

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**“ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA  
PROTECCIÓN DE RIBERAS EN RÍOS AMAZÓNICOS USANDO  
TRONCOS DE ÁRBOLES”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**

**JHOSTYN EDUARDO NINA MINAYA**

**ASESOR**

**MSc. Ing. MIGUEL ANGEL ZUBIAUR ALEJOS**

**LIMA- PERÚ**

**2020**

© 2020, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Nina Minaya, Jhostyn Eduardo

[jninam@uni.pe](mailto:jninam@uni.pe)

914041957

## ÍNDICE

### RESUMEN

### ABSTRACT

### PRÓLOGO

### LISTA DE TABLAS

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 GENERALIDADES.

#### 1.2 PROBLEMÁTICA

#### 1.3 OBJETIVOS

##### 1.3.1 Objetivo General

##### 1.3.2 Objetivos Específicos

#### 1.4 HIPÓTESIS

### CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA EXPERIMENTAL

##### 2.1.1 Análisis dimensional

##### 2.1.2 Teoría de Modelos Físicos

#### 2.2 FUNDAMENTOS DE HIDRAULICA FLUVIAL

##### 2.2.1 Sistema Fluvial

##### 2.2.2 Transporte de sedimentos en cauces naturales

##### 2.2.3 Morfología Fluvial

#### 2.3 EROSIÓN DE RIBERAS EN RÍOS

##### 2.3.1 Factores que influyen en la erosión de riberas

##### 2.3.2 Tipos de Erosión en las riberas de los ríos

##### 2.3.3 Flujo Curvilíneo

##### 2.3.4 Corrientes Secundarias

##### 2.3.5 Formación y Migración de los meandros

#### 2.4 ESPIGONES

##### 2.4.1 Estado del arte de las estructuras grandes de material madera

##### 2.4.2 Criterios de diseño

##### 2.4.3 Diseño en planta

##### 2.4.4 Ventajas del uso

#### 2.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

2.5.1 Recopilación de información bibliográfica

2.5.2 Trabajo de campo

2.5.3 Trabajo de oficina

### **CAPÍTULO III. INFORMACIÓN BÁSICA DEL PROTOTIPO**

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA**

3.1.1 Ubicación

3.1.2 Descripción de la zona de estudio

3.1.3 Levantamiento topográfico

3.1.4 Levantamiento batimétrico

#### **3.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA**

3.2.1 Geología regional

3.2.2 Geodinámica externa

3.2.3 Descripción geotécnica de la zona de estudio

#### **3.3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA**

3.3.1 Cuenca del Río Madre de Dios

3.3.2 Caudales de diseño

### **CAPÍTULO IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **4.1 LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA**

#### **4.2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO**

4.2.1 Procedimiento General

4.2.2 Ubicación del modelo

4.2.3 Descripción y Construcción del modelo

4.2.4 Similitud geométrica

4.2.5 Similitud cinemática

4.2.6 Similitud dinámica

4.2.7 Material representativo del lecho

4.2.8 Descripción de la operación del modelo

#### **4.3 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN**

4.3.1 Diseño

4.3.2 Construcción

4.3.3 Colocación

#### **4.4 EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

4.4.1 Batimetría

4.4.2 Nivel de agua

4.4.3 Caudal

4.4.4 Velocidad

4.5 EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

4.5.1 Programación de pruebas

4.5.2 Descripción de una prueba típica en el modelo

4.5.3 Procesamiento de datos recolectados

## **CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

5.1 RESULTADOS PROCESADOS

5.1.1 Velocidad de flujo

5.1.2 Nivel de agua

5.1.3 Nivel de lecho

5.2 CARACTERIZACIÓN DE RESULTADOS

5.2.1 Análisis de las velocidades medias y superficiales

5.2.2 Variación de la profundidad de erosión

5.2.3 Comentario

**CONCLUSIONES**

**RECOMENDACIONES**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ANEXOS**

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis busca estudiar la protección de riberas frente al fenómeno de erosión lateral del margen derecho del Río Madre de Dios en la zona “La Pastora”, mediante el desarrollo de un modelo físico de lecho móvil a escala reducida que represente el tramo, por ello se implementó un sistema de espigones como alternativa de solución para reducir la velocidad del agua cerca de la margen derecha del cauce del río, ya que los centros poblados pertenecientes a la selva baja sufren constantes desastres por efecto de las inundaciones, ante las crecidas en los ríos que desestabilizan las riberas.

El fenómeno que se desea controlar es la erosión lateral y se optó por el uso de un modelo físico para realizar pruebas experimentales que permitan estudiar o evaluar el uso de este tipo de alternativa de solución. Además, los resultados obtenidos generaran una contribución científica y técnica para aquellos que estudien este fenómeno donde se utilice la tecnología de protección denominada Ingeniería de Atascos de Madera.

La experiencia de protección de riberas usando troncos de árboles en los ríos Amazónicos del Perú es nula, ya que solo se practicó estudios en ríos de bajos caudales en países europeos y en Estados Unidos, por ello es importante impulsar la investigación en nuevas técnicas de ingeniería que permiten optimizar costos y tiempos en el proceso constructivo.

El diseño geométrico del sistema de protección fue consultado por la guía de diseño de estructuras grandes de material madera redactado por el cuerpo de ingenieros del ejercito de los Estados Unidos con la finalidad de distribuir los troncos en un entramado prismático representado a escala del modelo.

La construcción de los espigones se realizó en el área de carpintería del laboratorio y la colocación de espigones se realizó utilizando instrumentos topográficos con la orientación y posición del eje normal de cada espigón, su empotramiento en la ribera del río se realizó mediante procedimientos de albañilería, finalmente se realizaron los ensayos experimentales con las respectivas mejoras de diseño. Las actividades generales en el presente procedimiento experimental abarcan lo siguiente:

- Selección de la información necesaria para el modelamiento físico.
- Calibración del modelo físico.
- Ensayo en la condición sin estructuras de protección (espigones).

- Análisis de los datos como la morfología del cauce y la velocidad del flujo de las condiciones sin estructuras de protección.
- Ensayo en la condición con estructuras de protección (espigones).
- Análisis de los datos como la morfología del cauce y la velocidad del flujo de las condiciones con estructuras de protección.
- Reformulación y mejoras en el diseño preliminar del sistema de protección.

Los resultados obtenidos de las pruebas permitieron establecer la comparación de velocidad y morfología del cauce cuya comparación permite evaluar la eficacia de las estructuras de protección.

## **ABSTRACT**

The thesis study the protection of banks against the phenomenon of lateral erosion of the right bank of the Madre de Dios River in the "La Pastora" zone, through the development of a physical model of mobile bed on a reduced scale that represents the stretch For this reason, a breakwater system was implemented as an alternative solution to reduce the speed of the water near the right bank of the riverbed, since the population centers belonging to the low jungle suffer constant disasters due to the floods, due to the constant times of floods in the rivers that allow to destabilize the banks.

The phenomenon that we wish to control is lateral erosion and we chose the use of a physical model to perform experimental tests to study or evaluate the use of this type of solution alternative. In addition, the results obtained will generate a scientific and technical contribution for those who study this phenomenon where the protection technology known as the Wood Jam Engineering is used.

The experience of protecting riverbanks using tree trunks in the Amazonian rivers of Peru is null, since only studies were carried out in rivers with low flows in European countries and in the United States, so it is important to promote research in new engineering techniques that allow to optimize costs and times in the constructive process.

The geometrical design of the protection system was consulted by the design guide of large structures of wood material drafted by the United States Army Corps of Engineers with the purpose of distributing the logs in a prismatic framework represented at the scale of the model.

The construction of the breakwaters was performed in the carpentry area of the laboratory and the placement of breakwaters was performed using topographic instruments with the orientation and position of the normal axis of each breakwater, its embedding in the riverbank was carried out by means of masonry procedures and finally the experimental testing procedure with the respective design improvements. The general activities in the present experimental procedure include the following:

- Selection of the data necessary for physical modeling.
- Calibration of the experimental model.
- Experimentation of conditions without protection structures (breakwaters).



- Analysis of the data such as the morphology of the channel and the flow velocity of the conditions without protection structures.
- Experimentation of conditions with protection structures (breakwaters).
- Analysis of the data such as the channel morphology and the flow velocity of the conditions with protection structures.
- Reformulation and improvements in the preliminary design of the protection system.

The results obtained from the tests allowed to establish the comparison of velocity and morphology of the channel whose comparison allows to evaluate the effectiveness of the protection structures.

## **PROLÓGO**

La erosión que provocan los ríos en nuestro país durante eventos extraordinarios ha causado grandes daños al país, que han significado pérdidas materiales, así como de vidas humanas. Nuestra selva, también sufre estos problemas, el cual se agrava debido a que en estas zonas no se dispone de enrocados, las canteras más cercanas se encuentran a muchos kilómetros de distancia lo cual hace que su uso resulte antieconómico.

Actualmente, la protección se realiza con estructuras formadas por geotextiles en forma de bolsas cilíndricas rellenas con tierra del lugar lo cual es muy costoso. Debido a este problema y sabiendo de la abundancia de árboles forestales en la selva de nuestro país, es que se ha pensado aprovechar este recurso natural para la protección de las riberas de los ríos de la selva. Por esta razón, el bachiller en ingeniería civil Sr. Jhostyn Eduardo Nina Minaya ha desarrollado una investigación experimental para determinar la conveniencia de utilizar espigones formados por troncos de árbol como forma de protección de las márgenes de los ríos.

La investigación se realizó en el área experimental del Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedan La Cruz” mediante un modelo físico a escala reducida que permitió representar un tramo del río Madre de Dios, con problemas de erosión lateral, y ensayar tres alternativas diferentes de sistemas de espigones formados por troncos de árbol.

Los resultados de esta investigación muestran que es posible implementar este tipo de protección de manera favorable, con la ventaja que es más económica y con menor perjuicio al medio ambiente respecto a los sistemas de protección actualmente utilizados. Es importante mencionar que se deben profundizar las investigaciones considerando otras variables y otras situaciones por tratarse de un tema muy complejo.

