



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

**CURIHAM**



**Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA**

---

# **MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS EN ZONA DE LLANURA**

## **TESIS DE MAGISTER**

### **ING. CIVIL RIVERO ALBERTO JONÁS**

**“Canalización de Río Salí y Obras  
Complementarias, tramo: Los  
Gutiérrez – San Andrés”  
TUCUMÁN - ARGENTINA**

**DIRECTOR DE TESIS: Mag. Ing. Héctor Daniel Farías.**

**02 DICIEMBRE 2.020**

*Agradecimiento a :*

*A los Docentes de la Universidad Nacional de Rosario y a mi Director de Tesís por volcar su tiempo y conocimientos en mí.*

*Dedicado a mis hijas  
Guillermina y Natividad*

## Resumen

Cualquier obra de ingeniería ejecutada sobre un cauce de río o aledaña provoca una acción de antropización. Lo que se verá en la presente tesis es un mecanismo matemático ordenado aplicable a ríos de una cierta característica y para una obra particular que fue ejecutada, de este proyecto se dispone de distintos elementos para poder evaluar su eficiencia y perduración. Para este caso particular se estudió la rectificación del cauce del río, en un tramo del río Salí que va desde las coordenadas de inicio  $26^{\circ}48'50,54''S$  y  $65^{\circ}09'36,82''O$  hasta el punto final de  $26^{\circ}52'35,32''S$  y  $65^{\circ}11'53,99''O$ , abarcando una longitud de 7.000 m aproximadamente. En la Tesis se analizan dos escenarios, uno en las condiciones sin obra y el otro en condiciones de obra concluida desde el punto de vista hidráulico. A lo largo del recorrido del sector estudiado se presentan las siguientes características antrópicas: centros urbanos de alta densidad, establecimientos industriales, actividades agrícolas y asentamientos marginales.

Esta investigación se propone como objetivos: Analizar el comportamiento hidráulico del tramo en estudio, estimando los perfiles hidráulicos para un caudal de formación, a partir de dicho parámetro se determinó las velocidades medias del flujo, Numero de Froude, tirantes, velocidades críticas y tensiones de cortes asociadas al tramo afectado con y sin obra.

A los efectos de tener una visión más amplia se aplicaron algunas metodologías desarrolladas en la antigua Unión Soviética en lo que respecta a estabilidad de cauce (Rosinsky y Mirtsjulava). Con todos estos elementos se plantean unas series de cotejos evaluativos, donde nos define cuantitativamente la eficiencia de la obra y su durabilidad.

Además se identificaron zonas críticas en donde se desarrolla una planicie de inundación, para estimar la ubicación de las delimitaciones morfológicas de las secciones a lo largo del segmento seleccionado en los dos escenarios y cuantificar los impactos producidos por la obra construida. Por último, se realizó un análisis fluvio-morfológico del comportamiento del cauce, por las alteraciones de su geometría natural, aplicando la relación de balance sedimentológico conocida como metáfora de la Balanza de Lane.

En cuanto a la metodología, se llevó a cabo la interpretación, análisis y clasificación de información recopilada. Posteriormente se ejecutaron modelizaciones computacionales a través del software HEC-RAS. Finalmente se realizó el análisis y la interpretación de los resultados y se obtuvieron conclusiones técnicas sobre el comportamiento morfodinámico del tramo evaluado, tras el cual se aportan recomendaciones para contribuir al mejor funcionamiento del mismo.

*Palabras claves: Río Salí; actividades antrópicas; Software de modelización de ríos; Morfología Fluvial; Relación de Lane.*

## INDICE GENERAL

CAPITULO 1:.....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Estado del arte .....	10
1.3 Presentación del área de interés.....	13
CAPITULO 2: Definición del problema de investigación .....	17
CAPITULO 3: Análisis del material disponible.....	19
3.1. Introducción .....	19
3.2. Descripción del modelo HEC-RAS.....	19
3.3. Estudio Hidrológico.....	23
3.3.1.- MEMORIA DE PROCEDIMIENTO.....	23
3.3.1.1.- Objeto de la hidrología.....	23
3.3.1.2.- La cuenca de aporte.....	23
3.3.1.3.- Determinación de caudales.....	29
3.3.1.4.- Modelo precipitación caudal.....	30
3.3.1.5.- Hipótesis hidrológicas.....	33
3.3.1.6.- Resultados de los análisis Hidrológicos.....	34
3.4. Aspectos sedimentalógicos .....	34
3.4.1. Localización y características de las muestras .....	34
3.4.2. Análisis granulométrico .....	37
3.4.3. Parámetro granulométrico de la muestra.....	38
CAPITULO 4: Análisis de parámetros .....	40
4.1. Topografía.....	40
4.2. Infraestructura existente.....	40
4.3. Perfil longitudinal.....	42
4.4. Secciones transversales.....	43
4.5. Coeficiente de Manning.....	46
CAPITULO 5: Análisis Fluvio-Morfológico del tramo del Río.....	51
5.1. Introducción .....	51
5.2. Características Fluvio - Morfológica aplicada a cada tramo - .....	50
5.2.1. Escenario Estado natural (año 2007) o sin obra de rectificación.....	51
5.2.2. Escenario Estado de Proyecto (año 2009) o con obra de rectificación completa.....	60
5.3. Análisis del caudal de diseño .....	66
5.4. Explicación de los parámetros analizados en la tabla general .....	68
5.4.1 Interpretación de los resultados parciales .....	72
CAPITULO 6: Ampliación del análisis .....	74
6.1 Aplicación de las teorías de Rosinsky y Mirtsjulava.....	74
6.2 Tabla resumen de Velocidad crítica, Tensión de corte crítica, Método de Rosinsky y Método de Mirtsjulava.....	79
6.2.1 Observaciones.....	81
6.3 Cotejo de parámetros entre ambos escenarios .....	81
6.3.1 Tabla resumen y cotejo de los primeros parámetros.....	81
6.3.2 Cotejo de los otros parámetros.....	84

6.3.3	Tabla de comparación de “Velocidad media de circulación” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.	85
6.3.4	Tabla de comparación de “Tirantes” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.	86
6.3.5	Tabla de comparación de “Número de Froude” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.	87
6.3.6	Conclusiones de la comparación de parámetros.	87
CAPITULO 7: Estudio de la morfología transversal del río .....91		
7.1	Introducción	91
7.2	Criterio para la construcción de las líneas morfológicas de la sección transversal de un río.	91
7.3	Análisis delineativo de las imágenes	92
7.3.1	Imágenes 2002.	92
7.3.2	Imágenes 2014.	95
7.3.3	Comparación del canal de aguas bajas.	97
7.3.4	Comparación del cauce menor	99
7.3.5	Observaciones parciales	101
7.4	Comparación canal de aguas bajas y proyecto	101
7.4.1	Observaciones parciales	109
CAPITULO 8: Estudio fluvio-morfológico, basado en el concepto de la Balanza de Lane .....110		
8.1	Introducción	110
8.2	Análisis de la metodología	108
8.3	Gráficas comparativas entre el Método de Lane y la Situación de Proyecto calculado con el HEC-RAS.	114
8.4	Observaciones parciales.	115
8.5	Análisis e interpretación del planteo cualitativo de Chang de la relación de Lane.	116
8.5.1	Análisis numérico de las ecuaciones	124
8.6	Conclusiones de la unidad.	125
CAPITULO 9: Conclusiones ..... 127		
Bibliografía ..... 132		

# **CAPITULO 1:**

## **1.1 Introducción**

El propósito principal de la presente Tesis es establecer la incidencia de la realización de la obra “Rectificación del cauce” sobre el comportamiento hidráulico del río en las inmediaciones del sector estudiado, antes y después de la obra ejecutada.

Como objetivos particulares se propone analizar el comportamiento hidráulico del tramo en estudio, estimando los perfiles hidráulicos para un caudal característico determinando las velocidades medias de flujo, números de Froude, tirantes y tensiones de cortes asociadas al tramo afectado con y sin obra; además se estimará la ubicación de las delimitaciones morfológicas transversales a lo largo del segmento seleccionado y analizar el impacto del “nivel de afectación del agua”, con y sin obra en el ambiente fluvial (curso principal y planicie de inundación) y por otro lado se propone analizar la fluvio-morfología del comportamiento del cauce, por las alteraciones de su geometría natural, tipo Balanza de Lane y otros.

Con todos estos elementos se definirá un mecanismo mínimo necesario para poder evaluar los impactos ambientales que puede provocar la realización de dicha obra o cualquier obra ejecutada sobre el cauce de un río, en ese sentido se analizará una obra específica que es una “rectificación de cauce en el Río Salí, planteada en su parte más importante de su recorrido” y lo que se quiere lograr es un mecanismo aplicable a acciones con características hidráulicas similares.

Como caso particular de análisis y estudio se tomó la Obra: “Canalización de río Salí y Obras complementarias”, el proyecto consiste en la rectificación en sección transversal y longitudinal del cauce (variando su pendiente y su geomorfología en planta), provocando una acción antrópica importante sobre el propio río.

La obra tiene una longitud aproximada de 7.000 m, ubicada en el sector más importante del recorrido del río, ya que pasa por el límite de San Miguel de Tucumán, de Alderetes y Banda del Río Salí, (ver figura 1.1).

Como metodología a seguir, se planteará dos escenarios, uno en condiciones sin obra (Escenario Natural) y el otro en condiciones de obra concluida (Escenario con Proyecto ejecutado y concluido).

En primera instancia se analiza los distintos parámetros que son determinantes para la valoración de la obra, comenzando con un estudio Fluvio-morfologico en planta del tramo investigado.

## AREA METROPOLITANA Gran San Miguel de Tucuman



En la figura 1.1, se muestra la ubicación de la obra con respecto al gran San Miguel de Tucumán y ciudades aledañas, [Ref(1)]. Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.

Se definió el caudal líquido circulante teniendo en cuenta las limitaciones de la topografía disponible en el Proyecto ejecutivo de referencia, [Ref.(1)].

Ya entrando un poco más en el análisis, se comenzó con la comparación de parámetros representativos en distintos estados, a continuación se lo describe:

Se coteja:

“Velocidad media de circulación” con la “Velocidad crítica”, en estado Natural por un lado y en estado Proyecto por otro lado.

“Tensión de corte en el fondo” con la “Tensión de corte crítica”, en estado Natural por un lado y en estado Proyecto por otro lado.

En caso que los análisis indicados no arrojen valores representativos para tomar una decisión, es que en tal situación se continuará con el análisis, determinando y cotejando otros parámetros, ellos serían los siguientes:



“Tirante” con la “Profundidad de erosión localizada”, obtenida mediante el Método de Rosinsky.

“Velocidad media de circulación” con la “Velocidad de fondo crítica”, obtenido mediante el Método de Mirtsjulava.

Los métodos de Rosinsky y Mirtsjulava son aplicables para lechos cohesivos, el Río Salí no cumple completamente esta condición, esto se verá cuando se haga los análisis granulométricos, pero las planicies de inundación si lo cumple. Estudiando con este método nos dará una visión más amplia y tendremos más elementos de comparación y análisis.

Los cotejos anteriores son relativos a cada sección estudiada, se compara un parámetro particular con respecto de su condición crítica y se lo califica como “erosivo” o “no erosivo”, se computa cada sección y se analiza los resultados finales en forma más global.

Para tener otro punto de vista, es que se estudia los siguientes factores “Velocidad media de circulación”, “Tirantes” y “Numero de Froude” en las distintas secciones del tramo de estudio, tomando valores de referencia y determinando cuanto valores son mayores o menores al coeficiente de comparación o de referencia. Con estas tablas se realizan gráficos donde se interpreta los valores obtenidos y su comportamiento.

Continuando con el estudio es que se analizó visualmente a través del software Google Earth la “Morfología transversal natural del Río Salí” de todo el tramo en estudio, los rasgos fisiográficos estudiados son: Canal de aguas bajas, Cauce menor y Cauce mayor, en las dos situaciones, ante de la obra, y posterior a la conclusión de la obra. Las dos situaciones fueron comparadas con el Proyecto Ejecutivo y se determinaron porcentajes de porciones alteradas del Proyecto. Este análisis es muy rico ya que nos da un valor cierto y real de lo sucedido antes y después de la ejecución de la obra, y su grado de alteración y nos confirma los valores obtenidos del cotejo.

Y por último se estudió la fluvio-morfología de los tramos, basándome en el concepto de la Balanza de Lane. La metodología fue recopilar los mecanismos físicos-matemáticos planteados por otros autores, entre ellos Julien, Chang, las ecuaciones recopiladas por Farías y Ponce.

Con todos estos elementos y realizando un análisis profundo se puede establecer la incidencia en la realización de la obra “Rectificación del cauce” sobre el comportamiento hidráulico del río en las inmediaciones del sector estudiado, antes y

después de la obra ejecutada que es el objetivo principal de la presente Tesis y en las deducciones parciales de cada unidad da cumplimiento de cada objetivo particular.

## **1.2 Estado del arte**

Estudiar la estructura, forma, la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo y las características del perfil, todo esto comprende la morfología de los ríos. En esencia, las teorías y planteamientos analíticos para ríos se han desarrollado para casos ideales. Los datos empleados, ya sean de campo o de laboratorio, corresponden a canales rectos con secciones transversales casi invariantes, en los cuales se supone que el gasto es casi constante y se mantiene por grandes períodos. Como elemento principal de definición de datos para la presente Tesis es que se tomó el “Proyecto Ejecutivo “Canalización Río Salí y obras complementarias, Tramo: Los Gutierrez – San Andrés””, ejecutada dicha obra por la empresa Norgav S.A.C.I.I.F.F. YSYM – 2007, [Ref.(1)]. Este estudio se lo toma como materia prima y punto de partida de la presente tesis ya que dispone de los elementos necesarios para poder analizar y modelar el tramo en cuestión y también por ser el más actualizado. En resumen, de dicho proyecto se toma los siguientes estudios particulares: características fluvio-morfológicas, aspectos hidrológicos, aspectos sedimentológicos, geometría hidráulica (topografía).

Los ríos reales muestran muchas de las características idealizadas en los canales estables; sin embargo existen varias diferencias entre ambos, que es necesario conocer para aplicación satisfactoria de dichas teorías.

Para obtener los valores de análisis se utilizó un modelo computacional, el software elegido es el Hec Ras (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers, versión 4.1.0, enero 2010. Este modelo permite estimar los niveles alcanzados por el agua en un canal, o sistema de canales (natural o artificial), con flujo permanente gradualmente variado, en condiciones de flujo subcrítico, supercrítico o combinación de ambos.

El procedimiento de cálculo utilizado es la solución unidimensional de la ecuación de Manning. La ecuación de energía utilizada en situaciones de flujo gradualmente variado permite además modelar alcantarillas, puentes, vertederos, etc., y en flujo bruscamente variado se utiliza la ecuación de cantidad de movimiento, con esta se puede definir las curvas de resalto producidas, cubriendo de esta forma todas las

singularidades posibles. Tales características, entre otras, hacen a este modelo uno de los estándares para el tipo de análisis que se pretende en el sistema proyectado.

La modelación matemática de flujos a superficie libre constituye en la actualidad una herramienta ingenieril utilizada cada vez con mayor aceptación en estudios relacionados con los recursos hídricos. Los modelados matemáticos son de vital importancia como herramienta de diseño y verificación cuando la complejidad y alcance del fenómeno abordado no pueden ser resueltos usando los métodos tradicionales en hidráulica, (modelos físicos).

Los usuarios que usan los sistemas de modelación computacional no deberían estar solamente interesados en los aspectos físicos del problema, sino que en vistas a una correcta interpretación de los resultados se deben conocer al menos las hipótesis más relevantes, limitaciones y estructuras de los sistemas de simulación.

El proceso de modelado numérico computacional consiste esencialmente en la descripción de un sistema físico asociados a un grupo de números o medidas características y simulando las leyes actuantes con un grupo de operaciones de estos números.

En el libro de “Modelación matemática de Flujos a superficie libre”, Riccardi – 2005 - se aborda el modelado numérico unidimensional, cuasibidimensional y bidimensional de escurrimiento en cursos de agua y valles de inundación en régimen super y subcrítico.

Continuando con los pasos ejecutados en la presente Tesis se observa que los métodos de análisis fluvio-morfológico en la actualidad presentan unas series de limitaciones, entre las cuales se pueden destacar las siguientes:

Muchas de ellas han evolucionado a partir de conceptos de transporte de sedimentos, los cuáles utilizan la tensión tractiva para definir la estabilidad de la partícula. El valor de la tensión tractiva crítica se determina por el conocido diagrama de Shields. La mayor parte de los métodos basados en este concepto utilizan un valor constante del coeficiente de Shields, para casos de flujo turbulento rugoso, o leyes de velocidad de tipo logarítmico para relacionar velocidad con tensión tractiva. Dado que algunos investigadores han encontrado que el coeficiente de Shields varía con la rugosidad relativa y otros que las leyes logarítmicas de velocidad están también afectadas por ésta, resulta que muchas de los cálculos del tamaño del material de arrastre estan basados en conceptos de rugosidad relativa, pudiendo no resultar aplicables, estos

conceptos se lo puede ver en el libro “Geomorfología e hidráulica fluvial” de Basile – 2004.

Los métodos basados en la tensión tractiva tienen una clara desventaja respecto a los que utilizan como parámetros de cálculo, ya que desde un punto de vista práctico de aplicación en ingeniería la tensión tractiva local resulta difícil de medir y de conceptualizar en comparación con la velocidad.

La mayoría de los métodos existente no tienen en cuenta el efecto de la graduación, espesor y tamaño del material de arrastre.

Los métodos que utilizan la velocidad como parámetro de cálculo utilizan diferentes tipos de velocidad, entre ellas, velocidad media, velocidad media local, velocidad en el fondo, velocidad contra el material de arrastre, velocidad a una cierta distancia del fondo, etc. Este hecho puede crear cierta confusión en la utilización de los métodos de cálculo.

Entre todos los métodos encontrados en la literatura específica existente al respecto, tanto los basados en la tensión tractiva cómo los basados en la velocidad, solamente uno, el desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, tiene en cuenta, a efectos prácticos de cálculo, el efecto de la curvatura en planta sobre el tamaño de piedra en una protección de escollera dispuesta sobre un talud.

Las teorías de Rosinsky y Mirtsjulava tratan de procesos de erosión hídrica en suelos cohesivos, obtenida del libro “Erosión hídrica en curvas de llanura sobre los lechos cohesivos”, Pouey – 1998 – [Ref.(2)]. El tipo de suelo sobre el Río Salí es una mezcla de distintos tipos de materiales, donde tiene una porción de arcilla (suelo cohesivo). Cabe aclarar que dentro de una misma sección transversal del río, el suelo está compuesto por distintas granulometrías, por ejemplo sobre la propia solera del cauce principal el material del suelo es gravoso y sin material fino, sobre las bermas del cauce es un material gravoso con muy poco de material fino y sobre la planicie de inundación del río la granulometría se compone de un conglomerado o mezcla de suelos finos y gruesos.

Con respecto de los estudios Morfológicos se tomó varios texto que se refiere al tema, uno de lo que se aplicó es “Modelo morfológico simplificado para estimar las tasas de migración lateral en los ríos de llanura”, en el mismo se describe que los ríos aluviales en ambientes de llanura son en general proclives a desarrollar patrones de alineamiento en planta que siguen un trazado curvilíneo, el cual se adquiere a través de complejos procesos de erosión de márgenes y migraciones laterales del curso. En ese trabajo se

presenta un modelo morfodinámico simplificado, basado en el uso de variables hidrodinámicas que se pueden estimar a partir de un modelo unidimensional y de una serie de parámetros de erosión de márgenes que se pueden evaluar en función de las características geotécnicas del material constitutivo de las mismas. El modelo se aplica a dos casos particulares (ríos situados en el norte argentino) y se evalúan las ventajas y limitaciones del mismo en cuanto a sus capacidades de predicción de tasas de migración y posibilidades de refinamiento futuro de la metodología propuesta.

Además en dicho trabajo se encuentra una clasificación del río siguiendo los lineamientos de Rosgen y Silvey. Una de las graficas se basa en la relación de anchos de faja y cauce, y la otra grafica se base en pendiente y sección transversal; ambas graficas disponen de configuraciones en planta.

Otro de los textos utilizados en la presente es “Fórmulas Prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales”, “Lane’s Balance” y “Analytical River Morphology and River Channel Changes”, en estos trabajos se presenta un conjunto de fórmulas prácticas de diseño, basadas en el análisis de los aspectos esenciales de la estabilidad de canales en planicies aluviales, como lo son: fricción aluvial, transporte de material sólido y estabilidad de márgenes. Estos textos permiten arribar a la obtención de un menú de ecuaciones de diseño con base racional, que podrían aplicarse tanto para el cálculo de canales arenosos en régimen, así como para el diseño de obras de estabilización en cauces fluviales. El objetivo del presente estudio es la de obtener un conjunto de fórmulas prácticas de diseño para canales arenosos en régimen. Las mismas estarán basadas en un análisis cuantitativo racional, apoyado en la mecánica de los procesos físicos dominantes: resistencia al flujo, transporte de sedimentos y estabilidad de las márgenes en un canal aluvial.

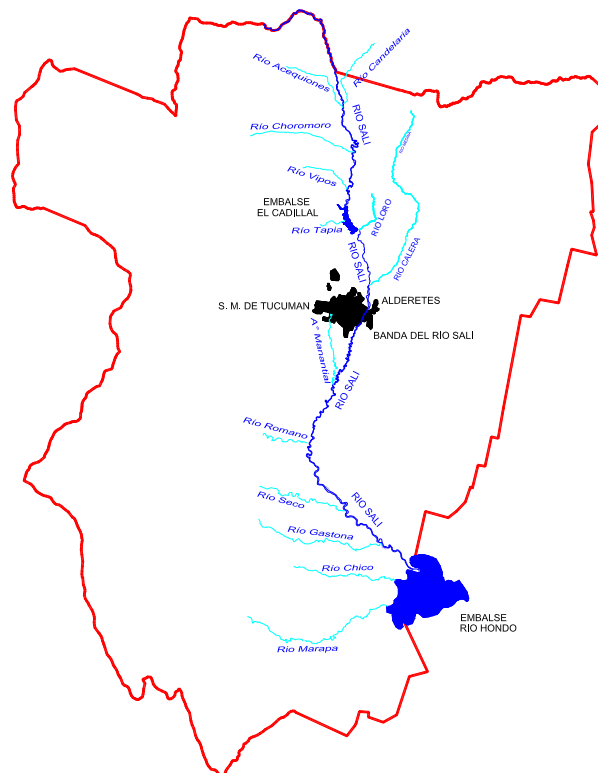
Estas series de características y limitaciones de las distintas metodología de cálculo de “erosión sobre el cuerpo de un cauce”, me conduce a realizar un exhaustivo análisis de las metodologías existente para tratar, posteriormente, de paliar alguna de estas limitaciones.

### **1.3 Presentación del área de interés**

El río Salí es un importante río del centro-norte de Argentina, perteneciente a la cuenca endorreica del Sistema Fluvial Salí-Dulce, y es el principal curso fluvial de la provincia de Tucumán, en donde recorre más de 200 km.

El Río Salí nace con el nombre de Grande en el sur de la provincia de Salta, toma rumbo sur e ingresa en la provincia de Tucumán, dividiendo prácticamente por la mitad a la provincia.

De diseño fluvial meandriforme, su caudal está regulado por el embalse El Cadillal. Es el eje colector de la mayoría de los ríos que nacen de las laderas orientales de las Cumbres Calchaquíes y Sierras del Aconquija que desembocan en la margen derecha, con orientación oeste-este y noroeste-sudeste. Por la margen izquierda recibe pocos afluentes con aportes hídricos de escasa significación.



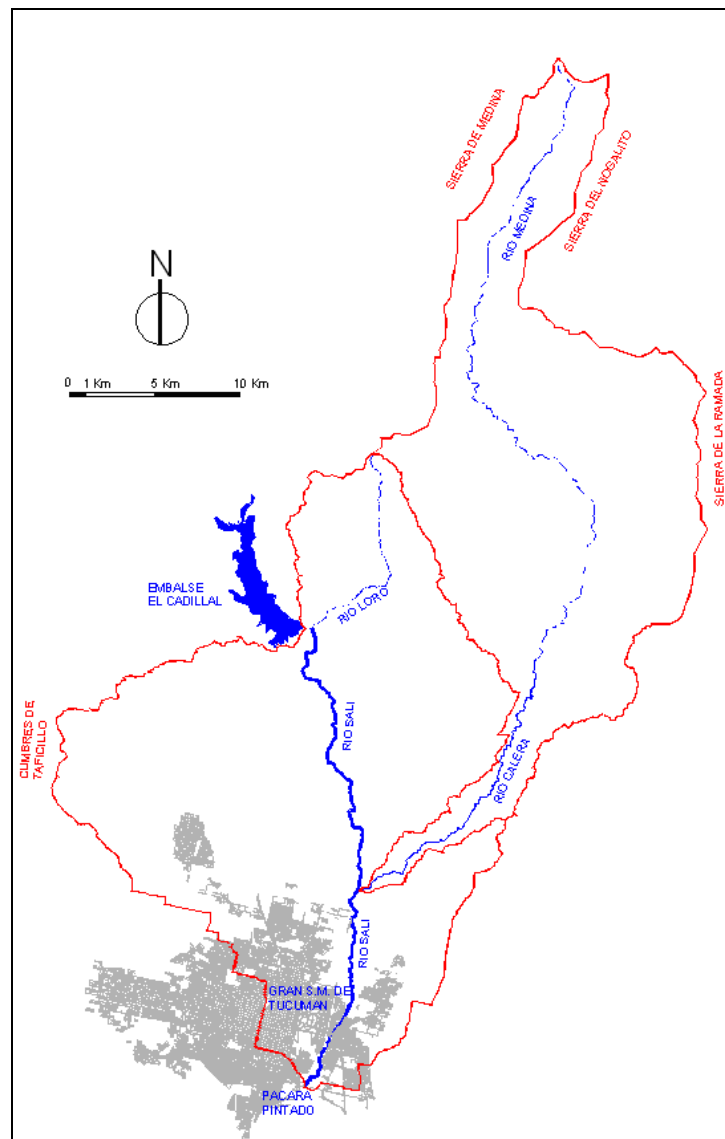
*En la figura 1.2, se muestra la ubicación general del Río Salí en la Provincia de Tucumán, [Ref(1)].  
Fuente: Proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*

Entre estos afluentes se encuentran, de Norte a Sur, los ríos Candelaria (de Este a Oeste), Acequiones (de Oeste a Este), Choromoro (de Oeste a Este), Vipos (de Oeste a Este), Tapia (de Oeste a Este), Loro (de Este a Oeste), Calera (Este a Oeste), Arroyo Manantial (de Oeste a Este), Romano (de Oeste a Este), Seco (de Oeste a Este), Gastona (de Oeste a Este), Chico (de Oeste a Este) y Marapa (de Oeste a Este).

En la llanura tucumana, el río Salí adquiere una dirección de escurrimiento aproximadamente norte-sur que luego varía de noroeste-sudeste al desembocar en el embalse Río Hondo, en el límite con la provincia de Santiago del Estero, en esa provincia recibe el nombre río Dulce. Recorre la provincia en forma diagonal y con

sentido sureste, pasando por el conglomerado urbano que forman las ciudades de Santiago del Estero y La Banda.

El río Salí es, asimismo, el núcleo que concentra las principales actividades económicas, sociales, políticas y de infraestructura de la provincia de Tucumán. A lo largo de su recorrido se realizan importantes actividades antrópicas destacándose especialmente centros urbanos de alta densidad (San Miguel de Tucumán), establecimientos industriales, actividades agrícolas y asentamientos marginales los que provocan fuertes impactos sobre el ambiente, “Influencia de factores naturales y antropogénicos en el diseño de drenaje fluvial en áreas urbanas”, [Ref.(23)].



En la figura 1.3, se muestra la intercuencia aguas abajo del Cadillal, [Ref(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.

La necesidad de agua para riego, actividad industrial –descarga de efluentes - y consumo humano ha llevado, asimismo, a la realización de obras de regulación y canales que han modificado su patrón de drenaje.

Asociados a las actividades anteriores, es importante mencionar la existencia, en sus márgenes, de basurales a cielo abierto que pueden modificar la sección transversal y provocar una alta contaminación al propio río.

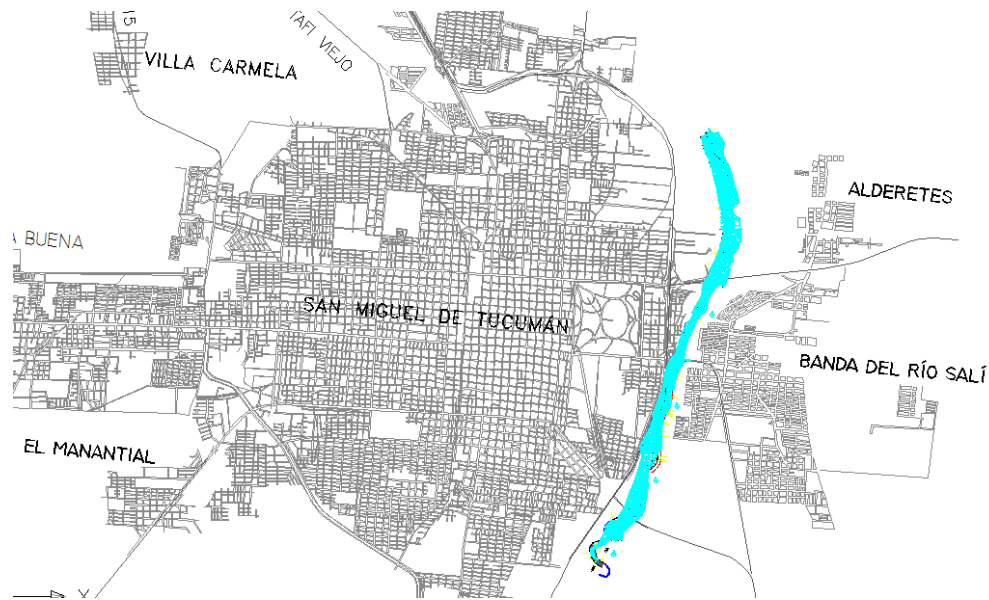
Existen también empresas que extraen áridos del cauce del río, en forma descontrolada y clandestina, lo cual lleva a cabo una fuerte antropización con efectos ambientales negativos.

Como se describió, la antropización del río Salí es de diversa índole, en este trabajo se estudiará la “CANALIZACIÓN RÍO SALÍ Y OBRAS COMPLEMENTARIAS, TRAMO: Los Gutiérrez – San Andrés”. Esta obra trata de una rectificación en planta y en sección del cauce del río.



## **CAPITULO 2: Definición del problema de investigación**

En el presente trabajo se pretende estudiar el cambio producido en el cauce del río Salí por acción de la obra “Canalización río Salí y obras complementarias; tramo: Los Gutiérrez - San Andrés”. La misma incluye la rectificación del curso y la adecuación geométrica de la sección transversal del cauce natural a una sección impuesta por el proyecto.



*En la figura 2.1, se muestra la ubicación de la obra con respecto al gran San Miguel de Tucumán y Banda del Río Salí, [Ref(1)]. Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*

El tramo en estudio se desarrolla en el sector Este de la ciudad de San Miguel de Tucumán, entre el Puente Carretero Oscar M. Barros y el Vaciadero de Residuo Sólidos “Pacará Pintado”, afectando a los municipios de San Miguel de Tucumán (margen derecha) y Banda del Río Salí (margen izquierda).

El estudio arranca a 405 m aproximadamente aguas abajo del “Puente Ferroviario Línea Mitre”. En las coordenadas Gauss Krueger Argentina, Zona 3 (67.5 W – 64.5 W), Datum: WGS84; 26°48’50,54”S y 65°09’36,82”O. En cotas planas UTM X=7.034.664,2938 e Y=3.583.489,9540.

El estudio termina a 1.200 m (medido en forma recta) aproximadamente aguas abajo del “Puente San Cayetano”. En las cotas Gauss Krueger Argentina, Zona 3 (67.5 W – 64.5 W), Datum: WGS84; 26°52’35,32”S y 65°11’53,99”O. En cotas planas UTM X=7.027.770,0733 e Y=3.579.657,9155.

El tramo estudiado tiene una longitud aproximada de 7.000 m y tiene un ancho estimado de estudio y afectación de 100 a 150 m para cada lado, con respecto del eje del río.

La fecha de construcción del proyecto “Canalización del Río Salí y Obras complementarias” fue desde 05/2.008 hasta el 02/2.009.

## **CAPITULO 3: Análisis del material disponible**

### **3.1. Introducción**

El principal material disponible es el “Proyecto Ejecutivo” que se desarrolló para la construcción de la obra en cuestión [Ref.(1)]. En este capítulo se presenta un resumen de la documentación analizada, haciendo transcripciones textuales de los estudios que se considera útiles para la presente Tesis.

Para la concreción de los objetivos de la tesis se dispone de la hidrología de San Miguel de Tucumán, la topografía en estado Natural del río Salí, la topografía en estado de Proyecto del río Salí, estudios sedimentológicos del río Salí, Informe y estudios hidráulicos, fotos del cauce del río y terrazas de inundación tanto en estado Natural como en Proyecto, todo obtenido de la documentación antecedente [Ref.(1)].

Se define como “Estado Natural” al estado del río antes de la obra y “Estado de Proyecto” al estado posterior a la ejecución de la obra, (o sea obra totalmente concluida).

El software utilizado para el cálculo hidráulico es HEC-RAS 4.1.0, [Ref.(3)].

A continuación se presenta una breve descripción de los materiales disponibles, indicando sus cualidades y características.

### **3.2. Descripción del modelo HEC-RAS**

La modelación hidrodinámica se realizó con el software HEC-RAS (River Análisis System) desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), versión 4.1.0 (Enero 2010), [Ref.(3)].

El modelo permite estimar los niveles alcanzados por el agua en un canal o sistema de canales (natural o artificial), en cauces de ríos con régimen permanente (si bien en sus últimas versiones permiten también el cálculo en régimen permanente gradualmente variable) en condiciones de flujo subcrítico, supercrítico o combinaciones de ambos.

El procedimiento de cálculo utilizado es la solución unidimensional de la ecuación de energía y de continuidad, y las pérdidas de fricción evaluadas por la fórmula de Manning, con el procedimiento generalmente conocido como Standard Step Method.

La ecuación de cantidad de movimiento utilizada en situaciones de flujo rápidamente variado permite además modelar alcantarillas, puentes, vertederos, etc. y por ende determinar las curvas de resalto producidas por estas singularidades. Tales

características, entre otras, hacen a este modelo uno de los estándares para el tipo de análisis que se pretende en el sistema proyectado.

A continuación se describen las principales características del programa de modelización hidráulica:

a) Teoría básica

Las ecuaciones que resuelve el programa por iteración para llegar a la elevación de la lámina de agua son:

$$H_2 + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} = H_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot J + C \left( \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

Donde cada uno de los términos de las expresiones anteriores representan:

H1, H2:	alturas de la lámina en cada sección
V1, V2:	velocidades medias en cada sección
$\alpha_1, \alpha_2$ :	coeficientes de velocidad
$h_e$ :	pérdida de carga en el tramo
L :	longitud entre secciones
J :	pendiente de la línea de energía
C :	coeficiente de expansión o contracción
g :	aceleración de la gravedad

Se considera un coeficiente de rozamiento medio entre cada dos secciones. Otras pérdidas de energía son calculadas según métodos diferentes. El nivel crítico de la lámina se calcula usando un proceso iterativo.

b) Caudal subcrítico o supercrítico

El cálculo comienza en una sección de control y procede hacia aguas arriba para régimen subcrítico y hacia aguas abajo para régimen supercrítico. En aquellos casos en los que el régimen pasa de subcrítico a supercrítico, o viceversa, el programa detecta el cambio de régimen calculando, de forma automática, el perfil entero dos veces, considerando alternativamente régimen subcrítico y supercrítico.

c) Niveles de partida

El nivel de la lámina de agua para la sección de comienzo de los cálculos (condición de contorno) puede ser especificado por una de las tres maneras siguientes:

- como profundidad crítica
- como un nivel conocido

- por el método del área-pendiente

d) Cálculo

El cálculo del régimen hidráulico puede ser especificado y alterado de varias maneras. El caudal inicial es normalmente especificado como variable  $Q$  y cuando se desea se puede cambiar el caudal que entra en una sección, tal como en la confluencia de otro afluente o en la toma lateral de un encauzamiento.

e) Coeficiente de Manning

Teniendo en cuenta que el coeficiente de rugosidad de Manning depende de factores tales como tipo y cantidad de vegetación, configuración de las márgenes del río, etc., el coeficiente "n" puede ser tomado variable en cada sección y esta variación puede hacerse por diferentes caminos.

