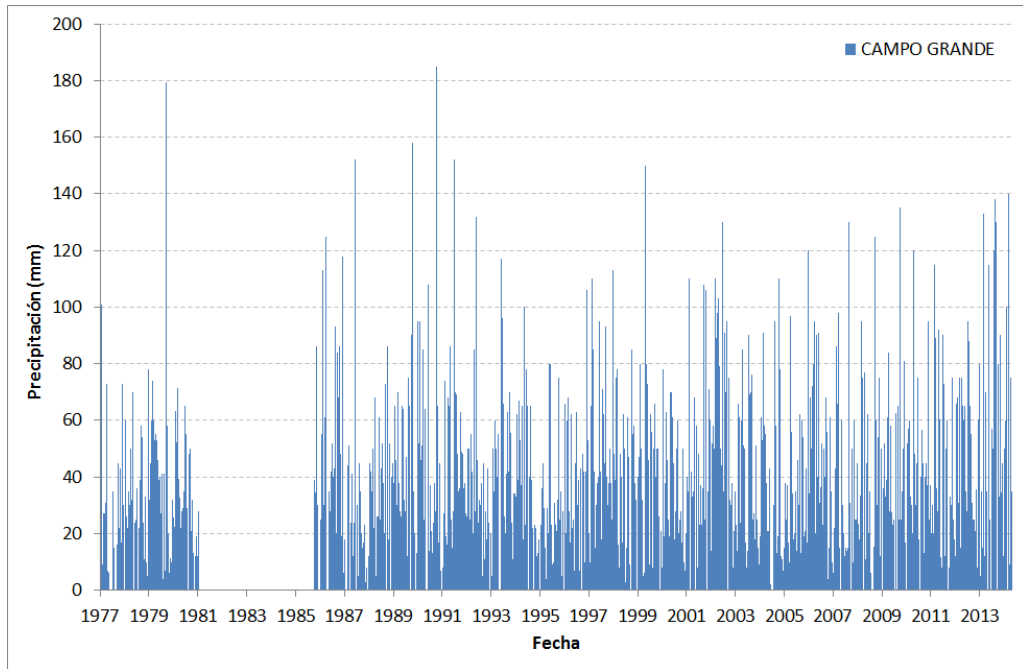


Figura 2.2.3. Isohietas, isotermas e isobaras de la Provincia de Misiones (Fuente: Gran Atlas de Misiones)

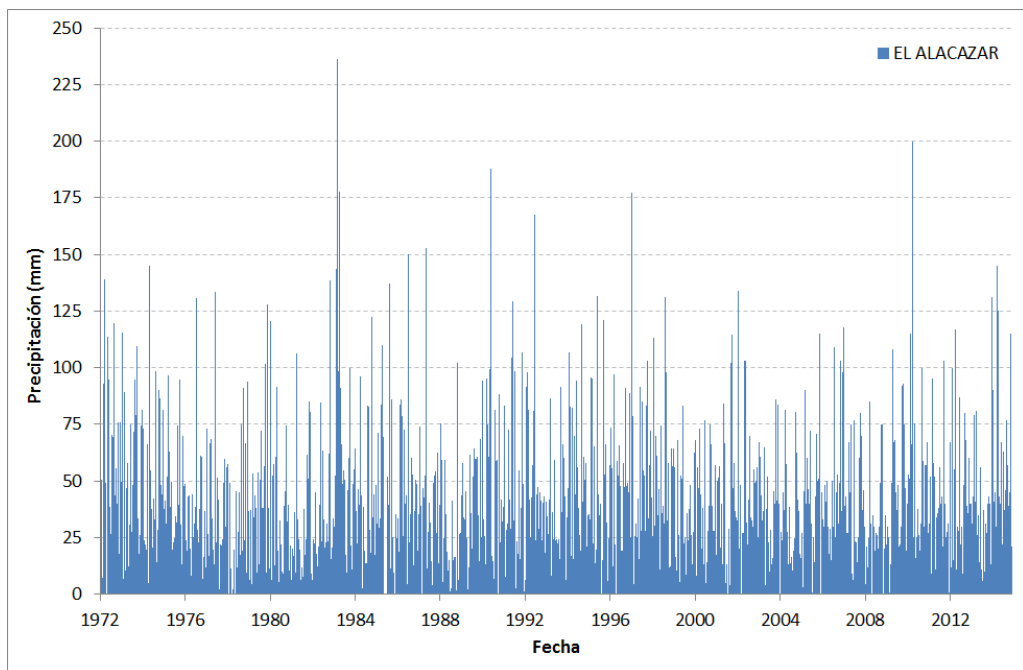
2.2.4 Precipitaciones

La Figura 2.2.4 presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas localizadas dentro de la Provincia de Misiones. En la Tabla 2.2.2 y la Figura 2.2.5 se indican las series temporales disponibles en la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos), de paso diario, asociadas a cursos de agua. Las mediciones se inician en la década del 60 o 70, y se extienden hasta la actualidad. La completitud de las series de datos se representa en la Figura 2.2.6.

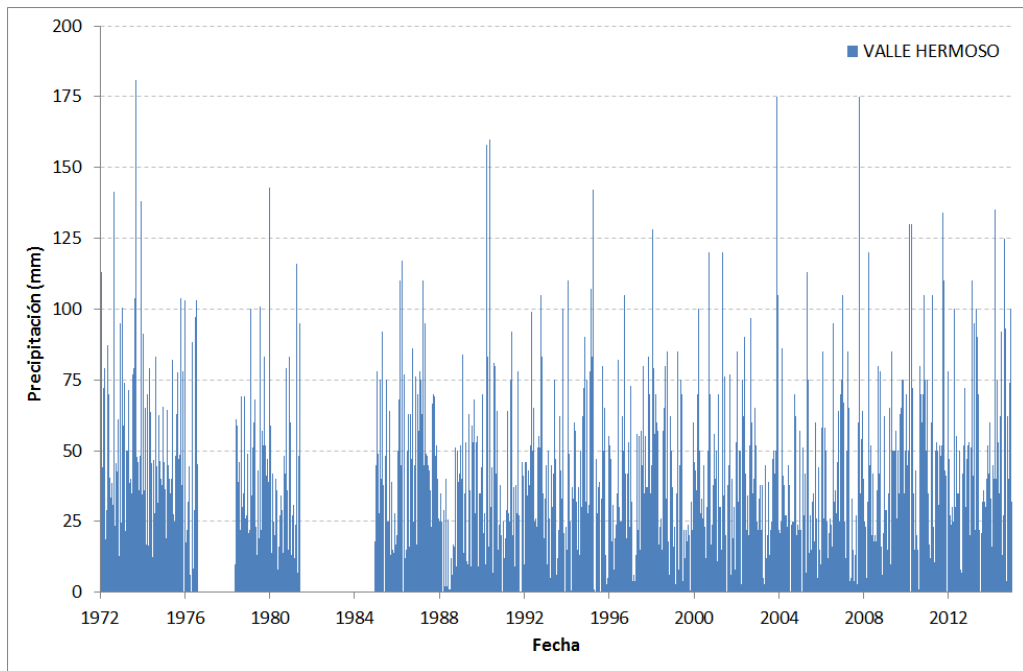
La Figura 2.2.6 muestra registros de series temporales de paso diario correspondientes a estaciones del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) y el INTA.



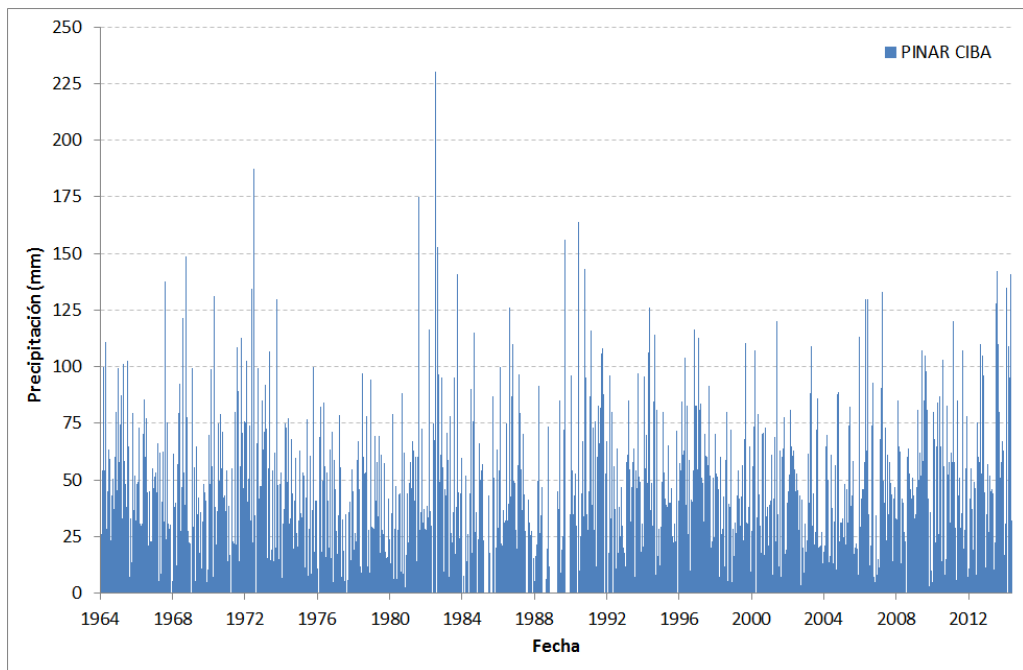
a) Campo Grande



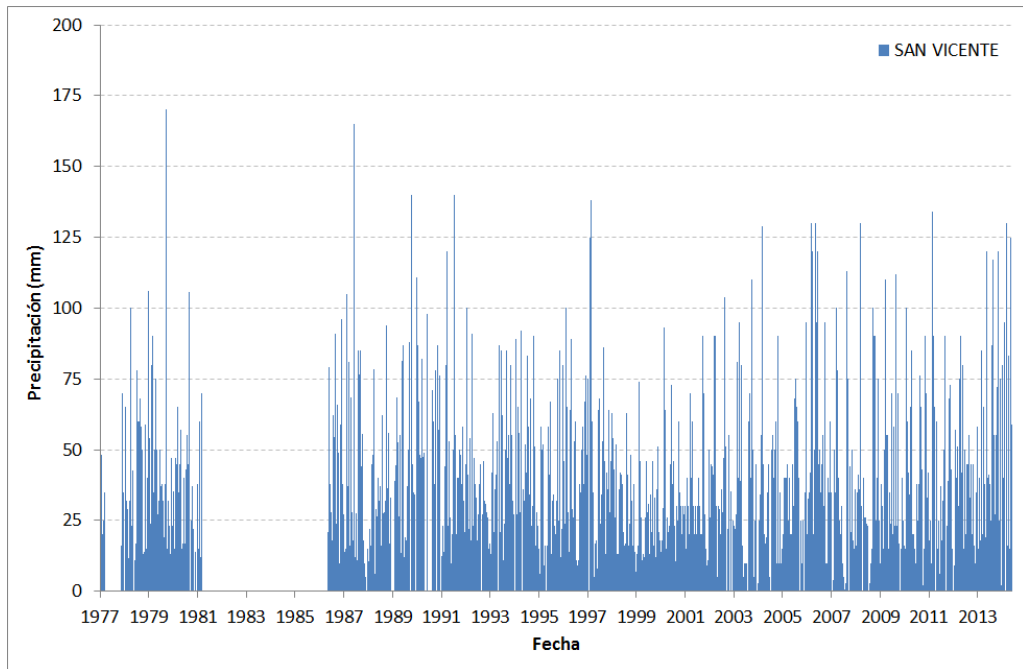
b) El Alcazar



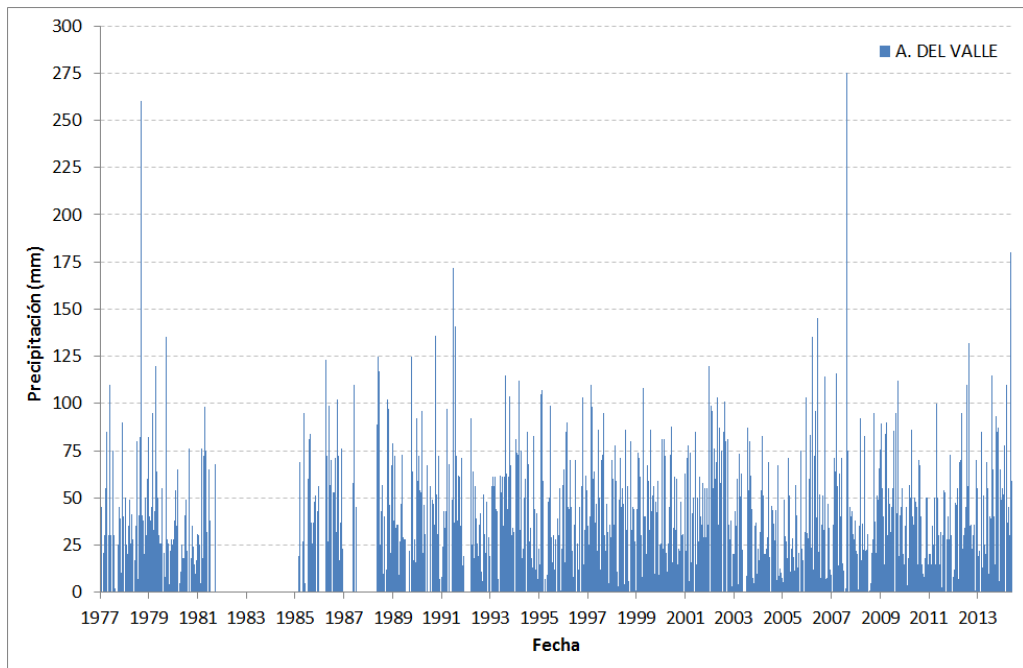
c) Valle Hermoso



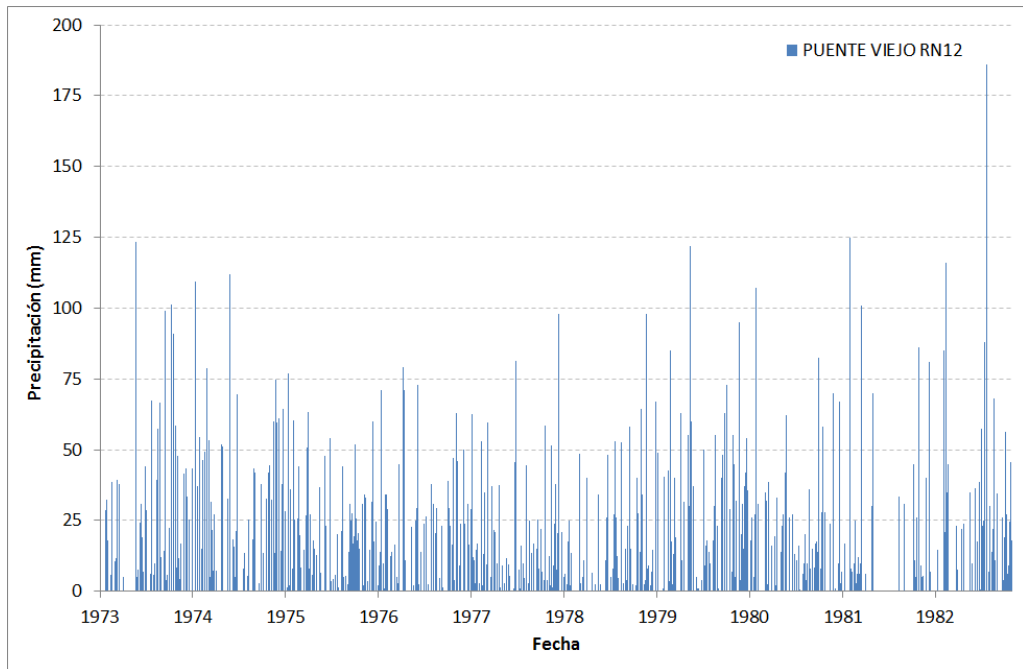
d) Pinar Ciba



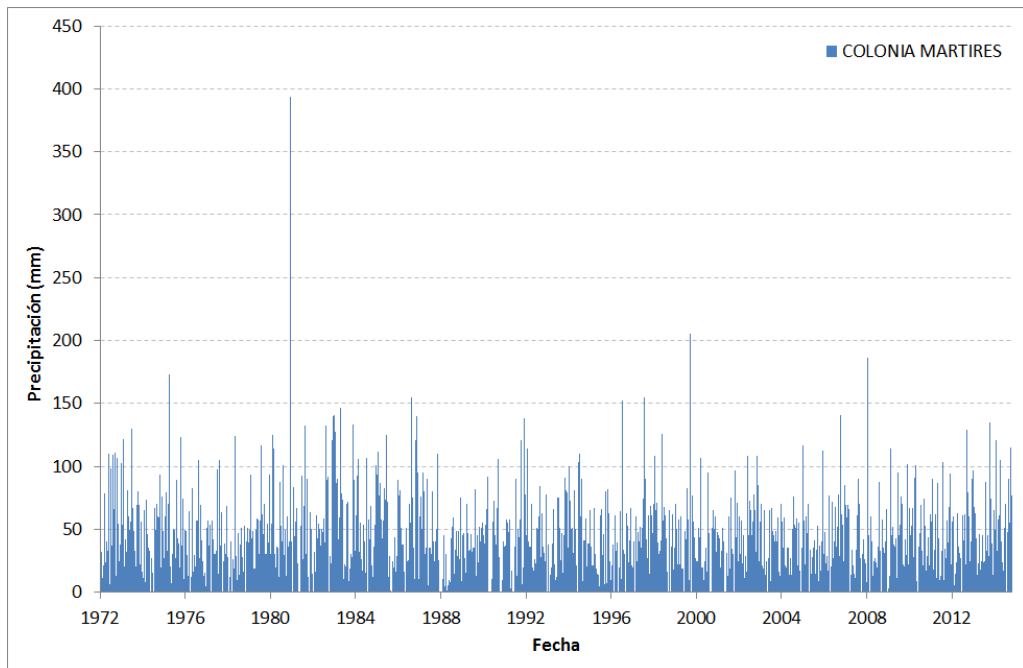
e) San Vicente



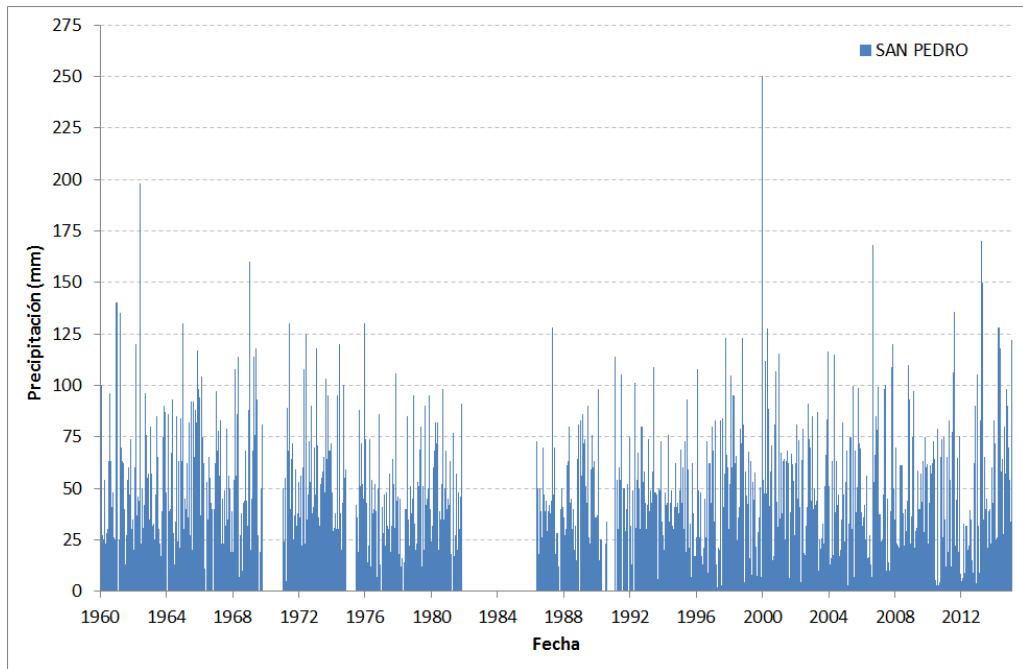
f) Arroyo del Valle



g) Puente Viejo RN12

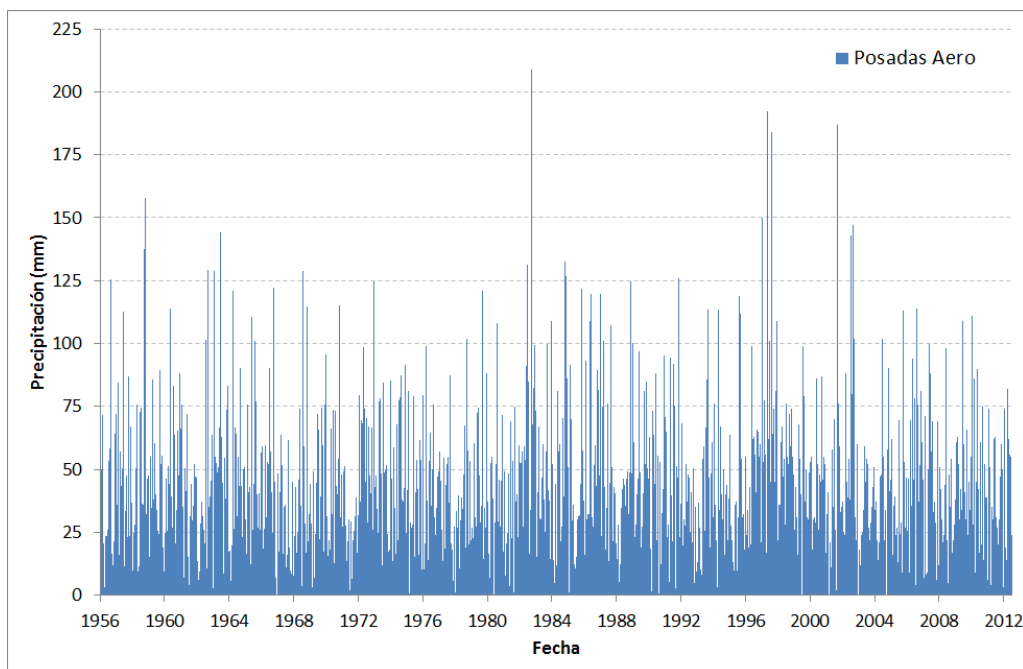


h) Colonia Martires

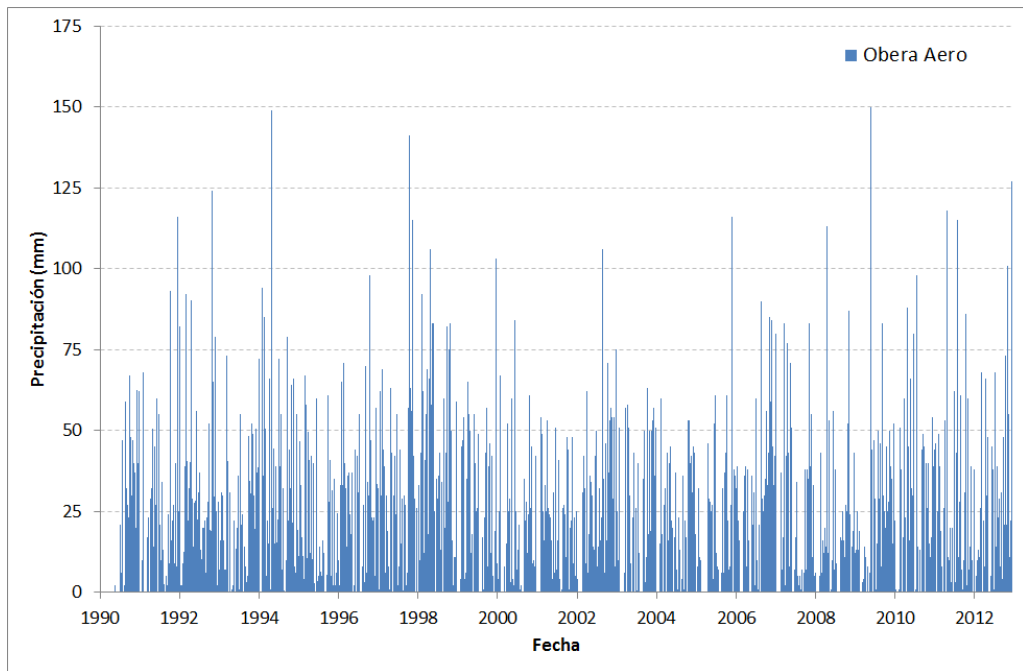


i) San Pedro

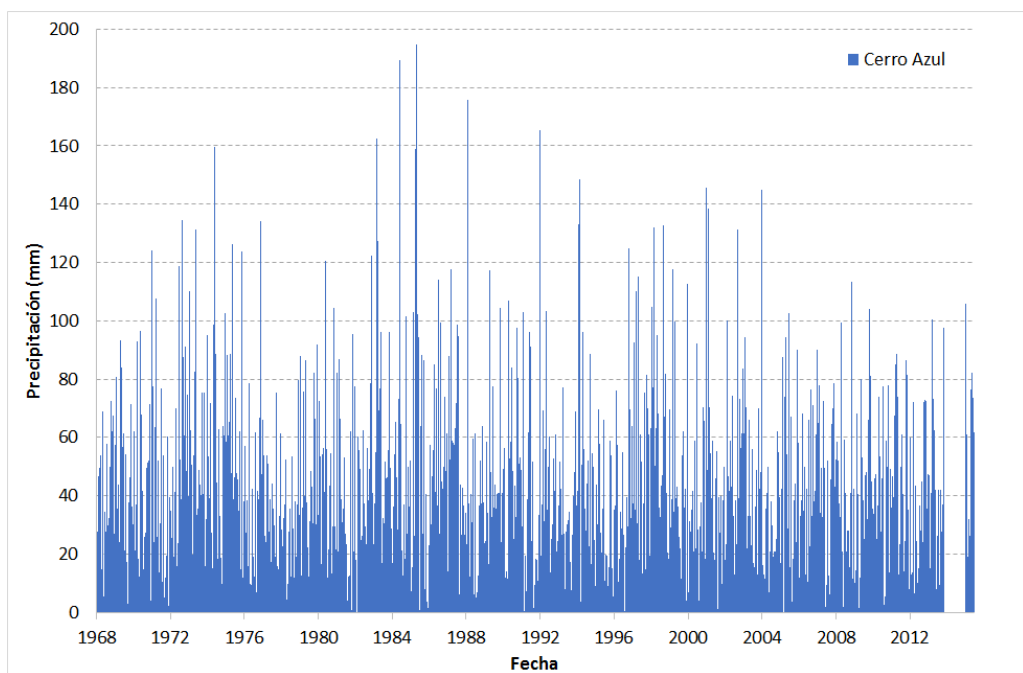
Figura 2.2.6. Precipitaciones diarias en estaciones de la base de datos de la SSRH



a) Posadas (SMN)



b) Oberá (SMN)



c) Cerro Azul (INTA)

Figura 2.2.6. Precipitaciones diarias en estaciones del SMN e INTA

También se descargaron series de precipitación de la página web de la Agencia Nacional del Agua⁷ (ANA) de Brasil. La ubicación de las estaciones se presenta en la Tabla 2.2.3 junto a la Figura 2.2.7. En la Figura 2.2.8 se presentan las distintas series de precipitación.

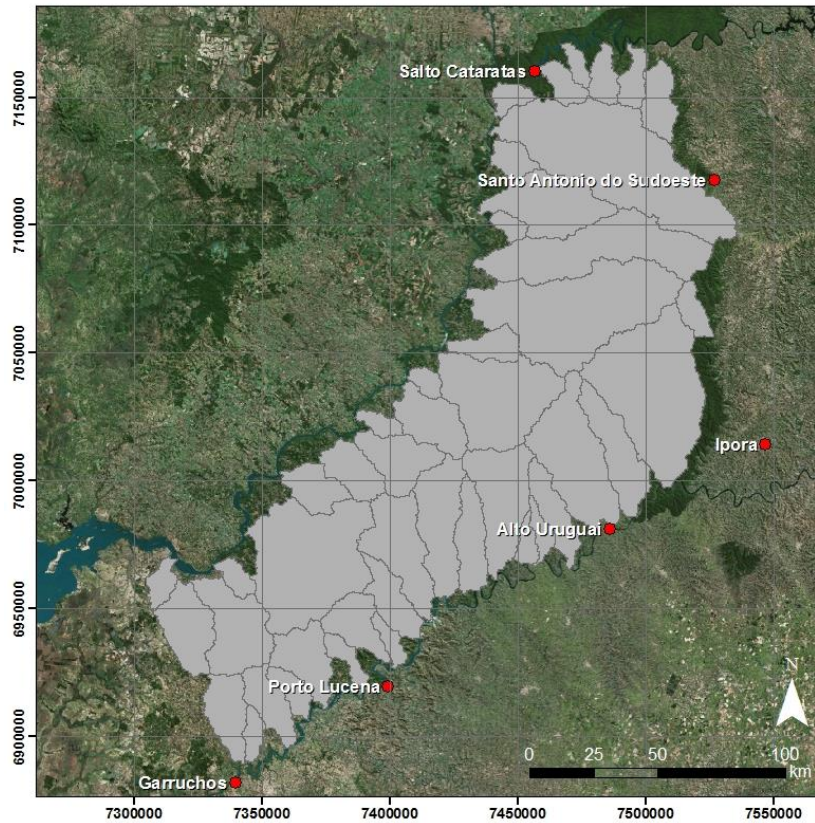
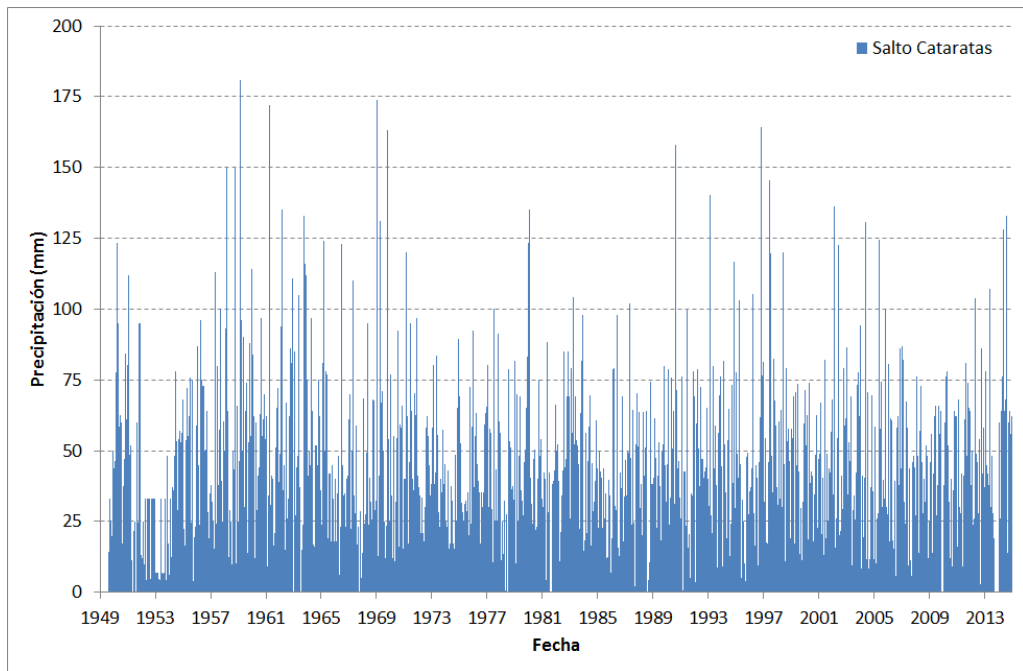


Figura 2.2.7. Estaciones pluviométricas en territorio brasileño.

