Anexo 7

INFORMES COMPLEMENTARIOS

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

DIMENSIONAMIENTO DEL PUENTE SOBRE EL RIO YPANE

Tramo "San Pedro - Piri Pucu - Potrero Naranjo – Punta Riel"

Equipo de Trabajo:

Ing. Cristian Escobar, M.Sc.
Ing. Benito Pereira, M.Sc.
Ing. Jazmín Cabrera
Cesar Yaluk

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 2
2. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS 3
2.1 Delimitación de cuencas 3
2.2 Estimación de la tormenta de diseño 4
2.3 Método para el cálculo del caudal de diseño 5
2.4 Estimación del caudal de diseño 8
3. ESTUDIOS HIDRÁULICOS 9
3.1 Metodología de cálculo y criterios de diseño 9
3.2 Estimación de parámetros 10
3.3 Dimensionamiento del puente y cálculo del Nivel de Aguas Máximas (NAM) 11
4. ESTUDIOS DE SOCAVACIÓN 14

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cuenca de aporte 4
Figura 2 Polígonos de Thiessen y ubicación de la obra calculada 4
Figura 3 Tipo de Suelo 6
Figura 4 Uso de Suelo 6
Figura 5 Número de curva 7
Figura 6 Hidrograma de caudal de diseño calculado 8
Figura 7 Hidrograma de caudal de verificación 8
Figura 8 Criterio para la ubicación de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de un puente. Extraída del Documento TP-151, del Manual del HEC RAS 10
Figura 9 Puntos de elevación levantados por el equipo de topografía, con los cuales se generan las secciones transversales 11
Figura 10 Sección transversal en el puente para un TR 100 años 12
Figura 11 Perfil longitudinal en el puente para un TR 100 años 12
Figura 12 Ensayo y curvas granulométricos 14
Figura 13 Resultado gráfico de los estudios de socavación 16

LISTA DE TABLAS

Tabla 3 Criterios utilizados para la selección del Tiempo de Retorno 3
Tabla 4 Criterio para la determinación del Número de Curva (CN) en base al tipo y uso de suelo 5
Tabla 5 Criterio para selección del Factor de Pico 7
Tabla 6 Tabla resumen de parámetros utilizados y caudales obtenidos 9
Tabla 7 Resumen de resultados obtenidos mediante el software utilizado 13
Tabla 8 Resultados obtenidos 13
Tabla 9 Parámetros y resultados de la socavación por contracción 15
Tabla 10 Parámetros y resultados de la socavación en estribos 15
Tabla 11 Parámetros y resultados de la socavación en pilas 16
Tabla 11 Resumen resultados socavación 16

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los cálculos de hidrología e hidráulica realizados para el dimensionamiento del puente ubicado sobre el Arroyo Ypane, sobre el Tramo "San Pedro - Piri Pucu - Potrero Naranjo – Punta Riel". El puente tiene coordenadas UTM X: 473443 Y: 7403508. El estudio se estructura en tres partes: **i) Hidrología:** correspondiente al cálculo de los caudales de diseño; **ii) Hidráulica:** correspondiente al cálculo de la longitud requerida de puente, los niveles de aguas máximas asociados y la definición de la cota de apoyo de viga; y **iii) Socavación:** correspondiente al cálculo del potencial de socavación por contracción, en estribos y pilas.
El diseño del puente desde el punto de vista hidráulico consiste en determinar la longitud y el nivel óptimos que permitan el correcto escurrimiento del agua durante un evento de precipitación dado, sin afectación al ambiente y manteniendo la seguridad de la vía. Se presta especial atención a:

- Que no exista interrupción a la vía para el evento de precipitación seleccionado
- Que el caudal o velocidad del agua no presente efectos adversos sobre la estructura del puente o terraplén de acceso
- Que el puente o terraplén no presenten efectos adversos sobre el medio ambiente

Como criterio de diseño se adoptan las recomendaciones del Capítulo de Drenaje del Manual de Carreteras del Paraguay (MCP). El MCP hace recomendaciones acerca de cómo llevar a cabo los estudios hidrológicos e hidráulicos, con relación específicamente a los aspectos de diseño, menciona que el nivel de apoyo de las vigas del puente (NAV) debe estar situado por lo menos 1,00 m por encima del nivel de aguas máximas (NAM) calculado para el periodo de recurrencia establecido. Sin embargo, el MCP no hace referencia a la pérdida de carga hidráulica máxima que podría tenerse para un puente dado, por lo tanto, para esta revisión se acude a otros documentos como son el Manual de Drenaje de Carreteras del Brasil (DNIT), el Manual de Diseño Hidráulico de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (Hydraulic Bridge Design, FHWA) y la Norma Española de Carreteras BOE-60, Capítulo 4 (Obras de drenaje Transversal).

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

2. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

Este capítulo tiene como objetivo calcular el caudal de diseño a ser utilizado en el dimensionamiento del puente correspondiente.

Para la elección del Tiempo de Recurrencia (TR) se siguen los criterios presentados en las guías de diseño del Manual de Carreteras del Paraguay (Revisión 2019), Unidad 4 Diseño de Drenaje de Carreteras - Volumen 4.2 - Pág. 283 (Tabla 1). Para el diseño del puente se utiliza un TR de 100 años, y para la verificación un TR de 150 años.

Tabla 1 Criterios utilizados para la selección del Tiempo de Retorno

Tipo de obra	Tipo de Ruta	Período de Retorno (años)		Vida útil Supuesta (n: años)	Riesgo de Falla (%)	
		Diseño[4]	Verificación[5]		Diseño	Verificación
Estructuras Especiales [1]	RVP	200	300	50	22	15
Puentes[2]	α	200	300 150	50 50	2 2	15
	β	100			40	28
Alcantarillas (S>1.75 m²) o $H_{terrap.}$ ≥ 10 m y Estructuras Enterradas[3]	α	1 0 0	150 100	50 30	4 0	28 26
	β	50			45	
Alcantarillas (S<1,75 m²)	α	50 25	100 50	50 30	6 4	40 45
	β				71	
Defensas de Riberas	α	1 0 0	- -	20 20	1 8	- -
	β	100			18	

S = Sección útil de la alcantarilla

RVP = Red Vial Primaria

α = Autopistas y Multicarriles

β = Caminos y Carreteras primarias.