Cuando se quiere adoptar un valor de "n" para cada uno de los diques laterales o taludes del río y otro "n" para la solera o cauce del mismo, el programa realiza los cálculos con estos valores. Otro método de utilización del valor de "n" sería dar en cada sección el valor de "n" en función del tirante.

f) Cálculo del tirante crítico

El tirante crítico no se calcula en todas las secciones aunque podría hacerse si se desea; sin embargo, el programa hace un tanteo en cada sección para determinar si el tirante se acerca al crítico. Si el tirante está cerca del crítico, el programa calcula el tirante crítico por medio de una subrutina mediante la que se calcula el punto de energía específica mínima.

g) Secciones transversales

Las secciones transversales son necesarias en todos los puntos representativos a lo largo del río o encauzamiento, esto es, puntos en los que existe un cambio de rugosidad, además de secciones espaciadas regularmente en tramos homogéneos. En general, para ríos de pendiente débil y sección uniforme o casi uniforme debe darse una sección transversal al menos cada doscientos metros.

Para pendientes más fuertes, o secciones transversales variables, serán necesarias un mínimo de diez o veinte secciones por kilómetro. Además, se introducirán todas las secciones especiales existentes en el cauce.

La aplicación de la tecnología GIS facilita la posibilidad de aumentar el número de perfiles a generar.

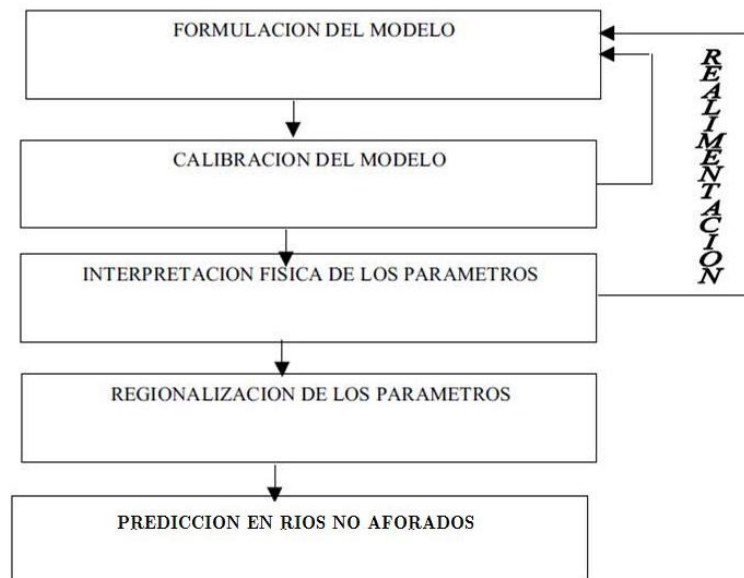
h) Pérdidas localizadas

El programa tiene en cuenta las pérdidas de carga localizadas tales como transiciones, unión con afluentes, etc. Asimismo, el programa tiene en cuenta las pérdidas producidas por obstáculos dentro del cauce tales como pilas de puentes, pequeños azudes, deflectores laterales, etc.

i) Calibración del modelo

El proceso de calibración del modelo debe ser iterativo y el factor de calibración es el coeficiente de Manning, se puede adoptar un valor único para todo el tramo o distintos valores si es que se da la situación. Además se puede variar dicho valor discriminando las paredes con el fondo del cauce del río.

En la figura 3.1, se muestra las etapas de un modelo conceptual, en el mismo se indica los pasos generales a realizar para alcanzar un buen ajuste de los parámetros, en el paso 3 se efectúa un detallado análisis del significado físico de cada parámetro, incluyendo un estudio de sensibilidad que permitiría mejorar la estructura del modelo. Luego se reinicia el proceso. Una vez obtenido el calibrado del modelo (paso 2), el análisis previsto en el paso 3 posibilitará un intento de regionalización de los parámetros, incluido si es necesario un nuevo ajuste de la estructura del modelo. Una vez verificado el modelo en el presente río aforado, se podrá aplicar el estudio a ríos vecinos o de igual características, extraído del libro “Modelación matemática de flujos a superficie libre”, [Ref.(6)].



En la figura 3.1, se muestran los pasos a seguir en la calibración y aplicación de un modelo en ríos, [Ref.(6)].

### **3.3. Estudio Hidrológico.**

En esta parte se realizará un resumen de la hidrología de Tucumán a partir del informe elaborado por la empresa NORGAV S.A. que hizo para el proyecto en estudio, [Ref.(1)].

#### **3.3.1.- MEMORIA DE PROCEDIMIENTO**

##### **3.3.1.1.- Objeto de la hidrología.**

Con este análisis hidrológico obtendremos el caudal máximo correspondiente a una creciente extrema en el cauce del río Salí en una posición dentro del tramo que involucra a la ciudad de S.M. de Tucumán, Alderetes y Banda del Río Salí, coincidente con el vaciadero de residuos sólidos de Pacará Pintado. Para ello se plantearon varios escenarios hidrológicos posibles asociados a eventos extremos considerando en todos los casos proyecciones a un escenario futuro.

De gran importancia resulta en el análisis la presencia del embalse El Cadillal, ya que este afecta fuertemente el tránsito de las crecientes. De los resultados de los estudios antecedentes se conoce los caudales extremos que el embalse eroga ante la ocurrencia de lluvias intensas en su cuenca de aporte. Atendiendo a ello se planteó para este estudio considerar escenarios donde a estos caudales erogados por El Cadillal se les suman los aportados por la intercuenca aguas abajo del embalse. De esta manera se desarrolló un modelo de transformación precipitación-caudal correspondiente a la intercuenca mencionada considerando en el mismo el aporte de los hidrogramas generados en El Cadillal.

##### **3.3.1.2.- La cuenca de aporte.**

La intercuenca agua abajo de El Cadillal tiene una superficie de 953,5 Km<sup>2</sup> con un importante desarrollo norte-sur de aproximadamente 63 Km, ascendiendo en esta dirección desde 413 msnm hasta 2250 msnm, en coincidencia con las cumbres de la subcuenca del río Calera-Medina (Sierra de Medina y Nogalito). En dirección este-oeste su mayor desarrollo es de 34 Km teniendo sus límites oeste y este en las cumbres de Taficillo y de la Sierra de La Ramada respectivamente. El cauce colector principal es el río Salí, cuya dirección preponderante es norte-sur con escurrimientos hacia el sur. Este recibe aportes de ríos, arroyos y canales de desagüe pluvial desde ambas márgenes. Los escurrimientos superficiales siguen la dirección de la pendiente principal del terreno que en general es noroeste-sudeste hacia el oeste del río Salí y noreste-sudoeste hacia el este del mismo. [Ver Figura 3.2].

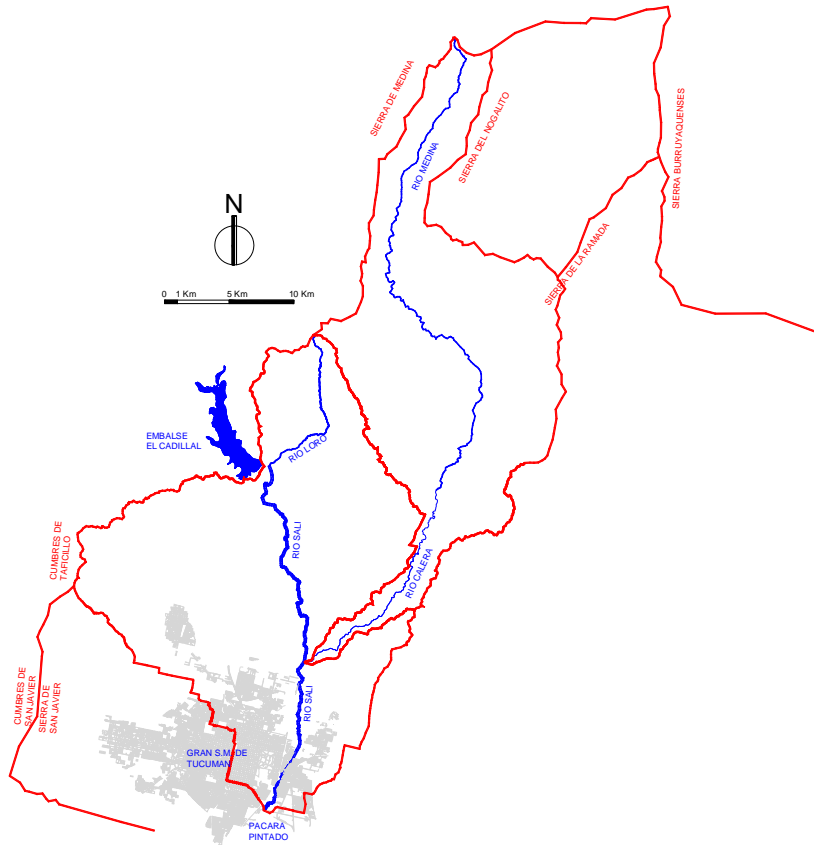


Figura 3.2. Intercuenca aguas bajo de El Cadillal, [Ref(1)].  
 Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.

De la superficie total de la intercuenca corresponden 420 Km<sup>2</sup>, (44%), a la cuenca de aporte al río Calera. Midiendo el cauce de mayor desarrollo en la intercuenca (Salí-Calera-Medina) se tiene una longitud de 84,8 Km ascendiendo aproximadamente 1837 m, lo cual da una pendiente media de 2,17%. Sobre el río Salí desde Pacará Pintado hasta el dique El Cadillal se tiene un desarrollo del cauce de 33,4 Km y un desnivel de 137 m aproximadamente, lo que da una pendiente media de 4,1%. Se estima el tiempo de concentración de la intercuenca en aproximadamente 24 Hs.

El área urbanizada en la intercuenca ocupa actualmente aproximadamente un 10% de su superficie, concentrándose casi la totalidad en el área del Gran San Miguel de Tucumán en el extremo inferior de la misma. La tendencia de crecimiento de las áreas urbanas del área metropolitana mencionada indica que aumentará fuertemente dentro de la intercuenca la migración hacia este tipo de uso del suelo. Gran parte de los sectores destinados a corto y mediano plazo para el emplazamiento de nuevos barrios de vivienda se encuentran proyectados al norte y este de San Miguel de Tucumán, en los municipios de Tafí Viejo, Las Talitas, Alderetes y Banda del Río Salí.



Un análisis del relieve de la cuenca indica que se tiene en la misma un 53% de su superficie constituida por Sierras, el resto tiene características pedemontanas y de llanura. Esta zona serrana se caracteriza por la presencia de bosque con sotobosque bien desarrollado en las laderas y con pastizales en las áreas cumbres. Las acciones antrópicas en estas áreas serranas son moderadas a bajas, no siendo significativas para el presente estudio hidrológico, tanto en un escenario actual como en escenarios proyectados futuros.

Del porcentaje citado 6,4% (61Km<sup>2</sup>) pertenecen a las Sierras de San Javier. Estas se disponen en la porción de la intercuenca ubicada al sudoeste. Se tiene como límite oeste del área de aporte las Cumbres del Taficillo pertenecientes a esta Sierra. La Sierra de San Javier pertenece a la unidad orográfica denominada Sierras Burruyaquenses, (Suayter – 1998), [Ref.(9)]. Criterios anteriores indicaban que esta pertenecía a la unidad orográfica denominada Sierras Centrales la cual forma parte del sistema de Sierras Pampeanas, uno de los dos sistemas morfoestructurales de la provincia de Tucumán, dispuesto de norte a sur en la porción centro-oeste de la provincia.

En la porción de la intercuenca ubicada al este y noreste del embalse El Cadillal se tiene otra zona serrana importante, (446,8 Km<sup>2</sup>), ocupando el 46.9% de la superficie de la intercuenca, conformada por las denominadas Sierras de La Ramada, Del Nogalito y De Medina. Estas pertenecen a la unidad orográfica de las Sierras del Noreste componente del otro sistema morfoestructural de la provincia denominado Sierras Subandinas.

Un basamento metamórfico de muy bajo grado de metamorfismo regional, aflora extensamente constituyendo el núcleo de las Sierras mencionadas. Estas metamorfitas han sido identificadas con el nombre de formación Medina y están constituidas principalmente por: pizarras, filitas, metagrauvas y cuarcitas. Sobre el basamento metamórfico se dispone un manto cuaternario de suelos finos, (arcillas y limos), de espesor variable no superior al metro.

La cobertura vegetal de las laderas está conformada por bosque con importante sotobosque. Se caracteriza la vegetación por la gran variedad constitutiva. Se distingue la selva del laurel y el bosque del cevil desde los 600 a los 1300 msnm, con la aparición de alisos y pino del cerro por sobre los 1300 msnm.

En las zonas pedemontanas y de llanura la acción antrópica fue y es importante con la desaparición casi total del bosque nativo para ser reemplazado por áreas urbanas y

rurales bajo explotación agrícola, (citrus y caña de azúcar). Los suelos que se encuentra en esta porción de la cuenca son finos, (arcillas y limos).

El escenario futuro propuesto para la modelación introduce incrementos significativos en las áreas destinadas a uso urbano. Se acepta que los sectores de ladera con bosque o pastizal no experimentarán cambios en el uso de suelos. Los sectores actualmente urbanizados se expandirán hacia el norte. El espacio hoy parcialmente urbanizado dispuesto entre S.M. de Tucumán, Las Talitas y Tafí Viejo migrarán a un uso totalmente urbano, al igual que zonas ubicadas al este de la actual zona urbanizada de Alderetes. [Ver Figura 2.1]. Los sectores ubicados al norte de Tafí Viejo, Las talitas y Alderetes tendrán una ocupación parcial para uso urbano, considerando que los nuevos asentamientos residenciales se establecerán cercanos a las rutas nacionales y provinciales.

Para la delimitación de cuencas se contempló los sistemas de desagüe pluvial ya proyectados o en proyecto. Este es el caso de los canales de desvío del arroyo Nueva Esperanza, Tafí y el correspondiente a la denominada Quebrada 6. También se contempló la posición de colectores y divisorias que forman parte de los planes directores de los desagües pluviales de Alderetes y Banda del Río Salí, [Ver figura 3.3 y 3.4].

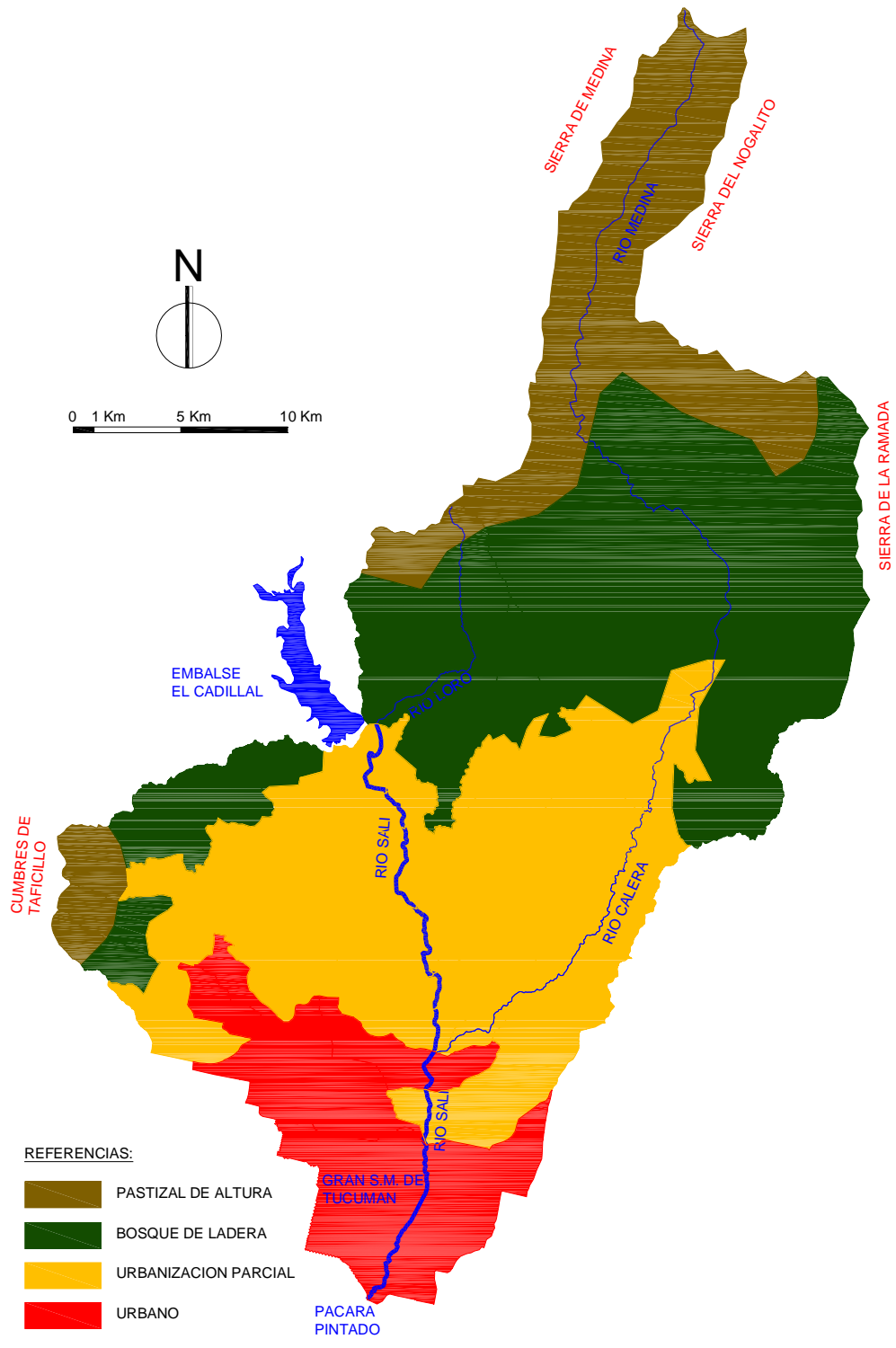


Figura 3.3. Uso de suelo medio proyectado, [Ref.(1)].  
 Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

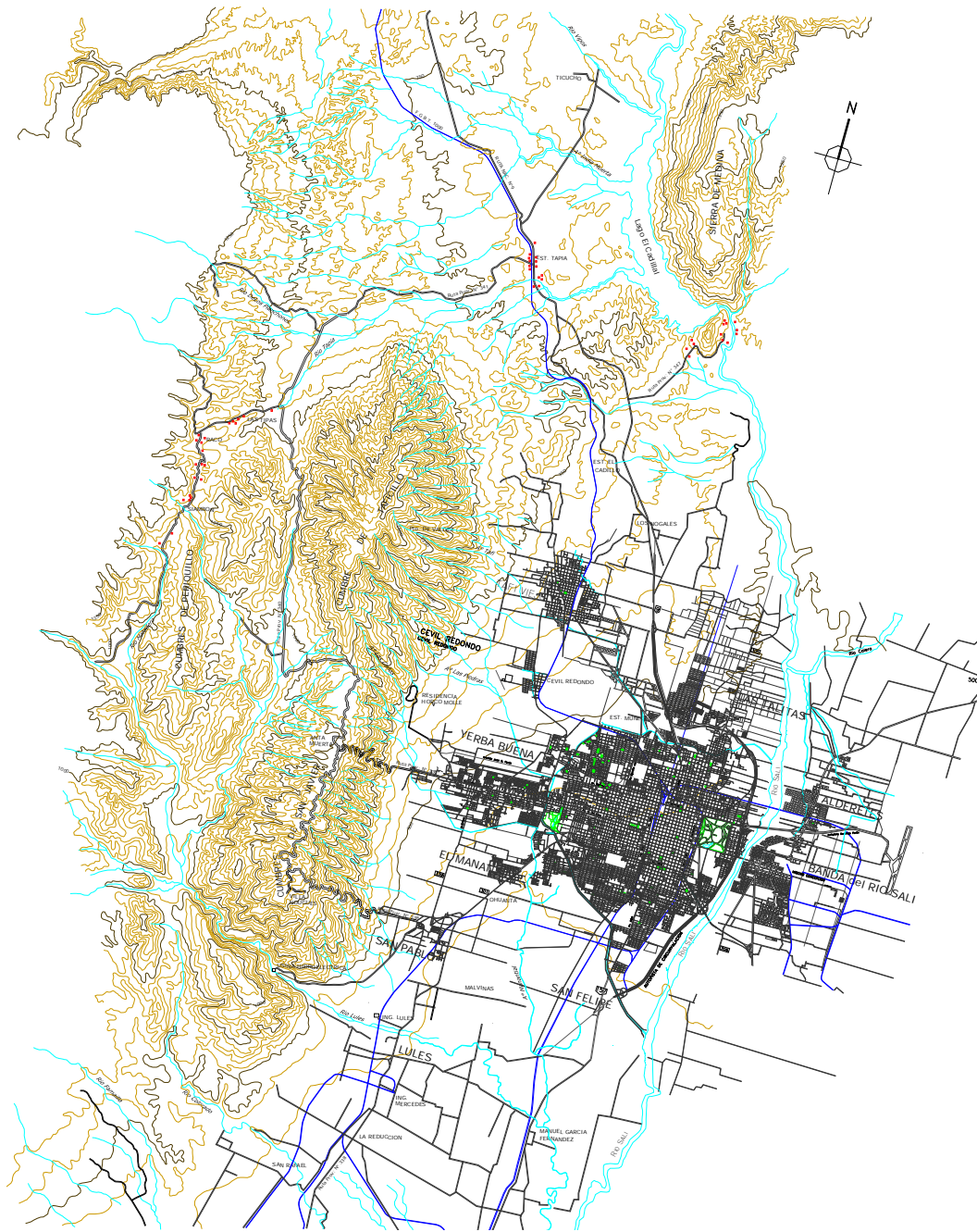
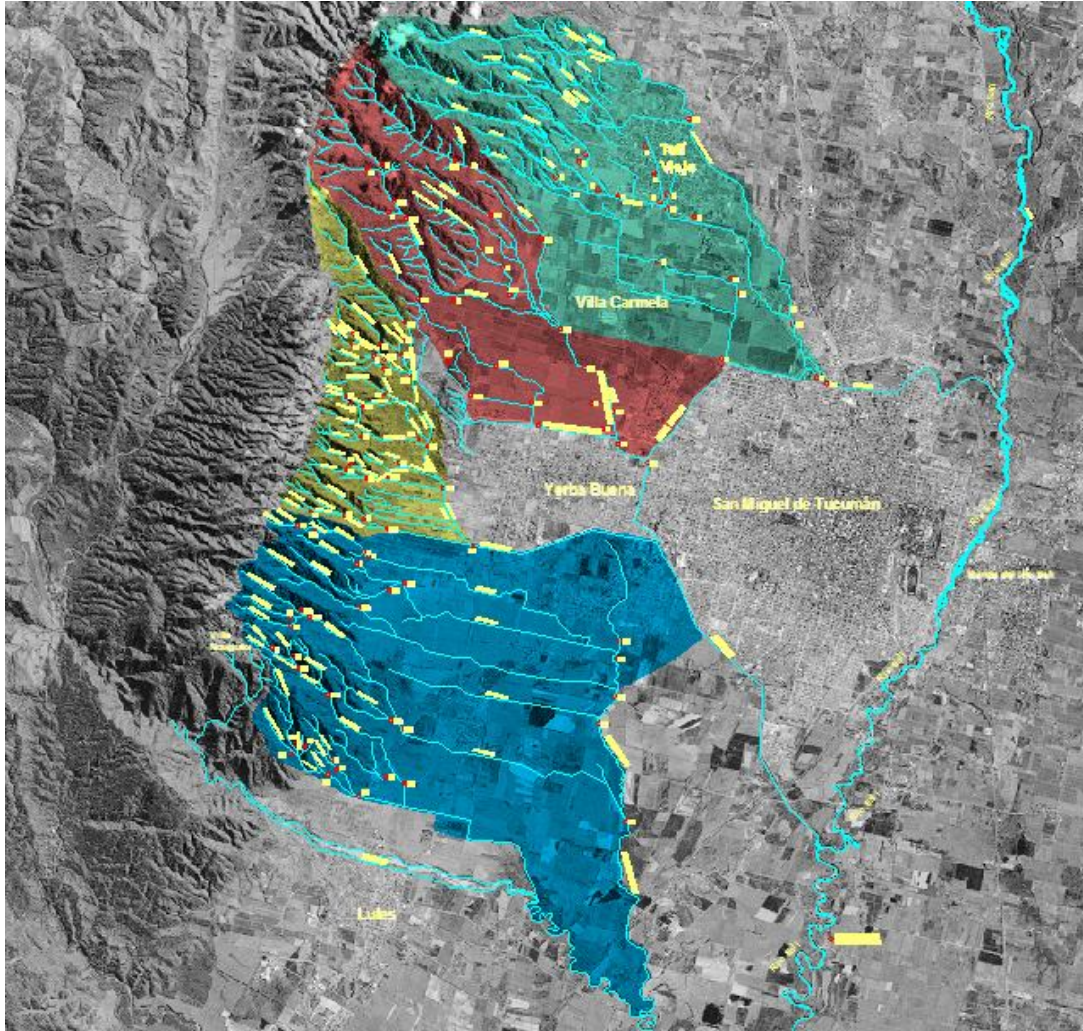


Figura 3.4. Ríos y arroyos que descargan en el Río Salí, [Ref.(10)].

Fuente: Plan Director para la Sistematización de las quebradas del flanco oriental de la sierras San Javier y Actualización del sistema de desagües.



*Figura 3.5. Ríos y arroyos, (con sus cuencas), que descargan en el Río Salí y pasa por San Miguel de Tucumán y alrededores, [Ref.(10)].*

*Fuente: Plan Director para la Sistematización de las quebradas del flanco oriental de la sierras San Javier y Actualización del sistema de desagües.*

### 3.3.1.3.- Determinación de caudales.

La generación del valor de caudal a partir de la precipitación de diseño se realiza a través de un modelo determinístico de precipitación-caudal. Los parámetros y variables utilizadas en el modelo que ofrecen en su valor un cierto rango de variación posible, se determinaron siempre con criterio conservador, es decir se adoptó aquel valor que arrojó el mayor caudal pico. La caracterización hidrológica de la cuenca será la correspondiente a un escenario definido con un horizonte de 50 años.

#### 3.3.1.4.- Modelo precipitación caudal.-

Se utilizó un modelo informático del HEC (Hydrologic Engineering Center) desarrollado en el centro de investigaciones del U.S. Army Corps of Engineers, en una versión adaptada a Windows por la empresa Haestad Methods denominada Visual HEC-1. El mismo simula los caudales resultantes de una precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema de componentes interconectados. Cada componente modela un elemento del proceso precipitación-caudal dentro de una subcuenca, caracterizándolos por un conjunto de parámetros. Los resultados finales de la modelación son los hidrogramas de crecida para cada subcuenca y en lugares predeterminados de la cuenca. Los componentes utilizados en el presente trabajo se enuncian a continuación:

- Componente de precipitación-escorrentía superficial, utilizado para simular el movimiento del agua superficial hacia los cauces.
- Componente de tránsito de caudales, utilizado para representar el movimiento de ondas de crecida en los cauces.
- Componente de hidrograma especificado, utilizado para ingresar una marcha temporal de caudales conocidos en una posición de la cuenca.

En cuanto al componente precipitación-escorrentía superficial es importante destacar que el hidrograma que éste arroja se obtiene aplicando el exceso de lluvia a un hidrograma unitario sintético, obtenido en este caso a través del Método de Clark. Este método permitió tener en cuenta, según lo permite los datos disponibles, los procesos de almacenamiento en la cuenca, evitando con ello sobrevalorar los caudales.

Para el componente de tránsito de caudales la entrada es el resultado de las escorrentías individuales de las subcuencas o de las combinaciones de éstas. El método a utilizar en este caso para el tránsito será Muskingum-Cunge. Las características de los cauces transitados se obtienen de la ponderación de la geometría de la sección del mismo y de su pendiente.

La ubicación de las subcuencas y los cauces se exponen a continuación en un plano de la cuenca:

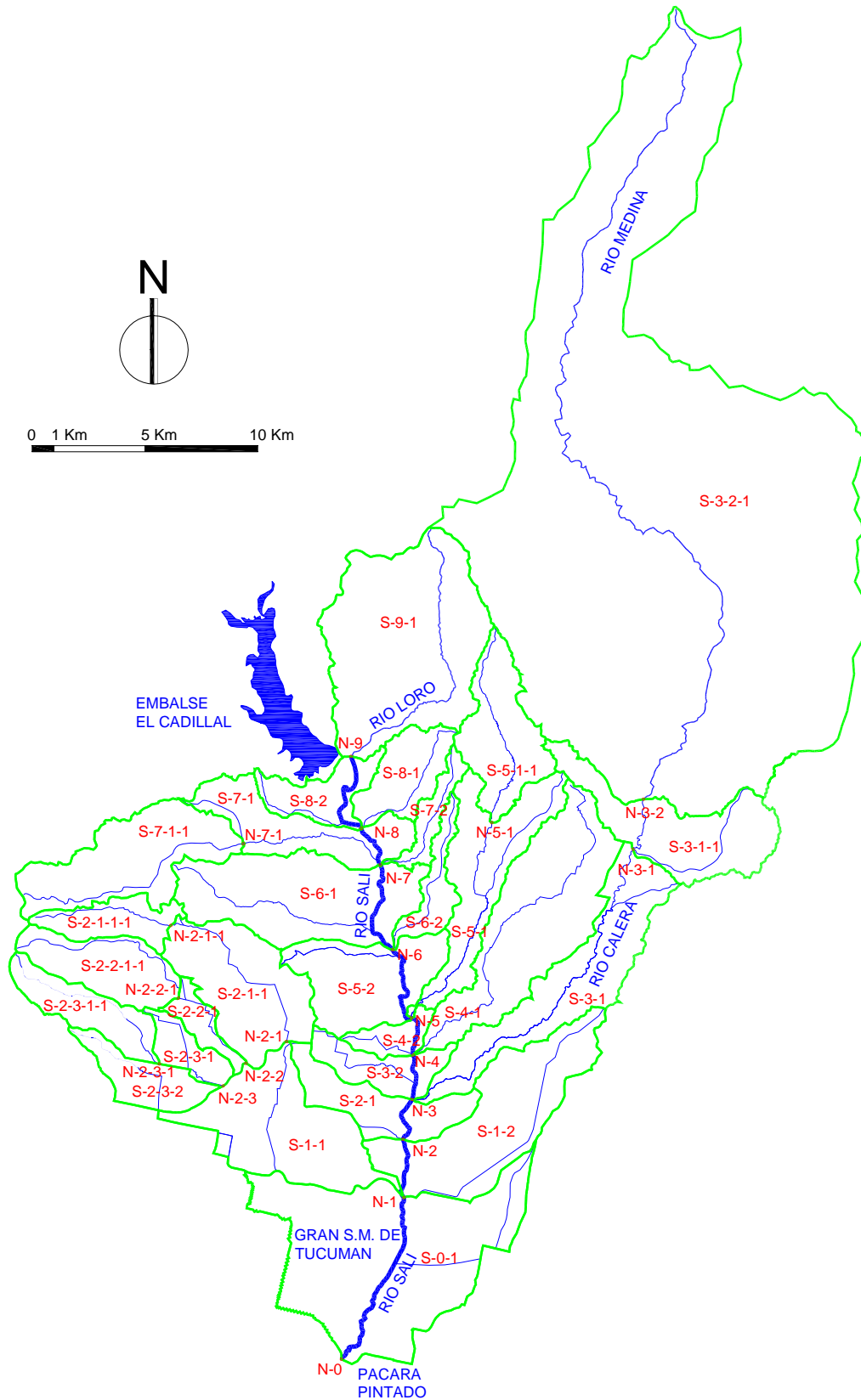


Figura 3.6. Sub-cuencas, nodos y cauces, [Ref.(1)].

Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

Los componentes interconectados que integran el modelo se exponen en el siguiente esquema:

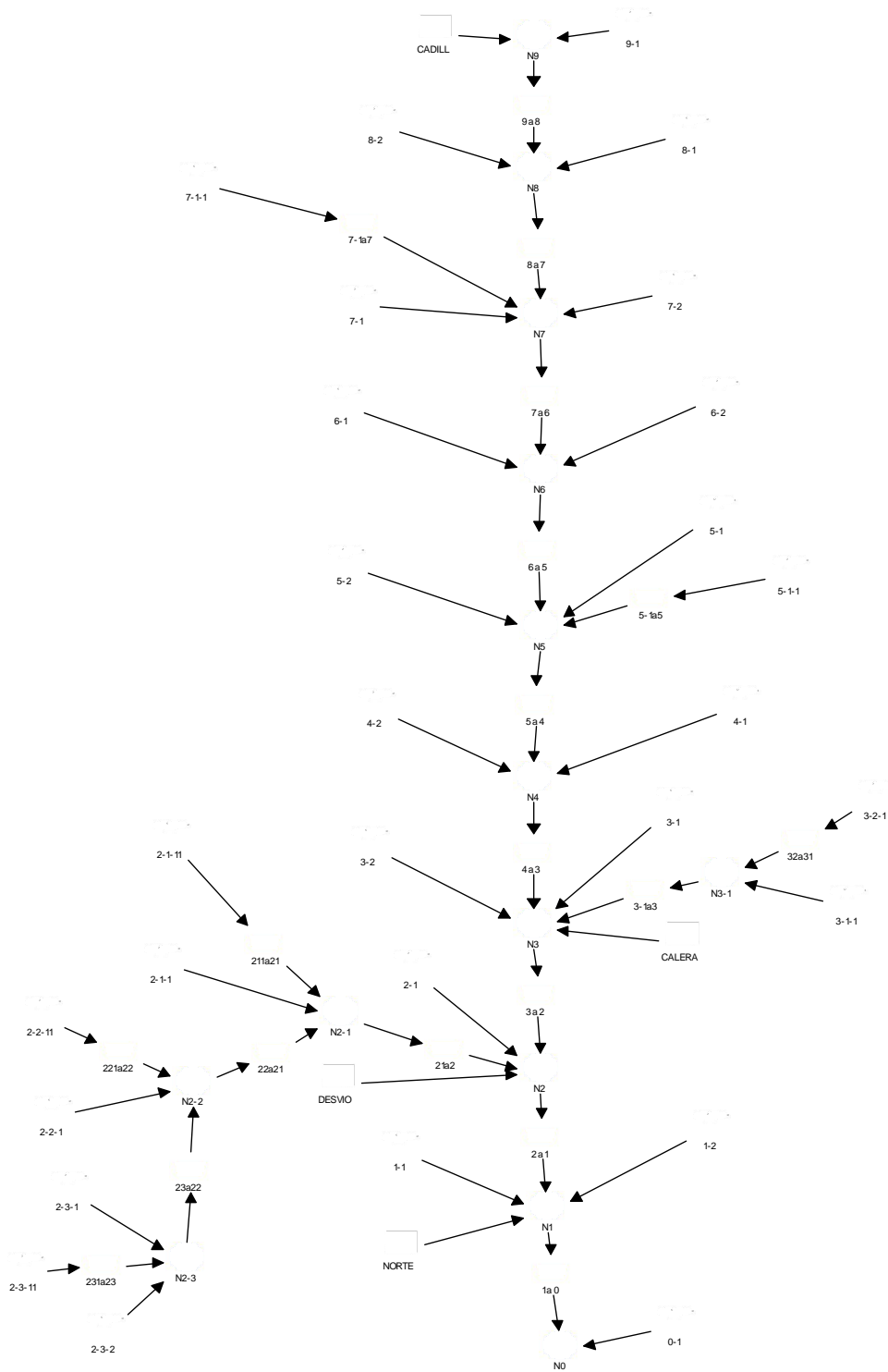


Figura 3.7. Modelo simplificado computacional, [Ref.(1)].

Fuente: Proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.



### 3.3.1.5.- Hipótesis hidrológicas.

Una de las variables que hay que estudiar es la erogación desde El Cadillal que podrán ser combinadas con lo generado en la intercuenca como respuesta a una precipitación:

- Erogación mínima desde la central hidroeléctrica trabajando a pleno. Caudal constante de 24 m<sup>3</sup>/s.
- Erogación correspondiente a una apertura completa de válvulas, (descargador de fondo y riego), más la central hidroeléctrica. Caudal constante de 364 m<sup>3</sup>/s.
- Creciente decamilenaria evacuando en total, (aliviadero, descargador de fondo, de riego y central), un caudal pico de 1.101 m<sup>3</sup>/s. Para tener un hidrograma representativo de la respuesta real del vaso de El Cadillal ante el ingreso de una creciente de esta magnitud se adoptó la distribución temporal de caudales informada en el trabajo: “Sistema De Alerta Hidrológico (Sahid) Embalses Cadillal y Escaba – Prov. de Tucumán”. (Ing. Franklin Adler, Ing. Roberto Lazarte, Ing. Hugo R. Paz). Trabajo realizado para ORSEP, regional Tucumán. Año 1999, [Ref.(11)].

Sobre estas situaciones de erogación de El Cadillal se generó escenarios de la cuenca a modelar sumándole el aporte de la intercuenca resultante de la caída de precipitaciones con tiempos de retorno de 2, 5, 50 y 100 años. También se consideró en el modelo los caudales de flujo base de los ríos Calera (12 m<sup>3</sup>/s), del canal de Desvío de Arroyo Taffí y Nueva Esperanza (1,1 m<sup>3</sup>/s), y del canal Norte (0,9 m<sup>3</sup>/s). Los escenarios considerados para la modelación se exponen con sus características en el siguiente cuadro junto a los caudales pico que estos arrojan en el cierre de la cuenca, (Pacará Pintado).