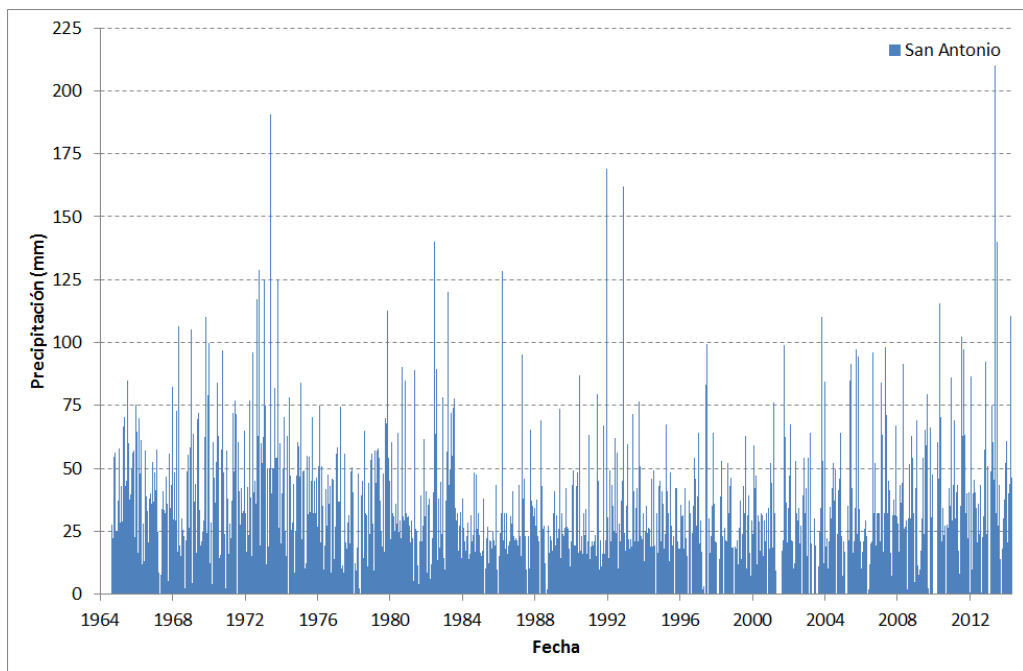
Tabla 2.2.3. Series de precipitaciones (Fuente: ANA)

Estación	Período	Latitud	Longitud
Salto Cataratas	01-Ene-1949 a 31-Dic-2014	25° 40' 59,00"	54° 25' 59,00"
San Antonio do Sudoeste	01-Ene-1964 a 30-Jun-2015	26° 04' 00,00"	53° 43' 48,00"
Ipora	01-Ago-1976 a 30-Nov-2015	27° 00' 05,00"	53° 31' 32,00"
Alto Uruguai	01-Sep-1949 a 30-Nov-2015	27° 18' 07,00"	54° 08' 22,00"
Porto Lucena	22-Mar-1949 a 29-Nov-2015	27° 51' 15,00"	51° 01' 25,00"
Garruchos	24-Mar-1949 a 30-Nov-2015	28° 11' 16,00"	55° 38' 14,00"

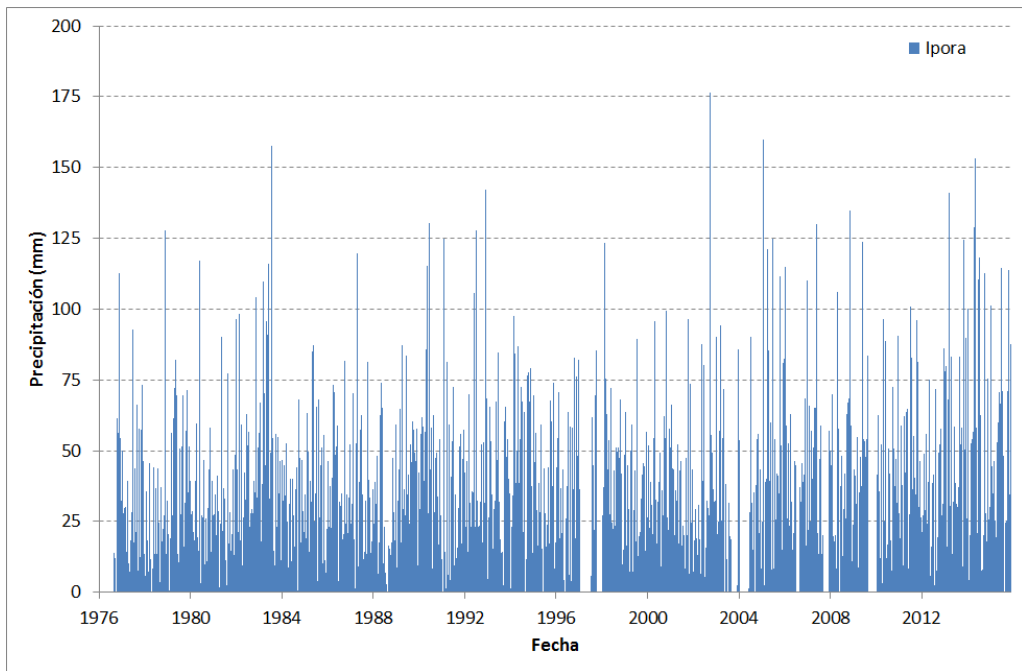
⁷ <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>



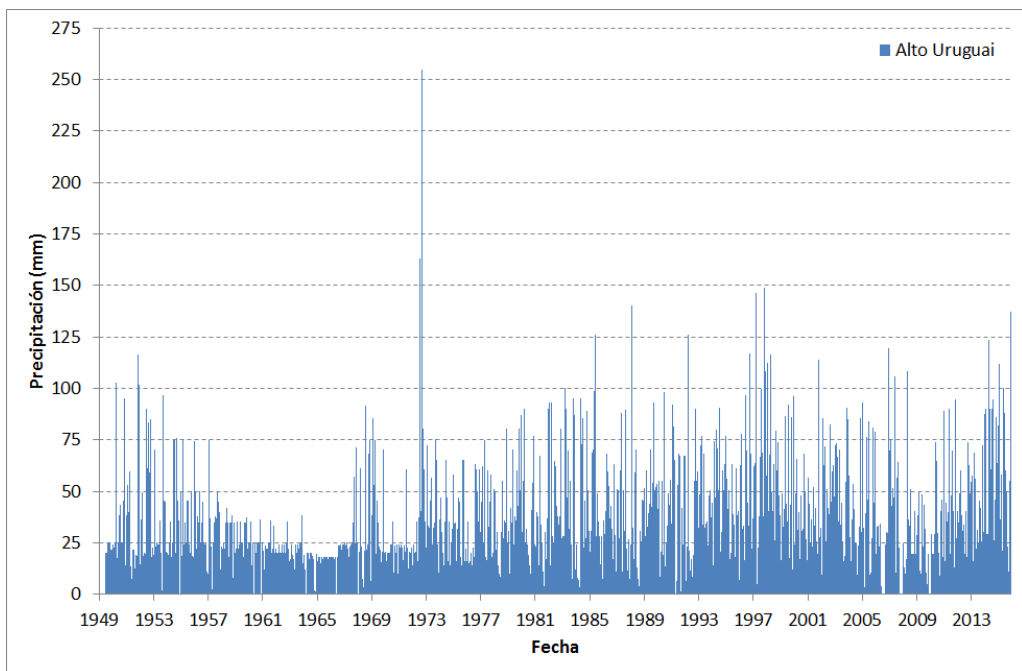
a) Salto Cataratas



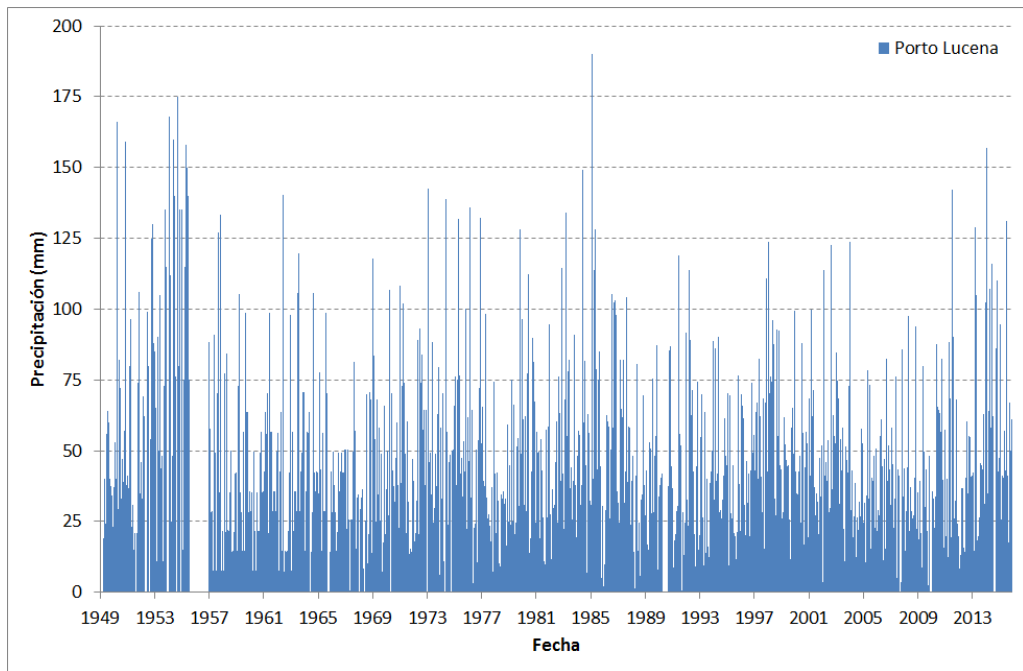
b) San Antonio do Sudoeste



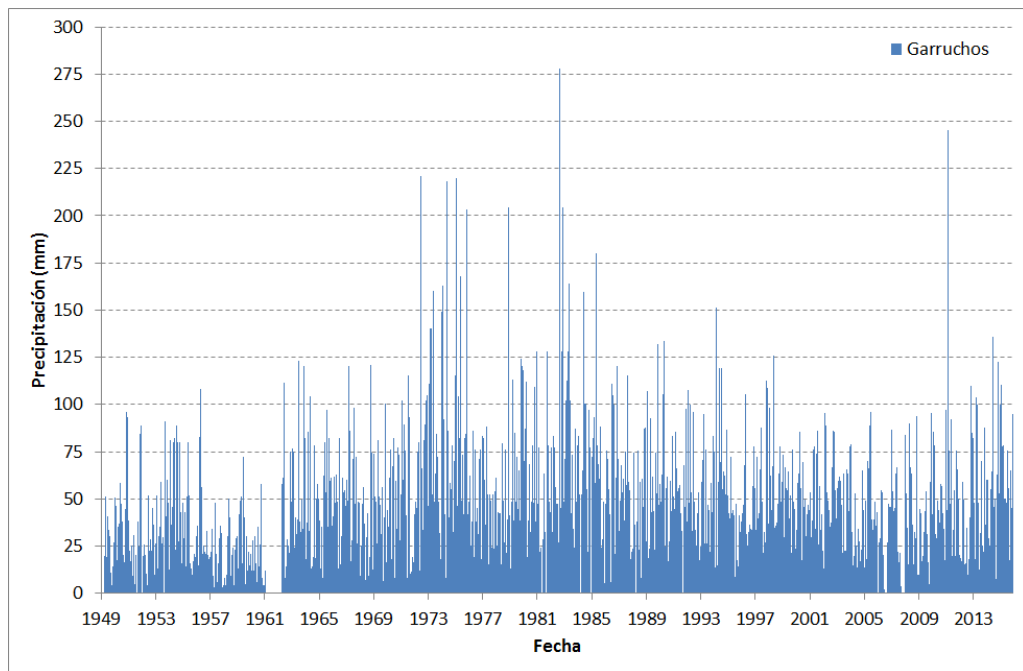
c) Ipora



d) Alto Uruguai



e) Porto Lucena

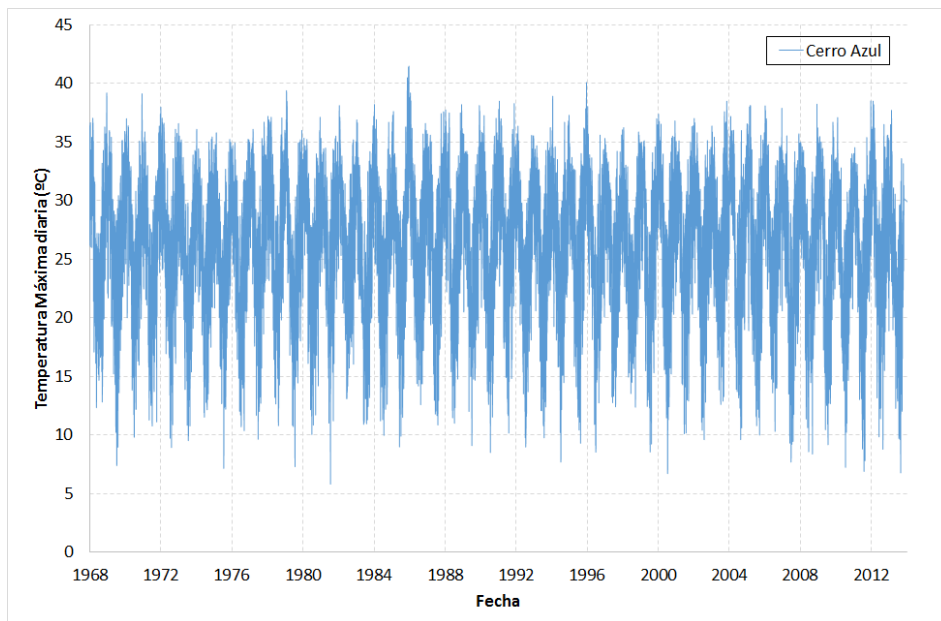


f) Garruchos

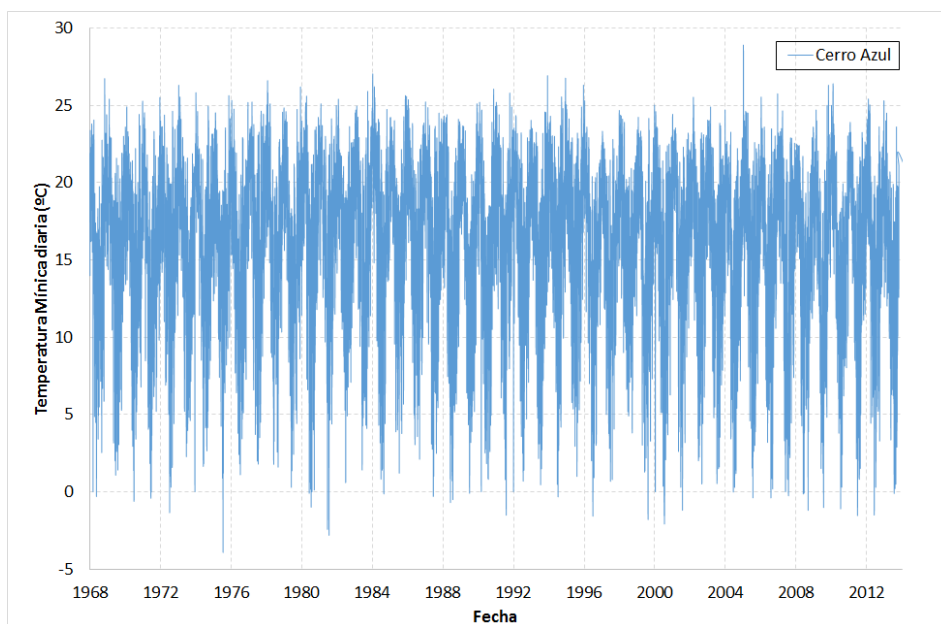
Figura 2.2.8. Precipitaciones diarias en estaciones del ANA.

2.2.5 Temperatura

En la Figura 2.2.9 se muestran las temperaturas máxima y mínima diaria en la estación Cerro Azul (INTA) desde 1968 a 2014. La Figura 2.2.10, por su parte, presenta el ciclo anual de temperaturas máximas y mínimas promedio diarias para la misma estación. El promedio anual de la temperatura máxima promedio diaria resulta ser de 26,3°C, mientras que el de la mínima de 16,0°C.



a) Temperatura Máxima



b) Temperatura Mínima

Figura 2.2.9. Temperaturas extremas diarias en estación Cerro Azul.

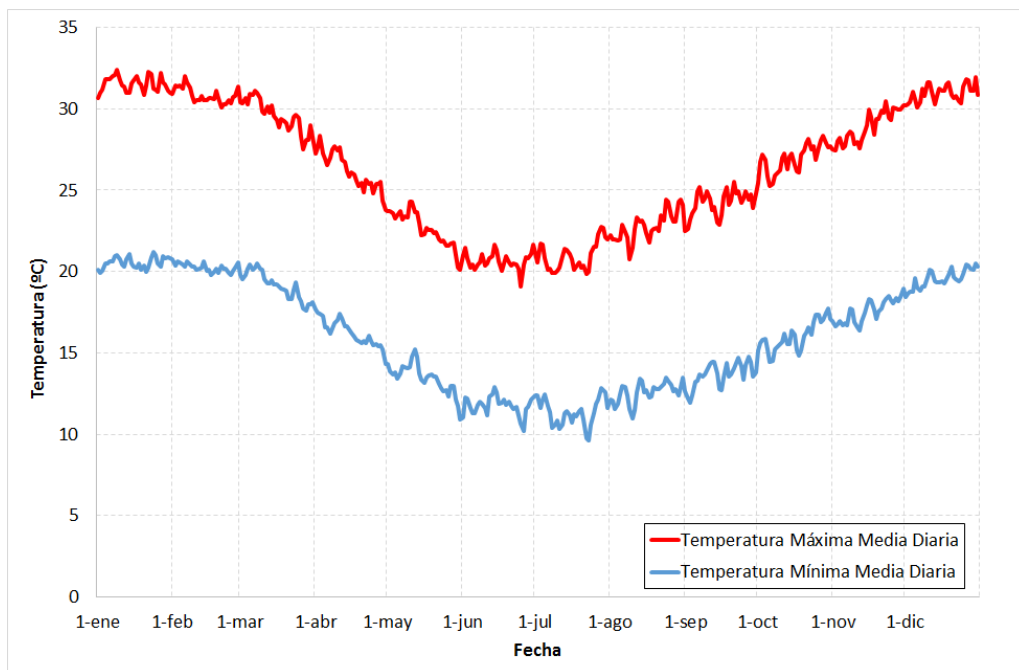


Figura 2.2.10. Temperaturas mínima y máxima medias diarias en estación Cerro Azul.

2.2.6 Heliofanía

La heliofanía indica la cantidad de horas de sol directa. La Figura 2.2.11 presenta la serie diaria de heliofanía en la estación Cerro Azul (INTA). El valor máximo es cercano a las 13 horas diarias en el solsticio de verano, y 9,3 horas en el solsticio de invierno.

En la Figura 2.2.12 se representa el correspondiente ciclo anual de heliofanía promedio diaria, donde se observan valores del orden de 9 horas diarias de luz en verano y 5 horas en invierno.

2.2.7 Viento

La Figura 2.2.13 muestra la serie de vientos medios diarios, medidos a 2 m de altura, en la estación Cerro Azul. Se nota el cambio de método de medición a partir de 1990, registrándose desde entonces valores diarios con mayor amplitud (desde 30km/h hasta días con calma).

En la Figura 2.2.14 se presenta el ciclo anual de vientos promedio diarios para el período 1990-2014. Se observan mayores valores durante la primavera (del orden de 6,5 km/h) y mínimos en otoño (del orden de 4,5 km/h).

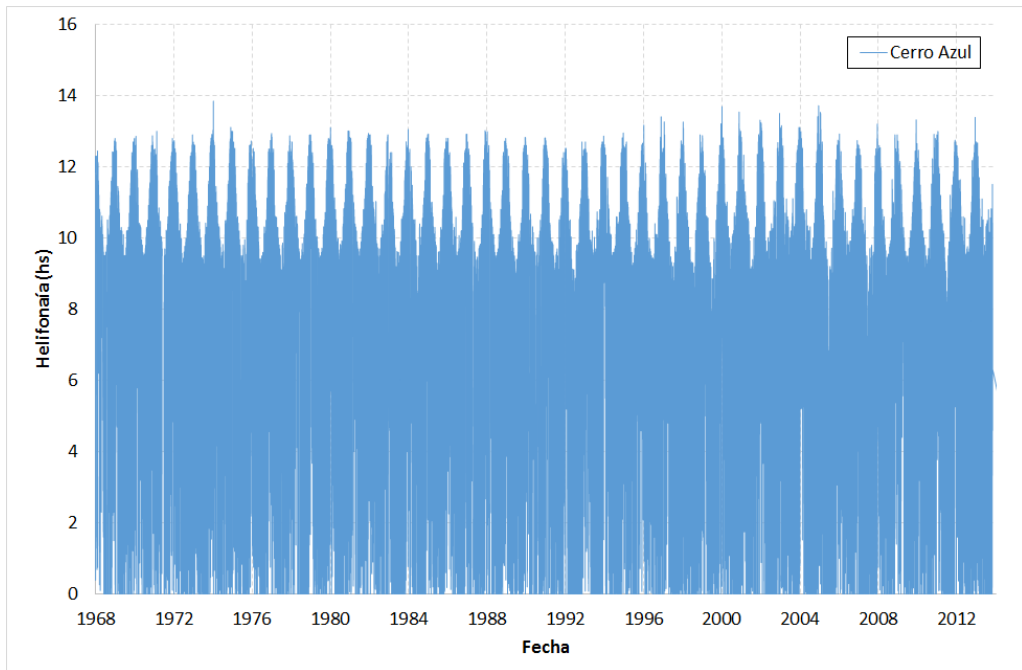


Figura 2.2.11. Serie de heliofanía diaria en estación Cerro Azul.

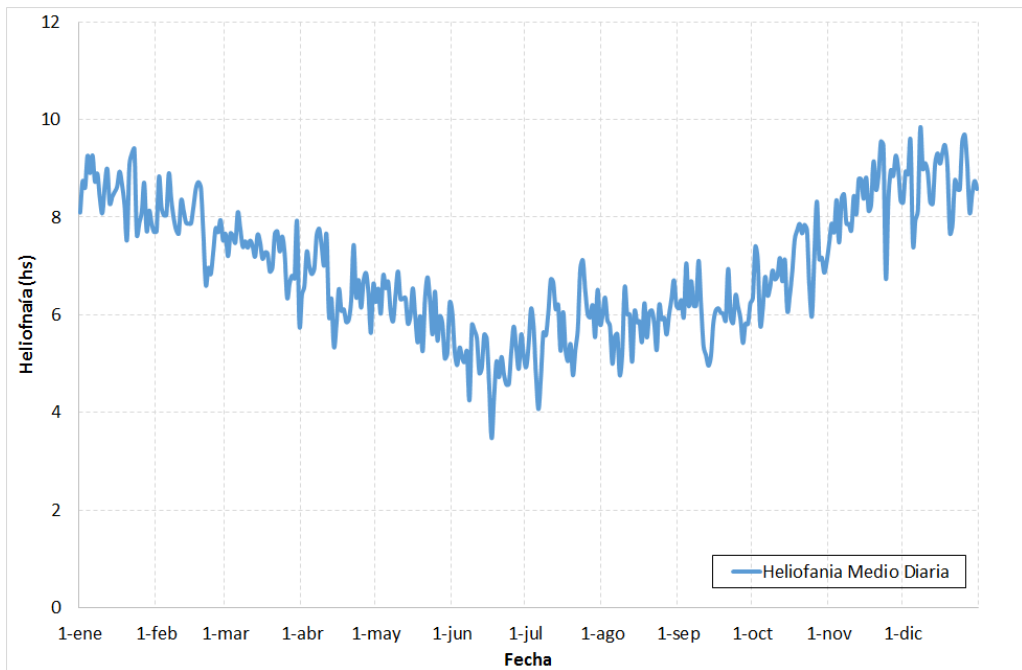


Figura 2.2.12. Heliofanía media diaria en estación Cerro Azul.

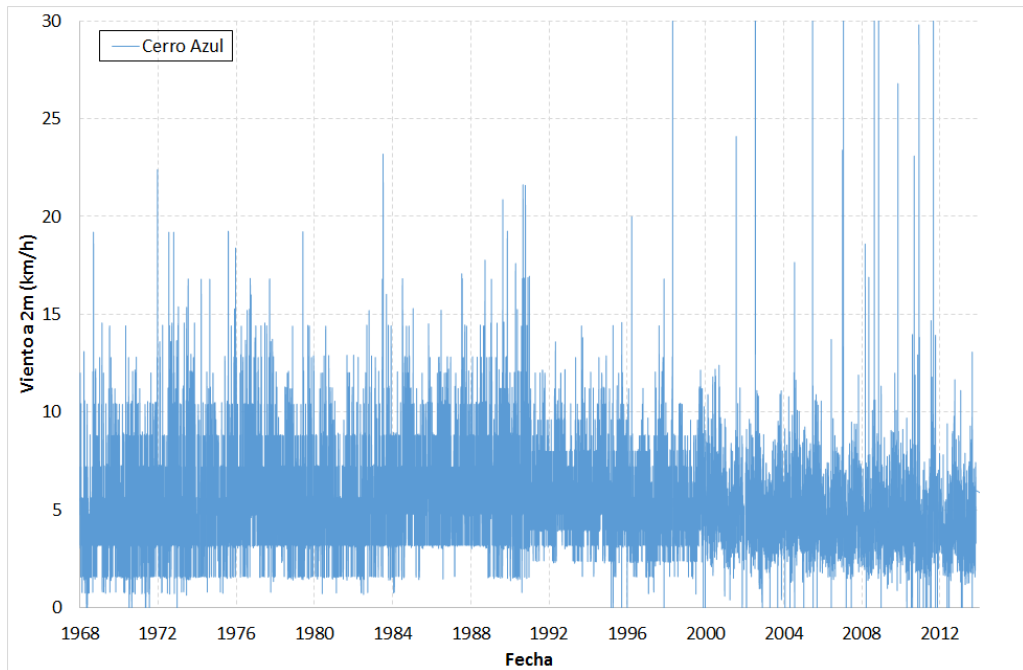


Figura 2.2.13. Serie temporal de viento medio diario en estación Cerro Azul.

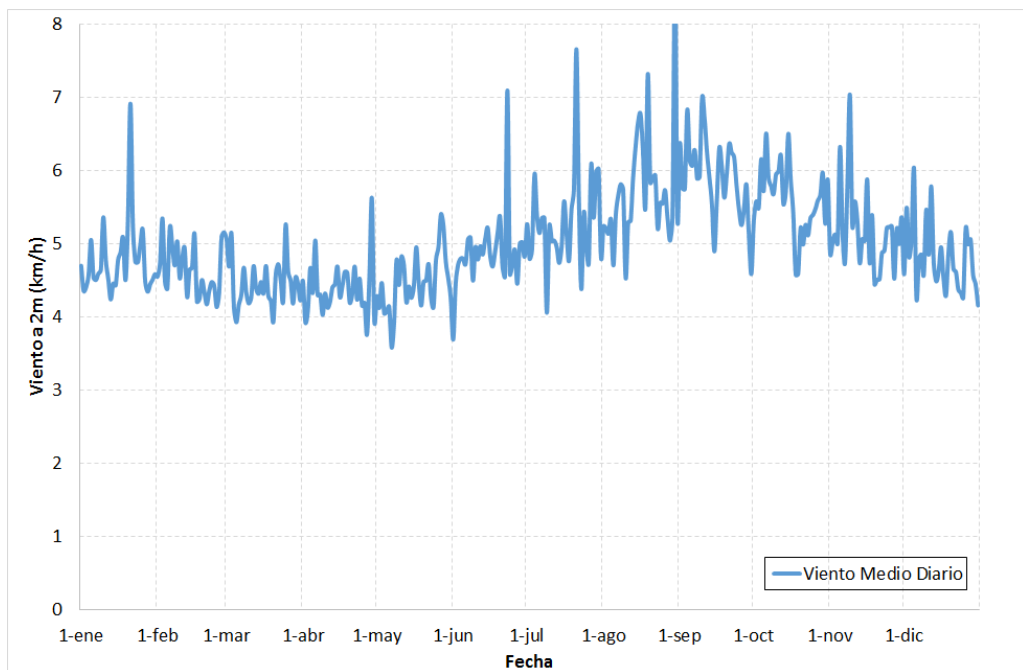


Figura 2.2.14. Vientos promedio diarios a 2m en estación Cerro Azul.

2.2.8 Humedad Relativa

En la Figura 2.2.15 se muestra la serie de humedad relativa media diaria en la estación Cerro Azul, que indica valores máximos diarios del 100% (atmósfera saturada) y mínimos de 25%. Por su parte, la Figura 2.2.16 presenta el ciclo anual de humedad relativa promedio diaria. Se observan valores del orden del 80% en el invierno, y del 65% a finales de primavera y comienzos del verano.

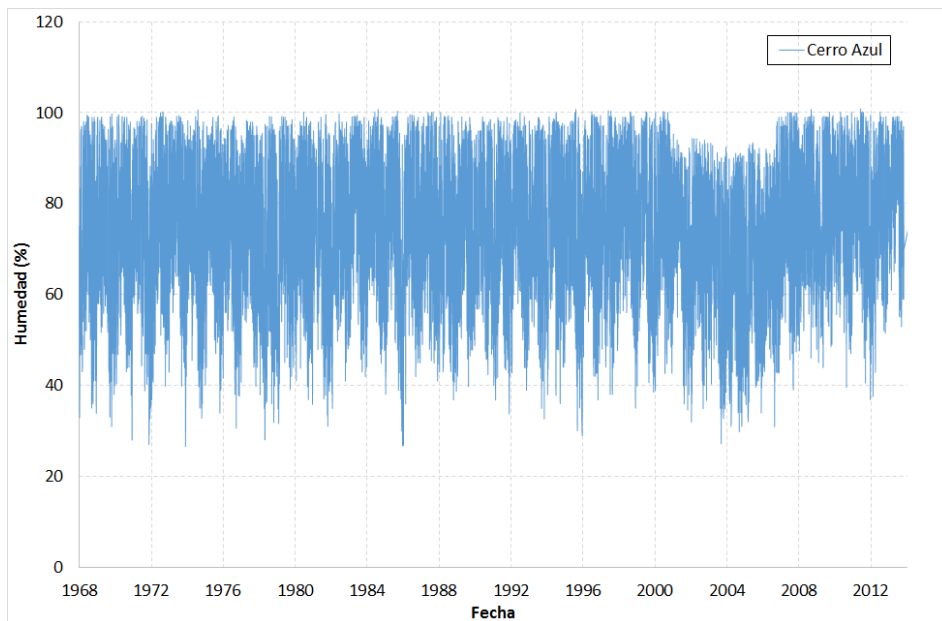


Figura 2.2.15. Serie de humedad relativa media diaria en estación Cerro Azul.

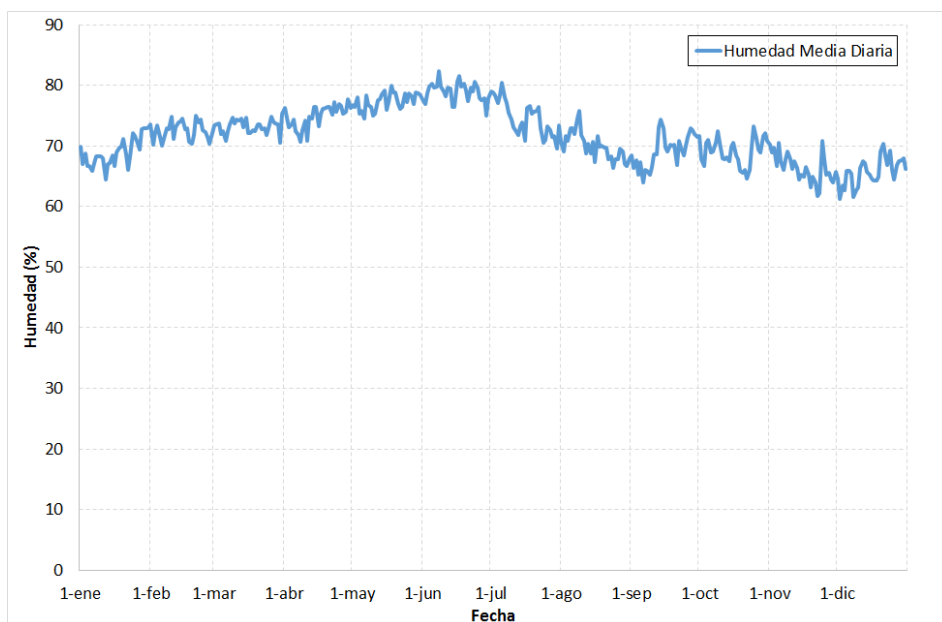


Figura 2.2.16. Humedad relativa promedio diaria en estación Cerro Azul.

2.2.9 Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración a paso diario se utilizó el método de Penman-Monteith, que emplea datos de temperatura mínima y máxima diaria, viento a 2 m y humedad relativa. En la Figura 2.2.17 se muestra la serie de evapotranspiración medio diaria resultante en la estación Cerro Azul, donde se dispone de toda esa información.

El ciclo anual de evapotranspiración promedio diaria se presenta en la Figura 2.2.18. Se observan valores del orden de 6 mm en verano y de 2 mm en invierno.

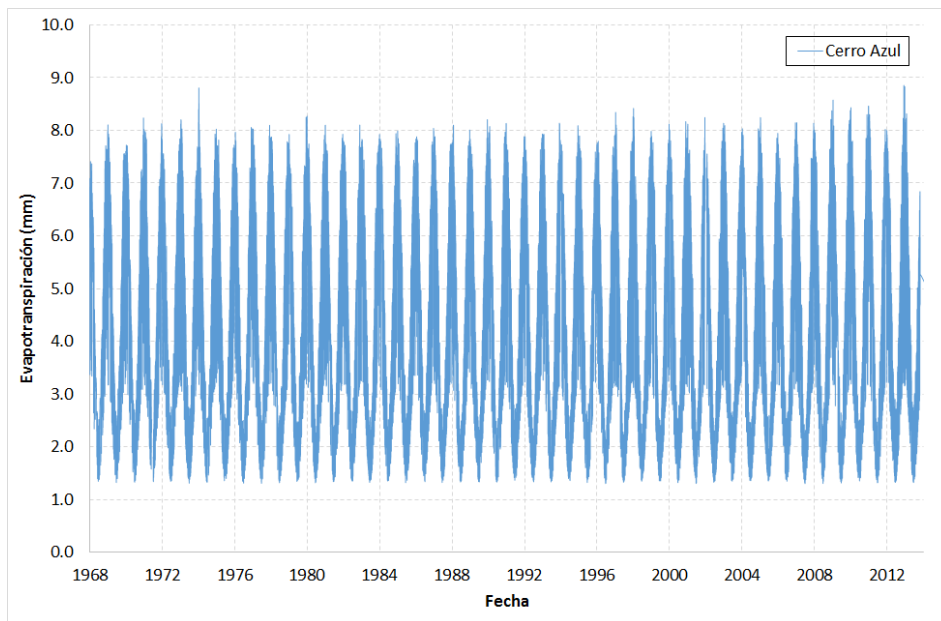


Figura 2.2.17. Serie de evapotranspiración media diaria en estación Cerro Azul.

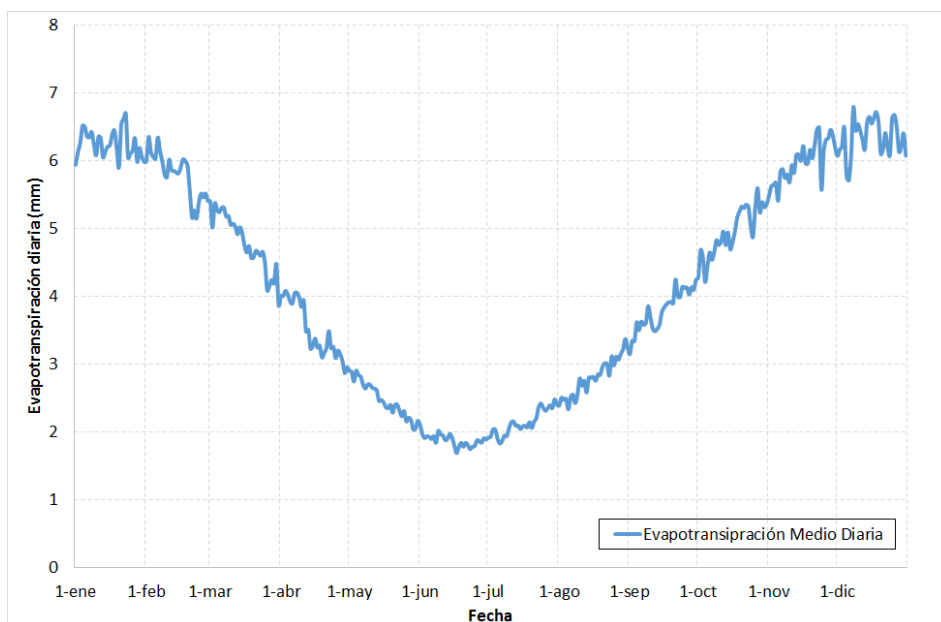


Figura 2.2.18. Evapotranspiración promedio diaria en estación Cerro Azul.

2.2.10 Hidrometría

Se contó con datos de caudales correspondientes a 7 estaciones de aforo operadas por la SRHH, cuya ubicación se muestra en la Figura 2.2.19. Comparando con la Figura 2.2.2 se observa que corresponden a las cuencas de mayor extensión, todas las cuales desembocan en el río Paraná.

La Figura 2.2.20 muestra las ventanas de tiempo con registros para cada estación. Si bien algunas series están discontinuadas, las cuencas del Yaberiby, Paranay, Piray Guazú y Piray Mini cuentan con registros desde la década de 1960 hasta la actualidad.

La información hidrométrica disponible puede clasificarse en:

- Series de caudales diarios.
- Series de alturas en escalas locales.
- Series de aforos, que permiten construir curvas altura-caudal.

La Figura 2.2.21 presenta las series de caudales diarios de Piray Mini, Piray Guazú y Paranay.

