

Informe Final

Proyecto de pasantía

“Diseño hidráulico Segundo Puente Portales”

Ingeniería Civil en Obras Civiles

Iván Alejandro Uribe Marín

ivuribe@alumnos.uai.cl

Profesora: Mary Fernanda Milla Cerda

mary.milla@edu.uai.cl

Resumen ejecutivo

El presente informe tiene como objetivo presentar el desarrollo del proyecto del alumno Iván Uribe Marín, quién realizó la pasantía en la empresa Orbe SPA, la cual es una empresa multidisciplinaria en el ámbito de la Ingeniería Civil, destacándose en el área de hidráulica y vialidad. Por esta razón, este informe comienza con una breve descripción de dicha empresa, además se muestra el proceso desde un comienzo, es decir, desde la detección de un problema hasta una solución de dicha problemática, incluyendo un análisis de este. El problema principal tiene que ver con la saturación proyectada en el Puente Portales, el cual se ubica en la comuna de Puente Alto, Región Metropolitana. Específicamente se encuentra en la intersección de las avenidas Tobalaba y Diego Portales en dicha comuna.

Esta proyección de saturación se debe a la construcción de un proyecto inmobiliario llamado “Ciudad del Este”, el cual le pertenece a la Inmobiliaria Monte Aconcagua SA y consta de 1204 viviendas adicionales a las ya existentes, por ende, es evidente un aumento de población y como consecuencia un aumento de flujo vehicular. Dado esto, se realizó un Estudio de Impacto sobre el Sistema de Transporte Urbano (EISTU), cabe destacar que este estudio actualmente se llama Informe de mitigación vial (IMIV), en el cual se estudian y se proyectan las consecuencias que tendrá el aumento del flujo vehicular en el Sistema de Transporte en la zona. En este estudio, se llevó a cabo un conteo del tráfico en la zona, registrando un total de 2.675 vehículos durante la hora punta mañana. Este hallazgo ha destacado la necesidad de implementar un plan de mitigación para reducir los riesgos de congestión vehicular debido al crecimiento de la población. Para lo cual se le solicitó a la empresa Orbe SPA realizar el diseño de un proyecto hidráulico que permita la continuidad de la Avenida Diego Portales atravesando el Canal San Carlos, ubicado entre la Avenida Tobalaba y Calle Sánchez Fontecilla, en la comuna de Puente Alto. En consecuencia, el objetivo de este informe es presentar la mejor alternativa de solución para resolver lo anteriormente mencionado.

Abstract

The purpose of this report is to present the development of the project carried out by student Iván Uribe Marín during his internship at Orbe SPA, a multidisciplinary company specializing in Civil Engineering, particularly in the fields of hydraulics and roadways. Therefore, this report begins with a brief description of the company. Additionally, it outlines the process starting from problem identification to problem resolution, including an analysis thereof.

The primary issue revolves around the projected saturation at Portales Bridge, located in the Puente Alto commune, Metropolitan Region. Specifically, it is situated at the intersection of Tobalaba and Diego Portales avenues within that commune. This projected saturation is a consequence of the construction of a real estate project named "Ciudad del Este," owned by Inmobiliaria Monte Aconcagua SA, which entails the addition of 1204 new dwellings to the existing ones, resulting in an evident population increase and consequently, a rise in vehicular flow.

To address this, an Urban Transport System Impact Study (EISTU), currently termed as the Road Mitigation Report (IMIV), was conducted. This study examines and projects the repercussions of increased vehicular flow on the Transportation System in the area. During this study, traffic in the area was monitored, recording a total of 2,675 vehicles during the morning peak hour. This finding underscored the necessity of implementing a mitigation plan to alleviate the risks of traffic congestion due to population growth. Consequently, Orbe SPA was commissioned to design a hydraulic project facilitating the continuity of Diego Portales Avenue across the San Carlos Canal, situated between Tobalaba Avenue and Sánchez Fontecilla Street in the Puente Alto commune. Thus, the objective of this report is to present the most viable solution to address the aforementioned issues.

ÍNDICE

Resumen ejecutivo.....	2
1. Introducción.....	7
1.1 Descripción de la empresa.....	7
1.2 Contexto.....	7
1.3 Problemática.....	11
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. Estado del Arte.....	14
3.1 Análisis Comparativo entre los modelos Hec-Ras e Iber en la evaluación hidráulica de puentes 14	
3.2 Estudio de tráfico del proyecto “Mejoramiento del puente Villena Rey y construcción del nuevo puente mellizo – distrito de Miraflores – Lima”.....	15
3.3 Estudio Factibilidad Construcción Obras Aguas Lluvias, Sector Sur-Oriente Santiago R.M.	15
4. Soluciones Propuestas.....	15
4.1 Solución 1: Puente de 34 metros con fundación directa.....	15
4.2 Solución 2: Puente de 42 metros con fundación directa.....	16
4.3 Solución 3: Puente de 34 metros sobre fundación indirecta.....	17
4.4 Solución Escogida.....	19
4.5 Matriz de riesgo.....	19
5. Solución a implementar.....	21
6. Factibilidad Económica.....	23
6.1 Rentabilidad del proyecto.....	23
7. Metodología.....	27
7.1 Realizar estudio hidrológico que abarque el 100% del tramo del Canal San Carlos identificado. Antes de octubre de 2023.....	28
7.2 Definir las condiciones de borde que permitan una revancha mínima de 1 m para un caudal con período de retorno de 100 años para obtener la aprobación de la Sociedad del Canal Del Maipo antes de octubre de 2023.....	29
7.3 Diseñar la obra hidráulica de tal manera que no exista modificación de cauce, de aceras ni caminos existentes antes del 30 de septiembre de 2023.....	29

7.4	Cumplir con el 100 % del “checklist” de documentos necesarios para obtener la aprobación de la Dirección General de Aguas (DGA) antes del 1 octubre de 2023.....	30
8.	Medidas de Desempeño	32
9.	Desarrollo del proyecto.....	33
9.1	Visita a Terreno	33
9.2	Estudio Hidrológico	33
9.3	Estudio Hidráulico	33
9.4	Compilación de Información y Preparación de Carpeta de Entrega	34
10.	Resultados cualitativos y cuantitativos	34
10.1	Caudales según estudio hidrológico:	34
10.2	Nivel de Agua Máxima según estudio hidráulico:	34
11.	Conclusiones y discusiones	35
12.	Bibliografía	37
13.	Anexos.....	38
13.1	Ecuaciones para determinar el objetivo específico 2.1	38
13.2	Ecuaciones para determinar el objetivo específico 2.3	47
13.3	Criterios para selección de alternativa de solución	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación Proyecto Ciudad del Este.....	8
Figura 1-2:	Ubicación de puntos de conteo de flujo vehicular.	9
Figura 4-1:	Esquema Puente Portales alternativa 2	16
Figura 5-1:	Sección transversal del tablero propuesto.....	21
Figura 5-2:	Perfil Longitudinal del Puente Portales propuesto.	22
Figura 7-1:	Diagrama de flujo del proyecto.....	31
Figura 13-1:	Sección por franjas.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Resumen de mediciones Punta Mañana Laboral.	10
Tabla 1-2:	Resumen de Mediciones punta tarde día laboral.	10
Tabla 1-3:	Flujo de Saturación de Tipo de Pista (ADE/hr)	11
Tabla 1-4:	Factor de equivalencia según tipo de vehículo.	11

Tabla 4-1: Ponderación de soluciones.....	19
Tabla 4-2: Medidas de mitigación	20
Tabla 6-1: Presupuesto Puente Portales proyectado.	25
Tabla 10-1: Resumen de Caudal adoptado.	34
Tabla 10-2: Resumen de caudal y N.A.M.	34
Tabla 10-3: Puente Colonial con precipitación del día 23 de agosto de 2023.	35
Tabla 11-1: Resumen de indicadores IR.	36
Tabla 13-1: Tabla de Cowan para determinar el coeficiente de Manning.....	47

1. Introducción

1.1 Descripción de la empresa

La pasantía se desarrolló en la empresa Orbe S.P.A. Dicha empresa es una consultora especializada en brindar servicios de asesoramiento y ejecución de proyectos en el campo de la ingeniería civil. Con 8 años de experiencia activa en el mercado, esta organización fue fundada en el año 2015 como un resultado natural de la continuidad de las actividades empresariales desarrolladas por su destacado equipo de profesionales altamente capacitados y comprometidos.

Orbe S.P.A. tiene una gran fortaleza en generación y desarrollo de proyectos multidisciplinarios de ingeniería y construcción. Su enfoque se basa en la creación y ejecución de iniciativas que se distinguen por su alto nivel de complejidad y exigencia técnica, buscando siempre alcanzar los más altos estándares de calidad. Dentro de las áreas de la ingeniería civil en donde Orbe participa, se destaca en Hidráulica y vialidad, en donde se ha ganado su reputación en el sector debido a su capacidad de ofrecer soluciones innovadoras y eficientes a los desafíos más complejos. Sin embargo, también ha participado en diversos proyectos de mecánica de suelos e ingeniería eléctrica. Su cumplimiento de los plazos establecidos y el cumplimiento de los más estrictos requisitos normativos les ha permitido consolidarse como un referente confiable en la industria de la ingeniería civil. Los proyectos realizados por la empresa pueden revisarse en su sitio web (www.orbespa.cl).

1.2 Contexto

La empresa Inmobiliaria Monte Aconcagua SA, desde el año 2018, está desarrollando un proyecto habitacional llamado “Ciudad del Este” en la comuna de Puente Alto, específicamente en las calles Av. Diego Portales y Av. Sánchez Fontecilla. Este proyecto contempla la construcción de 1204 viviendas adicionales a las ya existentes en diferentes lotes. Su construcción se divide en 3 etapas en donde la primera etapa contempla la construcción de 385 viviendas extras; la etapa 2 contempla 364 viviendas y la etapa 3 proyecta la construcción de 455 viviendas adicionales a las ya existentes. En total suman las 1204 viviendas estipuladas. Actualmente se está llevando a cabo la etapa 1 y se estima la entrega de las casas asociadas a esta etapa el mes de diciembre del año 2023. A continuación, se muestra la ubicación de este proyecto.