Escenario	Aporte Cadillal	Aporte Intercuenca Agua Abajo El Cadillal	Caudal Pico En Pacará Pintado
1a	Central Hidroeléctrica (24 m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=100años Distribución 1	1112 m <sup>3</sup> /s
1b	Central Hidroeléctrica (24 m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=100años Distribución 2	1310 m <sup>3</sup> /s
1c	Central Hidroeléctrica (24 m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=100años Distribución 3	696 m <sup>3</sup> /s
2	Creciente Decamilenaria (1101m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=100años Distribución 2	2480 m <sup>3</sup> /s
3	Creciente Decamilenaria (1101m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=5años Distribución 2	1818 m <sup>3</sup> /s
4	Creciente Decamilenaria (1101m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=2años Distribución 2	1547 m <sup>3</sup> /s

Escenario	Aporte Cadillal	Aporte Intercuenca Agua Abajo El Cadillal	Caudal Pico En Pacará Pintado
5	Creciente Decamilenaria (1101 m <sup>3</sup> /s)	Sin Lluvia	1108 m <sup>3</sup> /s
6	Apertura Completa de Descargadores + Central (364 m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=100años Distribución 2	1638 m <sup>3</sup> /s
7	Apertura Completa de Descargadores + Central (364 m <sup>3</sup> /s)	Lluvia Tr=50años Distribución 2	1487 m <sup>3</sup> /s

Tabla n° 3.1: Resumen de caudales en distintos puntos del Río Salí y distintas circunstancias, [Ref(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

### 3.3.1.6.- Resultados de los análisis Hidrológicos.

Atendiendo a lo expuesto y dado el compromiso de seguridad requerido para la obra a realizar sobre el río Salí se recomienda la utilización de los escenarios 1b, 4 y 7.

La rectificación de un cauce, es una obra de mediana magnitud, y lo que se busca es encauzar un caudal medio para acotar la magnitud de la obra.

El valor de caudal asociado a estos escenarios se encuentra cercano a los **1500 m<sup>3</sup>/s**, razón por la cual se recomienda la utilización de este valor como caudal de verificación de la obra de canalización.

## 3.4. Aspectos sedimentológicos

### 3.4.1. Localización y características de las muestras

Durante la visita del 4 de mayo de 2007 se realizó la toma de muestras emplazadas en diferentes secciones del tramo, además de la inspección visual del cauce, márgenes y aspectos característicos del sistema fluvial.

Concretamente se realizó la extracción de tres muestras en el área de estudio:

- Sección 1: 200 m aguas arriba del Puente Lucas Córdoba
- Sección 2: Entre Puente Lucas Córdoba y San Cayetano
- Sección 3: 800 m aguas abajo del Puente San Cayetano

En la Figura 3.8, se presenta un corte sobre la planicie localizado en la margen derecha del río Salí. En el corte, se evidencia la presencia de abundantes gravas y bolos de diferentes granulometrías, intercalados en una matriz de suelos finos, que son precisamente los que le confieren al material una aparente cohesión y mantienen un talud prácticamente vertical tal y como se aprecia en la imagen.

En las siguientes figuras se presentan fotografías del emplazamiento de las secciones muestreadas y características granulométricas del cauce.



En la figura 3.8, Sección 1, corte en profundidad sobre margen derecha, [Ref(1)].  
 Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

<b>MUESTRA SECCIÓN 01</b>		
		<p>Granulometría en Sección 1 (Prog. 4.600)</p>
X= 282762	Y= 7026585	

### MUESTRA SECCIÓN 02



X= 283456

Y= 7028563



Granulometría en Sección 2 (Prog. 6.000)

### MUESTRA SECCIÓN 03



X= 284007

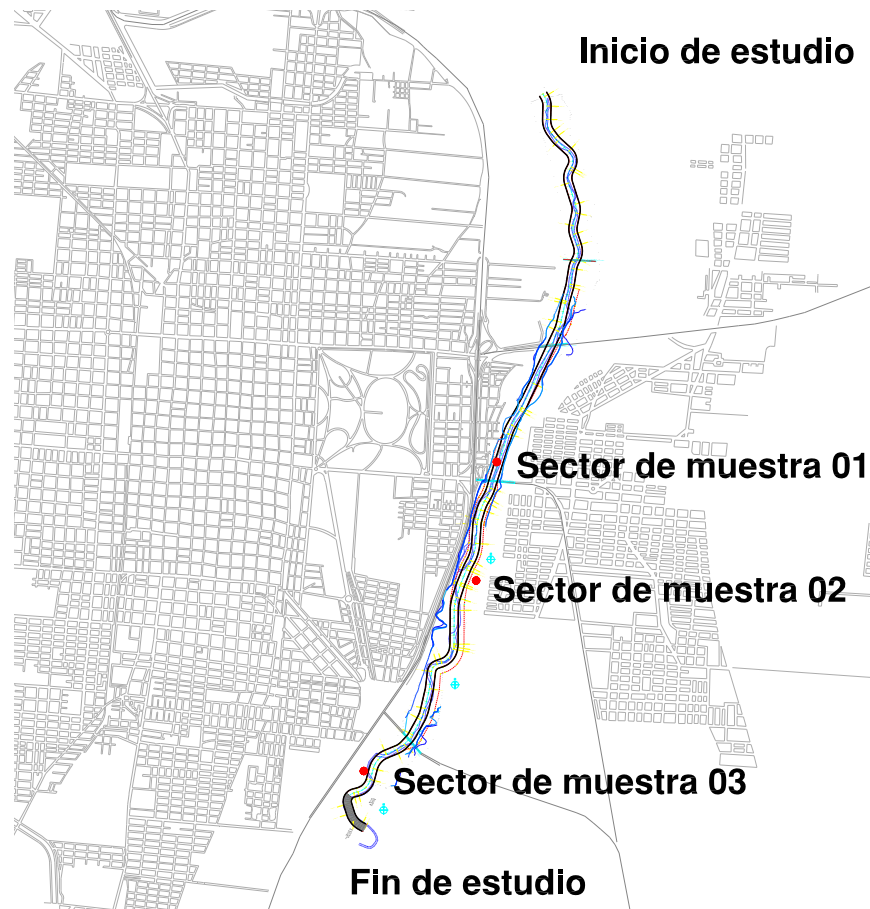
Y= 7029856



Granulometría en Sección 3 (Prog. 8.700)

*Figuras 3.9, Se indican los puntos de ubicación de extracción de muestras, [(Ref(1))].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*

Las muestras extraídas se correspondieron con algunos sectores particulares de la sección transversal y en general a una profundidad no mayor a 20 cm del nivel del terreno natural. Se utilizaron criterios hidráulicos para la selección de las muestras, principalmente fueron tomadas en el cauce principal del río, en correspondencia con las dovelas de mayor velocidad en la sección transversal (1 m/s para un caudal estimado de 6 m<sup>3</sup>/s). Para tener una mejor referencia de la ubicación general, [ver figura 3.10]. Es importante mencionar que en la planicie de inundación del río la granulometría se compone de un conglomerado o mezcla de suelos finos y gruesos, que forman una matriz compacta con una granulometría típica de suelos aluviales, [Ver figuras 3.9].



Figuras 3.10, Ubicación general de los puntos de extracción de muestra.

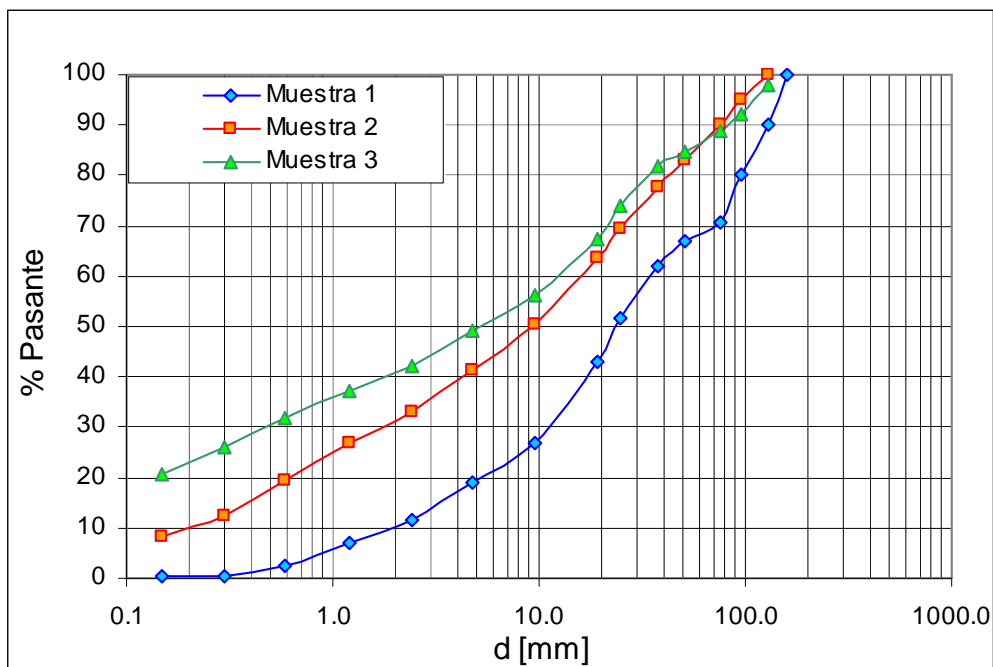
Elaboración propia.

### 3.4.2. Análisis granulométrico

Se ha procedido al análisis granulométrico de las muestras tomadas en la sección 02, por encontrarse ubicada en el interior del tramo de estudio. Se presenta en la siguiente figura las curvas granulométricas de las muestras de sedimentos, localizadas en los siguientes sectores de la sección transversal:

- Muestra 1: Canal principal con velocidad del orden de 1 m/s, con posible efecto de acorazamiento.
- Muestra 2: Margen interna de curva con velocidad del orden de 0,2 m/s.
- Muestra 3: Planicie sobre margen derecha.

De acuerdo a la clasificación del tamaño propuesta por la American Geophysical Union (Lane, 1947), las granulometrías presentadas se componen principalmente de gravas ( $2 \text{ mm} < d < 64 \text{ mm}$ ) y cantos ( $64 \text{ mm} < d < 256 \text{ mm}$ ), con una pequeña porción de arena.



Figuras 3.11, Granulometría por tamizado húmedo en Sección 2 (Prog. 6.000)  
 Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007, [Ref(1)].

GRANULOMETRÍA DE LAS MUESTRAS			
Di	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
<b>d<sub>95</sub></b>	145.00	95.00	112.50
<b>d<sub>90</sub></b>	130.00	76.00	83.50
<b>d<sub>85</sub></b>	105.20	57.60	52.90
<b>d<sub>75</sub></b>	105.10	33.70	26.70
<b>d<sub>65</sub></b>	45.90	20.30	17.10
<b>d<sub>55</sub></b>	29.10	12.70	8.60
<b>d<sub>45</sub></b>	20.50	6.70	3.40
<b>d<sub>35</sub></b>	14.30	3.00	1.00
<b>d<sub>25</sub></b>	8.30	0.40	0.30
<b>d<sub>15</sub></b>	3.60	1.00	0.00
<b>d<sub>05</sub></b>	0.90	0.00	0.00
<b>d<sub>m</sub></b>	48.00	23.00	22.30

Tabla n° 3.2: Resumen de las granulometría de las muestras estudiadas, [Ref(1)].  
 Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

### 3.4.3. Parámetro granulométrico de la muestra

Una vez tamizadas las muestras y obtenidas sus curvas de distribución granulométricas. Interesa conocer, en términos estadísticos, los siguientes parámetros de caracterización de la distribución granulométrica:

**d<sub>84</sub>**: Tamaño de muestra tal que el 84% del material es menor que él

**d<sub>50</sub>**: Mediana de la distribución granulométrica

**d<sub>16</sub>**: Tamaño de muestra tal que el 16% del material es menor que él

$d_m$  Media de la distribución granulométrica

$\sigma_g$  Desviación Típica Granulométrica.  $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$

Los parámetros estadísticos obtenidos se han utilizado como datos de entrada en próximos apartados.

di	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
$d_{84}$	103.20	53.90	48.20
$d_{50}$	23.80	9.10	5.30
$d_{16}$	3.90	0.40	0.10
$\sigma_g$	5.20	11.00	22.00

Tabla n° 3.3: Resumen de parámetros característicos de cada muestra, [Ref(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav – 2007.

El parámetro de desviación típica granulométrica procede de considerar que la distribución granulométrica de los sedimentos se ajusta a una distribución log-normal, y que por lo tanto, el logaritmo de los tamaños  $d_i$  se distribuye normalmente.

Como consecuencia la distribución, se cumple la siguiente expresión:

$$\text{Log}(d_{84}) - \text{Log}(d_{16}) = 2\sigma_g$$

y por lo tanto 
$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

Los lechos granulares están frecuentemente compuestos por una mezcla de tamaños, desde fino hasta grueso. Si la desviación típica granulométrica cumple que  $\sigma_g > 3$ , se dice que la granulometría es extendida o que el material está bien distribuido (bien graduado). Si por el contrario  $\sigma_g < 3$ , se dice que una granulometría es uniforme o que el material está mal distribuido (mal graduado). El comportamiento de uno u otro lecho es diferente. La propiedad más destacada en los primeros es la posibilidad de que ocurra el fenómeno potencial llamado acorazamiento, con frecuencia los lechos naturales con arenas y gravas siguen una distribución log-normal, mientras que los lechos de arenas finas uniformes pueden seguir una distribución normal (J. P. Martín Vide, Ingeniería de Ríos), [Ref.(24)].

## **CAPITULO 4: Análisis de parámetros**

En el presente capítulo tomamos del proyecto base, [Ref.(1)], ciertos estudios tales como la topografía del tramo en estudio, representada por las secciones y la planta del río, para que a partir de estos datos ubicar las obras existentes, tales como puentes, las acciones de las alcantarillas se la desprecia para los fines de este estudio.

Los datos de los puentes tales como la geometría y otros datos fueron obtenidos de fichas técnicas elaboradas por las reparticiones específicas que administran dichos elementos. De dichas fichas se elaboró una tabla resumen de las características principales de cada puente que se encuentra en el tramo de estudio.

### **4.1. Topografía**

El relieve topográfico que se utilizará para este trabajo es el empleado en el proyecto de la empresa NORGAV (2007), [Ref.(1)].

En dicho trabajo se realizó un modelo digital de terreno (M.D.T.), con perfiles transversales cada 50 m y un ancho promedio de 250 m.

En total se procesaran 138 secciones transversales, que se distribuirá en 6850 m que se desarrolla el estudio.

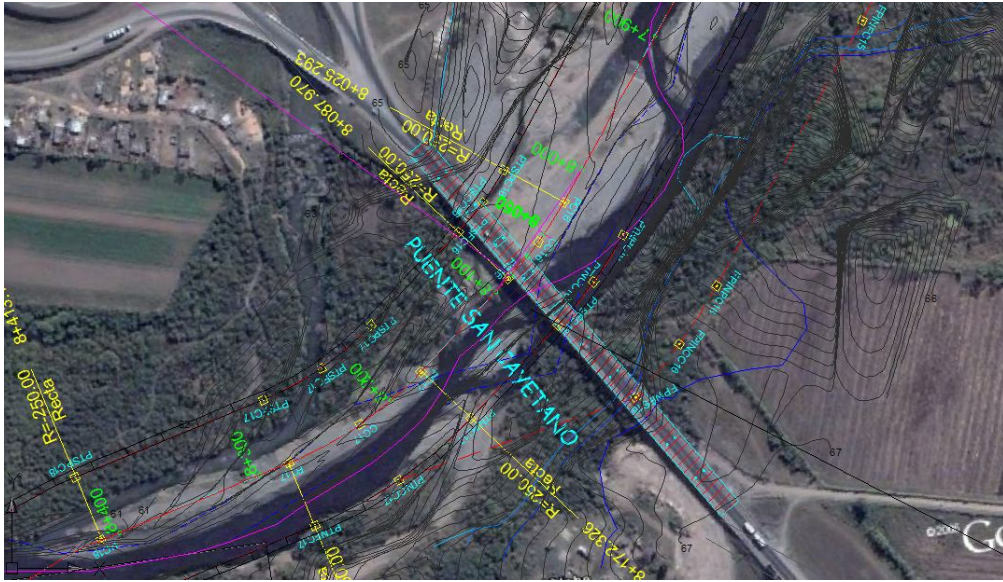
### **4.2. Infraestructura existente**

Básicamente las obras de infraestructura que se presentan a lo largo del tramo de río analizado son particularmente puentes. A continuación se definirán los mismos según aparición de norte a sur, sentido de escurrimiento.





*Puente San Cayetano, Progresiva 8.070 m.*



*Figura 4.3, Imagen satelital de la ubicación del Puente San Cayetano, [Ref.(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*

Las características geométricas de los puentes fueron obtenidas de informes realizado por Vialidad de la Provincia.

N°	NOMBRE DEL PUENTE	LONG. TOTAL	ANCHO TOTAL	N° DE TRAMOS	ANCHO DE PILA	ANCHO DE TABLERO	Galibo mínimo	Esvi aje
		(m)	(m)	(unid)	(m)	(m)	(m)	°
1	Oscar M. Barros	332,80	15,30	11	2 pilas de 1,35 m	1,50	3,66	50°
2	Lucas Córdoba	456,00	14,00	17	3 pilas de 2,60 m	1,70	3,10	90°
3	San Cayetano	310,90	15,50	11	2 pilas de 1,20 m	1,40	2,10	90°

*Tabla N° 4.1: Resumen de características para la modelación.*

*Elaboración propia.*

### **4.3. Perfil longitudinal**

En la figura 4.4 se presenta el perfil longitudinal del Río Salí por la línea de vaguada (línea de color azul), con el objeto de estimar la pendiente que adopta el río en el período de aguas bajas.

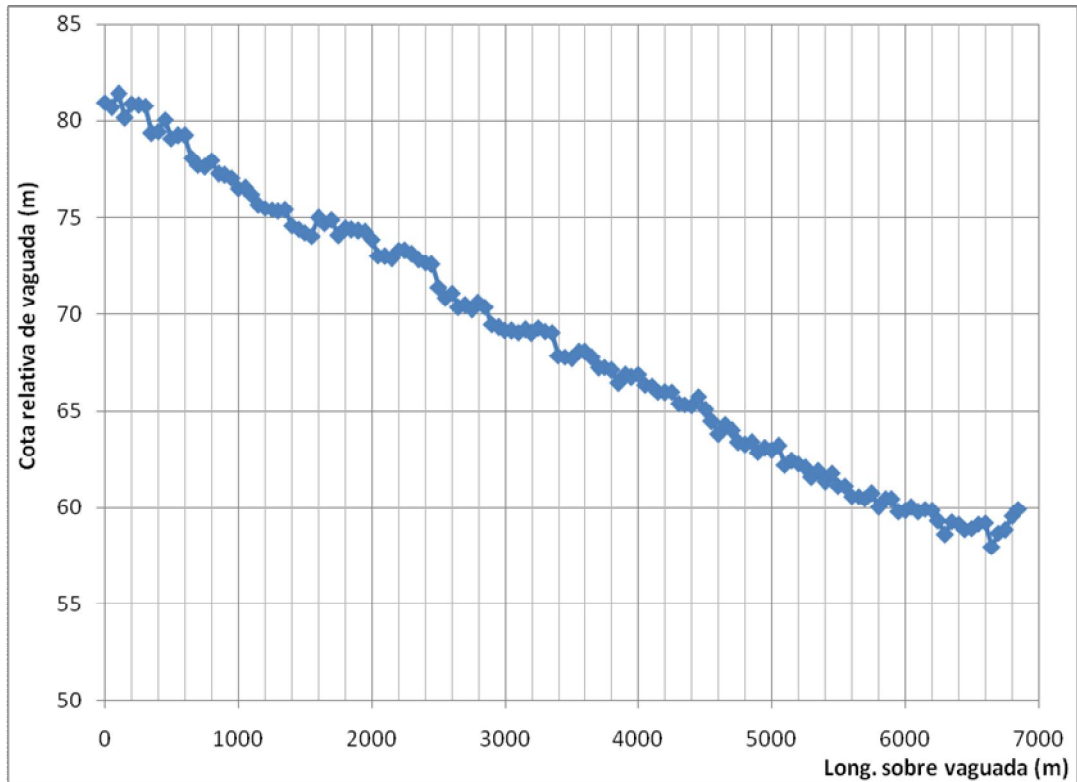


Figura 4.4, Perfil longitudinal del Río Salí (azul: línea de vaguada).  
Elaboración propia.

En la figura anterior se puede observar que la pendiente disminuye suavemente hacia aguas abajo, comenzando con una pendiente media de 3,5 ‰ aguas arriba y en el tramo final llega a 2 ‰. A su vez se puede observar en la figura que el cambio de pendiente es suave y se acentúa más en el tramo final, producto de la configuración meandriforme que adquiere el cauce en planta.

#### 4.4. Secciones transversales

Como se indicó se realizó 138 secciones transversales, tanto en el “Estado Natural” como en el “Estado de Proyecto”, distanciada cada una 50 m.

El ancho aproximado de relevamiento topográfico es del orden de los 250 m.

Debido a ese ancho adoptado en forma arbitraria, muchas de las secciones que fueron relevadas no manifiestan la “Morfología típica de una sección transversal natural”, que son “Canal de Estiaje” o “Canal Principal”, “Cauce Menor” y “Cauce Mayor”.

Por ejemplo la sección transversal en la progresiva 6.850 m, que es la que se observa en la figura inferior, es apreciable que está mal relevada. Toma la zona del “canal principal” que se aprecia a simple vista, pero el “Lecho menor” hacia la izquierda no está contenido. Esto es un error de la persona que levanto el relevamiento.

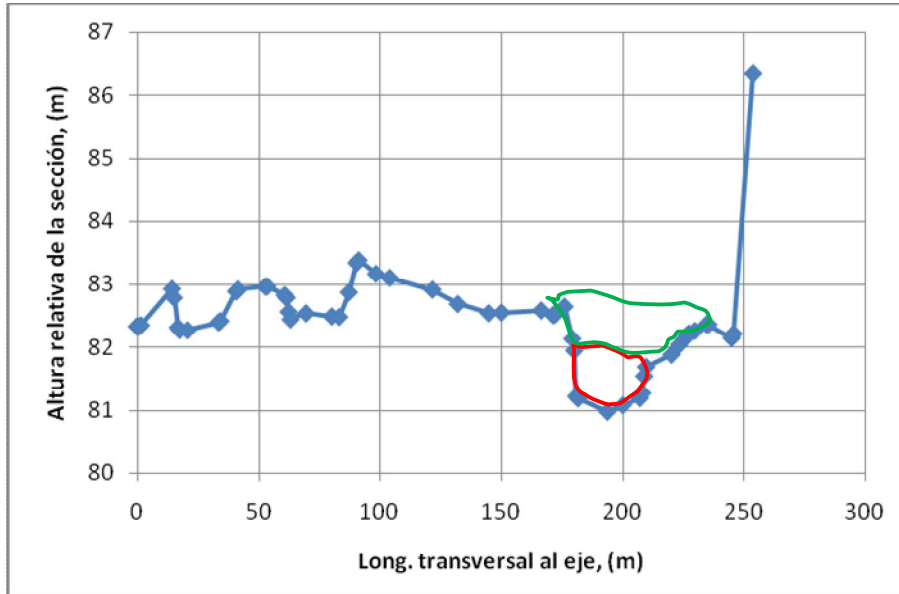


Figura 4.5, Sección transversal en la progresiva 6.850 m.  
Elaboración propia.

Además se observa que las secciones no superan los 250 m de ancho, que desde mi punto de vista es escueta la distancia adoptada.

Del lado izquierdo de la figura se observa que la cota llega a 82,30 aprox. y del lado derecho la cota llega a 86,30 por lo que la diferencia de niveles de bermas es importante y a su vez un error.

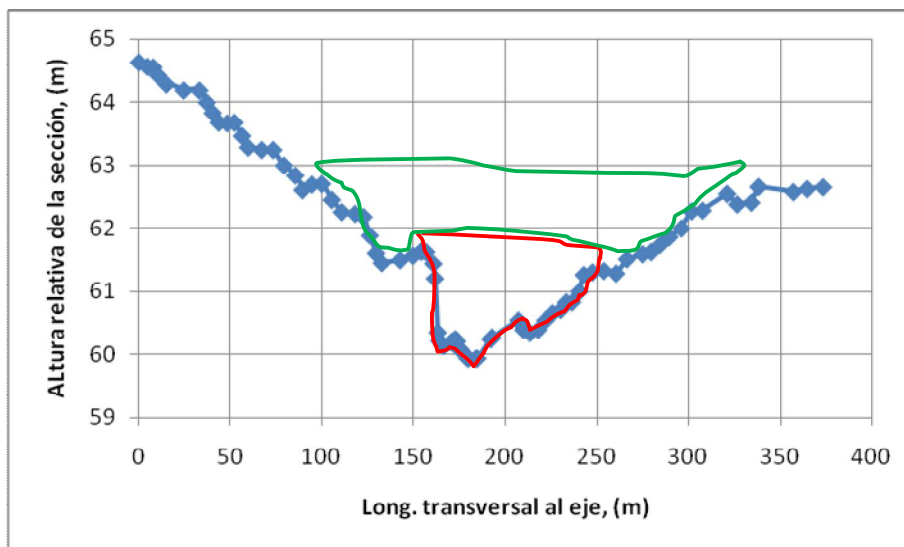


Figura 4.6, Sección transversal en la progresiva 0,00 m.  
Elaboración propia.

La sección transversal en la progresiva 0,00 m es un poco más adecuada, se ve la sección del “Canal Principal” y el “Lecho Menor” contenido en la sección, y el “Lecho Mayor” no contenido del lado derecho. Esta sección esta mejor relevada.

Muchas veces los estudios topográficos dependen de los accidentes de relieve del terreno, pero siempre es conveniente definir en gabinete el alcance del estudio y a su vez definir la magnitud del trabajo topográfico.

Como consejo es siempre: “Realizar mediciones topográficas hasta los mismos niveles para ambos márgenes”, por más que uno de ellos se extienda mucho.

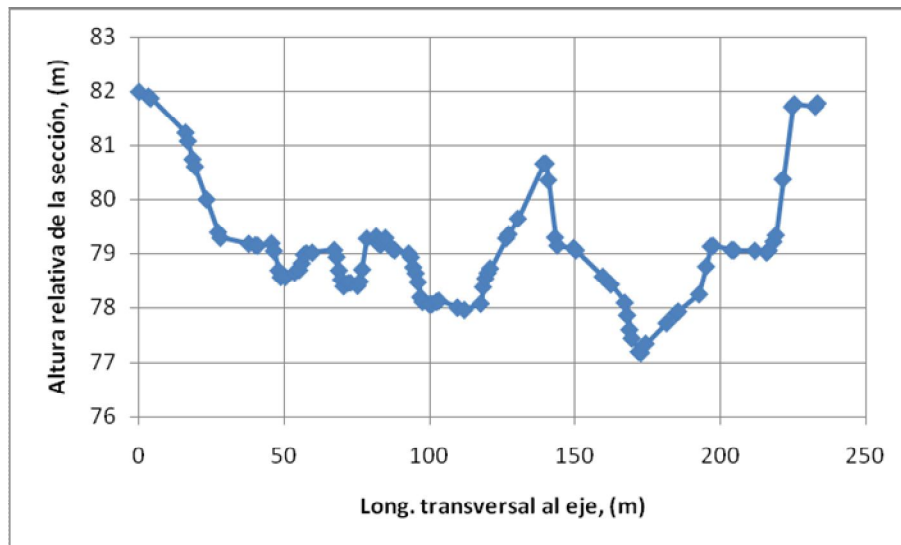


Figura 4.7, Sección transversal en la progresiva 6.050 m.  
Elaboración propia.

Esta sección está medianamente bien relevada, se desarrolla en una longitud de aproximadamente 250 m.

El trabajo topográfico es la base de un estudio fluvial.

De la observación general de las distintas secciones transversales, se pudo concluir que las geometrías medias del canal principal y del cauce menor se la pudo definir de la topografía realizada por la empresa Norgav [Ref.(1)], pero el cauce mayor no se la pudo definir ya que el ancho tomado es de 200 m para cada lado es escaso para poder definir esa característica. A continuación se mostrará una tabla de los valores medios determinados de la topografía, en la tabla se indica el “ancho” y “alto” del canal principal y del cauce menor.

Canal Principal		Cauce Menor		Cauce Mayor	
Ancho (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Alto (m)
35	1.5	280	3.7	-	-

*Tabla N° 4.2: Resumen de características geométricas de la secciones.*

*Elaboración propia.*

Por cuestiones de tiempo y de disponibilidad de elementos es que no se hizo un estudio más profundo en lo que respecta a la topografía.

#### **4.5. Coeficiente de Manning**

A continuación se mostrarán fotos de diversos lugares en el tramo estudiado del Río Salí.

Estas fotos sirven para observar y determinar el tipo de rugosidad que se tiene.



*Figura 4.8, foto tomada desde aguas abajo hacia aguas arriba del Puente Oscar Barros, [Ref.(1)].*

*Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*



*Figura 4.9, foto tomada desde aguas abajo hacia aguas arriba del Puente Lucas Córdoba, [Ref.(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*



*Figura 4.10, foto tomada desde el Puente San Cayetano hacia aguas abajo, [Ref.(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*



*Figura 4.11, foto tomada desde el Puente Oscar Barros hacia aguas abajo, [Ref.(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*



*Figura 4.12, foto tomada desde el Puente San Cayetano hacia aguas abajo, [Ref.(1)].  
Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.*





*Figura 4.13, Ubicación de las fotos en el Proyecto.*

*Elaboración propia.*

Mediante las fotos y el uso de una tabla de bibliografía conocida se puede obtener el coeficiente de Manning.

MATERIAL DE REVESTIMIENTO EN CORRIENTES NATURALES	COEF. MANNING	
	MÍN	MÁX
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente	0.027	0.033
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente, algo de vegetación	0.033	0.040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	<b>0.035</b>	0.050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0.060	0.080
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados, vegetación densa	0.100	0.200
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0.050	0.080
Areas de inundación adyacentes al canal ordinario	0.030	0.200

Tabla nº 4.3: Coeficiente de rugosidad “n” de Manning. “Hydraulics of steady flow in open channels”  
S. M. Woodward and C. J. Posey, [Ref. (1)].

Fuente: proyecto de referencia realizado por la empresa de Norgav - 2007.

El valor del coeficiente de Manning adoptado es de 0,035 y este será utilizado para el cálculo hidráulico en la primera iteración.

## CAPITULO 5: Análisis Fluvio-Morfológico del tramo del Río

### 5.1. Introducción.

Para comenzar con los estudios de esta unidad es que se analizó fluvio-morfológico del cauce a partir de la clasificación del río siguiendo los lineamientos de Rosgen y Silvey, [Ref.(7)], se las indica en las figuras siguientes.

STREAM TYPE	A	D	B & G	F	C	E
PLAN VIEW						
CROSS SECTION VIEW						
AVERAGE VALUES	1.5	1.1	3.7	5.3	11.4	24.2
RANGE	1 - 3	1 - 2	2 - 8	2 - 10	4 - 20	20 - 40

Figura N° 5.1: Clasificación de cursos fluviales en base a la relación de anchos de faja y cauce (Rosgen & Silvey, en [Ref.(7)]).

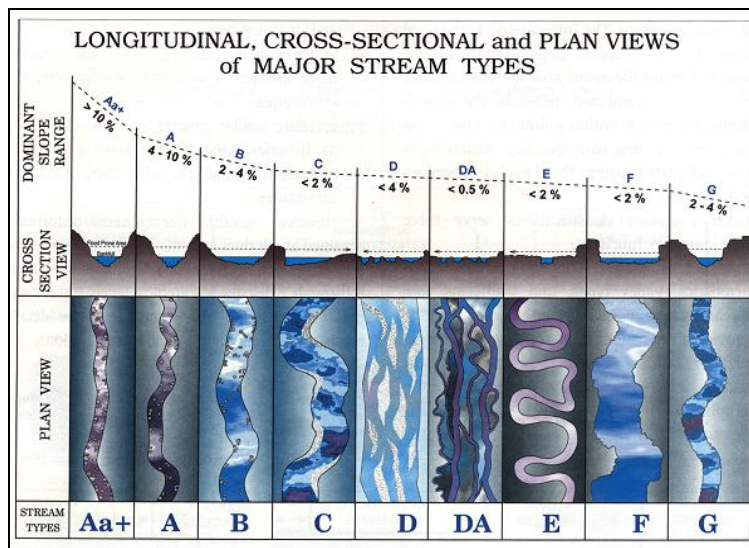


Figura N° 5.2: Clasificación de cursos fluviales en base a la pendiente y sección transversal (Rosgen & Silvey, en [Ref(7)]).

### 5.2. Caracterización Fluvio - Morfológica aplicado a cada tramo –

#### 5.2.1. Escenario Estado natural (año 2007) o sin obra de rectificación.

Como se dijo en las descripciones, el tramo estudiado es del orden de 7.000 m, en el mismo se pueden identificar diferentes tipologías en relación a la geomorfología del

entorno fluvial. Para describir en forma somera y cualitativa las características fluvio-morfológicas de la zona, se ha dividido el tramo en tres sectores y estos a su vez en sub-sectores.

Se analizan imágenes satelitales obtenidas del Google Earth del año 2.007.

En dichas imágenes se trazó el eje del río, los márgenes derecho e izquierdo del cauce principal y los bordes derecho e izquierdo de la planicie de inundación.

En los siguientes apartados se describen las características de cada sector.

### **Tramo I: Canal San Gutierrez – Puente Lucas Córdoba (Prog. 0,00 - 4.700,00)**

Este tramo se ubica aproximadamente 25 Km aguas abajo del dique El Cadillal y posee una pendiente media de 4,1‰; en base a la pendiente, sección transversal y aplicando el criterio de Rosgen y Silvey esta parte del río es tipo DA, la metodología de aplicación de Rosgen y Silver se encuentra en la [Ref.(7)].

En este segmento el río presenta una sinuosidad del orden de 1,1 y un trazado de curvas alternadas suaves, ya que no alcanza a desarrollar un patrón meandriforme completamente definido debido a las obras ejecutadas en la planicie de inundación (Figura N° 5.3). Las obras de infraestructura existentes como por ejemplo los Puentes Ferroviario Oscar Barros y el Puente vehicular Lucas Córdoba, ambas estructura restringen el desarrollo de procesos de erosión de márgenes y migración lateral, sumado a una disminución del caudal dominante por efecto de la regulación de caudales en El Cadillal. Además la presencia de actividades de extracción de áridos del cauce modifican notablemente el entorno fluvial, principalmente el ancho de las secciones.

El ancho medio del cauce activo es de 79 m con una desviación estándar de 35 m. A su vez al comienzo de este tramo el mínimo llega a 30 m y el máximo alcanza 170 m aguas arriba del Puente Oscar Barros.



*Figura N° 5.3, Tramo I.*

## Imágenes parciales del Tramo I



Figura N° 5.3.a, Tramo I-a.



Figura N° 5.3.b, Tramo I-b.



Figura N° 5.3.c, Tramo I-c.

### **Tramo II: Puente Lucas Córdoba – Puente San Cayetano (Prog. 4.700 - 8.000)**

Este tramo posee una pendiente media de 3,5%; en función de esta pendiente del cauce, sección transversal y aplicando el criterio de Rosgen y Silvey esta parte del río es tipo DA, [Ref.(7)].

Y por otro lado haciendo un cálculo de la sinuosidad nos da del orden de 1,5 y un trazado marcado de curvas alternadas, comenzando a desarrollar un patrón meandriforme definido (Figura N° 5.4). Además se observan claros signos de erosión de márgenes y migración lateral, comprometiendo en algunos casos obras de infraestructura del sector principalmente en el sector externo de las curvas. La presión urbana disminuye hacia el Sur, en donde el río se desarrolla en un sector con uso de suelo rural.

El ancho medio en este tramo es de 100 m y se mantiene la desviación estándar en el orden de 35 m. El valor mínimo aumenta a 46 m y el máximo se mantiene 170 m.



*Figura N° 5.4, Tramo II.*



Imágenes parciales del Tramo II



*Figura N° 5.4.a, Tramo II-a.*



*Figura N° 5.4.b, Tramo II-b.*

### **Tramo III: Puente San Cayetano - (Prog. 8.000 - 10.500)**

La pendiente media en este sector es del 2,5‰; en función de esta pendiente, sección transversal y aplicando el criterio de Rosgen y Silvey esta parte del río es tipo DA, [Ref.(7)].

Y la sinuosidad es del orden de 1,8; con un patrón de alineamiento altamente meandriforme (Figura N° 5.5, *Tramo III*). En este tramo el río desarrolla meandros de gran amplitud, y con curvas naturales periódicas debido a que los grados de libertad del sistema fluvial no se encuentran restringidos.