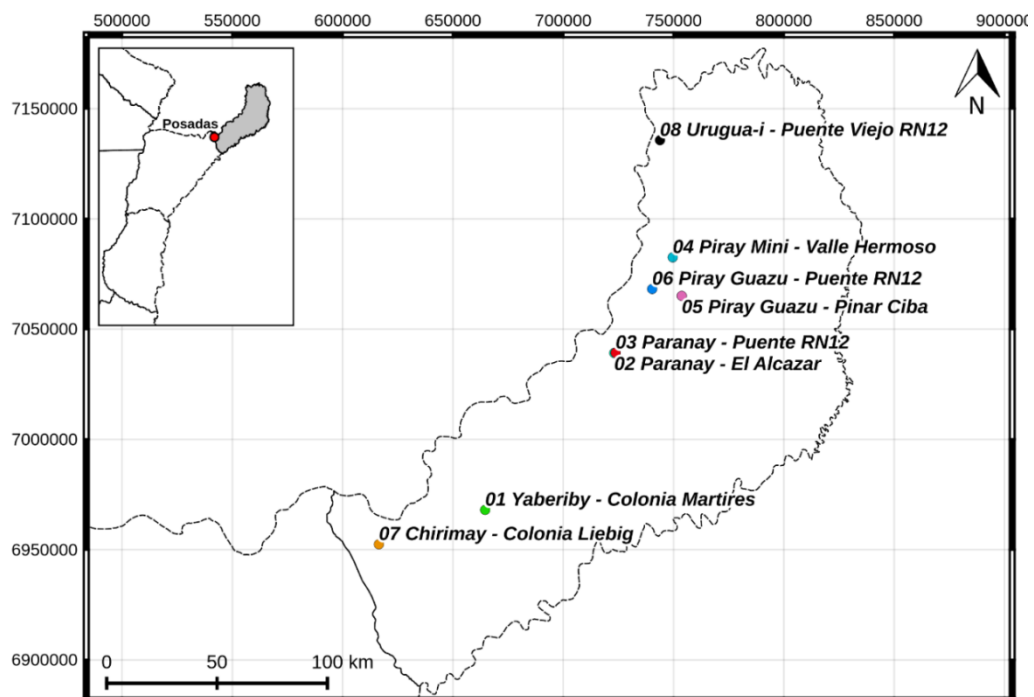
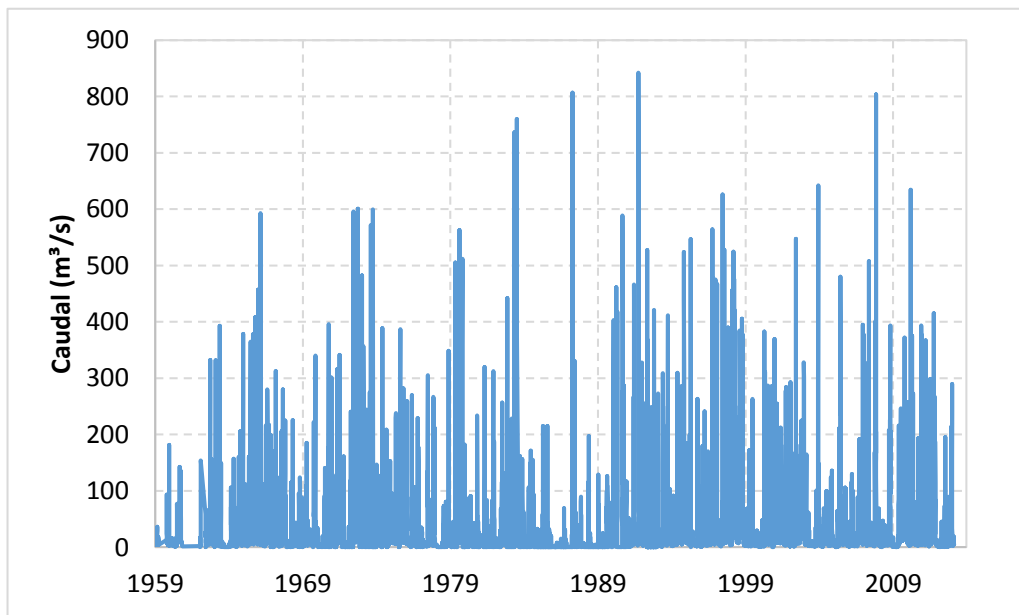
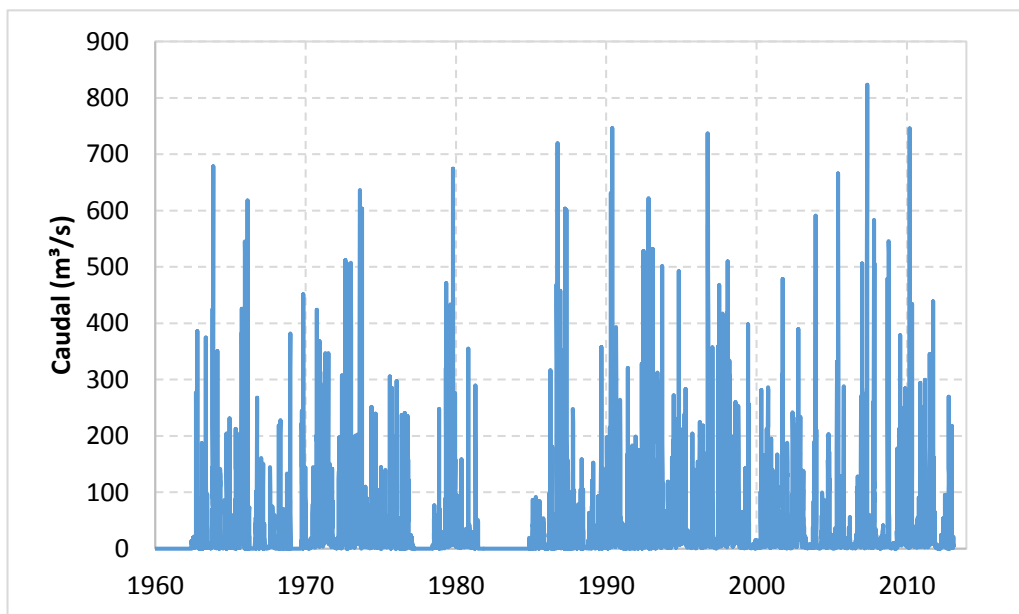


Figura 2.2.19. Estaciones de aforo (SSRH).



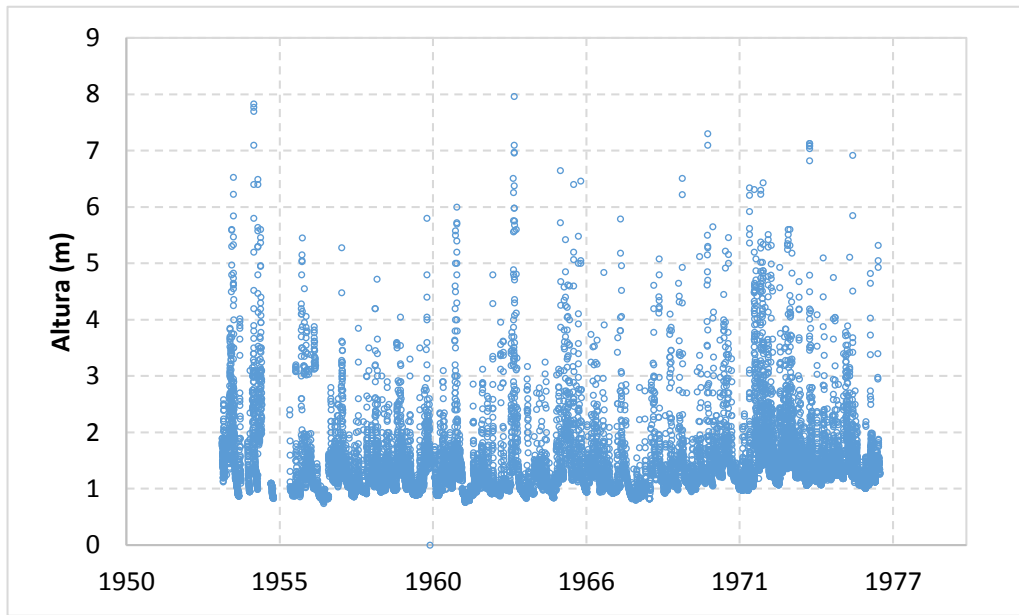
b) Estación Piray Guazú – Pinar Ciba



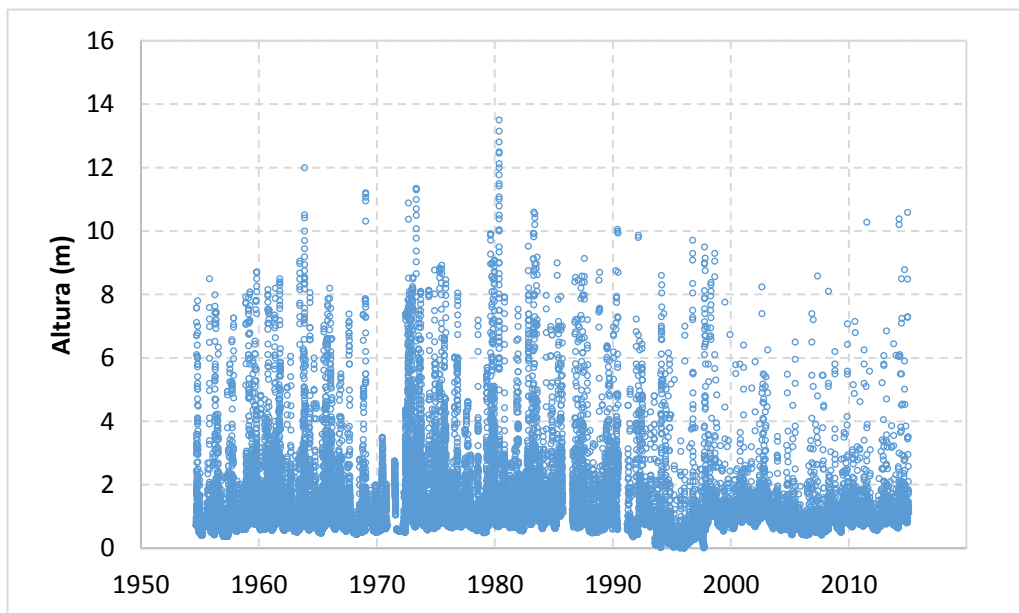
c) Estación Piray Miní – Valle Hermoso

Figura 2.2.21. Caudales diarios

Para las estaciones “Vieja RN12”, sobre el arroyo Paranay, y “Colonia Mártires”, sobre el arroyo Yabebiry, no se cuenta con registros de caudal diario, pero sí de niveles, los cuales se muestran en la Figura 2.2.22. En la Figura 2.2.23 se presentan los registros de aforos para esas dos estaciones, a los cuales se han ajustado curvas de modo de disponer de relaciones altura-caudal ($h-Q$) con las cuales convertir las series de nivel en series de caudal.

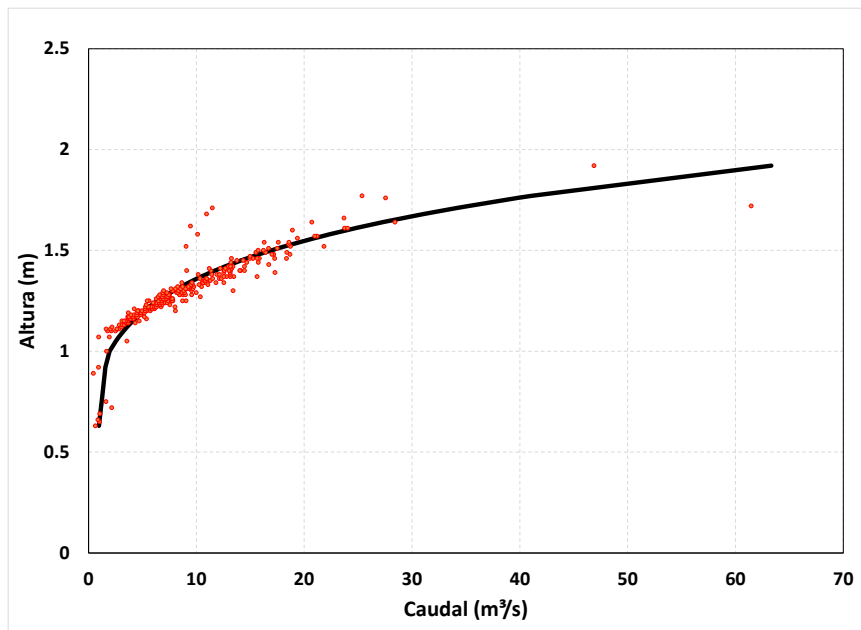


a) Arroyo Paranay en el Puente de la vieja RN12



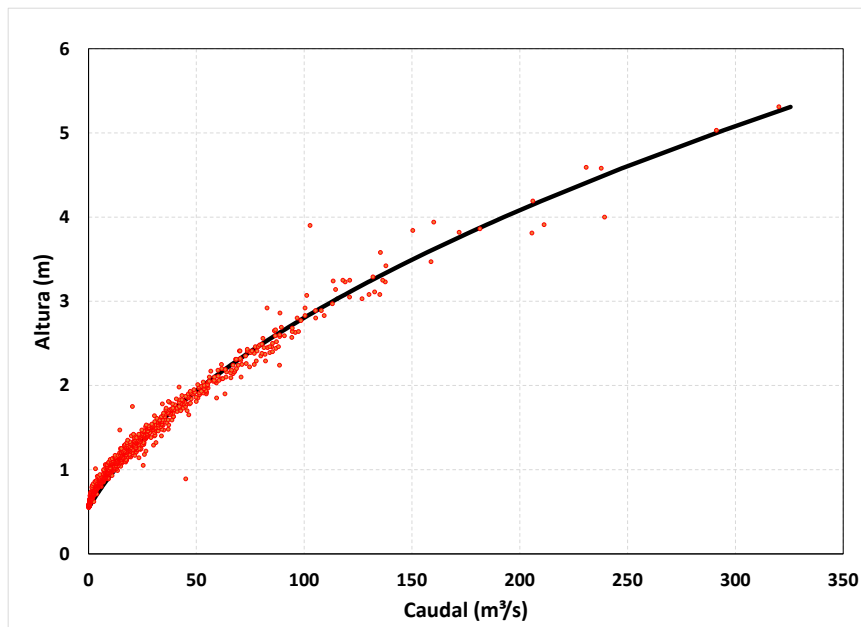
b) Arroyo Yabebiry en Colonia Mártires

Figura 2.2.22. Series de alturas hidrométricas



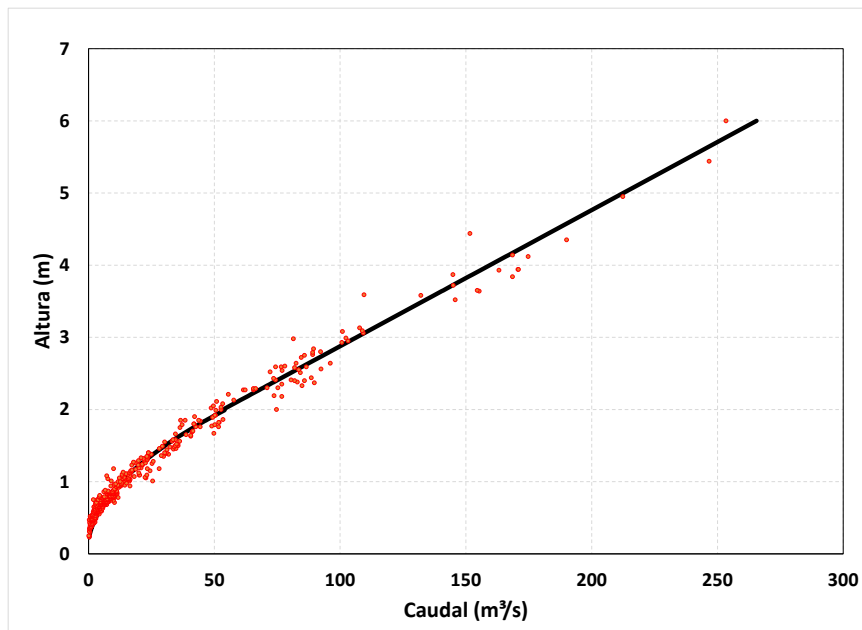
a) Arroyo Paranay en el Punte de la vieja RN12

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1\text{m} & Q = 2,051 \cdot h - 0,3254 \\ > 1\text{m} & Q = 1,9478 \cdot h^{5,3373} \end{cases}$$



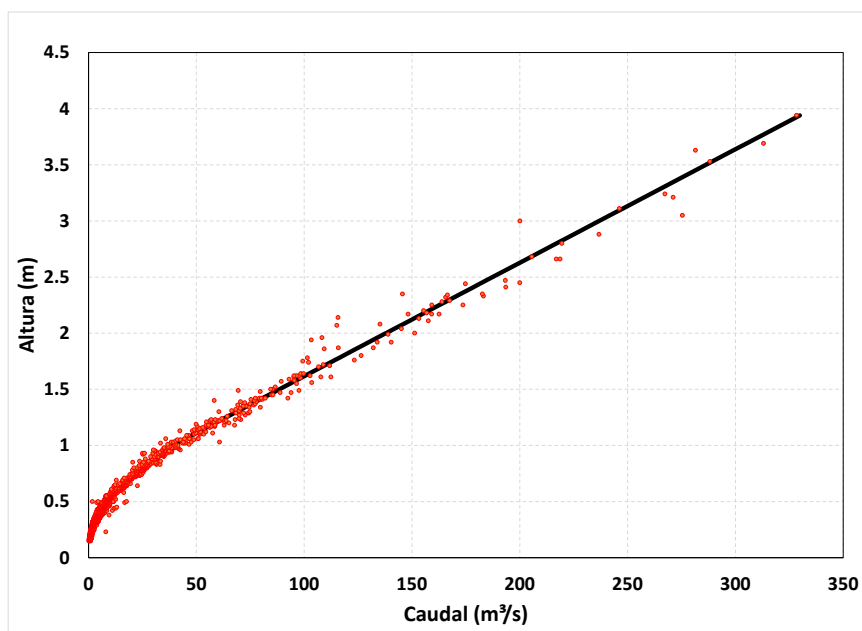
b) Arroyo Paranay en el Alcazar

$$Q = 9,6012 \cdot h^2 + 12,118 \cdot h - 9,5$$



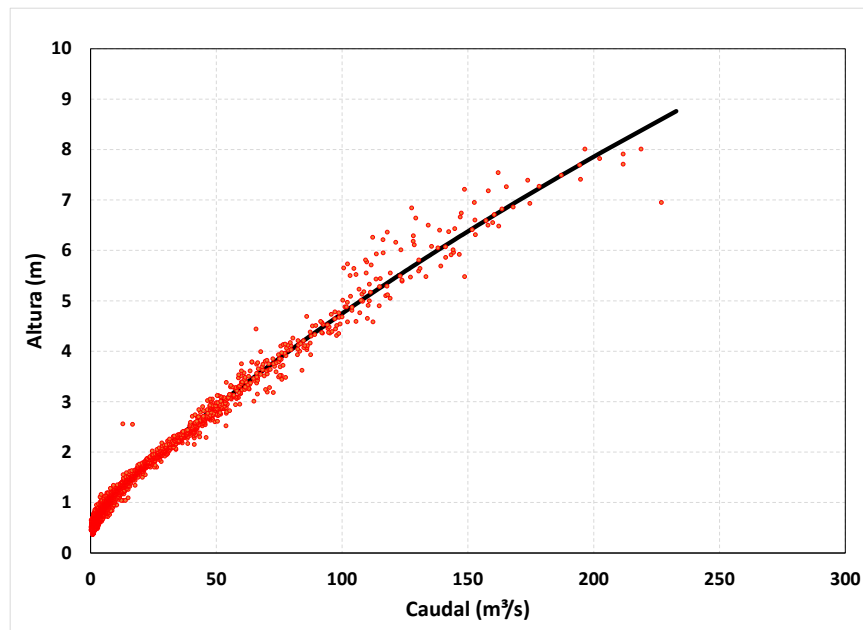
c) Arroyo Piray Mini en Valle Hermoso

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 2m \\ > 2m \end{cases} \quad \begin{cases} Q = 13,866 \cdot h^2 - 0,1741 \cdot h - 0,5 \\ Q = 53,004 \cdot h - 52,53 \end{cases}$$



d) Arroyo Piray Guazú en Pinar Ciba

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1m \\ > 1m \end{cases} \quad \begin{cases} Q = 41,472 \cdot h^{2,3731} \\ Q = 98,922 \cdot h - 59,924 \end{cases}$$



e) Arroyo Yabebiry en Colonia Mártires

$$\text{Altura escala} \begin{cases} < 1,1\text{m} & Q = 5,7512 \cdot h^{2,7072} \\ > 1,1\text{m} & Q = 1,013 \cdot h^2 + 19.413 \cdot h - 15 \end{cases}$$

Figura 2.2.23. Relaciones altura-caudal

A partir de las series temporales de caudal se determinaron las curvas de excedencia de caudales en todas las estaciones, las cuales se presentan en la Figura 2.2.24. Se observa que las curvas son similares entre sí, alcanzando valores picos de 800 m³/s en Piray Mini y Piray Guazú, y poco más de 500 m³/s en el Paranay.

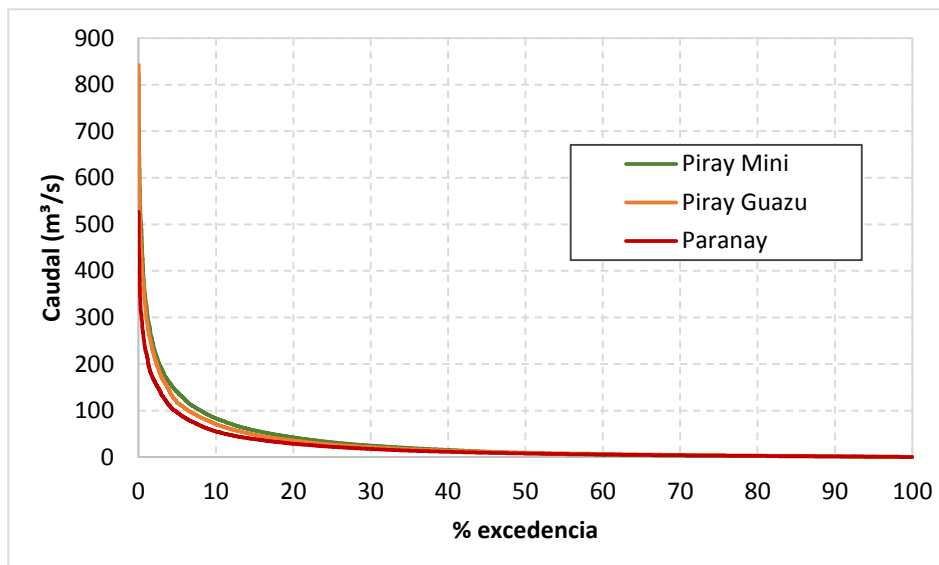


Figura 2.2.24. Curva de excedencia de caudales

2.3 SUELO

2.3.1 Usos del suelo

El Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables (RNR) de Misiones cuenta con un mapa detallado de áreas naturales protegidas (Figura 2.3.1). Se diferencian tres grupos:

- Áreas Naturales Protegidas
- Corredores verdes
- Ruta costera

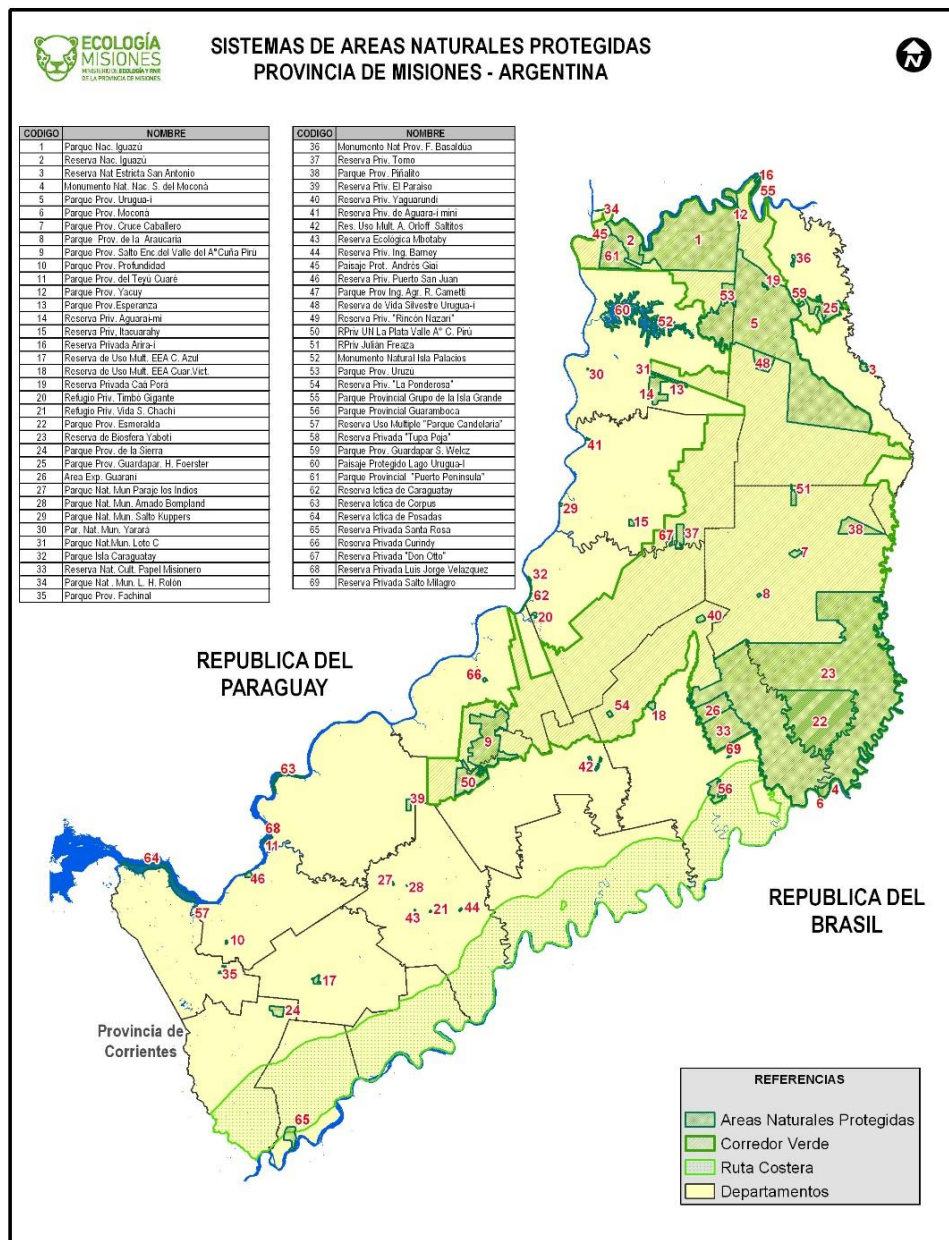


Figura 2.3.1. Mapa de áreas protegidas de la Provincia de Misiones (Fuente: Ministerio de Ecología y RNR de Misiones)

En la Figura 2.3.2 se superponen las áreas naturales con las cuencas. Se observa que:

- Todas las cuencas que desembocan en el río Uruguay tienen áreas naturales en la zona baja; según el mapa de la Figura 2.3.1 son parte del corredor denominado Ruta Costera.
- Gran parte de la zona centro-este de la provincia está catalogada como corredores verdes o áreas protegidas. En particular, las cuencas del Yabotí (7), La liana (30) y Toro (42) constituyen áreas protegidas de la Biosfera Yabotí.
- Los corredores verdes afectan gran parte de la zona alta de las cuencas Paranay Guazú (2), Piray Guazú (3) y Piray Mini (4).
- La cuenca del Yabebiry no se encuentra comprendida dentro de áreas naturales (con excepción de parque provinciales menores de poca extensión, como el Teyucuaré, a orillas del Paraná).
- En el norte de la provincia también se tienen Áreas Naturales Protegidas en las cuencas que desembocan sobre el río Iguazú, o en la zona alta de la cuenca del Urugua-í (5).

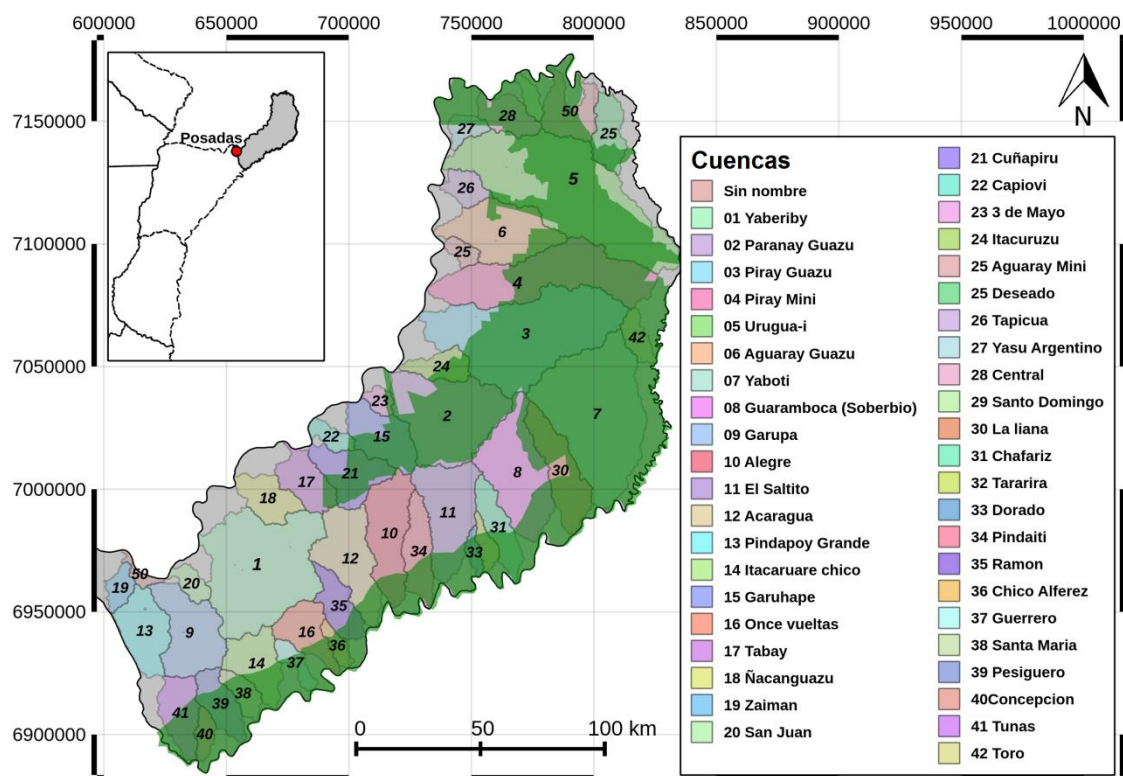


Figura 2.3.2. Superposición de cuencas y áreas naturales

El INTA ha confeccionado un mapa de aptitud de las tierras (Figura 2.3.3), donde se observa que poco más del 60% del territorio es apto para la forestación, siendo el resto apto para fines agrícolas o pastoreo.

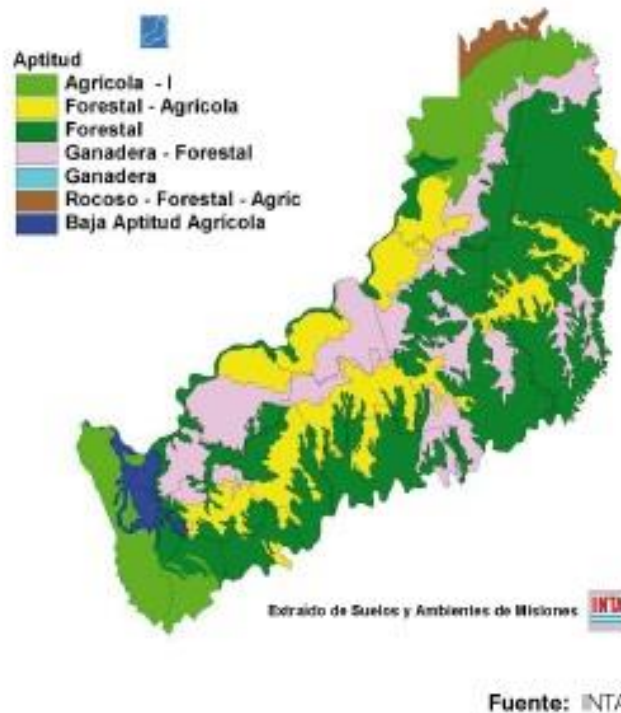


Figura 2.3.3. Aptitud de las tierras para usos agrícolas (INTA, 2011)

Para el análisis de los usos del suelo en el área de estudio se contó con la base de datos del Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA). En su plataforma web, están registradas series temporales de áreas implantadas a paso anual, en el período 1969-2013, para distintos tipos de cultivos. Dichas series están discriminadas por departamentos o bien para la totalidad de la Provincia de Misiones.

Se tomaron las series de áreas implantadas para la totalidad de la provincia, con el objetivo de identificar aquellos cultivos de mayor incidencia, evitando así trabajar con un volumen de datos demasiado grande con cultivos que no repercuten sensiblemente en el resultado del análisis. Se seleccionaron los 5 cultivos de mayor área implantada: yerba mate, té, maíz, soja y tung, aunque estos dos últimos hayan decrecido considerablemente en los últimos años. De la Figura 2.3.4 se observa que, efectivamente, el resto de los cultivos representa un área muy pequeña en comparación, sin superar las 10.000 ha, por lo que se desprecia en el análisis.

De la web del SIIA también se obtuvieron las series temporales de los cultivos dominantes discriminadas para cada uno de los 17 departamentos. Estas series presentan datos faltantes en los años 2004, 2005, 2008 y 2010 en todos los casos, y en años posteriores según el tipo de cultivo, los cuales fueron completados por interpolación lineal con los datos de los años más próximos. Posteriormente se pasó la información por departamentos a una discriminada por cuenca a través de una metodología de ponderación por área de intersección entre ambas (Figura 2.3.5).

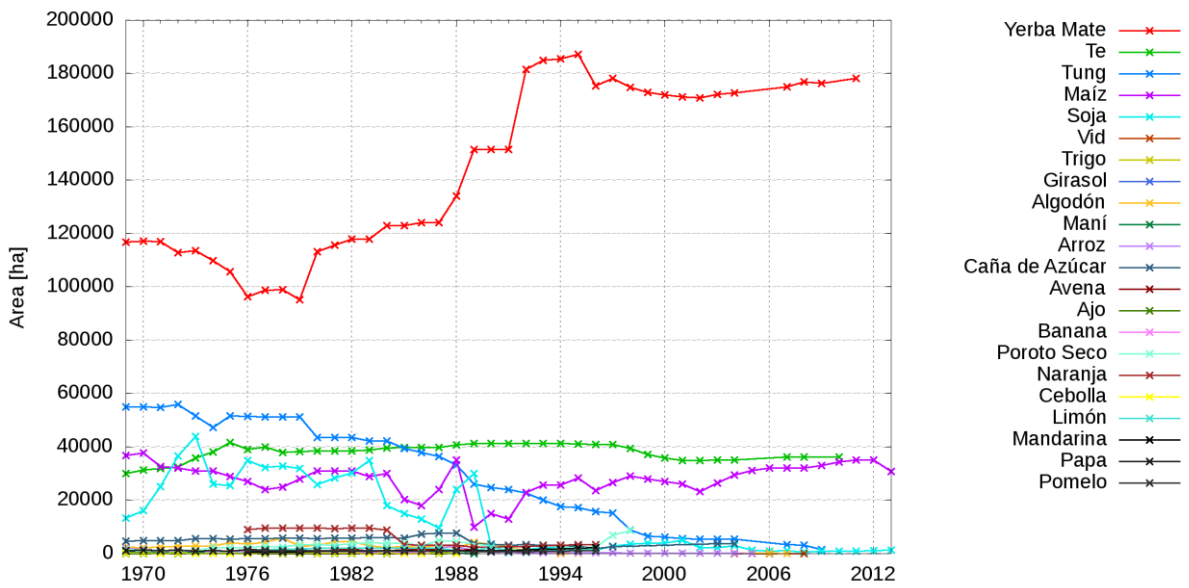


Figura 2.3.4. Área implantada en la provincia de Misiones según tipo de cultivo.