2.1 Delimitación de cuencas

La determinación del caudal de diseño requiere de una correcta delimitación de la cuenca de aporte. En el área de estudio se ha delimitado la cuenca hasta el puente de proyecto, en base al Modelo Digital de Elevación SRTM (resolución de 90 x 90 m). Esta delimitación puede verse en la siguiente Figura.

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

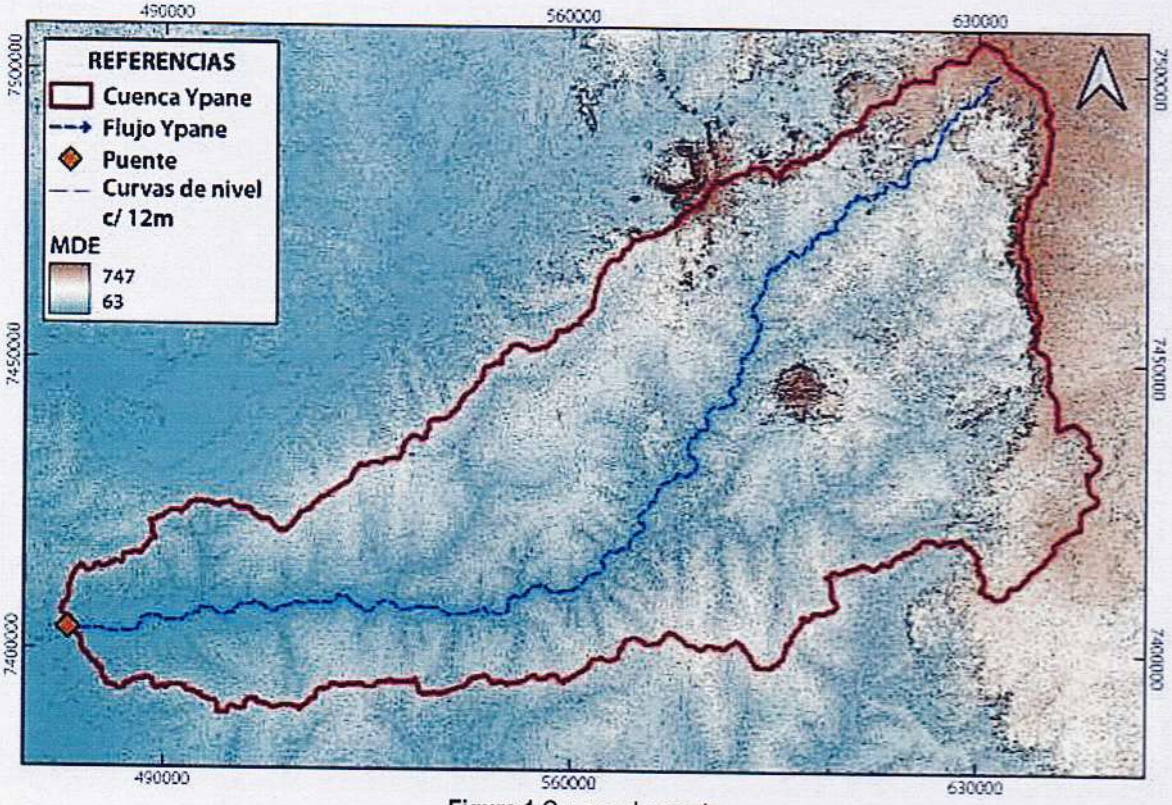

Figura 1 Cuenca de aporte

2.2 Estimación de la tormenta de diseño

Para la generación de la tormenta de diseño, se utilizan las curvas IDF de la FIUNA (Cuevas & Rolón, 2010), y se adopta la estación que representa espacialmente la lluvia en la cuenca conforme a los polígonos de Thiessen.

Figura 2 Polígonos de Thiessen y ubicación de la obra calculada

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

2.3 Método para el cálculo del caudal de diseño

El cálculo del caudal de diseño se realiza aplicando el método del Hidrograma Unitario SCS. Este método permite representar adecuadamente las características de la cuenca, ya que tiene en cuenta dos parámetros: i) Numero de Curva (CN), que permite representar las pérdidas y ii) Factor de Pico (PRF), que permite representar adecuadamente el hidrograma de acuerdo con características específicas de la cuenca.

2.3.1 Estimación de parámetros

Entre los parámetros (directos o indirectos) más importantes para la aplicación de este método se destacan:

i) ***Tiempo de concentración*** de la cuenca, con el cual se calcula el tiempo de retardo (Tlag = 0.6 Tc). Se utiliza la fórmula de KIRPICH. La formulación se muestra a continuación:

$$T_c = 1{,}42 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

Donde:
TC = tiempo de concentración, en horas.
L= longitud del curso de agua, en km.
H= desnivel máximo, en m.

ii) ***Número de Curva (CN)***, que refleja las abstracciones y pérdidas en función al tipo y uso de suelo. En el marco del presente estudio se utiliza información del PRUT para identificar el tipo y el uso de suelo. El cruce de ambas variables es realizado conforme al siguiente criterio:

Tabla 2 Criterio para la determinación del Número de Curva (CN) en base al tipo y uso de suelo

USO ESTIMADO SEGÚN PRUT (Banco Mundial & MAG-Paraguay, 1995)	**RECLASIFICACIÓN** (Tucci, 1993)				
		A	**B**	**C**	**D**
Tierras Agrícolas	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Pecuarias	Chácaras Normais	56	75	86	91
Tierras Forestales de Producción	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Forestales de Protección	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Silvestres Protegidas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas de Conservación Ecológica Especial	Humedales	80	85	90	95
Campos Bajos Inundados	Humedales	80	85	90	95
Asentamientos Indígenas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Urbanas	Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Agua	Agua	100	100	100	100

En las siguientes Figuras se pueden observar el tipo de suelo, uso de suelo y el número de curva correspondiente al área de la cuenca de aporte.