El ancho medio en este tramo alcanza el valor de 87 m y la desviación estándar se reduce a 24 m. El valor mínimo es de 50 m y el máximo se reduce a 140 m.



*Figura N° 5.5, Tramo III.*

### Imágenes parciales del Tramo III

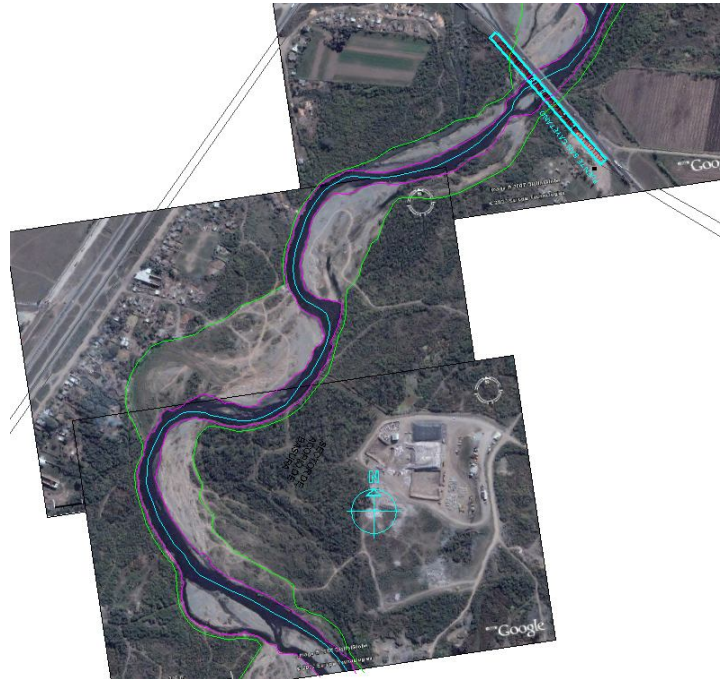


Figura N° 5.5.a, Tramo III-a.

Es importante destacar que aguas abajo del tramo III la sinuosidad del río aumenta y el ancho medio activo del río se reduce a 70 m. A su vez la tipología en planta es con meandros de gran amplitud y en algunos casos se observan cortes de los mismos y viejos paleocauces abandonados.

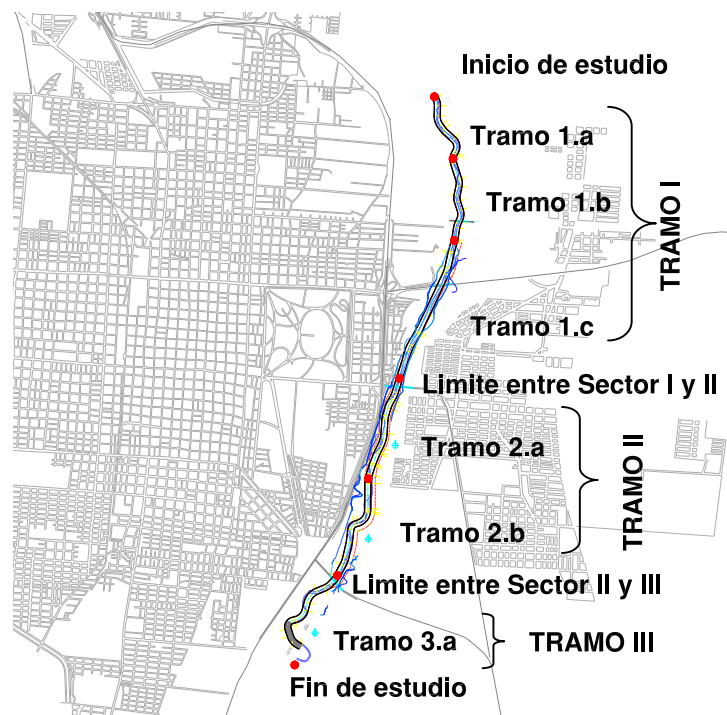


Figura N° 5.6, Esquema general de los tramos.

**5.2.2. Escenario Estado de Proyecto (año 2009) o con obra de rectificación completa.**

La longitud del tramo se conserva igual al “Estado Natural”.

Se estudiará los tres sectores idénticos a lo propuesto en Estado Natural.

**Tramo I: Canal San Gutiérrez – Puente Lucas Córdoba (Prog. 0,00 - 4.700,00)**

Este tramo posee una pendiente media de 3,259%. En este segmento el río presenta una sinuosidad del orden de 1,0043, el trazado del canal de proyecto es casi recto con leves o muy suaves curvas alternadas, (Figuras N° 5.6 a, b y c). En sectores se plantea llanuras de inundación para ambos lados de la sección principal. Las obras de infraestructura existentes como por ejemplo los Puentes Ferroviario, Oscar Barros y Lucas Córdoba no restringen el desarrollo de procesos de erosión de márgenes y migración lateral debido a que la sección propuesta en el proyecto se circunscribe en la sección existente, sumado a una disminución del caudal formativo por limitación de las secciones planteadas.

El ancho del canal de proyecto es de 100 m y permanece constante a lo largo de todo su recorrido.

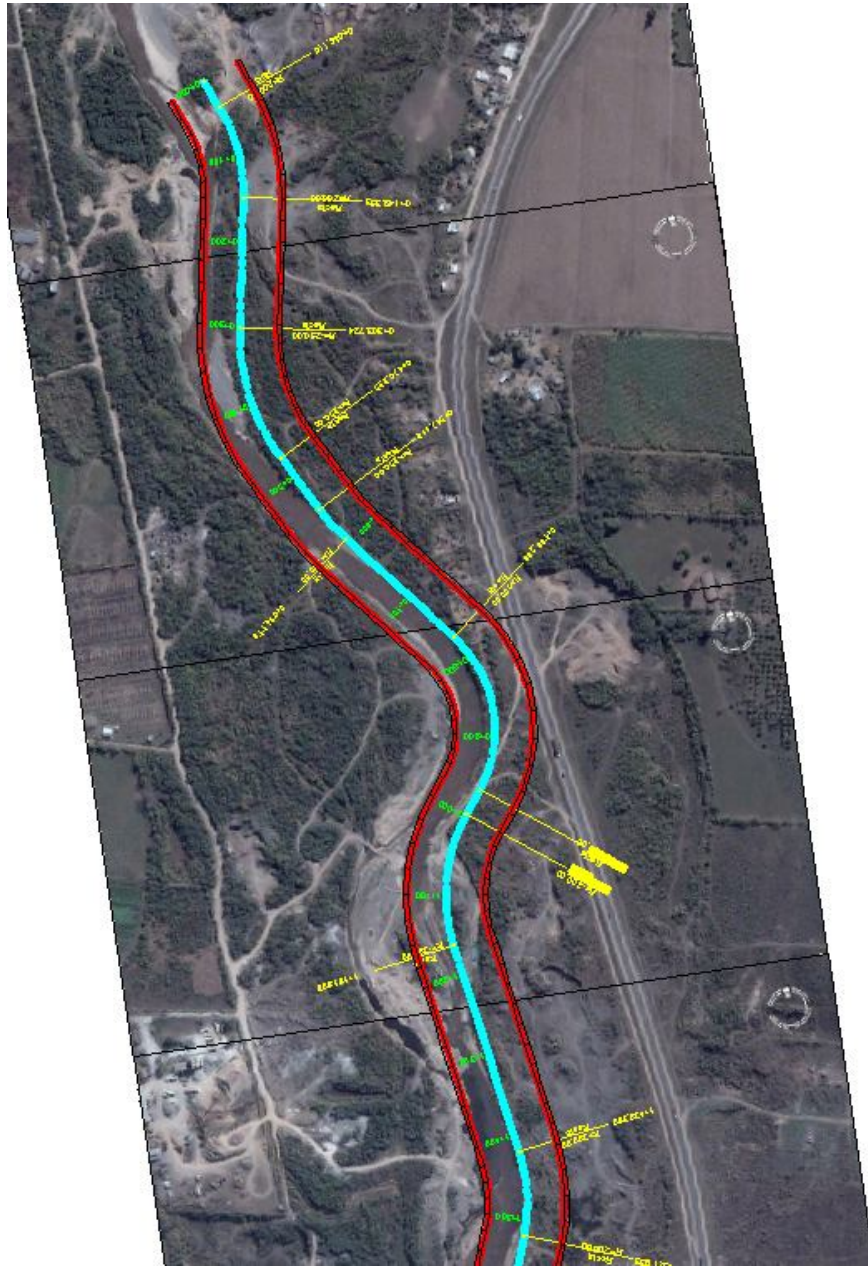


Figura N° 5.6.a, Tramo I-a.

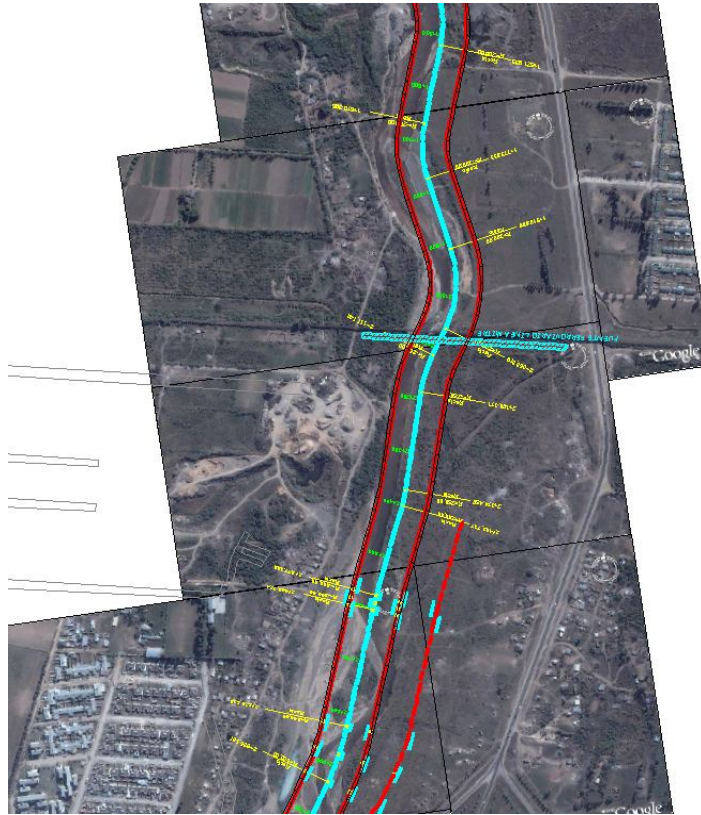


Figura N° 5.6.b, Tramo I-b.

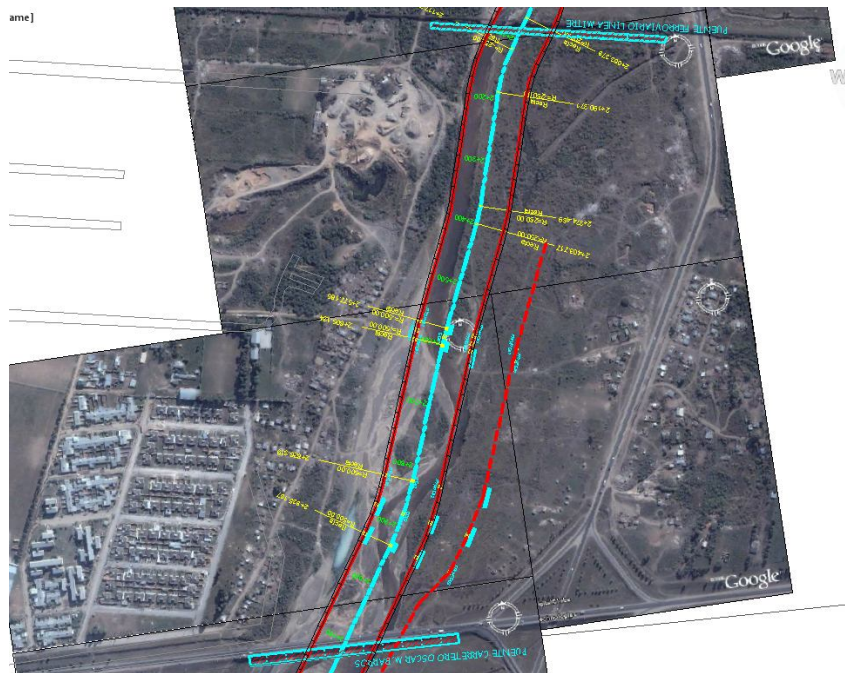


Figura N° 5.6.c, Tramo I-c.



*Figura N° 5.6.d, Tramo I-d.*

**Tramo II: Puente Lucas Córdoba – Puente San Cayetano (Prog. 4.700 - 8.000)**

Este tramo posee una pendiente media de 3,428‰ y en este segmento del proyecto presenta una sinuosidad del orden de 1,035 y un trazado marcado de curvas alternadas, comenzando a desarrollar un patrón muy levemente meandriforme (Figura 5.5 a, b y c).

El ancho del sector del canal principal es del orden de los 100 m de forma constante a lo largo de todo el tramo definido, en sectores se plantea playas de inundación incrementando la sección.



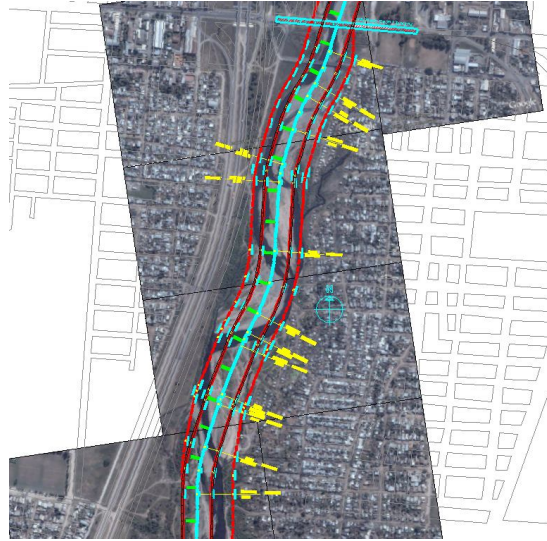


Figura N° 5.7.a, Tramo II-a.

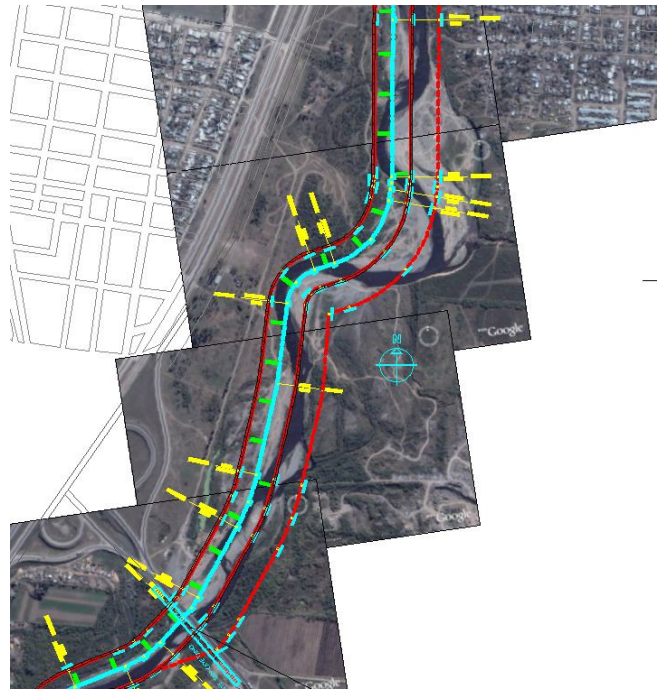


Figura N° 5.7.b, Tramo II-b.

### **Tramo III: Puente San Cayetano - (Prog. 8.000 - 10.500)**

La pendiente media en este sector es de 1,932‰ y la sinuosidad es del orden de 1,131, con un patrón de alineamiento meandriforme (Figura N° 5.5, *Tramo III*). En este tramo el río desarrolla meandros de amplitud media.

El ancho del canal de proyecto es del orden de 100 m y es constante a lo largo de todo su recorrido.

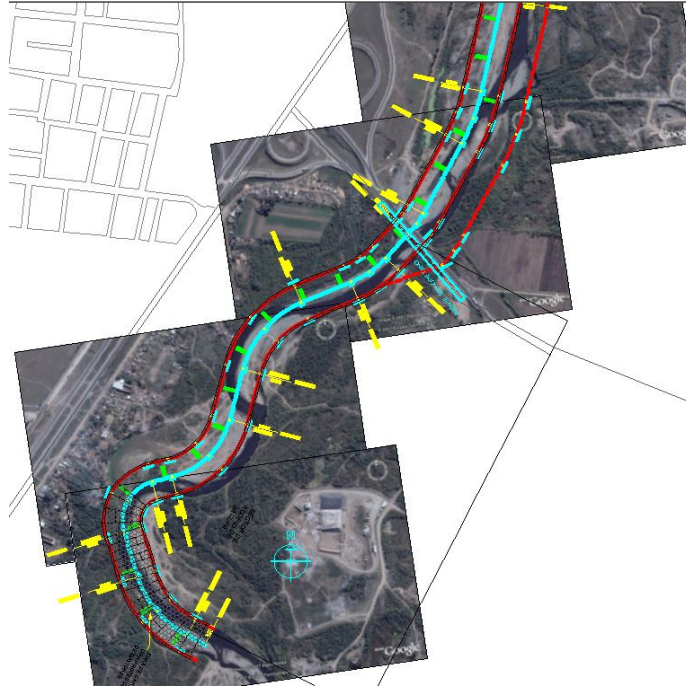


Figura N° 5.8.a, Tramo III-a.

### 5.3. Análisis del caudal de diseño

El estudio Hidrológico presentado en el Proyecto Ejecutivo, [Ref. (1)], recomienda que el caudal de diseño de la obra será de  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , para una creciente decamilenaria + lluvia con un  $\text{Tr}=2$  años.

Modelando con este caudal en el HEC-RAS, se obtienen secciones transversales hidráulicas que superan las secciones topográficas mensuradas, (ver figura N° 5.9). Esto se determina por simple observación de cada una de las secciones modeladas en el programa computacional HEC-RAS. En dichas secciones se aprecian bermas verticales (aproximaciones o soluciones que plantea el software HEC RAS, otorgándole a los cálculos errores enormes debido a esa simplificación). Estas bermas verticales en los extremos de la sección topográfica exhiben inconsistencias, ya que la sección topográfica real posee una geometría diferente, es decir, las adoptadas por el modelo resultan distintas a las reales.

Por ejemplo tomando como referencia lo mostrado en la figura N° 5.9, la margen derecha, en su punto extremo se observa un talud vertical del orden de 1 m de altura y en la margen izquierda presenta un talud vertical extremo del orden de 0,40 m, esta simplificación que nos hace el software de cálculo es contradictorio al perfil real y natural del terreno, por lo que además de adoptar la sección incorrecta, los procesos de cálculos hidráulicos están basado en dichas secciones mal definida.

De todo esto se deduce que la sección mensurada es insuficiente para el caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s.

Por tal motivo se descartó el caudal definido por la hidrología y como caudal de diseño se definió el “Caudal Formativo” o “Caudal Dominante”.

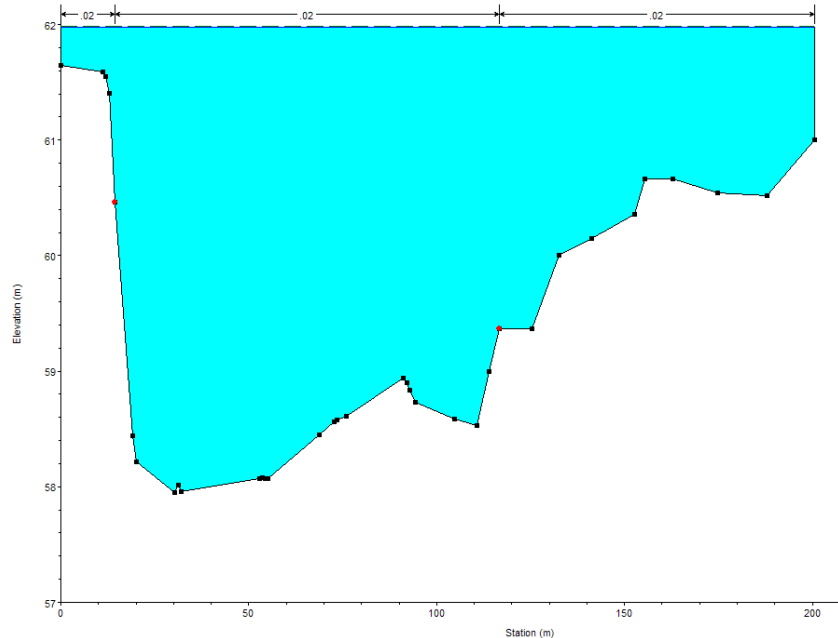


Figura N° 5.9, sección transversal genérica, donde se indica nivel de agua superior a la capacidad propia de la sección topográfica.

De lo expuesto en el párrafo anterior se puede concluir que el estudio topográfico es exiguo, o que el caudal determinado hidrológicamente es muy grande para modelarlo en las secciones medidas topográficamente, esta discordancia es viable que se produzca ya que el estudio hidrológico no contempla la topografía del terreno en detalle. La hidrología contempla superficies totales de las cuencas.

Para salvar este problema se definirá como Caudal de Diseño al Caudal Dominante.

El método de cálculo escogido para determinar el “Caudal Dominante” fue uno que se enmarca en los “Métodos Geométricos”. Estos se determinan teniendo en cuenta la geometría del cauce, tomando el caudal de diseño igual al caudal de desborde.

La metodología seguida para determinar este caudal es modelar en HEC-RAS con una serie de caudales y mediante la observación de cada una de las secciones, definir el perfil transversal donde la sección de conducción hidráulica – por donde circula el agua -, esté contenida completamente en la sección topográfica y teniendo su máxima capacidad de conducción, ambas condiciones se deben cumplir en forma simultánea y analizado bajo la circunstancia de “Escenario Natural”.

El CAUDAL FORMATIVO GEOMETRICO obtenido es de 200 m<sup>3</sup>/seg. (se considera que este valor es adecuado para ser usado en el contexto de esta investigación).

#### **5.4. Explicación de los parámetros analizados en la tabla general**

Mediante el “Caudal formativo” determinado en el apartado anterior, se ejecutó el modelo computacional, cargando los dos escenarios (Natural y Proyecto), y de la tabla de resultados que ofrece el software se cargó una tabla Excel, donde estos valores servirán de datos para otros cálculos que se indicarán en los apartados subsiguientes.

En las tablas de cálculo existen dos sectores, a saber: uno contiene los parámetros que se obtienen de la modelación hidráulica (HEC-RAS) y otras columnas representan valores calculados a partir de las primeras columnas y otros factores.

El programa HEC-RAS entrega los siguientes parámetros:

- Estación o progresiva de cada sección, (m).
- Caudal utilizado para la modelación, (m<sup>3</sup>/s).
- Nivel Mínimo de Cauce, (m).
- Nivel de agua, (m).
- Nivel de tirante crítico, (m).
- Nivel de línea de energía, (m).
- Pendiente de línea de energía, (m/m).
- Velocidad media de escurrimiento, (m/s).
- Área de conducción, (m<sup>2</sup>).
- Ancho superficial máximo, (m).
- Número de Froude, (adimensional).
- Radio hidráulico, (m).

A través de expresiones hidráulicas se calcularon los siguientes parámetros:

- Tirante, (m); (Nivel de agua – Nivel Mínimo de Cauce).
- Velocidad Crítica o de Inicio de erosión en un lecho fluvial, (m/s).

En el libro “*Geomorfología e Hidráulica fluvial*”, [Ref.(5)], pag. 3, de Basile 2004, se muestra un desarrollo de la teoría de Lischtván-Lebediev, donde llega a una ecuación del siguiente tipo:

$$V_c = 4,70 \cdot \beta \cdot d_{50}^{0,28} h^x$$

Dónde:

$V_c$  : Es la velocidad crítica, en m/s a determinar.

$\beta$  : es un coeficiente adimensional que depende del período de retorno  $T_r$  asociado al caudal  $Q_d$ .

$d_{50}$  : es la mediana de la distribución granulométrica del sedimento del lecho.

$x$  : es un coeficiente adimensional que depende de  $d_{50}$ .

En el trabajo “*Erosión General en Ríos con lechos Arenosos*”, pag. 10, de Farías et al 2003, [Ref.(21)], se muestra un resumen de ecuaciones del tipo:

$$V_c = b_0 \cdot d^{b_1} h^{b_2}$$

Siendo  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son constantes.

Formula	$b_0$	$b_1$	$b_2$
Shamov	6.000	0.333	0.167
DoT-FHWA-HEC18	6.190	0.333	0.167
Maza A. - Echavarría A.	3.620	0.200	0.275
Levi (aprox. pot)	8.290	0.357	0.156
van Rijn (aprox. pot.)	0.340	0.004	0.100
Lischtvan-Lebediev	4.700	0.280	0.410
Shields-Manning	6.093	0.283	0.167

Tabla N° 5.1, Tabla resumen de fórmulas para velocidad crítica donde se definen  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$ .

[Ref.(27)]. Fuente: *Erosión General en Ríos con lechos Arenosos – 2003*.

La ecuación que mejor se adapta a un cauce como el Río Salí es la expresión de Lischtvan & Lebediev, en el trabajo de “Estudio fluvial, Canalización del río Salí y Obras complementarias”, pag. 82, de Farías 2010, [Ref.(22)], particulariza la presente ecuación propiamente para el Río Salí, la expresión es la siguiente:

$$V_c = 4,70 \cdot d_{50}^{0.28} \cdot h^{0.30} \quad \rightarrow \text{ecuación (A)}$$

Por todo lo expuesto es que se utiliza esta última para calcular la “Velocidad crítica” en el Río Salí.

Siendo:

$d_{50}$  : Tamaño medio del sedimento superficial, (mediana de la distribución granulométrica), (m).

$h$  : Tirante en la sección de cálculo, (m)

- En la columna A, se realiza la comparación entre la “Velocidad media de escurrimiento” y la “Velocidad Crítica”. En caso que la “Velocidad media de escurrimiento” es mayor que “Velocidad Crítica” entonces el cauce “SI EROSIONA” en caso contrario “NO EROSIONA”. (Ver apéndice desde hoja

134 a la 141, Escenario: Natural – Caudal: 200 m<sup>3</sup>/s).

En este punto se estudia la “VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN”.

A continuación se estudiará el efecto de la acción de corte en el fondo del canal. Los parámetros obtenidos del software son los mismos que la anterior tabla.

Pero los factores calculados son distintos y serán los siguientes.

- $\tau_b$  tensión de corte sobre el fondo del canal, se define de la siguiente manera:

$$\tau_b = \rho \cdot g \cdot h \cdot S \rightarrow \text{ecuación (B)}$$

Donde

$\rho$ : Densidad específica del agua.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$h$ : Tirante.

$S$ : Pendiente de la superficie libre.

- $V_0$ : Velocidad de corte asociada a la tensión de corte, se define de la siguiente manera:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

Donde

$\tau_b$ : Tensión de corte.

$\rho$ : Densidad específica del agua.

De Basile – 2004, “Geomorfología e Hidráulica Fluvial”, [Ref.(5)], se extrajeron las siguientes ecuaciones:

Ecuación (17), cap. (4):

$$\frac{U_c}{U_{*c}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \rightarrow (17)$$

$V_0 = U_* =$  Velocidad de corte.

$U_{*c} =$  Velocidad de corte crítica.

$U_c = V_c =$  Velocidad crítica.

$C =$  coeficiente de Chezy.

Ecuación (18), cap. (4) y/o ecuación (2), cap. (6):

$$\Psi_{cr} = \frac{(U_{*c})^2}{(s-1) \cdot g \cdot d} = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d} \rightarrow (18)$$

$\Psi_{cr} =$  Tensión de corte adimensional crítica o parámetro de movilidad de

Shields.

De (17)  $\rightarrow U_{*c} = \frac{U_c \sqrt{g}}{C}$  y reemplazando esta última en la ecuac. (18), se

$$\text{obtiene: } \Psi_{cr} = \frac{(U_c)^2 \cdot \cancel{g}}{C^2 \cdot (s-1) \cdot \cancel{g} \cdot d} = \frac{(U_c)^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot d} \rightarrow (20)$$

Dónde:

$\Delta = s - 1$  : Densidad relativa del material sumergido.

C: Coeficiente de Chezy.

De la ecuación (19) de Cap. (4), se obtiene la siguiente expresión:

$$C = 18 \cdot \log \left( \frac{11h}{K_s} \right) \rightarrow (19)$$

Siendo:

h : Tirante (m).

K<sub>s</sub>: Rugosidad absoluta del contorno, ([Ref.(5)], Cap. (2), pag. (14)).

Reemplazando la ecuación (19) en la (20), se obtiene:

$$\Psi_{cr} = \frac{U_c^2}{\left( 18 \cdot \log \left( \frac{11h}{K_s} \right) \right)^2 \cdot \Delta \cdot d_{50}}$$

- **Ψ<sub>cr</sub>**: Parámetro de movilidad de Shields crítico o tensión de corte adimensional crítica, se define como:

Donde

U<sub>c</sub>: Velocidad Crítica, determinada con la ecuación (A).

$\Delta = s - 1$ : Densidad relativa del material sumergido.

$s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$  : Relación de densidad entre el sólido y el líquido.

d<sub>50</sub>: Tamaño medio del sedimento superficial, (mediana de la distribución granulométrica).

h: Tirante hidráulico en la sección transversal en estudio.

K<sub>s</sub>: Rugosidad absoluta del contorno; ([Ref.(5)], cap. (2), pag. (14)).

- **τ<sub>0c</sub>**: Tensión de corte crítica, se la obtiene de la ecuac (18), siendo:

$$\tau_{0c} = \Psi_{cr} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50} \rightarrow \text{Ecuación (C)}$$

- En la columna B, se realiza la comparación entre la “Tensión de corte generada en el fondo, ecuación (B)” vs “Tensión de corte crítica, ecuación (C)”, (valor

límite, superando este valor se produce erosión). Si “Tensión de corte generada” es superior a la “Tensión de corte crítica” entonces “SI EROSIONA”, en caso contrario “NO EROSIONA”. (Ver apéndice desde hoja 142 a 145, Escenario: Natural – Caudal: 200 m<sup>3</sup>/s)).

Este análisis se lo aplica en los dos escenarios de estudio, “SITUACIÓN NATURAL y PROYECTO”.

Los resultados de los Escenarios “Natural y Proyecto con un caudal de 200 m<sup>3</sup>/s” se los puede ver en el apartado “Apéndice” en los artículos 1.1 y 1.2.

#### 5.4.1 Interpretación de los resultados parciales

Lo primero que se realizó es la comparación entre parámetros específicos en los dos escenarios. Estos factores son: Velocidad media de circulación, Velocidad crítica, Tensión de corte en el fondo y Tensión de corte crítica.

*Escenario Natural:*

- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 125  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 13
- Comparación entre “Tensión de corte en el fondo” y “Tensión de corte crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 110  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 28
- Promediando ambos cotejos, se obtiene:  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 117  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 21

*Escenario Proyecto:*

- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 120  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 18
- Comparación entre “Tensión de corte en el fondo” y “Tensión de corte crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 138  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 0
- Promediando ambos cotejos, se obtiene:  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 129



## Secciones en donde “NO EROSIONA”: 9

Lo primero que se hizo es cotejar la “Velocidad media de circulación” y “Velocidad crítica” y por otro lado cotejar la “Tensión de corte en el fondo” y la “Tensión de corte crítica”, todos los parámetros según cálculos, en ambos escenarios “Natural” y “Proyecto”.

Para su análisis se considera que si la “Velocidad crítica” es menor que la “Velocidad de circulación”, entonces “Si Erosiona”, en caso contrario “No Erosiona”, en la misma situación.

Y para el otro parámetro se considera que si la “Tensión de corte crítica” es menor que la “Tensión de Corte en el Fondo”, entonces “Si Erosiona”, en caso contrario “No Erosiona”, en la misma situación. Dicho análisis se hizo en cada una de la sección que compone el tramo de río estudiado.

Como ambas comparaciones de los parámetros, para el mismo escenario son levemente divergentes, se hizo un promedio para obtener un único valor para cada escenario.

Comparando los valores promedio que nos arroja cada escenario a prima facie se puede concluir que no sería adecuado la realización del proyecto ya que pasa de 117 secciones que se erosiona en el estado Natural a 129 en estado Proyecto, por lo que no se observa ninguna mejoría.

Ahora bien, si se comparan las “Velocidades” de los dos escenarios por separado, se observa una muy leve mejoría, ya que se pasa de 13 secciones “NO EROSIONADA” a 18 secciones, algo que se debe analizar económicamente si es justificable realizar la obra por esa mínima mejoría. Debe destacarse que el análisis económico detallado es ajeno a los objetivos de la presente Tesis.

Y si ahora se cotejan los valores de “Tensiones de corte” entre los dos escenarios, debido a los valores obtenidos se puede concluir que no es conveniente la ejecución de la obra, ya que en el estado “Natural” se tienen 110 secciones “EROSIONABLES” y en estado de “Proyecto” todas las secciones se “EROSIONAN”, por lo que se puede concluir que el estado Natural tiene mejor comportamiento que el estado de Proyecto.

## CAPITULO 6: Ampliación del análisis

### 6.1 Aplicación del análisis con las teorías de Rosinsky y Mirtsjulava

Observando que los resultados son muy dispares, se estudiarán los dos escenarios aplicando las Teorías de ROSINSKY y de MIRTSJULAVA, [Ref.(2)].

De la modelación computacional a través del programa HEC-RAS me entrega los siguientes parámetros:

- Estación o progresiva de cada sección, (m).
- Caudal utilizado para la modelación, (m<sup>3</sup>/s).
- Nivel Mínimo de Cauce, (m).
- Nivel de agua, (m).
- Nivel de tirante crítico, (m).
- Nivel de línea de energía, (m).
- Pendiente de línea de energía, (m/m).
- Velocidad media de escurrimiento, (m/s).
- Área de conducción, (m<sup>2</sup>).
- Ancho superficial máximo, (m).
- Número de Froude, (adimensional).
- Radio hidráulico, (m).

Para el “Método de Rosinsky” se calcularon los siguientes parámetros:

- $T_w$  = Tirante, (m); (Nivel de agua – Nivel Mínimo de Cauce).
- $q$  = Caudal unitario, (m<sup>2</sup>/s); ( $Q_{total}$  / Ancho superficial max.).
- $h$  = Profundidad de erosión localizada, (m); Según Rosinsky.

La fórmula es la siguiente:

$$h = 1.2 \sqrt{\frac{q}{v_h}} + \frac{\Delta}{n}$$

Dónde:

$h$  = Profundidad de erosión localizada, [m]. Obtenido del cálculo hidráulico mediante el método de Rosinsky.

$q$  = caudal específico, [m<sup>2</sup> / s]. Obtenido del cálculo hidráulico mediante el software HEC-RAS.

$v_h$  = velocidad media no erosiva del flujo, [m / s]. Obtenida de [Ref.(2)].

$\Delta$  = espesor de la capa natural, [m]. Obtenida de [Ref.(1)].

$n$  = contenido relativo de las inclusiones gruesas en el volumen, [%].  
Obtenida de [Ref.(1)].

El primer miembro de la parte derecha de la igualdad, da la profundidad para la cual finaliza el arrastre de fracciones que conforman la capa de suelo, en este término esta la velocidad no erosiva; el segundo término determina la potencia de la capa, teniendo en cuenta el espesor del estrato de lecho considerado y el porcentaje de inclusiones gruesas con respecto al diámetro de la partícula tomada para determinar la velocidad no erosiva. Si es un único estrato entonces:  $\Delta = 0$ .

Los parámetros de  $v_h$  y  $n$  se los pueden obtener de tablas obtenidas por experimentación, [Ref.(2)].

Dependiendo del valor de  $h$  que nos da la ecuación es que nos define si se erosiona o no el lecho.

Si  $h > tirante \rightarrow$  se erosiona.  $h > T_w$

Si  $h < tirante \rightarrow$  no se erosiona, se deposita.  $h < T_w$

Si  $h = tirante \rightarrow$  queda inalterada la sección.  $h = T_w$

Además la expresión me define el valor exacto de dicha erosión.

La profundidad de la erosión localizada depende del tipo de suelo que está formado el fondo erosivo del río. La heterogeneidad del suelo es muy importante en los cálculos de la profundidad de erosión.

Supongamos un suelo estratificado con dos capas, la primera un suelo deslizante fino y la segunda formada por partículas gruesas, si calculamos la “profundidad de erosión” con la velocidad del primer estrato, puede a que llegue a superar al espesor del propio estrato, pero como existe una conformación de una capa natural gruesa, que impide su evolución hasta la profundidad que hubiera alcanzado ante la ausencia de suelos con grandes incrustaciones.

Por tal motivo, para suelos heterogéneo, el cálculo se lleva a cabo no para un solo valor de velocidad no erosiva de la corriente, sino para varios.

El cálculo para un caso tal, se ejecuta por capas que tienen distintos valores de  $v_h$ .