MSc. Miguel A. Zubiaur Alejos

Asesor

Profesor Asociado – Facultad de Ingeniería Civil

**LISTA DE TABLAS**

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Pág.</b>
1.	Factores para tener en cuenta en el análisis de un río.....	15
2.	Clasificación de tamaño de partículas.....	17
3.	Equivalencia de malla y diámetro de abertura.....	18
4.	Ángulo de orientación vs Separación.....	38
5.	Ángulo entre el espigón y la orilla aguas abajo. ....	41
6.	Comparación de las alternativas de solución. ....	44
7.	Secciones transversales en la zona de estudio (La Pastora) .....	61
8.	Parámetros Geomorfológicos de la cuenca del río Madre de Dios.....	62
9.	Caudales máximos obtenidos a partir de datos de precipitación.....	63
10.	Hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 años.....	63
11.	Relaciones asociadas entre el modelo y el prototipo para diferentes magnitudes. ....	66
12.	Etapas de la construcción del modelo físico.....	66
13.	Características de las cuatro electrobombas.....	69
14.	Análisis granulométrico por tamizado del material de lecho del prototipo.....	72
15.	Granulometría del material del lecho del río Madre de Dios, del modelo La Pastora. ....	73
16.	Pesos específico relativo de algunos materiales. ....	77
17.	BMs con elevación y coordenadas en prototipo. ....	78
18.	Especificaciones técnicas del nivel de ingeniero PENTAX modelo AFL-321	81
19.	Caudales en prototipo y modelo utilizados en las pruebas.....	82
20.	Características de la madera Capirona .....	88
21.	Chequeo de permeabilidad de un espigón.....	92
22.	Longitud y separación de los espigones en escala modelo.....	96
23.	Altura máxima de los espigones en su eje longitudinal en escala prototipo .	97
24.	Coordenadas UTM del punto C-1 en el prototipo. ....	105
25.	Caudales en el prototipo utilizados en la calibración del modelo.....	106
26.	Cronograma de pruebas en el modelo físico.....	107
27.	Caudales ensayados en las diferentes pruebas.....	108
28.	Configuración de una sección de medición para posicionar el instrumento. ....	109
29.	Etapas principales del levantamiento con Laser Escáner 3D. ....	112
30.	Tirantes de agua para una sección típica.....	116
31.	Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°1. ....	118
32.	Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°2. ....	119
33.	Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°3. ....	120

34. Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N4.....	121
35. Tirantes de agua para la prueba N°1. ....	123
36. Tirantes de agua para la prueba N°2. ....	123
37. Tirantes de agua para la prueba N°3. ....	124
38. Tirantes de agua para los puntos de medición de cada sección de estudio para la prueba N°4.....	124
39. Nivel de agua para la prueba N°1. ....	125
40. Nivel de agua para la prueba N°2. ....	125
41. Nivel de agua para la prueba N°3. ....	126
42. Nivel de agua para la prueba N°4. ....	126
43. Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 2 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5. ....	130
44. Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 3 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5. ....	131
45. Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 4 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5.. ....	132
46. Resumen de dispersión promedio de velocidades. ....	150

**LISTA DE FIGURAS**

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Pág.</b>
1.	Zonas de un sistema fluvial.....	14
2.	Distribución granulométrica del material sólido de un río. ....	19
3.	Gráfico ilustrativo del cálculo de diámetro efectivo.....	19
4.	Diferentes configuraciones típicas de formas de fondo. ....	21
5.	Tipos de cauce según la morfología del río.....	22
6.	Formas de cauce según la morfología del río. ....	22
7.	Tipos de erosión en riberas de material no cohesivo. ....	27
8.	Mecanismo de falla de una ribera cohesiva. ....	28
9.	Corrientes secundarias en la parte curva y recta de un río con sus respectivas isovelas.....	29
10.	Obtención de cortes transversales del meandro con efectos de inestabilidad lateral.....	30
11.	Reducción del ancho de un río entrelazado por un sistema de espigones. ...	31
12.	Representación de un entramado de troncos de árboles. ....	32
13.	Esquema de las dimensiones de un tronco de árbol. ....	33
14.	Ilustración de una estructura tipo protección bancaria. ....	34
15.	Trazo en planta del eje de un río y líneas extremas de defensa.....	35
16.	Relación entre la longitud del espigón y el ángulo de expansión para diferentes permeabilidades. ....	37
17.	Espaciamiento de espigones en tramos rectos. ....	39
18.	Espaciamiento en curvas regulares. ....	39
19.	Espaciamiento en curvas irregulares. ....	40
20.	Orientación en sentido del flujo.....	41
21.	Orientación del espigón en contra del flujo. ....	42
22.	Ilustración del meandro con sus bancos erosionados y depositados. ....	44
23.	Establecimiento de los límites mínimos de protección. ....	45
24.	Establecimiento de la máxima constricción del flujo.....	46
25.	Estimar las localizaciones de thalweg por varias condiciones de flujo.....	47
26.	Localización y orientación del primer espigón. ....	48
27.	Localización del segundo espigón. ....	49
28.	Orientación del segundo espigón.....	50
29.	Esquema final de la geometría de espigones.....	51
30.	Ubicación del área del levantamiento batimétrico del río Madre de Dios en una imagen satelital (color naranja). ....	56
31.	Topografía y Batimetría de la zona de estudio (Zona de La Pastora).....	57

32. Esquema del proceso de erosión lateral sobre el río en curva y el derrumbe de masas.....	58
33. Sección Transversal Crítica del talud en la zona de la Pastora, en la progresiva 2+500 del plano topográfico (sin escala).....	60
34. Curva granulométrica del material de fondo en prototipo.....	72
35. Curva Granulométrica del material del lecho del río Madre de Dios, del modelo La Pastora.....	73
36. Solución gráfica generalizada para la obtención de valor “Z”.....	75
37. Solución gráfica generalizada para la obtención de valor “ $\lambda_x$ ”.....	76
38. Modelo físico con sus respectivos BMs.....	79
39. Ubicación del eje del modelo y representación de los tarugos.....	79
40. Instrumento Sonda Vectrino – Nortek AS.....	86
41. Columna de agua para el análisis (lado izquierdo) y una laptop portátil con la interfaz de usuario (lado derecho).....	87
42. Representación esquemática de la geometría de un espigón dentro del talud.....	90
43. Representación esquemática de la distribución del entramado de troncos sobre el talud.....	91
44. Vista perfil (lado izquierdo) y frontal (lado derecho) de un espigón representativo.....	91
45. Radios de curvatura representativo del meandro en escala prototipo.....	93
46. Extensión de radio de curvatura hacia los puntos donde inicia los espigones.....	94
47. Orientación perpendicular del primer y segundo espigón con un punto rígido de vegetación.....	95
48. Trazo de ejes normales según los ángulos de desviación de flujo.....	95
49. Esquema representativo de un espigón de prueba.....	99
50. Ubicación de ejes normales sobre los espigones.....	102
51. Estación total TOPCOM serie gpt 3000 (izquierda) y un esquema característico para la colocar y orientar los espigones.....	103
52. Representación de una sección típica para la medición de velocidades. ...	109
53. Ubicación de puntos de medición de velocidades.....	111
54. Batimetría del lecho representado como superficie.....	113
55. Plano de corte de la superficie generada en Paraview.....	113
56. Sección Transversal dibujado en una hoja de cálculo.....	114
57. Archivo de velocidades en las tres direcciones luego del procesamiento...	115
58. Figura N°58 Perfil de velocidad en las tres direcciones con la velocidad promedio ponderada.....	115
59. Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°1.....	118
60. Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°2.....	119

61. Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°3. .....	120
62. Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°4. .....	121
63. Superficie $S_0$ con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo .....	127
64. Superficie $S_1$ con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo .....	127
65. Superficie $S_2$ con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo .....	128
66. Superficie $S_3$ con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo .....	128
67. Superficie $S_4$ con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo .....	129
68. Esquema de velocidades cercana a la superficie sobre el punto 6 en las cuatro pruebas.....	133
69. Esquema de velocidades media del flujo sobre el punto 5 en las cuatro pruebas.....	134
70. Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°1. .	135
71. Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°2. .	136
72. Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°3. .	137
73. Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°4. .	138
74. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “0+360”..	139
75. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “1+200”..	140
76. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “1+440”..	141
77. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “1+680”..	142
78. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “1+920”..	143
79. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “2+160”..	144
80. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “2+400”..	145
81. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “2+640”..	146
82. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “2+880”..	147
83. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “3+120”..	148
84. Comparación morfológica del cauce para la sección transversal “4+320”..	149

**LISTA DE FOTOS**

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Pág.</b>
1.	Gaviones de malla metálica como defensa ribereña.....	9
2.	Laboratorio Nacional de Hidráulica ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería.....	9
3.	Problemática representativa a causa de la erosión lateral efectuada en el margen derecho de la zona de estudio (zona La Pastora). ....	10
4.	Avenida en el río Rímac – Lima con tendencia de desplomar un muro de canalización.....	25
5.	Ribera de un río amazónico con presencia de vegetación. ....	26
6.	Imagen satelital de la zona de estudio del tramo La Pastora. ....	55
7.	Vista del talud en la zona de La Pastora, donde se aprecian derrumbes de material no consolidado y paredes verticales en la parte alta. ....	59
8.	Vista desde la parte alta del talud en la zona de La Pastora, donde se aprecian derrumbes al pie de los acantilados y la deforestación alrededor del meandro La Pastora. ....	59
9.	Imagen satelital de la cuenca del río Madre de Dios.....	62
10.	Vista satelital de la posición del modelo en las instalaciones del laboratorio	64
11.	Vista aérea del Modelo Físico.....	65
12.	Cisternas en el área de didáctica con sus respectivas profundidades.....	68
13.	Tanque elevado permanente para el almacenamiento de agua junto a las tuberías de impulsión con sus respectivas válvulas. ....	69
14.	Ubicación de las 4 electrobombas y bomba centrífuga en el área de didáctica para el abastecimiento del modelo físico. ....	70
15.	Ingreso del modelo hidráulico con vertederos rectangulares.....	70
16.	Salida del modelo hidráulico con la poza de sedimentación.....	71
17.	Regulación del nivel de agua a la salida del modelo físico.....	71
18.	Vista del material representativo para el fondo del modelo. ....	77
19.	Lecho móvil a escala modelo con presencia de arena limosa en fondo y manto arcilloso en la ribera.....	78
20.	Regla que se coloca en cada sección transversal para la colocación de tarugos.....	80
21.	Colocación de tarugos mediante la regla y varilla metálica. ....	80
22.	Nivelación de tarugos utilizando el nivel de ingeniero. ....	81
23.	Representación en modelo del lecho del cauce. ....	82
24.	Estación del Escáner laser modelo Focus3D X330.....	83
25.	Uso de la mira limnimétrica para medir el nivel de agua ....	84
26.	Nivel de ingeniero PENTAX modelo AFL-321.....	84
27.	Descarga de agua sobre los dos vertederos rectangulares de ingreso al modelo.....	85