Figura 1-1: Ubicación Proyecto Ciudad del Este



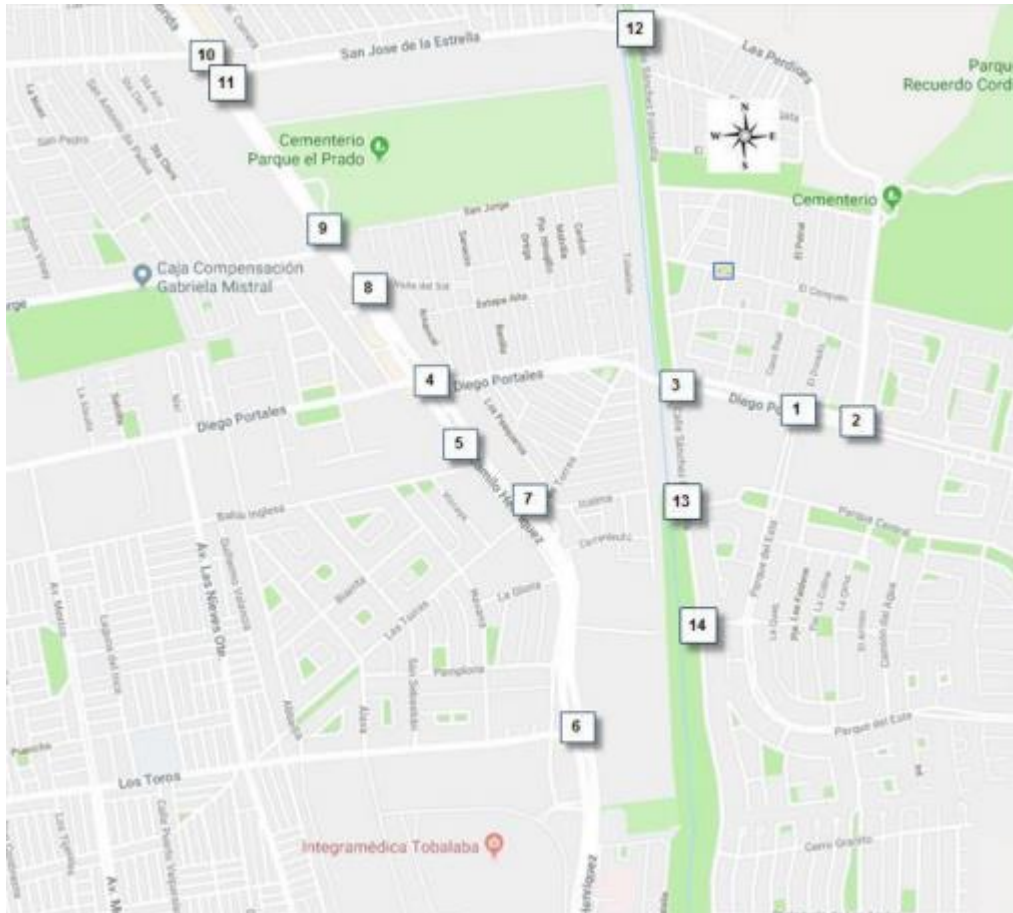
Fuente: "EISTU Ciudad del Este"

Debido al impacto que generaría estas viviendas adicionales, en diciembre del año 2018, se realizó el "Estudio de Impacto sobre el Sistema de Transporte Urbano" (EISTU), en donde se destaca el conteo de flujo vehicular y la Generación, atracción y distribución de viajes. El conteo del flujo vehicular se hizo en diferentes puntos estratégicos en donde el punto más crítico es en la intersección de las Calles Av. Diego Portales y Av. Sánchez Fontecilla, Punto 3 de la Figura 1-2. Esto se llevó a cabo el martes 23 de octubre y jueves 25 del mismo mes en el año 2018, en horarios punta y valle. Como resultado del conteo, en el punto crítico mencionado, se obtuvo que el flujo vehicular en horario punta mañana es de 2.675 vehículos, Tabla 1-1, mientras que para la punta tarde es de 1.610 vehículos (Tabla 1-2). Estos datos se multiplicaron por un factor de equivalencia, Tabla 1-4, con el fin de transformar todos los tipos de vehículos en un vehículo equivalente y de esta manera determinar el nivel de saturación de la vía. Esto arrojó que para la punta

mañana se encuentra saturado, ya que, según el Manual de Procedimientos y metodologías de los EISTU, se considera saturado cuando se presentan más de 2.000 vehículos por hora (

Tabla 1-3)

Figura 1-2: Ubicación de puntos de conteo de flujo vehicular.



Fuente: "EISTU Ciudad del Este"

Tabla 1-1: Resumen de mediciones Punta Mañana Laboral.

RESUMEN MEDICIONES PUNTA MAÑANA LABORAL								
AUTOS	TAX. COL	TXB	BUS	BUS ARTIC.	CAM 2E	CAM + 2E	VEH	VEQ
753	16	1	17	0	7	0	794	823
0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	40	40
232	0	0	0	0	1	0	233	234
837	16	1	17	0	8	0	879	909
36	0	0	0	0	0	0	36	36
118	1	0	0	0	0	0	119	119
90	3	0	0	0	0	0	93	94
411	8	2	15	0	3	0	439	458
41	0	0	0	0	1	0	42	43
Hora:	7:30-8:30					Total	2675	2756

Fuente: EISTU "Ciudad del Este"

Tabla 1-2: Resumen de Mediciones punta tarde día laboral.

RESUMEN MEDICIONES PUNTA TARDE LABORAL								
AUTOS	TAX. COL	TXB	BUS	BUS ARTIC.	CAM 2E	CAM + 2E	VEH	VEQ
263	20	1	10	0	5	1	300	323
3	0	0	0	0	0	0	3	3
73	1	0	0	0	1	0	75	76
88	1	0	0	0	1	0	90	91
371	21	1	10	0	6	1	410	434
15	0	0	0	0	0	0	15	15
66	2	0	0	0	0	0	68	69
189	3	0	0	0	2	0	194	197
368	22	3	11	0	4	3	411	435
44	0	0	0	0	0	0	44	44
Hora:	18:30-19:30					Total	1610	1687

Fuente: EISTU "Ciudad del Este"

Usando el software TRANSYT, se modeló el impacto del proyecto 'Ciudad del Este' en la generación, atracción y distribución de viajes en tres situaciones distintas. La primera refleja la situación sin el proyecto en 2018 durante los períodos punta mañana y tarde laboral. La segunda considera el proyecto y su demanda generada. La tercera, llamada Situación con proyecto mejorada, incorpora medidas de mitigación para reducir su impacto. El modelo revela un efecto negativo en los indicadores globales, ya que la adición de nuevos viajes aumenta la saturación y las colas."

Tabla 1-3: Flujo de Saturación de Tipo de Pista (ADE/hr)

Tipo de Pista	Flujo de Saturación
Sólo Autos	2.000
Autos y Buses	1.800
Pistas con Paraderos de Actividad Baja	1.700
Pistas con Paraderos de Actividad Media	1.600
Pistas con Paraderos de Actividad Alta	1.500

Fuente: "EISTU Ciudad del Este"

Tabla 1-4: Factor de equivalencia según tipo de vehículo.

Tipo de Vehículo	Factor de Equivalencia (VEQ)
Vehículos livianos	1,00
Taxis Colectivos	1,35
Buses	2,00
Buses Articulados	3,00
Camiones 2 ejes	2,00
Camiones + 2 ejes	2,50

Fuente: "EISTU Ciudad del Este"

1.3 Problemática

Según se menciona anteriormente, específicamente en la tabla 1-3, una pista de solo autos se satura cuando el flujo es mayor a 2.000 ADE/hr. Se utiliza una pista de solo autos ya que en la tabla 1-1 se realiza la conversión de todos los tipos de vehículos a solo autos equivalentes, según los factores de conversión mostradas en la tabla 1-4. En la tabla 1-1, se muestra que el resultado del conteo fue de 2755 vehículos/hr,

lo que implica que la construcción del proyecto inmobiliario “Ciudad del Este” provocaría una saturación de alrededor de 28% sobre lo normado en el Puente Av. Diego Portales, dado esta proyección, se le exigió a la inmobiliaria realizar una serie de medidas de mitigación en la cual se destaca el Proyecto segundo puente Av. Diego Portales. Al saber que se debe construir un puente en el sector, se realizó una revisión de antecedentes.

En primer lugar, se debe destacar que dicho puente se circunscribe en un tramo urbano lo que conlleva a una limitación geométrica importante, puesto que se debe evitar un cambio de pendiente brusco entre la avenida existente y la estructura proyectada. Esto principalmente ya que transitan buses “orugas” y no contemplar este cambio de pendiente, provocaría impactos sobre el vehículo.

El puente proyectado atraviesa el Canal San Carlos, este canal es privado y pertenece a la Sociedad del Canal Del Maipo. Esto implica que no se debe modificar el cauce existente ni presentar obstáculos al flujo libre del canal, además la SCM realiza constantes proyectos sobre el canal, lo que puede implicar un cambio en la geometría o suelo.

Del punto anterior se desprende que el canal es utilizado para regadío, sin embargo, en eventos de precipitación importante, se superpondrá con el caudal provocado por aguas pluviales.

Dado todo lo anterior, es necesario realizar un estudio y diseño responsable con el fin de evitar tanto incidentes viales en el sector del puente como posibles inundaciones.

De esto, surgen las siguientes interrogantes:

- ¿Qué tipo de vía es la Avenida Diego Portales?
- ¿Cómo es el tipo de flujo?
- ¿Qué tipo de Canal es y dónde descarga?
- ¿Qué pasaría si ocurre una precipitación importante?
- ¿Se espera alguna crecida importante?
- ¿La planicie de inundación es tal que se necesitan defensas fluviales?
- ¿Es necesaria la construcción de obras de arte o aliviadores?
- ¿El tipo de suelo permite fundación directa?
- ¿Existe algún obstáculo que obstruya el flujo libre del caudal?
- ¿Existen otros proyectos aprobados que afecten directamente al canal?

Además de estas problemáticas, se suma que la zona del proyecto corresponde a una zona urbana, por lo que es menester considerar el sistema de drenaje de la comuna, particularmente en las cuencas y subcuencas que posiblemente descargan al Canal San Carlos en el tramo estudiado. La empresa Orbe Spa tiene una amplia experiencia con más de 30 proyectos de puentes en zonas rurales, sin embargo, no hay presencia de proyectos previos en zonas urbanas, con lo cual se suma un nuevo antecedente a la problemática.

Por otra parte, se realizó una solicitud de información, pidiendo el Caudal de diseño a la SCM (Sociedad del Canal del Maipo) y la cual fue resuelta mediante la carta SCM 0-96 el día 10 de abril de 2023, en la que se menciona que el caudal de diseño a considerar es de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que es este el caudal máximo que ellos transportan por dicho canal. Esto genera incertidumbre ya que no contempla la evacuación de aguas lluvias, además tampoco cuentan con antecedentes hidrológicos debido a la antigüedad de los puentes existentes en el canal. Adicionalmente, se está realizando un proyecto que considera el entubamiento del canal San Carlos, esto implica que el caudal proporcionado por la SCM fluirá por una tubería de 2 metros de diámetro, esto genera un cambio en la topografía del canal provocando un aumento de la cota de fondo del cauce, lo que conlleva a una reducción de las dimensiones del canal para el flujo de Aguas Lluvias.