Para realizar el cálculo de  $h$  (profundidad de erosión localizada), se procede de la siguiente manera: se adopta la magnitud  $v_H$ , que corresponde a la capa superior. Si al calcular  $h$  y se coteja con la geometría existente y si se demuestra que la capa superior

se erosiona completamente, entonces se continúa con la capa siguiente y si nuevamente obtenemos los mismos resultados, se repite los mismos procedimiento hasta obtener el valor de h contenido dentro de una capa, es decir, la cota obtenida del fondo erosivo resultará en los límites de la capa o bien no alcanzará a su parte superior (en el último caso, la erosión se detendrá sobre la parte superior de la capa dada).

En el caso de inclusión dentro de un suelo relativamente fino no cohesivo, de una cantidad no muy grande de material grueso, capacitado de conformar la capa natural del fondo, cuando acontece el lavado de fracciones finas, el cálculo se lleva, cuando acontece el lavado de fracciones finas.

A continuación se indicará como se determinó cada uno de los parámetros:

Caudal específico (q), [por definición  $q = \frac{Q}{b}$ , donde Q es el caudal circulante y b es el ancho superficial, variable para cada sección], los valores de Q y b son obtenidos de los resultados que nos entrega la modelación en el software Hec Ras, este es único para cada sección y en la situación de canal en estado Natural y en Proyecto, (Ver Apéndice 2, desde pag. 158 a la 189).

Velocidad media no erosiva del flujo (Vh), se adopta un suelo homogéneo de potencia o espesor infinito. Se lo va a determinar según la Tabla 6.1 que está en el capítulo 3 de la [Ref.(2)], a continuación se la transcribe. El valor adoptado es de 0,95 m/s, que es el valor medio para un suelo tipo “Grava media”.

Tipo de Suelo	Dimensión de la partícula	Velocidades no erosivas h=1 m
Arena fina	0,25 - 0,03	0,30 - 0,45
Arena media	1,00 - 0,25	0,45 - 0,60
Arena gruesa	2,50 - 1,00	0,60 - 0,75
Grava fina	5,00 - 2,50	0,75 - 0,85
Grava media	10,00 - 5,00	0,85 - 1,05
Grava gruesa	15,00 - 10,00	1,05 - 1,20
Guijarro fino	25,00 - 15,00	1,20 - 1,45
Guijarro medio	40,00 - 25,00	1,45 - 1,85
Guijarro grueso	75,00 - 40,00	1,85 - 2,40
Roca fina	100,00 - 75,00	2,40 - 2,80
Roca media	150,00 - 100,00	2,80 - 3,35
Roca gruesa	200,00 - 150,00	3,35 - 3,80

Tabla N° 6.1, Tipo de suelo Vs Dimensión de la partícula Vs Velocidades no erosivas, (Tabla N° 3.2, pag. 34, de origen).- [Ref.(2)].

Fuente: Erosión Hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos.

Espesor de la capa natural ( $\Delta$ ), en el Proyecto Ejecutivo de Norgav, [Ref.(1)]; define a la capa superficial de 20 cm = 0,20 m, según indica el estudio granulométrico. Por

razones prácticas, el tesista toma esta característica con un espesor infinito, para no tener problemas con el cálculo y evitar iteraciones.

Contenido relativo de las inclusiones gruesas en el volumen, [%]; los valores fueron extraído de los estudios de granulometría del Proyecto Ejecutivo de Norgav, [Ref.(1)]. El tipo de suelo que considero para este ejemplo es de “Grava media”, según tabla 3.2, el tamaño de las partículas gruesa va entre 10 mm a 5 mm obteniendo un valor promedio de 7,50 mm. Del estudio granulométrico mostrado en el apartado “3.4.2. Análisis granulométrico” de la presente Tesis, se extraen los siguientes valores:

P/Muestra 01 → 24% material pasante → 76% mat. retenido.

P/Muestra 02 → 47% material pasante → 53% mat. retenido.

P/Muestra 03 → 54% material pasante → 46% mat. retenido.

Por lo que el promedio del material retenido es de 58,33%. (este valor es porcentaje en peso, yo voy a tomar que es % en volumen).

Los valores finales adoptados para este método son los siguientes:

DATOS		
Velocidad no erosiva p/h=1m =	0.95	m/s
Espesor de capa natural =	0	m
Contenido rel. de incl. Gruesas =	0.5833	

Tabla N° 6.2, Valores finales asumido para realizar los cálculos, para el Método de Rosinsky.-

- Columna A, comparación entre el “Tirante” y la “Profundidad de erosión localizada”.

Para el “Método de Mirtsjulava”, la expresión del citado autor está determinada para canales artificiales y naturales sin revestir, donde la fórmula dada por este investigador tiene como característica que dicha expresión está en función del tamaño de las partículas y la profundidad de la corriente, aunque sobre la erosión influyen de manera no menos esencial: las pulsaciones de la velocidad, las distintas formas y pesos específicos de los acarreo, la variación del régimen de turbulencia en la capa del fondo, la aparición de fuerzas de cohesión con la disminución del tamaño d, etc.

Los parámetros que intervienen en la ecuación analizada son:

- Cohesión.
- Peso específico del agua y sedimento.
- Diámetro de la partícula.
- Coeficiente que depende de las condiciones de escurrimiento.

- Se tiene en cuenta la intensidad de la turbulencia (con un coeficiente).

Determinación de los parámetros intervinientes:

- Tirante, (m); (Nivel de agua – Nivel Mínimo de Cauce).
- $V_{fon.cr}$ : Velocidad de fondo crítica, (m/s); según Mirtsjulava.

$$v_{fon.cr} = lg \left( \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2gm}{2,6 \gamma_0 n} [(\gamma_1 - \gamma_0)d + 1,25 C_y^H k]}$$

Dónde:

$m$  = coeficiente que caracteriza las condiciones del escurrimiento y se adopta de tablas.

Obtenida de [Ref.(2)].

$\gamma_1$  = peso específico del sedimento,  $[kg / m^3]$ . Obtenida de [Ref.(1)].

$\gamma_0$  = peso específico del agua,  $[kg / m^3]$ . Obtenida de [Ref.(1)].

$d$  = diámetro de la partícula,  $[m]$ . Obtenida de [Ref.(1)].

$H$  = Profundidad de la corriente,  $[m]$ . Obtenido del cálculo hidráulico con el software HEC-RAS, (ver Apéndice).

$g$  = Aceleración de la gravedad,  $[9,81 m/s^2]$ .

$C_y^H$  = resistencia normal de fatiga a la rotura para suelos cohesivo bajo carga dinámica. Obtenida de [Ref. (2)].

$k$  = Coeficiente de homogeneidad que depende de la aparición de fuerzas de cohesión para suelos de grano fino. Obtenida de [Ref. (2)].

$n$  = Coeficiente de sobrecarga que depende de la relación de la velocidad promediada en el mismo punto (intensidad de la turbulencia). Obtenida de [Ref. (2)].

$$n = \left( \frac{v_{max_0}}{v_{fon}} \right)^2$$

En forma aproximada, se la puede determinar de la siguiente manera:

$$n = 1 + \frac{d}{(0,00005 + 0,3.d)}$$

Siendo  $d$ , diámetro característico de la partícula.

$K$ , se establece en base al tratamiento estadístico de los datos experimentales:

$$K = 1 - \frac{\alpha \cdot \sigma}{c}$$

Dónde:

$\sigma$ : desviación media cuadrática de c (cohesión).

c: valor de la cohesión media del suelo.

$\alpha$ : coeficiente que varía entre 2,65 a 2,0.

Los valores de m, se lo extrae de la siguiente tabla propuesta por T.E. Mirtsjulava:

Características del cauce	Categoría del Canal*1		
	I	II	III
Canales portadores de:			
acarreo en estado coloidal (más de 0,1 kg/m <sup>3</sup> )	1,30	1,40	1,60
acarreo de fondos erosionantes	0,75	0,80	0,85
Canales con fondo cubierto de vegetación	1,10	1,15	1,20
Canales de funcionamiento discontinuo:			
en regiones de clima seco	0,20	0,22	0,25
en regiones de clima húmedo	0,60	0,70	0,80
Sinuosidad de canales:			
Canal recto	1,00	1,00	1,00
ligeramente sinuoso	0,90	0,95	0,95
Sinuosidad media	0,75	0,85	0,90
Sinuosidad pronunciada	0,60	0,65	0,70

Tabla N° 6.3, Valores de m en función de características del cauce y la categoría del canal, [Ref.(2)].

Los valores finales adoptado para este método son los siguientes:

g =	9.81	m/s <sup>2</sup>
m =	1	
$\gamma_1$ =	2.65	T/m <sup>3</sup>
$\gamma_0$ =	1	T/m <sup>3</sup>
n =	4.2	
d =	0.004	m
Cyk =	0.049	T/m <sup>2</sup>
K =	0.53	

Tabla N° 6.4, Valores finales asumido para realizar los cálculos, para el Método de Mirtsjulava.-

Los resultados de las Metodologías de Rosinsky y Mirtsjulava para los escenarios de natural y proyecto, y para un caudal de 200 m<sup>3</sup>/s se presentan en el Apéndice, en los artículos 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4.

## 6.2 Tabla resumen de Velocidad crítica, Tensión de corte crítica, Método de Rosinsky y Método de Mirtsjulava

Realizando una tabla resumen global con todos los métodos aplicados, se obtiene lo siguiente:

***Escenario Natural:***

- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 125  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 13
- Comparación entre “Tensión de corte en el fondo” y “Tensión de corte crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 110  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 28
- Comparación entre “Tirante” y “Profundidad de erosión localizada”, obtenida a través del Método de Rosinsky.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 65  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 73
- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad de fondo crítica”, obtenida a través del Método de Mirtsjulava.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 137  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 1

***Escenario Proyecto:***

- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 120  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 18
- Comparación entre “Tensión de corte en el fondo” y “Tensión de corte crítica”.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 138  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 0
- Comparación entre “Tirante” y “Profundidad de erosión localizada”, obtenida a través del Método de Rosinsky.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 137  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 1
- Comparación entre “Velocidad media de circulación” y “Velocidad de fondo crítica”, obtenida a través del Método de Mirtsjulava.  
Secciones en donde “SI EROSIONA”: 138  
Secciones en donde “NO EROSIONA”: 0



### 6.2.1 Observaciones

En el escenario Natural resulta sorprendente lo obtenido con el Método de Rosinsky, ya que este método es aplicable a lechos de cauces naturales y sus valores discrepan muy ampliamente de lo que se había obtenido previamente. Esto es debido a que el Método de Rosinsky entrega como resultado que 65 secciones se erosionan y 73 secciones no se erosionan, y en este escenario se había obteniendo 124 secciones erosionadas y 14 secciones no erosionadas (valores medios).

Las probables causas de este error podrían ser tres:

- a) Las tablas que nos ofrece el método de Rosinsky no son generalizadas o aplicables para todos los casos, en especial para un río como el que se analiza, por consecuencia los valores de la Tabla N° 6.2, estaría mal determinado.
- b) En caso que los parámetros definido en la tabla N° 6.2 sean correctos, otras de las posibles fuente de error podría ser la falta de calibración de la ecuación

$$h = \alpha_1 \cdot \sqrt[1.2]{\frac{q}{v_h}} + \alpha_2 \cdot \frac{\Delta}{n}$$

Siendo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  factores de calibración.

- c) Y en caso de no obtener resultados satisfactorios, se puede concluir que dicha ecuación no es aplicable al tramo del río estudiado.

El tesista solo controla el punto a) no pudiendo realizar los incisos b) y c), ya que realizar esos puntos, por un lado no dispongo valores medidos in situ y por otro lado no dispongo valores medidos in situ y por otro lado realizar esos estudios queda fuera del alcance de la presente Tesis.

En el escenario de Proyecto los valores obtenidos por los Métodos de Rosinsky y Mirtsjulava son muy similares y se aproxima mucho al método de “comparación de Tensiones de fondo”. Porque los valores de secciones erosionadas son casi similares, Rosinsky da 137 secciones erosionadas y Mirtsjulava da 138 secciones erosionadas.

En conclusión, en función de los valores obtenidos no es justificable la construcción de dicho proyecto.

## 6.3 Cotejo de parámetros entre ambos escenarios

### 6.3.1 Tabla resumen y cotejo de los primeros parámetros.

A continuación se mostrará una tabla resumen de los primeros parámetros

Parámetros a Analizar		Escenario "Estado Natural"			
		Tramo I	Tramo II	Tramo III	Promedio
Parámetro fluvio-morfológicos	Pendiente media	0,41%	0,35%	0,25%	0,34%
	Sinuosidad	1,1	1,5	1,8	1,47
	Ancho medio (m)	79	100	87	88,67
Comparación entre "Velocidad media de circulación" y "Velocidad crítica"	Si erosiona				125
	No erosiona				13
Comparación entre "Tensión de corte en el fondo" y "Tensión de corte crítica"	Si erosiona				110
	No erosiona				28
Comparación entre "Tirante" y "Profundidad de erosión localizada"	Si erosiona				65
	No erosiona				73
Comparación entre "Velocidad media de circulación" y "Velocidad de fondo crítica"	Si erosiona				137
	No erosiona				1

Tabla N° 6.5, Tabla resumen de parámetros, estado natural.-

Parámetros a Analizar		Escenario "Proyecto Ejecutado"			
		Tramo I	Tramo II	Tramo III	Promedio
Parámetro fluvio-morfológicos	Pendiente media	0,33%	0,34%	0,19%	0,29%
	Sinuosidad	1	1,03	1,13	1,05
	Ancho medio (m)	100	100	100	100,00
Comparación entre "Velocidad media de circulación" y "Velocidad crítica"	Si erosiona				120
	No erosiona				18
Comparación entre "Tensión de corte en el fondo" y "Tensión de corte crítica"	Si erosiona				138
	No erosiona				0
Comparación entre "Tirante" y "Profundidad de erosión localizada"	Si erosiona				137
	No erosiona				1
Comparación entre "Velocidad media de circulación" y "Velocidad de fondo crítica"	Si erosiona				138
	No erosiona				0

Tabla N° 6.6, Tabla resumen de parámetros, estado Proyecto Ejecutado.-

La tabla resumen expone los valores de algunos parámetros fluvio-morfológicos juntos con los parámetros comparativos.

Analizando los parámetros fluvio-morfológico tales como la pendiente, se observa que la misma en estado natural es de 0,34% y se reduce a 0,29% en estado de proyecto. Esta reducción de pendiente es poco factible que se mantenga en el tiempo ya que no se puede variar en forma independiente un tramo de un sistema de río natural de una longitud total del orden de 200 km y siendo el Proyecto de apenas 7 km.

La sinuosidad en estado natural es de 1,47 y se reduce a 1,05 en estado de proyecto, por un lado bajar la sinuosidad provocaría un aumento de la velocidad media de circulación, siendo este aumento negativo para la finalidad de estabilizar el cauce. Por otro lado como los taludes de la nueva sección es de materiales sueltos, similares al estado natural del terreno por lo que a priori se podría concluir que el material migraría. Para verificar lo dicho se estudió imágenes satelitales posterior a la obra ejecutada – 5 años posteriores a su conclusión – y se pudo determinar que las secciones propuestas y el planteo en planta se fueron deteriorando hasta formar nuevamente meandros tendiendo al estado original.

Continuando el análisis de la metodología de Rosinsky y comparando el “Estado natural” con el “Estado de Proyecto”, se ve que en éste último la metodología de Rosinsky se adaptó muy bien, mientras que el “Estado natural” los valores obtenidos discrepan mucho con los valores que se venían obteniendo. Esto puede deberse a que en el “Estado natural”, la fluvio-morfología en planta del río es meandriforme entrelazado.

Mientras que en el estado de proyecto al perfilar la sección y cambiar su pendiente, estamos modificando dos características hidráulicas importantes, cambiando su fluvio-morfología en planta por un curvilíneo circular (ver proyecto); nace que la metodología sea aplicable bajo estas circunstancias y no en el “Estado Natural”.

Con respecto del ancho, en el Estado de Proyecto se adoptó un valor constante de 100 m, mientras que en el Estado Natural existen secciones donde el ancho es del orden de 170 m, por lo que adoptar las secciones de proyecto produciría el estrangulación de la sección acelerando la velocidad media de circulación.

Con respecto a los otros parámetros que se estudió tales como la “Velocidad media de circulación” y “velocidad crítica” según los cálculos y los análisis indican que en “Estado de Proyecto” 18 secciones no se erosionan contra 13 secciones en “Estado Natural” en 138 secciones totales, esta leve ventaja hacia el Proyecto es minúsculo.

Cuando se compara la “Tensiones de corte en el Fondo” y la “Tensión de Corte Crítica”, en “Estado de Proyecto” se erosionan las 138 secciones y en “estado Natural” solo se erosiona 110 secciones, este análisis es contradictorio con el anterior, ya que la ventaja hacia el “Estado Natural” es pequeño y no representativo.

El estudio de Rosinsky de este parámetro es el único que presenta una diferencia notable, los parámetros estudiados son “Tirante” y “Profundidad de erosión localizada” y se observa que en “Estado Natural” se erosiona 65 secciones y en “Estado de

Proyecto” se erosiona 137 secciones, este estudio se los desprecia por no ajustarse a los valores que venimos obteniendo.

Debido a la discrepancia que se obtuvieron a través del metodología de Rosinsky o estudio de tirantes, aplicado al Estado Natural, ya que los resultados producidos discrepan abismalmente con los resultados que veníamos teniendo, es que se plantea descartar los resultados obtenidos por la metodología de Rosinsky por disímiles a los valores que se venían obteniendo.

Estos valores se lo puede observar en la tabla N° 6.5.

Por otro lado se puede hacer un estudio más profundo de la Metodología de Rosinsky, con la finalidad de calibrar la ecuación (ver art. 6.2.1, in fine).

Aplicar esos estudios o realizar las calibraciones quedan fuera del alcance de la presente Tesis.

Y por último, los parámetros analizados son “Velocidad media de circulación” y “Velocidad de fondo critica”, no se aprecia una mejoría para ninguna de las opciones analizadas.

### 6.3.2 Cotejo de otros parámetros.

Continuando con el análisis se estudiaron tres variables en los dos escenarios (Natural y Proyecto).

Las variables que se analizaron fueron:

- Velocidad media de circulación.
- Tirantes.
- Número de Froude.

En esta sección se estudiarán los siguientes parámetros: “Velocidad media de circulación”, “Tirantes” y “Número de Froude” en cada una de las secciones transversales del tramo del río estudiado, que en nuestro caso son 138 secciones transversales.

Los escenarios analizados son dos: “Natural” y “Proyecto”.

Los valores de los parámetros a estudiar son los determinados por la modelización computacional, para cada uno de los escenarios planteados.

El criterio de selección de la escala fue el siguiente:

- Se determinó los valores máximo y mínimo del parámetro de estudio.
- Se hizo la diferencia entre los valores extremos. Esto nos da la amplitud de los valores a analizar.

- Se selecciona la cantidad de puntos que deseo para construir la gráfica, para este caso se adoptó, 8 escalones.
- Se divide la amplitud de valores a analizar en la cantidad de punto elegido, esto nos da la amplitud o salto de cada punto.
- Se redondea el valor de amplitud y también por ende el rango total de estudio.

El estudio consta en contabilizar cuantos valores de un parámetro particular son “Superior” o “Inferior” a un valor de la escala de referencia, se hace el mismo análisis para cada uno de los valores definido en la escala de referencia, obteniendo de esta forma la tabla resultante; y para una interpretación se hacen graficas de los resultados obtenidos.

### 6.3.3 Tabla de comparación de “Velocidad media de circulación” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.

Para tener una visión más amplia entre los dos escenarios dispuestos es que se va a plantear graficas comparativas de ciertos parámetros en esos dos estados.

Para comenzar el análisis me parece determinante estudiar la “velocidad media de circulación” y analizar cómo esta varía según valores de referencias.

Se tomaron los valores extremos del parámetro elegido y se tomó a priori un escalón de tal forma de tener 8 valores distintos para poder construir una gráfica.

De cada uno de los valores de referencia estudiado, se tomaron dos criterios, valores MAYORES y MENORES a ese valor y se realizan tablas separadas.

Se tomó a la “Velocidad media” como parámetro de análisis, ya que este valor es de suma importancia para determinar cómo se modifica dicho factor con la ejecución del proyecto.

Construcción de la tabla:

De la tabla mostradas en los apéndices, donde se exponen las “Estaciones”, (en cada una de la sección estudiada en el Hec Ras), de esta tabla se tomó la “Velocidad media” en el estado de “Proyecto” y en estado “Natural”, con estos valores se estudió cuál de los mismos son mayores o menores según un valor de referencia, según corresponda el análisis. Posteriormente se estudió el parámetro en cuestión en cada una de las progresivas en función de una escala de valores adoptadas a priori.

Los resultados de esta comparación se presentan en el Apéndice en el artículo 3.1.

La tabla resumen se la muestra en la figura inferior.

VALORES MAYORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
V=	1	V=	1.5	V=	2	V=	2.5	V=	3	V=	3.5	V=	4	V=	4.5	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	136	111	104	88	76	65	51	50	6	28	6	19	6	13	0	8
%	99	80	75	64	55	47	37	36	4	20	4	14	4	9	0	6

Tabla N° 6.7, Tabla Comparativa de Velocidades mayores al parámetro de referencia.

VALORES MENORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
V=	1	V=	1.5	V=	2	V=	2.5	V=	3	V=	3.5	V=	4	V=	4.5	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	2	27	34	50	62	73	87	88	132	110	132	119	132	125	138	130
%	1	20	25	36	45	53	63	64	96	80	96	86	96	91	100	94

Tabla N° 6.8, Tabla Comparativa de Velocidades menores al parámetro de referencia.

#### 6.3.4 Tabla de comparación de “Tirantes” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.

Se confeccionó una tabla colocando en cada una de las “Estaciones” los valores de “Tirantes” calculado en el estado de “Proyecto” y en estado “Natural”, en dicha tabla se estudió cuál de los valores es mayor. Y posteriormente se estudió el parámetro en cuestión en cada una de las progresivas en función de una escala de valores adoptadas a priori.

Se tomó el “Tirante” como parámetro de análisis, ya que este valor es otro de los factores determinante que se podría modificar con la ejecución del proyecto.

Los resultados de esta comparación se presentan en el Apéndice en el artículo 3.2.

La tabla resumen se muestra a continuación.

VALORES MAYORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
Y=	0.5	Y=	0.8	Y=	1	Y=	1.25	Y=	1.5	Y=	1.75	Y=	2	Y=	2.25	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	137	138	130	137	64	130	47	118	10	104	0	82	0	61	0	46
%	99	100	94	99	46	94	34	85.5	7.2	75	0	59.4	0	44	0	33.3

Tabla N° 6.9, Tabla Comparativa de Tirantes mayores al parámetro de referencia.

VALORES MENORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
Y=	0.5	Y=	0.8	Y=	1	Y=	1.25	Y=	1.5	Y=	1.75	Y=	2	Y=	2.25	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	1	0	8	1	74	8	91	20	128	34	138	56	138	77	138	92
%	0.7	0	5.8	0.7	54	5.8	66	14.5	93	25	100	40.6	100	56	100	66.7

Tabla N° 6.10, Tabla Comparativa de Tirantes menores al parámetro de referencia.

6.3.5 Tabla de comparación de “Número de Froude” en los dos escenarios “Natural” y “Proyecto”.

Se confeccionó una tabla colocando en cada una de las “Estaciones” los valores de los “Número de Froude” calculado en el estado de “Proyecto” y en estado “Natural”, en dicha tabla se estudió cuál de los valores es mayor. Y posteriormente se estudió el parámetro en cuestión en cada una de las progresivas en función de una escala de valores adoptadas a priori.

Y por último parámetro de análisis se tomó el “Numero de Froude”, ya que este valor es otro de los factores determinante que se podría modificar con la ejecución del proyecto.

Los resultados se presentan en el Apéndice en el artículo 3.3.

La tabla resumen se indica a continuación.

VALORES MAYORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
NF=	0.5	NF=	0.75	NF=	1	NF=	1.25	NF=	1.5	NF=	1.75	NF=	2	NF=	2.25	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	89	65	70	49	19	19	6	14	6	8	6	5	0	2	0	1
%	64	47	51	35.5	14	14	4.3	10.1	4.3	5.8	4.3	3.62	0	1.4	0	0.72

Tabla N° 6.11, Tabla Comparativa de Números de Froude mayores al parámetro de referencia.

VALORES MENORES AL PARÁMETRO DE REFERENCIA																
NF=	0.5	NF=	0.75	NF=	1	NF=	1.25	NF=	1.5	NF=	1.75	NF=	2	NF=	2.25	
P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	
u	49	73	68	89	119	119	132	124	132	130	132	133	138	136	138	137
%	36	53	49	64.5	86	86	96	89.9	96	94	96	96.4	100	99	100	99.3

Tabla N° 6.12, Tabla Comparativa de Números de Froude menores al parámetro de referencia.

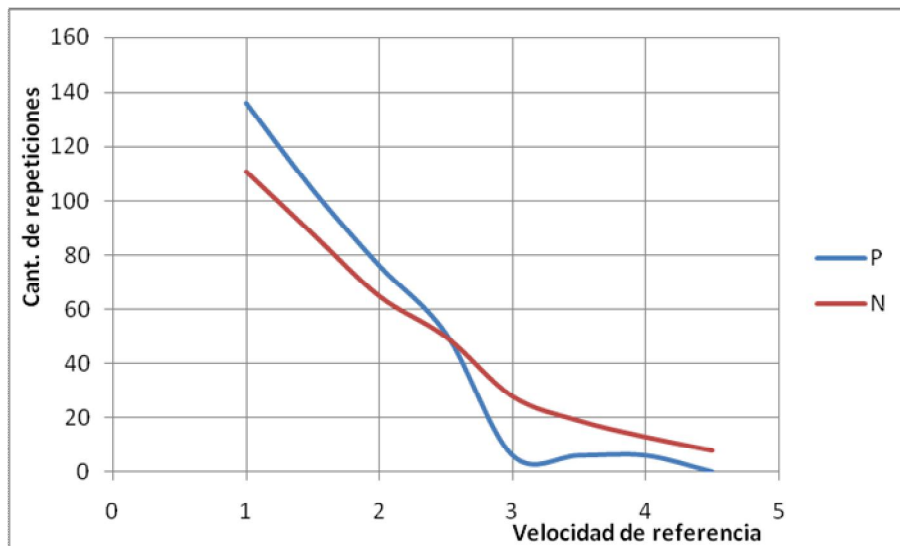
6.3.6 Conclusiones de la comparación de parámetros

- Cuando se analizaron las “Velocidades Medias” en los dos escenarios, se observó que por mera coincidencia, en 69 secciones transversales las “velocidades medias” en la situación de Proyecto son superiores a la situación Natural y viceversa.
- En estado Natural existen 27 secciones que tienen Velocidad Media menor a 1 m/s y para el caso del estado de Proyecto solo 2 secciones es menor a 1 m/s. Este comportamiento se va acentuando a medida que el parámetro de referencia aumenta, por ejemplo para una velocidad de 2,5 m/s tiene aproximadamente igual cantidad de secciones que son menores al valor de referencia (87 o 88

secciones).

- En la Figura 6.1 se muestra la variación de la “cantidad de secciones que son superiores a la velocidad de referencia” Vs “velocidad de referencia”. La velocidad de referencia va de 1 a 4,5 m/s, y los escalones son cada 0,5 m/s. Además se estudiaron para los dos escenarios, P: cauce con Proyecto; N: estado Natural del cauce.-

De la misma se observa que para valores de Velocidad superiores a 2,5 m/s se comporta mejor el Proyecto.

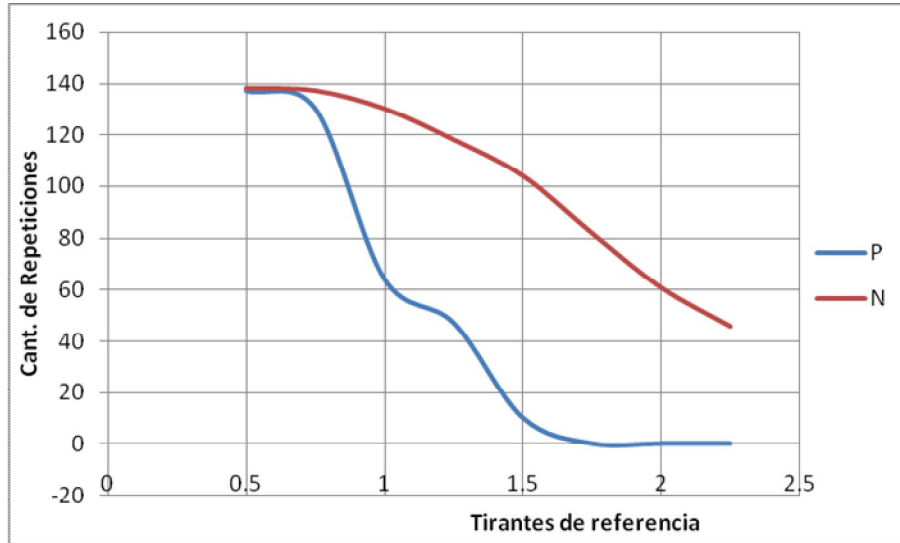


En la figura Nº 6.1, la curva representa la “cantidad de repeticiones superiores al valor de referencia” VS “valor de referencia, en este caso la velocidad”.

La grafica representa los valores mayores al parámetro de referencia, en el eje de la abscisa van los valores de “Velocidad de Referencia” y en la ordenada van la “cantidad valores mayores al parámetro de referencia”.

- Cuando se analizaron los “Tirantes” se observa una notoria diferencia, en 133 secciones transversales el Tirante calculado en estado Natural es mayor al Tirante calculado en estado de Proyecto. Solo 5 exhiben el caso inverso.
- En la Figura 6.2 se muestra la variación de la “cantidad de secciones que son superiores a los tirantes de referencia” Vs “tirante de referencia”. Los tirantes de referencia va de 0,5 a 2,25 m, y los escalones son cada 0,25 m. Analizando propiamente la curva que nos otorga el estudio se puede ver que los “Tirantes” para el caso de la situación de estado Natural es mayor en toda circunstancia a los tirantes en estado de proyecto.

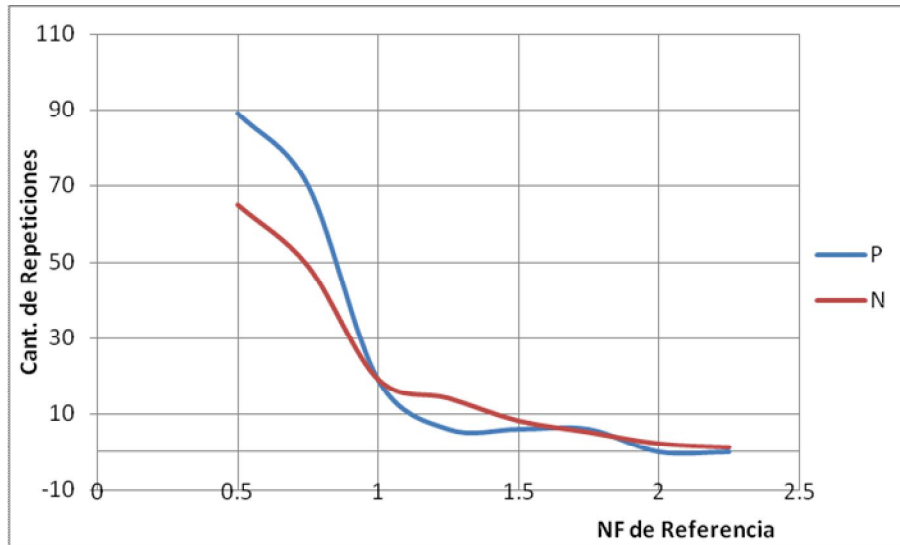




En la figura N° 6.2, la curva representa la cantidad de repeticiones superiores al valor de referencia VS valor de referencia, en este caso el tirante.

La grafica representa los valores mayores al parámetro de referencia, en el eje de la abscisa se indican los valores de “Tirante de Referencia” y en la ordenada la “cantidad de valores mayores al parámetro de referencia”.

- Cuando se analizaron los “Números de Froude” se observó que 96 secciones transversales del estado de Proyecto son superior al estado Natural, y solo 42 muestran la situación inversa.
- En la Figura N° 6.3 se muestra la variación de la “cantidad de secciones que son superiores a los Números de Froude de referencia” Vs “Número de Froude de referencia”. Los Números de Froude de referencia va de 0,5 a 2,25 m, y los escalones son cada 0,25 m. Se analizaron los “valores mayores al parámetro de referencia”.



*En la figura N° 6.3, la curva representa la cantidad de repeticiones superiores al valor de referencia VS valor de referencia, en este caso el Número de Froude.*

La gráfica representa los valores mayores al parámetro de referencia, en el eje de la abscisa se indican los valores de “Número de Froude de Referencia” y en la ordenada se grafica la “cantidad de valores mayores al parámetro de referencia”.

De la gráfica se observa que el estado Natural se comporta mejor que el Proyecto.

## **CAPITULO 7: Estudio de la morfología transversal del río**

### **7.1 Introducción**

Los análisis realizados hasta el momento son en base teóricas, para tener un valor cierto de la situación es que se va a estudiar ambos escenarios planteados con fotos satelitales, imágenes que nos otorga la realidad y el verdadero comportamiento de la situación.

Para el estudio de la morfología transversal del río se recurrió al Software on-line “Google Earth”, el cual me proveyó imágenes satelitales de fecha 14/07/2.002 y 06/01/2.014. Las imágenes de fecha del 2.002 corresponden a una situación anterior a la obra, es decir, la considero en estado natural. Por otra parte, las imágenes de fecha 2.014 corresponden al estado de Proyecto concluido, se estima que la obra de rectificación del cauce termino a fecha 02/2.009.

No se pudieron compilar imágenes de otra fecha más próxima al inicio y conclusión del Proyecto, ya que no se disponían en el software Google Earth.

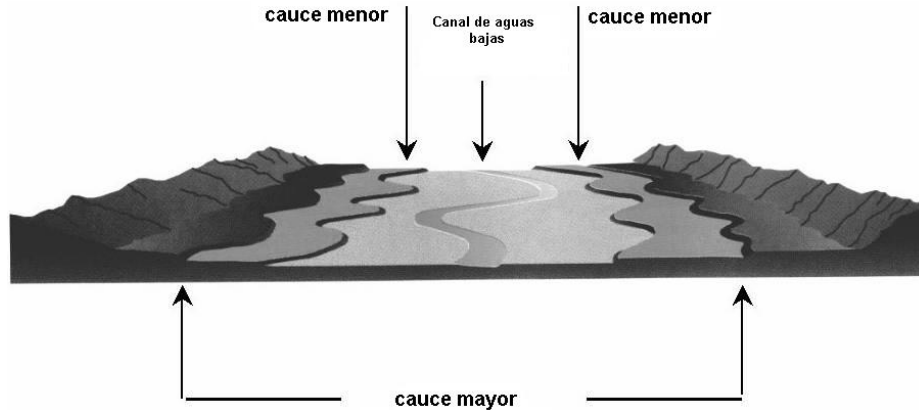
### **7.2 Criterio para la construcción de las líneas morfológicas de la sección transversal de un río.**

La determinación de las líneas morfológicas de la sección transversal de un río se llevó a cabo en base a la forma de la superficie del cauce que se aprecia a través del software Google Earth, este a través de su interface permite apreciar la forma del relieve determinando ciertas características que son habituales e identificables en una sección de un río.

El trabajo se ejecutó en el mismo Google Earth, mediante el trazado de polilíneas. El software genera archivos “kmz” que se pueden exportar a formato CAD (usando otros paquetes de software).

En las imágenes se estudiaron los siguientes rasgos fisiográficos:

- Canal de aguas bajas.
- Cauce menor.
- Cauce mayor.



*En la figura 7.1, Esquema conceptual de la configuración morfológica transversal natural del Río Salí.*

Estos rasgos característicos de la sección típica de un río, es independiente del caudal circulante, recurrencia, etc; la formación de la sección transversal del río es el resultado de la acción de la naturaleza durante un largo periodo de años y se encuentra en continua modificación.

En el caso que nos atañe, se trata de investigar el estado antes de la obra y posterior de la obra y como va variando estas características por acción natural del propio río.