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

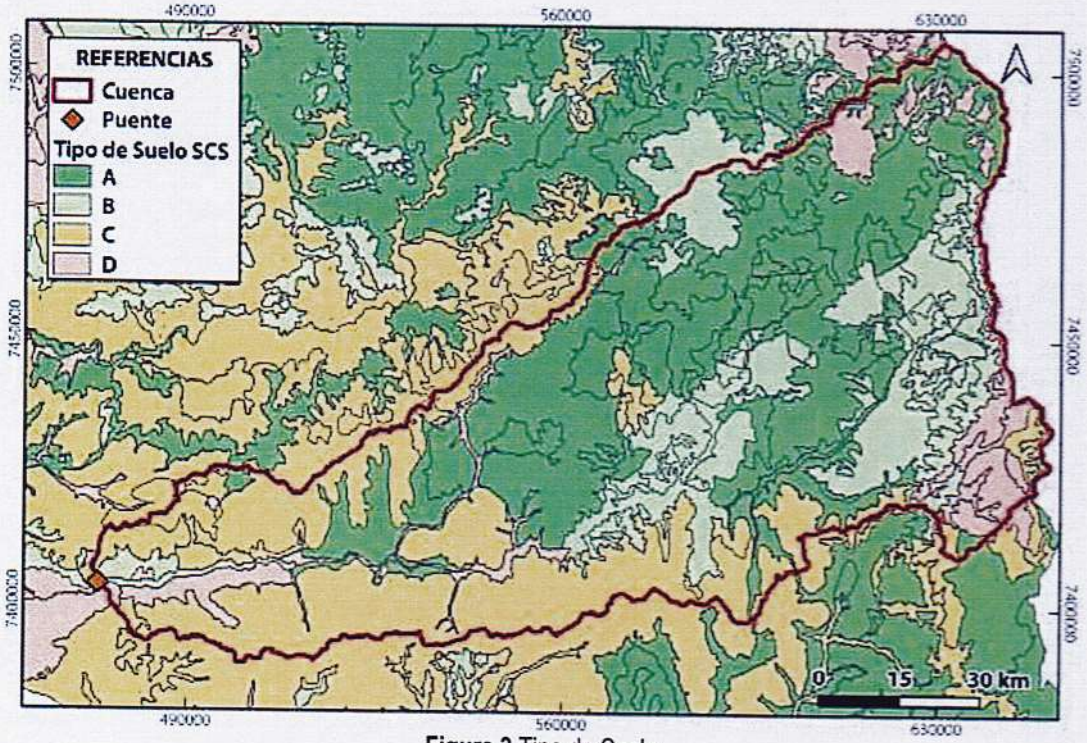

Figura 3 Tipo de Suelo

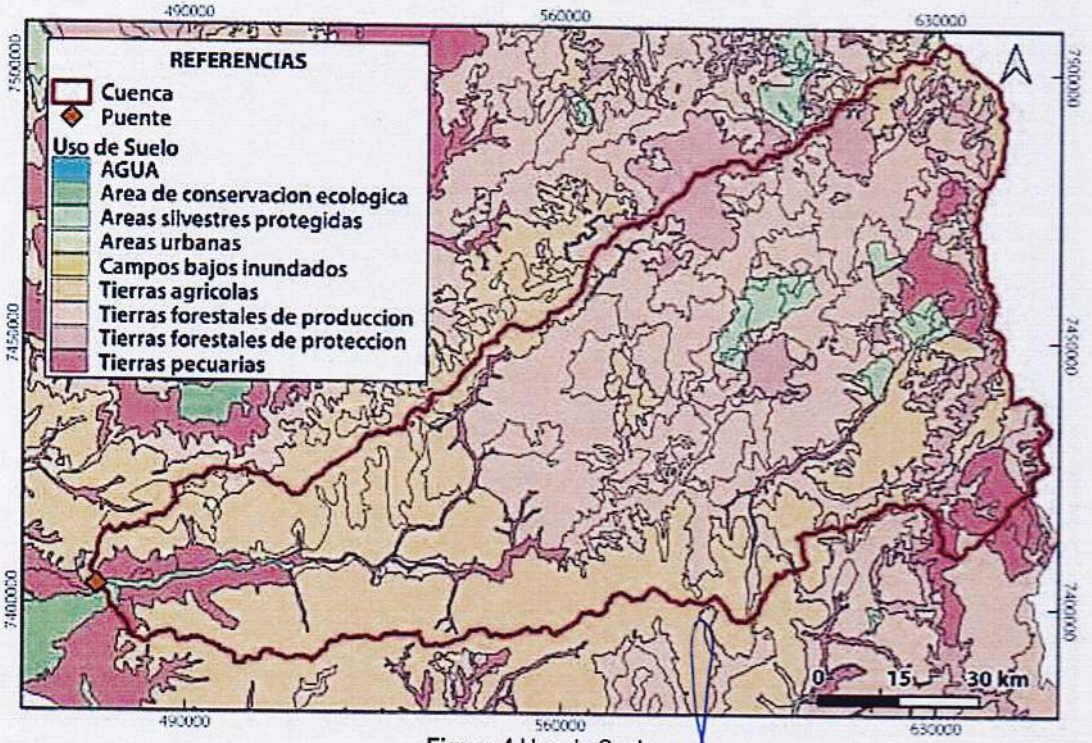

Figura 4 Uso de Suelo

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

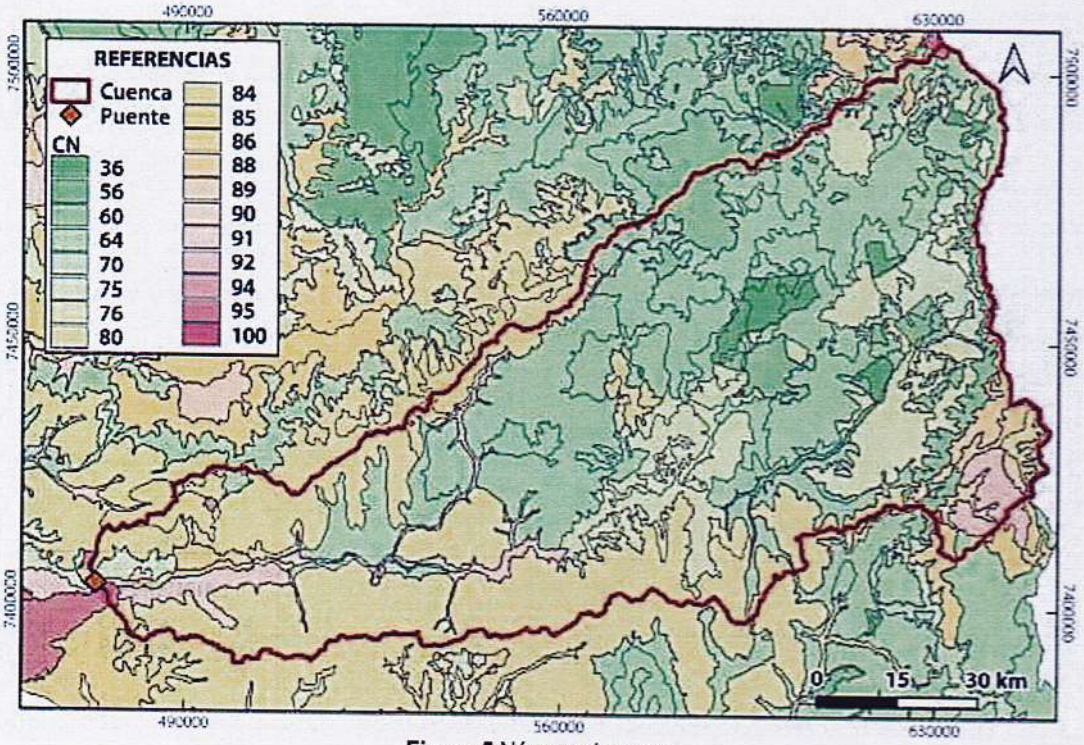

Figura 5 Número de curva

Promediando los valores de CN dentro del área de la cuenca se obtiene el valor finalmente utilizado, que se muestra en la Tabla 4.

iii) ***Factor de Pico (PRF)***, el cual refleja la atenuación del pico del hidrograma en función a las pendientes del terreno. De acuerdo con Wanielista, Kersten e Eaglin (1997) los valores típicos de factor pico asociados a cuencas con distintas características son los siguientes:

Tabla 3 Criterio para selección del Factor de Pico

DESCRIPCIÓN GENERAL	FACTOR DE PICO
Áreas Urbanas; Pendientes Pronunciadas	575
Valor Típico del SCS	484
Urbano/Rural Mixto	400
Rural, Colinas	300
Rural, Pendientes Leves	200
Rural, Muy Plano	100

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

2.4 Estimación del caudal de diseño

En base a los parámetros calculados para la implementación del HUT del SCS, se estima el caudal de diseño y se muestra el hidrograma obtenido en la siguiente figura.