Estos antecedentes provocan mayor incertidumbre ante una posible precipitación considerable, puesto que el último Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias Del Gran Santiago corresponde al año 2001, por ende, no se encuentra actualizado, lo que provoca una mayor dificultad para determinar el caudal de diseño.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

"Realizar el diseño hidráulico e ingresar formalmente "Segundo Puente Portales" que disminuya en un 28% el flujo vehicular del Puente Portales existente en horario punta antes de diciembre de 2023"

2.2 Objetivos específicos

1. Realizar estudio hidrológico que abarque el 100% del tramo del Canal San Carlos identificado. Antes de octubre de 2023.
2. Definir las condiciones de borde que permitan una revancha mínima de 1 m para un caudal con periodo de retorno de 100 años para obtener la aprobación de la Sociedad del Canal Del Maipo antes de octubre de 2023.
3. Diseñar la obra hidráulica de tal manera que no exista modificación de cauce, de aceras ni caminos existentes para obtener la aprobación de SERVIU Metropolitano antes del 30 de septiembre de 2023.
4. Cumplir con el 100 % del "checklist" de documentos necesarios para obtener la aprobación de la Dirección General de Aguas (DGA) antes del 1 noviembre de 2023.

3. Estado del Arte

3.1 Análisis Comparativo entre los modelos Hec-Ras e Iber en la evaluación hidráulica de puentes

El estudio comparativo de softwares hidráulicos (Hec-Ras e Iber) por ingenieros civiles de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado de Venezuela (Rincón et al., 2017), analiza la simulación hidráulica en ríos con estructuras como puentes, centrándose en la quebrada La Guardia. Compara conceptualmente ambos programas, evaluando su desempeño en el estudio y contrastando los resultados obtenidos. Concluye que Hec-Ras es más apropiado para geometrías simples, como canales, por su enfoque unidimensional, facilidad de entrada de datos y resultados confiables en poco tiempo. Iber, en cambio, se recomienda para flujos más complejos, como ríos con puentes de gran luz libre y múltiples cepas.

3.2 Estudio de tráfico del proyecto “Mejoramiento del puente Villena Rey y construcción del nuevo puente mellizo – distrito de Miraflores – Lima”.

El estudio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (Flores & Tumbalobos, 2017) expone la saturación vehicular crítica en el Puente Villena Rey, Miraflores, evidenciando deficiencias en la señalización y estado del puente. Ante esto, la Municipalidad autorizó un puente gemelo para mejorar el tráfico, aunque el aumento vehicular podría empeorar la situación. Se evaluaron tres escenarios: situación actual, con la propuesta y su proyección. Concluye que la propuesta mejorará significativamente el tránsito, pasando de nivel E a C, con una reducción de 15 segundos en la intersección crítica, evidenciando sus beneficios.

3.3 Estudio Factibilidad Construcción Obras Aguas Lluvias, Sector Sur-Oriente Santiago R.M.

El Estudio Factibilidad Construcción Obras Aguas Lluvias, Sector Sur-Oriente Santiago R.M. (Conic-BF, 2017) destaca un aspecto crucial: desde la creación del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago en 2001, el sector Sur-Oriente de Santiago ha sufrido notables cambios debido al aumento de población y a un intenso proceso de urbanización. Este análisis revela discrepancias entre las condiciones de drenaje y evacuación de aguas lluvias previstas en el plan y la realidad actual en Puente Alto. En síntesis, los cambios en el uso del suelo, la construcción de nuevas infraestructuras de evacuación de aguas lluvias tras la elaboración del plan original, junto con los problemas de inundación existentes, demandan una actualización de los estudios en una parte significativa de Puente Alto. Esta actualización es crucial para modernizar el Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago.

4. Soluciones Propuestas

Las soluciones propuestas se basan en el estudio realizado por Héctor Ventura & Asociados, empresa subcontratada por Orbe para la realización del estudio de mecánica de suelos del Canal San Carlos. Este estudio fue recibido por Orbe spa el día 19 de junio de 2023. En base a esto, se presentan opciones considerando información recopilada de estudios y experiencia de ingenieros superiores, buscando la mejor solución que cumpla normativas, recomendaciones y sea coste-eficiente para la empresa.

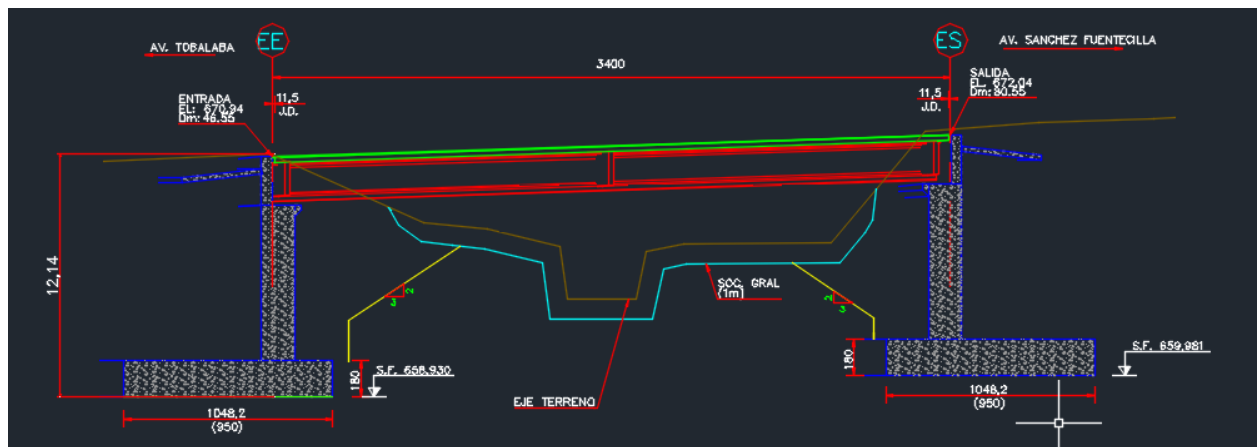
4.1 Solución 1: Puente de 34 metros con fundación directa.

Como primera alternativa, se propone la realización de un puente con una Luz libre de 31.6 metros, es decir, la distancia de sus estribos debe ser de 31.6 metros y una longitud total de 34 metros. Esta distancia se determina debido a la ubicación de los estudios de suelos (sondajes) y para igualar las condiciones del

punto existente. Por otra parte, al ser un canal no revestido, el sello de fundación deberá asegurar un empotramiento mínimo de 1 metro bajo el lecho del Canal San Carlos, y a una profundidad de 12 metros de la superficie del terreno. En base a los resultados de las socavaciones, este sello de fundación deberá quedar a no menos de 2 metros bajo el nivel de socavación. Por lo que, en esta solución, la fundación sería del tipo directa.

En la siguiente figura se presenta un esquema de la solución planteada.

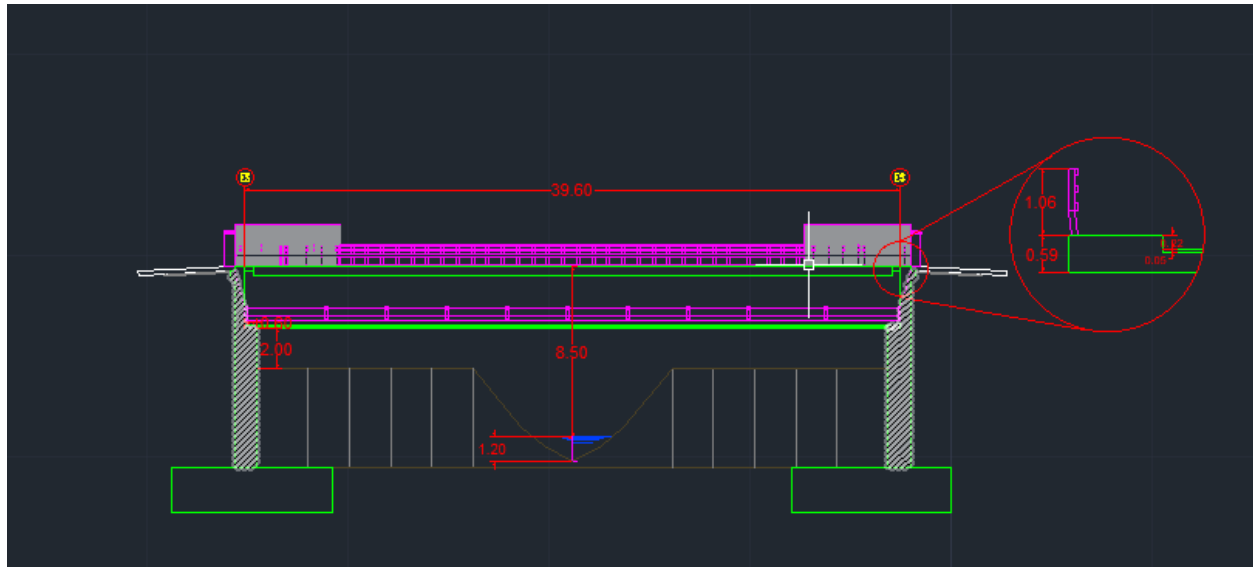
Figura 4-1: Esquema Puente Portales alternativa 1



4.2 Solución 2: Puente de 42 metros con fundación directa.

Otra alternativa de solución corresponde a una luz libre de 39.6 metros. Esto ya que se toman las mismas condiciones que en el punto 4.1, sin embargo, se alejan 4 metros cada uno de los estribos, esto con el fin de que dichas estructuras no se entrometan en el cauce, garantizando que no sean necesarias las defensas fluviales. Esta alternativa mantiene las condiciones de fundación que la alternativa 1, por lo que variaría el coste del proyecto, ya que se extendería 8 metros el tablero del puente.

Figura 4-2: Esquema Puente Portales alternativa 2.