28. Válvula tipo mariposa (Lado izquierdo) y tipo compuerta (Lado derecho) para la regulación del caudal que ingresa al modelo.....	86
29. Soporte (puente metálico) para la medición de velocidades de flujo en cada sección transversal. ....	87
30. Vista general de la geometría del espigón. ....	89
31. Taller de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica. ....	98
32. Madera utilizada para la construcción de espigones. ....	99
33. Perforación de los troncos para colocar tarugos (lado izquierdo) y un tronco con tarugos colocados para la fijación. ....	100
34. Colocación del tronco en la sierra de banda (lado izquierdo) y corte de troncos para diferentes longitudes (lado derecho). ....	100
35. Proceso de pegado y unión del tronco (1 mm) con la raíz representativa (2.5 mm). ....	101
36. Espigones formado por entramados de troncos con raíces.....	101
37. Excavación de material de lecho.....	103
38. Nivelación de espigones con una regla metálica ubicada en el eje normal. ....	104
39. Uso de pilotes de madera y mortero para empotrar el espigón sobre el lecho del río.....	104
40. Reconstrucción del talud (izquierda) y colocación del sistema de espigones (derecha). ....	105
41. Nivel de agua en el punto de control C-1. ....	106
42. Lámina de agua en regulación sobre el modelo físico.....	107
43. Puente y soporte metálico en el cual se instaló el vectrino.....	108
44. Posición correcta del vectrino para medir velocidades. ....	110
45. Asistentes de operación del vectrino en el modelo físico. ....	110

**LISTA DE SIMBÓLOS Y SIGLAS**

$A_f$	Área frontal del espigón con respecto a la dirección del flujo
$B$	Ancho medio de la superficie libre en los tramos rectos del río
$C_d$	Coefficiente de fricción superficial
$C_d^*$	Coefficiente de descarga
$c'$	Cohesión efectiva
$c$	Cohesión
$D_m$	Diámetro efectivo
$d$	Diámetro del sedimento
$d_s$	Diámetro representativo del sedimento
$d_{50}$	Diámetro correspondiente al 50% del porcentaje acumulado
$e_a$	Factor de escala de Aceleración
$e_F$	Factor de escala de Fuerza
$e_L$	Factor de escala de Longitud
$e_t$	Factor de escala de Tiempo
$e_v$	Factor de escala de Velocidad
$F$	Fuerza
$Fr$	Número de Froude
$g$	aceleración de la gravedad
$H$	Altura del espigón
$L$	Longitud característica del espigón
$L_c$	Longitud de la cresta del vertedero
$L_e$	Longitud de empotramiento del espigón
$L_t$	Longitud de trabajo del espigón
$m$	modelo
$p$	prototipo
$Q$	Descarga del flujo
$Q_n$	Caudal de avenidas para el periodo de retorno en "n" años
$Re^*$	Número de Reynolds de la partícula
$r$	Radio de curvatura del río
$S_0$	Situación inicial del lecho del río, sin espigones de protección
$S_1$	Lecho del río luego de la prueba N°1
$S_2$	Lecho del río luego de la prueba N°2
$S_3$	Lecho del río luego de la prueba N°3
$S_4$	Lecho del río luego de la prueba N°4

---

$S_s$	Separación entre los espigones
$s_o$	Pendiente de lecho
$T_r$	Periodo de retorno
$V$	velocidad del flujo
$v^*$	Velocidad de corte
$y'$	altura hidráulica
$Z$	Parámetro de diseño de la escala gráfica
$\alpha$	Ángulo de orientación del espigón con respecto a la dirección del flujo
$\beta$	Ángulo de desviación del flujo del espigón
$\gamma'_s$	Peso específico del material utilizado para el modelo físico
$\delta$	Tensión superficial
$\eta$	Porosidad del espigón
$\kappa$	Rugosidad superficial del espigón
$\mu$	Viscosidad dinámica del flujo
$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido
$\pi_n$	Parámetro adimensional "n"
$\rho$	Densidad del flujo
$\rho_s$	Densidad del sedimento
$\sigma'_n$	Presión normal efectiva
$\tau$	Presión efectiva de rotura
$\tau_o$	Esfuerzo cortante del lecho
$\Delta V_m$	Variación de velocidad media
$\phi'$	Ángulo de rozamiento o fricción interna efectiva
$\omega$	Velocidad de caída de la partícula
DAHH	Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología
INDECI	Instituto de Defensa Civil
LNH	Laboratorio Nacional de Hidráulica
SINAGERD	Sistema Nacional de Gestión de Desastres

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El país sufre por una variedad de desastres naturales en las regiones, por los cuales se acontece perdida productivas y económicas que superan limites millonarios, como también las pérdidas humanas por causa de inundaciones.

Los ríos selváticos presentan pendientes bajas, las aguas fluyen en un suelo aluvial y los caudales varían dependiendo de la época del año. Sus cursos son anastomosados, trenzados, meándricos constituidos por curvas alternadas en forma de "S".

La ingeniería permite estudiar los fenómenos presentes en la naturaleza mediante modelos matemáticos y modelos físicos. Los modelos matemáticos permiten estudiar el fenómeno de manera ideal y aproximada por la implementación de métodos numéricos, los modelos físicos permiten estudiar el fenómeno de forma más cercana al caso real por un proceso de experimentación. Además, los estudios con modelos matemáticos necesitan información preliminar de un modelo experimental para validar el estudio con un proceso de calibración, en estos casos, es recomendable apoyarse en resultados de un modelo físico.

### 1.1 GENERALIDADES

#### 1.1.1 Modelos Físicos

Los modelos físicos son aquellas herramientas de investigación que permite representar un fenómeno físico a escala reducida mediante la semejanza entre el modelo y prototipo.

A continuación, se presentan, las definiciones básicas que son útiles en el desarrollo de modelos físicos.

##### *1.1.1.1 Prototipo*

Fenómeno o sistema natural que se desea investigar el cual se representa por el subíndice p.

### 1.1.1.2 Modelo

Representación a escala del prototipo, para lo cual deben cumplirse y utilizarse condiciones de similitud (geométrica, cinemática y dinámica).

### 1.1.1.3 Escala

Es la relación que existe entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en modelo. Se representa con la “e” y con el subíndice según la variable escalada.

## 1.1.2 Número de Froude

Se utiliza la similitud de Froude cuando en el flujo predomina la fuerza gravitatoria, esto es característico en el flujo a superficie libre, como en el caso de vertederos, embalses, playas, mareas, bahías, canales, ríos, entre otros. Se expresa mediante la relación.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy'}} \quad (1.1)$$

En donde:

- V = velocidad [m/s]
- g = gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- y' = altura hidráulica [m]
- Fr = Número de Froude [Fr]

## 1.1.3 Defensas ribereñas

Son aquellas estructuras que protegen las riberas de un río ante eventos de avenidas que causan socavación y fuerzas de impacto sobre esta. (ver Foto N°1) Las defensas ribereñas pueden estar formadas por grava, enrocado, vegetal, bloques de concreto, mantos, gaviones, geosintéticos, madera, entre otros.



Foto N° 1 Gaviones de malla metálica como defensa ribereña

#### 1.1.4 Laboratorio Nacional de Hidráulica

El Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) “Alfonso Alcedán la Cruz (ver Foto N°2) cuenta con un área total de 17 000 m<sup>2</sup>, de los cuales 12 000 m<sup>2</sup> se destinan para pruebas en modelo físico. Las áreas disponibles en el laboratorio son el área de modelos físicos, canal de calibración de correntómetros, taller de carpintería y mecánica, el área de didáctica y modelamiento matemático.



Foto N° 2 Laboratorio Nacional de Hidráulica ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

Los ríos amazónicos presentan una geomorfología variada principalmente meándrico, estos presentan una sucesión de curvas alternadas donde aparecen vórtices que inducen flujos secundarios que modifican la orientación del flujo aguas abajo, desviando, las líneas de corrientes cerca de la superficie libre hacia el banco exterior mientras que las líneas cerca al lecho son desviadas hacia al banco interior. Asimismo, se produce el fenómeno de erosión cerca al banco externo y el fenómeno de sedimentación cerca al banco interno (Ver Foto N°3), esto provoca la migración lateral del río poniendo en riesgo zonas urbanas cercanas a estos ríos.



Foto N° 3 Problemática representativa a causa de la erosión lateral efectuada en el margen derecho de la zona de estudio (zona La Pastora).

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo general

Estudiar mediante un modelo físico de lecho móvil, la protección de la ribera de un río amazónico utilizando troncos de árboles.

Para cumplir con el objetivo general, el estudio se realizará en un tramo de aproximadamente 1543 m de longitud, en la margen derecha del río Madre de Dios, en la zona La Pastora – Puerto Maldonado.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Medir las velocidades en las secciones transversales del río.
- Evaluar la eficacia de este sistema de protección (troncos de árboles).

### 1.4 HIPÓTESIS

Los resultados obtenidos del proceso experimental en el modelo en lecho móvil a escala reducida, permitirá comparar las condiciones hidrodinámicas (velocidades) y la profundidad de erosión (morfología del cauce) sin estructura y con estructura de protección formado por troncos de árbol.



## CAPITULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se presentan algunos conceptos de los modelos físicos hidráulicos, referido principalmente a su mecanismo de aplicación y características, asimismo, conceptos básicos de la hidráulica de ríos, para entender el fenómeno de erosión de riberas.

### 2.1 FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA EXPERIMENTAL

En la naturaleza existen fenómenos hidráulicos que requieren ser analizados, mediante un modelo físico a escala reducida, para ello es necesario aplicar técnicas relacionadas el análisis dimensional y la teoría de modelos.

#### 2.1.1 Análisis dimensional

Este análisis estudia la forma adecuada de conseguir parámetros adimensionales para explicar un fenómeno natural, asumiendo que este puede ser expresado por una ecuación que dependa de las variables que intervienen en él. El análisis dimensional permite reducir el número de variables, agrupándolas en parámetros adimensionales, que permite obtener una interpretación y presentación de los resultados experimentales en forma gráfica. Además, trabajar con parámetros adimensionales presenta las siguientes ventajas:

- a) Permiten conseguir o comprobar una expresión matemática.
- b) Permiten reducir el número de variables de un evento simplificándolo en forma importante.
- c) Permite establecer relaciones entre los parámetros adimensionales y extrapolar los resultados a prototipos de mayor tamaño.

#### 2.1.2 Teoría de modelos

Los modelos físicos hidráulicos se definen como estructuras hidráulicas similares al prototipo, con una correcta relación de escala prototipo. El modelo físico permite realizar medidas experimentales de magnitudes como tirantes, velocidades,

presión, etc., y a partir de las relaciones de escala determinar esas magnitudes en el prototipo.

### 2.1.2.1 Semejanza hidráulica

Para que un modelo represente un fenómeno, debe cumplir tres condiciones de similitud o semejanza con el prototipo, que son la geométrica, cinemática y dinámica.