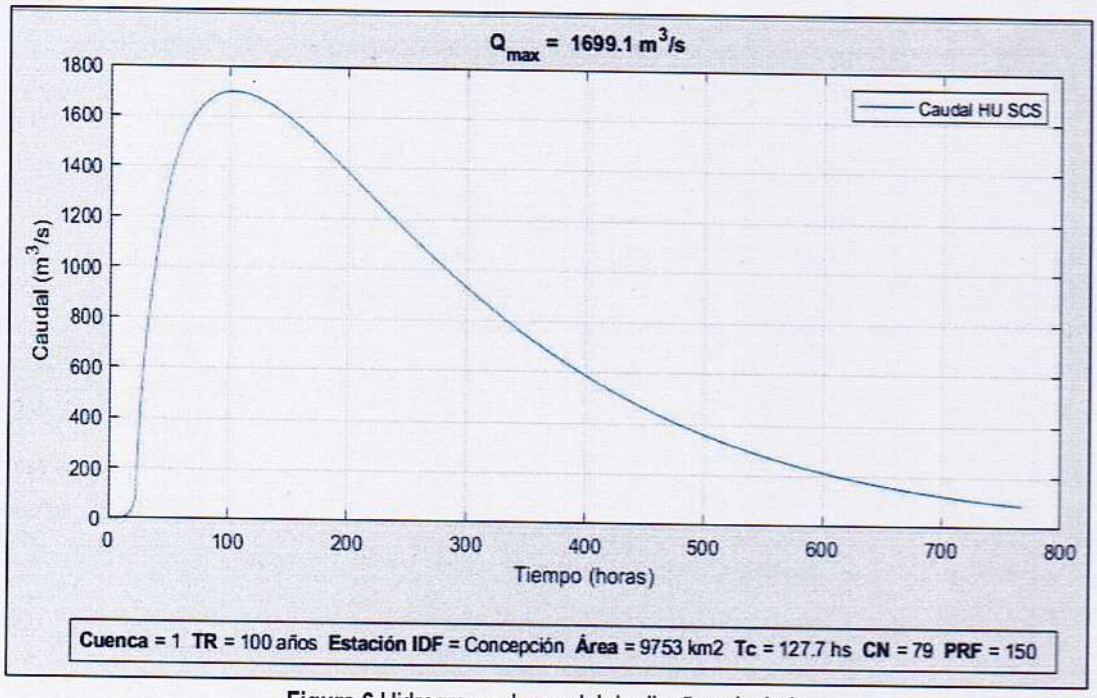

Figura 6 Hidrograma de caudal de diseño calculado

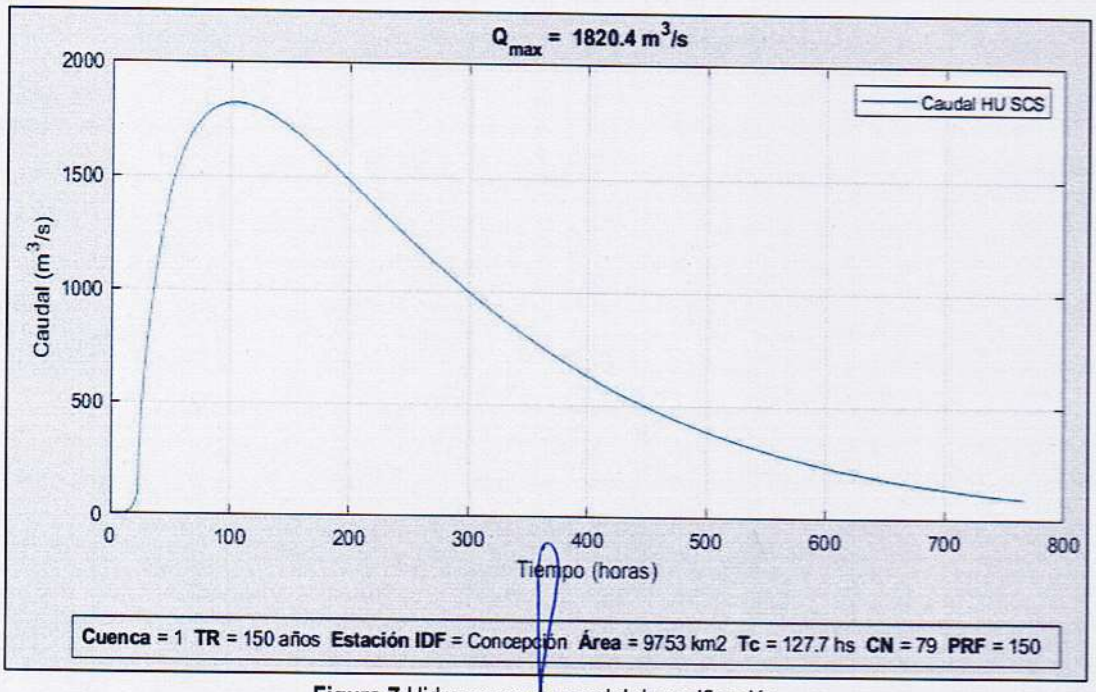

Figura 7 Hidrograma de caudal de verificación

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

Tabla 4 Tabla resumen de parámetros utilizados y caudales obtenidos

Parámetro	Valor
Cuenca	Ypane
Área (km2)	9753
Longitud (km)	277
Pendiente media (%)	0.06
Fórmula de Tc adoptada	Kirpich
Tc (hr)	127.7
CN	79
PRF	100
TR de Diseño (años)	100
Duración Tormenta (hrs)	48
Estación IDF	Concepción
Q diseño (m3/s)	1699
Q verificación (m3/s)	1820

3. ESTUDIOS HIDRÁULICOS

En este capítulo se describe el dimensionamiento del puente, realizado con el software de simulación hidráulica HEC-RAS. El dimensionamiento del puente consiste en obtener la geometría y altura óptima de la obra para que satisfaga los requerimientos mencionados en la introducción. El caudal de diseño corresponde al caudal calculado en el apartado de Hidrología.

3.1 Metodología de cálculo y criterios de diseño

La simulación del sistema terraplén + puente se lleva a cabo con el software de simulación hidráulica HEC RAS, del Cuerpo de Ingenieros de la Ejército de los EEUU (HEC, USACE). Se siguen los procedimientos recomendados en el Manual de Referencia Hidráulica del HEC-RAS para el diseño, así como también del Manual de Carreteras del Paraguay (MCP), el Manual de Puentes, y el documento Bridge Analysis Using HEC-RAS (TP-151).

Se procede a simular el efecto de un puente y terraplén en el sitio de emplazamiento, bajo el escenario de un caudal asociado a la precipitación de diseño, el cual fue calculado en el apartado anterior. Para el análisis de resultados se utilizan los siguientes criterios:

- Criterio 1: Longitud de puente tal que no produzca pérdida de carga hidráulica (dH) máxima de 0,50 m (C1, recomendado por BOE-60)
- Criterio 2: Nivel de Apoyo de Vigas (N.A.V) situado a por lo menos 1,00 m por encima del nivel de aguas máximas (N.A.M) calculado para un periodo de recurrencia de 100 años (C2)

El HEC RAS calcula el Nivel de Agua (N.A.) para cada caudal calculado mediante las ecuaciones de hidráulica que se describen con suficiente detalle en el Manual de Referencia Hidráulica del programa. Para llevar a cabo estos cálculos el programa requiere:

1. Geometría del Río: longitud, pendiente, forma de la sección transversal
2. Coeficiente de rugosidad: de la Ecuación de Manning, parámetro que representa la capacidad de escurrimiento del agua en el canal.

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

3. Condición de borde: en los límites del tramo de estudio, como se encuentra el río.

3.2 Estimación de parámetros

Los parámetros principales que inciden en la simulación hidráulica son:

i) **Coeficiente de rugosidad de Manning:** se utiliza el método de Cowan (1956) para el cálculo de este valor. El método de Cowan permite calcular un valor de rugosidad conforme a la siguiente ecuación.

$$n = (nb + n1 + n2 + n3 + n4)\, m$$

Donde:
nb: valor base de *n* para un canal recto, uniforme y de un material determinado.
n1: valor que se adiciona por efectos de irregularidades en el suelo.
n2: valor que se adiciona por la variación de la sección transversal a lo largo del canal.
n3: valor que se adiciona teniendo en cuenta obstrucciones.
n4: valor que se adiciona teniendo en cuenta la vegetación.
m: factor de corrección que tiene en cuenta los meandros existentes.

El valor adoptado para el coeficiente de rugosidad en la planicie es de 0.1 y en el cauce es de 0.032.

ii) **Extensión de las secciones transversales:** para una correcta simulación del sistema cauce con planicie de inundación es necesario contar con una sección transversal que contemple toda la extensión de la planicie en ambas márgenes. Además, es necesario contar con secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del puente, espaciadas según criterios específicos, tal como se muestra en la **Figura 8**. Para este estudio se recibieron datos de topografía para la generación de secciones transversales, cuya extensión se muestra en la **Figura 9**.