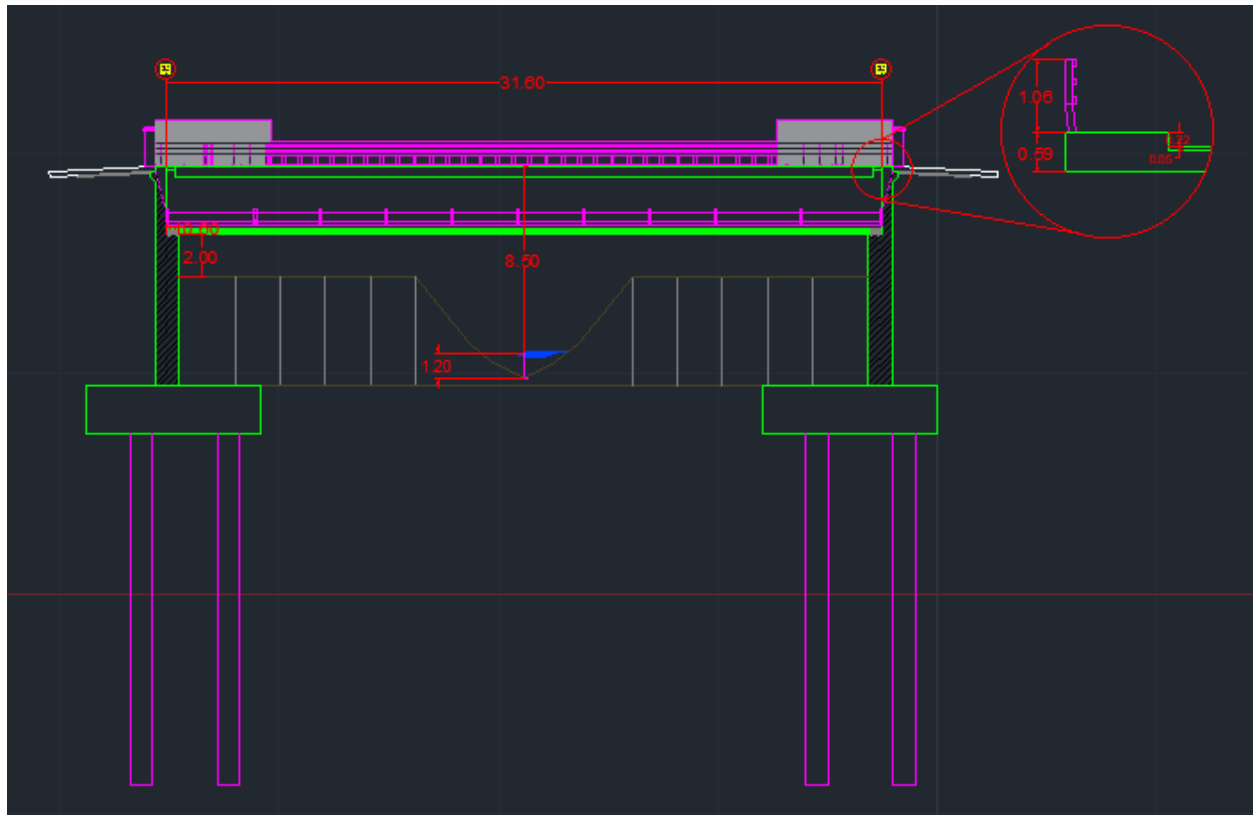


4.3 Solución 3: Puente de 34 metros sobre fundación indirecta.

La siguiente alternativa propone una fundación profunda, mediante pilotes pre-excavados de hormigón armado. En base al estudio de suelo recibido esto se puede realizar aumentando la profundidad de fundación a 18 metros bajo la superficie del terreno.

Esta alternativa mantiene la luz libre de 31.6 metros por lo que los estribos estarían entrometidos en el cauce, con lo cual es necesario la realización del modelo hidráulico para definir la utilización de defensas fluviales. Por otra parte, al utilizar fundaciones indirectas, es decir, más profundas, permitiría una mayor holgura de socavaciones.

Figura 4-3: Esquema Puente Portales alternativa 3



4.4 Solución Escogida

Tabla 4-1: Ponderación de soluciones

	Menor costo de implementación	Menor tiempo de implementación	Seguridad para los trabajadores	Seguridad para los transeúntes	Menor modificación de estructuras existente	Nota
Ponderación	25%	10%	30%	30%	5%	100%
Solución 1	5	3	4	4	5	4.2
Solución 2	3	3	4	4	3	3.6
Solución 3	2	1	3	5	4	3.5

La tabla muestra criterios y su ponderación para la selección de la mejor solución, priorizando seguridad, costo, tiempo y modificaciones estructurales. La escala va de 1 a 5, donde 5 es la mejor puntuación, usada solo para comparar. Se eligió la alternativa 1 basándose en esto. Para más detalles, ver Anexo 13.3.

4.5 Matriz de riesgo

Tabla 4-2: Matriz de riesgo

		CONSECUENCIAS				
		Insignificante	Leve	Moderado	Graves	Catastróficas
PROBABILIDAD		1	2	3	4	5
Muy Alta	5	5	10	15	20	25
Alta	4	4	8	12	16	20
Media	3	3	6	9	12	15
Baja	2	2	4	6	8	10
Muy Baja	1	1	2	3	4	5

Tabla 4-2: Medidas de mitigación

Evento	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo	Mitigación
Indeterminación de la totalidad de entidades involucradas en la aprobación del proyecto	Muy Baja	Alta	Bajo	Realizar un recuento de proyectos anteriores de características similares y además entregar de carta de pertinencia a cada institución.
Incumplimiento de los valores mínimos aceptados por el Manual De Carreteras y OGUC.	Media	Alta	Alto	Hay que informar que se debe realizar limpieza de cauce con el fin de reducir el coeficiente de Manning.
Cambios geométricos en el canal que no estaban previstos en el comienzo.	Baja	Alta	Tolerable	Generar constantes reuniones con SCM y visitas a terreno mensuales.
Falta de información de los vecinos del sector.	Baja	Media	Tolerable	Realizar una difusión en medios de comunicación masiva, mediante anuncios en radios de la zona, en donde se muestren todos los beneficios que conlleva para comunidad la realización del proyecto.
Derrumbe de terreno producto del diseño	Media	Grave	Alto	Realizar cálculos de taludes de excavación sin moldaje.

5. Solución a implementar

Dado lo expuesto anteriormente, la solución escogida corresponde a la propuesta número 1, es decir un puente de dos pistas unidireccional de oriente a poniente cuya longitud es de 34 m y su luz libre de 31,6 m. El tipo de fundación corresponde a fundación directa a una profundidad de 12 metros desde la superficie del terreno natural. En la siguiente figura se muestra el tablero del puente

Figura 5-1: Sección transversal del tablero propuesto.

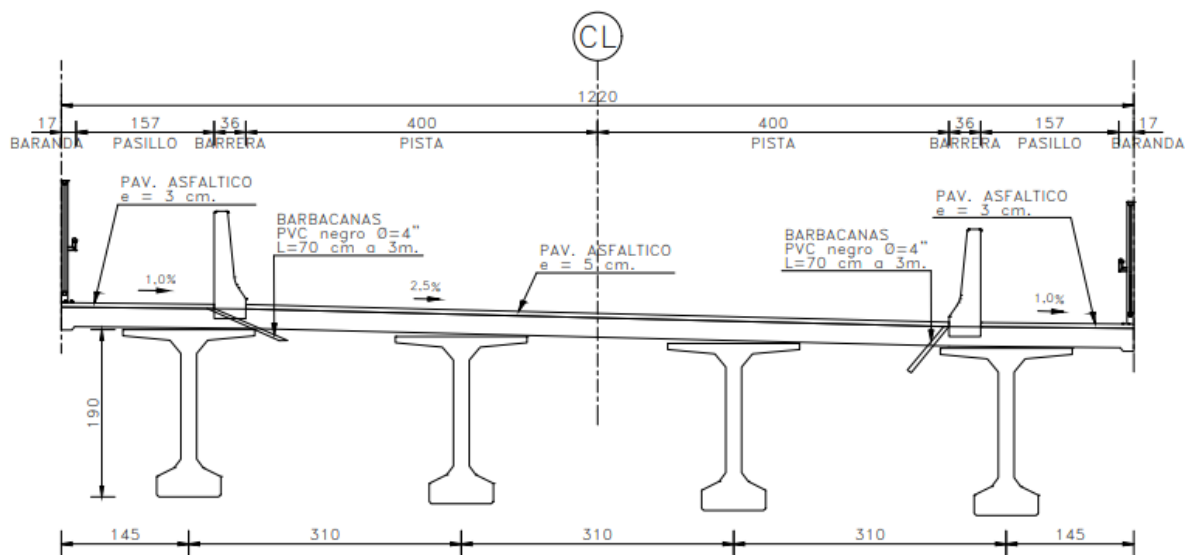
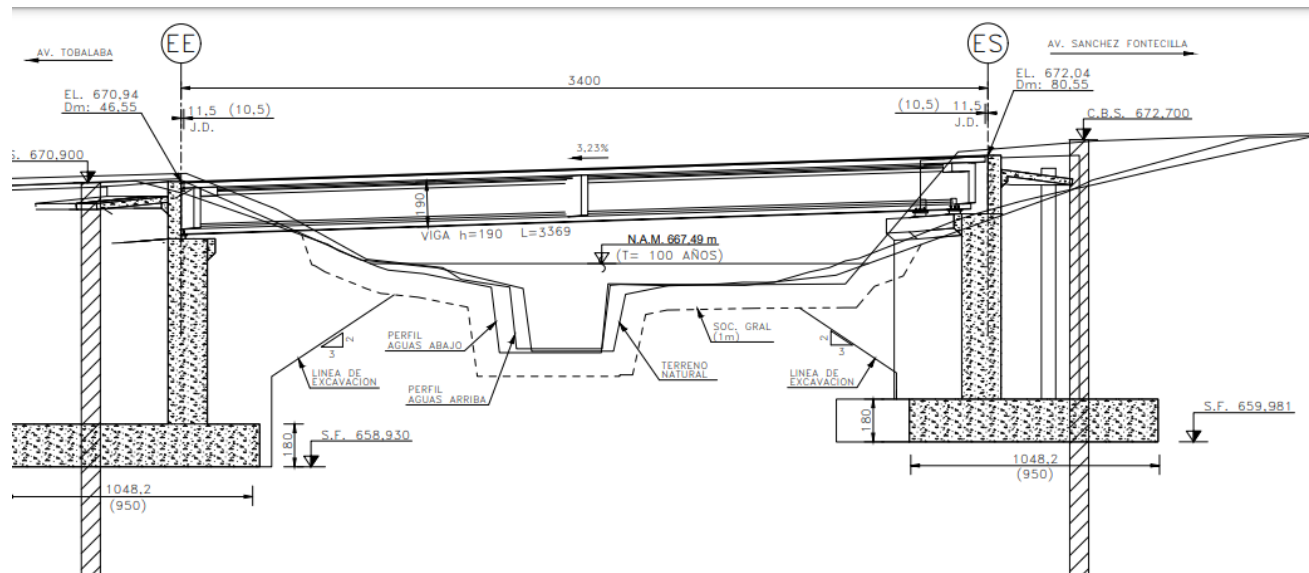


Figura 5-2: Perfil Longitudinal del Puente Portales propuesto.