#### Similitud o Semejanza Geométrica

Existe semejanza geométrica entre modelo y prototipo cuando entre ambos hay proporcionalidad de longitudes homologas. De esta relación se derivan las escalas de áreas y volúmenes:

$$\text{Escala de longitudes} \quad \frac{L_{1p}}{L_{1m}} = \frac{L_{2p}}{L_{2m}} = \frac{L_{3p}}{L_{3m}} \dots = e_L \quad (2.8)$$

$$\text{Escala de áreas} \quad \frac{A_{1p}}{A_{1m}} = \frac{A_{2p}}{A_{2m}} = \frac{A_{3p}}{A_{3m}} \dots = e_L^2 \quad (2.9)$$

$$\text{Escala de volúmenes} \quad \frac{V_{1p}}{V_{1m}} = \frac{V_{2p}}{V_{2m}} = \frac{V_{3p}}{V_{3m}} \dots = e_L^3 \quad (2.10)$$

#### Similitud o Semejanza Cinemática

Existe semejanza cinemática cuando las trayectorias de partículas fuidas homologas en prototipo y modelo son proporcionales.

Se define la escala de velocidades y aceleraciones de la siguiente manera:

$$e_t = t_p/t_m \quad (2.11)$$

$$e_v = V_p/V_m = e_L/e_t \quad (2.12)$$

$$e_a = a_p/a_m = e_v/e_t = e_L/e_t^2 \quad (2.13)$$

#### Similitud o Semejanza Dinámica

Las fuerzas predominantes del prototipo deben estar reproducidas en el modelo en magnitudes proporcionales. La semejanza dinámica requiere que el total de

fuerzas actuantes (suma de las diversas fuerzas activas y las fuerzas de Inercia) en el prototipo deban guardar con sus homologas del modelo una relación constante, llamada escala de fuerzas.

$$e_F = F_p / F_m \quad (2.14)$$

## 2.2 FUNDAMENTOS DE HIDRAULICA FLUVIAL

Presentamos los siguientes conceptos:

### 2.2.1 Sistema fluvial

Un sistema fluvial puede ser idealizado en tres zonas, en dirección aguas abajo: Zona 1 de producción de sedimentos, zona 2 de transferencia de sedimentos y zona 3 de deposición de sedimentos. (Ver Figura N°1)

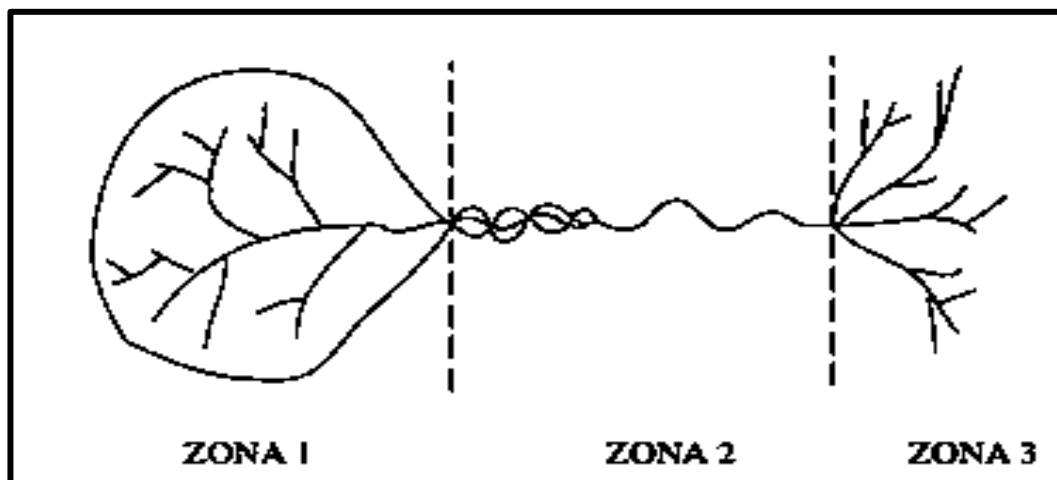


Figura N° 1 Zonas de un sistema fluvial.

Este esquema es limitado, ya que los sedimentos son almacenados, erosionados y transportados en todas las zonas, sin embargo, en cada caso, un proceso es dominante.

Es necesario conocer el comportamiento del río para realizar el diseño de las obras hidráulicas que controlen la erosión. A continuación, se presenta el cuadro

de los variados factores que afectan el estudio de la dinámica de ríos. (ver Tabla N°1)

Tabla N°1 Factores para tener en cuenta en el análisis de un río  
Fuente: Control de Erosión en suelos tropicales, Jaime Suarez Diaz

<b>Factor</b>	<b>Variable</b>
<b>TIEMPO</b>	Historia geológica. Tiempo moderno. Tiempo reciente. Tiempo futuro de análisis
<b>GEOLOGÍA</b>	Litología. Tectónica. Estructura. Geomorfología. Meteorización. Heterogeneidad geológica.
<b>SUELOS</b>	Tipo, gradación y peso específico. Distribución de los diferentes tipos de suelo en la cuenca. Composición química de las partículas. Cohesión y fricción. Resistencia a la alteración física y química. Grado de densificación. Permeabilidad- Infiltración. Erosionabilidad.
<b>HIDROLOGÍA</b>	Lluvias anuales -mensuales-diarias-horarias. Intensidades máximas de aguaceros. Magnitud- Intensidad y duración de las lluvias. Caudales. Tipo y forma de hidrograma.
<b>COBERTURA VEGETAL</b>	Tipo de vegetación. porcentaje de cobertura vegetal y su distribución. Prácticas de cultivos. Modificaciones de la cobertura por acción antrópica.
<b>TOPOGRAFÍA</b>	Topografía, pendiente, morfología de la cuenca. Perfil longitudinal del río. Morfología en planta, tipo de río (semirrecto, sinuoso, trenzado, meándrico) Sinuosidad, radios de curvatura, ancho de divagación, distancia entre meandros. Distancia entre barras o islas, alineamiento general, sección, forma, ancho, Profundidad, fondo, formas del fondo, forma de dunas o barras, rápidos y fosas
<b>HIDRÁULICA</b>	Pendiente del flujo. Rugosidad del fondo del cauce. Velocidad. Distribución de velocidades. Radio hidráulico. Fuerza tractiva. Resistencia al flujo. Poder de la corriente.

<b>Factor</b>	<b>Variable</b>
<b>SEDIMENTOS</b>	Disponibilidad y localización de sedimentos. Granulometría de la carga de fondo. Granulometría de partículas en suspensión. Velocidad de caída. Mecánica del transporte.
<b>ALTERACIONES DE ORIGEN ANTROPÍCO</b>	Sitios, volúmenes y procedimientos de explotación de materiales en el cauce y riberas. Localización y características de estructuras en el río (puentes, etc.). Estructuras de orilla. Canales de riego. Presas. Localización de asentamientos humanos. Rectificación del cauce

### 2.2.2 Transporte de sedimentos en cauces naturales

En cauces naturales se presentan principalmente dos mecanismos de transporte de sedimentos: Transporte en suspensión y Arrastre de fondo.

La presencia de estos mecanismos depende de características litológicas, geológicas e incluso eólicas de la cuenca, precipitación y coeficientes de escorrentía, relacionados con la disgregación de partículas sólidas, además de la morfología fluvial, donde esta última representa una directa influencia en los procesos que causan el transporte de sedimentos.

#### 2.2.2.1 Propiedades físicas de los sedimentos

Toda cuenca produce continuamente sedimentos que el flujo transporta y luego deposita. La mayoría de las fórmulas utilizadas para el cálculo del transporte de fondo son empíricas, basadas principalmente en fórmulas experimentales debido a que la medición en campo no permite tener valores confiables. Sin embargo, la medición de la carga suspendida es fácil y confiable.

La forma irregular de la mayoría de los flujos y la no uniformidad de los sedimentos dificulta los cálculos. El margen de error en los cálculos de sedimentos transportados es excesivamente alto. (Przedwojski y otros, 1995)

### Clasificación de los sedimentos

Se clasifican en sedimentos cohesivos y sedimentos no cohesivos. Los no cohesivos comprenden los cantos, guijarros, gravas y arenas y los cohesivos son esencialmente mezclas de limos y arcillas.

En los sedimentos no cohesivos la principal fuerza de resistencia a la erosión es el peso sumergido de los sedimentos, mientras en los sedimentos cohesivos las fuerzas netas de atracción entre partículas y las fuerzas electroquímicas controlan la resistencia a la erosión. Estas mismas fuerzas controlan el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones de sedimentos finos.

El movimiento de las partículas depende de sus características físicas tales como tamaño, forma y densidad.

### Tamaño de los sedimentos

El tamaño de las partículas y su distribución granulométrica tienen gran influencia en su movilidad. Se clasifican como arcillas, limos, arenas, gravas, guijarros y cantos (ver Tabla N°2).

Tabla N°2 Clasificación de tamaño de partículas.

Fuente: Control de erosión en suelos tropicales, Jaime Suarez Diaz.

<b>Partícula</b>	<b>Rango de tamaño (milímetros)</b>
Cantos	Más de 256
Guijarros	64 a 256
Grava	2 a 64
Arena	0.064 a 2
Limos	0.004 a 0.064
Arcillas	Menos de 0.004

### Curva Granulométrica

Las curvas granulométricas se obtienen al pasar los sedimentos por las mallas que se indican en la Tabla N°3.

Tabla N°3 Equivalencia de malla y diámetro de abertura.

Fuente: Control de erosión en suelos tropicales, Jaime Suarez Diaz.

<b>Malla</b>	<b>Abertura (mm)</b>
3"	18.850
2"	13.330
1 1/2"	9.423
N°4	4.760
N°5	4.000
N°8	2.380
N°10	2.000
N°18	1.000
N°20	0.840
N°30	0.590
N°35	0.500
N°40	0.420
N°50	0.297
N°60	0.250
N°100	0.149
N°200	0.074

Al realizar un análisis granulométrico por tamizado se obtiene la curva de distribución granulométrica, cuya gráfica en un papel semilogarítmico se muestra en la Figura N°2.

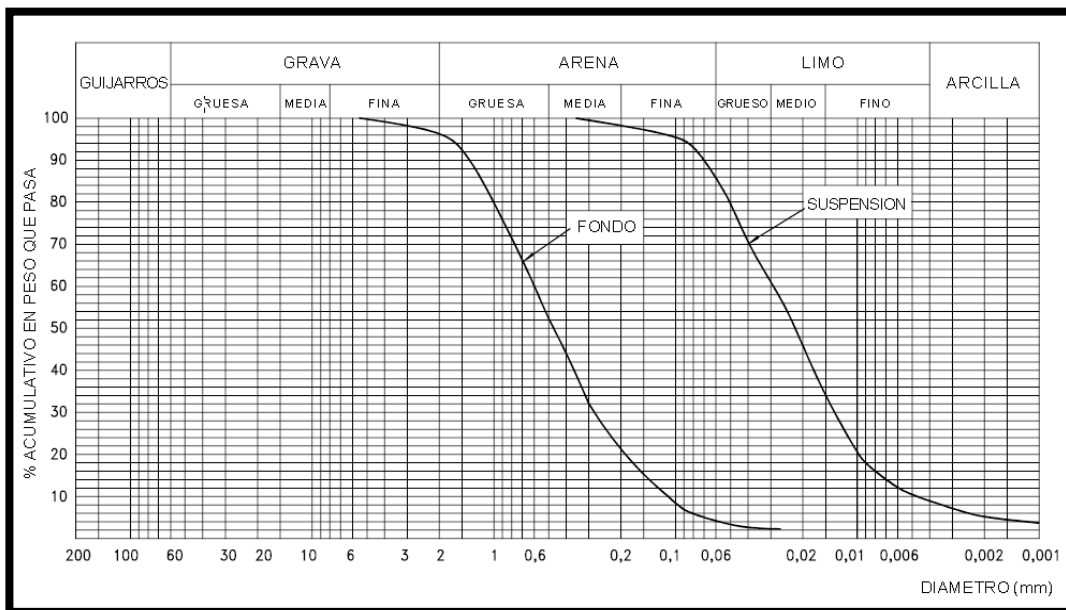


Figura N° 2 Distribución granulométrica del material sólido de un río.