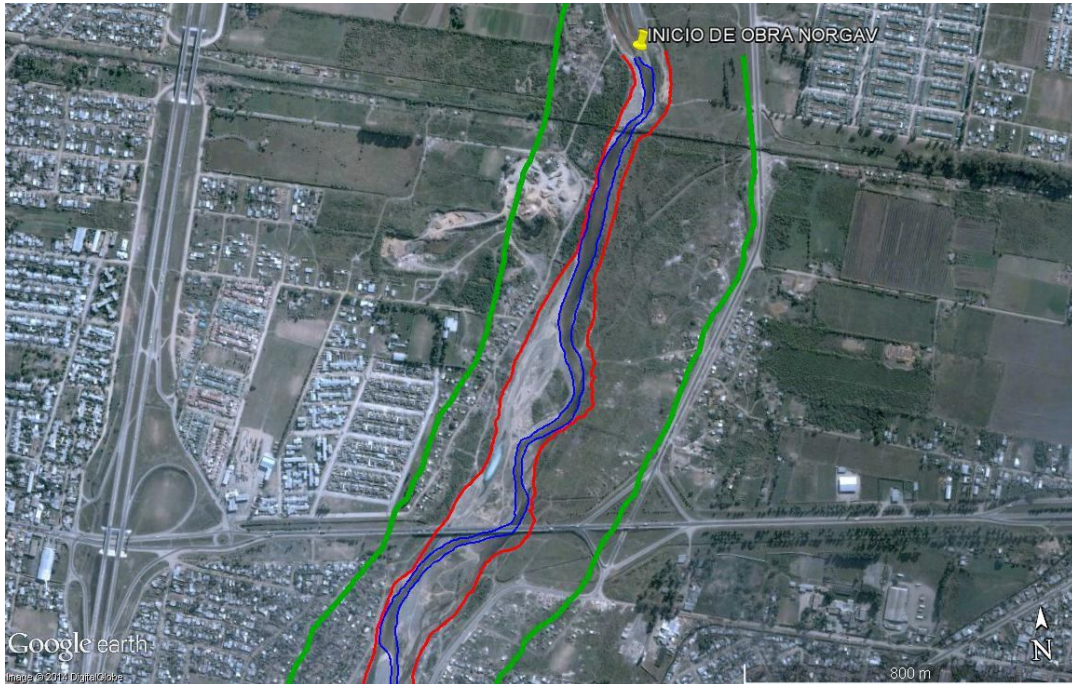
### **7.3 Análisis delineativo de las imágenes**

Las imágenes que se mostraran a continuación es una a continuación de la otra y en todo el desarrollo del estudio, y la finalidad de mostrar por tramos es tener graficas representativas para poder observar con claridad las distintas delimitaciones estudiadas.

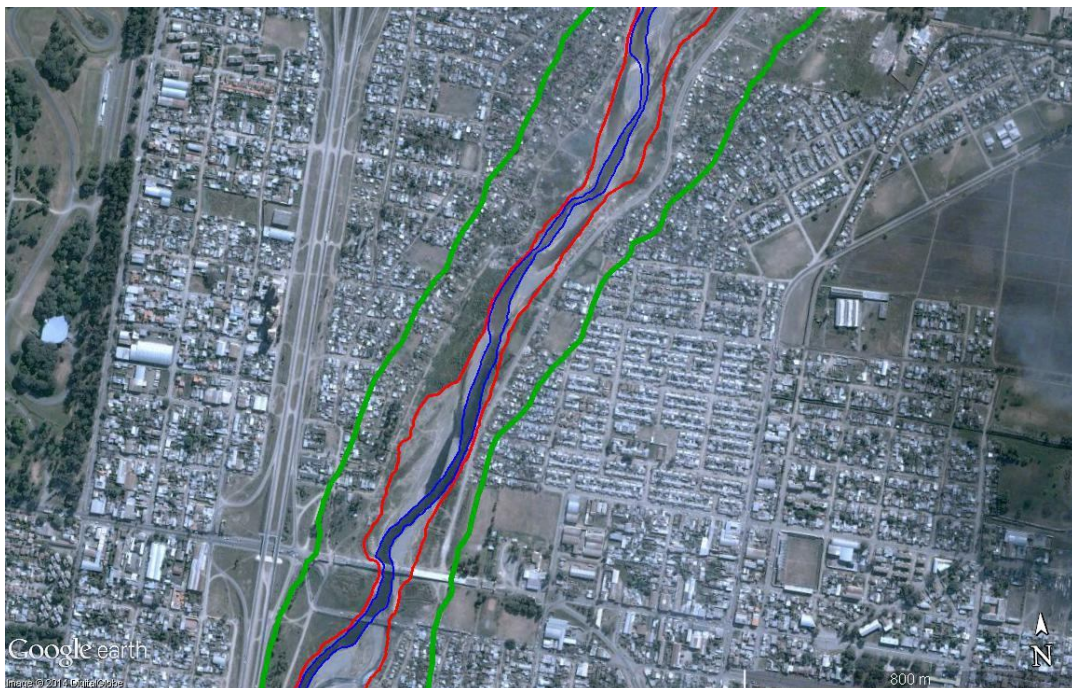
#### 7.3.1 Imágenes 2002

Se indican los códigos de colores para las siguientes imágenes:

- Canal de aguas bajas: Color azul.
- Cauce menor: Color rojo.
- Cauce mayor: Color verde.



*En la figura N° 7.2, Imagen satelital, estado: sin obra, primer tramo.  
Progresivas: 0,00m a 1350 m.*



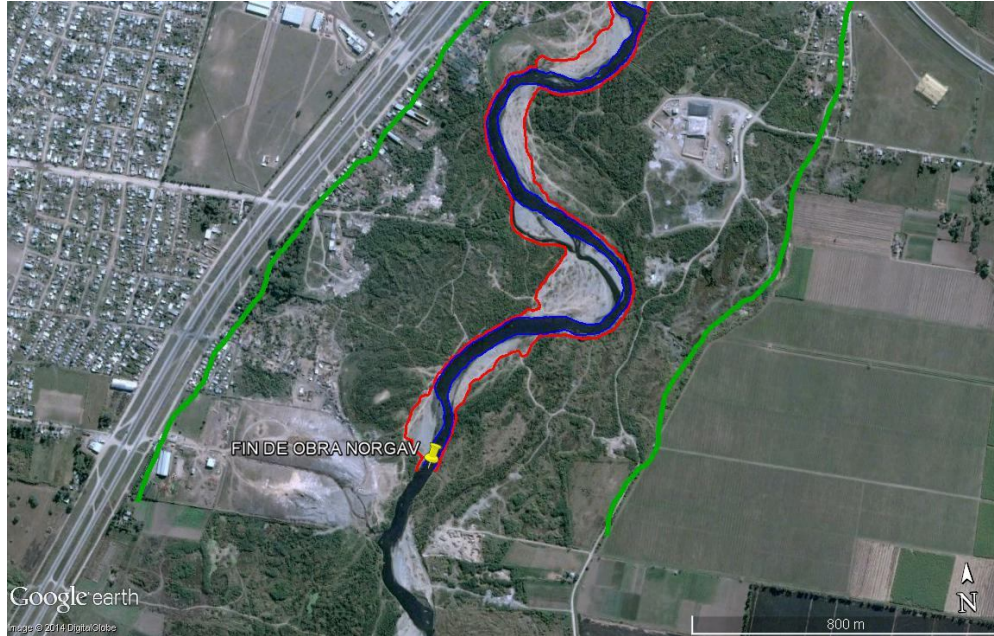
*En la figura N° 7.3, Imagen satelital, estado: sin obra, segundo tramo.  
Progresivas: 1400 m a 2700 m.*



*En la figura N° 7.4, Imagen satelital, estado: sin obra, tercer tramo.  
Progresivas: 2750 m a 4100 m.*



*En la figura N° 7.5, Imagen satelital, estado: sin obra, cuarto tramo.  
Progresivas: 4150 m a 5500 m.*

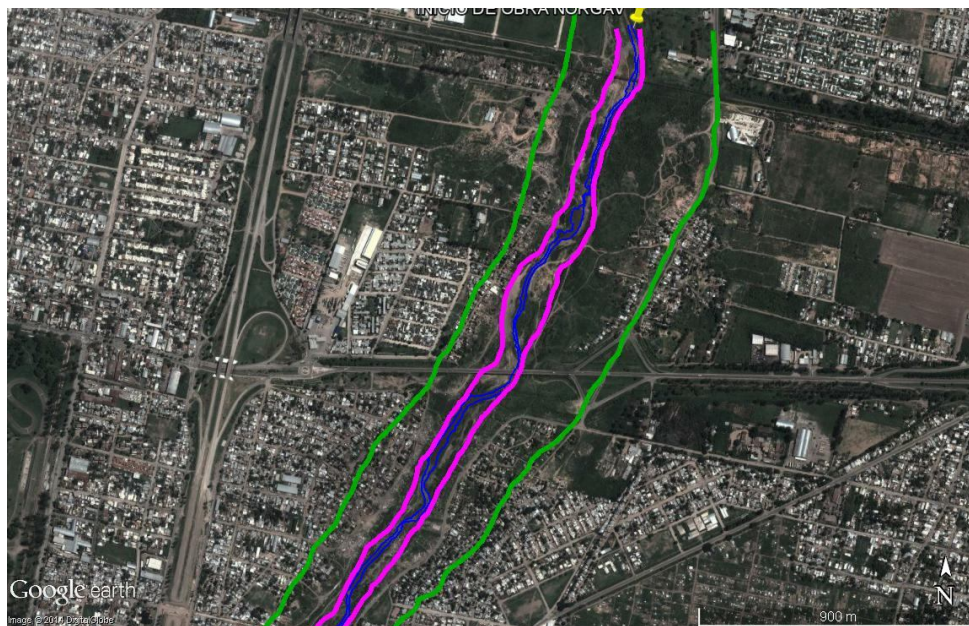


*En la figura N° 7.6, Imagen satelital, estado: sin obra, quinto tramo.  
Progresiva: 5550 m a 6850 m.*

### 7.3.2 Imágenes 2014

Se indican los códigos de colores para las siguientes imágenes:

- Canal de aguas bajas: Color azul.
- Cauce menor: Color magenta.
- Cauce mayor: Color verde.



*En la figura N° 7.7, Imagen satelital, estado: con obra + 5 años posteriores a su conclusión, primer tramo. Progresiva: 0,00 m a 1600 m.*

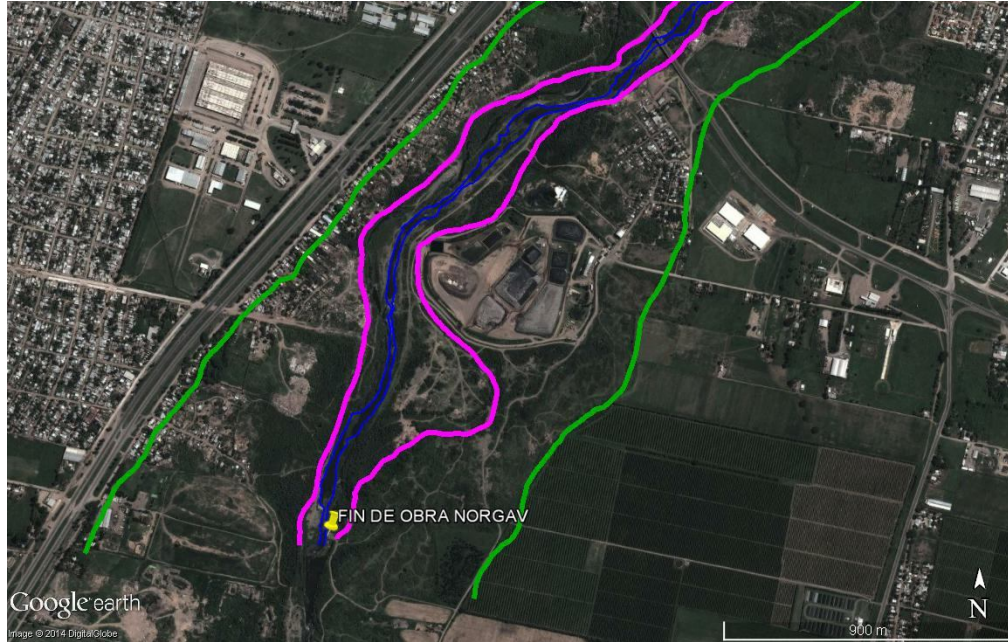


*En la figura N° 7.8, Imagen satelital, estado: con obra + 5 años posteriores a su conclusión, segundo tramo. Progresiva: 1650 m a 3400 m.*



*En la figura N° 7.9, Imagen satelital, estado: con obra + 5 años posteriores a su conclusión, tercer tramo. Progresiva: 3450 m a 5100 m.*





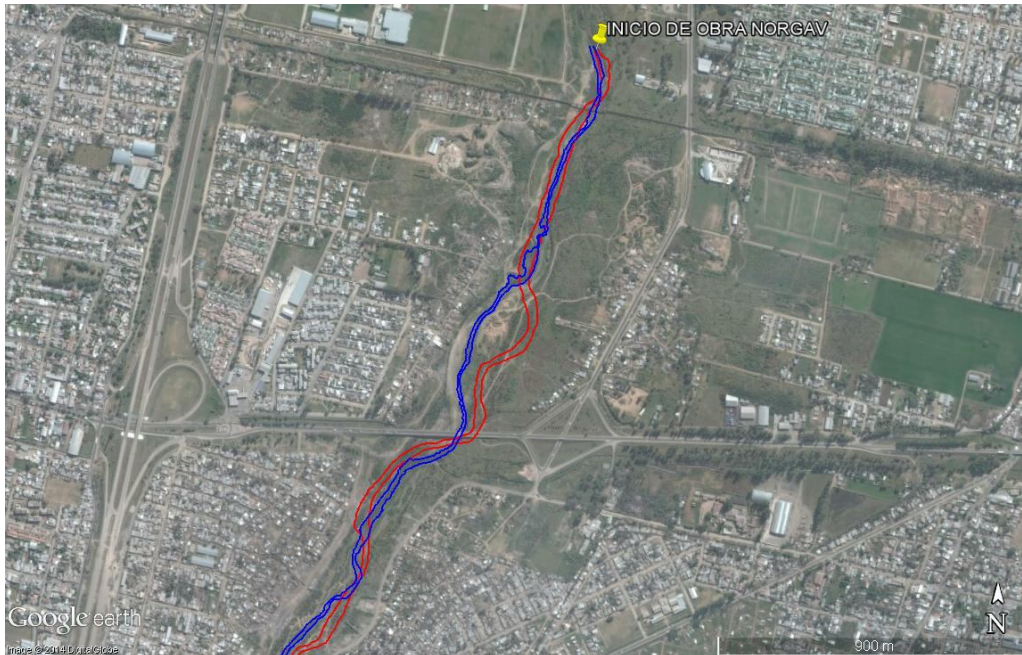
En la figura N° 7.10, Imagen satelital, estado: con obra + 5 años posteriores a su conclusión, cuarto tramo. Progresiva: 5150 m a 6850 m.

### 7.3.3 Comparación del canal de aguas bajas

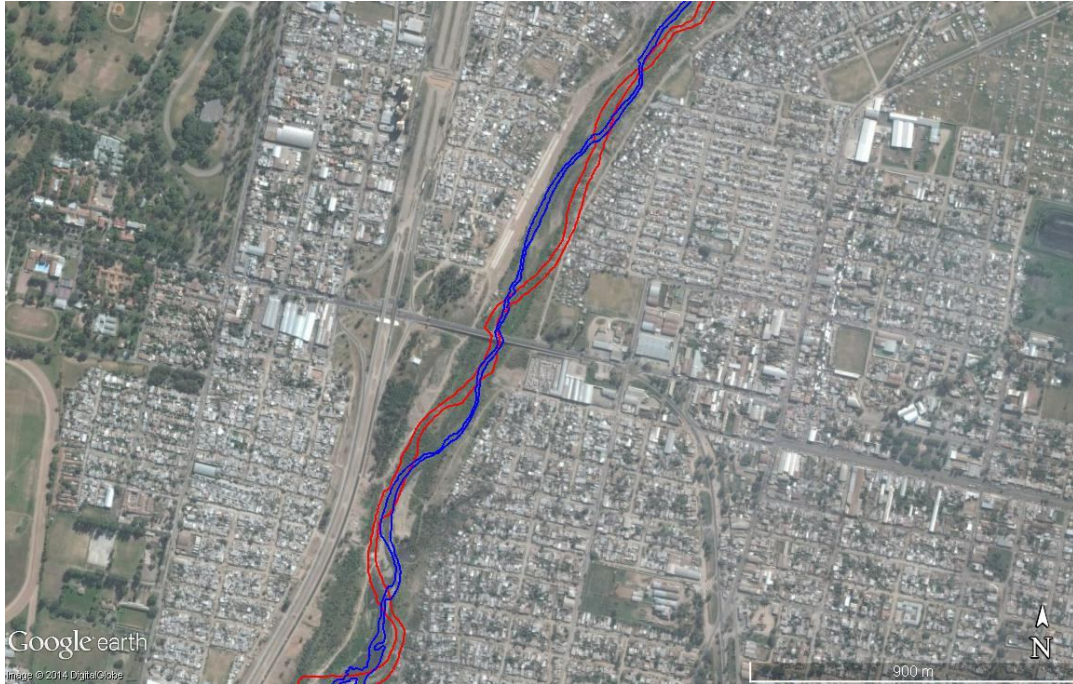
Para poder cotejar se representaron las bermas del “canal de aguas bajas” de los años 2002 y 2014 en la imagen del año 2014.

Líneas en color Azul para el año 2014.

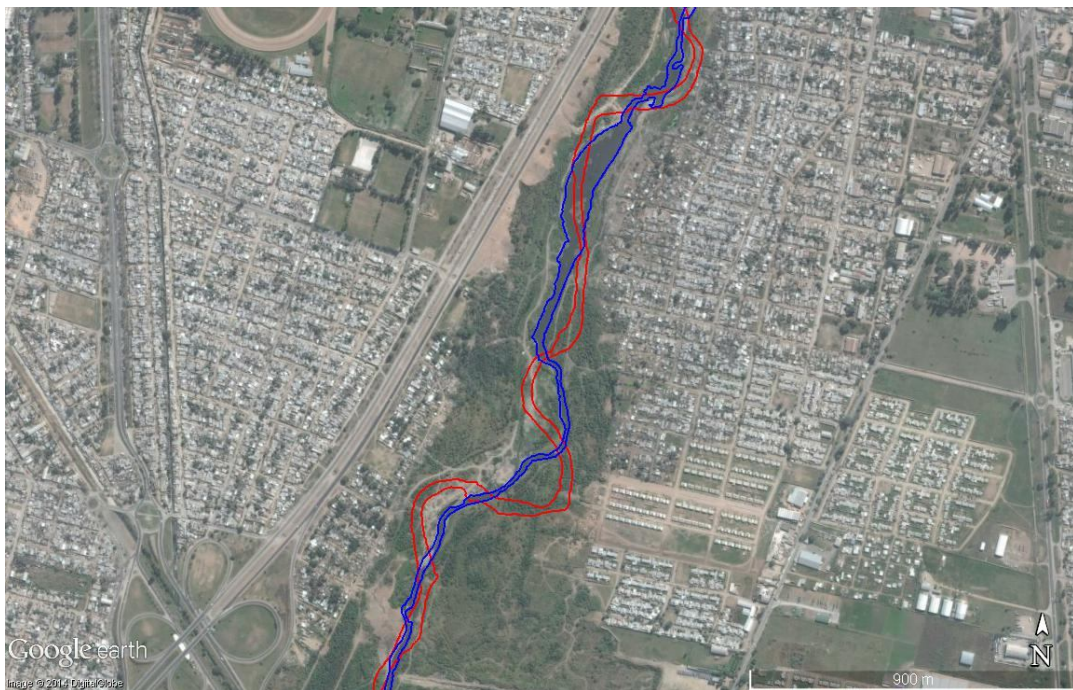
Líneas en color Rojo para el año 2002.



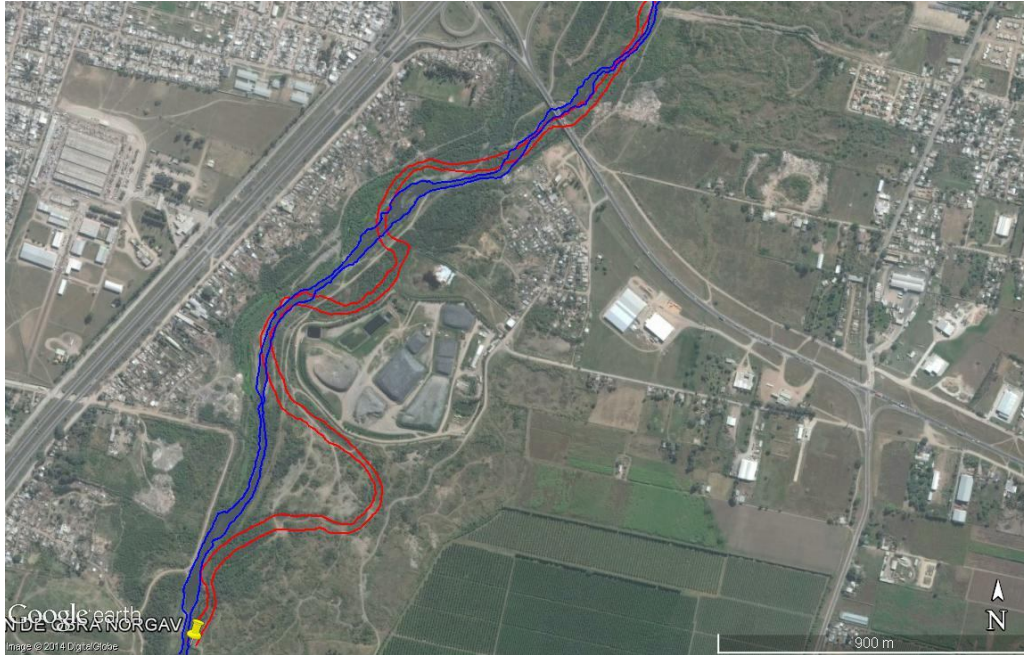
En la figura N° 7.11, Imagen satelital, definición de canal de aguas bajas, en los años 2.002 y 2.014, tramo 01.-



*En la figura N° 7.12, Imagen satelital, definición de canal de aguas bajas, en los años 2.002 y 2.014, tramo 02.-*



*En la figura N° 7.13, Imagen satelital, definición de canal de aguas bajas, en los años 2.002 y 2.014, tramo 03.-*



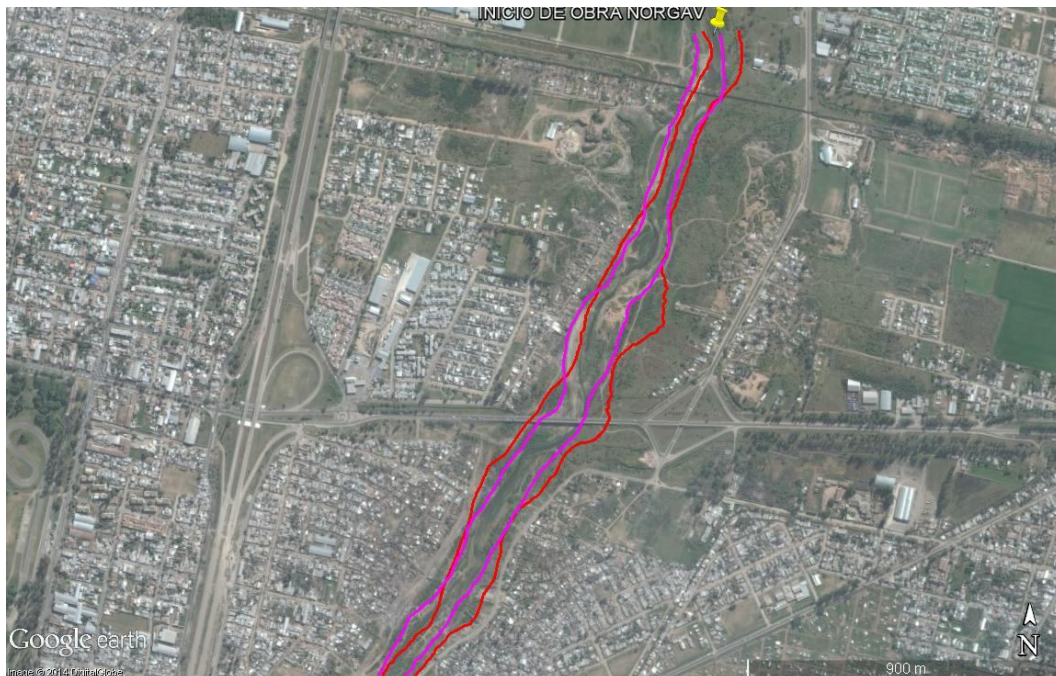
*En la figura N° 7.14, Imagen satelital, definición de canal de aguas bajas, en los años 2.002 y 2.014, tramo 04.-*

### 7.3.4 Comparación del cauce menor

Ahora se representaron las bermas del “cauce menor” del año 2002 y 2014 en la imagen satelital del 2014.

Líneas de color Rojo para el año 2002.

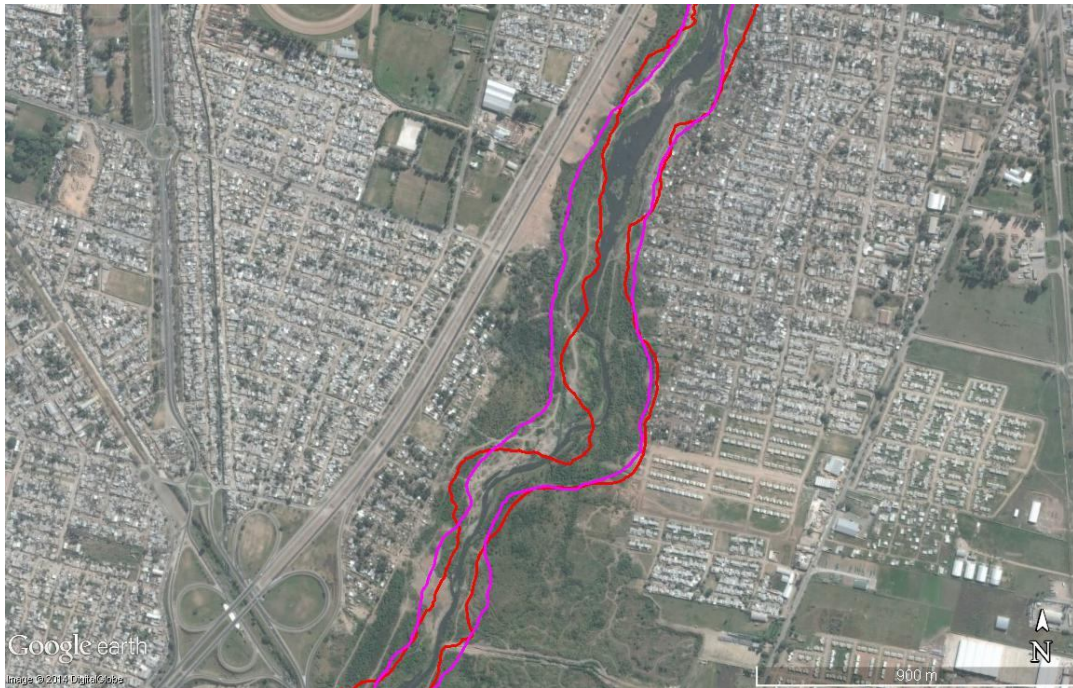
Líneas de color Magenta para el año 2014.



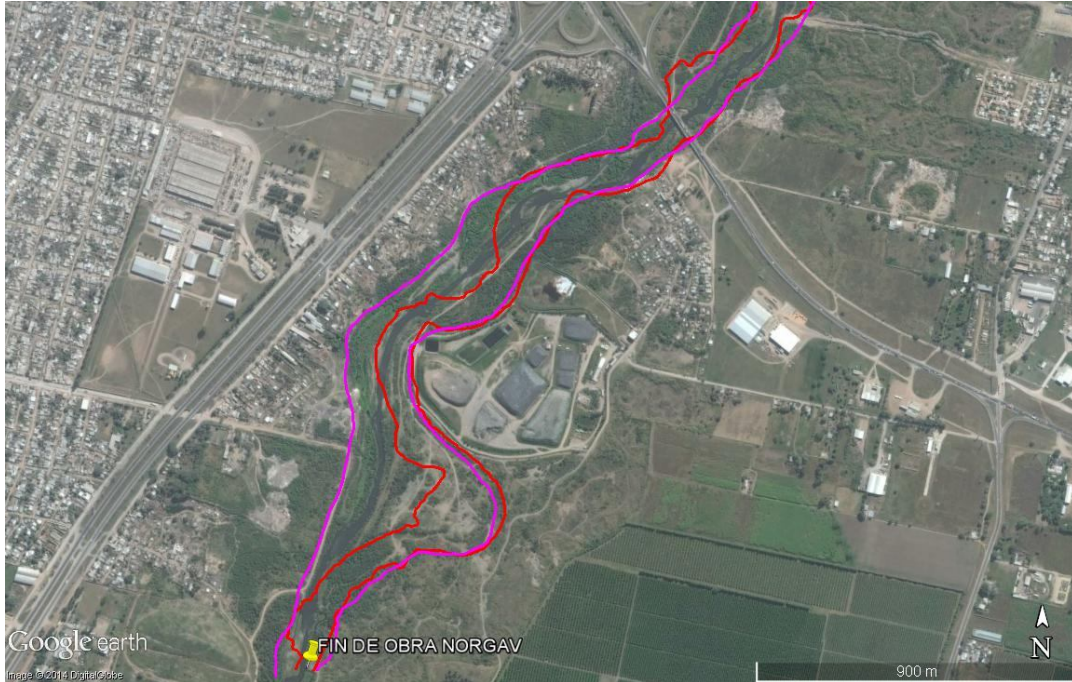
*En la figura N° 7.15, Imagen satelital, definición del cauce menor, en los años 2.002 y 2.014, tramo 01.-*



*En la figura N° 7.16, Imagen satelital, definición del cauce menor, en los años 2.002 y 2.014, tramo 02.-*



*En la figura N° 7.17, Imagen satelital, definición del cauce menor, en los años 2.002 y 2.014, tramo 03.-*



*En la figura N° 7.18, Imagen satelital, definición del cauce menor, en los años 2.002 y 2.014, tramo 04.-*

#### 7.3.5 Observaciones parciales

- De la visualización de las imágenes se puede observar que el “canal de aguas bajas” varió de forma apreciable entre los años 2002 y 2014.
- En lo que respecta al “Cauce Menor” se observan leves variaciones entre los años 2002 y 2014.
- El “Cauce Mayor” no varía significativamente entre los años analizados.

### **7.4 Comparación canal de aguas bajas y proyecto**

Para realizar esta comparación, se llevó a cabo un análisis multi-temporal de imágenes satelitales del 2002, en conjunto con el proyecto y en las mismas imágenes los “canales de aguas bajas” para los años 2002 y 2014.

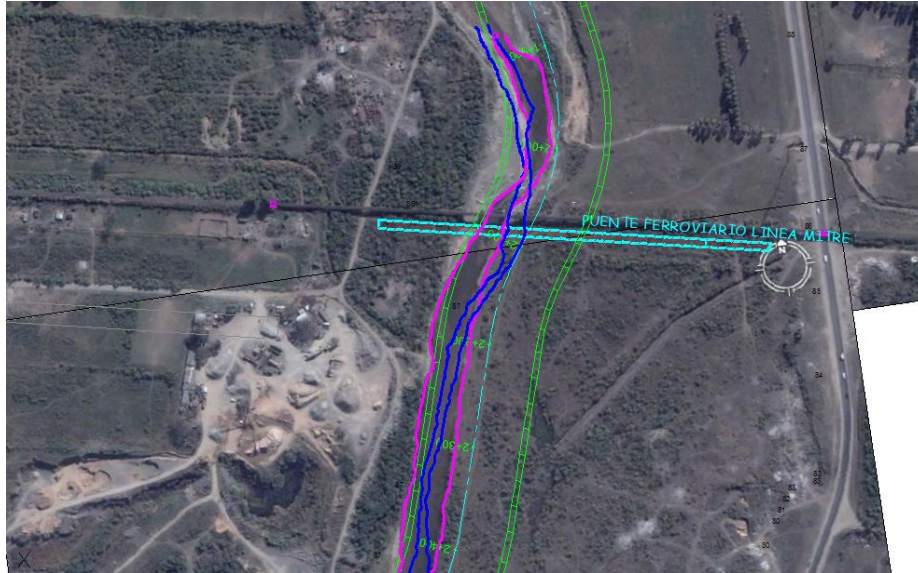
Las imágenes resultantes son las siguientes:

REFERENCIA:

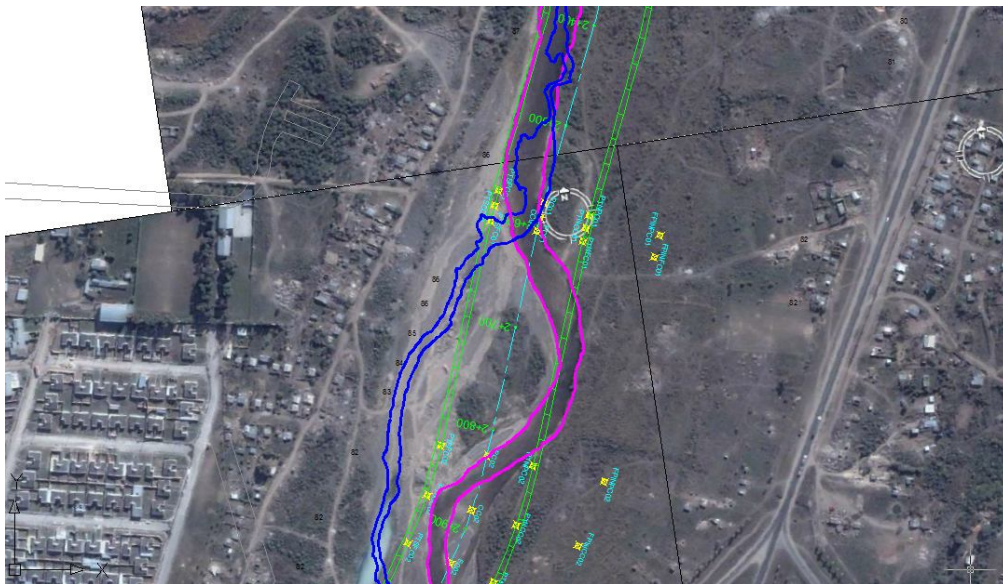
Doble líneas de color Verde para el Proyecto ejecutivo.

Líneas de color Magenta para el Canal de estiaje, según imagen de 2002.

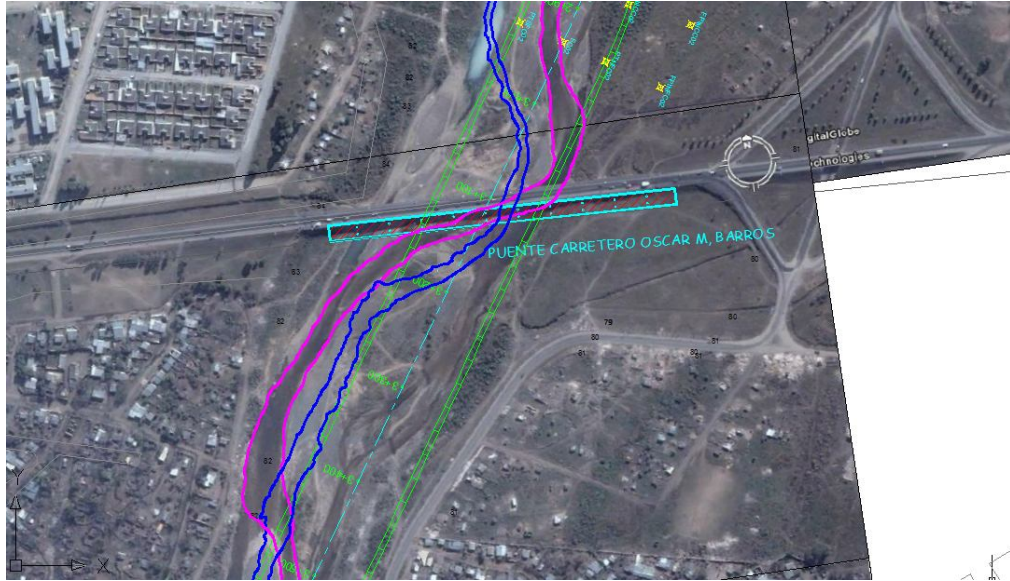
Líneas de color Azul para el Canal de estiaje, según imagen de 2014.