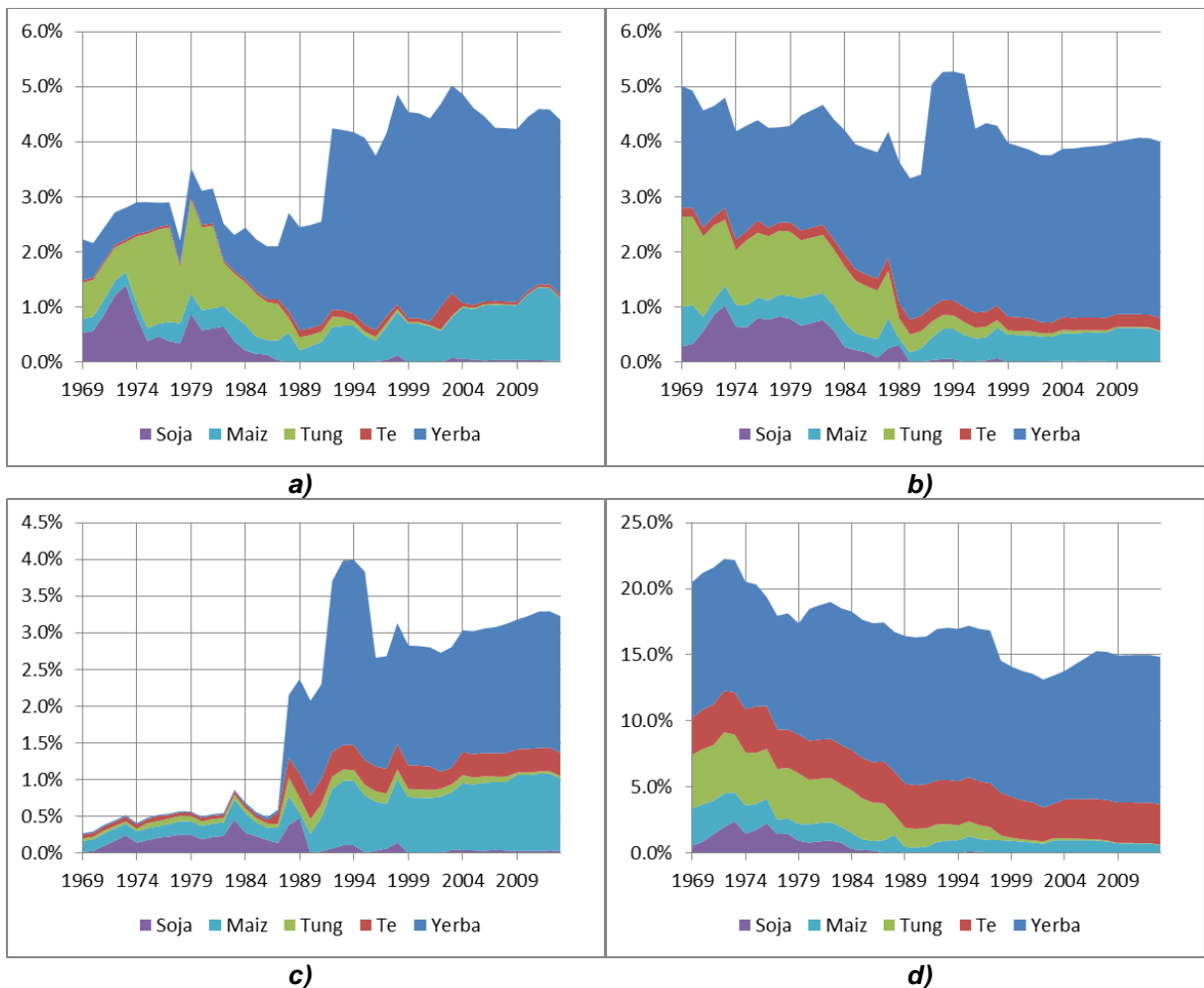


Figura 2.3.5. Área implantada en la Provincia de Misiones según tipo de cultivo para las cuencas Urugua-í (a), Piray-Guazú (b), Yabotí (c) y Yabebiry (d).

En la Figura 2.3.6 se presentan los resultados agrupados espacialmente para el año 2007 (el año más reciente con datos completos no interpolados), donde se observa que en la gran mayoría de las cuencas el cultivo predominante es la yerba mate, y que aquella con mayor área cultivada es Yabebiry. Además, los cultivos de té y soja se concentran en la zona central de la provincia.

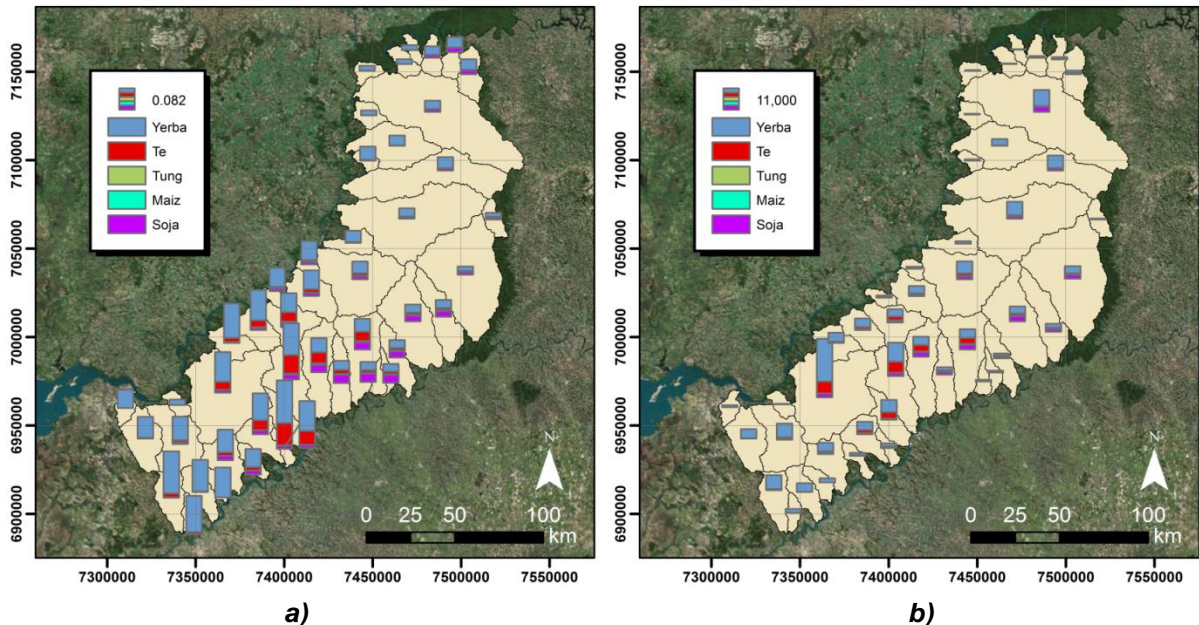


Figura 2.3.6. Área implantada en la Provincia de Misiones según tipo de cultivo. En valores relativos al área de cuenca (a) y valores absolutos (b).

2.3.2 Tipos de suelo

La Figura 2.3.7 muestra la caracterización de los suelos de la provincia. Son preponderantes los suelos pedregosos sobre base basáltica, variando su inclinación desde pronunciada (marrón), pasando por pendientes poco pronunciadas (naranja), y hasta superficies onduladas (amarillo). En casi toda la extensión provincial los suelos se caracterizan por ser de libre drenaje.

2.3.3 Erosibilidad

La Figura 2.3.8 muestra que la mayor parte del territorio presenta un potencial de erosión hídrica entre moderadamente alto a extremadamente alto.

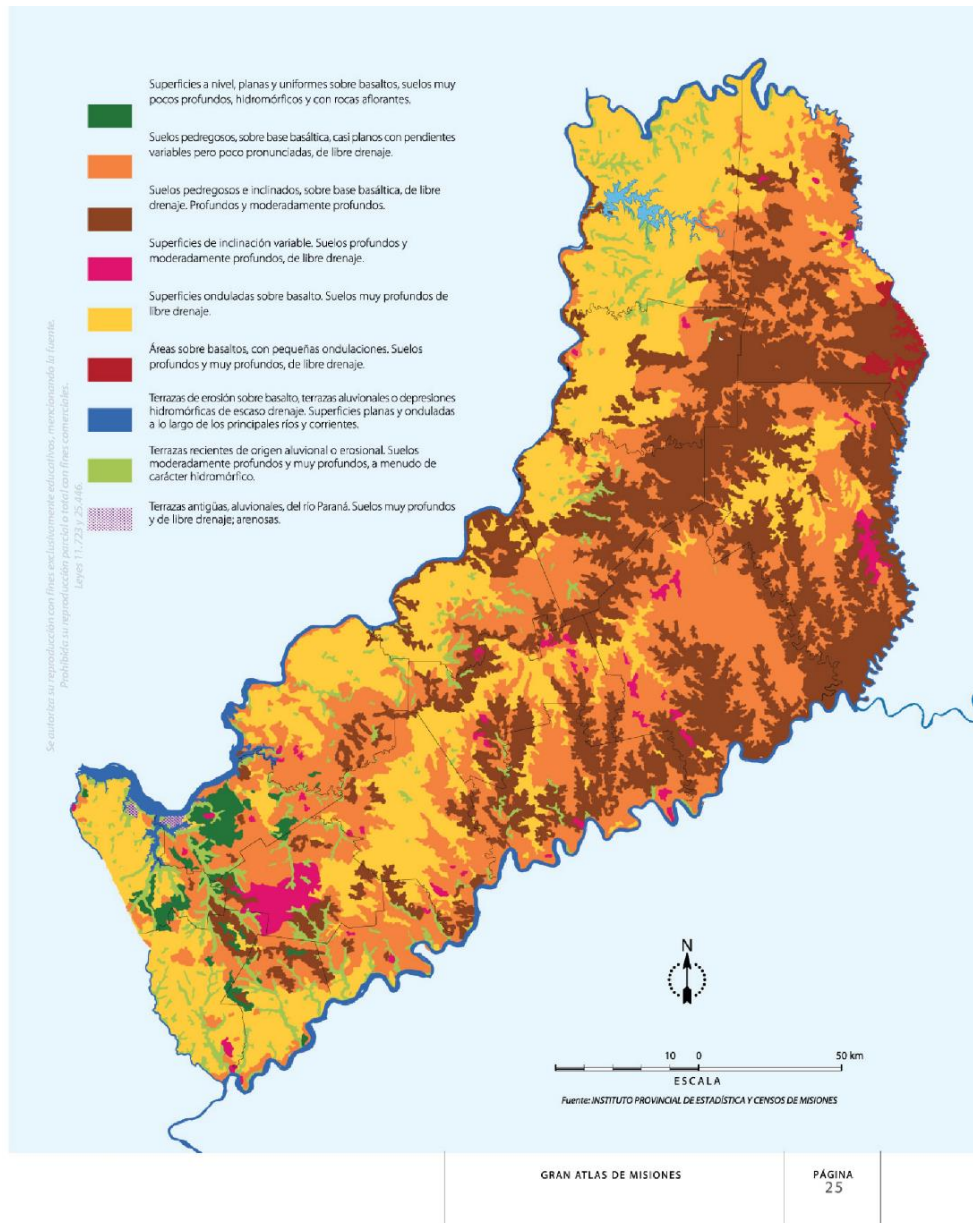


Figura 2.3.7. Tipos de suelos de la Provincia de Misiones (Fuente: Ministerio de Ecología y RNR de Misiones)

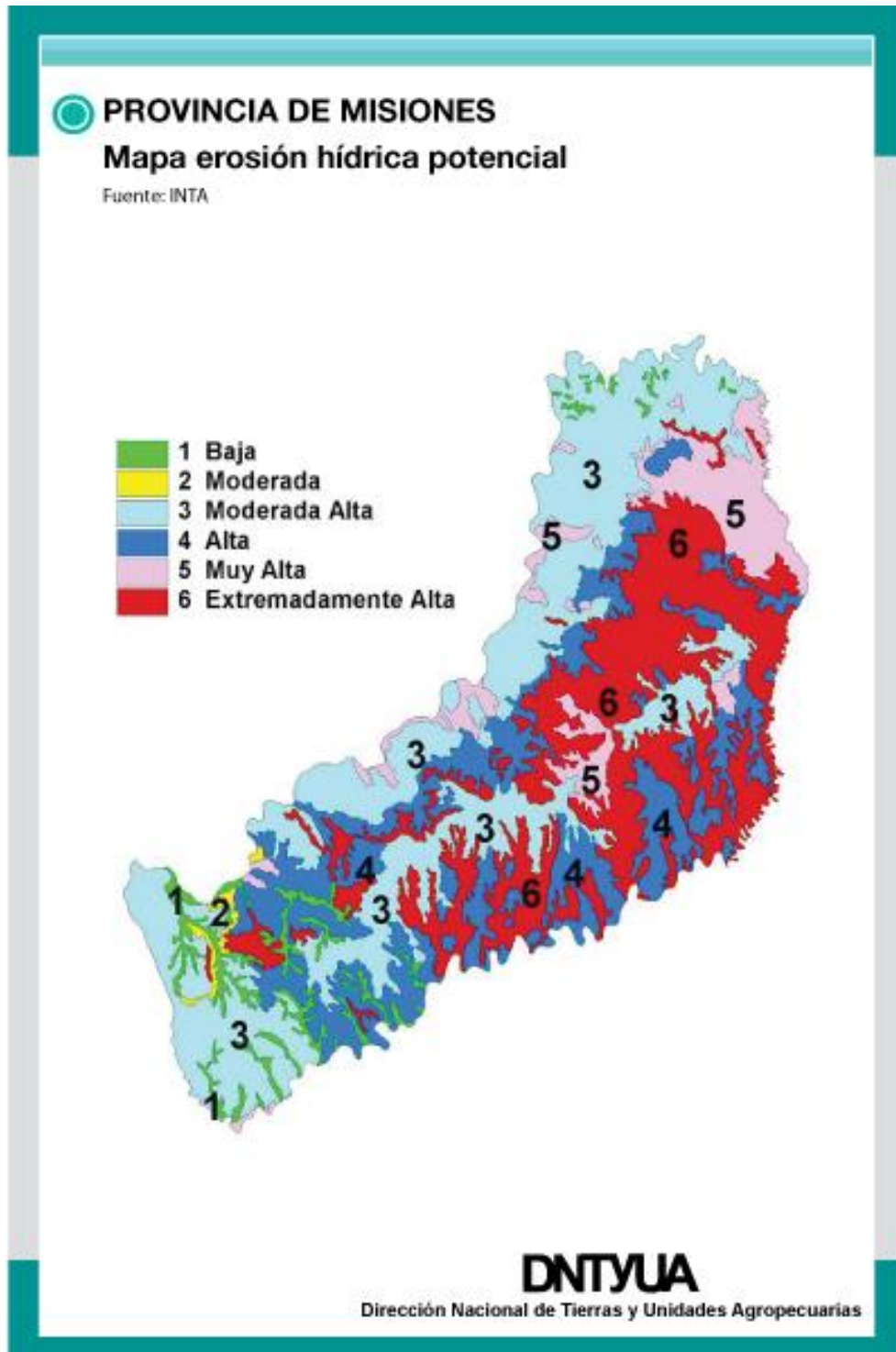


Figura 2.3.8. Erosión hídrica potencial de la Provincia de Misiones (Fuente: Dirección Nacional de Tierras y Unidades Agropecuarias)

2.4 APROVECHAMIENTOS EXISTENTES Y PROYECTADOS

En la Figura 2.4.1 se ubican los micro-aprovechamientos hidroeléctricos existentes en la Provincia de Misiones, 7 en total, a saber:

- Aprovechamiento Arroyo Central
- Aprovechamiento El Taruma (hidroeléctrico)
- Aprovechamiento Salto Pereyra
- Aprovechamiento Persiguero
- Aprovechamiento el Tigre (hidroeléctrico, Potencia instalada: 250 kW)
- Aprovechamiento Dorado
- Aprovechamiento Salto Carlitos



Figura 2.4.1. Aprovechamientos en la Provincia de Misiones (Fuente: Gobierno de la Provincia de Misiones)

En lo que respecta a aprovechamientos hidroeléctricos, la Secretaría de Energía indica 3 centrales (Figura 2.4.2):

- Uruguayí
- El Salto I
- El Salto II

Los dos últimos se encuentran dentro de la categoría de pequeños aprovechamientos, y son operados desde 1996 por Energía Misiones SA (EMSA)⁸. Además, se identifica un pequeño aprovechamiento en la cuenca del Yabebiry (Figura 2.4.2).

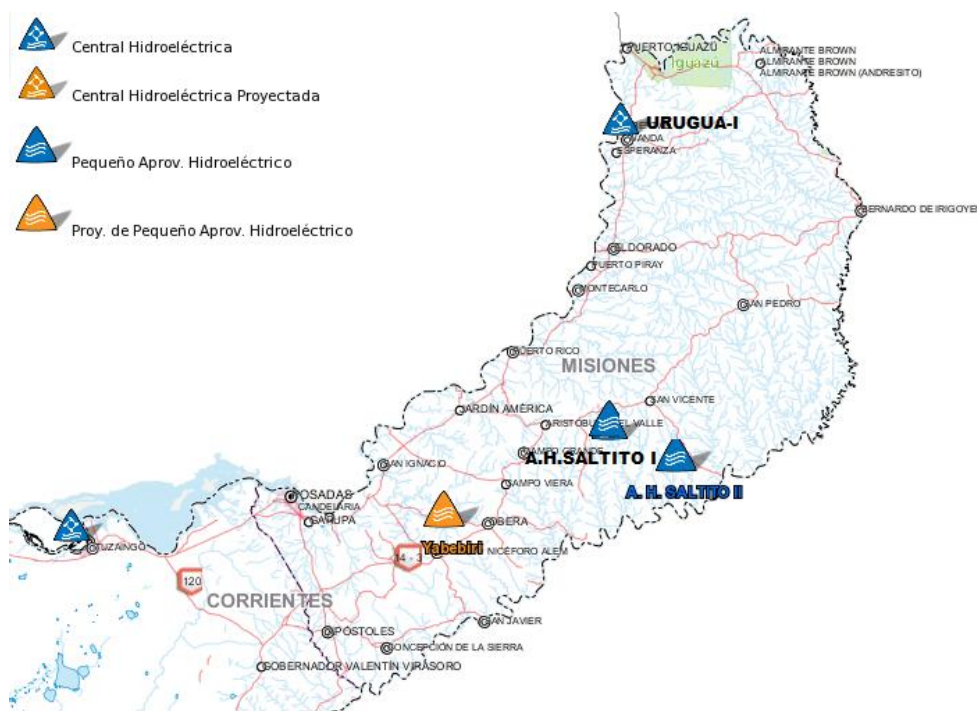


Figura 2.4.2. Aprovechamientos hidroeléctricos (Fuente: Secretaría de Energía)

En un antiguo estudio llevado a cabo por la COMIP⁹ se identificaron 44 aprovechamientos con un Potencial Hidroeléctrico Teórico (PHT) menor a 5 MW, y 10 con una potencia superior a 5 MW. Para los aprovechamientos identificados se realizó un análisis sobre el grado de factibilidad económica, determinándose que para que un aprovechamiento fuera posible la potencia instalada debía ser mayor a 11 MW.

⁸ Informe 2001-2005. Secretaría de Energía

(http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/mercado_electrico/inf_sec_elect_01_05_Q.pdf)

⁹ Aprovechamiento del Río Paraná en el Tramo Límitrofe Comprendido por la Desembocadura del Río Iguazú y la sección Encarnación-Posadas con particular atención a la Zona de Corpus (1975), Tomo 5, Capítulo XI: Otros Aprovechamientos

En el contexto actual de Yacretá operando y Corpus sin construir, los aprovechamientos que resultan económicamente factibles, entre los identificados en aquella oportunidad, serían los que se presentan en la Tabla 2.4.1, donde se indican sus respectivas potencias instaladas, y cuya ubicación se muestra en la Figura 2.4.3. Solo el aprovechamiento de Urugua-í fue construido y está operando actualmente.

Tabla 2.4.1. Potencia de aprovechamientos económicamente factibles estudiados por COMIP

Aprovechamiento	Potencia instalada (MW)		
	Base	Media	Punta
Urugua-í	30,2	76,8	108,0
Piray Guazú	20,1	50,5	70,3
Paranay Guazú	8,2	20,5	28,7
Ita Curuzú	6,1	15,3	21,4

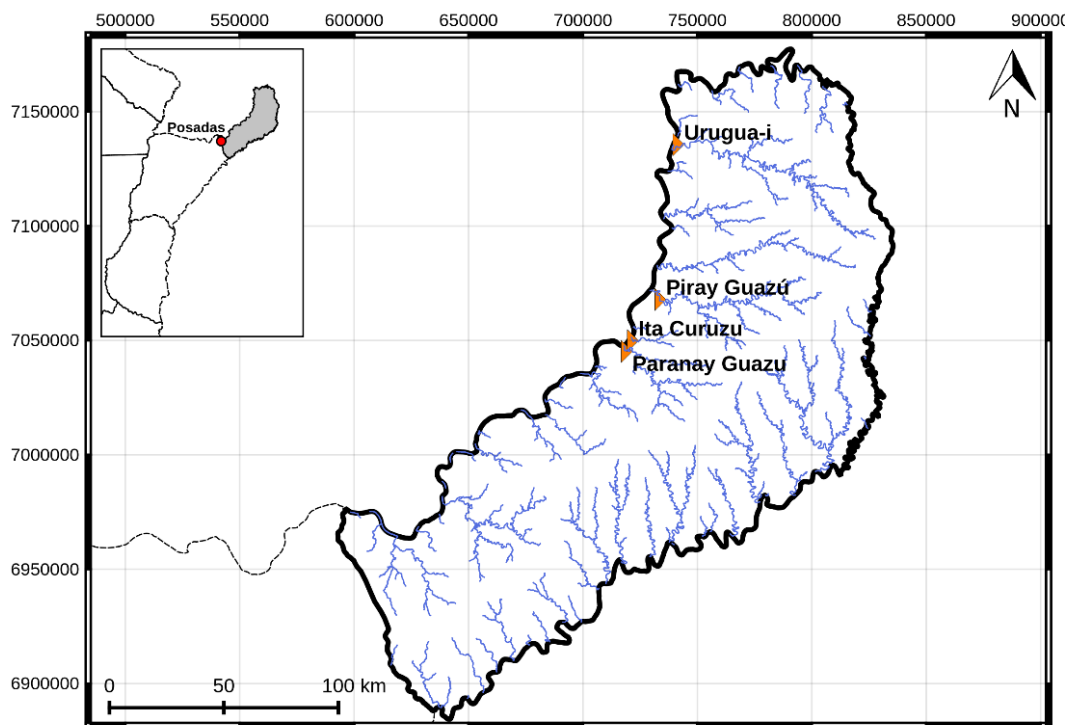


Figura 2.4.3. Aprovechamientos factibles

3 MODELO HIDROLOGICO

3.1 Metodología

Para llevar a cabo un balance hídrico completo es necesario recurrir a la modelación hidrológica de la cuenca.

Se ha encarado la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE). Este software está diseñado para simular el proceso hidrológico completo de sistemas dendríticos. Incluye procedimientos de análisis hidrológicos tradicionales, tales como infiltración por eventos, hidrograma unitario y traslado hidrológico. También contiene procedimientos para simulación continua, incluyendo evapotranspiración, fusión de nieve, y control de humedad del suelo.

Para el preprocesamiento de los datos se ha utilizado el software HEC-GeoHMS. Es una extensión del software ArcGIS que contiene una serie de procedimientos, herramientas y utilidades para la preparación de los datos desde un sistema de información geográfica. Permite visualizar y realizar análisis espaciales, obtener las características de la cuenca, delinear cauces y cuencas, y finalmente construir las entradas para el HEC-HMS.

3.2 Preprocesamiento hidrológico

El preprocesamiento hidrológico apunta a establecer las cuencas y la red de drenaje asociada. Procede a través de los siguientes pasos:

- Selección del MDE del terreno
- Relleno de vacíos
- Dirección del flujo
- Acumulación del flujo
- Definición de cauces
- Segmentación de cauces
- Delineación de subcuencas

La información se genera en formato *grid* (celda o raster) o en formato *shape* (vector: puntos, líneas o polígonos).

3.2.1 Selección del MDE del terreno

El IGN desarrolló una línea de producción para generar de un MDE para la República Argentina. La información de base es el MDE satelital proveniente de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que fue realizada en el transcurso del mes de febrero del año 2000. Esta misión fue un trabajo conjunto de la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos de Norte América y las Agencias Espaciales de Alemania e Italia. La técnica utilizada fue la interferometría RADAR desde el espacio. Todos los datos son de libre distribución, y tienen una resolución de 30 metros por píxel para el territorio de los Estados Unidos, y de 90 metros, para el resto del mundo.

A través de un convenio con la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos de Norte América, el IGN recibió el modelo de Argentina con resolución de 30 metros por píxel. A partir de este modelo derivó a otro de 45 metros por píxel, al que se le aplicaron los siguientes procesos: relleno de vacíos, inclusión de datos de lagos, filtrado espacial y enmascarado de límites¹⁰. Este fue denominado SRTM-AR, tal como se indicó en la sección 2.1.3.

Para el presente proyecto se tomó el SRTM-AR para la totalidad de la Provincia de Misiones y se le efectuó un cambio en la resolución de la grilla a 180 metros, mediante un remuestreo de la información, de modo de disminuir la cantidad de datos (en un factor 16), lo cual permite un manejo más eficiente de la información sin perder precisión a los fines buscados. El MDE resultante, proyectado a Gauss – Kruegger Faja 7 (Marco de referencia: Posgar 2008), se grafica en la Figura 3.2.1.

3.2.2 Relleno de Vacíos

El MDE se procesó de manera tal que no queden depresiones en el terreno. Este procesamiento se efectúa rellenando las depresiones, o sea, aumentando las cotas de las celdas que estén rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta forma el agua puede circular de una celda a otra sin estancarse. Este MDE “hidrológicamente corregido” (Figura 3.2.2) se tomó como punto de partida para delinear las cuencas y los cauces.

¹⁰ <http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>

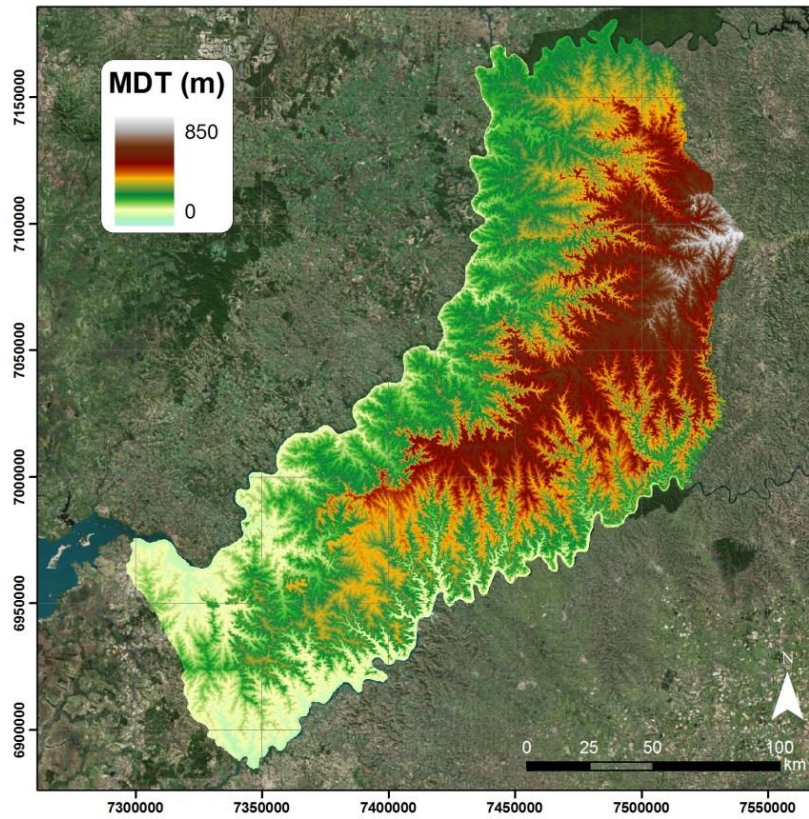


Figura 3.2.1. MDE del Terreno

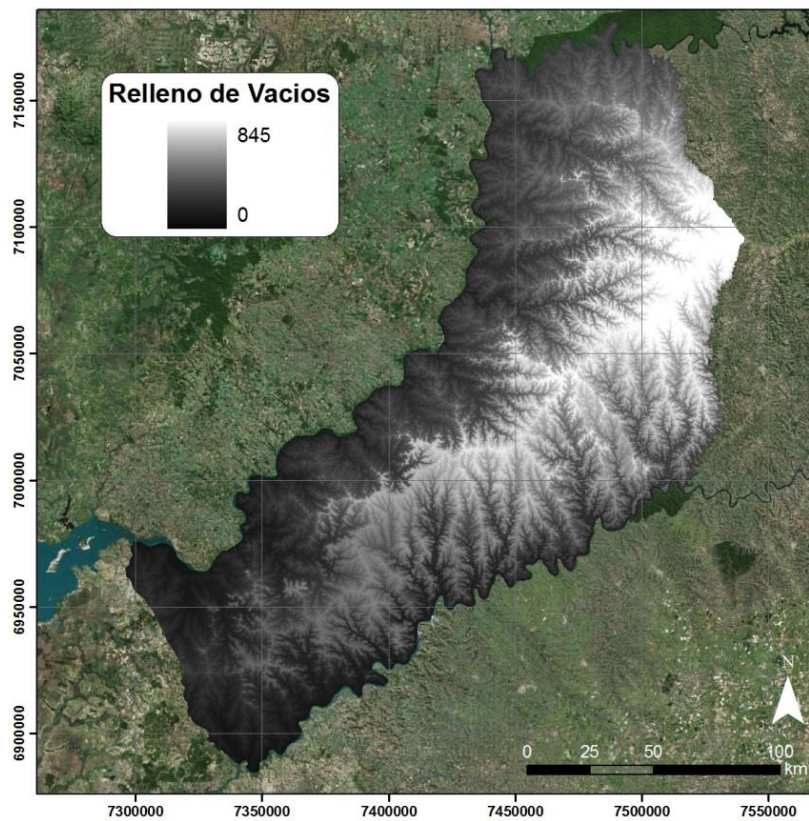


Figura 3.2.2. MDE hidrológicamente corregido

3.2.3 Dirección del flujo

En este paso se definen las direcciones de máxima pendiente, considerando celda a celda las cotas de las celdas circundantes. Para ello se utiliza el MDE hidrológicamente corregido. Las ocho posibles direcciones del flujo se indican en la Tabla 3.2.1. Las direcciones de flujo resultantes para el presente problema se muestran en la Figura 3.2.3.

Tabla 3.2.1. Dirección del flujo

Numeración	Dirección
1	Este
2	Sudeste
4	Sur
8	Sudoeste
16	Oeste
32	Noroeste
64	Norte
128	Noreste

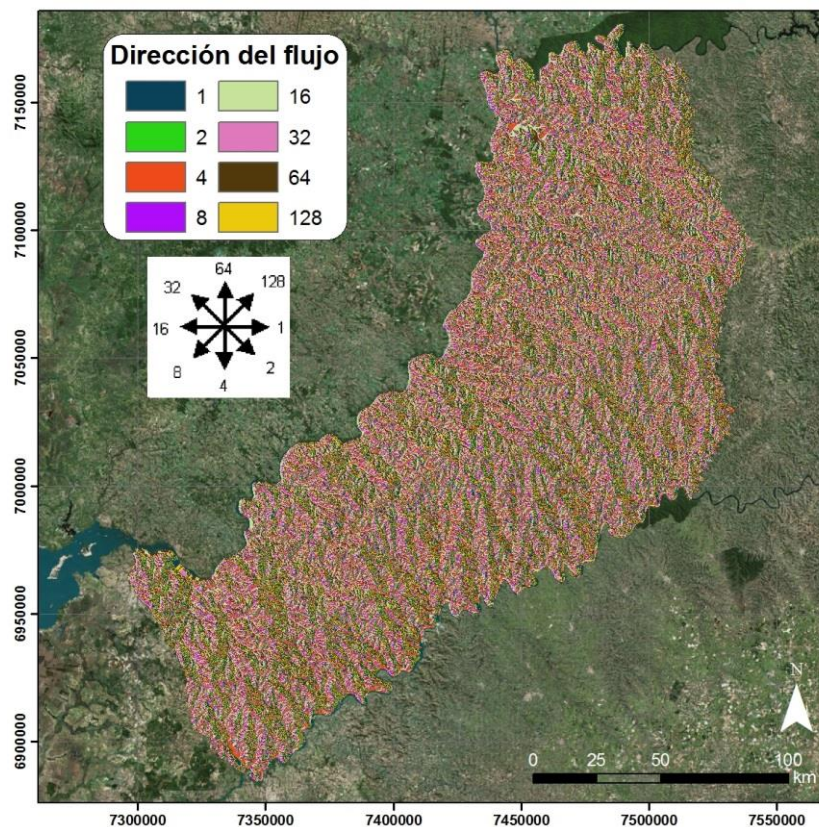


Figura 3.2.3. Direcciones de flujo

3.2.4 Acumulación del flujo

En este paso se determina el número de celdas de aguas arriba que drenan a cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo de ella. La acumulación de flujo es una medida del área de drenaje, expresada en unidades de celdas, que puede ser pasada fácilmente a m^2 o km^2 multiplicando el número de celdas por el tamaño de la celda del modelo. En la Figura 3.2.4 se observa la acumulación de flujo para el presente problema.

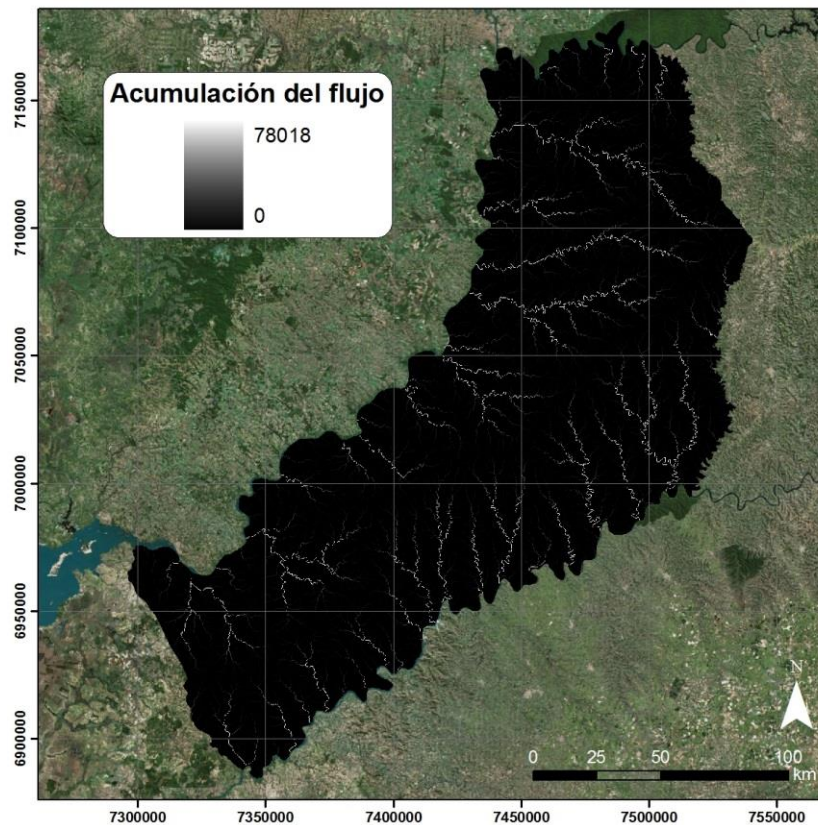


Figura 3.2.4. Acumulación de flujo

3.2.5 Definición de cauces

En este paso se califica como pertenecientes al cauce a aquellas celdas con flujo procedente de una cantidad de celdas mayor a un umbral definido por el usuario. El umbral puede especificarse como área o cantidad de celdas. Todas las celdas que tengan un valor superior al valor umbral serán clasificadas como celdas que forman parte del cauce, mientras que las restantes celdas serán consideradas como superficie del terreno que drena a los cauces definidos. Cuanto menor sea el umbral, mayor será el número de cauces generados.

Para el presente problema se ha seleccionado como umbral 3.000 celdas, valor que permite representar los principales cauces de la Provincia.

3.2.6 Segmentación de cauces

En este paso se identifican segmentos de cauces. Los segmentos son tramos de cauces formados por el punto de inicio de un cauce y una unión, por dos uniones o por una unión y el punto final del cauce. A todas las celdas que formen parte de un mismo segmento se les asignará el mismo número.

La Figura 3.2.5 ilustra la segmentación para la cuenca Piray Guazú. En la Tabla 3.2.2 se observa la cantidad de segmentos obtenidos en función de diferentes umbrales. Para el umbral de 3000 celdas corresponden 117 segmentos.