En las figuras anteriores se muestra, en primer lugar (Figura 5-1), se muestra la sección transversal del tablero del puente proyectado, en ella se puede observar que el ancho total es de 12 metros, en los que se incluyen 2 pistas unidireccional de 4 metros cada una, con bombeo simple y una pendiente de 2,5% con el fin de que el agua pluvial escurre hacia un único sentido. Además, cuenta con dos pasillos los cuales están protegidos por una barrera de hormigón y una baranda metálica. Por otra parte, en la

Figura 5-2, se muestra el perfil longitudinal del puente proyectado, en ella se destaca las cotas de fundación de los estribos y sus longitudes, además se puede observar el nivel de agua máxima junto con su línea de socavación respetando los criterios de diseño propuesto por el especialista de suelos. La pendiente longitudinal del puente es de 3,23%. Esta pendiente implica que el empalme de la estructura junto con la avenida existente será suave y no será notorio para los automovilistas.

6. Factibilidad Económica

La empresa Orbe SPA ha sido seleccionada para llevar a cabo el diseño del puente, con la particularidad de que las especialidades de mecánica de suelos y topografía serán subcontratadas por la empresa contratante. Se establece un plazo de 6 meses para completar el proyecto, y se acuerda un precio final de 14 millones de pesos para los servicios de Orbe SPA, de los cuales 5 millones están destinados a la subcontratación de la especialidad de estructuras.

6.1 Rentabilidad del proyecto

Además de los costos directos, se debe evaluar si el proyecto genera un retorno de inversión satisfactorio para Orbe SPA. Esto implica considerar tanto los ingresos generados como los costos incurridos.

Para calcular la rentabilidad final de ORBE SPA es necesario definir tanto los ingresos como los costos:

Ingresos → \$ 14.000.000

Costos:

- Costos fijos:
 - Subcontratación especialidad de estructuras → \$5.000.000
 - Salario Pasante → $\$300.000 * 6 = \$1.800.000$
 - Electricidad → $\$3.296 * 120 = \395.520
- Costos Variables:
 - Salidas a terreno:
 1. Rendimiento vehículo: 6,6 km/l
 2. Distancia desde oficina hasta la zona del proyecto: 18,6 km

3. Precio promedio litro de bencina 97 octanos a fecha 31 de agosto de 2023: \$1.330

Costo Salida a terreno: \$7.500 (Se contemplan 5 visitas a terreno)

Costo Total proyecto → \$7.233.020

Rentabilidad = $(14,000,000 - 7.233.020) = \$6.766.980$ o bien, se puede expresar como una rentabilidad del 55,67%.

Por lo tanto, el ingreso final de ORBE SPA para este proyecto es aproximadamente \$6.766.980. Esto significa que, en relación con los costos incurridos, la empresa ha generará un retorno positivo, lo que indica que el proyecto será rentable en términos financieros.

Como se mencionó anteriormente, la empresa Orbe Spa recibe un beneficio económico por la realización de este proyecto lo que claramente es esperado a la hora de aceptar el proyecto.

Por otra parte, también es necesario saber cuánto le costará a la inmobiliaria mandante la realización de este puente. Para ello se realizó la cubicación de las diferentes partes de la estructura y se realizó el presupuesto multiplicando cada partida por su valor unitario. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 6-1: Presupuesto Puente Portales proyectado.

Ítem	Designación	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
I	Infraestructura				
202-5	Excavación a Máquina en Puentes y Estructuras	m3	4008	9.500	38.076.000
206-2	Relleno Estructural Permeable	m3	2523	28.000	70.644.000
412-2	Impermeabilización de Muros y Estribos	m2	492	4.480	2.204.160
501-1	Hormigón G05	m3	14	125.000	1.750.000
501-14	Hormigón G25 S/M	m3	1049	230.000	241.270.000
503-2	Acero para Armaduras A630-420H	kg	94410	2.500	236.025.000
504-1	Moldajes	m2	894	23.000	20.562.000
				Subtotal 1	610.531.160
II	Superestructura				
411-1	Carpeta Concreto Asfáltico para Puentes	m3	20	350	7.000.000
412-1	Impermeabilización de tableros de puentes	m2	391	8.500	3.323.500
501-14	Hormigón G25 S/M	m3	114	230.000	26.220.000
503-2	Acero para Armaduras A63-42H	kg	18240	2.500	45.600.000
504-1	Moldajes	m2	279	23.000	6.417.000

Ítem	Designación	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
506-24	Vigas Pretensadas de longitud mayor o igual a 30 metros y menor a 35 metros	n°	4	24.200.000	96.800.000
512-1	Juntas Metálicas en Tableros de Puente	ml	24	450.000	10.980.000
513-2	Anclajes Antisísmicos	n°	12	400.000	4.800.000
514-1	Placas de Neopreno	n°	8	1.200.000	9.600.000
514-1A	Placas para Topes Sísmicos	n°	12	600.000	7.200.000
515-1	Losas de Acceso	m3	24	400.000	9.600.000
615-1	Barbacanas de Desagüe	gl	1	1.400.000	1.400.000
710-1	Baranda Metálica Peatonal Pintada	ml	94	150.000	14.100.000
710-3	Barrera de Hormigón para Puentes	ml	94	250.000	23.500.000
				Subtotal 2	266.540.500
				TOTAL NETO	877.071.660
				19% IVA	166.643.615
				TOTAL GENERAL	1.043.715.275

A simple vista, pareciera ser que el precio es elevado, pero dada la solución escogida, la cual no intervendrá el cauce y la planicie de inundación no afectará a la estructura, no son necesarias defensas fluviales, por lo que el costo del proyecto es menor a proyectos similares. Llevando esto a números, se puede comparar con proyectos de similares características los cuales se muestran a continuación:

- Puente Carmen de Codigua.

\$2.777.219.554

- Puente Las Canoas:

\$3.809.614.116

Ambos proyectos fueron realizados por la empresa Orbe SPA, en consecuencia, se evidencia un costo notablemente menor a otros puentes de similares características.

7. Metodología

A continuación, se explica detalladamente la metodología que se utilizará para cada uno de los objetivos específicos.

7.1 Realizar estudio hidrológico que abarque el 100% del tramo del Canal San Carlos identificado. Antes de octubre de 2023.

Recopilación de datos de estaciones.

En primer lugar, se debe determinar las estaciones activas y que estén cercanas a la ubicación del lugar donde se proyecta el puente. Estas se determinan en base a la información de la red hidrométrica de la Dirección General de Aguas (DGA). Para este estudio se debe tener en cuenta la información pluviométrica de precipitaciones máximas en 24 horas entregada por la DGA y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) de las estaciones que se detecten como más adecuadas. Para seleccionar las estaciones meteorológicas se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- Ser la estación más cercana a la zona en estudio
- Se considera que la estación es representativa de las características geográficas del sector, específicamente la elevación media en el que se encuentra emplazada.
- Cumplir con el punto 3.702.3, llamado “análisis de observaciones en el punto de interés”, del manual de carreteras Volumen 3. El cual indica que la extensión de registro debe ser mayor a 20 años, generando una confiabilidad de realizar un análisis de frecuencia con un nivel de confianza superior al 95%.
- Si la prueba se realizara mediante el Test Ji-cuadrado, la extensión de registro debe ser 5 veces el número de clases (Canavos).
- El artículo 2.402.403 (2), del manual de carretera Vol. N°2, recomienda elegir un número reducido de clases, de tal manera que las frecuencias observadas sean a lo menos 5.

Análisis de consistencia y datos dudosos

Según el Manual de Carreteras en Vol. N°3, Artículo 3.702.3 (Análisis de observaciones en el punto de interés), es necesario verificar la representatividad, calidad y consistencia de la información, de tal manera que los datos representen observaciones ciertas y precisas. Por tal motivo antes de iniciar el estudio probabilístico, la información debe ser revisada en su consistencia.

El MC-V3 y La “Guía Metodológica para la elaboración del balance Hídrico en América del Sur” (Unesco, 1982) recomiendan realizar un análisis de consistencia a través del método de

doble curvas acumuladas (CDA). Para realizar este procedimiento se requieren al menos tres estaciones, además de la que se va a analizar, y deben tener una extensión de registro amplia, todas por igual.

Si la información disponible de la zona de estudio no es suficiente para llevar a cabo esta metodología, no se considera adecuado usar CDA.

El método de la Water Resources Council recomienda la realización de ajustes de datos dudosos, que son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados, especialmente en muestras pequeñas, como es el caso de las muestras presentadas en este estudio.

La metodología en detalle y sus ecuaciones se muestran en el **Anexo 13.1**.

7.2 Definir las condiciones de borde que permitan una revancha mínima de 1 m para un caudal con período de retorno de 100 años para obtener la aprobación de la Sociedad del Canal Del Maipo antes de octubre de 2023

Se externalizará el estudio de mecánica de suelos y topografía. Héctor Ventura y Asociados realizará el estudio de suelos con información del subsuelo, fundación recomendada para estribos, su empuje y clasificación del suelo. Con Google Earth, se proyectarán perfiles transversales cada 20 m a lo largo de 300 m antes y después del puente. Urbano Proyectos ejecutará el estudio topográfico. Posteriormente, se proyectará la ubicación, pendiente y longitud del puente con base en estos estudios.

7.3 Diseñar la obra hidráulica de tal manera que no exista modificación de cauce, de aceras ni caminos existentes antes del 30 de septiembre de 2023.

Para diseñar la obra hidráulica es necesario la realización del modelo permite hacer un análisis hidráulico fiable, para ello se asigna el caudal de diseño aquel determinado en el punto 7.1 correspondiente a 100 años de período de retorno, mientras que para la verificación se utilizará el caudal correspondiente a 150 años de período de retorno. Esto ya que lo indica la Tabla 3.702.2.B del Manual de Carreteras en su Volumen 3.

Para realizar el modelo se usará el Software llamado HEC-RAS (River Analysis Systems) perteneciente a la institución Hydraulic Engineering Center. Este software utiliza el método de pasos fijos y calcula de forma iterativa mediante la técnica de diferencias finitas.

Dicho software solicita datos de entrada los cuales se mencionan a continuación.