En la figura N° 7.19, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 01.-



En la figura N° 7.20, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 02.-



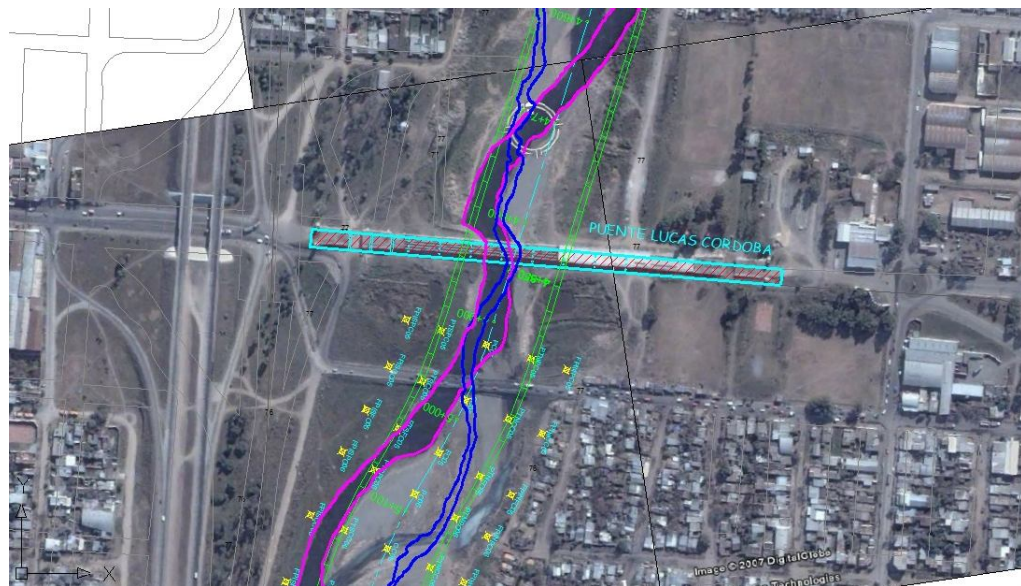
*En la figura N° 7.21, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo n° 03.-*



*En la figura N° 7.22, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 04.-*



En la figura N° 7.23, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 05.-



En la figura N° 7.24, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 06.-

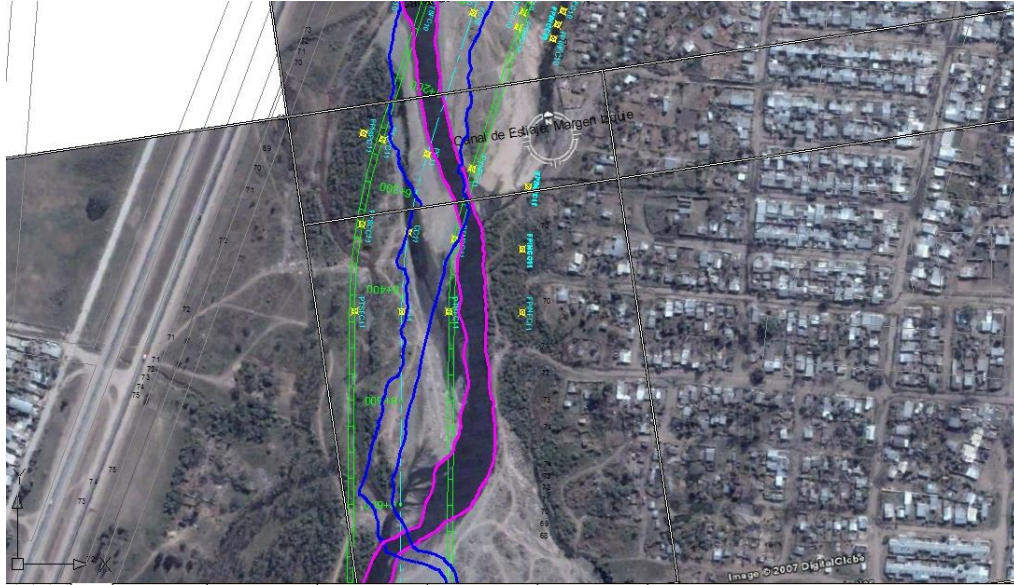




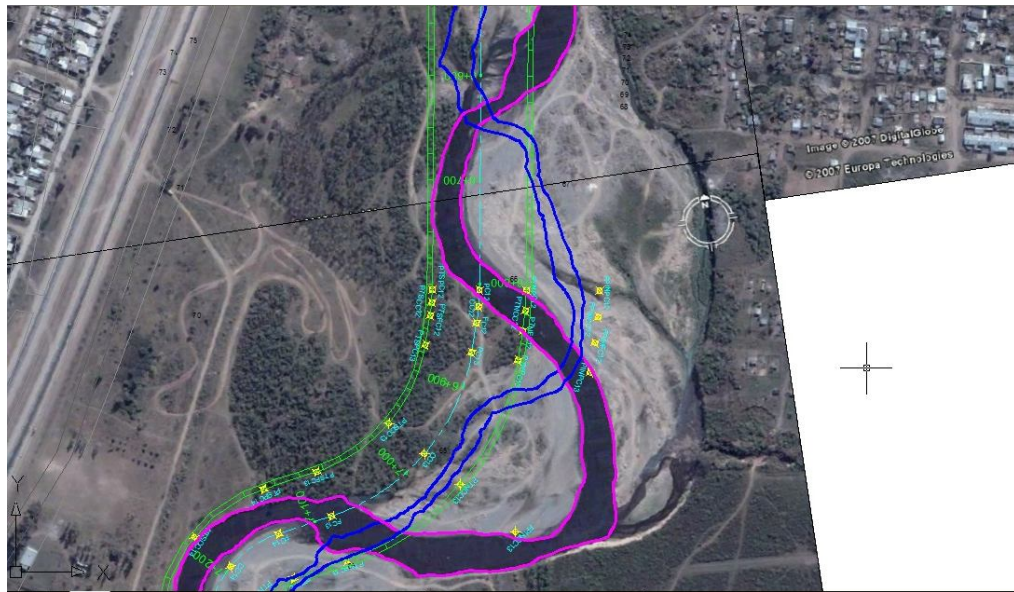
En la figura N° 7.25, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2002, 2014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 07.-



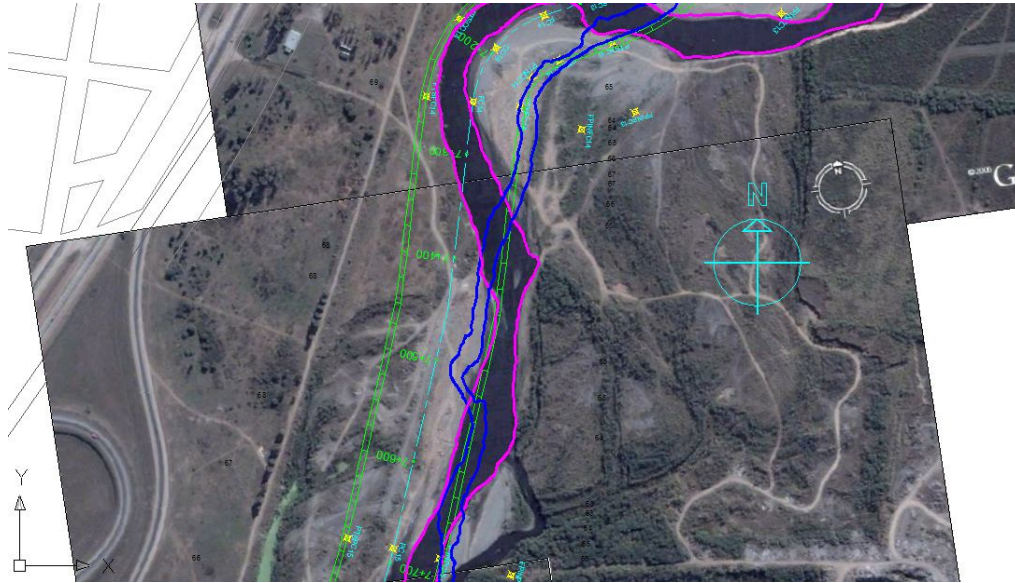
En la figura N° 7.26, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2002, 2014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 08.-



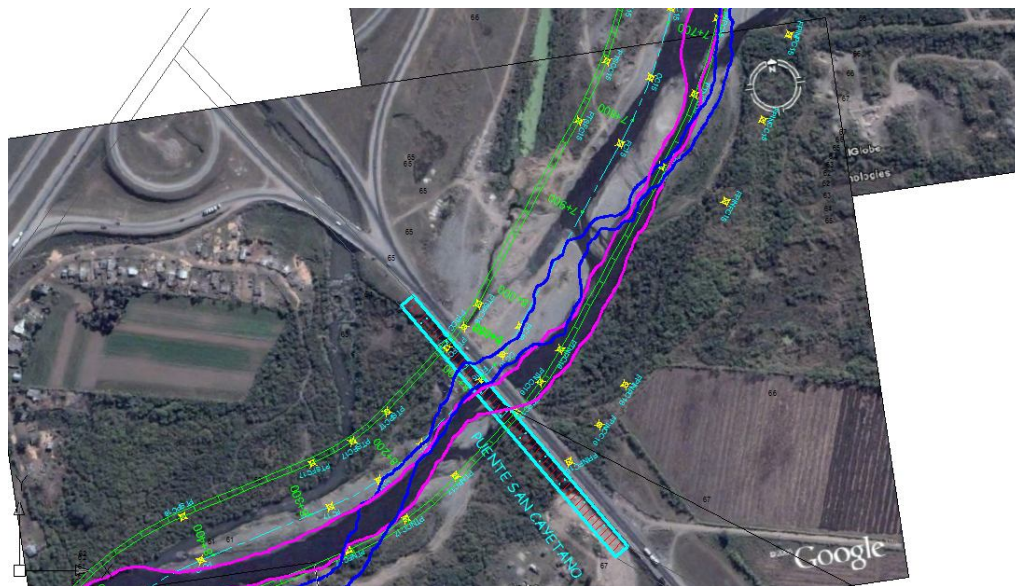
*En la figura N° 7.27, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 09.-*



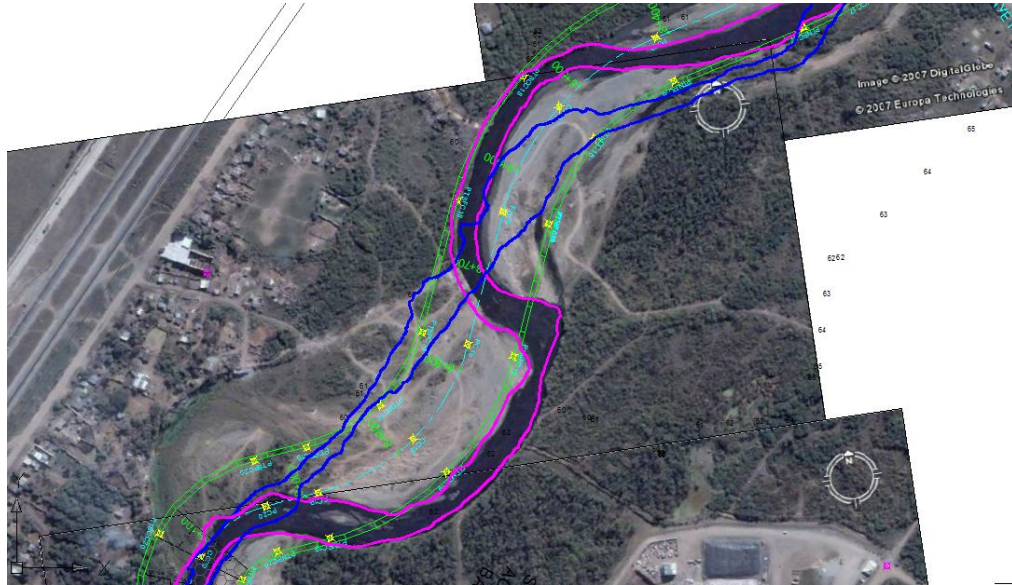
*En la figura N° 7.28, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 10.-*



En la figura N° 7.29, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 11.-



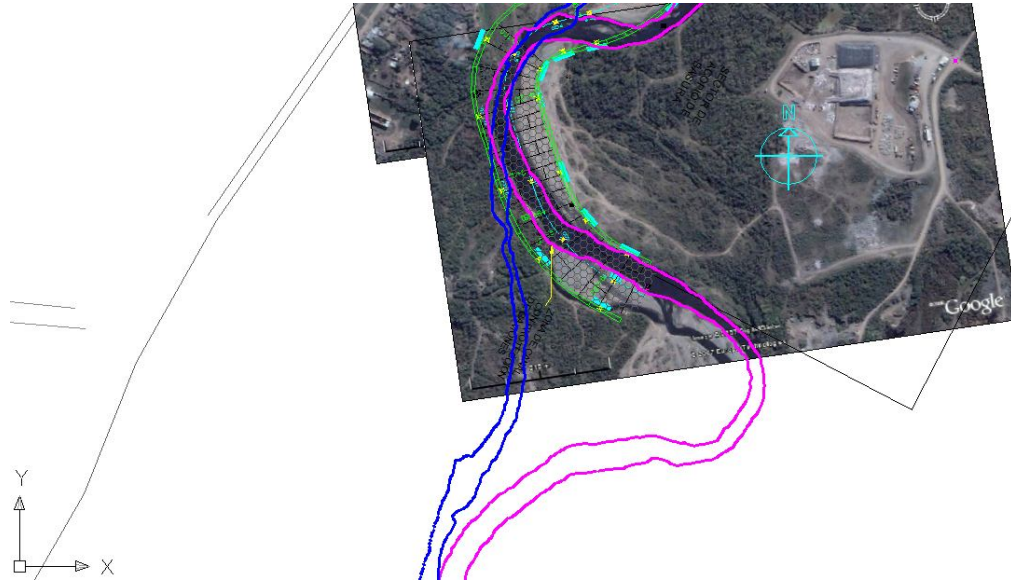
En la figura N° 7.30, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 12.-



En la figura N° 7.31, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 13.-



En la figura N° 7.32, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 14.-



*En la figura N° 7.33, Imagen satelital, definición del canal de estiaje, en los años 2.002, 2.014 y además se presenta el proyecto, tramo N° 15.-*

#### 7.4.1 Observaciones parciales

Aunque no se dispone de imágenes satelitales en fechas inmediatamente posteriores a la conclusión de la obra, se puede concluir que a fecha 2.014 queda vestigio de la obra en sectores de su recorrido.

La acción natural del río actuando en un lapso de tiempo de aproximadamente de 5 años después de concluida la obra produjo la destrucción parcial y estabilización del cauce.

Esto puede observarse en las imágenes donde se comparan los “canales de estiajes de fecha 2.014” y el “proyecto”.

En especial en la última imagen se observa que por aumento de la velocidad provocado por la disminución del “Índice de sinuosidad del cauce”, en el tramo final de la obra el flujo se deflecta en una trayectoria cuasi-rectilínea, eliminando un meandro y las protecciones superficiales planteadas.

Casi el 70% del margen derecho y el 40% del margen Izquierdo del proyecto se encuentran destruidos a fecha del 2.014.

## **CAPITULO 8: Estudio fluvio-morfológico, basado en el concepto de la Balanza de Lane**

### **8.1 Introducción**

Observando lo que se hizo hasta este punto se ve a grueso modo que se estudió teóricamente y comparativamente con el Software HEC RAS; se hizo estudios prácticos de las situaciones mediante el software Google Earth, y en este capítulo se verá cómo afecta la circulación del material sólido en el tramo estudiado y si es representativa estudiar teniendo en cuenta ese parámetro.

Como se expuso en este capítulo se analizará el transporte sólido tomando como base a la conocida y sencilla ecuación de Lane (1.957), [Ref.(13)], en la gráfica 8.1 nos da una visión clara para su interpretación.

Como se vio en los capítulos anteriores donde se evaluaron las velocidades media de circulación cotejada con la velocidad crítica y por otro lado se comparó la tensión de corte en el fondo con la tensión de corte crítica y para complementar el estudio se cotejaron el tirante normal con el tirante de erosión local según expresión de Rosinsky y por otro lado se cotejo la velocidad media de circulación con la velocidad de fondo crítica obtenida por el método de Mirtsjulava. De todas estas situaciones se observó que las secciones eran erosionadas en su mayoría, por lo que el tesista cree necesario completar el estudio con un análisis comparativo del tipo que plantea Lane, donde se tiene en cuenta el traslado de material sólido.

### **8.2 Análisis de la metodología.**

La formulación de Lane (1957) – [Ref.(13)]; establece una relación funcional “cualitativa” entre las variables de control en un río aluvial.

La misma puede escribirse como sigue:

$$Q.S \sim Q_s.d \quad (8.1)$$

Donde el lado izquierdo de la igualdad es “ $Q.S$ ” son las variables “Hidráulica”.

Y el lado derecho de la igualdad es “ $Q_s.d$ ” son las variables “Sedimentológicas” o caudal sólido.

El significado de cada una de las variables, son las siguientes:

Q: Caudal líquido (Gasto Dominante).

S: Pendiente topográfica de la solera del río.

$Q_s$ : Carga de Sedimentos.

$d$ : Tamaño representativo del material de fondo ( $\approx d_{50}$ )

La relación especifica un “balance” entre las variables hidráulicas y sedimentológicas en un río (en realidad, en un tramo de curso fluvial), en una condición de “equilibrio dinámico”.

En virtud de ello, la misma se interpreta a través de la “metáfora de la balanza”.

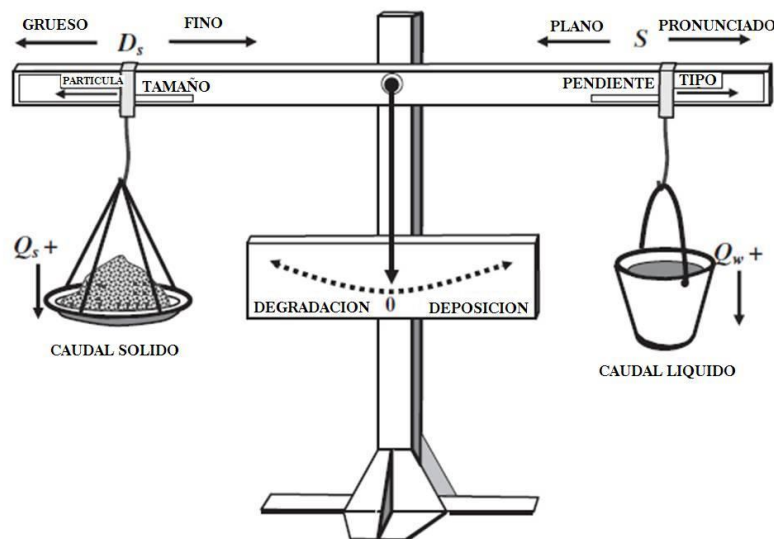


Figura N° 8.1, relación simbólica de la relación de Lane, [Ref.(13)].

Fuente: David Dust, Ellen Whol – 2011 - Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation - Departamento de Geociencia, de la Universidad del estado de Colorado, Fort Collins, CO 80523-1482, USA.

Como se trata de una “relación cualitativa” existen varios enfoques que intentan una “cuantificación” usando los conceptos modernos de la mecánica del transporte de sedimentos y la estabilidad de cauces fluviales.

Por ejemplo, uno de los enfoques se deriva a partir de los fundamentos de la “Teoría del Régimen” (lo realizado por Chang Howard H.) [Ref(15) y Ref(16)], y los estudios asociado a la “Geometría Hidráulica” de cauces fluviales (lo realizado por Julien Pierre Y.) [Ref(17) y Ref(4)].

En efecto, en Geomorfología Fluvial es práctica común aceptar relaciones tipo potenciales (“power-law”), entre las variables involucradas:

O sea de la ecuación original de Lane, se puede obtener lo siguiente:

$$Q.S \sim Q_s.d \rightarrow Q^{K_1}.S^{K_2} = K_0.Q_s^{K_3}.d^{K_4} \quad (8.2)$$

Donde  $K_i$  ( $i = 0,1,2,3,4$ ) son constantes.

A partir de esta expresión:

$$\begin{aligned} S &= \left( K_0.d^{K_4}.Q_s^{K_3}.Q^{-K_1} \right)^{1/K_2} \\ S &= K_0^{1/K_2}.d^{K_4/K_2}.Q_s^{K_3/K_2}.Q^{-K_1/K_2} \\ S &= C_0.d^{C_1}.Q_s^{C_2}.Q^{-C_3} \end{aligned} \quad (8.3)$$

Dónde:  $C_0 = K_0^{1/K_2}$ ;  $C_1 = K_4 / K_2$ ;  $C_2 = K_3 / K_2$ ;  $C_3 = K_1 / K_2$

La expresión (8.3), tiene la estructura de las típicas “ecuaciones de régimen”, donde las variables independiente son (diámetro de la partícula) “d”, (caudal sólido) “ $Q_s$ ” y (caudal líquido) “Q” y como variable dependiente la pendiente “S”.

Escribiendo la concentración volumétrica total del sedimentos  $C_s = \frac{Q_s}{Q}$

Entonces la ecuación (8.3) se transformará en:

$$S = a_0.d^{a_1}.C_s^{a_2}.Q^{-a_3} \quad (8.4)$$

Donde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $-a_3$  son constantes y resultan de la combinación algebraica de las constantes que aparecen en la función fundamental (Ecs. 8.2).

Muchas ecuaciones publicadas en la literatura pueden expresarse en este formato y el mismo puede servir para inferir tendencias evolutivas de ríos (a mediano y largo plazo) alterados en sus condiciones naturales de equilibrio dinámico por acciones antrópicas (por ejemplo encauzamientos, canalizaciones, etc).

A continuación se presenta el análisis del comportamiento fluvio-morfológico del cauce en cuestión, por alteraciones de su geometría natural. Para ello se utilizaron las ecuaciones expuestas en el libro “River Mechanics” de Pierre Y. Julien de Cambridge University Press 2002, [Ref.(4)].

El procedimiento físico-matemático es el siguiente:



- Se estimó el caudal dominante para las secciones y las pendientes en estado Natural, en algunas secciones representativas. Ello se realizó modelando con HEC-RAS, y el valor determinado es de 235 m<sup>3</sup>/s.
- Se determinó lo más exactamente posible el caudal dominante para las secciones y pendientes en estado de Proyecto, para algunas secciones representativas. Para ello se aplicó el modelo HEC-RAS, y el valor determinado es de 465 m<sup>3</sup>/s.
- Se calculó la relación de caudales  $Q_p/Q_n = 1,98$ .
- Se determinó el ancho mojado de las secciones de proyecto, simuladas con el caudal dominante.
- Se determinó el tirante de las secciones de proyecto, simuladas con el caudal dominante.
- Se determinó la pendiente de las secciones de proyecto.
- Se supone que el material de arrastre y suspendido es constante en el estado natural y en el proyecto.
- Se aplicaron las siguientes ecuaciones obtenidas del libro, “River Mechanics”, de Pierre Y, Julien, [Ref.(4)].

- Las ecuaciones fundamentales son las siguientes:

$$h \approx 1.1Q^{0.34} d_s^{0.13} C_{mg/l}^{-0.12}, \quad (8.5a)$$

$$W \approx 12Q^{0.47} d_s^{-0.15} C_{mg/l}^{-0.15}, \quad (8.5b)$$

$$V \approx 0.075Q^{0.19} d_s^{0.02} C_{mg/l}^{0.27}, \quad (8.5c)$$

$$S \approx 4.4 \times 10^{-5} Q^{-0.08} d_s^{0.19} C_{mg/l}^{-0.69}, \quad (8.5d)$$

$$\tau_* \approx 3 \times 10^{-5} Q^{0.26} d_s^{-0.67} C_{mg/l}^{0.57}, \quad (8.5e)$$

- Para un proyecto que cambia de estado se pueden aplicar las siguientes:

De las relaciones (8.5):

$$\frac{h_p}{h_n} \cong \left( \frac{Q_p}{Q_n} \right)^{0.34} = \quad (8.6a)$$

$$\frac{W_p}{W_n} \cong \left( \frac{Q_p}{Q_n} \right)^{0.47} = \quad (8.6b)$$

$$\frac{V_p}{V_n} \cong \left( \frac{Q_p}{Q_n} \right)^{0.19} = \quad (8.6c)$$

$$\frac{S_p}{S_n} \cong \left( \frac{Q_p}{Q_n} \right)^{-0.08} = \quad (8.6d)$$

- Para facilitar la aplicación de estas ecuaciones en cada una de las secciones, se confeccionó una tabla Excel.
- Con la aplicación de estas ecuaciones se determinaron las variaciones de los parámetros estudiados, tales como tirante, ancho, velocidad y pendiente para la nueva situación de equilibrio.
- Estos cambios esperados sólo se pueden utilizar como una primera aproximación.

Con el cálculo hidráulico realizado en el “Estado natural con un caudal de 235 m<sup>3</sup>/s”, con estos datos se calculó cómo evolucionará la geometría de cada una de las secciones con un caudal de proyecto de 465 m<sup>3</sup>/s. Esas geometrías que se obtendrán aplicando el método de Lane se compararon con las características geométricas que se lograron modelando el cauce de proyecto con el caudal de 465 m<sup>3</sup>/s.

Los resultados de la aplicación de la metodología de Lane se pueden ver en el Apéndice en el artículo 4.

### 8.3 Gráficas comparativas entre el Método de Lane y la Situación de Proyecto calculado con el HEC-RAS.

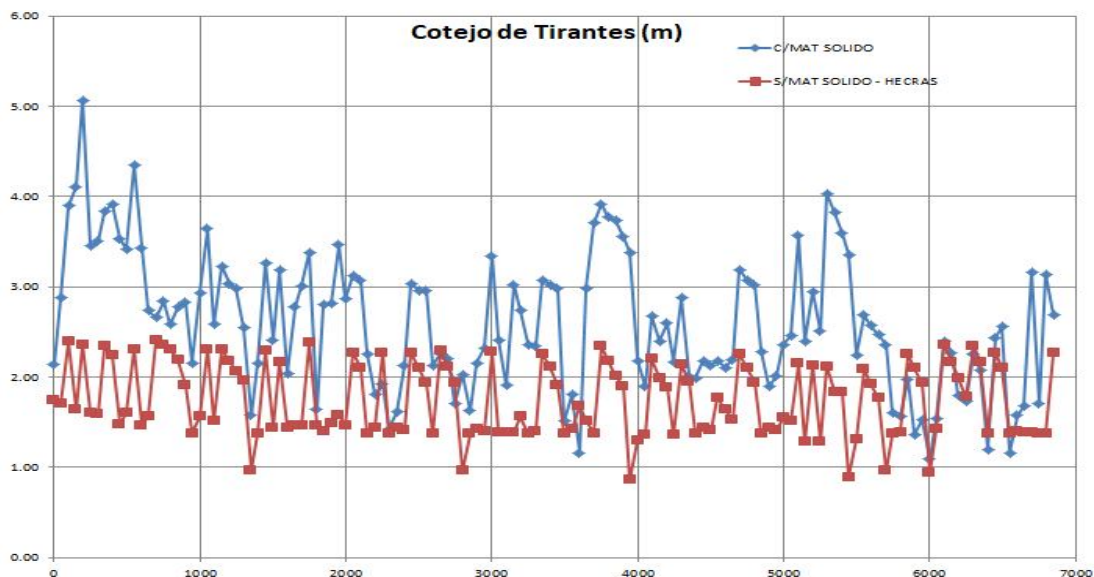


Figura N° 8.2, gráfica de tirante del cauce en función de la progresiva.

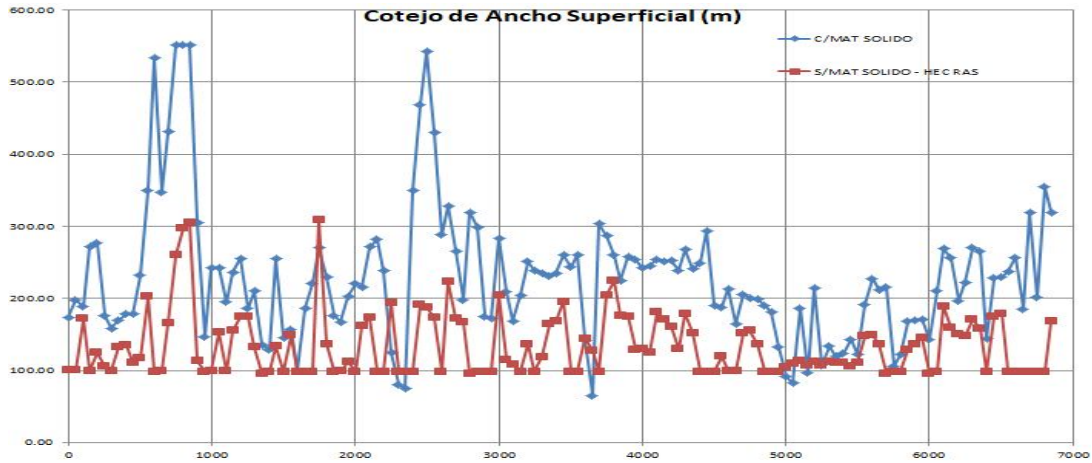


Figura N° 8.3, gráfica de Ancho superficial del cauce en función de la progresiva.

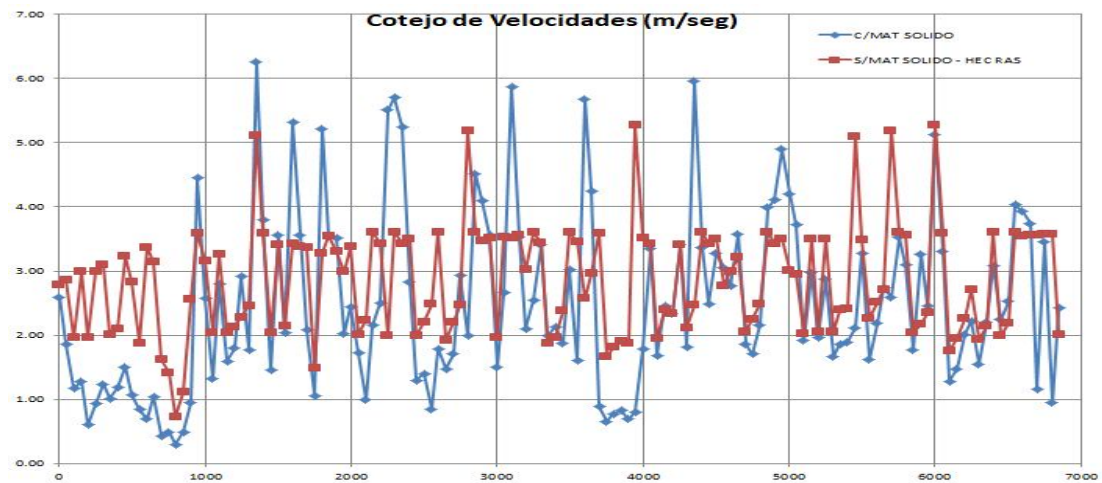


Figura N° 8.4, gráfica de la velocidad media del fluido en función de la progresiva.

## 8.4 Observaciones parciales

El escenario que representan los cálculos de Lane se considera como un estado natural sometido a un caudal que soporta el proyecto.

Como el estado de Lane y Proyecto circulan el mismo caudal de  $465 \text{ m}^3/\text{s}$  se los considera como dos estados comparables.

En las gráficas N° 8.2, 8.3 y 8.4 se muestra la comparación de distintos parámetros hidráulicos entre los dos estados “contemplando material sólido” y “sin contemplar material sólido”, ambos en estado de proyecto y circulando un caudal de  $465 \text{ m}^3/\text{s}$  y se indica cuál de los dos estados genera mayor variación de los parámetros estudiado.

Son 138 secciones analizadas.

Si se analiza el “Tirante” se ve que 125 secciones del método de Lane son mayores que analizando el Proyecto, contra 13 secciones que domina el Proyecto.

Para el caso del “Ancho superficial” se ve que 128 secciones del método de Lane son mayores que analizando el Proyecto, contra 10 secciones que domina el Proyecto.

Para el caso de la “velocidad” se ve que 40 secciones del método de Lane son mayores que analizando el proyecto, contra 98 secciones que domina el Proyecto.

Como se dijo, este método es aproximado y sirve para tener una primera aproximación.

## **8.5 Análisis e interpretación del planteo cualitativo de Chang de la relación de Lane.**

Teoría obtenida del libro “Analytical River Morphology and River Channel Changes”, en dicho libro [Ref.(18)], Chang plantea una “Cuantificación de la Relación de Lane”, dependiendo de las siguientes variables:

Q: caudal líquido.

Qs: caudal sólido.

S: pendiente de la solera del tramo analizado.

d: diámetro representativo de la partícula.

Todas estas variables están interrelacionada con la relación cualitativa de Lane

$$Q.S \sim Q_s.d$$

Chang encuentra las siguientes expresiones, que la considera adecuadas para ciertas condiciones de flujo.

En la región I, la relación grafica está representada por la ecuación:

$$\frac{S}{d^{1/2}} = 5,27 \times 10^{-5} (C_s)^{0,58} Q^{-0,17} \quad (8.7)$$

Donde Q esta en metros cúbicos por segundo y d esta en milímetros.

En la región 3 y 4 la ecuación es:

$$\frac{S}{d^{1/2}} = 7,28 \times 10^{-6} (C_s)^{0,87} \quad (8.8)$$

De la ecuación 8.7 y 8.8 y para Q y d constante, el valor de Qs incrementa con S<sup>1,73</sup> en la región I pero es variable según S<sup>1.15</sup> en la región 3 y 4.

Esta disimilitud se explica por la variación de la geometría del canal, porque en pendientes pronunciadas, el aumento de Qs con S se desacelera (o ralentiza) por el desarrollo cada vez mayor.

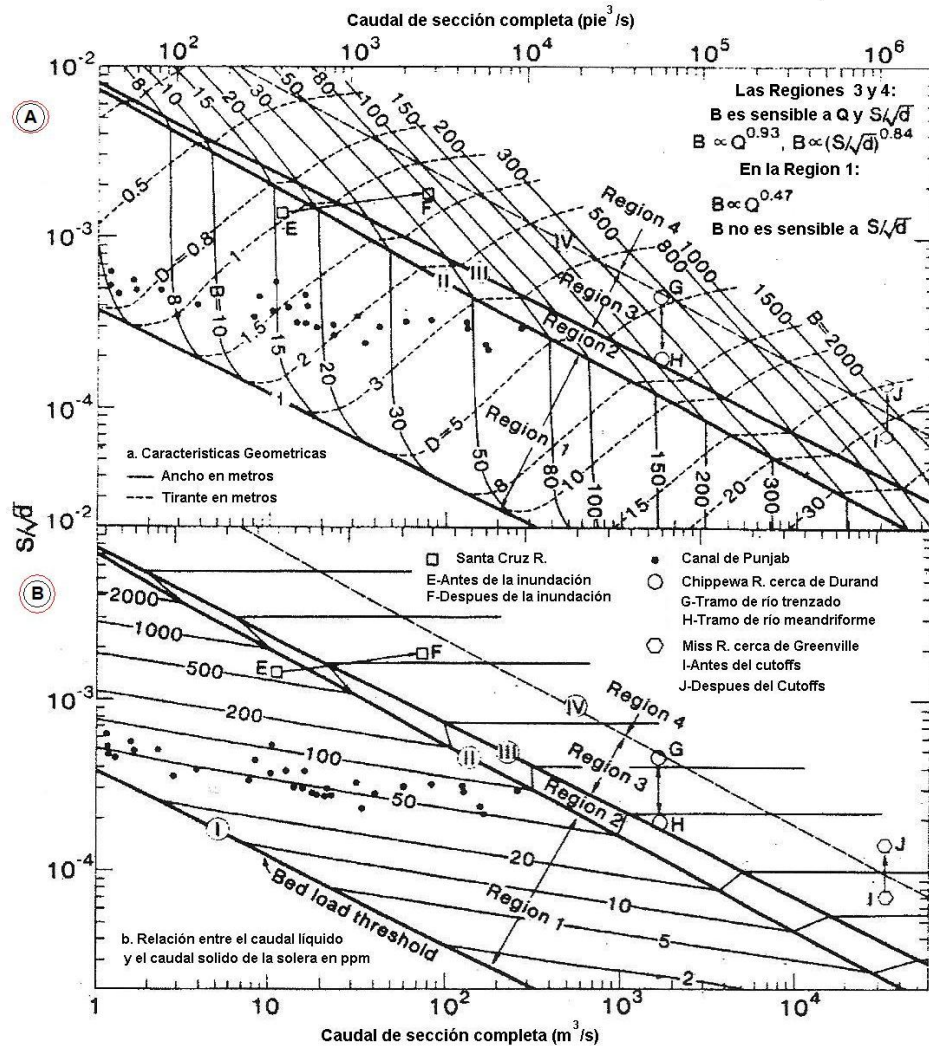
De la relación cuantitativa presentadas en las ecuaciones 8.7 y 8.8 se desprende que las variables involucradas son Q, Qs, S, d, B y D, además Chang define límites, alcances y rangos de cada expresión, todo esto el autor lo vuelca en el gráfico que se muestra a

continuación (Fig 8.5), de este ábaco se pueden determinar ciertas variables dependientes en función de las otras independientes y/o viceversa.

Siendo:

B: ancho superficial en metros.

D: tirante hidráulico en metros.



**Regímenes vinculantes entre el fondo de río de arena con un caso tomado como ejemplo de un cambio de forma de un canal.**

Figura N° 8.5, gráfica propuesta por Chang en función de las ecuaciones propuestas.

Fuente: Analytical River Morphology and River Channel Change, [Ref.(18)].

En la figura N° 8.5 se muestra un ábaco determinado por Chang, donde en la parte superior del gráfico se muestra el sector A, en el mismo se determina las características geométricas del canal estudiado. Esas características son:

B: ancho superficial del canal, en metros.

D: Tirante del río, en metros.

Continuando con el análisis de este sector, se observa que estos parámetros en la Región 1, tales como el ancho superficial (B) es proporcional al caudal líquido (Q)

elevado a una potencia de 0,47 y no depende de la ordenada del gráfico  $S/\sqrt{d}$ . En las

Regiones 3 y 4 el ancho superficial (B) depende del caudal líquido (Q) y de  $S/\sqrt{d}$ .