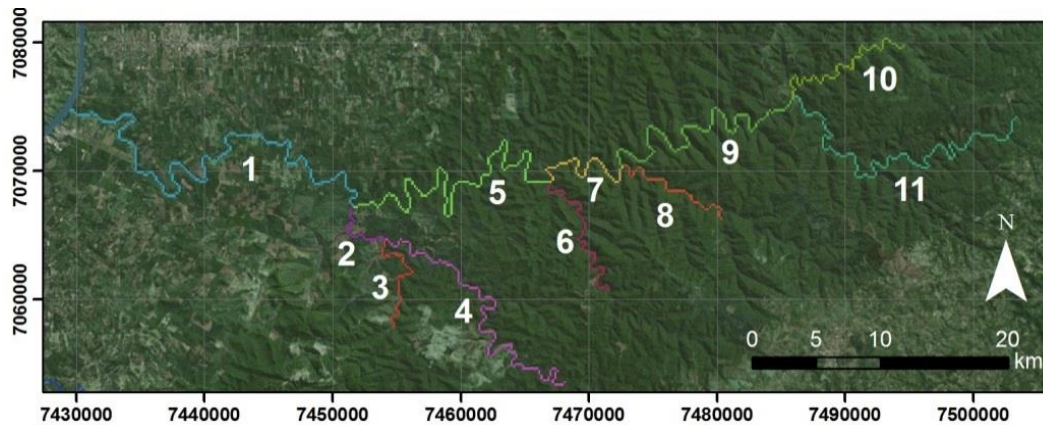


Figura 3.2.5. Segmentación de cauces

Tabla 3.2.2. Segmentos en función de un umbral

Umbral (cantidad de celdas)	Cantidad de segmentos
1000	425
2000	211
3000	117
4000	95
5000	73

3.2.7 Delineación de cuencas

Finalmente se define una cuenca por cada segmento de cauce. Las 117 cuencas resultantes para el presente problema se muestran en la Figura 3.2.6.

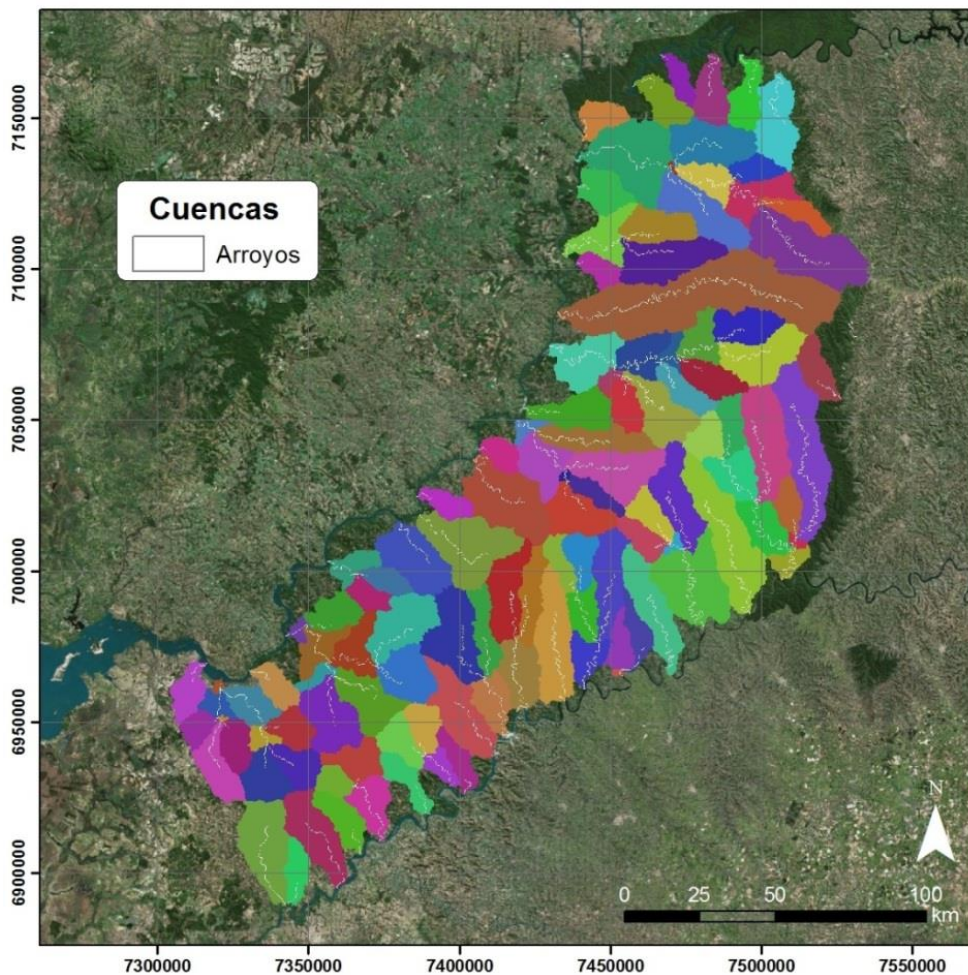


Figura 3.2.6. Delineación de cuencas

3.3 Esquematización

3.3.1 Cuencas

Para la representación en el modelo HEC-HMS se han fusionado cuencas, de modo de que ninguna tenga un área menor a 100 km². En la Figura 3.3.1 se muestran las 45 cuencas resultantes.

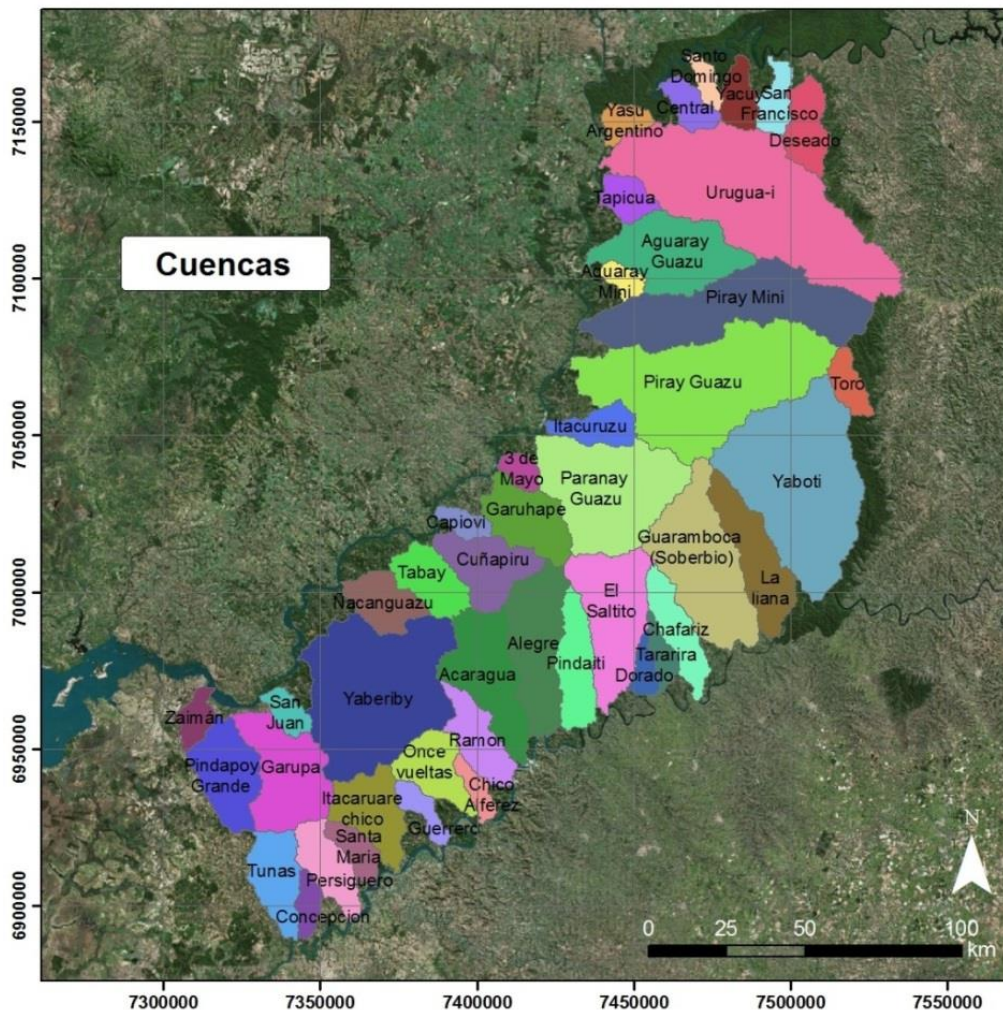


Figura 3.3.1. Cuencas de cálculo

HEC-GeoHMS calcula varias características topográficas de los cauces y cuencas. Estas características son útiles para comparar cuencas entre sí y estimar parámetros hidrológicos. Las características físicas de la cuenca y los cauces se almacenan en tabla de atributos.

Se determinaron el área y la ubicación del centroide de las subcuencas, la longitud de los cauces más extensos (Figura 3.3.2) y la pendiente media de dichos cauces. La pendiente media (*Pend*) se calculó utilizando la longitud del cauce más extenso y la diferencia entre las cotas de aguas arriba y aguas abajo de dicho cauce. También se efectuó el cálculo de la pendiente media a través de la formulación de Benson¹¹, donde la pendiente media puede asimilarse a través de la pendiente de la recta trazada entre los puntos que se encuentran al 85% y al 10% de distancia a partir del punto de desagüe siguiendo el curso principal (*Pend**). Esta última es significativamente menor. Los resultados se muestran en la Tabla 3.3.1.

¹¹ Benson, M.A. 1959. En Llamas, J. 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, 635 p.

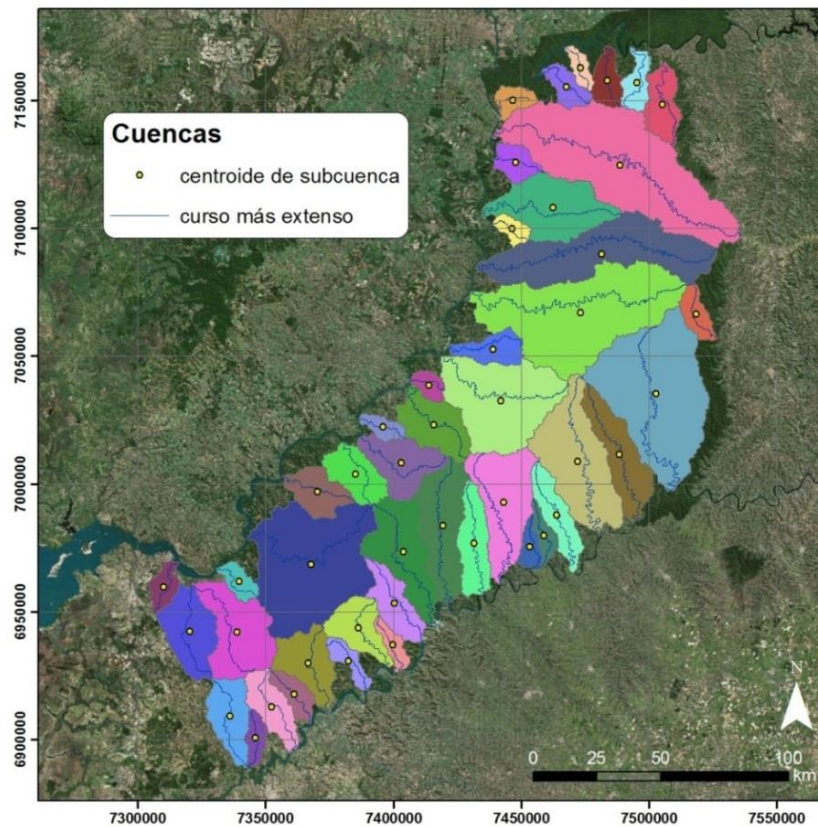


Figura 3.3.2. Curso más extenso y centroide de cuenca

Tabla 3.3.1. Características topográficas de las cuencas

#	Nombre	Área (km ²)	Long (km)	Pend (%)	Pend* (%)
1	Urugua-í	2.528	203	0,36	0,16
2	Piray Guazú	2.135	174	0,39	0,22
3	Yabotí	1.997	144	0,42	0,23
4	Yabebiry	1.869	109	0,35	0,16
5	Piray Miní	1.459	174	0,40	0,24
6	Paranay Guazú	1.311	94	0,55	0,31
7	Guaramboca (Soberbio)	1.153	117	0,44	0,25
8	El Saltito	857	90	0,51	0,36
9	Aguaray Guazú	853	89	0,52	0,20
10	Acaragua	774	89	0,42	0,31
11	Garupa	764	64	0,37	0,15
12	Alegre	757	90	0,49	0,38
13	La liana	608	89	0,52	0,45
14	Pindapoy Grande	554	51	0,32	0,16
15	Garuhape	509	65	0,73	0,32
16	Cuñapirú	508	59	0,74	0,46
17	Itacaruaré chico	477	54	0,51	0,16

#	Nombre	Área (km ²)	Long (km)	Pend (%)	Pend* (%)
18	Pindaití	430	68	0,62	0,42
19	Tunas	424	50	0,39	0,16
20	Once vueltas	391	48	0,60	0,47
21	Ramón	374	53	0,55	0,56
22	Tabay	373	40	0,96	0,42
23	Chafariz	361	68	0,63	0,48
24	Persiguero	354	49	0,53	0,26
25	Đacan Guazú	338	41	0,89	0,39
26	Deseado	325	50	0,66	0,41
27	Itacuruzú	258	44	1,12	0,53
28	Yacuy	205	35	0,74	0,29
29	Tapicua	195	26	0,90	0,43
30	San Francisco	195	41	0,73	0,31
31	Santa María	185	33	0,76	0,26
32	Central	185	35	0,61	0,29
33	Toro	179	34	1,19	0,81
34	Zaimán	154	30	0,35	0,22
35	Guerrero	151	35	0,76	0,57
36	San Juan	143	30	0,84	0,42
37	Yasu Argentino	142	26	0,88	0,29
38	Concepción	132	28	0,77	0,25
39	Tararira	130	40	1,00	0,90
40	Chico Alferez	128	30	0,94	0,69
41	Dorado	121	29	1,36	1,09
42	Capioví	121	26	1,29	0,57
43	3 de Mayo	112	20	1,01	0,71
44	Aguaray Miní	108	22	1,14	0,65
45	Santo Domingo	104	27	0,63	0,35

3.3.2 Modelo de balance vertical

El balance vertical de agua se efectúa mediante el método SMA (*Soil Moisture Accounting*¹²), que plantea una distinción entre 5 compartimientos, a saber (Figura 3.3.3):

- *Follaje*: Intercepta parte del agua de las precipitaciones, impidiendo su llegada a la superficie del terreno.
- *Superficie del terreno*: Almacena en sus depresiones parte del agua que cae sobre ella, impidiendo que escurra.

¹² Bennett, T.H. and Peters, J.C., 2000, "Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)", Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Water Resources 2000, Rollin H. Hotchkiss, Michael Glade - Editors, July 30 – August 2, Minneapolis, Minnesota, USA.

- *Capa superior de suelo:* Es la zona de raíces, donde puede haber extracción de agua por evapotranspiración. Consta, a su vez, de dos zonas; la denominada Zona Superior es la de agua libre, que también puede perderse por percolación, mientras que la Zona Capilar es la de agua capilar, que sólo puede extraerse por evapotranspiración. Hay infiltración de agua hacia esta capa desde la superficie del terreno, si es que esta capa no se encuentra saturada y si no se trata de una superficie impermeable.
- *Capas subterránea superior y subterránea inferior:* Se trata de las zonas de interflujo (ó flujo hipodérmico), el cual se desplaza relativamente rápido en relación al flujo de aguas subterráneas, y que produce un flujo de base a la salida de la subcuenca. Puede haber percolación desde la capa superior hacia la inferior.

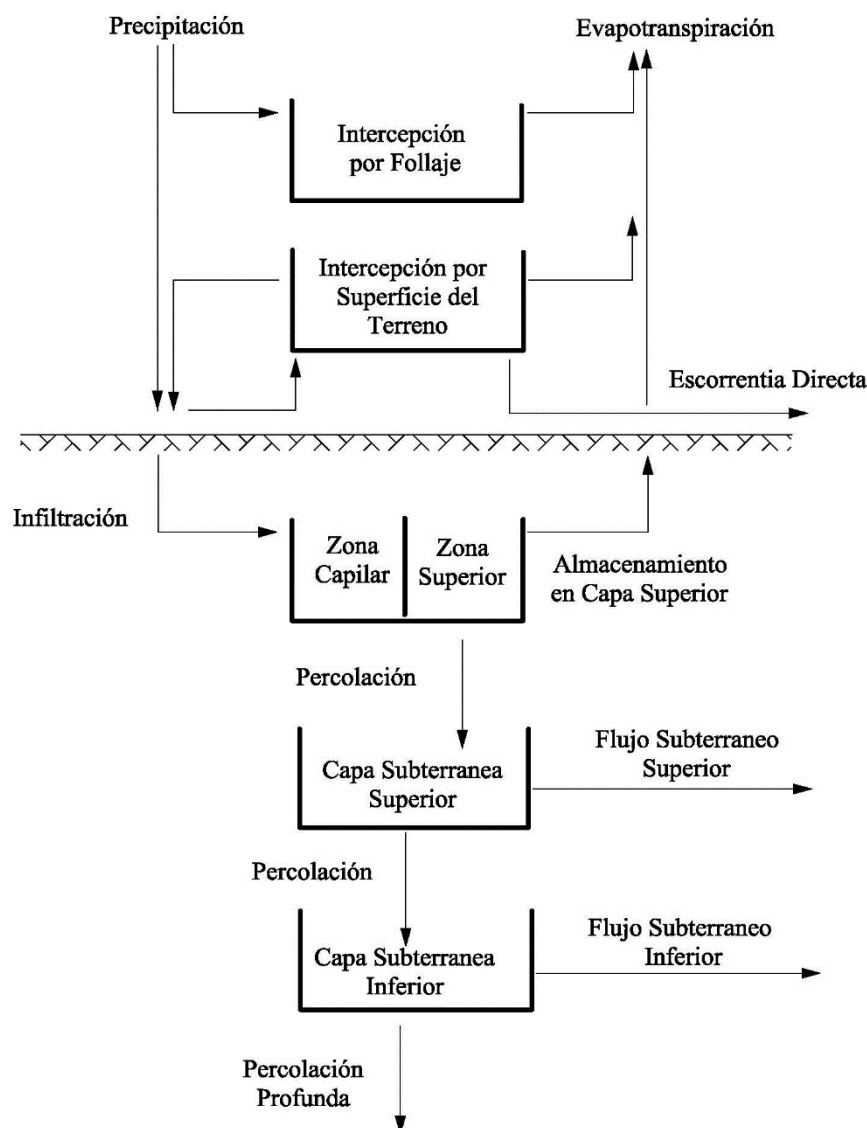


Figura 3.3.3. Esquema conceptual del SMA

Los siguientes son los datos necesarios para poder efectuar el balance vertical:

- *Almacenamientos iniciales*: Estos son los valores al principio del ciclo. En una simulación continua sólo influyen durante un transitorio, cuya duración es necesario estimar.
- *Almacenamientos máximos*: Son las capacidades máximas de cada compartimiento.
- *Infiltración/Percolaciones máximas*: Se trata de las máximas velocidades de flujo hacia cada uno de los tres compartimientos de suelo.
- *Tiempo de retardo subterráneo*: Representa la constante de tiempo con que se parametriza el interflujo, que constituye una medida del tiempo en el que el agua alcanza la salida de la subcuenca.
- *Impermeabilidad*: Indica la fracción de superficie en la que no se produce infiltración.

A continuación se presentan valores indicativos de estos parámetros.

3.4 Parámetros de la modelación hidrológica

3.4.1 Almacenamiento máximo

El almacenamiento máximo en follaje, h_f , depende del tipo de vegetación. En la Tabla 3.4.1 se presentan valores indicativos.

Tabla 3.4.1. Almacenamiento máximo en follaje por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Intercepción [mm]
Bosque	9
Matorral	4
Herbazal	3
Urbano y baldío	0
Desnudo	0
Plantación forestal	9
Parques urbanos	3
Cultivos agrícolas	1

El almacenamiento máximo en depresiones, h_d , depende del tipo de superficie del suelo (pavimentada o no), tal como se muestra en la Tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2. Almacenamiento máximo en depresiones por tipo y pendiente.

Descripción	Pendiente (%)	Almacenamiento (mm)
Zonas Pavimentadas		3,2 – 6,4
Pendientes fuertes	>30%	1,0
Pendientes suaves	10 - 30%	12,7 – 6,4
Zonas llanas	0 - 5%	50,8

El espesor de la Capa Superior de suelo es del orden de 0,50 m, valor típico del horizonte radicular. Ahora bien, el almacenamiento máximo en la Zona Superior de esa capa depende de la porosidad del medio. En la Tabla 3.4.3 se indican valores típicos por tipo de suelo. Con respecto al almacenamiento máximo en la Zona Capilar de la Capa Superior de suelo, este puede estimarse a partir de la regla de reconocimiento mostrada en la Tabla 3.4.4, que indica el rango de valores esperado en función de la frecuencia de aparición de escorrentía.

Tabla 3.4.3. Porosidad para distintos tipos de suelos.

Clase de Suelo	Porosidad	Porosidad efectiva
Arena	0,437	0,417
Arena margosa	0,437	0,401
Marga arenosa	0,453	0,412
Marga	0,463	0,434
Marga limosa	0,501	0,486
Marga areno-arcillosa	0,398	0,330
Marga arcillosa	0,464	0,309
Marga limo-arcillosa	0,471	0,432
Arcilla arenosa	0,430	0,321
Arcilla limosa	0,479	0,423
Arcilla	0,475	0,388

Tabla 3.4.4. Almacenamiento máximo en la Zona Capilar, de acuerdo a la frecuencia observada de eventos de escorrentía.

Frecuencia de Escorrentía	Almacenamiento máximo en Zona Capilar (mm)
En todos los eventos	10,2 – 15,2
En eventos moderados	15,2 – 25,4
Solo en eventos largos	25,4 – 40,6
Nunca	> 40,6

3.4.2 Infiltración máxima y percolaciones

En la Tabla 3.4.5 se presentan valores representativos de infiltración por tipo de suelo.

Tabla 3.4.5 Infiltración máxima por tipo de suelo.

Grupo hidrológico de suelo	Infiltración Superficial (mm/hr)
A	> 7,6
B	3,8 – 7,6
C	1,3 – 3,8
D	0 – 1,27

La percolación máxima desde la Capa Superior de suelo a la Capa Subterránea puede considerarse del orden de la conductividad hidráulica. La Tabla 3.4.6 muestra rangos típicos de este último parámetro de acuerdo a las características de filtración observada.

Tabla 3.4.6. Conductividad hidráulica de acuerdo a las características de filtración.

Conductividad hidráulica [mm/h]	Características de filtración
< 0,8	Muy lenta
0,8 – 5	Lenta
5 – 20	Moderadamente lenta
20 – 60	Moderada
60 – 120	Moderadamente rápida
120 – 180	Rápida

3.4.3 Flujo de base

El transporte del flujo de base se efectúa mediante el método del reservorio lineal, que requiere la especificación del tiempo de retardo. Este tiempo surge de la observación.

3.4.4 Escorrentía superficial

Para el transporte de la escorrentía superficial se utiliza el método del hidrograma unitario del SCS¹³. Este requiere especificar el tiempo de retardo, Tlag, sugiriendo su estimación como el 60% del tiempo de concentración, Tc, de la cuenca. Este se calculó utilizando la fórmula de Kirpich, de donde surgieron los valores por cuenca mostrados en la Tabla 3.4.7.

Tabla 3.4.7. Escalas de tiempo de las cuencas.

#	Nombre	Tc (min)	Tlag (min)
1	Urugua-í	2.132	1.279
2	Piray Guazú	1.842	1.105
3	Yabotí	1.546	927
4	Yabebiry	1.329	797
5	Piray Mini	1.820	1.092
6	Paranay Guazú	995	597
7	Guaramboca (Soberbio)	1.295	777
8	El Saltito	1.001	600
9	Aguaray Guazú	978	587
10	Acaraguá	1.069	641

¹³ Ven Te Chow, 1994, "Hidrología Aplicada", Maidment Mays

#	Nombre	Tc (min)	Tlag (min)
11	Garupá	859	516
12	Alegre	1.013	608
13	La liana	982	589
14	Pindapoy Grande	767	460
15	Garuhape	679	407
16	Cuíapiru	626	376
17	Itacaruaré chico	670	402
18	Pindaiti	747	448
19	Tunas	701	421
20	Once vueltas	577	346
21	Ramón	649	389
22	Tabay	422	253
23	Chafariz	743	446
24	Persiguero	613	368
25	Nacan Guazú	440	264
26	Deseado	575	345
27	Itacuruzu	424	254
28	Yacuy	417	250
29	Tapicua	311	187
30	San Francisco	473	284
31	Santa María	398	239
32	Central	447	268
33	Toro	340	204
34	Zaimán	497	298
35	Guerrero	410	246
36	San Juan	353	212
37	Yasu Argentino	311	186
38	Concepción	343	206
39	Tararira	414	248
40	Chico Alferez	338	203
41	Dorado	283	170
42	Capioví	268	161
43	3 de Mayo	245	147
44	Aguaray Miní	246	148
45	Santo Domingo	363	218

3.4.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial calculada con la fórmula de Penman-Monteith corresponde al valor de referencia, ETo. Para tener en cuenta la cobertura es necesario multiplicar ETo por el coeficiente de cultivo, Kc, que depende del uso del suelo¹⁴. Este coeficiente tiene un

¹⁴ Allen, R.G., Smith, M., Pruitt, W.O., Pereira, L.S., 1996. Modification of the FAO crop coefficient approach, In:

valor máximo, uno mínimo, y una variación temporal de tipo estacional, dependiendo del tipo de cultivo. En la Tabla 3.4.8 se presentan valores medios mensuales de Kc por cultivo típico de la Provincia. Se considera que 'forestación' también representa a los bosques naturales.

Se calculó la serie temporal de Kc efectivo por cuenca ponderando los valores de Kc por cultivo dominante con las series temporales de áreas implantadas de cada uno (de acuerdo a lo descrito en la sección 2.3.1), considerando que el remanente de área no implantada corresponde a bosque natural o forestación. A título ilustrativo, en la Figura 3.4.1 se muestra la serie resultante para la cuenca del Piray Guazú. Se observa que Kc oscila aproximadamente entre 0,795 y 0,810, es decir, muy cerca del valor asignado a forestación, lo cual se debe a que el área de cultivos sólo representa del orden del 5% del área de la cuenca. Siendo así, resulta posible tomar directamente un valor contante de Kc a lo largo del año.

Tabla 3.4.8. Coeficiente de cultivo por mes

Mes	Yerba/Te	Maíz	Forestación/tung	Soja
Julio	0,95	0,00	0,80	1,10
Agosto	0,95	0,00	0,80	1,10
Setiembre	0,98	1,05	0,80	0,30
Octubre	1,00	1,05	0,80	0,30
Noviembre	1,00	1,15	0,80	0,30
Diciembre	1,00	1,15	0,80	0,30
Enero	1,00	1,15	0,80	0,30
Febrero	1,00	1,15	0,80	0,30
Marzo	0,98	1,05	0,80	0,30
Abril	0,95	0,00	0,80	0,30
Mayo	0,95	0,00	0,80	0,30
Junio	0,95	0,00	0,80	1,10

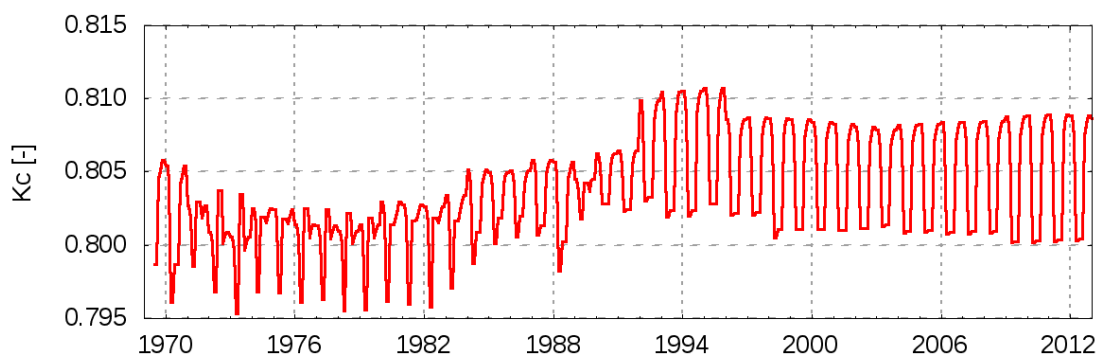


Figura 3.4.1. Serie histórica de Kc para la cuenca Piray Guazú.

Camp, C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.), Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the International Conference, November 3–6, San Antonio, TX, pp. 124–132. NRCS (Natural Resource Conservation Service), 1999, "Urban Hydrology for Small Watersheds", Engineering Division, Department of Agriculture, USA, Technical Release–55.

3.5 Calibración

3.5.1 Criterios

Se llevó adelante la calibración del modelo hidrológico en las cuencas Piray Mini, Piray Guazú, Paranay y Yabebiry, que son las que poseen series extensas de registros de niveles y aforos en los arroyos. Estas se identifican en la Figura 3.5.1, donde también se muestran las estaciones pluviométricas utilizadas.

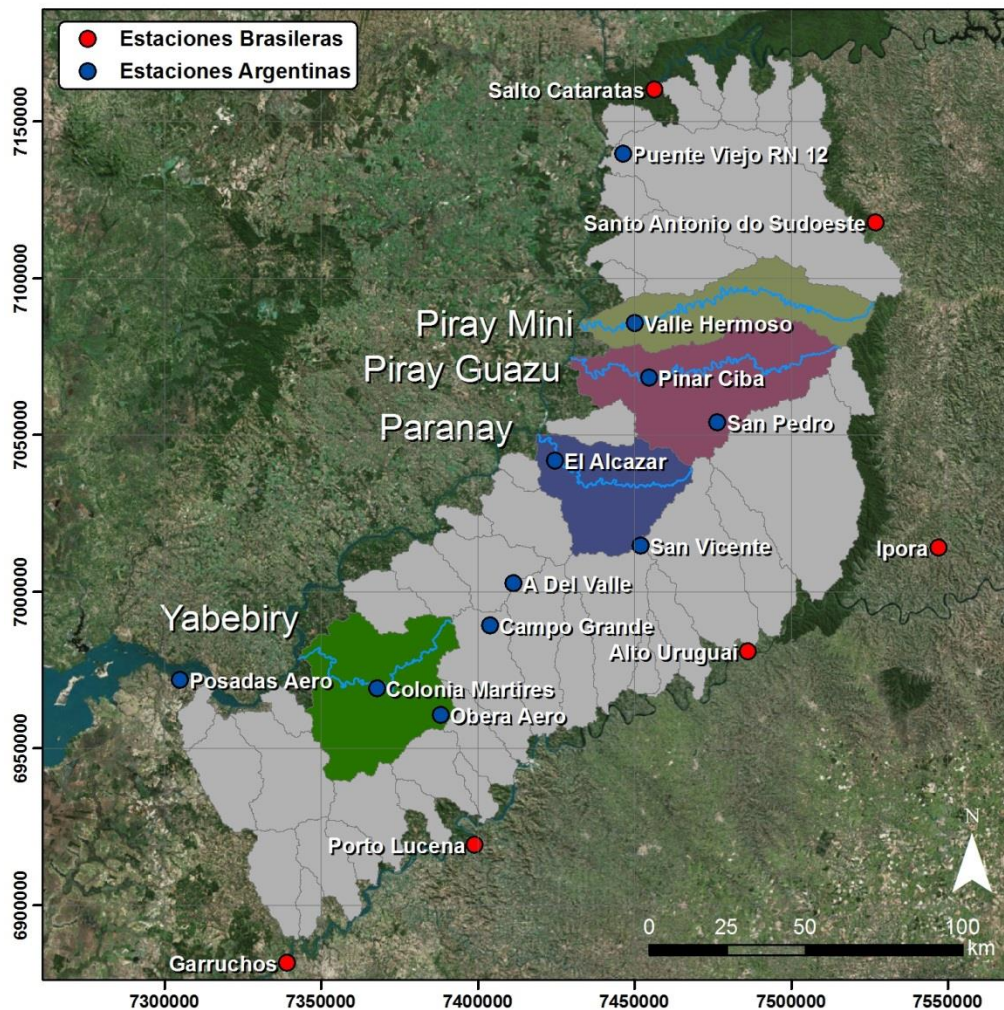


Figura 3.5.1. Cuencas de calibración y estaciones pluviométricas utilizadas.

Se contó con aproximadamente 50 años de mediciones de caudal, desde 1965 hasta 2013. Para la calibración se trabajó con los últimos 20 años (1993-2013), ya que es una ventana de tiempo relativamente extensa y actual, sobre la cual tanto los datos de precipitación como los de caudal están completos.

Los valores de los parámetros de calibración adoptados se muestran en la Tabla 3.5.1. El almacenamiento en follaje surgió como promedio pesado (con el área ocupada) del uso de suelo, utilizando un valor de 10 mm para bosque y 1 mm para cultivo. Los tiempos de retardo se establecieron como proporcionales al tiempo de concentración de la cuenca, utilizándose factores de $1,5^{-1}$ para el Reservorio Subterráneo Superior, de 1 para el Reservorio Subterráneo Inferior y de 1,2 para la cuenca. El resto de los parámetros se ajustaron simultáneamente en las 4 cuencas, de modo de obtener el mejor acuerdo posible.

Tabla 3.5.1. Valores de los parámetros de calibración para las distintas cuencas

Parámetro	Piray Miní	Piray Guazú	Paranay Guazú	Yabebiry
Almacenamiento en follaje (mm)	9,5	9,6	9,4	8,6
Almacenamiento en depresiones (mm)	0	0	0	0
Almacenamiento en Zona Superior (mm)	1.000	1.000	1.000	1.000
Almacenamiento en Zona Capilar (mm)	0	0	0	0
Almacenamiento Subterráneo Superior (mm)	2	2	2	2
Almacenamiento Subterráneo Inferior (mm)	1	1	1	1
Máxima infiltración (mm/h)	1	1	1	1
Percolación suelo (mm/h)	0,8	0,8	0,8	0,8
Percolación subterránea (mm/h)	0,8	0,8	0,8	0,8
Percolación subterránea profunda (mm/h)	0,6	0,6	0,6	0,6
Tiempo de retardo del reservorio subterráneo superior (hr)	18	16	9	10
Tiempo de retardo del reservorio subterráneo inferior (hr)	27	25	14	15
Tiempo de retardo de la subcuenca (min)	1.977	1.770	992	1.068

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada una de las cuencas 4 cuencas utilizadas para la calibración.

3.5.2 Cuenca Piray Miní

La cuenca del río Piray Miní recorre la Provincia de este a oeste hasta desembocar en el río Paraná (Figura 3.5.2). El área de aporte en la estación de medición es de 1.216 km^2 , que representa el 83% de la superficie de la cuenca, de 1.459 km^2 . La longitud total del cauce es de 174 km. Como estaciones pluviométricas dentro de la cuenca la única existente es la coincidente con la estación de aforos Valle Hermoso, pero tiene en zonas cercanas a la estación Pinar Ciba (río Piray Guazú) y, un poco más alejada, la estación San Pedro (Yabotí).

La Figura 3.5.3 muestra la comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo. Se observa un acuerdo general satisfactorio. El modelo representa algunos picos de caudal no registrados. Esta diferencia podría deberse a fallas en la representatividad de las series temporales de precipitación utilizada, o a carencias de los registros.