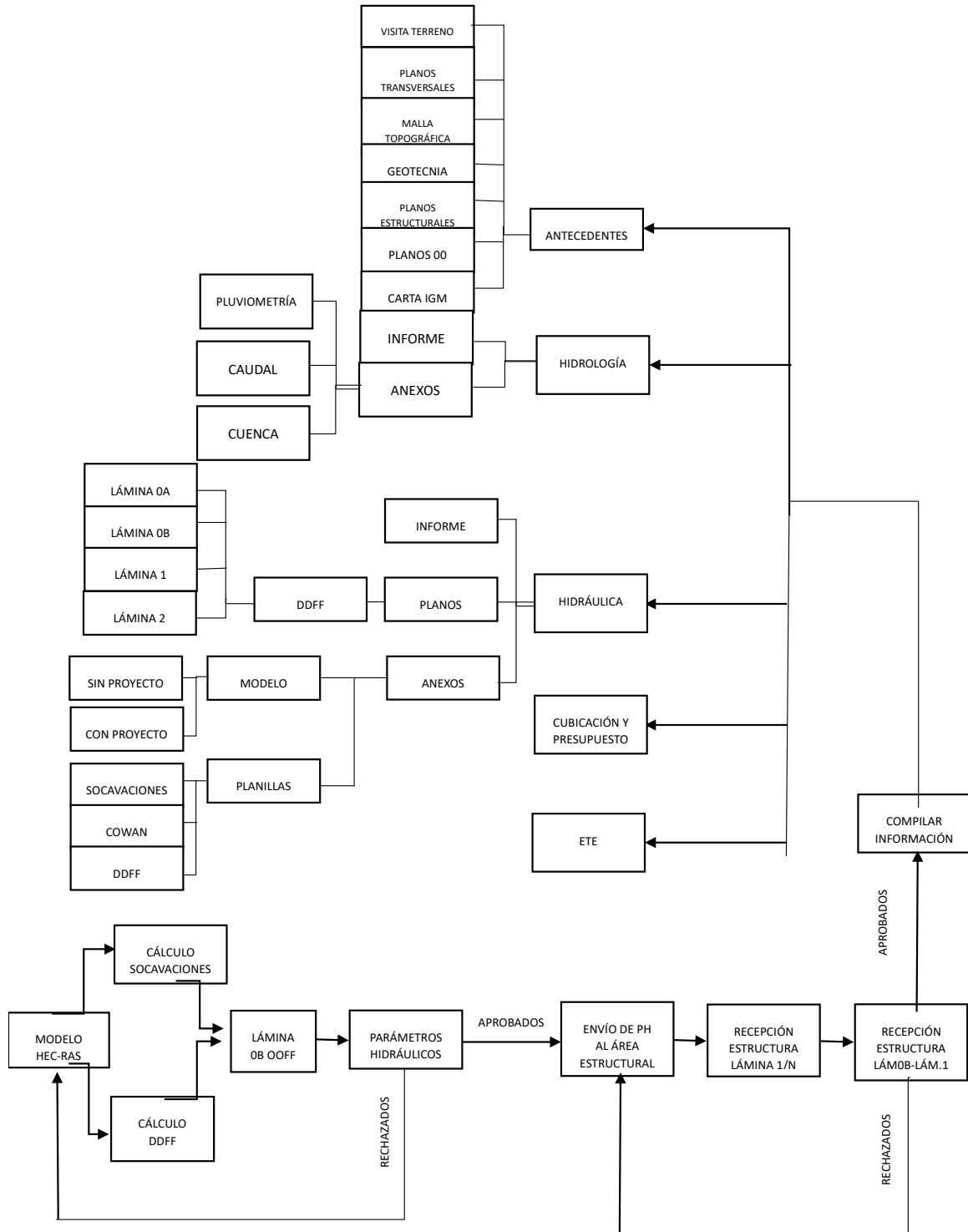
- Datos topográficos de las secciones transversales del cauce a modelar. Esto se obtendrá mediante una empresa externa quien se encarga de la topografía.
- La rugosidad del lecho

Las ecuaciones de la metodología empleada se encuentran en el **Anexo 13.2**

7.4 Cumplir con el 100 % del “checklist” de documentos necesarios para obtener la aprobación de la Dirección General de Aguas (DGA) antes del 1 octubre de 2023.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo en donde se indica el paso a paso de la realización del proyecto para poder ingresarlo formalmente. Cabe destacar que dicho diagrama comienza desde la realización del modelo hidráulico en HEC-RAS.

Figura 7-1: Diagrama de flujo del proyecto.



8. Medidas de Desempeño

- *Objetivo específico 2.1*

- N° de estaciones pluviométricas ≥ 2 .
- N° de datos de estaciones pluviométricas ≥ 25 .
- Área de la Cuenca Estudiada \geq Área de la cuenca aportante.
- $T_c \geq 10$ minutos

T_c = Tiempo de concentración de cada cuenca.

- *Objetivo específico 2.2*

- $C.I.V. > N.A.M. + 1 \text{ m}$

Donde $C.I.V.$ = Cota inferior de viga

$N.A.M.$ = Nivel de agua máximo.

- *Objetivo específico 2.3*

- Luz Libre $>$ ancho del cauce (31 m)
- Cota Línea de Socavación general $>$ Cota de fundación + 2 m.
- $|\theta_1 - \theta_2| > 0.5\%$

Donde θ_1 = Pendiente camino existente.

θ_2 = Pendiente camino proyectado.

- *Objetivo específico 2.4*

- N° de documentos ≥ 14

9. Desarrollo del proyecto

9.1 Visita a Terreno

La primera fase del proyecto involucró tres visitas exhaustivas al sitio de intervención. Durante la primera visita, se llevaron a cabo mediciones detalladas de las estructuras existentes, se capturaron fotografías para documentación visual y se realizó un vuelo de dron con el objetivo de analizar minuciosamente todas las estructuras que podrían influir en el diseño del puente proyectado.

Un hallazgo significativo durante esta fase fue la presencia de un puente colonial ubicado aproximadamente a 300 metros aguas arriba del lugar del puente proyectado. Este puente colonial se reveló como una restricción al flujo del canal debido a su diseño abovedado. La segunda visita, tuvo como objetivo verificar lo medido en la primera salida a terreno y verificar si las condiciones se mantenían intactas, lo cual no fue así ya que se observó que se estaba llevando a cabo un proyecto de entubamiento del canal, lo que influyó directamente en el proyecto puesto que se tuvo que realizar un segundo estudio topográfico. Finalmente, la tercera visita ocurrió el día siguiente de la precipitación ocurrida en Santiago el día 23 de agosto. Esta visita permitió conocer presencialmente cómo funcionaba el canal en eventos de lluvia importante. Esto permitió observar que el canal sufría un importante aumento de caudal, principalmente en el puente colonial, lo que afirmó lo propuesto en la problemática.

9.2 Estudio Hidrológico

El siguiente paso consistió en llevar a cabo un estudio hidrológico detallado. Siguiendo la metodología descrita en los anexos y basándose en la información recopilada en el "estudio de crecidas", se evaluaron las condiciones hidrológicas del área de intervención. Este análisis proporcionó datos esenciales para comprender el comportamiento del flujo de agua y así determinar los caudales de diseño necesarios para los siguientes pasos. Además, es importante destacar que se determinó el caudal del evento de precipitación importante ocurrido el día 23 de agosto.

9.3 Estudio Hidráulico

Con los resultados del estudio hidrológico en mano, se procedió a desarrollar un modelo en HEC-RAS. Este modelo hidráulico permitió realizar un análisis detallado del comportamiento del flujo en diferentes escenarios. Los resultados obtenidos de este análisis fueron fundamentales para definir las condiciones de borde que debían entregarse a las especialidades estructural y vial en las etapas posteriores del

proyecto. Además, el evento pluvial del día 23 de agosto, permitió calibrar el modelo y así poder asegurar que los cálculos realizados estuvieran correctos.

Posterior a ello se realizó el cálculo de socavaciones lo cual implica la verificación del estudio de suelos y una modificación o no del cauce.

9.4 Compilación de Información y Preparación de Carpeta de Entrega

Una vez completadas las fases de visita a terreno y estudios hidrológico e hidráulico, se llevó a cabo la compilación de toda la información recopilada, incluyendo las diferentes especialidades. Esta información se organizó de manera sistemática y se preparó una carpeta de entrega para formalizar el ingreso del proyecto.

10. Resultados cualitativos y cuantitativos

10.1 Caudales según estudio hidrológico:

Tabla 10-1: Resumen de Caudal adoptado.

T años	Q [m ³ /s]
100	36.67
150	39.88

Caudal evento de precipitación: 9.55 m³/s

10.2 Nivel de Agua Máxima según estudio hidráulico:

Tabla 10-2: Resumen de caudal y N.A.M.

Puente	T (años)	Caudal de diseño (m ³ /s)	N.A.M. (m.s.n.m.)
Portales	100	36.97	667.49
	150	39.88	667.60

Esto implica que la cota inferior de viga debe ser a lo menos 668,59 m.s.n.m. La especialidad de estructuras estipuló la cota inferior de viga en 668,86 m.s.n.m. en su punto más desfavorable por lo que es coherente con lo solicitado. Por otra parte, la modelación con el caudal del evento del 23 de agosto de 2023 permitió conocer que tan cercano a la realidad fueron los cálculos. En la siguiente imagen se muestra una fotografía del puente colonial el día de la precipitación:

Tabla 10-3: Puente Colonial con precipitación del día 23 de agosto de 2023.



Como se tenía la cota superior de la bóveda fue fácil estimar el nivel de agua alcanzado, el cual fue de 667,50 m.s.n.m., y según el caudal calculado junto con la modelación se obtuvo un nivel de agua de 667,57 m.s.n.m., es decir, solo 7 centímetros de diferencia, lo cual implica que los métodos utilizados para el cálculo del proyecto fueron correctos.

Por otra parte, la socavación general calculada fue de 0,3 m, pero el manual de carreteras indica que la mínima socavación debe ser de 1 m, por lo cual esta fue la socavación adoptada.

11. Conclusiones y discusiones

El software TRANSYT ofrece la capacidad de simular y optimizar una red vial urbana. La función objetivo que minimiza TRANSYT se conoce como Índice de Rendimiento, abreviado como IR. TRANSYT modela la situación de manera que se determina si este índice IR aumenta o disminuye. Claramente, en este

escenario, se busca la disminución del IR. A continuación, se presentan los resultados de la modelación de TRANSYT para tres situaciones: la Situación Base, que representa la condición actual sin la implementación del proyecto; la Situación con Proyecto, que incluye la situación base junto con el proyecto propuesto; y la Situación con Proyecto Mejorado, que considera la implementación de la medida de mitigación propuesta. Los resultados son los siguientes.

Tabla 11-1: Resumen de indicadores IR.

	2019		2021		2023		2028	
	P. Mañana	P. Tarde	P. Mañana	P. Tarde	P. Mañana	P. Tarde	P. Mañana	P. Tarde
Base	769,91	572,61	905,1	807	1234	1017,37	3240,59	2053,62
Proyecto	911,85	571,81	1172,68	854,48	1681,56	1096,07	3404,69	2421
Proyecto mejorado	619,38	342,65	668,59	398,14	1040,44	498,3	1941,67	1844,68

Fuente: EISTU "Ciudad del Este".