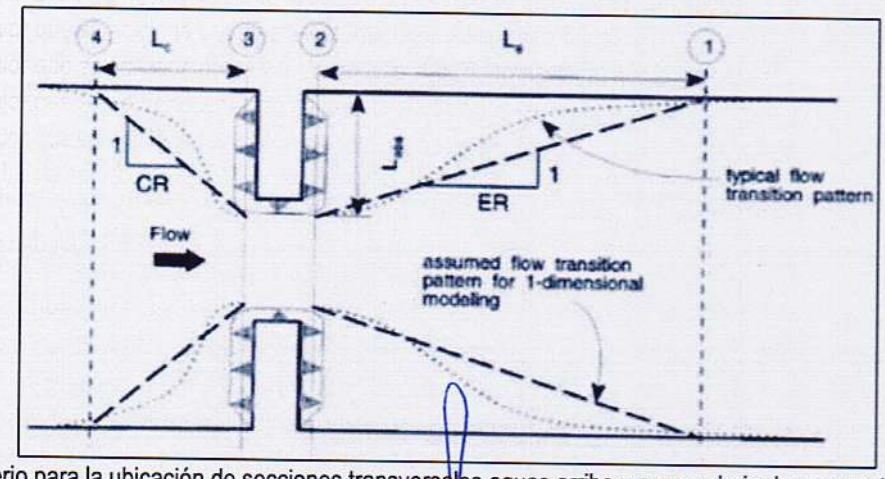

Figura 8 Criterio para la ubicación de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de un puente. Extraída del Documento TP-151, del Manual del HEC RAS

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

Figura 9 Puntos de elevación levantados por el equipo de topografía, con los cuales se generan las secciones transversales

3.3 Dimensionamiento del puente y cálculo del Nivel de Aguas Máximas (NAM)

El modelo en HEC RAS se arma a partir de la topografía del cauce y la rugosidad calculada más arriba. Posteriormente se ingresa al modelo la geometría del puente y terraplén. Como condición de borde de aguas arriba se tiene el caudal de diseño calculado, de Tr 100 y Tr 150 años, para diseño y verificación respectivamente.

Como condición de borde aguas abajo en general se utiliza flujo normal. Se simulan distintas configuraciones de puentes de manera a identificar la geometría óptima que satisfaga los criterios mencionados (niveles adecuados, sobre elevación inferior a 50 cm con respecto al escenario natural, velocidades razonables, entre otros).

En las siguientes Figuras se muestran los resultados de la modelación hidráulica realizada. En la **Figura 10** se muestra la sección transversal del puente. Por otro lado, en la **Figura 11** se muestra el perfil longitudinal del río en las inmediaciones del puente, así como la sobre elevación causada.