Fuente: Estabilización y Rectificación de ríos, José Antonio Maza.

Existen diferentes criterios para seleccionar el diámetro representativo de la muestra, por ejemplo, es frecuente tomar el diámetro correspondiente al 50% del porcentaje acumulado, denominándose como  $d_{50}$ ; EINSTEIN, por ejemplo, toma el  $d_{65}$  y MEYER-PETER utiliza el llamado diámetro efectivo, que lo obtiene como:

$$D_m = \sum \frac{d_i \Delta p}{100} \tag{2.15}$$

siendo  $\Delta p$  un intervalo que se toma sobre el eje vertical de porcentajes y  $d_i$  el diámetro medio correspondiente al intervalo  $\Delta p$  (ver Figura N°3).

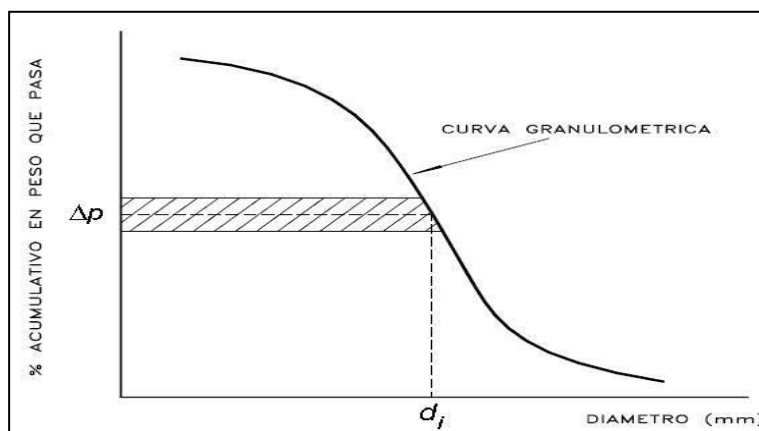


Figura N° 3 Gráfico ilustrativo del cálculo de diámetro efectivo.

Fuente: Estabilización y Rectificación de ríos, José Antonio Maza.



### *2.2.2.2 Inicio del movimiento de partículas en cauces naturales*

Con respecto a la dinámica de las partículas, la condición de movimiento incipiente corresponde a un equilibrio entre las fuerzas hidrodinámicas, que provocan el movimiento de la partícula y las fuerzas que están en contra del movimiento de esta, relacionadas con la fricción o roce estático, atrapamiento de las partículas del lecho y el peso

Por ello, la condición crítica de arrastre incipiente de partículas puede ser expresada como una función de las características del material del cauce y de las características del flujo.

### *2.2.2.3 Formas de fondo*

Las formas de fondo son el resultado de la intensidad del inicio de movimiento de partículas en un cauce erosionable. Estas formas están condicionadas por la capacidad de transporte del cauce, pero a su vez configuran la rugosidad del lecho que afecta a la resistencia que este ejerce al flujo, en consecuencia, existe una relación entre los parámetros hidráulicos (calado, velocidad del flujo, diámetro de partículas), rugosidad del lecho, carga sólida transportada y formas geométrica de fondo.

Sin embargo, las formas geométricas de fondo no poseen un criterio global o unificado para predecir correctamente las dimensiones. Además, las diferentes formas típicas de estas configuraciones que se pueden presentar en un lecho compuesto de sedimentos ocurren cuando se incrementa el número de Froude. (ver Figura N°4)

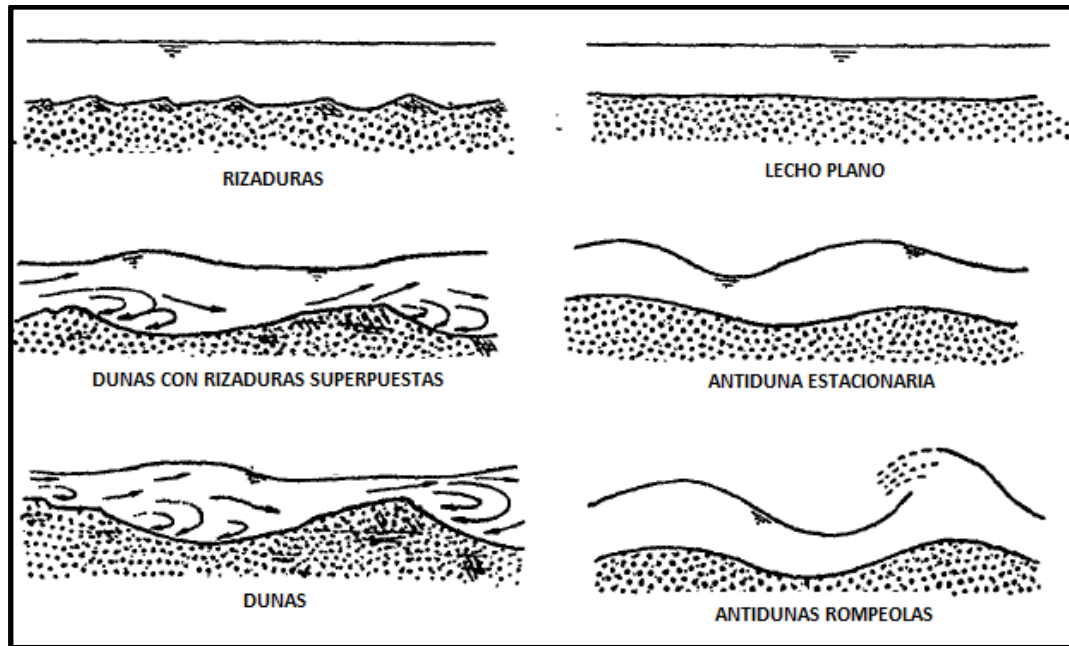


Figura N° 4 Diferentes configuraciones típicas de formas de fondo.

### 2.2.3 Morfología fluvial

La morfología fluvial es el estudio de la evolución de la forma del cauce del río tanto en planta como en perfil, ante las acciones naturales o antrópicas.

La forma de los ríos depende de las características hidrológicas y geológicas de la cuenca y de las propiedades de las partículas sólidas (sedimentos).

Existen tres formas fundamentales de un río (ver Figura N°5), las cuales pueden explicarse como un equilibrio instantáneo entre las fuerzas que producen erosión y las que la resisten. Además, las tres morfologías de un río representan diferentes formas de cauce según los cortes transversales. (ver Figura N°6)

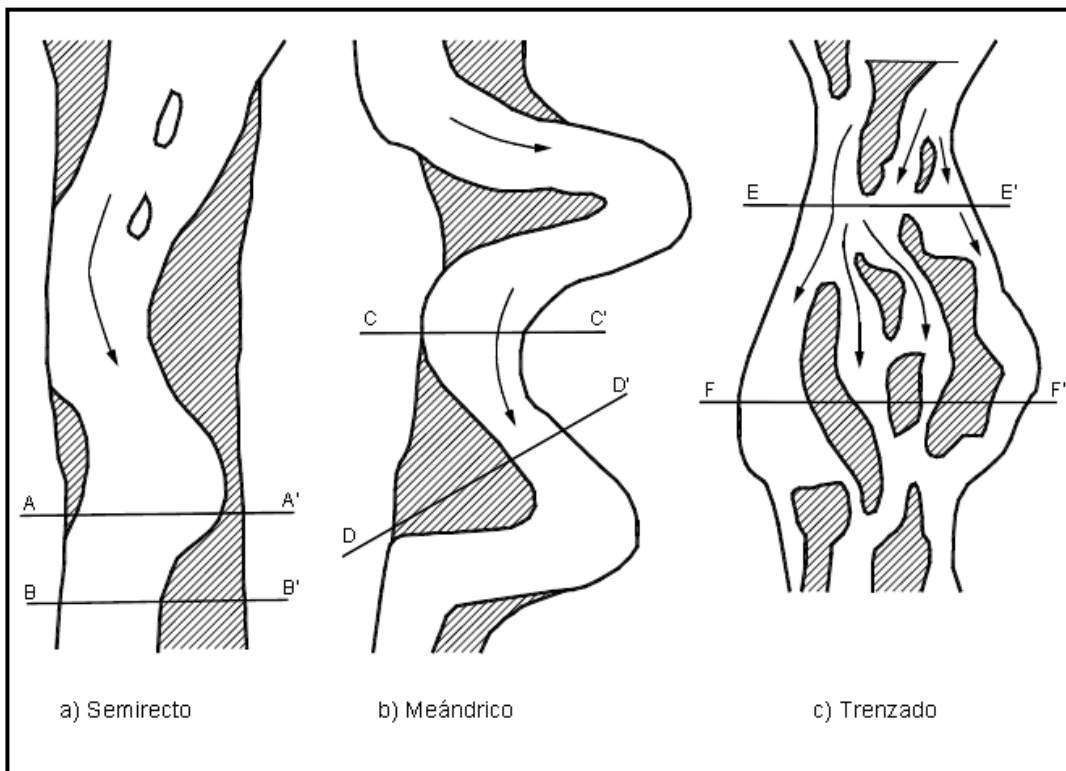


Figura N° 5 Tipos de cauce según la morfología del río.