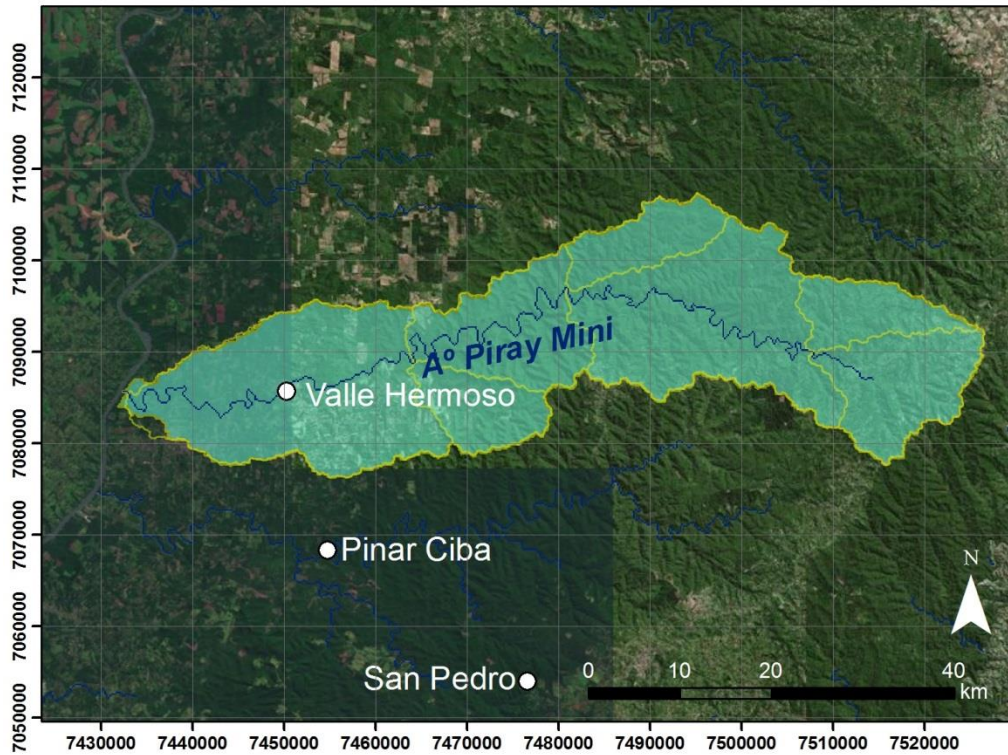
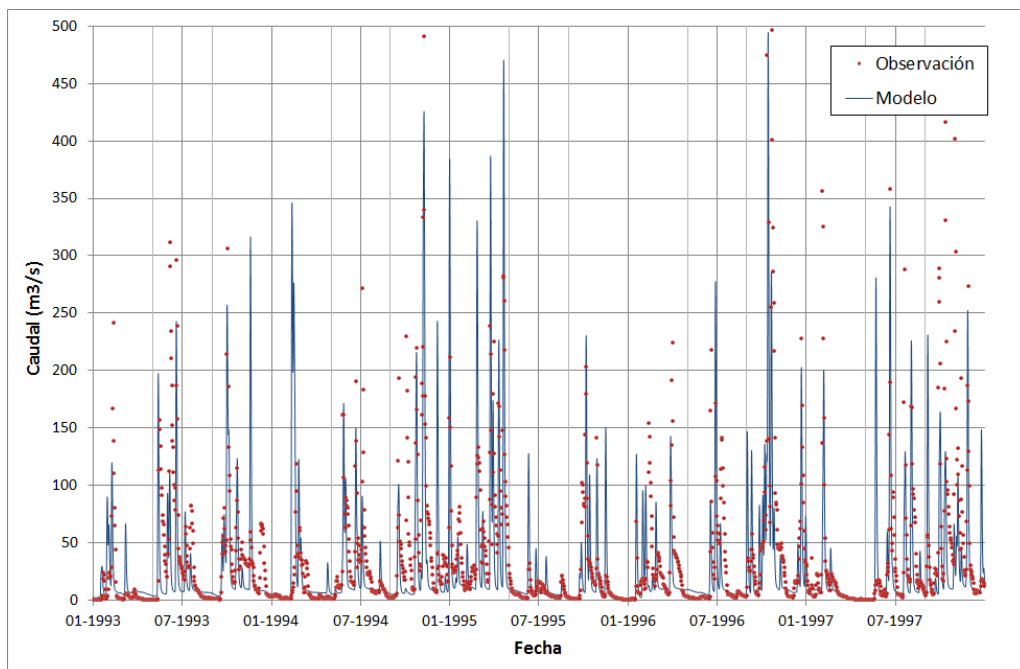
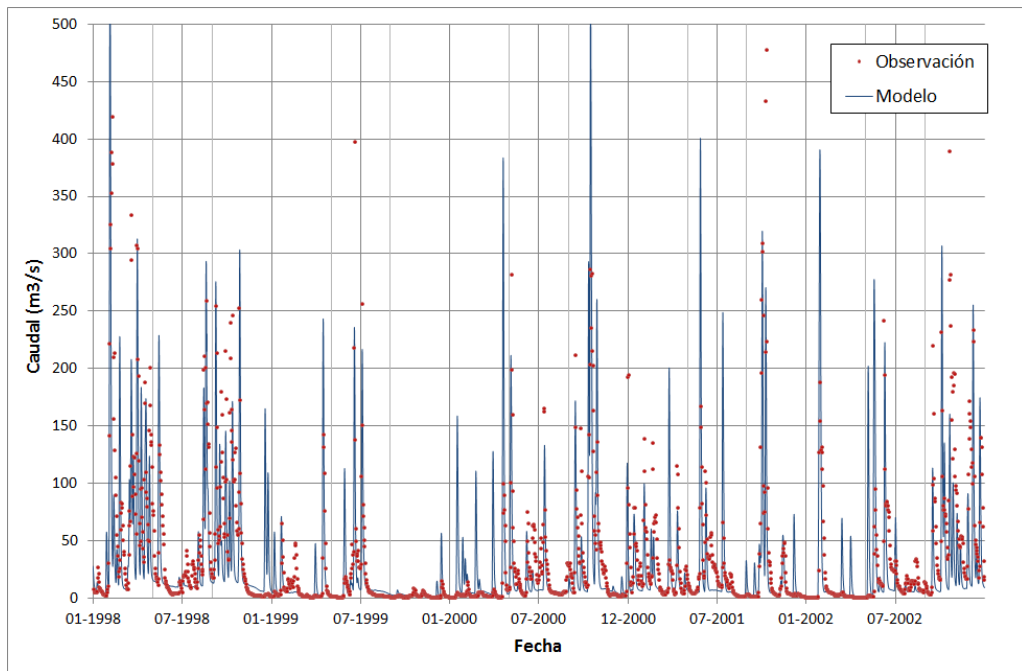


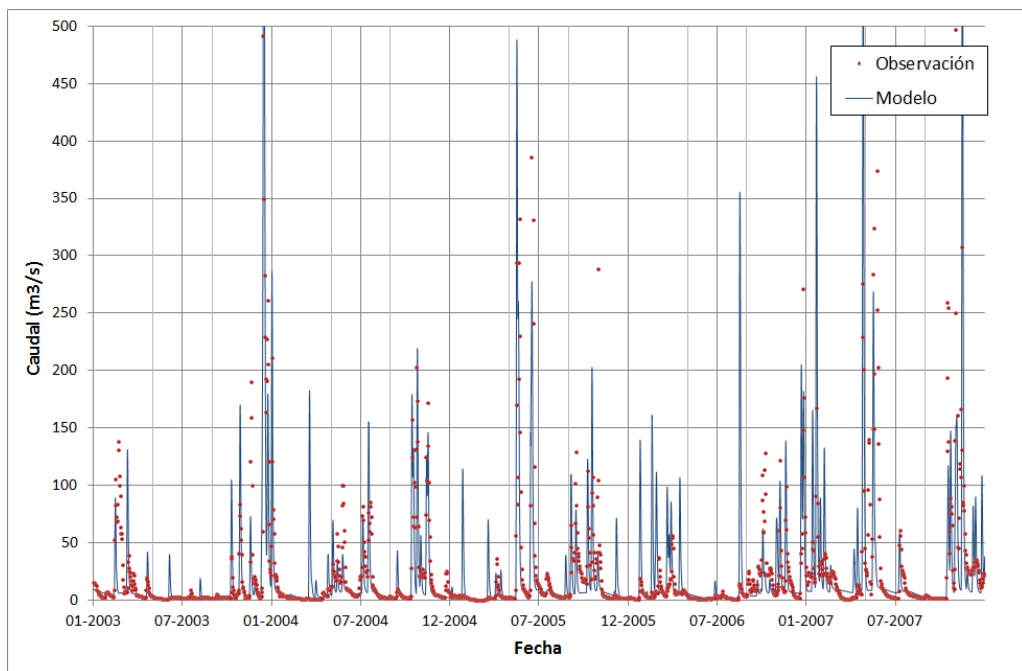
Figura 3.5.2. Cuenca Piray Mini



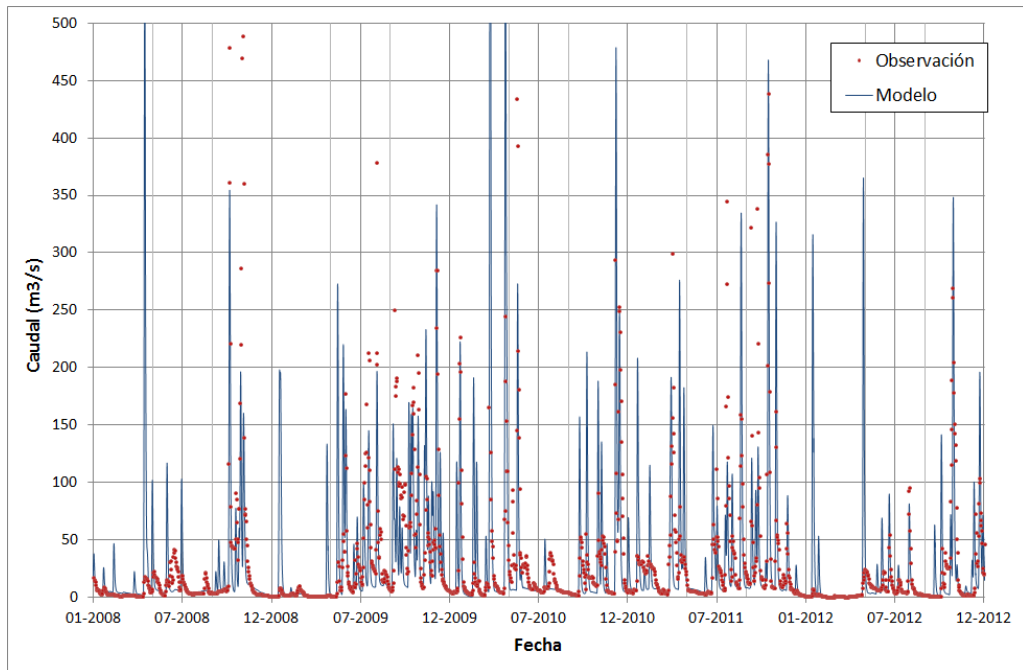
a) 1993-1998



b) 1998-2003



c) 2003-2008



d) 2008-2013

Figura 3.5.3. Comparación entre serie de caudales observada y calculada con el modelo para la cuenca del Piray Miní.

En la Figura 3.5.4 se presentan la curva de excedencia de caudales provista por el modelo y se la compara con la que surge de las mediciones. Se observa una buena coincidencia para el rango de caudales más frecuentes (con una leve sobrestimación de parte del modelo), que son los significativos para definir el potencial hidroeléctrico. Por debajo del 50% de excedencia el modelo tiende a subestimar. En la Tabla 3.5.2 se indican los valores de caudal correspondientes a las excedencias mayores.

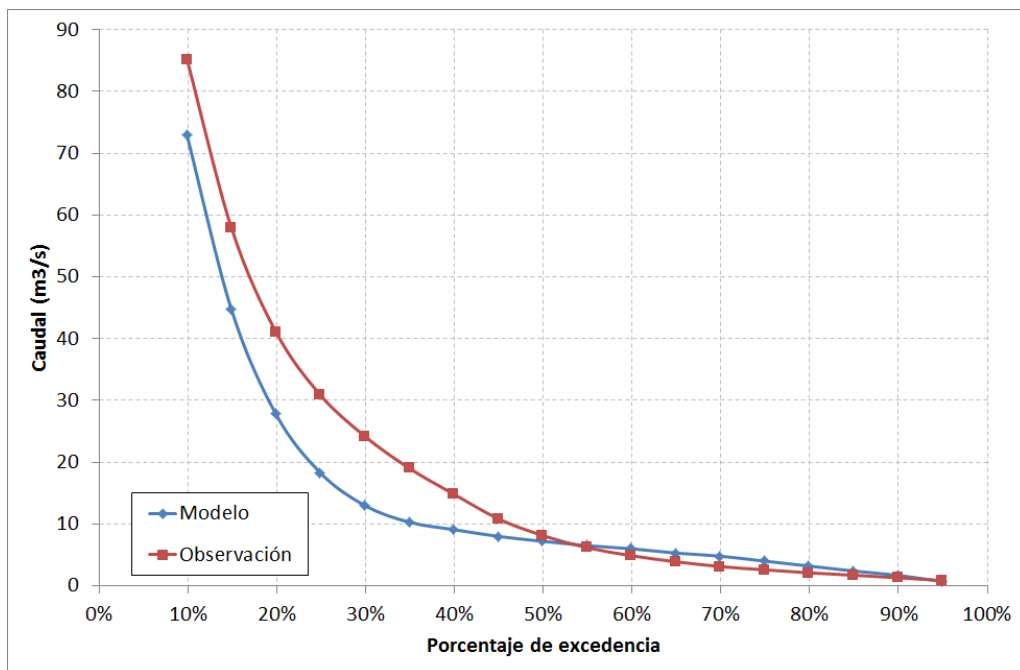


Figura 3.5.4. Porcentaje de excedencia de caudales para la cuenca del Piray Miní.

Tabla 3.5.2. Caudales correspondientes a distintas excedencias para la cuenca del Piray Miní.

Excedencia	Caudal (m ³ /s)	
	Modelo	Registros
90%	1,7	1,3
80%	3,2	2,1
70%	4,8	3,1
60%	6,0	4,9
50%	7,2	8,1

3.5.3 Cuenca Piray Guazú

La cuenca del río Piray Guazú recorre la Provincia de este a oeste hasta desembocar en el río Paraná (Figura 3.5.5). El área de aporte en la estación de medición es de 1.400 km², que representa el 65% de la superficie de la cuenca, de 2.135 km². La longitud total del cauce es de 174 km. Como estaciones pluviométricas, dentro de la cuenca existe la coincidente con la estación de aforos Pinar Ciba, y la de San Pedro (río Yabotí), afluente del Piray Guazú. Fuera de la cuenca se encuentra la estación Valle Hermoso, dentro de la cuenca del río Piray Miní.

La comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo se muestran en la Figura 3.5.6. Nuevamente, el acuerdo general se considera satisfactorio, con el modelo representando picos adicionales de caudal.

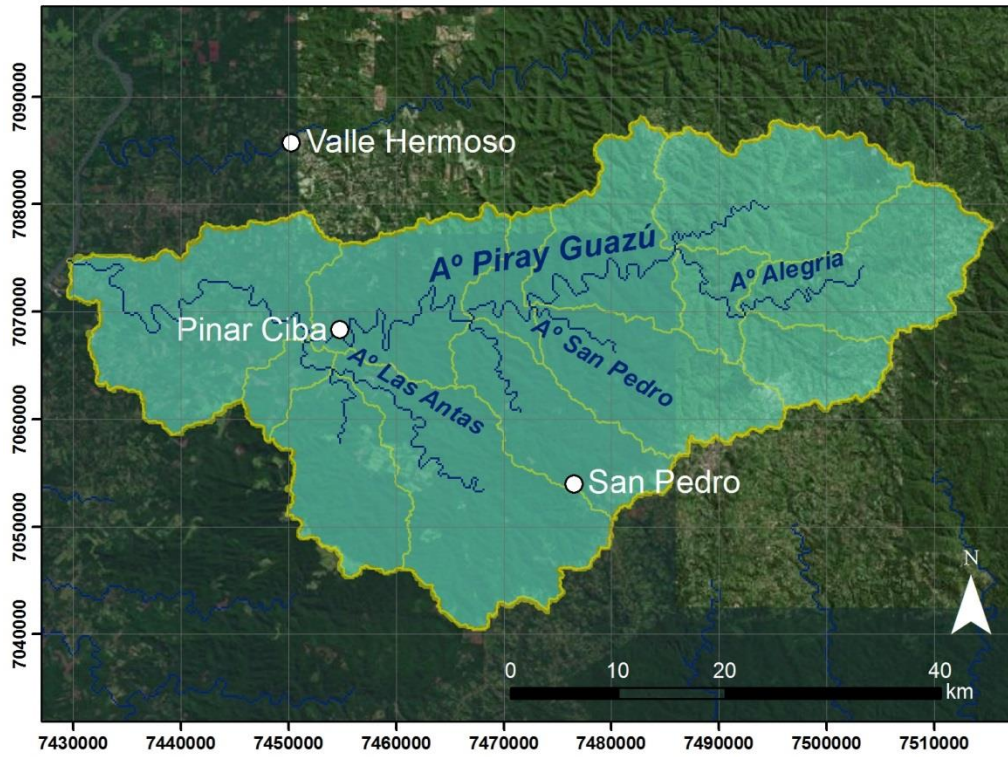
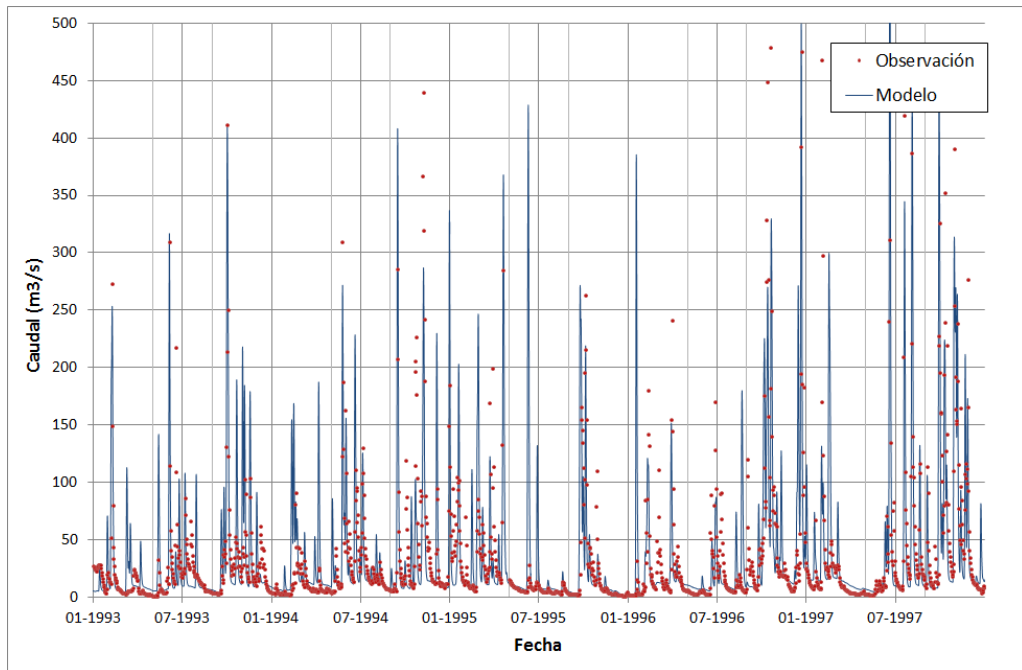
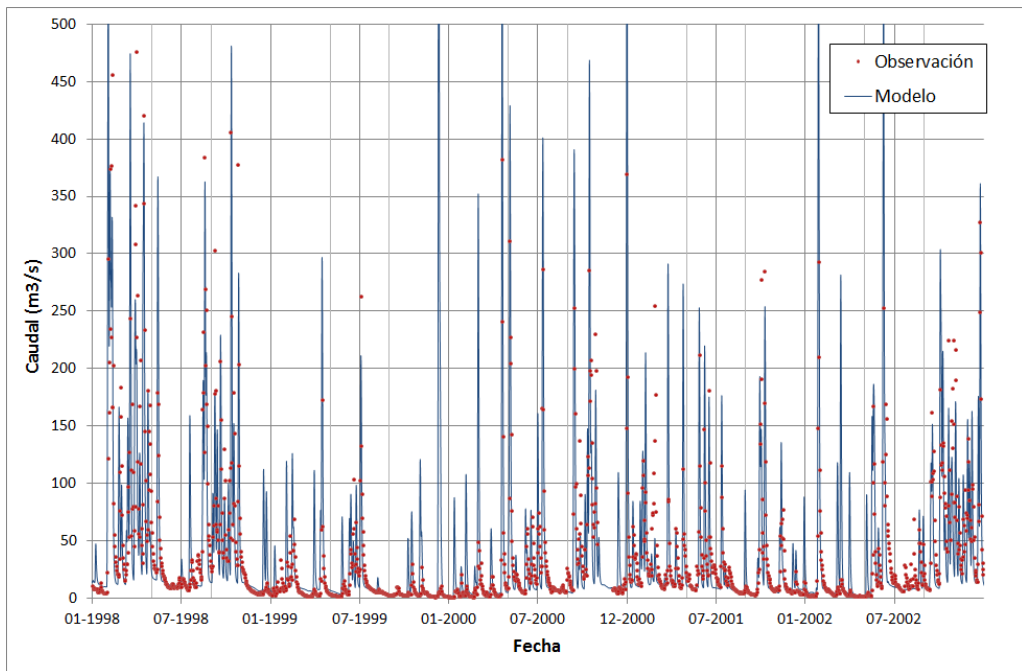


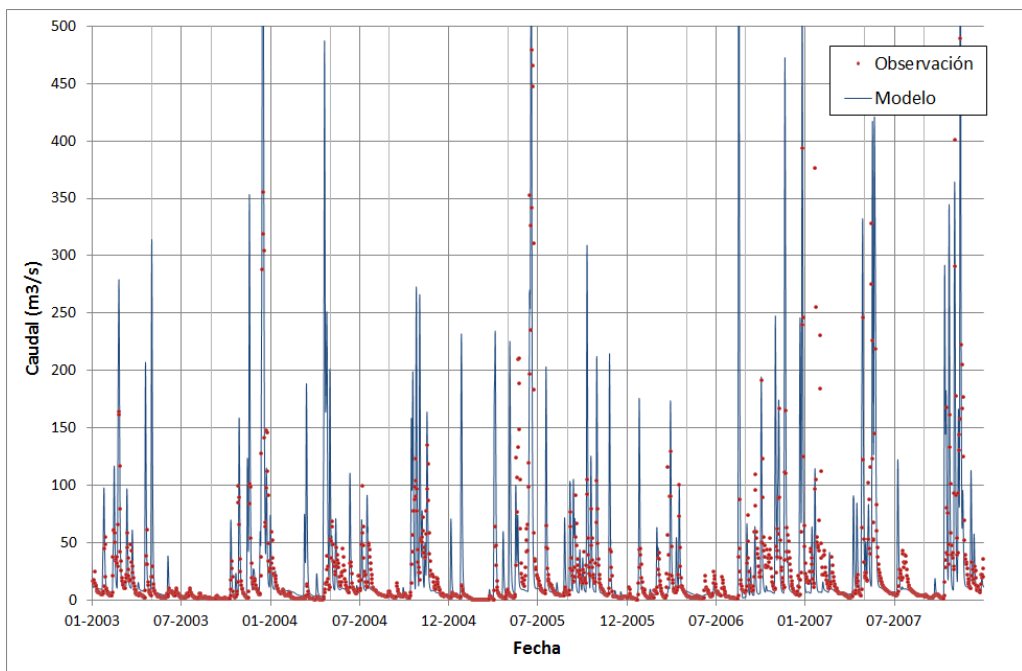
Figura 3.5.5. Cuenca Piray Guazú



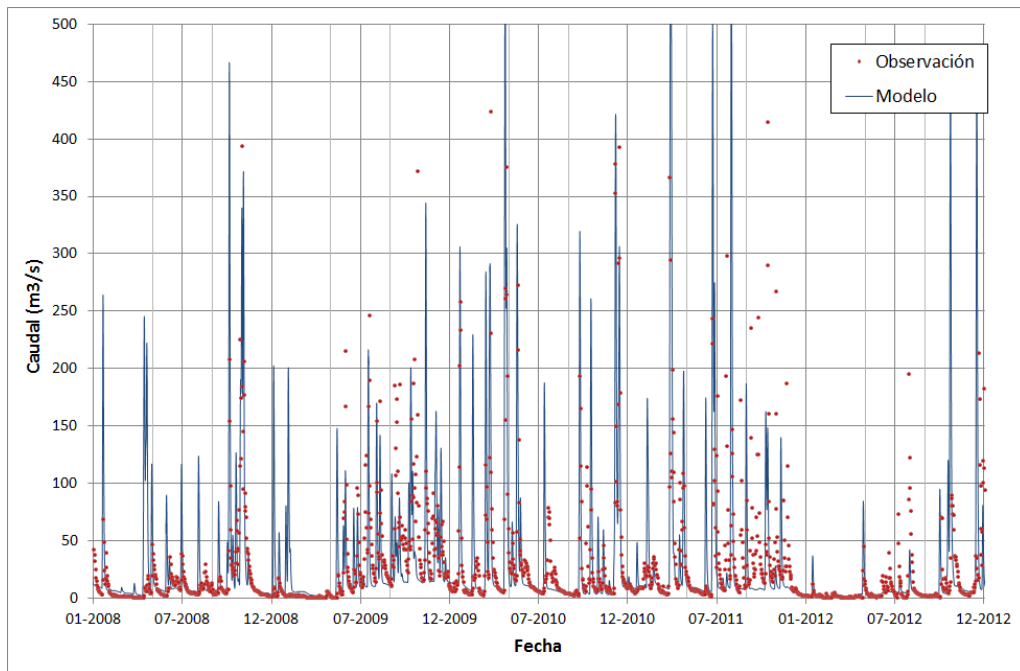
a) 1993-1998



b) 1998-2003



c) 2003-2008



d) 2008-2013

Figura 3.5.6. Comparación entre serie de caudales observada y calculada con el modelo para la cuenca del Piray Guazú

Las curvas de excedencia de caudales se presentan en la Figura 3.5.7. Nuevamente, se observa una buena coincidencia para el rango de caudales más frecuentes. La Tabla 3.5.3 muestra los valores de caudal correspondientes a las excedencias mayores.

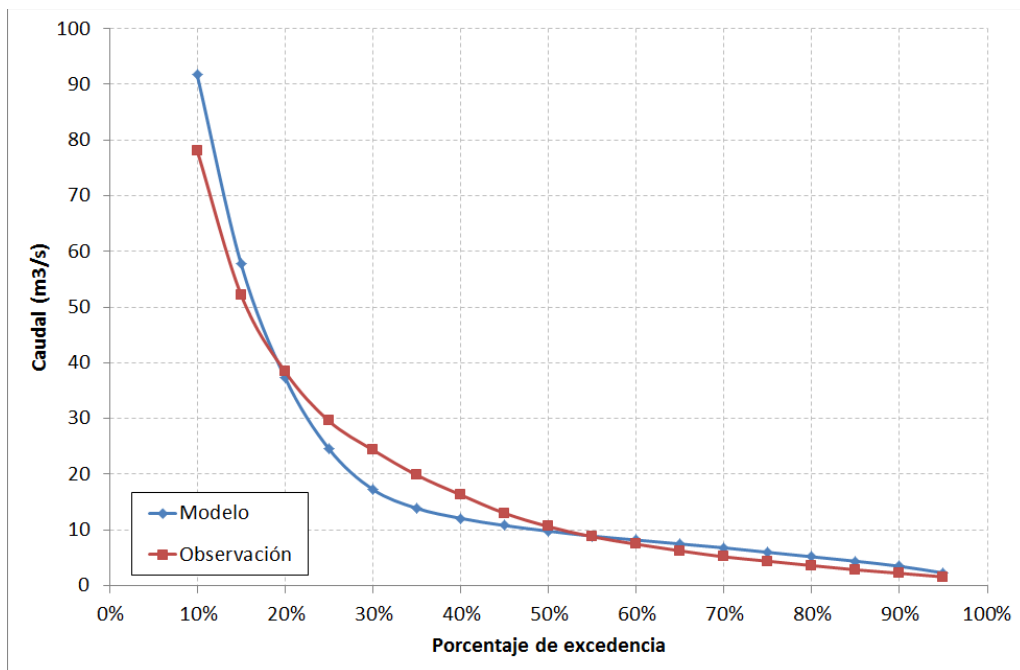


Figura 3.5.7. Porcentaje de excedencia de caudales para la cuenca del Piray Guazú.

Tabla 3.5.3. Caudales correspondientes a distintas excedencias para la cuenca del Piray Guazú.

Excedencia	Caudal (m ³ /s)	
	Modelo	Registros
90%	3,5	2,2
80%	5,2	3,6
70%	6,8	5,2
60%	8,2	7,5
50%	9,8	10,6

3.5.4 Cuenca Paranay Guazú

La cuenca del río Paranay Guazú recorre la Provincia de este a oeste hasta desembocar en el río Paraná (Figura 3.5.8). El área de aporte en la estación de medición es de 896 km², que representa el 70% de la superficie de la cuenca, de 1.311 km². La longitud total del cauce es de 94 km. Como estaciones pluviométricas dentro de la cuenca se tienen a El Alcazar, coincidente con la estación de aforos del río, y San Vicente, en la parte alta de la cuenca. Al Noreste de la cuenca, relativamente cercana, se encuentran la estaciones San Pedro (río Yabotí), y Arroyo del Valle (río Torto).

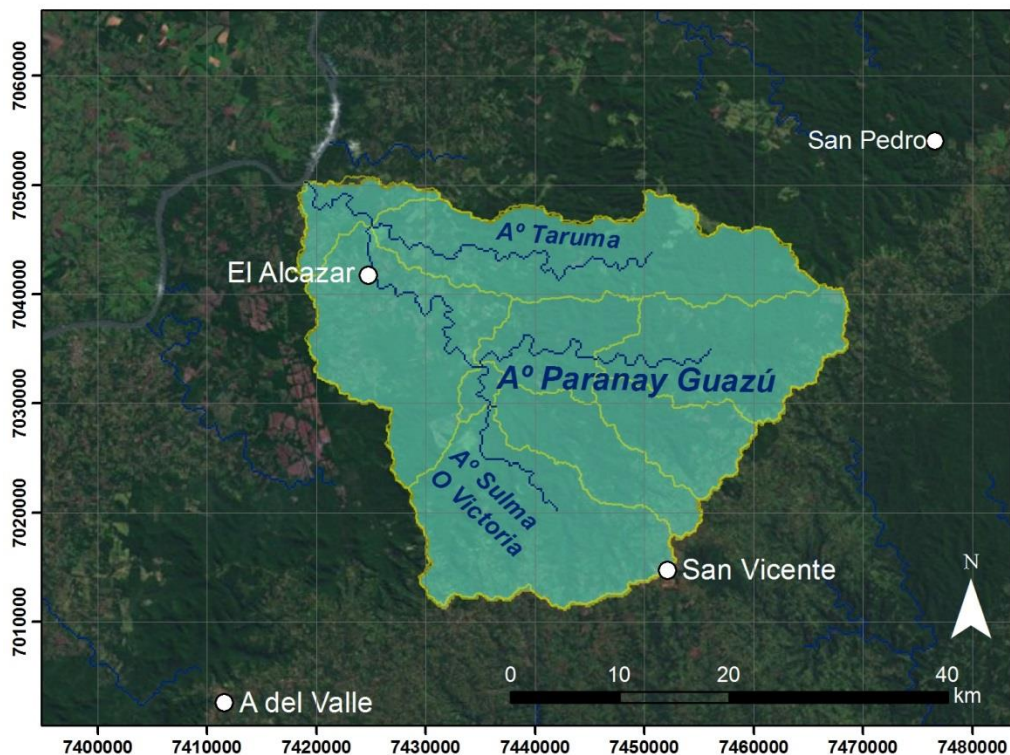
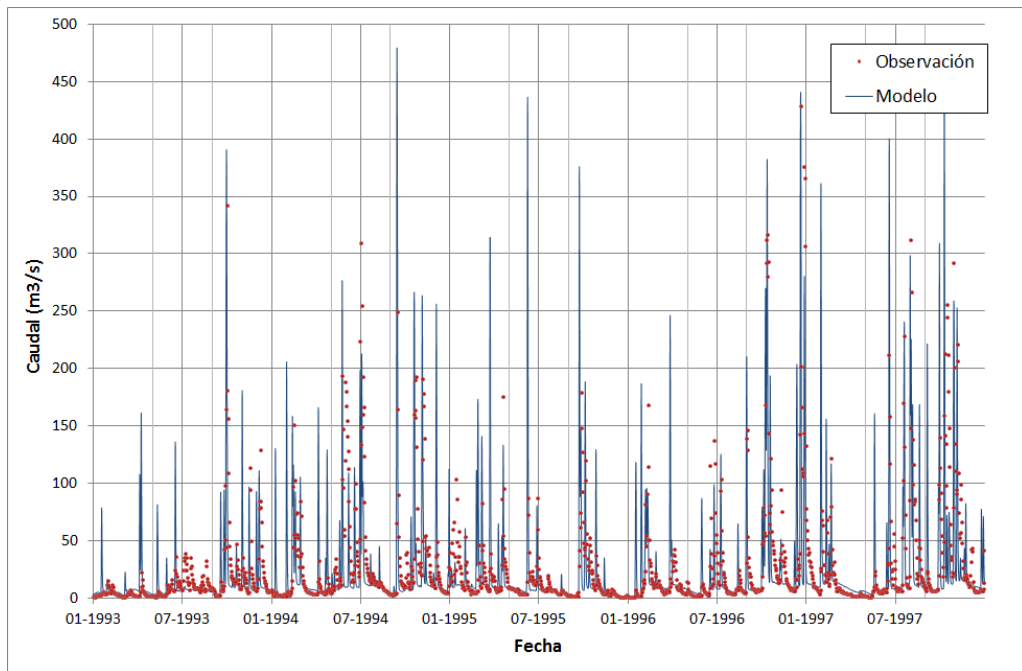
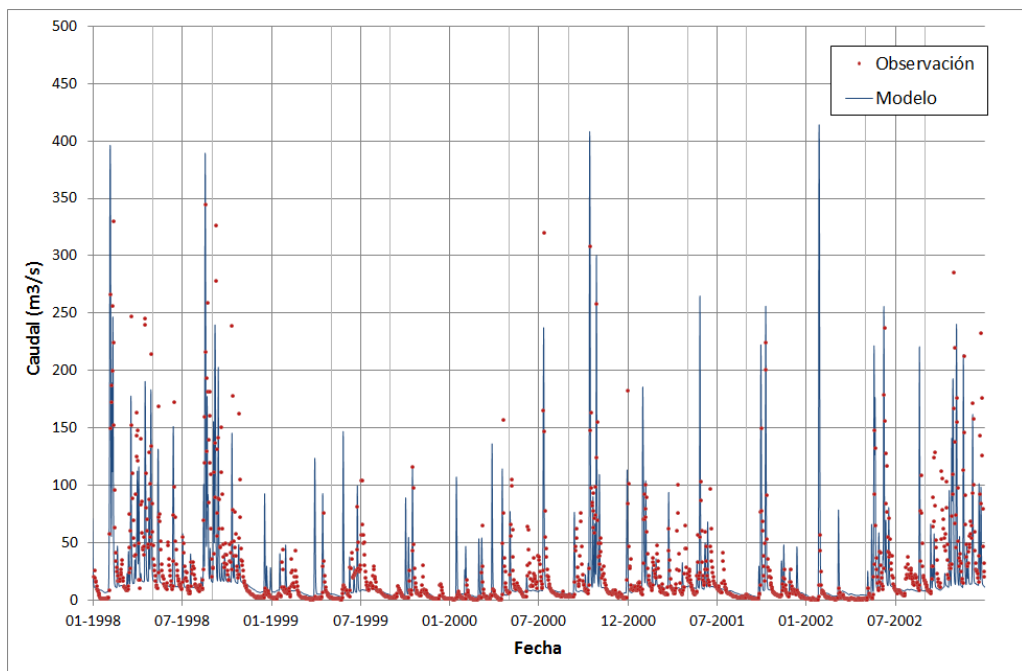


Figura 3.5.8. Cuenca Paranay Guazú

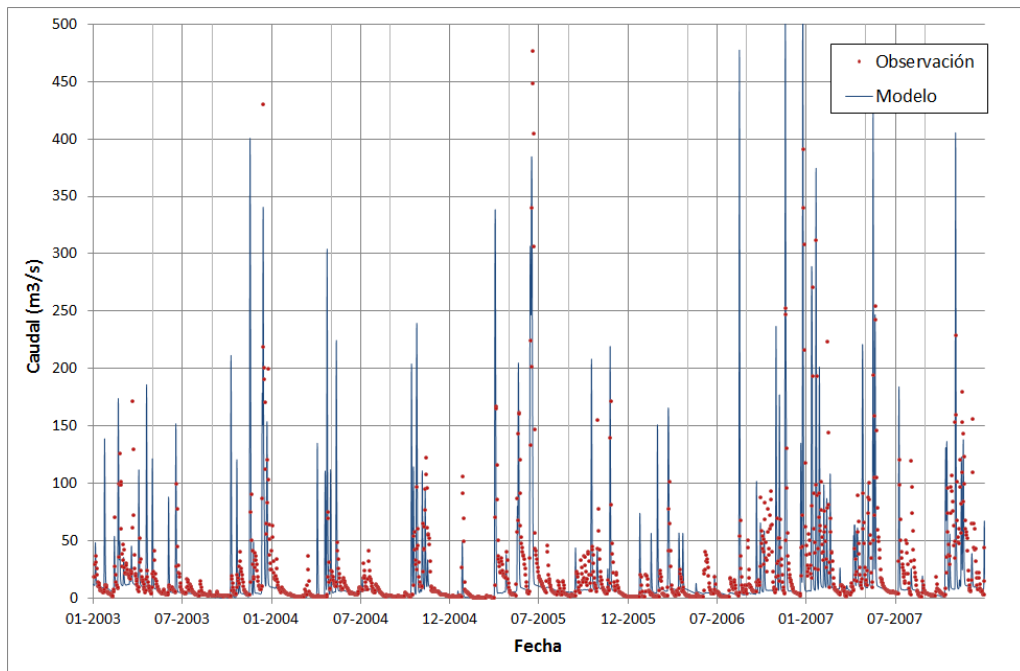
La Figura 3.5.9 presenta la comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo. Se repite el patrón de acuerdo general satisfactorio y representación de picos adicionales de caudal por parte del modelo.