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

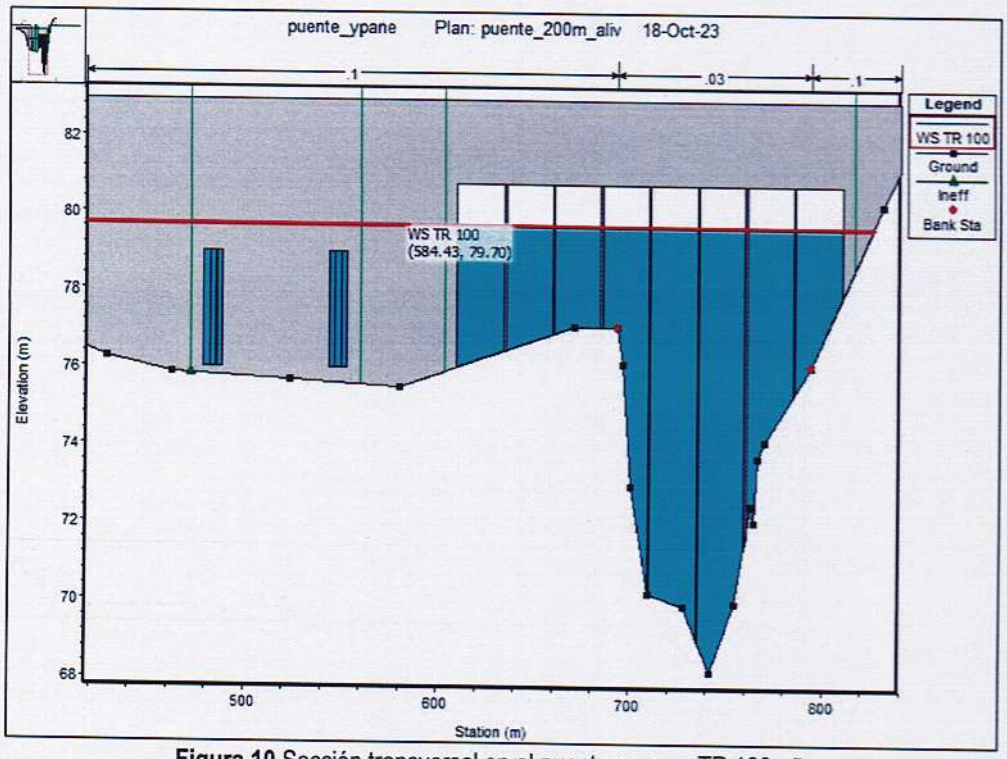

Figura 10 Sección transversal en el puente para un TR 100 años

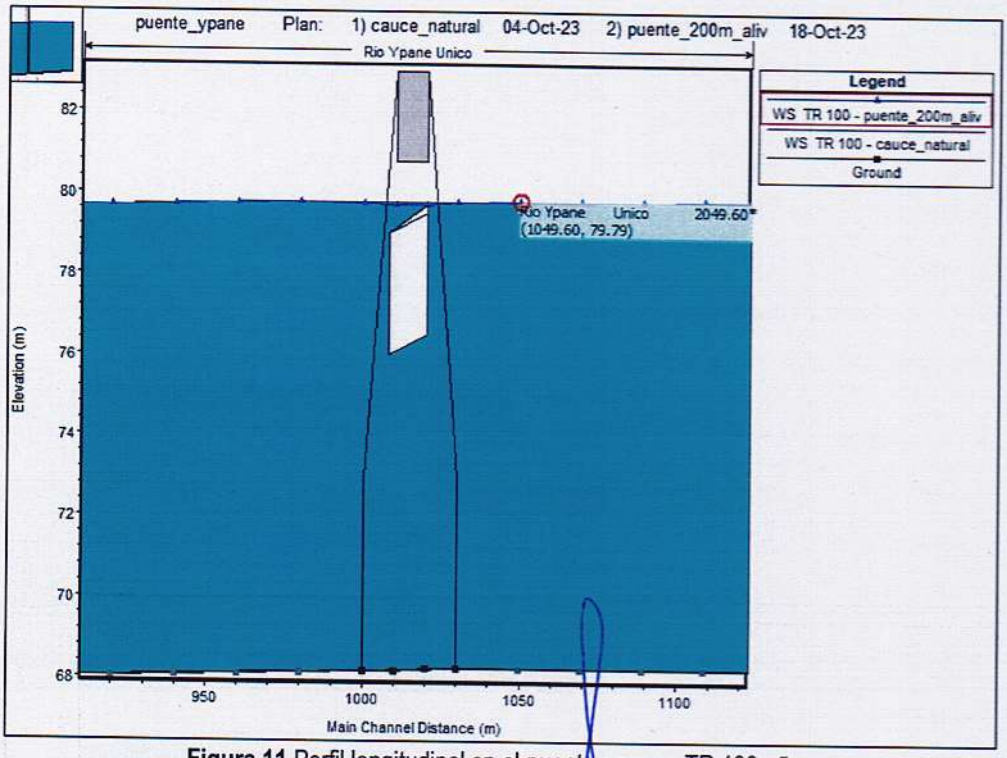

Figura 11 Perfil longitudinal en el puente para un TR 100 años

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

En la siguiente tabla se resume en detalle los resultados hidráulicos obtenidos y la obra finalmente recomendada.

Tabla 5 Resumen de resultados obtenidos mediante el software utilizado

HEC-RAS Plan: puente_200m_aliv River: Rio Ypane Reach: Unico Profile: TR 100												
Reach	River Sta	Profile	E.G. Elev	W.S. Elev	Crit W.S.	Frctn Loss	C & E Loss	Top Width	Q Left	Q Channel	Q Right	Vel Chnl
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m/s)
Unico	2049.60*	TR 100	79.92	79.79	74.66	0.00	0.00	490.89	307.84	1319.31	72.85	1.81
Unico	2030	TR 100	79.92	79.76	74.69			463.64	270.23	1369.53	60.24	1.95
Unico	2015 BR U #1	TR 100	79.91	79.71	74.77	0.00	0.00	193.00	194.13	1426.26	54.59	2.12
Unico	2015 BR D #1	TR 100	79.91	79.70	74.43	0.00	0.00	193.00	96.03	1561.46	17.50	2.06
Unico	2000	TR 100	79.90	79.75	74.32	0.00	0.01	468.14	210.69	1475.75	13.56	1.85
Unico	1855.00*	TR 100	79.89	79.76	74.28	0.00	0.00	507.52	291.96	1394.45	13.59	1.76

Tabla 6 Resultados obtenidos