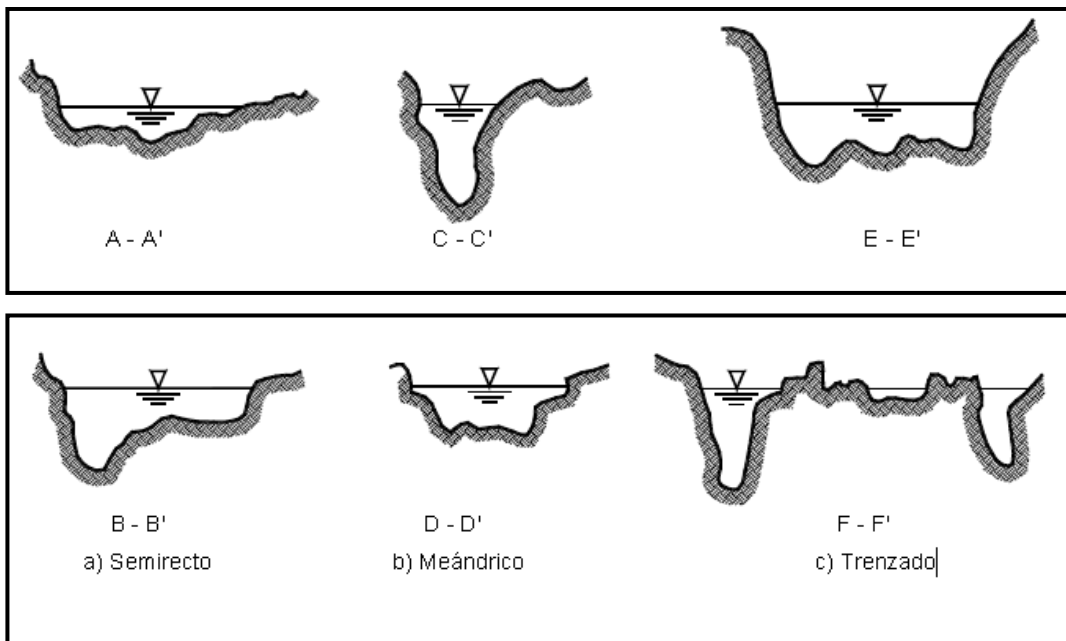


Figura N° 6 Formas de cauce según la morfología del río.

### 2.2.3.1 *Propiedades morfológicas de los ríos*

La forma de los cauces puede clasificarse como semirecta, trenzada o meándrica. Un mismo flujo presenta cambios de patrón a lo largo de su longitud y de acuerdo al caudal en cada época del año. Adicionalmente, los cauces se clasifican como de lecho simple o múltiple y de acuerdo al material de fondo como, rocoso o aluvial; cohesivo o granular; homogéneo o heterogéneo.

#### **Thalweg**

El thalweg es la línea del flujo en la cual el cauce es más profundo y el flujo posee mayor velocidad. Todos los cauces naturales poseen thalweg. Además, generalmente posee una tendencia a recorrer de un lado al otro del cauce y se acerca a la línea exterior del cauce en las curvas.

#### **Sinuosidad**

La sinuosidad es la relación entre la longitud total del thalweg en el tramo del río y la longitud en línea recta. Un cauce se considera semirecto cuando la sinuosidad es menor de 1.1 y se considera meándrico cuando la sinuosidad es mayor de 1.5. Cuando la sinuosidad se encuentra entre 1.1 y 1.5 se dice que el río es sinuoso.

#### **Barras**

Las barras son depósitos de sedimento junto a la orilla o dentro del cauce del río. El ancho de la barra aumenta progresivamente a medida que aumenta la tasa de erosión en la orilla opuesta, tratando de formarse una curva, por el cual ese aumento de tamaño tiene la posibilidad de convertirse en un meandro.

### 2.2.3.2 *Clasificación de los ríos por su forma en planta*

El cauce está condicionado por la forma del terreno y el tipo de naturaleza, así como por las características hidrológicas, etc. La clasificación de los ríos considera tres formas fundamentales:

#### **Río Recto**

Los ríos rectos son considerados ríos ideales ya que no existe un río completamente recto, pero pueden considerarse como tales a aquellos cuyo cauce no presenta curvas y alcanzan altas velocidades.

### **Río entrelazado**

El río entrelazado o trenzado está compuesto por varios cauces que se cruzan entre sí. Los ríos de esta forma tienen varios canales secundarios que se comunican entre sí y se forman bancos entre ellos. Estos canales se separan y vuelven a unirse, presentando un comportamiento divagante. Este tipo de río ocurre cuando el caudal sólido que transporta es superior al que puede transportar y como existen ocasiones donde el caudal líquido disminuye, entonces, estos sólidos no pueden ser transportados, depositándose en el lecho formando islas.

### **Río Meandro**

Los ríos meándricos presentan muchas inflexiones a lo largo de su recorrido y están formados por un conjunto de curvas consecutivas cuyo índice de sinuosidad es superior a 1,5 (valor referencial).

## **2.3 EROSIÓN DE RIBERAS EN RÍOS**

Los ríos meandros presentan procesos de erosión y sedimentación intensificados por acciones de la naturaleza o del hombre, por ello, como el flujo transita un recorrido curvo y presenta un comportamiento helicoidal, se forman corrientes secundarias donde la orilla externa y orilla interna presenta cambios. Asimismo, los meandros en el río Madre de Dios presentan migración lateral que afecta a centros urbanos o infraestructura cercanas a su ribera.

### **2.3.1 Factores que influyen en la erosión de riberas**

Las características que influyen en el proceso erosivo son las siguientes:

#### **2.3.1.1 Condiciones de flujo**

El aumento de la magnitud del caudal provoca un aumento de pérdida de partículas sólidas a causa del proceso erosivo.

La duración de una crecida puede resultar más perjudicial que su magnitud, sobre la estabilidad del talud de la ribera. El comienzo de la erosión en los bancos es similar al comienzo de la erosión en el lecho, en otras palabras, necesita más energía para superar la resistencia al flujo creada por la vegetación y otras fuerzas

cohesivas. Luego de poseer riberas sin resistencia debido a la duración, el proceso de erosión avanza aceleradamente y cuanto más tiempo dura la desprotección de los bancos mayor será las consecuencias como el desplome de puentes, socavación de pilates y estribos, caída de taludes o muros, etc. (ver Foto N°4)



Foto N° 4 Avenida en el río Rímac – Lima con tendencia de desplomar un muro de canalización.

### 2.3.1.2 Geotecnia

El proceso erosivo ataca al talud que presenta baja estabilidad debido a, así como factores que lo condicionan como los parámetros geotécnicos.

#### Parámetros Geotécnicos

La presión efectiva de rotura se puede expresar matemáticamente como la suma de dos términos, la cohesión efectiva y la fricción interna efectiva, como está escrito en la expresión 2.24:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (2.24)$$

Donde:

$$c' = c - u$$

- $c'$  =cohesión efectiva [kg/cm<sup>2</sup>]
- $c$  =cohesión [kg/cm<sup>2</sup>]
- $\sigma'_n$  =presión normal efectiva [Kg/cm<sup>2</sup>]
- $\varphi'$  =Ángulo de rozamiento o fricción interna efectiva [Kg/cm<sup>2</sup>]

- $\tau$  = Presión efectiva de rotura [Kg/cm<sup>2</sup>]

En el caso de suelos no cohesivos, como arenas y gravas, la cohesión es cero. En los suelos cohesivos, la presión de rotura depende normalmente de la cohesión y de la fricción interna, aunque puede ocurrir el caso de suelos arcillosos saturados por falta de tiempo que se produzca el drenaje.

### 2.3.1.3 Vegetación

La vegetación es un factor dominante para el éxito en estabilización de riberas contra los procesos erosivos en los ríos, ya que la principal influencia para aumentar la resistencia del suelo es la fuerza de fijación de las raíces. Esta fuerza permite regular el grado de cohesión entre las partículas del suelo mejorando su resistencia, debido al intercambio de esfuerzos entre el suelo y raíces, aumentando de esta manera la resistencia a perder partículas en las riberas como las altas zonas de vegetación en el río Madre de Dios. (ver Foto N°5)



Foto N° 5 Ribera de un río amazónico con presencia de vegetación.

### 2.3.1.4 Estabilidad de la ribera

El lecho del cauce sufre cambios de formas por efectos de sedimentación y socavación del mismo, en consecuencia, se manifiesta una inestabilidad como factor influyente de la erosión. La socavación del lecho favorece la erosión de las

márgenes. Asimismo, el aumento de la resistencia a la erosión sobre el material del lecho permite que los procesos erosivos actúen directamente sobre el material del margen.

### 2.3.2 Tipos de erosión en las riberas de los ríos

Las características del material que forma la ribera de un río representan directamente la resistencia a la erosión o pérdida de suelo. Estos materiales se pueden clasificar en dos tipos: cohesivo y no cohesivo

#### 2.3.2.1 Riberas de material no cohesivo

La erosión en las riberas constituidas por este tipo de material puede ocurrir de dos formas:

- a) Movimiento del material granular que forma la base del talud del margen, el cual depende del tamaño de la partícula, del ángulo del talud y de factores de carácter hidráulico como la velocidad del flujo y la turbulencia. El movimiento del material en esta forma causa erosión en la parte baja del talud provocando el deslizamiento del material de la parte alta para mantener un talud compatible con el ángulo de rozamiento interno del material que lo constituye.
- b) Deslizamiento superficial debido a la presión intersticial. (ver Figura N°7)



Figura N° 7 Tipos de erosión en riberas de material no cohesivo.

#### 2.3.2.2 Riberas de material cohesivo

Las riberas compuestas por materiales cohesivos presentan la característica de baja permeabilidad debido al grado de cohesión que presentan. La saturación y drenaje de la ribera son las principales causas de erosión en este tipo de material.



El aumento del peso específico del material cohesivo y una reducción de la presión interna es provocado por la dificultad de disipar las presiones intersticiales con un adecuado drenaje, estas presiones son las que causan la desestabilización del talud. Los deslizamientos de masa de suelo a lo largo de la superficie de falla son normalmente en un margen compuesto por este tipo de material. (Ver Figura N°8)

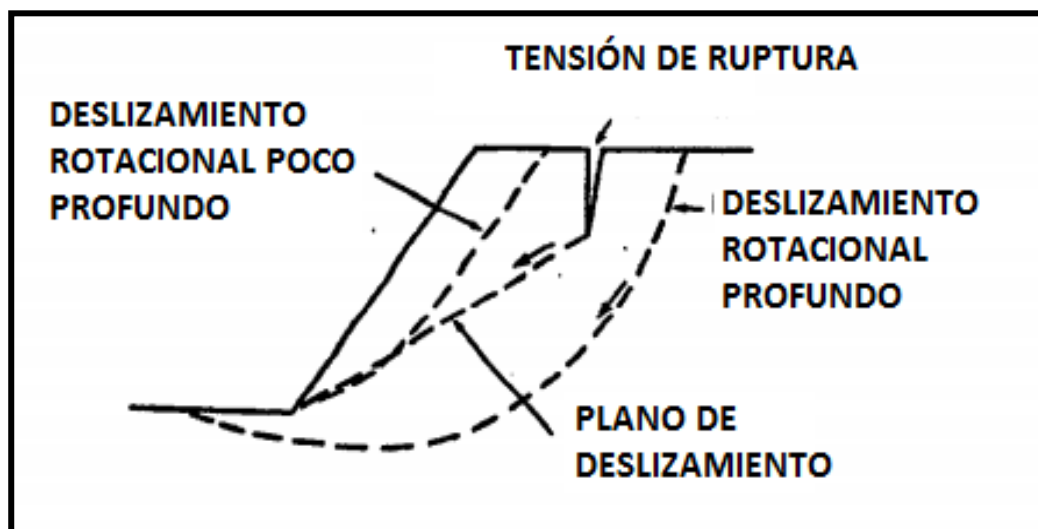


Figura N° 8 Mecanismo de falla de una ribera cohesiva.