Al analizar estos resultados, especialmente durante los horarios punta de la mañana en los años 2023 y 2028, se observa una disminución significativa del Índice de Rendimiento (IR) en un 38,13% y un 42,97%, respectivamente. Este hallazgo indica que la implementación de la solución propuesta logra mitigar de manera sustancial el impacto ocasionado por la ejecución del proyecto, superando con creces el objetivo inicial de reducir la saturación en un 28%. Esto, a su vez, garantiza que la red vial opere de manera eficiente.

Desde una perspectiva cualitativa, se destacan varios puntos que promoverán mejoras sustanciales en la calidad de vida de los residentes:

Aumento de Capacidad: La construcción de un nuevo puente paralelo posibilitará duplicar la capacidad de la infraestructura en el cruce del puente Portales. La actual limitación de una sola pista en cada dirección generadora de congestiones se resolverá con la incorporación de dos puentes y dos pistas en ambas direcciones, proporcionando una capacidad sustancial para gestionar el tráfico existente y futuro de manera eficiente.

Eliminación del Punto de Estrangulamiento: El puente Portales, con solo una pista en cada dirección, actúa como un punto de estrangulamiento para el flujo de tráfico desde la Avenida Diego Portales. La adición de

un nuevo puente paralelo eliminará este cuello de botella, permitiendo un flujo más fluido y sin obstrucciones, lo que, a su vez, reducirá la saturación de manera significativa.

Distribución Uniforme del Tráfico: La presencia de dos puentes facilitará una distribución más uniforme del tráfico en ambas direcciones. Evitará que todas las pistas converjan en un solo punto, mejorando la circulación general y reduciendo los embotellamientos causados por el estrechamiento actual en el puente.

Mejora en la Seguridad Vial: La reducción de la saturación y la eliminación de puntos críticos de congestión contribuirán a mejorar la seguridad vial. La disminución de la congestión generalmente se asocia con una menor incidencia de accidentes de tráfico, promoviendo así un entorno más seguro para los usuarios de la vía.

Además de representar un flujo económico significativo para Orbe SPA, este proyecto ha traído consigo la incorporación de un nuevo cliente para futuras colaboraciones. Asimismo, ha ampliado la experiencia de la empresa al incluir un proyecto de puente en una zona urbana, enriqueciendo así la cartera de servicios ofrecidos. En última instancia, este proyecto ha sentado las bases para abordar con mayor facilidad futuros proyectos de puentes en áreas urbanas, simplificando su desarrollo.

12. Bibliografía

- (Juan Soto, Alejandra Muñoz, Matias Chávez, Rodrigo Castro, Felipe Nuñez, Alejandro López)
- (J. Rincón, M. Pérez, G. Delfín, C. Freitez, F. Manríquez, 2017)
- (Enciso, 2015)
- Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos (1959)
- Manual de Carreteras Volumen 2
- Manual de Carreteras Volumen 3
- Manual de Carreteras Volumen 8
- Dirección general de aguas, Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. (1995).

13. Anexos

13.1 Ecuaciones para determinar el objetivo específico 2.1

Las ecuaciones para aplicar el método de datos dudosos se muestran a continuación.

Para datos altos: $yH = \bar{y} + (K_n \times S_y)$

Para datos bajos: $yL = \bar{y} - (K_n \times S_y)$

yH : Valor superior de los logaritmos en base e de los valores.

yL : Valor inferior de los logaritmos en base e de los valores.

\bar{y} : Media aritmética de los logaritmos en base e de los valores.

Kn : Coeficiente que depende del tamaño de la muestra.

Sy : Desviación estándar de los logaritmos en base e de los valores.

Análisis de frecuencia.

Las distribuciones que se utilizarán para el análisis de frecuencia serán las siguientes:

a. Distribución de Valores Extremos o de Gumbel

Los valores de precipitación en 24 horas con su período de retorno asociado, se debe ajustar un modelo probabilístico de valores extremos tipo I o de distribución de Gumbel, con el fin de extrapolar la información en distintos periodos de retorno.

La distribución de Gumbel viene dada por la siguiente expresión:

$$F_x(P) = e^{-e^{-a(P-u)}}$$

Donde:

P= Probabilidad de la precipitación máxima en 24 horas.

a= Parámetro de dispersión.

u= Modo de la distribución.

Luego:

$$P = u - \frac{1}{a} \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))$$

Donde:

$$a = \frac{S_n}{S_x}$$

$$u = x - S_x * \frac{Y_n}{S_n}$$

$$S_x = \sqrt{\sum \frac{(x_i - x)^2}{n - 1}}$$

En donde:

X_i = Precipitaciones máximas en 24 horas.

Y_n = Valor medio de la variable reducida.

X = Promedio de la muestra de precipitaciones.

S_x =Desviación estándar de la muestra.

S_n =Desviación estándar de la variable reducida.

b. Distribución Normal

Esta es una distribución en la cual los valores de una secuencia son considerados como normalmente distribuidos, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma * 2\pi} * e^{-0.5(x-\frac{\mu}{\sigma})^2}$$

Donde:

μ : Valor esperado de la muestra

σ : Desviación estándar de la muestra.

Como esta función es no integrable se usa la función estándar normalizada definida como:

$$F(x) = F(\frac{x - \mu}{\sigma})$$

La probabilidad de que un evento supere el valor esperado es la siguiente:

$$P(x \geq X) = \frac{1}{T}$$

Donde T es el período de retorno, finalmente el valor de la precipitación se obtiene al aplicar la siguiente ecuación:

$$x = \mu + \sigma * F^{-1}(1 - \frac{1}{T})$$

En donde F^{-1} es conocida como la distribución normal estándar inversa y se encuentra tabulada.

c. Distribución Log Normal

Esta distribución es una extensión de la distribución normal, y se utiliza cuando los datos están convertidos a la forma logarítmica como se indica a continuación:

$$y = \ln(x); 0 < x \leq \infty$$

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma y} * e^{\frac{-(Y-\mu y)^2}{2\sigma y^2}}$$

$$-\infty \leq Y \leq \infty$$

Luego, la probabilidad de excedencia del evento Y se estima de la siguiente forma:

$$y = F^{-1}(P(y \geq Y))$$

Donde F^{-1} es la distribución normal estándar inversa.

Finalmente, el valor de la precipitación se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$P_T = e^{\sigma y * f^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right) + y}$$

d. Distribución Gamma

Esta distribución es la distribución de variable aleatoria donde la función de densidad de probabilidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$f_x(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Donde

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

$$\alpha = \frac{\mu}{\beta}$$

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma^2}$$

μ y σ correspondo a la media y desviación estándar respectivamente.

Prueba de Bondad

La adopción de la distribución que presenta el mejor ajuste y por tanto represente mejor al estudio, se realiza mediante el test Chi-cuadrado.

La prueba Chi-Cuadrado es un método estadístico, que determina la distribución que mejor ajuste tiene con la serie de precipitaciones obtenidas por medio de una estación pluviométrica y/o fluviométrica. Luego de haber obtenido la distribución más cercana a la serie real, es posible calcular las precipitaciones para distintos períodos de retorno.

El procedimiento aplicado al caso de una variable hidrológica y para cada distribución analizada, es el siguiente:

- Se divide el rango de variación de la muestra de N valores en k intervalos de clase con lo que se define un histograma de la muestra.
- A partir de este histograma, se determina la frecuencia absoluta de los valores observados (f_i) para cada uno de los intervalos.
- A continuación, se adopta la hipótesis que la muestra corresponde a una cierta distribución conocida con densidad de frecuencia $f(x)$.
- Si se designa con (c_i) a las fronteras de clase del histograma, las frecuencias absolutas esperadas (e_i) para cada clase y para la distribución elegida, vienen dadas por:

$$e_i = N * \int_{c_{i-1}}^{c_i} f(x) * dx$$

ó

$$e_i = N * (F(c_i) - F(c_{i-1}))$$

Donde N es el número de valores de la muestra y $F(c_{i-1})$ y $F(c_i)$ son las fronteras de clase i.

Si la hipótesis adoptada es la adecuada, es decir, si la función de densidad de frecuencia es la correcta, es posible aplicar el siguiente teorema estadístico:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i}$$

- Se aproxima a una distribución Chi-cuadrado (χ^2) con $v = k - s - 1$ grados de libertad, donde s es el número de parámetros de la distribución elegida.

Selección de precipitación de diseño

Ahora, se procede a la selección de la estación a utilizar utilizada en el diseño, para ello se debe elegir aquella que posea una altitud similar al centroide de la cuenca en estudio y tenga los resultados más conservadores.

Adicionalmente, se debe considerar que los datos de precipitación máxima en 24 horas obtenidos en las estaciones pluviométricas, usualmente corresponden a registros tomados entre las 08:00 horas de dos días consecutivos, por ello los resultados se deben multiplicar, de manera conservadora por un factor $k=1,1$ para obtener las precipitaciones de diseño correspondientes a 24 horas móviles.

Tiempos de Concentración.

El tiempo de concentración de la cuenca (T_c) se define como el tiempo necesario para que la partícula de agua hidráulicamente más alejada alcance la salida de la cuenca. Este puede estimarse por fórmulas empíricas aproximadas, tales como:

- California Highways and Public works

$$T_c = 0.95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} [hr]$$

- Giandotti:

$$T_c = \frac{(4 \times \sqrt{A}) + (1.5 \times L)}{0.8 \times \sqrt{HM}}$$

En forma adicional, el método de Giandotti debe verificar la siguiente condición:

$$\frac{L}{3.6} \geq t_c \geq \frac{L}{5.4}$$

- Norma Española:

$$T_c = 0.3 \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}} [hr]$$

- Navdocks:

$$T_c = \frac{L}{V \times 3.6}$$

T_c : Tiempo de concentración [hr]

- L : Longitud del cauce principal, en [km]
- S : Razón entre el desnivel que existe del punto de descarga y el punto hidráulicamente más alejado, en tanto por uno [m/m]
- A : Área del sector analizado [km²]
- HM : Desnivel entre la salida y la cota del centroide [m]
- H : Desnivel entre la salida y el punto más alejado del sector analizado [m]
- V : Velocidad media de escurrimiento, que depende de la pendiente general de la cuenca, de acuerdo a la siguiente tabla correspondiente a las velocidades de Navdocks.