Puente	Q 100 (m3/s)	NAM TR100 Natural (m)	NAM TR100 Puente (m)	NAV (m)	Obra Propuesta
Ypane	1699	79.78	79.79	80.79	Puente de 200 m (8 vanos de 25 m) + 2 AC3 3.0 x 3.0 m

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

4. ESTUDIOS DE SOCAVACIÓN

En este capítulo se presenta el cálculo de la socavación potencial, la cual podría darse en el escenario más desfavorable si no se tienen medidas de protección. Esta profundidad máxima corresponde a una situación que asume que una estratigrafía más o menos continua con una profundidad de roca por debajo de la profundidad calculada.

El cálculo de socavación potencial se lleva a cabo utilizando el software HEC-RAS. Se utiliza el caudal de diseño calculado en hidrología y la geometría de puente seleccionada en el capítulo anterior. Como no se presentan aliviaderos en este caso, el caudal efectivo es el total del caudal de diseño.

En base a los estudios geotécnicos realizados en las inmediaciones del puente, se elaboran las curvas granulométricas para cada punto de sondeo, con las cuales se estiman los parámetros D50 y D95 del material del cauce.

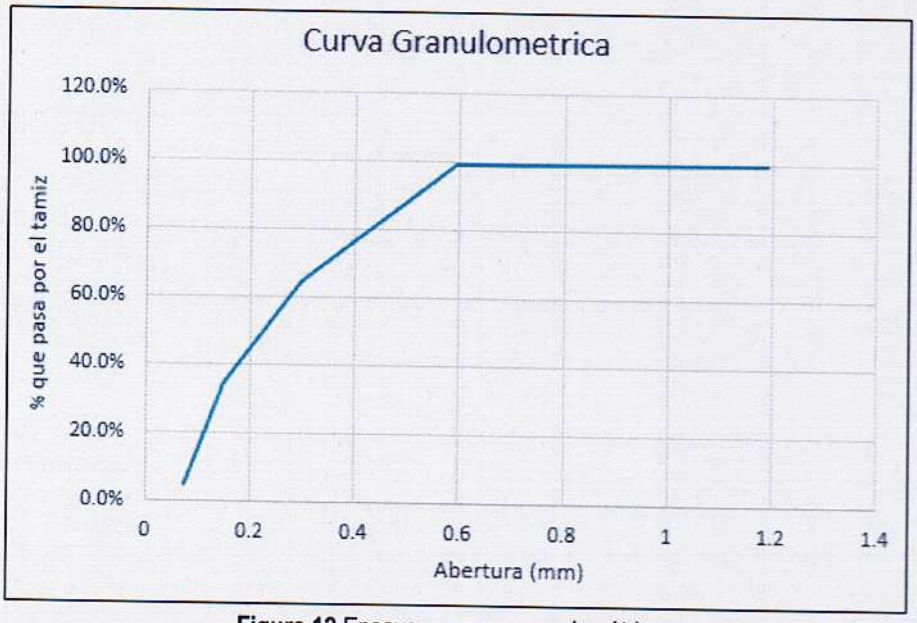

Figura 12 Ensayo y curvas granulométricos

Utilizando las curvas generadas, se tiene que D50 = 0.17 mm y D95= 0.56 mm.