### 2.3.3 Flujo curvilíneo

Las velocidades más altas del flujo curvilíneo se encuentran en la ribera exterior a diferencia de los flujos en ríos rectos donde las altas velocidades se encuentran en el centro del cauce, en consecuencia, la producción de altas líneas de velocidad en la ribera externa genera el fenómeno de erosión lateral. El lado exterior del cauce toma una forma semi vertical y la superficie del agua se sobre eleva. El flujo en ríos curvos está influenciado por aceleración centrífuga, que induce un flujo tridimensional caracterizado por un movimiento helicoidal (tipo tornillo).

### 2.3.4 Corrientes secundarias

El proceso erosivo en un meandro no se explica debido al movimiento del agua en dirección a su eje principal, sino que son necesarias otras consideraciones debido a la existencia de componentes de la velocidad en otras direcciones distintas a la principal. El flujo desarrolla corrientes secundarias que aparecen

tanto en los tramos rectos como en los curvos, pero son más intensos en las curvas. Además, en los meandros estas corrientes secundarias son causadas principalmente al comportamiento helicoidal del flujo; las corrientes secundarias distorsionan la distribución de isovelas y también los esfuerzos de corte en la superficie del cauce (Thorne y otros, 1983) donde se puede apreciar dos graficas en la parte curva y en la recta. (ver Figura N°9).

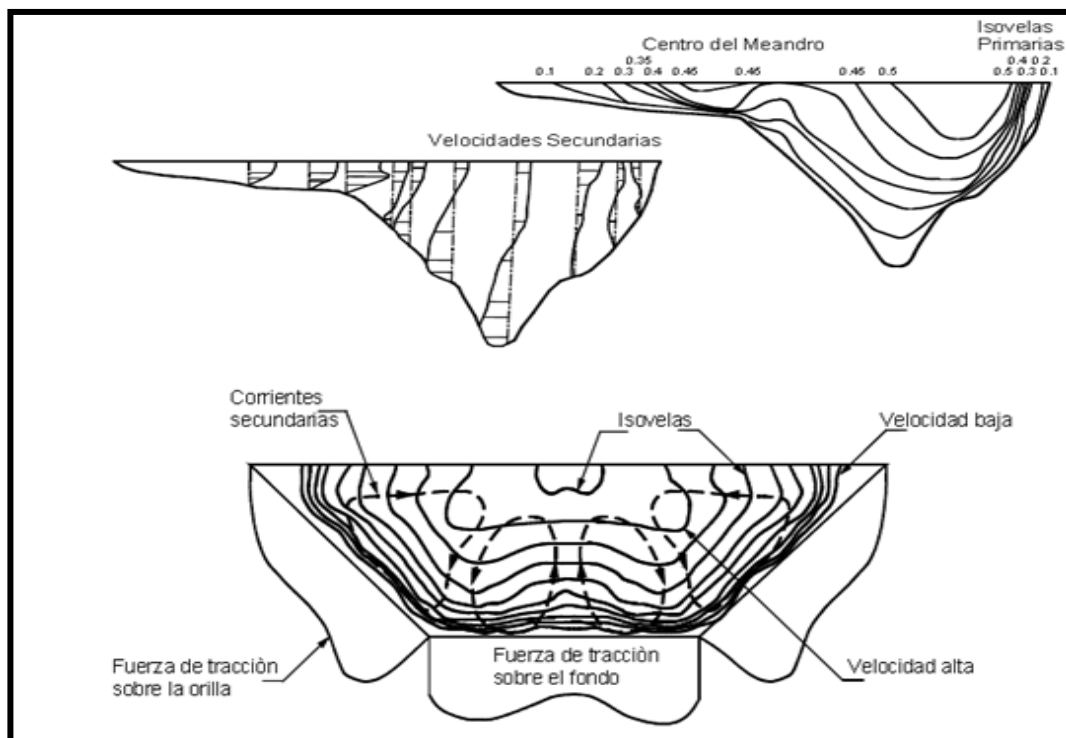


Figura N° 9 Corrientes secundarias en la parte curva y recta de un río con sus respectivas isovelas.

### 2.3.5 Formación y migración de los meandros

El comportamiento de meandros es una divagación de curvas repetidas en dirección contraria dentro de un ancho general, donde ocurre un flujo curvilíneo helicoidal con áreas de erosión y deposición. La hidráulica de los meandros se asemeja al flujo en tuberías curvas, donde se ha demostrado que cuando existe una relación radio de curvatura con ancho de casi dos, ocurre una resistencia mínima por causa de la curvatura (Bagnold, 1960). Los meandros necesitan llegar al equilibrio dinámico de igual manera que las tuberías, aunque la migración lateral del meandro prosigue aguas abajo así se llegue al equilibrio esperado (Phelps, 1983).

La inestabilidad del fondo puede causar la formación de barras alternadas y estas barras a crecer fuerzan al flujo a la formación de meandros; igual situación ocurre cuando se tiene un río de lecho aluvial sinuoso con riberas erosionables. La sinuosidad genera una inestabilidad lateral y la formación de fosas en el extradós de las curvas. (ver Figura N°10).

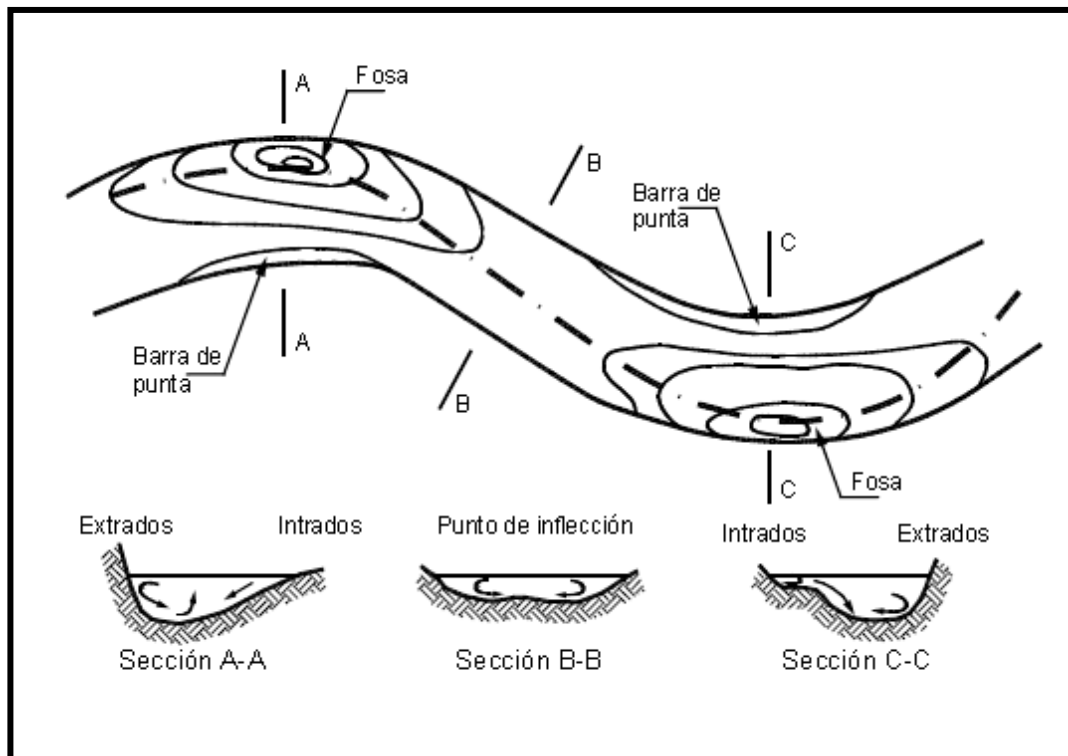


Figura N° 10 Obtención de cortes transversales del meandro con efectos de inestabilidad lateral.

## 2.4 ESPIGONES

Los espigones son considerados diques transversales a la dirección del flujo en cauces naturales, fundado en la orilla de río en donde pueden estar empotrados o no, con la función de proteger la ribera por acciones antrópicas o naturales. Los espigones tienen la función de controlar la circulación efectuada por las aguas altas. Por ello, la forma de proteger la ribera beneficia el cauce con el incremento de finos en los espacios entre espigones, permitiendo formar nuevos márgenes que estabilizan el cauce principal reducido en ancho. (Figura N°11)

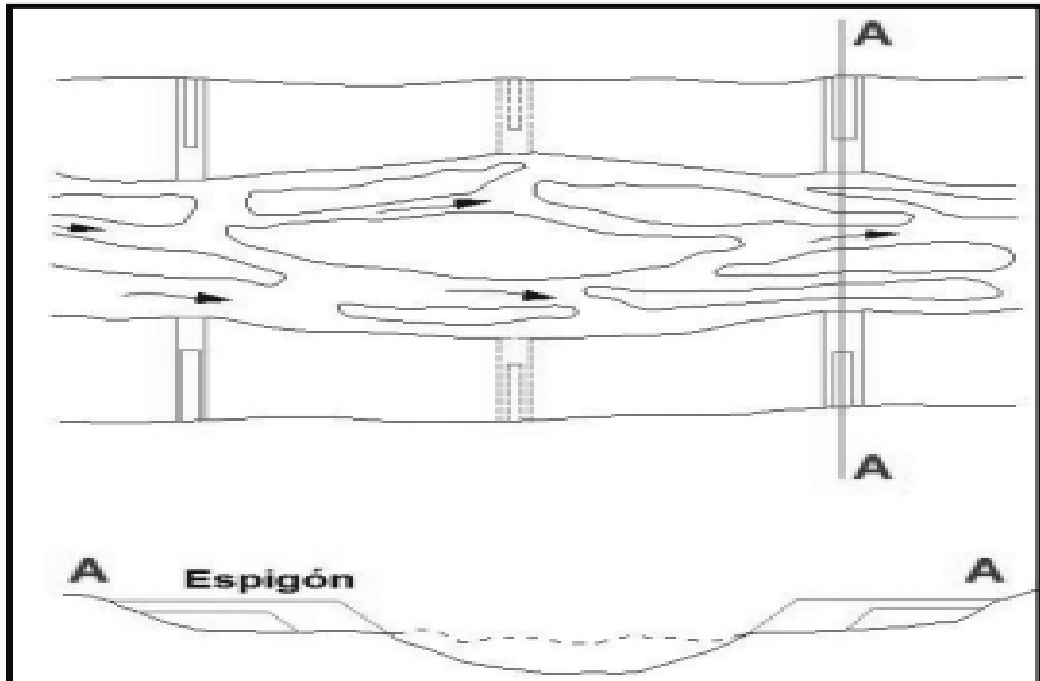


Figura N° 11 Reducción del ancho de un río entrelazado por un sistema de espigones.