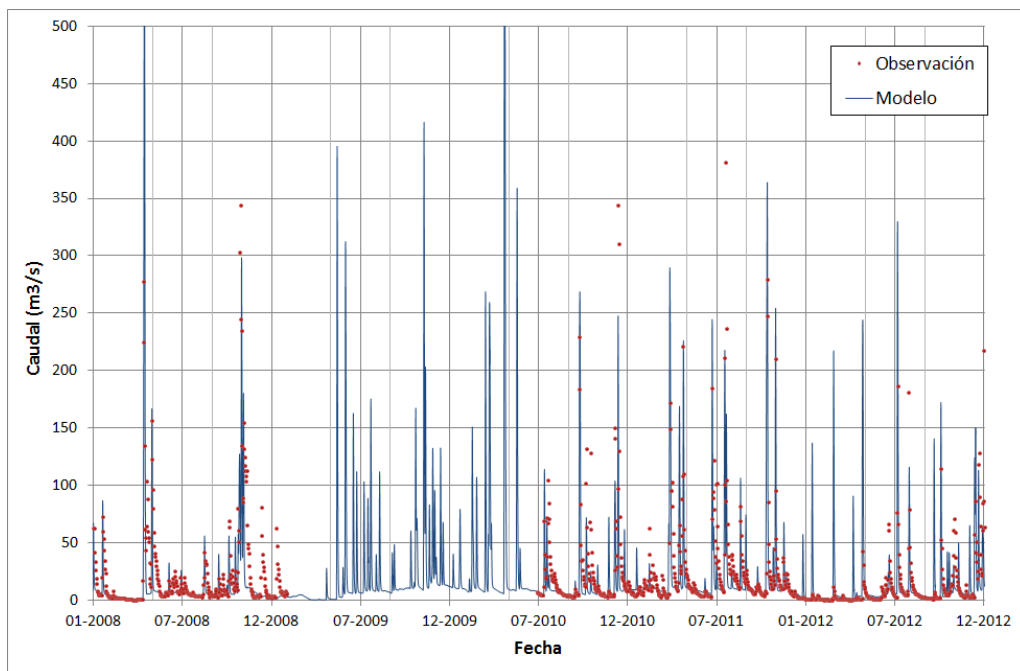
a) 1993-1998



b) 1998-2003



c) 2003-2008



d) 2008-2013

Figura 3.5.9. Comparación entre serie de caudales observada y calculada con el modelo para la cuenca del Paranay Guazú.

En la Figura 3.5.10 se presentan las curvas de excedencia de caudales, que nuevamente indican una buena coincidencia para el rango de caudales más frecuentes. Los valores de caudal correspondientes a las excedencias mayores se muestran en la Tabla 3.5.4.

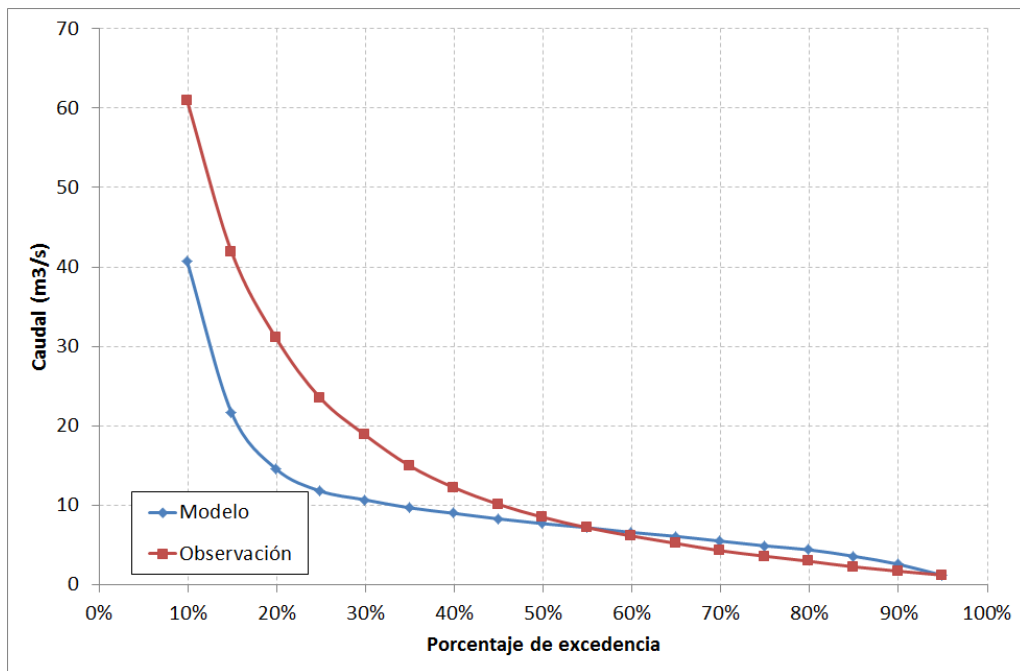


Figura 3.5.10. Porcentaje de excedencia de caudales para la cuenca del Paranay Guazú.

Tabla 3.5.4. Caudales correspondientes a distintas excedencias para la cuenca del Paranay Guazú.

Excedencia	Caudal (m³/s)	
	Modelo	Registros
90%	2,6	1,7
80%	4,4	3,0
70%	5,5	4,3
60%	6,6	6,2
50%	7,7	8,5

3.5.5 Cuenca Yabebiry

La cuenca del río Yabebiry se encuentra en el sur de la Provincia de Misiones, y la recorre de este a oeste hasta desembocar en el río Paraná (Figura 3.5.11). El área de aporte en la estación de medición es de 653 km², que representa el 35% de la superficie de la cuenca, de 1.869 km². La longitud total del cauce es de 109 km. Como estaciones pluviométricas dentro de la cuenca se tienen a Colonia Mártires, coincidente con la estación de aforos del río, y Oberá Aero, en la parte alta de la cuenca. Al noreste de la cuenca, relativamente cercana, se encuentra Campo Grande (río Acaragua).

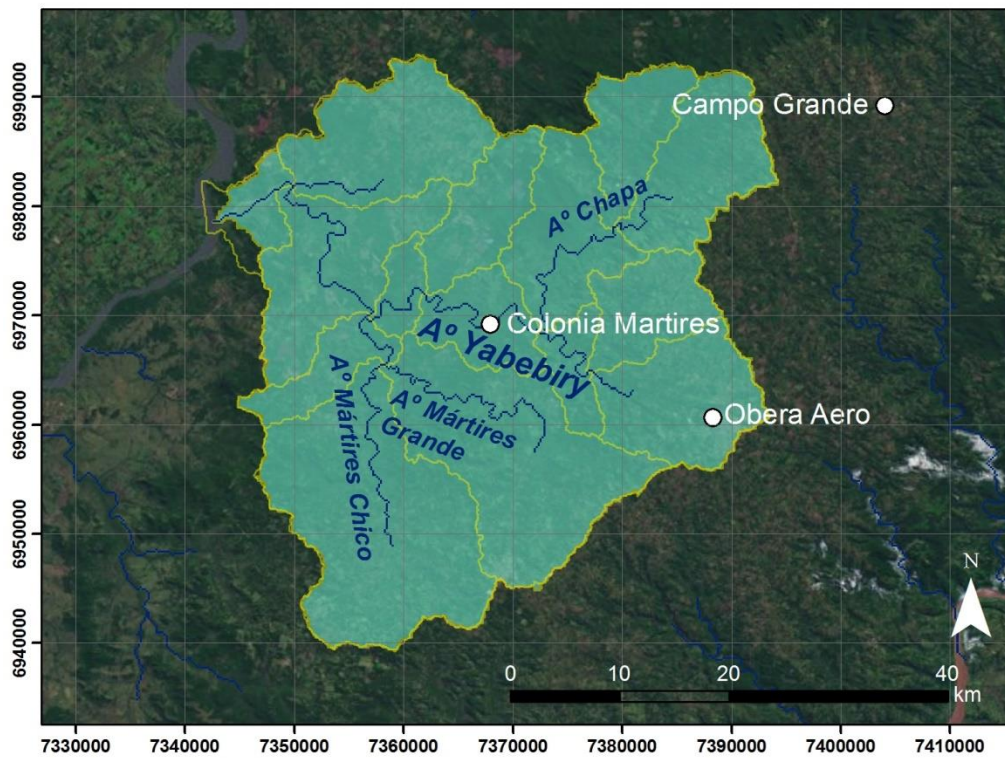
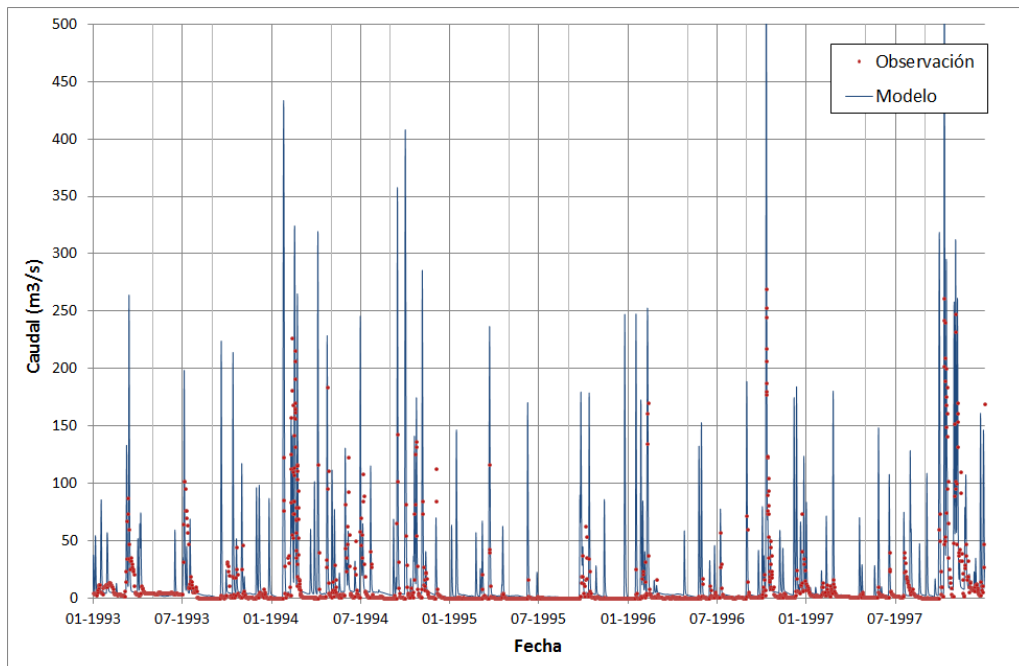
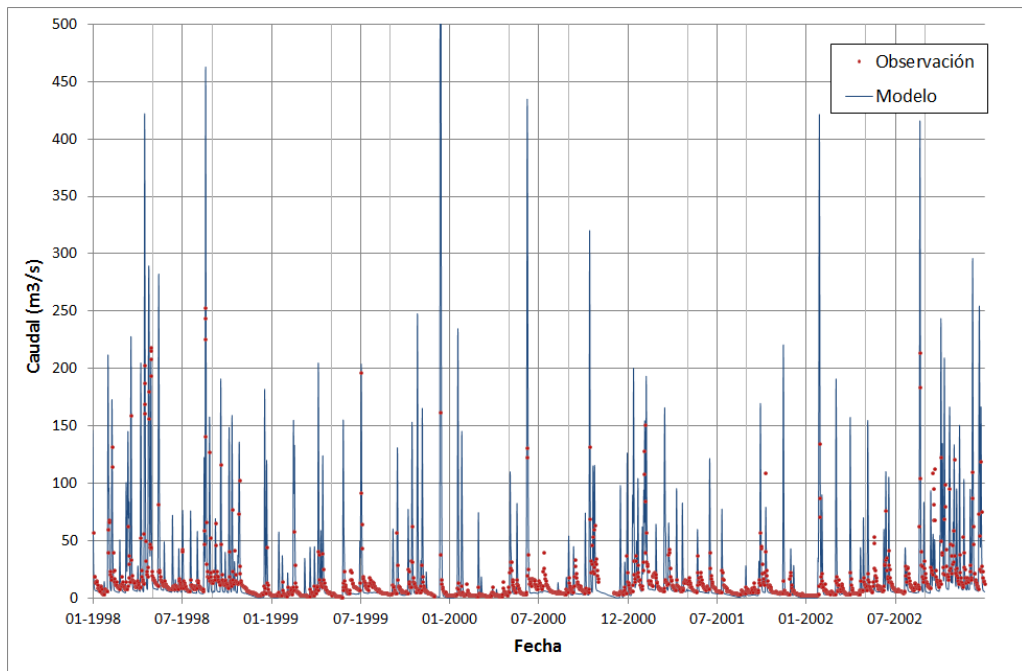


Figura 3.5.11. Cuenca Yabebiry

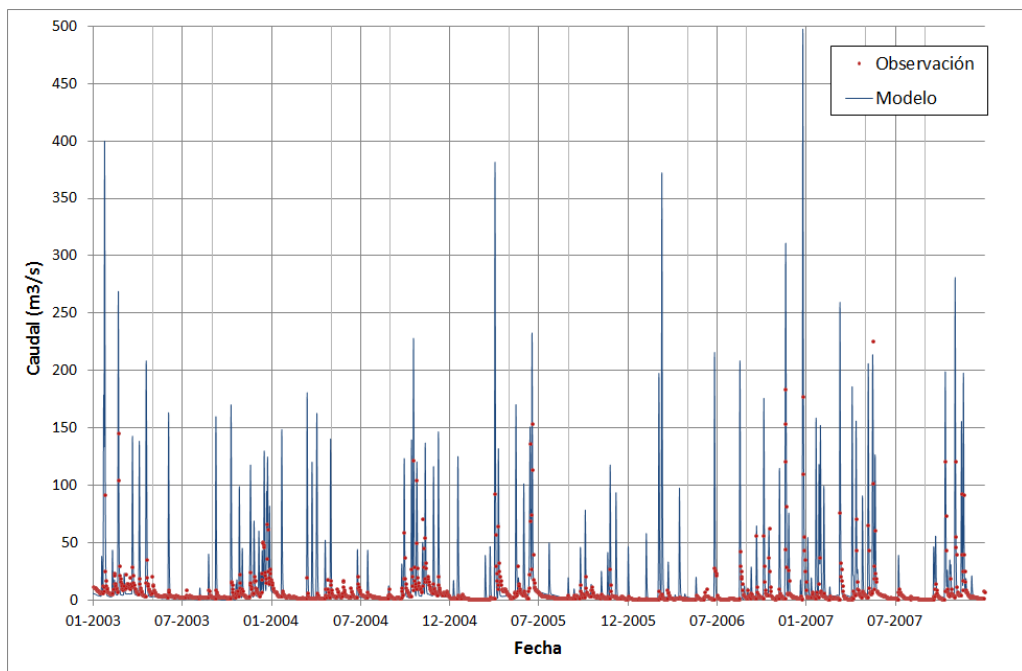
La comparación entre los caudales observados y los obtenidos mediante el modelo se muestran en la Figura 3.5.12, observándose otra vez un acuerdo general satisfactorio y representación de picos adicionales de caudal por parte del modelo.



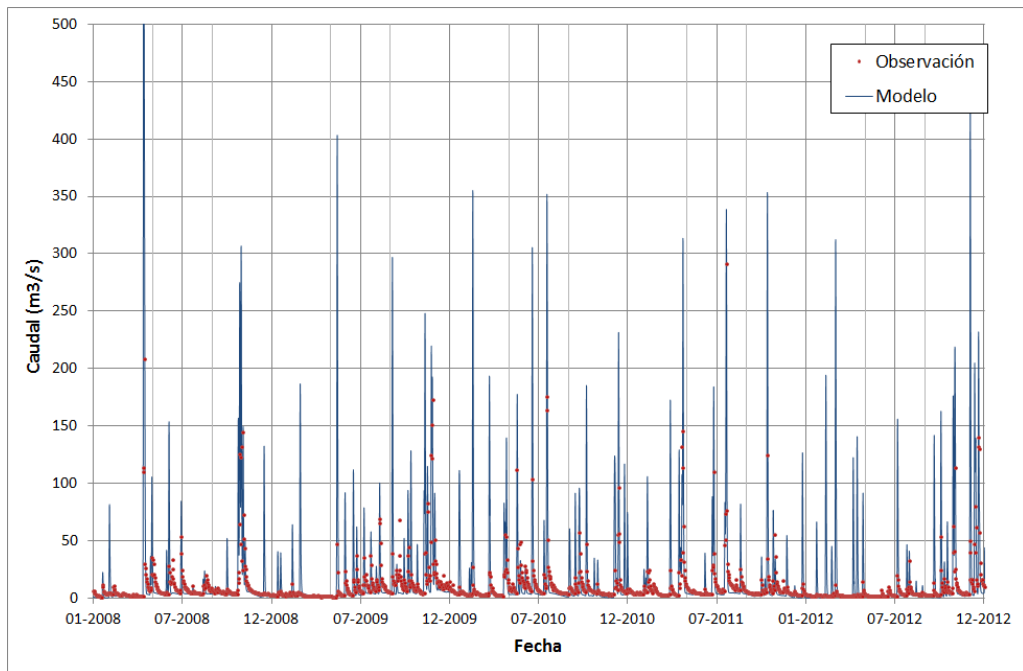
a) 1993-1998



b) 1998-2003



c) 2003-2008



d) 2008-2013

Figura 3.5.12. Comparación entre serie de caudales observada y calculada con el modelo para la cuenca del Yabebiry.

Las curvas de excedencia de caudales se presentan en la Figura 3.5.13, donde se repite la buena coincidencia para el rango de caudales más frecuentes. Los valores de caudal correspondientes a las excedencias mayores se muestran en la Tabla 3.5.5.

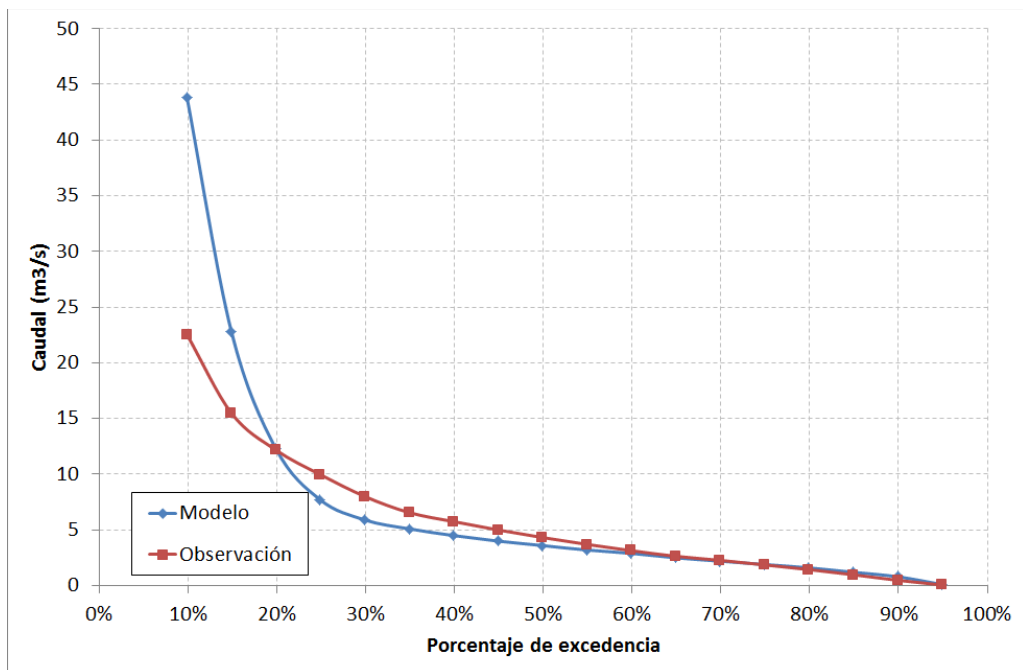


Figura 3.5.13. Porcentaje de excedencia de caudales para la cuenca del Yabebiry.

Tabla 3.5.5. Caudales correspondientes a distintas excedencias para la cuenca del Yabebiry.

Excedencia	Caudal (m ³ /s)	
	Modelo	Registros
90%	0,8	0,5
80%	1,6	1,4
70%	2,2	2,3
60%	2,9	3,1
50%	3,6	4,3

3.6 Explotación

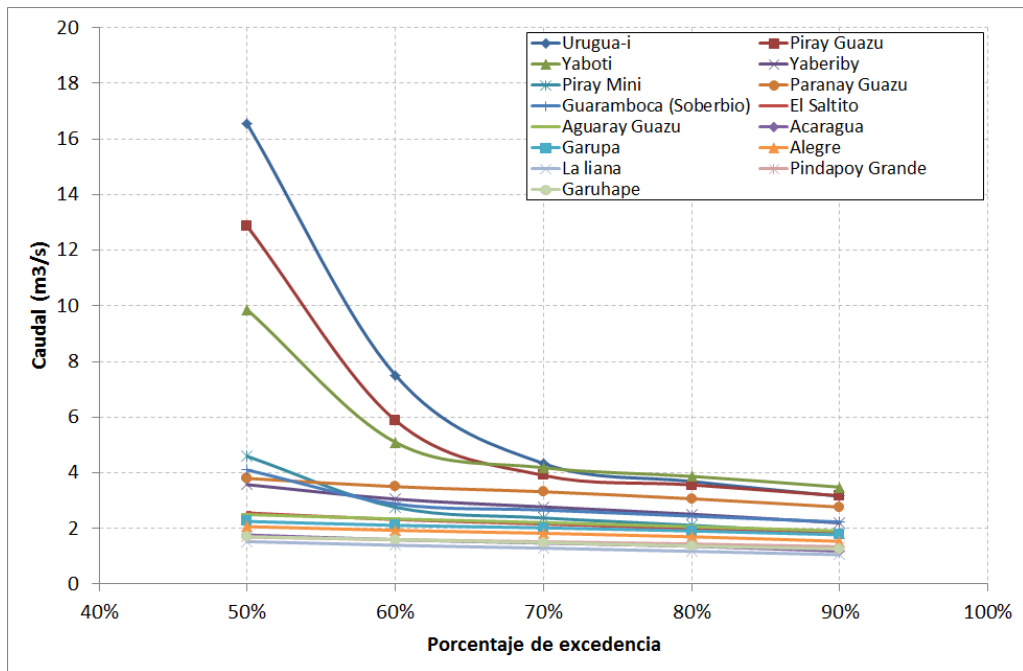
Para las restantes cuencas la calibración del modelo no es posible debido a la ausencia o escasez de datos hidrométricos. Se utilizaron entonces los mismos criterios que para las cuencas calibradas, es decir, se determinaron el almacenamiento en follaje y los tiempos de retardo correspondientes (mostrados en la Tabla 3.6.1, donde también se incluyen las cuencas calibradas por completitud), y para el resto de los parámetros se adoptaron los mismos valores que para las cuencas calibradas.

Tabla 3.6.1. Parámetros de las cuencas.

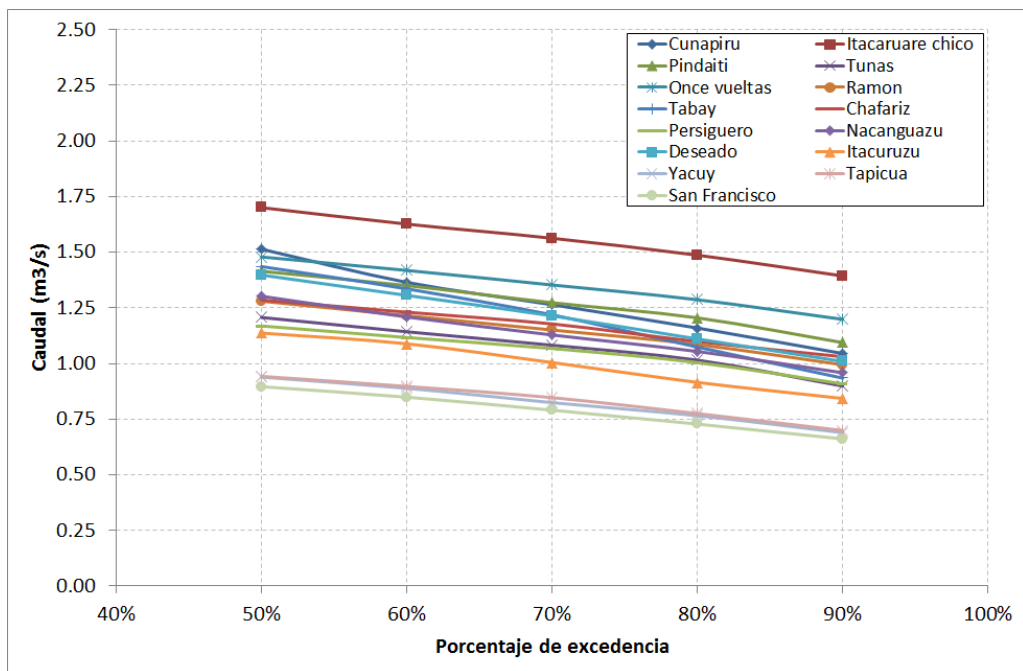
#	Nombre	Almacenam. en follaje (mm)	Tiempos de retardo		
			Reservorio Subterráneo Superior (hr)	Reservorio Subterráneo Inferior (hr)	Subcuenca (min)
1	Urugua-í	9,62	24	36	2.559
2	Piray Guazú	9,65	20	31	2.210
3	Yaboti	9,72	17	26	1.855
4	Yabebiry	8,62	15	22	1.594
5	Piray Miní	9,54	20	30	2.183
6	Paranay Guazú	9,39	11	17	1.194
7	Guaramboca (Soberbio)	9,38	14	22	1.554
8	El Saltito	8,94	11	17	1.201
9	Aguaray Guazú	9,65	11	16	1.173
10	Acaraguá	8,07	12	18	1.283
11	Garupá	9,06	10	14	1.031
12	Alegre	8,80	11	17	1.216
13	La liana	9,42	11	16	1.178
14	Pindapoy Grande	9,24	9	13	920
15	Garuhape	9,15	8	11	815
16	Cuñapirú	8,83	7	10	751
17	Itacaruaire chico	8,95	7	11	804
18	Pindaiti	9,22	8	12	896

#	Nombre	Almacenam. en follaje (mm)	Tiempos de retardo		
			Reservorio Subterráneo Superior (hr)	Reservorio Subterráneo Inferior (hr)	Subcuenca (min)
19	Tunas	8,39	8	12	841
20	Once vueltas	8,63	6	10	692
21	Ramón	7,43	7	11	779
22	Tabay	8,69	5	7	507
23	Chafariz	9,41	8	12	891
24	Persiguero	8,85	7	10	736
25	Đacan Guazú	9,42	5	7	528
26	Deseado	9,50	6	10	690
27	Itacuruzú	9,57	5	7	509
28	Yacuy	9,38	5	7	500
29	Tapicua	9,84	3	5	373
30	San Francisco	9,50	5	8	567
31	Santa María	8,96	4	7	477
32	Central	9,90	5	7	537
33	Toro	9,77	4	6	408
34	Zaimán	8,72	6	8	597
35	Guerrero	9,11	5	7	492
36	San Juan	9,81	4	6	423
37	Yasu Argentino	9,84	3	5	373
38	Concepción	8,67	4	6	412
39	Tararira	9,31	5	7	496
40	Chico Alferez	8,18	4	6	406
41	Dorado	9,02	3	5	339
42	Capiovi	9,33	3	4	322
43	3 de Mayo	9,13	3	4	294
44	Aguaray Mini	9,52	3	4	296
45	Santo Domingo	9,84	4	6	436

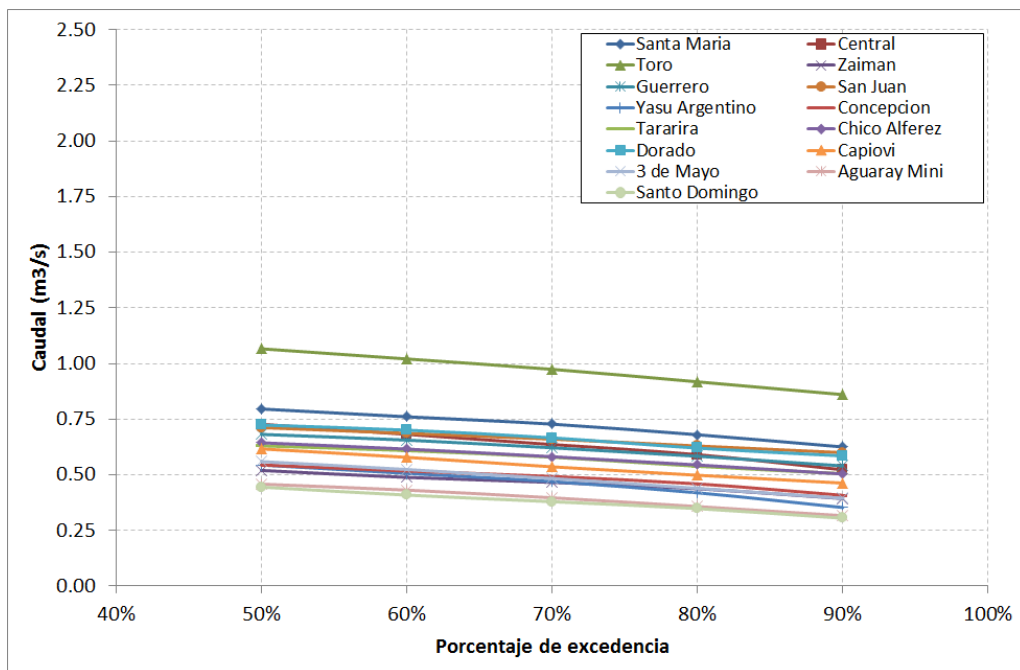
La Figura 3.5.14 muestra las curvas de excedencia de caudales provistas por el modelo, subdivididas en tres grupos de acuerdo a su tamaño. En la Tabla 3.6.2 se presentan los caudales correspondientes para distintos porcentajes de excedencia. Se observa que las 7 cuencas más grandes (Urugua-í, Piray Guazú, Yabotí, Yabebiry, Piray Mini, Paranay Guazú y Guaramboca (Soberbio)) son las que efectivamente indican mayores caudales.



a) Cuencas grandes (mayores a 500 km²)



b) Cuencas medianas (entre 200 km² y 500 km²)



c) Cuencas pequeñas (menores a 200 km²)

Figura 3.6.2. Curvas de excedencia de caudales para todas las cuencas.

Tabla 3.6.2. Caudales correspondientes a distintas excedencias para todas las cuencas.

#	Nombre	Excedencia								
		90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
1	Urugua-í	3,16	3,69	4,33	7,51	16,53	34,55	67,63	127,74	254,15
2	Piray Guazú	3,17	3,57	3,91	5,88	12,86	29,81	65,00	131,05	276,73
3	Yabotí	3,49	3,87	4,19	5,10	9,86	23,07	52,50	116,00	255,85
4	Yabebiry	2,20	2,51	2,77	3,06	3,58	7,16	21,30	63,96	189,88
5	Piray Mini	1,82	2,12	2,38	2,76	4,59	10,42	24,69	57,70	139,47
6	Paranay Guazú	2,77	3,07	3,32	3,50	3,80	6,22	17,01	51,64	142,59
7	Guaramboca (Soberbio)	2,23	2,44	2,66	2,88	4,10	8,95	22,39	53,16	127,58
8	El Saltito	1,80	1,99	2,16	2,32	2,56	4,53	12,08	33,70	93,00
9	Aguaray Guazú	1,91	2,07	2,21	2,34	2,50	3,50	9,16	29,74	89,70
10	Acaragua	1,18	1,36	1,48	1,60	1,76	2,43	7,05	23,31	75,76
11	Garupa	1,77	1,91	2,02	2,11	2,25	2,60	6,46	23,71	76,40
12	Alegre	1,54	1,70	1,83	1,93	2,06	3,20	9,26	29,87	87,85
13	La liana	1,05	1,18	1,29	1,40	1,53	1,85	4,71	16,24	53,68
14	Pindapoy Grande	1,34	1,44	1,52	1,60	1,69	1,84	3,32	13,15	51,72
15	Garuhape	1,26	1,37	1,49	1,60	1,70	1,89	3,68	14,69	52,53
16	Cuñapirú	1,05	1,16	1,26	1,37	1,51	1,67	2,19	9,88	50,70
17	Itacaruaré chico	1,39	1,49	1,56	1,63	1,70	1,87	3,80	14,86	49,40
18	Pindaiti	1,09	1,21	1,27	1,35	1,41	1,62	3,99	14,17	46,55

#	Nombre	Excedencia								
		90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
19	Tunas	0,90	1,02	1,08	1,14	1,21	1,30	1,74	7,60	37,66
20	Once vueltas	1,20	1,29	1,35	1,42	1,48	1,60	2,29	10,33	41,64
21	Ramón	0,99	1,09	1,15	1,22	1,28	1,38	2,32	9,81	39,84
22	Tabay	0,93	1,07	1,22	1,34	1,44	1,52	1,70	4,56	31,94
23	Chafariz	1,03	1,10	1,18	1,23	1,29	1,58	4,17	14,17	40,51
24	Persiguero	0,91	1,00	1,07	1,12	1,17	1,25	1,53	6,30	32,25
25	Đacan Guazú	0,96	1,05	1,13	1,21	1,30	1,41	1,59	5,01	29,87
26	Deseado	1,01	1,11	1,21	1,31	1,40	1,63	4,34	13,80	36,84
27	Itacuruzú	0,84	0,92	1,00	1,09	1,14	1,19	1,34	4,77	26,99
28	Yacuy	0,69	0,77	0,82	0,89	0,94	1,00	1,09	3,18	18,20
29	Tapicua	0,70	0,78	0,85	0,90	0,94	1,01	1,08	1,77	14,98
30	San Francisco	0,66	0,73	0,79	0,85	0,90	0,97	1,43	5,44	19,62
31	Santa María	0,63	0,68	0,73	0,76	0,80	0,84	0,94	2,29	15,98
32	Central	0,52	0,59	0,64	0,68	0,73	0,78	0,84	2,05	14,93
33	Toro	0,86	0,92	0,97	1,02	1,07	1,13	2,19	8,28	24,88
34	Zaimán	0,39	0,44	0,47	0,49	0,52	0,57	0,63	1,68	12,25
35	Guerrero	0,54	0,58	0,62	0,66	0,68	0,73	0,81	2,70	14,12
36	San Juan	0,60	0,63	0,66	0,69	0,71	0,75	0,81	2,60	15,21
37	Yasu Argentino	0,35	0,42	0,47	0,51	0,54	0,59	0,64	0,75	7,64
38	Concepción	0,41	0,46	0,49	0,52	0,54	0,58	0,62	0,94	10,11
39	Tararira	0,51	0,54	0,58	0,61	0,63	0,66	0,79	3,25	13,47
40	Chico Alférez	0,50	0,54	0,58	0,62	0,64	0,68	0,74	2,17	12,24
41	Dorado	0,59	0,62	0,67	0,70	0,72	0,76	0,82	2,89	12,88
42	Capioví	0,46	0,50	0,54	0,58	0,62	0,67	0,73	1,29	10,99
43	3 de Mayo	0,39	0,44	0,48	0,52	0,56	0,59	0,63	0,77	9,35
44	Aguaray Miní	0,32	0,36	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,59	5,41
45	Santo Domingo	0,31	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,52	0,84	7,64

4 CÁLCULO DE POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO

4.1 Metodología

El Potencial Hidroeléctrico Teórico (PHT) es una medida de la energía potencial disponible en un curso de agua para producir energía hidroeléctrica. Considera que la totalidad de esa energía potencial se transforma en energía eléctrica, es decir, que la eficiencia es del 100%.