En base a estas asunciones, se ingresan los datos al modelo hidráulico y se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente Tabla.

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

Tabla 7 Parámetros y resultados de la socavación por contracción

SOCAVACIÓN POR CONTRACCIÓN			
DATOS DE ENTRADA	Margen Izq.	Canal	Margen Der.
Profundidad media (m):	2.43	7.19	2.18
Velocidad de aproximación (m/s):	0.17	1.17	0.16
Profundidad media en puente (m):	4.42	8.41	4.51
Caudal en puente (m3/s):	192.30	1428.59	54.11
Ancho del puente (m):	89.13	79.20	24.67
Tamaño del grano D50 (mm):	0.17	0.17	0.17
Caudal de aproximación (m3/s):	40.02	1420.21	214.78
Ancho de aproximación (m):	95.52	168.23	616.03
Coeficiente K1:	0.69	0.69	0.64
RESULTADOS DE SOCAVACIÓN POR CONTRACCIÓN	Margen Izq.	Canal	Margen Der.
Profundidad de Socavación Ys (m):	0.07	3.74	0.05
Velocidad Critica (m/s):	0.40	0.48	0.39
Ecuación	Clear	Live	Clear

Tabla 8 Parámetros y resultados de la socavación en estribos

SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS		
DATOS DE ENTRADA	Margen Izq.	Margen Der.
Estación al pie del puente (m):	610.00	810.00
Estación en la sección de aproximación (m):	610.17	813.92
Longitud de estribo (m):	21.03	681.37
Profundidad al pie (m):	4.82	4.02
Coeficiente de forma K1	1.00 (Estribo vertical)	1.00 (Estribo vertical)
Grado de inclinación (Grado):	90.00	90.00
Coeficiente de inclinación K2:	1.00	1.00
Longitud proyectada L' (m):	21.03	681.37
Profundidad media obstruida Ya (m):	2.43	2.47
Caudal obstruido Qe (m3/s):	8.81	531.64
Área obstruida Ae (m2):	51.09	1681.62
RESULTADOS DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBO	Margen Izq.	Margen Der.
Profundidad de socavación Ys (m):	4.24	11.78
Froude #:	0.04	0.06
Ecuación:	Froehlich	HIRE

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal

Tabla 9 Parámetros y resultados de la socavación en pilas

SOCAVACIÓN EN PILA	
DATOS DE ENTRADA	**Valor**
Forma de pila	Pila eliptico
Ancho de pila (m)	1.00
Tamaño de grano D50 (mm)	0.17
Profundidad aguas arriba (m)	10.63
Velocidad aguas arriba (m/s)	2.35
Coeficiente de forma de nariz	1.00
RESULTADOS DE SOCAVACIÓN EN PILAS	
Profundidad de socavación Ys (m):	2.68
Froude #:	0.23
Ecuación:	CSU

Cabe resaltar que estos resultados representan una socavación "teórica" y no precisamente sucederá en la práctica, ya que también depende de la profundidad en donde se encuentre el firme o roca. Se deberán prever medidas de protección tales como, colchoneta reno para el canal y gaviones o enrocados tipo rip rap para los estribos.

En la siguiente Figura se puede observar el resultado gráfico de los estudios de socavación.

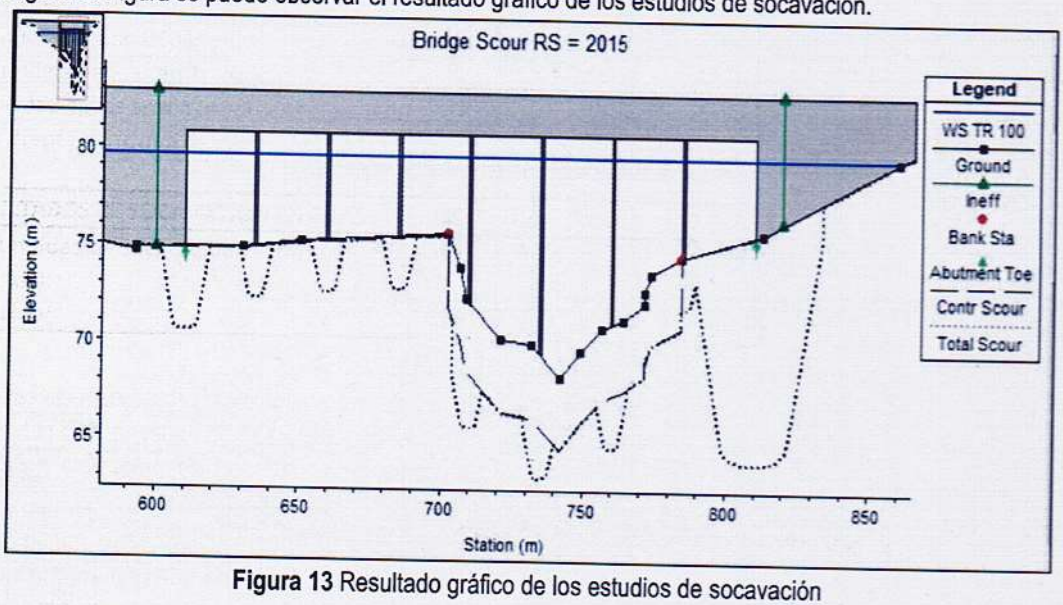

Figura 13 Resultado gráfico de los estudios de socavación

En la siguiente Tabla se muestra un resumen de los resultados de la socavación.

Tabla 10 Resumen resultados socavación

Socavación por contracción (m)			Socavación en estribos (m)		Socavación estribo Izq + Socavación por contracción (m)	Socavación estribo Der + Socavación por contracción (m)
Margen Izq.	Canal	Margen Der.	Margen Izq.	Margen Der.		
0.07	3.74	0.05	4.24	11.78	4.32	11.83

ING. TEODORO RIVEROS
Representante Legal