En la parte inferior del ábaco, se muestra el sector B, en el mismo se determina “el cociente entre el caudal sólido de la solera y el caudal líquido (Qs/Q).

Continuando con el análisis de este sector, se observa que en la Región 1, (Qs/Q)

depende del caudal líquido (Q) y menor valor de  $S/\sqrt{d}$ . En las Regiones 3 y 4, (Qs/Q)

depende solamente de  $S/\sqrt{d}$  y no del caudal líquido (Q).

A partir de la ecuación 8.7 se realiza una reelaboración del diagrama de Chang para cuantificar la relación de Lane.

$Q$	$Cs$ (ppm)	$Cs$	$S/d^{0.5}$
1	10	3,77358E-06	0,006335838
10	10	3,77358E-06	0,004283552
100	10	3,77358E-06	0,002896037
1000	10	3,77358E-06	0,001957961
10000	10	3,77358E-06	0,001323744
1	50	1,88679E-05	0,016114122
10	50	1,88679E-05	0,010894483
100	50	1,88679E-05	0,007365575
1000	50	1,88679E-05	0,00497974
10000	50	1,88679E-05	0,003366717
1	100	3,77358E-05	0,024088183
10	100	3,77358E-05	0,01628561
100	100	3,77358E-05	0,011010424
1000	100	3,77358E-05	0,00744396
10000	100	3,77358E-05	0,005032735
1	500	0,000188679	0,061264182
10	500	0,000188679	0,041419671
100	500	0,000188679	0,028003134
1000	500	0,000188679	0,018932442
10000	500	0,000188679	0,012799902
1	1000	0,000377358	0,091580717
10	1000	0,000377358	0,061916163
100	1000	0,000377358	0,041860464
1000	1000	0,000377358	0,028301147
10000	1000	0,000377358	0,019133924

Tabla N° 8.1: Tabla de valores obtenidos, según ecuación 8.7.

Graficando los valores obtenidos, logramos la siguiente gráfica.

Cs: Unidades (forma volumétrica adimensional).

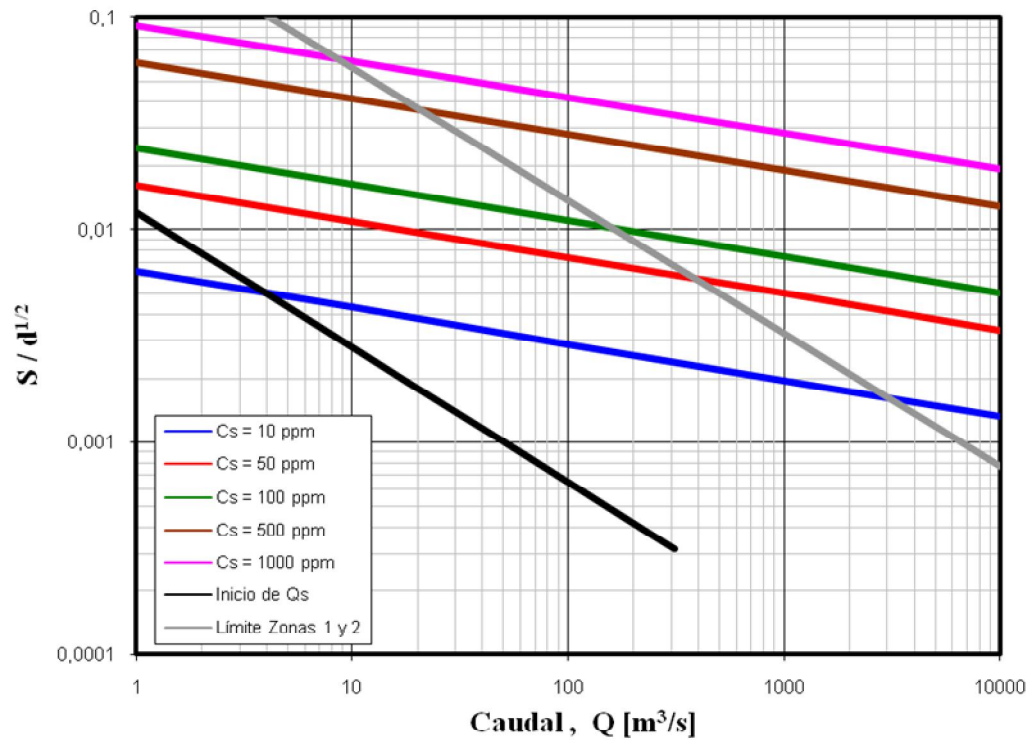


Figura N° 8.6, gráfica de  $S/d^{1/2}$  Vs  $Q$  y en función del  $C_s$ , según ecuación 8.5 de Chang.

Para ampliar la investigación de lo realizado se hace una recopilación de las expresiones que vincula cualitativamente la relación de Lane, este resumen se lo obtiene del paper realizado por el Ing. Héctor Daniel Farías, llamado “Formulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales”, [Ref.(8)], logrando los siguientes resúmenes de ecuaciones:

Las ecuaciones de régimen obtenidas por el Ing. Farías son las siguientes:

Tabla 1. Fórmulas obtenidas para el diseño de canales aluviales en régimen.

Código	Proceso	Autor	Ecuaciones Usadas	Ecuaciones de Régimen
BBC	Fricción	Brownlie	$V = 13.29 d^{-0.029} R^{0.529} S^{0.389}$	$P = 2.70 d^{0.033} C_s^{-0.080} Q^{0.514}$
	Transporte	Brownlie	$q_b = 1.535 \times 10^{-4} d^{-0.759} V^{3.774} R^{0.632} S^{0.758}$	$R = 0.049 d^{-0.140} C_s^{-0.102} Q^{0.375}$
	Estabilidad Lat.	Chitale	$P = 6.592 d^{0.115} Q^{0.414} R^{0.209} S^{-0.097}$	$S = 14.645 d^{0.541} C_s^{0.605} Q^{-0.224}$
KKM	Fricción	Karim-Kennedy	$V = 18.19 d^{-0.103} R^{0.603} S^{0.497}$	$P = 0.664 d^{-0.066} C_s^{-0.120} Q^{0.562}$
	Transporte	Karim-Kennedy	$q_b = 9.74 \times 10^{-5} d^{-0.682} V^{3.334} R^{0.623} S^{0.625}$	$R = 0.089 d^{-0.066} C_s^{-0.120} Q^{0.333}$
	Estabilidad Lat.	Mao-Flook (Farias)	$P = 7.42 Q^{0.229} R$	$S = 16.04 d^{0.555} C_s^{0.630} Q^{-0.192}$
PLG	Fricción	Pavlovsky-Lacey	$V = 17.81 d^{-0.133} R^{0.736} S^{0.515}$	$P = 0.710 d^{-0.089} C_s^{-0.115} Q^{0.519}$
	Transporte	Levi (Modif.)	$q_b = 4.88 \times 10^{-7} d^{-0.774} V^{5.495} R^{-0.449}$	$R = 0.112 d^{-0.063} C_s^{-0.081} Q^{0.363}$
	Estabilidad Lat.	Glushkov (Modif.)	$P = 16.12 R^{1.428}$	$S = 11.498 d^{0.643} C_s^{0.497} Q^{-0.292}$

Tabla N° 8.2: Tabla resumen de ecuaciones, obtenido de [Ref.(08)].

De esta tabla solo voy a utilizar las siguientes ecuaciones de Régimen:

$$\text{BBC} \rightarrow S = 14,645.d^{0.541}.C_s^{0.605}.Q^{-0.224}$$

$$\text{KKM} \rightarrow S = 16,04.d^{0.555}.C_s^{0.630}.Q^{-0.192}$$

$$\text{PLG} \rightarrow S = 11,498.d^{0.643}.C_s^{0.497}.Q^{-0.292}$$

$$\text{CHANG} \rightarrow S = 8,85713414.d^{0.50}.C_s^{0.58}.Q^{-0.17}$$

$$\text{JULIEN} \rightarrow S = 1,2.d^{0.19}.C_s^{0.69}.Q^{-0.08}$$

$$\text{PONCE} \rightarrow S = 4,51822754.d^{1/3}.C_s.R^{-1/3}, \quad [\text{Ref.}(19)].$$

Las unidades de las ecuaciones son las siguientes:

- d en metros.
- Cs en forma volumétrica adimensional.
- Q en metro cubico por segundo.

Realizando un análisis similar al planteado anteriormente, donde se realiza un análisis cualitativo con valores constantes, para cada ecuación se va a obtener las siguientes gráficas:

Diagrama Alternativo (al de Chang) para cuantificar la Relación de Lane con expresión BBC.

Q	Cs (ppm)	Cs	S/d <sup>0.541</sup>
1	10	3,77E-06	0,007667
10	10	3,77E-06	0,00457747
100	10	3,77E-06	0,00273291
1000	10	3,77E-06	0,00163164



$Q$	$C_s$ (ppm)	$C_s$	$S/d^{0.541}$
10000	10	3,77E-06	0,00097415
1	50	1,89E-05	0,0203003
10	50	1,89E-05	0,01212
100	50	1,89E-05	0,00723607
1000	50	1,89E-05	0,00432019
10000	50	1,89E-05	0,0025793
1	100	3,77E-05	0,03087633
10	100	3,77E-05	0,01843426
100	100	3,77E-05	0,0110059
1000	100	3,77E-05	0,00657091
10000	100	3,77E-05	0,00392307
1	500	0,00018868	0,08175277
10	500	0,00018868	0,04880929
100	500	0,00018868	0,02914087
1000	500	0,00018868	0,01739813
10000	500	0,00018868	0,0103873
1	1000	0,00037736	0,12434423
10	1000	0,00037736	0,07423789
100	1000	0,00037736	0,04432264
1000	1000	0,00037736	0,02646218
10000	1000	0,00037736	0,01579886

Tabla N° 8.3: Tabla de valores obtenidos, según las ecuaciones BBC.

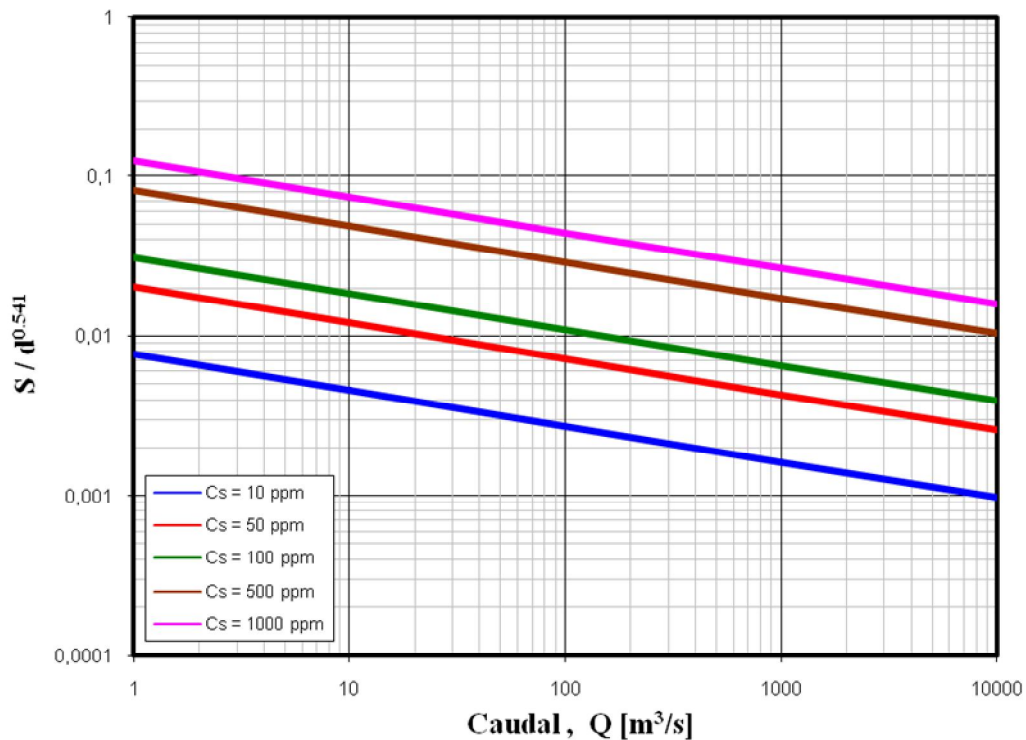


Figura N° 8.7, gráfica de  $S/d^{0.541}$  Vs  $Q$  y en función del  $C_s$ , según las expresiones de BBC.

Diagrama alternativo (al de Chang) para cuantificar la relación de Lane con la expresión KKM.

$Q$	$C_s$ (ppm)	$C_s$	$S/d^{0.555}$
1	10	3,77358E-06	0,00614553
10	10	3,77358E-06	0,00394966
100	10	3,77358E-06	0,0025384
1000	10	3,77358E-06	0,0016314
10000	10	3,77358E-06	0,00104848
1	50	1,88679E-05	0,01693989
10	50	1,88679E-05	0,01088706
100	50	1,88679E-05	0,00699698
1000	50	1,88679E-05	0,00449687
10000	50	1,88679E-05	0,00289008
1	100	3,77358E-05	0,02621558
10	100	3,77358E-05	0,01684843
100	100	3,77358E-05	0,01082828
1000	100	3,77358E-05	0,0069592
10000	100	3,77358E-05	0,00447259
1	500	0,000188679	0,0722621
10	500	0,000188679	0,04644196
100	500	0,000188679	0,02984768
1000	500	0,000188679	0,01918274
10000	500	0,000188679	0,01232851
1	1000	0,000377358	0,11183029
10	1000	0,000377358	0,07187196
100	1000	0,000377358	0,04619122
1000	1000	0,000377358	0,02968653
10000	1000	0,000377358	0,01907917

Tabla N° 8.4: Tabla de valores obtenidos, según las ecuaciones KKM.

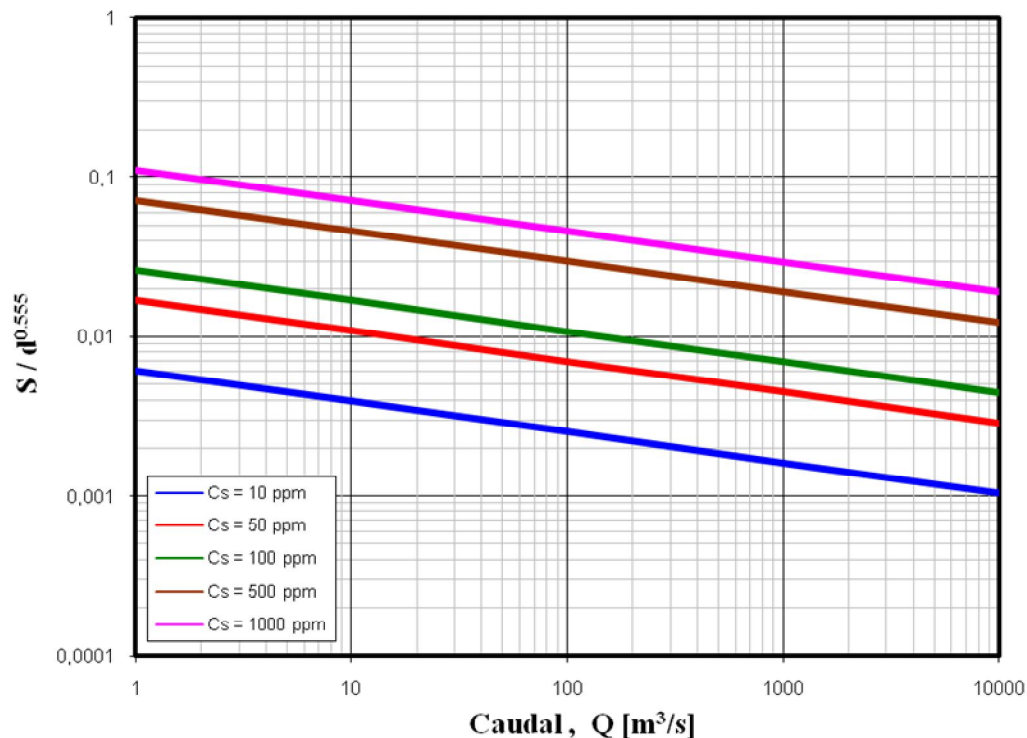


Figura N° 8.8, gráfica de  $S/d^{0.555}$  Vs  $Q$  y en función del  $C_s$ , según las expresiones de KKM.

Diagrama Alternativo (al de Chang) para cuantificar la Relación de Lane con la expresión PLG.

$Q$	$C_s$ (ppm)	$C_s$	$S/d^{0.643}$
1	10	3,77E-06	0,02318831
10	10	3,77E-06	0,01183775
100	10	3,77E-06	0,00604323
1000	10	3,77E-06	0,0030851
10000	10	3,77E-06	0,00157496
1	50	1,89E-05	0,05160089
10	50	1,89E-05	0,02634251
100	50	1,89E-05	0,01344798
1000	50	1,89E-05	0,00686526
10000	50	1,89E-05	0,00350475
1	100	3,77E-05	0,07282309
10	100	3,77E-05	0,03717655
100	100	3,77E-05	0,01897882
1000	100	3,77E-05	0,00968878
10000	100	3,77E-05	0,00494617

$Q$	$C_s$ (ppm)	$C_s$	$S/d^{0.643}$
1	500	0,00018868	0,16205305
10	500	0,00018868	0,08272889
100	500	0,00018868	0,04223351
1000	500	0,00018868	0,02156042
10000	500	0,00018868	0,0110067
1	1000	0,00037736	0,22870155
10	1000	0,00037736	0,11675328
100	1000	0,00037736	0,05960314
1000	1000	0,00037736	0,0304277
10000	1000	0,00037736	0,01553349

Tabla N° 8.5: Tabla de valores obtenidos, según las ecuaciones PLG.

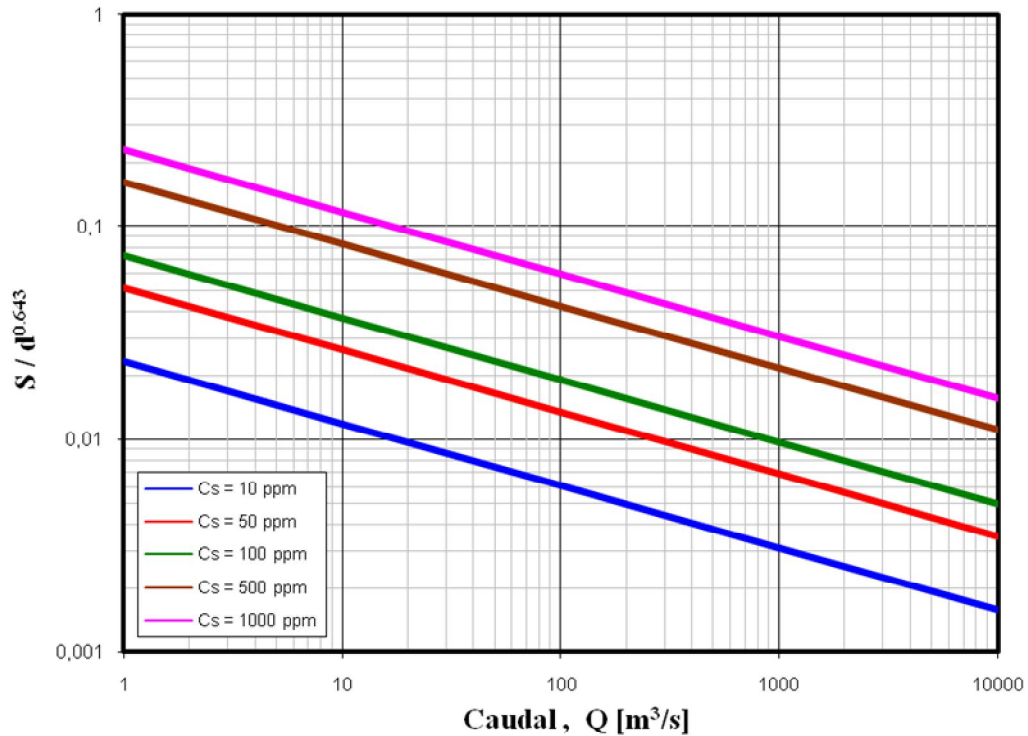


Figura N° 8.9, gráfica de  $S/d^{0.643}$  Vs  $Q$  y en función del  $C_s$ , según las expresiones de PLG.-

De las expresiones analizadas, y de las gráficas obtenidas se puede concluir que las ecuaciones son similares, la diferencia está en las características intrínsecas de cada río que se analiza.

O sea de la ecuación original de Lane, se puede obtener lo siguiente:

$$Q.S \sim Q_s.d \rightarrow Q^{K_1}.S^{K_2} = K_0.Q_s^{K_3}.d^{K_4}$$

Donde  $K_i$  ( $i = 0,1,2,3,4$ ) son constantes.

De este estudio se puede concluir que los valores  $K_i$  van a variar según el tipo de río que se analice, debiendo calibrar cada uno de estos valores en el modelo matemático a analizar.

### 8.5.1 ANALISIS NUMERICO DE LAS ECUACIONES

Para poder cuantificar las ecuaciones propuestas es que el Tesista propone dos ejemplos numéricos para poder determinar los valores y poder cotejar los mismos.

#### Verificación

Las unidades puestas en cada variable son las que entran en las ecuaciones indicadas.

#### *Ejemplo 01*

Datos

$$Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 0,0003 \text{ m}$$

$$C_s = 3,77358\text{E-}05$$

#### *Ejemplo 02*

Datos

$$Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 0,0003 \text{ m}$$

$$C_s = 7,54717\text{E-}05$$

Los valores resultantes son:

MÉTODO	Valor de S			
	Ejemplo 01		Ejemplo 02	
		Desv (%)		Desv (%)
<b>CHANG s/ecuac.</b>	0.00028208	24	0.00034983	54
<b>CHANG s/graf.</b>	0.00027386	21	0.00035602	57
<b>BBC</b>	0.00022895	1	0.00027227	20
<b>KKM</b>	0.00018679	-18	0.0002341	3
<b>PLG</b>	0.00020186	-11	0.0002067	-9
<b>JULIEN</b>	0.00018958	-17	0.00028011	23
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.0002272</b>		<b>0.0002832</b>	

Tabla N° 8.6: Tabla resumen del valor S (pendiente de la superficie libre del flujo).

## 8.6 CONCLUSIONES DE LA UNIDAD

De la recopilaciones de ecuaciones estudiadas en este capítulo me pareció muy importantes los resultados logrados por las ecuaciones dadas por Julien 2002, [Ref.(4)], en la mismas Julien coteja entre el estado natural del río y el del proyecto, determinando parámetros como tirantes, ancho superficial, velocidades, etc. Con la presente metodología, considerando el transporte de sólidos en el cuerpo del fluido obtenemos que los tirantes y los anchos superficiales son superiores al calculado con el software Hec Ras (sin considerar caudal sólido), esto nos dará una mayor área de inundación, consideración no despreciable para los fines de cálculo y dimensionado de obras.

Por otro lado también se determinó la velocidad de circulación considerando caudal sólido y sin considerar material sólido y se concluye que por incremento de la sección el flujo produce que la velocidad disminuya.

Posterior a este análisis y tomando como base lo propuesto por Julien y otros investigadores se realizó una recopilación de ecuaciones del mismo estilo,  $S=f(d,C_s,Q)$  y se determinó que las mismas dan en el mismo orden obteniendo como error máximo de 57% (desviación del valor calculado con el valor promedio), con la ecuación propuesta por Chang usando el ábaco de la figura 8.5.

## **CAPITULO 9: Conclusiones**

Como se planteó al principio del presente trabajo, la idea primordial es generar un mecanismo racional para que a partir del mismo se pueda evaluar en etapa de proyecto la efectividad y durabilidad de una obra ejecutada sobre el cauce de río en función el tiempo.

Y también por otro lado tratar de generalizar el mecanismo para poder aplicar dicha metodología en distintas obras que se construya en un cauce del río y con distintas características morfológicas de ríos.

Después de haber producido los elementos necesarios para el análisis se pueden realizar las siguientes conclusiones.

Cotejando los siguientes parámetros:

- a) “Velocidad media de escurrimiento” con la “Velocidad Crítica” y
- b) “Tensión de corte en el fondo” con la “Tensión de corte crítica”

Estos cotejos se lo realizó en las distintas secciones medidas topográficamente, para un mismo estado (Natural o Proyecto), con estos estudios ya nos da un indicio fuerte sobre la ejecución o no de la obra, por ejemplo para el caso particular que se estudió en el presente trabajo se observó que para el escenario Natural el 90% de las secciones son erosionables contra el 87% para el escenario de Proyecto, con un 3% de diferencia favorable para el Proyecto. El otro parámetro de análisis es el indicado en el punto b), para el caso que se estudió nos dan 80% de secciones erosionadas para el estado Natural y un 100% para el escenario de proyecto.

Los valores obtenidos del análisis de estos dos cotejos nos determinan con contundencia que la construcción de esta obra de rectificación no responde a las necesidades planteadas ya que al circular el caudal de diseño, (caudal dominante de  $200\text{m}^3/\text{s}$ ), utilizado en las secciones se erosionaran en los valores indicados.

No conforme con los resultados logrados o suponiendo que no son representativos, se amplió el análisis, con los siguientes cotejos:

- c) “Tirante” y “Profundidad de erosión localizada”, S/ Método de Rosinsky.
- d) “Velocidad media de circulación” y “Velocidad de fondo crítica”, S/ Método de Mirtsjulava.

Igual que en los cotejos anteriores, se estudiaron los dos escenarios y los resultados obtenidos son negativos para la construcción del Proyecto, ver tablas resumen en los puntos “6.3.1 Tabla Resumen y cotejo de los primeros parámetros”.

El avance logrado es que realizando los procedimientos indicados en la presente Tesis, lo que se muestra en el art. “6.3.1. Tablas Resúmenes”, nos da una orientación cierta de la efectividad de una obra de “Rectificación de un tramo de río”.

Para ser ordenado, se define los siguientes procedimientos:

- A. Determinar el caudal de diseño para la obra.
- B. Realizar topografía del sector de estudio.
- C. Realizar estudio granulométrico del suelo.
- D. Modelar mediante un software que determine los parámetros hidráulicos.
- E. Calcular la “Velocidad media de circulación”.
- F. Calcular la “Velocidad Crítica”, según Lischtvan y Lebediev.
- G. Realizar cotejo entre la “Velocidad media” de circulación en cada sección con la “Velocidad Crítica”.
- H. Calcular la “Tensión de corte en el fondo”.
- I. Calcular la “Tensión de corte crítica”.
- J. Realizar el cotejo entre la “Tensión de Corte generada en el fondo” con la “Tensión de corte crítica”.
- K. Calcular el “Tirante de circulación”.
- L. Calcular la “Profundidad de erosión localizada”, según Método de Rosinsky.
- M. Realizar el cotejo entre el “Tirante de circulación” con la “Profundidad de erosión localizada”.
- N. Calcular la “Velocidad de fondo crítica”, según Método de Mirtsjulava.
- O. Realizar cotejo entre la “Velocidad media” de circulación en cada sección con la “Velocidad Crítica”, según Método de Mirtsjulava.
- P. Los puntos G, J, M y O se lo debe aplicar en las dos situaciones a evaluar. Situación con obra ejecutada y sin obra. En el presente caso los estados de Proyecto y Natural se compara y analiza por separado.
- Q. A continuación se produce tablas comparativas entre los dos estados (Natural y Proyecto), los parámetros a estudiar son:
  - i. Velocidad media de circulación.
  - ii. Tirantes.
  - iii. Numero de Froude.
- R. La forma de estudiar los factores definidos en el punto Q, es la siguiente:



- i. Se observan los valores límites y se define la amplitud de los valores a estudiar.
  - ii. Se define a priori un salto de valores de referencias, de tal manera de tener 8 o 10 puntos de salto.
  - iii. Una vez definidos los valores de los parámetros de referencia se computa por separado, cuantas secciones o perfiles del río son menor o mayor que dicho parámetro de referencia. Se construye la tabla, en total serían 6 tablas.
  - iv. Con cada una de las tablas se construyen graficas para tener una visión panorámica de los valores y su comportamiento en el rango de su amplitud. Se la valoran y se sacan conclusiones.
  - v. En este último caso de análisis es comparativo entre los escenarios Natural con Proyecto.
- S. Continuando con el análisis y siguiendo la misma línea de estudio es que se aplica los procedimientos que se indica en el libro “ River Mechanics” de Pierre Y. Julien, en este se define una forma para valorar el impacto que produce una obra en el cauce de un río, en dicho libro trabaja con el caudal definido como “bankfull discharge” que es similar al caudal dominante que el tesista usa. Se pueden aplicar las ecuaciones 8.6a, 8.6b, 8.6c y 8.6d. El tesista había considerado un caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  para los cálculos anteriores, este valor es redondeado o del orden, no es exacto y además se calculó el caudal dominante para las secciones en esta natural y ese mismo valor se aplicó en el estado de Proyecto; como en este caso es necesario mayor precisión de dicho valor, se calculó nuevamente los caudales dominantes para cada uno de los escenarios, los valores obtenidos fueron  $235 \text{ m}^3/\text{s}$  para el estado Natural y de  $465 \text{ m}^3/\text{s}$  para el estado Proyecto. La metodología aplicada de Julien sería una verificación de lo que vengo analizando, confirmando los resultados obtenidos de mi planteo.

Retornando al análisis general de la Tesis y aplicando los procedimientos indicados, se puede definir con certeza la eficiencia de la obra a ejecutar en función del tiempo.

Esta metodología se la puede extrapolar a otras tipos de obras solamente teniendo en cuenta en la modelación computacional las características de la obra a construir y calculando con el software los parámetros hidráulicos producidos.

También se puede interpolar la presente metodología a cursos de agua similares, las características que se deben respetar son:

- A. Fluvio-Morfología en planta.
- B. Granulometría de solera y bermas.
- C. Las ecuaciones utilizadas.

Con respecto de la fluvio-morfología, se aplicó la teoría de Rosgen y Silver [Ref.(7)], obteniendo una pendiente media de 3,4 ‰, una sinuosidad promedio de 1,47; estos valores son de todo el tramo en estudio.

Con respecto del tipo de suelo del río estudiado el mismo tiene una buena distribución en su granulometría, ya que cumple  $\sigma_s > 3$ , en las tres extracciones de muestra seleccionada.

Las ecuaciones utilizadas son para estos tipos de suelos, hay autores que recalculan o calibran sus ecuaciones en función del tipo de suelo.

Redondeando, la metodología está desarrollada para un curso de agua como se definió anteriormente y se puede aplicar para un sistema similar. En caso de querer extrapolar la presente metodología para evaluar el accionar de una canalización en otros cursos de agua similares o distintos es realizando las correcciones o calibraciones de las ecuaciones a utilizar o utilizar las expresiones ya verificadas por otros autores.

Como parámetros a resolver o pendientes, el tesista aconseja estudiar los siguientes:

- A. Definir los porcentajes límites de los distintos cotejos, se podría definir un valor límite para que a partir de ese número sea factible o no la construcción de una obra particular. En el caso estudiado es muy evidente que para los valores obtenidos no es factible.
- B. Estos valores límites, (%), se lo debería estudiar según distintos tipos de obras a proyectar.
- C. El caudal de diseño para la presente metodología también es importante definirlo, en el presente estudio se tomó el caudal dominante, mucho menor que el caudal de diseño de la obra y que definía la hidrología. El tesista al obtener valores definitivos con dicho caudal, considero que no es necesario recalcular todos los estudios con el caudal que me otorga la Hidrología. Caudal dominante tomado por el tesista para los cálculos es de 200 m<sup>3</sup>/s, según hidrología 1500 m<sup>3</sup>/s. Y por otro lado considero que para este caso particular – (u obra particular)-, es correcto tomar el caudal dominante de 200 m<sup>3</sup>/s, ya que el mismo cubre con amplitud la obra proyectada.

Como idea final cito la siguiente: “No obstante, resulta necesario comprender que el río no es el “culpable” de estos efectos indeseados, sino lo es el hombre que progresivamente ha invadido el área que naturalmente le corresponde. Por lo tanto, en el proyecto y construcción de emprendimientos recreacionales y comerciales en los ambientes fluviales, deben efectuarse todos los estudios de rigor: hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos, ambientales, etc. para evaluar mediante indicadores apropiados, la conveniencia o no de introducir perturbaciones que alteren el equilibrio dinámico del sistema fluvial”; Ing. Farías en el proyecto. “Estudios Hidráulicos y Fluviales del Río Dulce para Determinación de Línea de Ribera e Impactos de Obras”, pag.10; [Ref.(20)].

## **Bibliografía**

- (1).Norgav S.A.C.I.I.F.F. YSYM – 2007 - *Proyecto ejecutivo “Canalización Río Salí y obras complementarias, Tramo: Los Gutiérrez – San Andrés”*.
- (2).Nora Pouey – 1998 – *Erosión hídrica en cursos de llanura sobre los lechos cohesivos* – Universidad Nacional de Rosario Editora.
- (3).U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC) – 2010 - *Software HEC-RAS (River Analysis System) version 4.1.0*.
- (4).Pierre Y. Julien – 2002 – *River Mechanics* – Cambridge University Press.
- (5).Basile P. A. – 2004 – *Geomorfología e Hidráulica Fluvial* – Universidad Nacional de Rosario; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; Escuela de Posgrado y Educación Continua.
- (6).Riccardi Gerardo A. – 2005 – *Modelación Matemática de Flujos a superficie libre* - Universidad Nacional de Rosario; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; Escuela de Posgrado y Educación Continua.
- (7).Farias, H., Trejo, J., Betancourth, D. y Dominguez, J. – 2007 - *Modelo morfodinámico simplificado para estimar las tasas de migración lateral en los ríos de llanura* - Instituto de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Trabajo presentado al XXIº Congreso Nacional del Agua 2007, realizado en Tucumán del 15 al 19 de Mayo de 2007.
- (8).Farias, H. – 1995 – *Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales* - Ingeniería del Agua, Vol. 2 Num. 3 p. 53-68.
- (9).Suayter, L. E. – 1998 - *Esquema sismotectónico de la provincia de Tucumán*. En: Gianfrancisco, M.; Puchulu, M. E.; Durango de Cabrera, J. y Ace- ñolaza, G. F. (Eds.): 155-160. *Geología de Tucumán*. (Segunda edición). Publicación Especial del Colegio de Geólogos de la provincia de Tucumán.
- (10). CIUNT-Une-CEIHMA – 2006 – *Plan Director para la Sistematización de las quebradas del flanco oriental de la Sierras de San Javier y actualización del sistema de desagües* – Universidad Nacional de Tucumán.
- (11). Adler F., Lazarte R. y Paz H. R. – 1999 – *Sistema de alerta hidrológico (Sahid), embalse Cadillal y Escaba – Provincia de Tucumán* – ORSEP.
- (12). E.W. Lane – 1947 – *Report of the subcommittee on Sediment Terminology* - Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/TR028i006p00936>
- (13). E.W. Lane – 1957 – *Lane’s Balance*. En: Sharma N.; *River System Analysis and Management*; Springer, p 267.

- (14). D. Dust, E. Whol – 2011 - *Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation* - Departamento de Geociencia, de la Universidad del estado de Colorado, Fort Collins, CO 80523-1482, USA.
- (15). Chang, H. H. y Hill, J. C – 1990 - *Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers* - New York, NY, 1204 pp.
- (16). Chang, Howard H. – 1988 - *Fluvial Processes in River Engineering*; J. Wiley & Sons. NY, USA.
- (17). Juliem P.Y. – 1995 – *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press. New York, United States of America.
- (18). Chang, Howard H. – 2008 – *Analytical River Morphology and River Channel Changes; Traducción de Tianjin University*, Volumen 14, 4 de Noviembre 2008 – ISSN 1006-4982 (print), 1995-8196 (online).
- (19). Ponce V. M. – 2013 – *Open Channel 114* – Video de Youtube; disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=NKrClhqvJE4>.
- (20). Farias H. D. – 2009 – *Estudios Hidráulicos y Fluviales del Río Dulce para Determinación de Línea de Ribera e Impactos de Obras* – Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- (21). Farias H. D., Pilám M. T., Pece F. J. y Olmos L. A. – 2003 – *Erosión General en Ríos con lechos Arenosos* – Instituto de Recursos Hidrios (IRHi-FCEyT-UNSE), Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- (22). Farias H. D. – 2010 – *Estudio Fluvial, Canalización del Río Salí y Obras Complementarias*.
- (23). Neder L., Caria M. y Busnelli L. – 2007 – *Influencia de factores naturales y antropogénicos en el diseño de drenaje fluvial en áreas urbanas* – INGEMA (Instituto de Geociencias y Medio Ambiente), Facultad de Ciencias Naturales e IML. U.N.T., Trabajo presentado en el XXIº Congreso Nacional del Agua 2007, realizado en Tucumán del 15 al 19 de Mayo de 2007.
- (24). Vide M. J. P. – 2.003 – *Ingeniería de Ríos – México D. F.: Editorial Altaomega Grupo Editor S.A.*