Pendiente [%]	Velocidad [m/s]	Pendiente [%]	Velocidad [m/s]
1 <	0,30	10 – 17	1,80
1 – 2	0,60	17 – 29	2,10
2 – 4	0,90	29 – 49	2,40
4 – 6	1,20	49 – 83	2,70
6 – 10	1,50	83 – 141	3,00

Estimación de caudales máximos instantáneos

A continuación, se describen los métodos precipitación-escorrentía utilizados por recomendación del Manual de Carreteras en base al Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica de la DGA.

- *Verni y King Modificado*

Este método fue elaborado para períodos de retorno menores o iguales a 100 años y cuencas de áreas mayores a 20 km².

La fórmula de Verni y King Modificada tiene la siguiente forma:

$$Q = C(T) \cdot 0,00618 \cdot P_{24}^{1,24} \cdot A_p^{0,88}$$

Donde:

Q : Caudal instantáneo máximo asociado al período de retorno T , expresado en $[m^3/s]$.

$C_{(T)}$: Coeficiente empírico de período de retorno T años.

P : Precipitación diaria máxima al período de retorno de T años, expresada en $[mm]$.

A : Área pluvial de la cuenca, expresada en $[km^2]$.

- **DGA-AC**

a) Determinación de zona homogénea

Esto se compara directamente con el mapa de zona homogéneas de Chile.

b) Determinación de curva frecuencial regional

Según la zona homogénea en la que se ubique la cuenca en estudio tiene asociado una curva de frecuencia regional.

c) Determinación del caudal medio diario máximo de periodo de retorno $T=10$ años.

El caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años (Q_{10}), es la variable usada para la adimensionalización de curvas de frecuencias regionales del método. Para la zona de estudio se tiene lo siguiente:

- V - RM - VI Región

$$Q_{10} = 2 * 10^{-3} * A^{0,973} * (P_{24}^{10})^{1,224}$$

d) Determinación de la Curva de Frecuencia del Caudal Instantáneo Máximo

El factor de conversión (α) de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo se determina según la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca. Al multiplicar este factor por los caudales medios determinados en c) se obtienen los caudales instantáneos máximos.

- **Racional**

La expresión que permite determinar el caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T es:

$$Q = \frac{C * i * A}{3.6}$$

Donde:

Q = Caudal instantáneo máximo de período de retorno T, expresado en [m³/s].

I = Intensidad media de lluvia en [mm/hr] para el período seleccionado y con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial.

C = Coeficiente de escorrentía de la cuenca asociado al período de retorno T.

A = Área pluvial aportante expresada en [km²].

a) Intensidad de diseño

Para la determinación de las curvas intensidad-duración-frecuencia (I.D.F.) se tiene:

Por definición:

$$I_t = \frac{P_t}{t}$$

I_t : Intensidad en [mm/h] correspondiente a una precipitación de duración "t" [hr].

P_t : precipitación de duración "t" [hr].

t: duración de la tormenta de diseño, en [hr].

b) Coeficiente de escorrentía

Este parámetro depende de las características geomorfológicas del sector a analizar; topografía, vegetación, capacidad de almacenamiento, etc. Por tal motivo, depende fundamentalmente de la inspección del terreno. Una vez reconocido el terreno, se emplea la Tabla 3.702.404(1)B del M.C.V-3 para definir el valor de este coeficiente.

13.2 Ecuaciones para determinar el objetivo específico 2.3

Esto se determina mediante el Método de Cowan, el cual principalmente se basa en condiciones del terreno. El coeficiente de rugosidad de Manning se determina a partir de la siguiente fórmula:

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

Donde:

n : Coeficiente de rugosidad de Manning.

m_5 : Factor de corrección por sinuosidad del cauce (meandros).

n_0 : Valor base, suponiendo cauce ideal.

n_1 : Valor adicional por irregularidades superficiales.

n_2 : Valor adicional por variaciones de forma y tamaño de las secciones transversales.

n_3 : Valor adicional por obstrucciones

n_4 : Valor adicional según presencia de vegetación y condiciones del flujo.

Estos valores se pueden determinar según la Tabla 13-1 siguiente:

Tabla 13-1: Tabla de Cowan para determinar el coeficiente de Manning.

TABLA DE COWAN			
CONDICIONES DEL CAUCE		VALOR	
MATERIAL	Tierra	n_0	0,02
	Roca		0,022
	Grava Fina		0,024
	Grava Gruesa		0,028
GRADO DE IRREGULARIDAD	Despreciable	n_1	0
	Leve		0,005

	Moderado		0,01	
	Alto		0,02	
VARIACIONES DE LAS SECCIONES A LO LARGO DE LA SECCION	Graduales	n ₂	0	
	Alternándose Gradualmente		0,005	
	Alternándose Frecuentemente		0,01	0,02
EFECTO RELATIVO DE LAS OBSTRUCCIONES	Despreciable	n ₃	0	
	Leve		0,01	0,02
	Apreciable		0,02	0,03
	Alto		0,04	0,06
DENSIDAD DE VEGETACION	Baja	n ₄	0,01	0,01
	Media		0,01	0,03
	Alta		0,03	0,05
	Muy Alta		0,05	0,1
FRECUENCIA DE MEANDROS	Leve	m	1	
	Apreciable		1,15	
	Alto		1,3	

- Los caudales mencionados anteriormente.
- Condiciones de borde que dependen del tipo de flujo que se desarrolla en la zona.

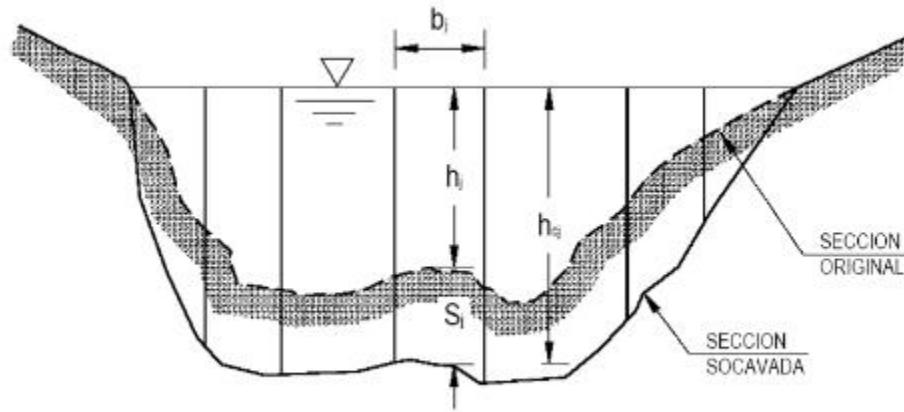
Este modelo entregará resultados como el eje hidráulico, del cual se desprende el N.A.M. además del número de Froude entre otros parámetros hidráulicos.

Por otra parte, para determinar la cota de la línea de socavación general se debe calcular mediante dos métodos dados en el MC-V3, los cuales son el Método de Neill y el Método de Lischtvan-Levediev.

- **Método de Neill**

La siguiente figura extraída del manual de carreteras, presenta la forma para realizar el cálculo

Figura 13-1: Sección por franjas.



La socavación de la franja S_j mostrada en la Figura 5-1 se calcula como:

$$S_j = h_{cj} - h_j$$

Donde:

H_{cj} = altura de la franja socavada

H_j = altura de la franja sin socavar

Igualando caudales la expresión anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$h_{cj} = \left(\frac{q_j}{1.81 * \sqrt{g} * D^{0.33}} \right)^{0.855}$$

Donde q_j , es el caudal por unidad de ancho y se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$q_j = \frac{Q_j}{B_j} = \frac{1}{B_j} * \frac{\Omega_j}{\Omega} * \left(\frac{R_j}{R} \right)^{\frac{2}{3}} * \frac{n}{n_j} * Q$$

Donde:

Q_j = Caudal total de la franja

B_j = Ancho de la franja

Ω_j = Área de la franja

Rj= Radio hidráulico: $Rj = \frac{\Omega j}{Bj}$

Ω , R, n, Q = Corresponden a las mismas variables anteriores pero definidas para la sección total.

- **Método de Litschvan-Levediev**

Para sedimentos no cohesivos se tiene lo siguiente:

$$hj = \left(\frac{qj}{0.68 * \beta * D^{0.28} * \Psi} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Donde:

hj: Altura de escurrimiento de la franja socavada.

qj: Caudal por unidad de ancho de la franja socavada j.

D: diámetro del sedimento obtenido de la curva granulométrica.

β : Coeficiente función de la probabilidad de excedencia según tabla 3.707.405A

Ψ : Coeficiente que considera la influencia del sedimento en suspensión según tabla 3.707.405B

X: Parámetro de la fórmula de arrastre crítico según la tabla 3.707.405C

Todas las tablas mencionadas anteriormente pertenecen al Manual de Carreteras Volumen 3.

13.3 Criterios para selección de alternativa de solución

Menor Costo de implementación

Este criterio, toma como referencia el menor costo asociado para la empresa Orbe SPA y para Monte Aconcagua. Esto implica un diseño en la que se minimice los costos asociados y se realice una reducción de materiales, es decir, que la cubicación de todas las alternativas sea la menor.

Menor tiempo de implementación

El criterio de selección de solución "Menor tiempo de implementación" implica que al tomar decisiones sobre cómo diseñar y construir el puente, se dará prioridad a las opciones que permitan completar el proyecto en el menor período de tiempo posible. En otras palabras, se buscarán soluciones y enfoques que aceleren el proceso de construcción sin comprometer la calidad, la seguridad ni la durabilidad del puente.

Este criterio se centra en reducir los plazos de construcción para minimizar los costos asociados con la mano de obra, la logística y el uso de equipos.

Seguridad para los trabajadores

Se refiere a dar prioridad a las opciones y enfoques que aseguren la protección y el bienestar de los trabajadores involucrados en el proceso de diseño y construcción del puente. Este criterio reconoce la importancia fundamental de la seguridad y la salud de los trabajadores como un factor clave en la toma de decisiones

Seguridad para los transeúntes

La prioridad de este criterio es garantizar la protección y la seguridad de las personas que van a utilizar el puente una vez que esté construido. Este criterio se enfoca en la implementación de medidas y soluciones que minimicen los riesgos y peligros para cualquier persona que cruce o utilice el puente, ya sean peatones, ciclistas, automóviles u otros usuarios.

Menor modificación de estructuras existente

Se enfoca en la elección de opciones de diseño y construcción que impliquen la mínima alteración o intervención en las estructuras ya existentes en el entorno donde se planea construir el puente. En otras palabras, se busca reducir al máximo los cambios en elementos preexistentes, como el canal, las orillas y otros aspectos de la infraestructura circundante.

Este criterio se enfoca en preservar la integridad y la funcionalidad de las estructuras, así como también el entorno natural existente mientras se construye el nuevo puente.