Dada una ubicación sobre un curso de agua, el PHT de un aprovechamiento allí situado se calcula como (Figura 4.1.1)

$$PHT = 9,81 Q_{50\%} H$$

donde

PHT : Potencial Hidroeléctrico Teórico en kW

$Q_{50\%}$: caudal en ese punto correspondiente a una excedencia del 50%, en m³/s

H : altura proyectada del aprovechamiento, en m

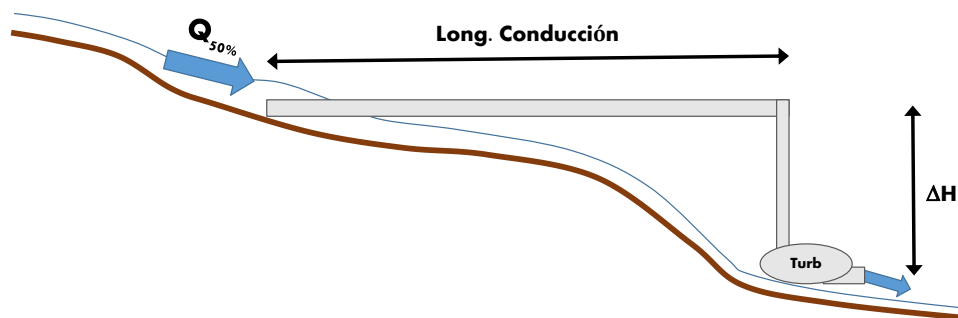


Figura 4.1.1. Esquema de aprovechamiento tipo adoptado en el análisis

Como metodología de evaluación del PHT de un curso de agua se ha establecido un cálculo de aprovechamientos de pasada en cascada, separados por una distancia fija. Para cada punto i de ubicación de un aprovechamiento (contado desde aguas arriba hacia aguas abajo), el PHT asociado se calcula como

$$PHT_i = 9,81 A q_{50\%} \Delta H_i$$

donde

PHT_i : Potencial Hidroeléctrico Teórico en el punto i , en kW

A : área de aporte al punto i , en km^2

$q_{50\%}$: caudal específico areal de la cuenca correspondiente a una excedencia del 50%, en $m^3/s/km^2$

ΔH_i : diferencia de nivel topográfico entre el punto i y el $i-1$, en m

Esta metodología se implementó en una rutina programada en *python* bajo el entorno *QGIS* (en adelante *HydroQGIS*), la cual genera un *shape* de puntos equiespaciados sobre los cauces principales, cuya separación (que representa la longitud del reservorio del aprovechamiento) se especifica como dato. Para el presente trabajo esta separación se estableció en 1 km.

4.2 Verificación

A modo de verificación de la metodología, en la Figura 4.2.1 se muestra el detalle de la imagen satelital en torno a uno de los puntos de mayor PHT en la cuenca del Piray Guazú. Se observa sobre el curso de agua una coloración blanca, asociada a la presencia de espuma/aireación generada por un salto topográfico relativamente significativo. Aunque también hay que tener en cuenta que se trata de un punto ubicado en la cuenca baja, por lo que el área de aporte es significativamente alta.

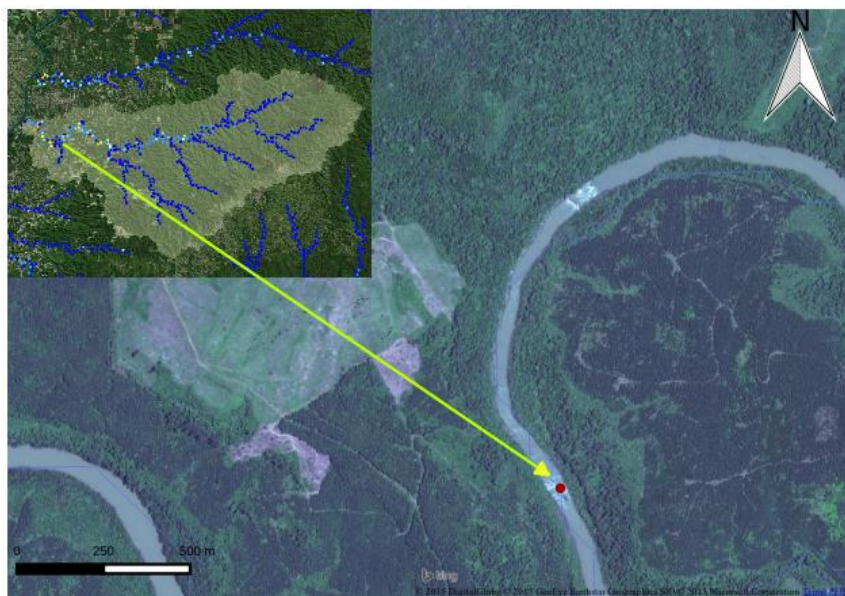


Figura 4.2.1 Detalle de sitio con alto PHT en la cuenca del Piray Guazú

4.3 Análisis general

En la Tabla 4.3.1 se presentan los valores de PHT máximo y acumulado por cuenca, ordenado de acuerdo a valores decrecientes del primer parámetro. Se observa que el ranking de PHT máximo lo encabeza la cuenca del Urugua-í, con 8,6 MW, mientras que el de PHT acumulado la del Piray Guazú, con 57 MW. Los valores acumulados se representan en la Figura 4.3.1.

Tabla 4.3.1. PHT máximo y acumulado para cada cuenca

#	Cuenca	PHT Máx. (MW)	PHT Acum. (MW)
1	Urugua-í	8,55	49,55
2	Piray Guazú	1,78	56,87
3	Yaboti	1,34	35,44
4	Piray Mini	0,58	16,91
5	Aguaray Guazú	0,39	4,51
6	Paranay Guazú	0,37	6,85
7	Guaramboca (Soberbio)	0,26	9,62
8	Tapicua	0,26	0,55
9	Garuhape	0,24	2,15
10	Yasu Argentino	0,21	0,56
11	Cuñapiru	0,21	1,80
12	El Saltito	0,21	5,44
13	Alegre	0,20	3,51
14	Tabay	0,18	1,58
15	Yaberiby	0,18	4,83
16	La liana	0,16	2,90
17	Aguaray Mini	0,15	0,30
18	Chafariz	0,14	2,68
19	Itacuruзу	0,14	1,49
20	Itacaruare chico	0,14	1,43
21	Pindaiti	0,14	1,97
22	3 de Mayo	0,11	0,24
23	Once vueltas	0,11	1,31
24	Ramon	0,11	1,09
25	Acaragua	0,11	3,24
26	Garupa	0,11	2,05
27	ÑacanGuazú	0,10	0,85
28	Toro	0,08	0,67
29	San Francisco	0,07	0,72
30	Persiguero	0,07	0,59
31	Tararira	0,06	0,40
32	Chico Alferéz	0,06	0,23
33	Deseado	0,06	1,14
34	Tunas	0,06	0,60

35	Capiovi	0,05	0,31
36	Santa María	0,05	0,34
37	Guerrero	0,04	0,30
38	Yacuy	0,04	0,45
39	Dorado	0,04	0,22
40	San Juan	0,04	0,25
41	Pindapoy Grande	0,04	0,64
42	Central	0,03	0,29
43	Concepción	0,03	0,15
44	Santo Domingo	0,02	0,14
45	Zaimán	0,02	0,11

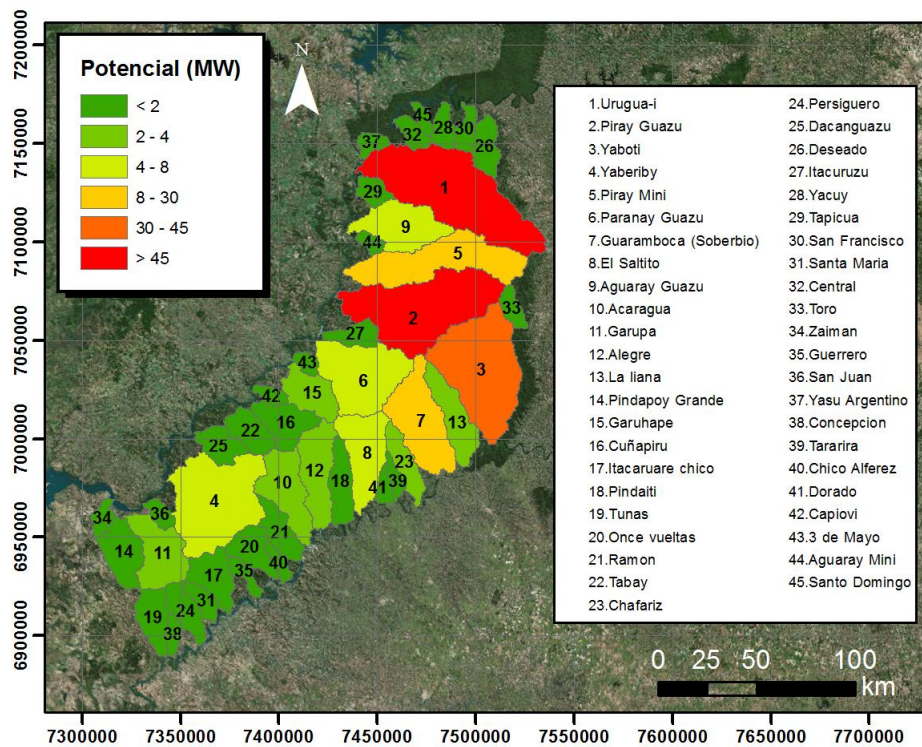


Figura 4.3.1 PHT Acumulado para cada cuenca de la provincia de Misiones.

Dado que se consideró una longitud de aprovechamiento de 1km, la cantidad de puntos analizados es muy alta, del orden de 5000. Obviamente, no todos tienen un PHT significativo. Para generar un corte en el análisis se tuvo en cuenta la clasificación de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos de la Secretaría de Energía¹⁵, la cual se presenta en la Tabla 4.3.2. En base a ella, surgen las cantidades de centrales potenciales por cuenca y por categoría indicadas en la Figura 4.3.2.

¹⁵ Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos - Secretaría de Energía, 2008 (http://www.inti.gov.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_hidrica.pdf)

Tabla 4.3.2. Categorías de aprovechamiento según potencia

Categorías	Rango de Potencia (kW)
Pico Central	0-5
Micro Central	5-50
Mini Central	50-500
Pequeña Central	500-30.000
Mediana Central	30.000-50.000
Gran Central	> 50.000

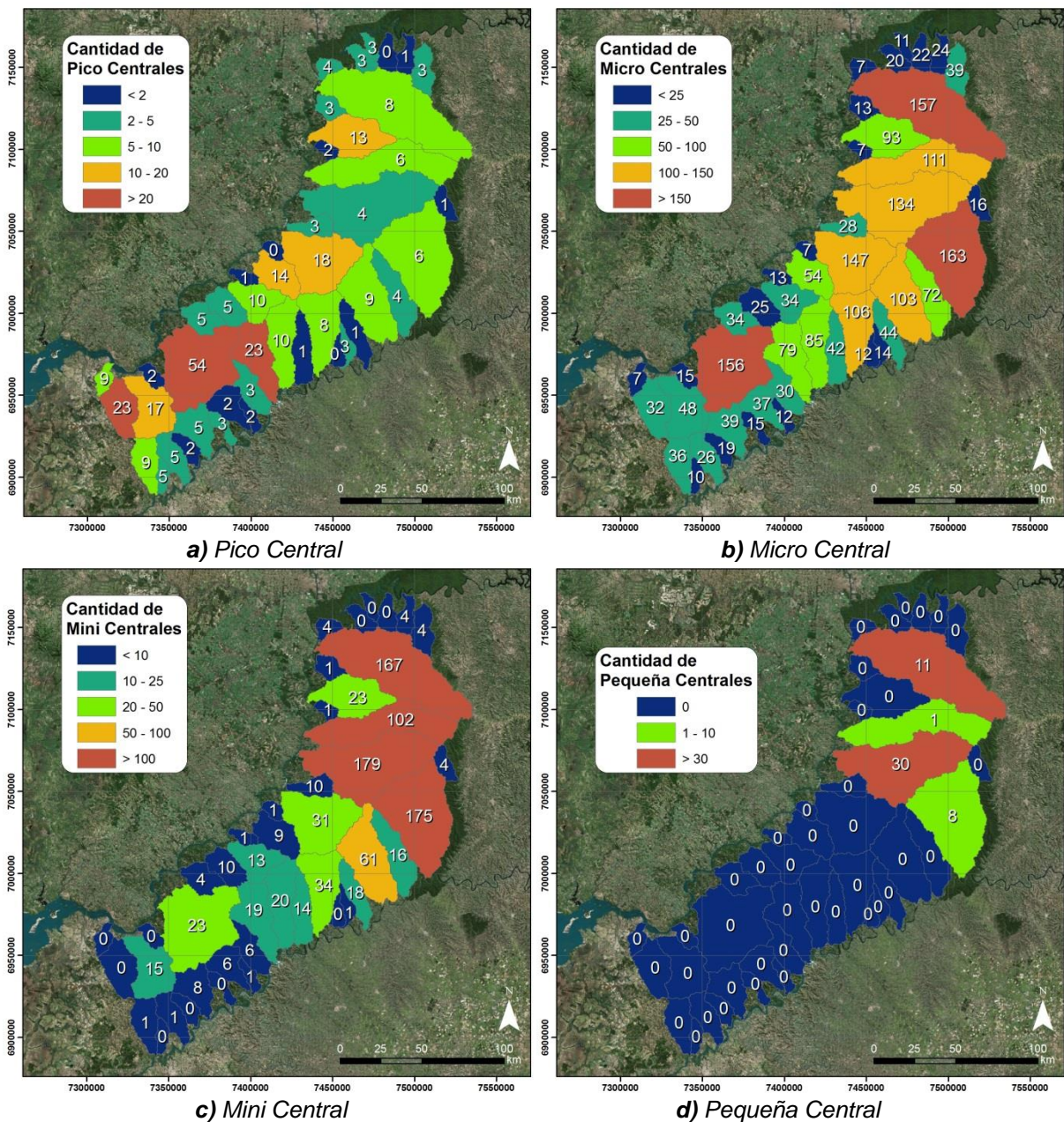


Figura 4.3.2 Cantidad de centrales potenciales por categoría.

4.4 Análisis por cuenca

Las cuatro cuencas con mayor PHT acumulado y con un PHT máximo puntual mayor a los 500kW (entrando en categoría de al menos Pequeña Central) son Uruguay-í, Piray Guazú, Yabotí y Piray Miní. Los resultados obtenidos para estas cuencas se analizan con más detalle a continuación.

4.4.1 Cuenca del Uruguay-í

En la Tabla 4.4.1 se muestra el caudal, altura y PHT de cada uno de los aprovechamientos potenciales sobre el Uruguay-í, ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo. Sólo se consideran aquellos con PHT > 250 kW (que sería una Mini Central de relativa envergadura). El PHT se representa en la Figura 4.4.1.

Debe tener en cuenta que en esta cuenca ya existe un aprovechamiento de 76 m de altura y una potencia instalada de 60 MW, cuya ubicación se indica en la Tabla 4.4.1 y se distingue en la imagen satelital de la Figura 4.4.1, sobre la cual coincide el punto identificado como de mayor PHT. El PHT acumulado aguas arriba del aprovechamiento existente es de 12,71 MW, con 5 puntos que superan los 500 kW.

Tabla 4.4.1. Puntos con PHT > 250 kW en la cuenca de Uruguay-í

#	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	PHT (MW)
1	2,16	14	0,30
2	2,73	10	0,27
3	4,98	7	0,34
4	5,02	6	0,30
5	5,75	8	0,45
6	5,77	5	0,28
7	6,26	6	0,37
8	6,27	7	0,43
9	7,20	7	0,49
10	7,35	13	0,94
11	7,44	4	0,29
12	7,48	6	0,44
13	7,52	4	0,30
14	7,64	4	0,30
15	7,88	5	0,39
16	7,90	4	0,31
17	7,90	6	0,47
18	7,94	6	0,47
19	7,97	4	0,31
20	8,00	7	0,55
21	8,10	9	0,71

22	8,14	7	0,56
23	8,15	4	0,32
24	10,55	4	0,41
25	10,56	4	0,41
26	13,11	3	0,39
27	13,12	3	0,39
28	13,98	3	0,41
29	13,99	4	0,55
30	14,52	2	0,28
31	14,53	2	0,29
Embalse Urugua-í			
32	16,45	53	8,55
33	16,46	12	1,94
34	16,48	9	1,46
35	16,50	5	0,81
36	16,51	4	0,65
37	16,53	4	0,65
38	16,53	2	0,32
39	16,54	3	0,49

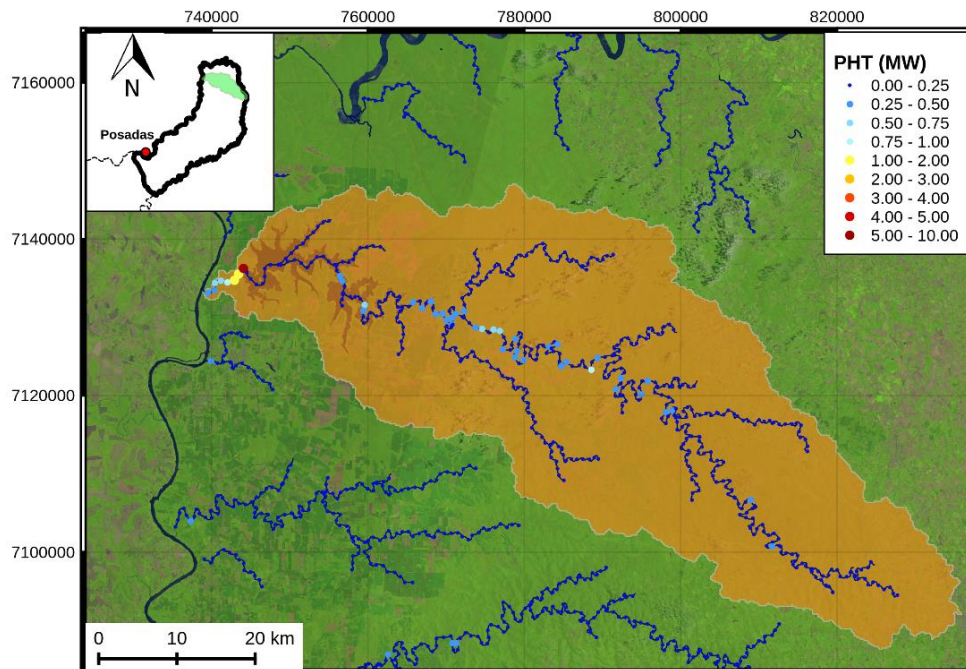


Figura 4.4.1. PHT locales para la cuenca del Urugua-í.

4.4.2 Cuenca del Piray-Guazú

La Tabla 4.4.2 presenta el caudal, altura y PHT de cada uno de los aprovechamientos potenciales sobre el Piray-Guazú, ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo y con PHT > 250 kW. El PHT se representa en la Figura 4.4.2. En la cuenca baja se observa una sucesión importante de puntos con potencial de entre 500 kW y 1 MW. En la cuenca media también existen puntos de interés, con PHT superiores a los 500 kW.

La confluencia del Piray Guazú con el A° Las Antas es un punto de inflexión, ya que aguas arriba se distinguen 6 puntos con PHT mayor a 500 kW, mientras que aguas abajo la cantidad de puntos con esa misma característica asciende a 25. El 70% del PHT acumulado (con PHT > 250 kW) se concentra aguas abajo de esa confluencia.

Tabla 4.4.2. Puntos con PHT > 250 kW en la cuenca del Piray-Guazú

#	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	PHT (MW)
1	1,72	18	0,30
2	2,99	16	0,47
3	4,29	8	0,34
4	4,40	6	0,26
5	5,64	12	0,66
6	5,65	13	0,72
7	5,68	5	0,28
8	5,90	9	0,52
9	6,86	7	0,47
10	6,87	4	0,27
11	6,90	4	0,27
12	6,91	7	0,47
13	6,93	6	0,41
14	7,37	5	0,36
15	7,38	4	0,29
16	7,51	4	0,29
17	7,62	4	0,30
18	7,63	6	0,45
19	7,72	7	0,53
20	7,72	4	0,30
21	7,73	10	0,76
22	7,76	6	0,46
23	7,78	7	0,53
24	8,03	4	0,31
Confluencia con A° Las Antas			
25	11,05	5	0,54
26	11,06	6	0,65

27	11,06	6	0,65
28	11,07	7	0,76
29	11,10	8	0,87
30	11,10	3	0,33
31	11,12	9	0,98
32	11,15	10	1,09
33	11,16	3	0,33
34	11,35	6	0,67
35	11,35	11	1,22
36	11,37	4	0,45
37	11,39	4	0,45
38	11,41	4	0,45
39	11,42	3	0,34
40	11,72	6	0,69
41	11,73	8	0,92
42	11,81	6	0,70
43	11,91	5	0,58
44	11,98	5	0,59
45	11,98	5	0,59
46	12,09	15	1,78
47	12,46	7	0,86
48	12,47	8	0,98
49	12,48	5	0,61
50	12,68	7	0,87
51	12,70	4	0,50
52	12,73	12	1,50
53	12,74	8	1,00
54	12,81	5	0,63
55	12,82	4	0,50
56	12,82	3	0,38
57	12,83	3	0,38
58	12,85	2	0,25

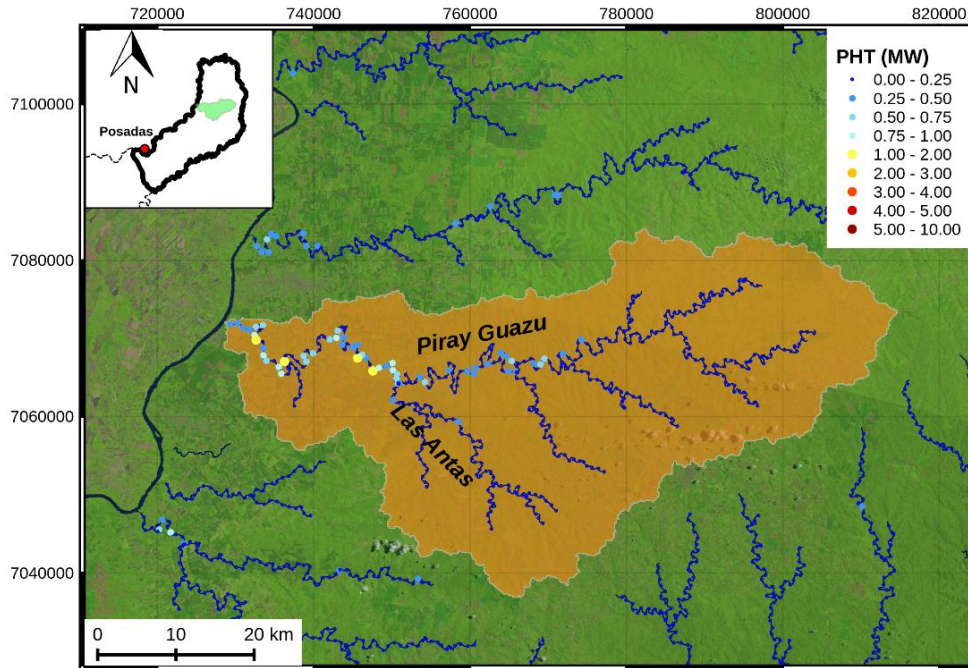


Figura 4.4.2 PHT locales para la cuenca del Piray Guazú.

4.4.3 Cuenca del Yabotí

El caudal, altura y PHT de cada uno de los aprovechamientos potenciales sobre el Yabotí, ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo y con PHT > 250 kW, se muestran en la Tabla 4.4.3. La Figura 4.4.3 muestra el PHT. Se observan puntos de interés sobre los tributarios Pepirí Mini y Yabotí Miní, los cuales luego constituyen el A° Yaboti, pero la mayor parte del PHT (aproximadamente el 60% si se consideran puntos con PHT > 250kW) se encuentra en la cuenca baja. Aguas arriba de la confluencia no se registran puntos con PHT superiores a los 500 kW. En cambio, en la zona baja se distinguen 8 puntos con valores superiores a 500 kW, uno de los cuales supera 1MW.

Tabla 4.4.3. Puntos con PHT > 250 kW en la cuenca del Yabotí

#	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	PHT (MW)
1	0,63	48	0,30
2	2,12	13	0,27
3	2,16	17	0,36
4	2,69	10	0,26
5	2,70	12	0,32
6	2,95	11	0,32
7	5,02	8	0,39
8	5,07	6	0,30
9	5,18	8	0,41
10	5,37	5	0,26
11	5,48	9	0,48
12	5,49	5	0,27
13	5,53	5	0,27
14	5,54	5	0,27
15	5,55	6	0,33
16	5,55	7	0,38
17	5,57	5	0,27
18	5,58	9	0,49
19	5,68	5	0,28
20	5,70	5	0,28
Confluencia Yabotí Mini – Pepirí Mini			
21	9,45	6	0,56
22	9,46	3	0,28
23	9,49	4	0,37
24	9,51	3	0,28
25	9,62	6	0,57
26	9,62	5	0,47
27	9,66	5	0,47
28	9,66	8	0,76
29	9,71	3	0,29
30	9,72	6	0,57
31	9,73	7	0,67
32	9,73	14	1,34
33	9,74	3	0,29
34	9,84	4	0,39
35	9,85	8	0,77
36	9,85	7	0,68

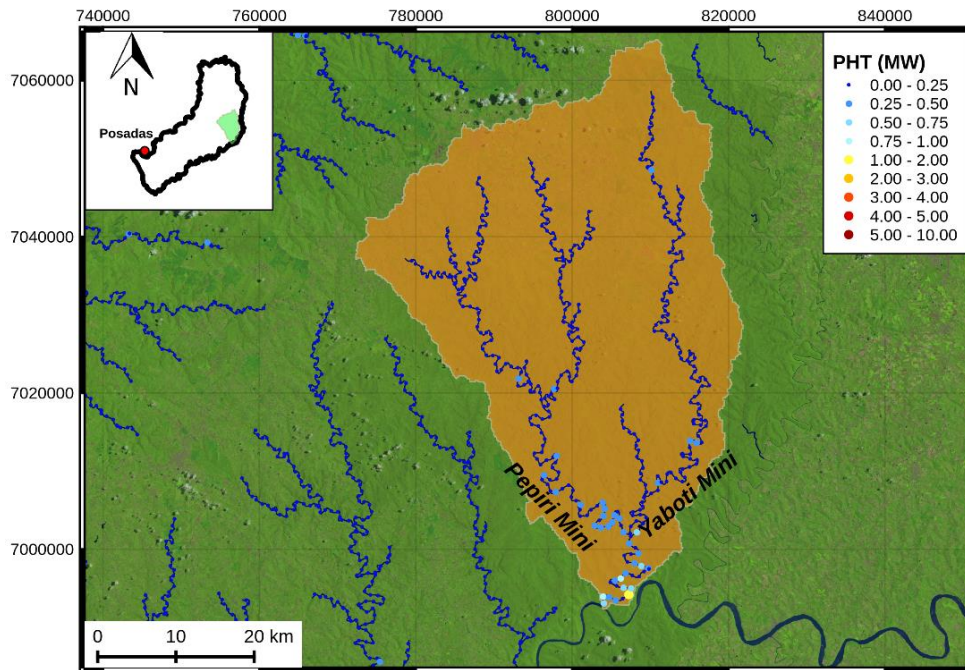


Figura 4.4.3 PHT locales para la cuenca del Yabotí

4.4.4 Cuenca del Piray Miní

La Tabla 4.4.4 presenta el caudal, altura y PHT de cada uno de los aprovechamientos potenciales sobre el Piray Miní, ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo y con PHT > 250 kW. El PHT se representa en la Figura 4.4.4. Se observa que en esta cuenca sólo 12 puntos superan los 250 kW. El mayor potencial se concentra en la zona baja de la cuenca. Próximo a la desembocadura al río Paraná existe un punto cuyo PHT supera los 500 kW. Alrededor del 70% del PHT acumulado se encuentra en la zona baja de la cuenca. Allí los saltos siguen siendo significativos, en relación a los saltos topográficos que se registran en el resto del cauce, pero se concentran los caudales provenientes de toda la cuenca.

Tabla 4.4.4. Puntos con PHT > 250 kW en la cuenca de Piray Mini

#	Caudal (m ³ /s)	Altura (m)	PHT (MW)
1	2,71	10	0,27
2	2,74	12	0,32
3	3,33	10	0,33
4	4,38	8	0,34
5	4,39	6	0,26
6	4,44	6	0,26
7	4,56	9	0,40
8	4,57	10	0,45
9	4,57	13	0,58
10	4,58	7	0,31
11	4,60	6	0,27
12	4,61	9	0,41

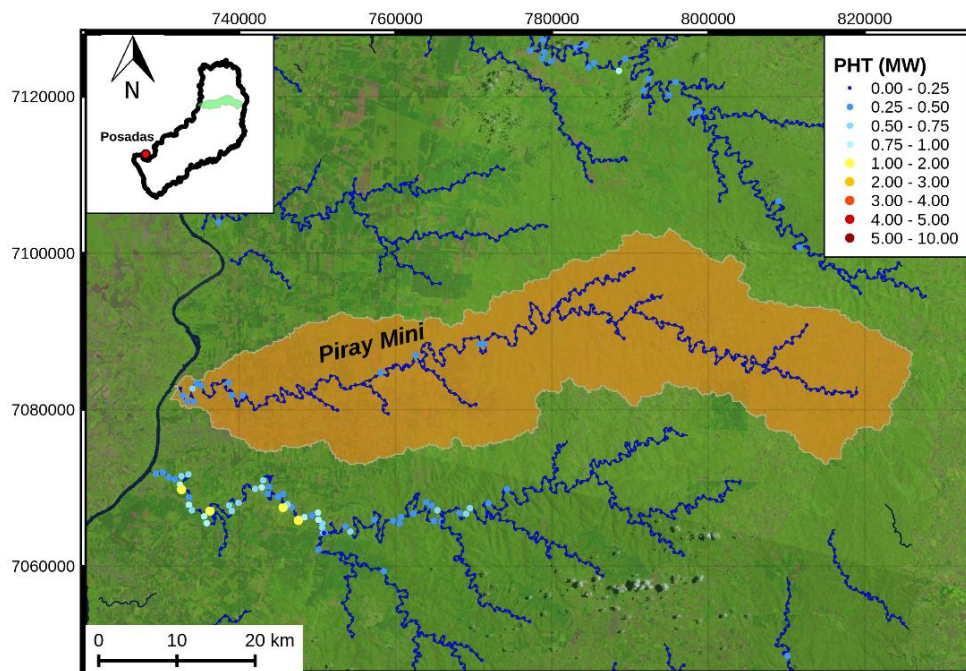


Figura 4.4.4. PHT locales para la cuenca del Piray Mini

5 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta fase de los estudios:

- En base a la información disponible, se ha implementado la modelación hidrológica de toda la Provincia de Misiones. Se determinaron cuencas con áreas no menores a 100 km², resultando un total de 45 cuencas.
- Se llevó adelante la calibración del modelo hidrológico en las cuencas Piray Miní, Piray Guazú, Paranay y Yabebiry, que son las que poseen series extensas de registros de niveles y aforos en los arroyos. Se adoptó un criterio de cálculo y ajuste de parámetros para la calibración que permitió su extrapolación a las cuencas no aforadas. Las curvas de excedencia de caudales provistas por el modelo para las cuatro cuencas de calibración mostraron una buena coincidencia con las correspondientes que surgen de las mediciones para el rango de caudales más frecuentes, que son los significativos para definir el potencial hidroeléctrico.
- El Potencial Hidroeléctrico Teórico (PHT) es una medida de la energía potencial disponible en un curso de agua para producir energía hidroeléctrica. Considera que la totalidad de esa energía potencial se transforma en energía eléctrica, es decir, que la eficiencia es del 100%. Como metodología de evaluación del PHT de un curso de agua se ha establecido un cálculo de aprovechamientos de pasada en cascada, separados por una distancia fija. Para el presente trabajo esta separación se estableció en 1 km.
- El ranking de PHT máximo lo encabeza la cuenca del Urugua-i, con 8,6 MW. Pero éste se da justamente en el punto donde ya existe una Gran Central de 76 m de altura y una potencia instalada de 60 MW.
- El ranking de PHT acumulado lo encabeza la cuenca del Piray Guazú, con 57 MW.
- Las cuatro cuencas con mayor PHT acumulado y con un PHT máximo puntual mayor a los 500 kW (entrando en categoría de al menos Pequeña Central) son Urugua-í, Piray Guazú, Yabotí y Piray Miní.
- En la cuenca del Urugua-í el PHT acumulado aguas arriba del aprovechamiento existente es de 12.71 MW, con 5 puntos que superan los 500 kW.
- En la cuenca baja del Piray-Guazú se observa una sucesión importante de puntos con potencial de entre 500 kW y 1 MW; en la cuenca media también existen puntos de interés, con PHT superiores a los 500 kW. El 70% del PHT acumulado (con PHT > 250 kW) se concentra aguas abajo de la confluencia del Piray Guazú con el A° Las Antas.

- En la cuenca del Yabotí se observan puntos de interés sobre los tributarios Pepirí Mini y Yabotí Mini, pero la mayor parte del PHT (aproximadamente el 60% si se consideran puntos con $PHT > 250kW$) se encuentra en la cuenca baja. Aguas arriba de la confluencia no se registran puntos con PHT superiores a los 500 kW. En cambio, en la zona baja se distinguen 8 puntos con valores superiores a 500 kW, uno de los cuales supera 1MW.
- En la cuenca del Piray Mini sólo 12 puntos superan los 250 kW. El mayor potencial se concentra en la zona baja de la cuenca, con alrededor del 70% de PHT acumulado. Próximo a la desembocadura al río Paraná existe un punto cuyo PHT supera los 500 kW.
- Los resultados presentados en este Informe, si bien son representativos de las potencialidades, están condicionados por la hipótesis de separación de 1 km entre aprovechamientos. Con la modelación ya implementada, sería posible investigar hipótesis alternativas.
- Estos resultados constituyen una guía para seleccionar ubicaciones de aprovechamientos potenciales. Identificados los puntos más interesantes, deberían considerarse las restricciones de uso de suelo que podrían condicionarlos o impedirlos. Pasado este filtro, debería procederse a determinar el Potencial Hidroeléctrico Técnico Aprovechable de esos emprendimientos.