En diferentes partes del mundo se utiliza la ingeniería de atascos de troncos como alternativa de protección y restauración de riberas debido al uso de entramados de troncos de arboles.

#### 2.4.1 Estado del arte de las estructuras grandes de material madera

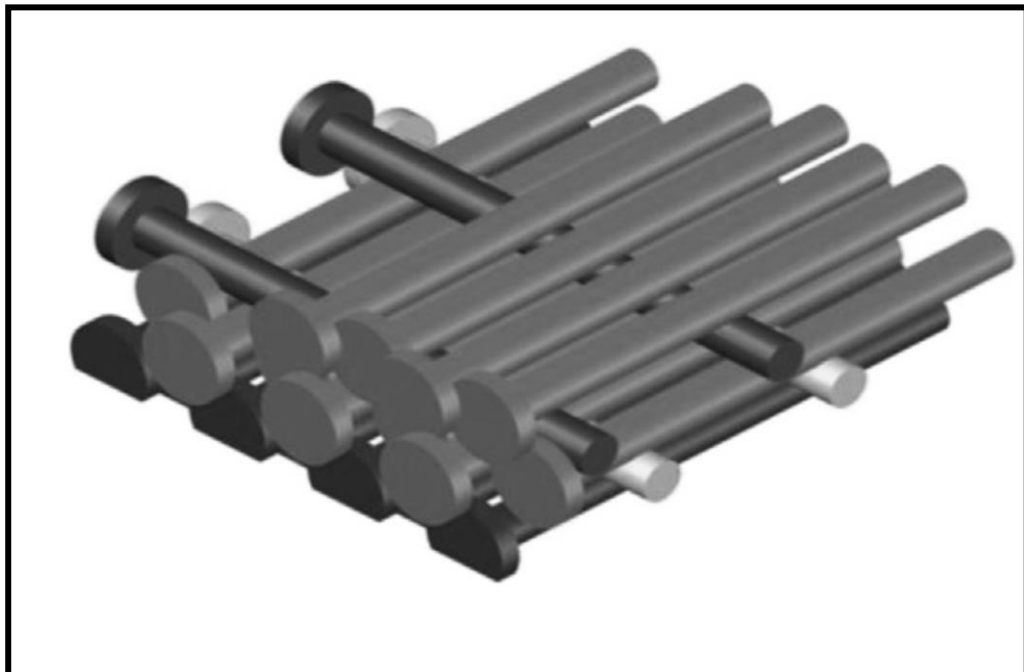
Se desarrolla una reseña de la historia y descripción de la guía de diseño de entramados de troncos como un sistema de defensas en los ríos como una metodología de su restauración.

##### 2.4.1.1 Historia

La madera es un elemento disperso en la Amazonía peruana y puede servir para entramar troncos y formar espigones para la protección de las riberas como técnica de bioingeniería, formándose estructuras de control de flujo y mitigación de la erosión lateral. De esta manera, se evitaría utilizar materiales más costosos como concreto o rocas.

En los últimos años en los proyectos de ingeniería de ríos y restauración de arroyos se emplea el uso de los entramados de troncos (ver Figura N°12), este

término nació a partir del uso de largos restos de madera. Estas estructuras representan actualmente una alternativa ecológicamente sensible y multifuncional en la corriente, la reintroducción de espigones fabricados por troncos de árboles tiene muchos beneficios para los ríos y arroyos degradados, siendo un método potencial para restaurar o rehabilitar los daños ecológicos (Abbe y otros 2003a y Brooks, 2006). Estas estructuras se han usado con éxito para proteger riberas vulnerables y al mismo tiempo incrementar el habitat del río (Abbe y otros 2003). Si bien existen algunos criterios de diseño para los espigones, también existen algunos vacíos muy importantes que todavía carecen de comprensión e implementación a los efectos a largo plazo en la morfodinámica del río.



*Figura N° 12 Representación de un entramado de troncos de árboles.*

#### 2.4.1.2 Guía de diseño basado en riesgo

La guía describe los proceso basado en riesgos (Knutson y otros, 2014), en el diseño y colocación de grandes materiales leñosos dentro de los ríos y arroyos de todo el Noroeste Pacífico.

Actualmente, no existen estándares oficiales de diseño, construcción y colocación de estas estructuras, por lo tanto se crearon estandares nacionales para el diseño y colocación de las estructuras grandes de madera, la cual se redactó por el

cuerpo de ingenieros del ejercito de los Estados Unidos. Por ello, el diseño del sistema de espigones por entramado de troncos se realizó con esta guía como apoyo de investigación. (Knutson y otros, 2014)

#### 2.4.2 Elección de tipo de madera

La elección del tipo de madera dependerá de la que abunde en la zona, así como de los costos de transporte que se requieran para desplazarlos.

Los criterios para la elección del tipo de madera son la zona de crecimiento, altura máxima del tronco, altura comercial, diámetro a la altura del pecho, densidad básica y diámetro de la troza (ver Figura N°13). Sin embargo, la propiedad física que tiene mayor relevancia para ser considerado criterio de elección es la densidad, ya que la madera más densa presenta mayor dureza causando menor capacidad de absorción de agua que altera su densidad. Por lo tanto, una madera más densa presenta mayor resistencia a los agentes biológicos y menos flotabilidad.

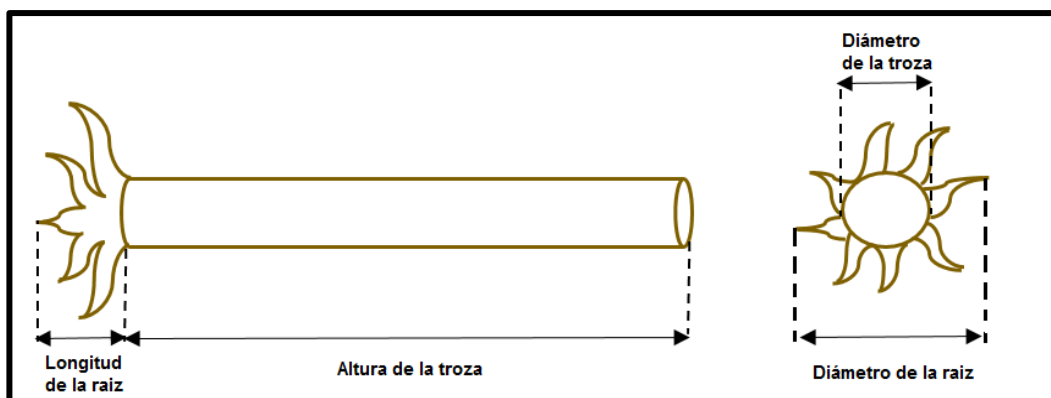
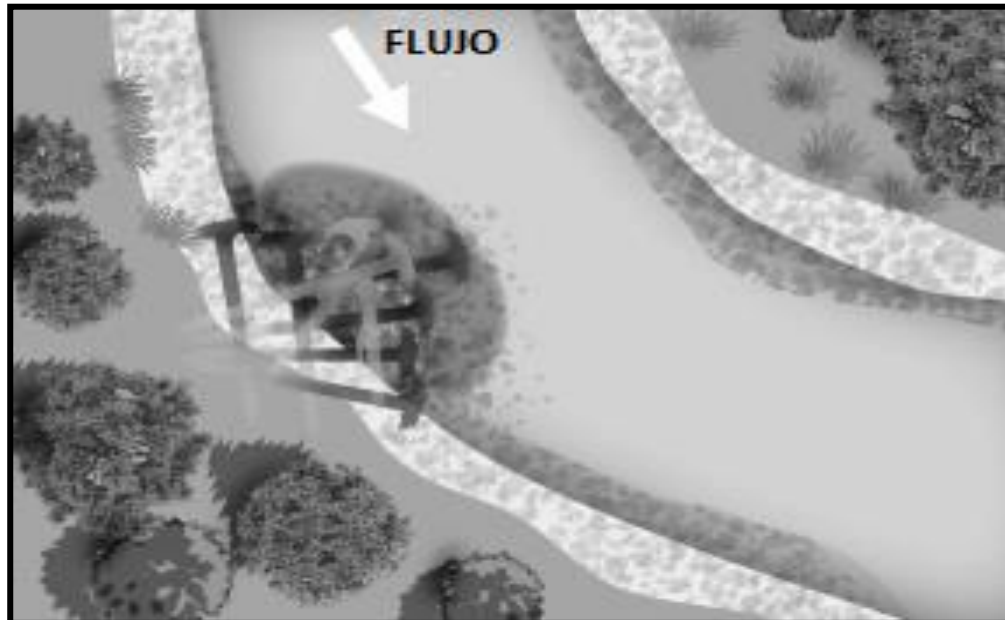


Figura N° 13 Esquema de las dimensiones de un tronco de árbol.

#### 2.4.3 Tipos de estructuras grandes de material de madera

El principal objetivo de colocar espigones fabricados de troncos de árbol a lo largo de la margen derecha del tramo “La Pastora” (Río Madre de Dios) es proteger la ribera. Por ello, este sistema de defensa se puede colocar de la siguiente manera:

- a) Estructuras tipo protección del talud, localizadas a lo largo del cauce y muchas veces empotradas en el talud (ver Figura N°14). Estas estructuras permiten deflectar las líneas de corriente hacia el cauce principal para evitar altas tasas de erosión del talud.



*Figura N° 14 Ilustración de una estructura tipo protección bancaria.*

#### 2.4.4 Selección del tipo de Estructura

La configuración de una estructura de material de madera se seleccionará manejando criterios que son empleados para la estabilización de un río o rehabilitación de habitats:

- La configuración deberá controlar los procesos erosivos que se produzcan en el lugar de estudio.
- Los habitats que sufren deficiencia por parte de su cobertura deberían ser abordados en la selección.
- La selección de la estructura debe funcionar con adecuada interrelación con la respuesta geomorfológica del río.
- Deben ser considerados el aspecto económico, político y el proceso constructivo.
- Deben ser usados adecuados materiales por su accesibilidad y costo.

- f) Se debe tener en cuenta que las estructuras como diques o espigones que se proyecten dentro del flujo crean gran diversidad de habitats, por la protección de riberas.

#### 2.4.5 Criterios de diseño

Los criterios presentados son basados en resultados de investigaciones, las cuales son útiles para el diseño.

##### 2.4.5.1 Localización en planta

Para la ubicación de defensas ribereñas, se requiere trazar en planta el eje del río y cerca a las orillas o márgenes otra línea de frontera compuesta por los extremos de los espigones reconocida como línea de defensa (ver Figura 15).

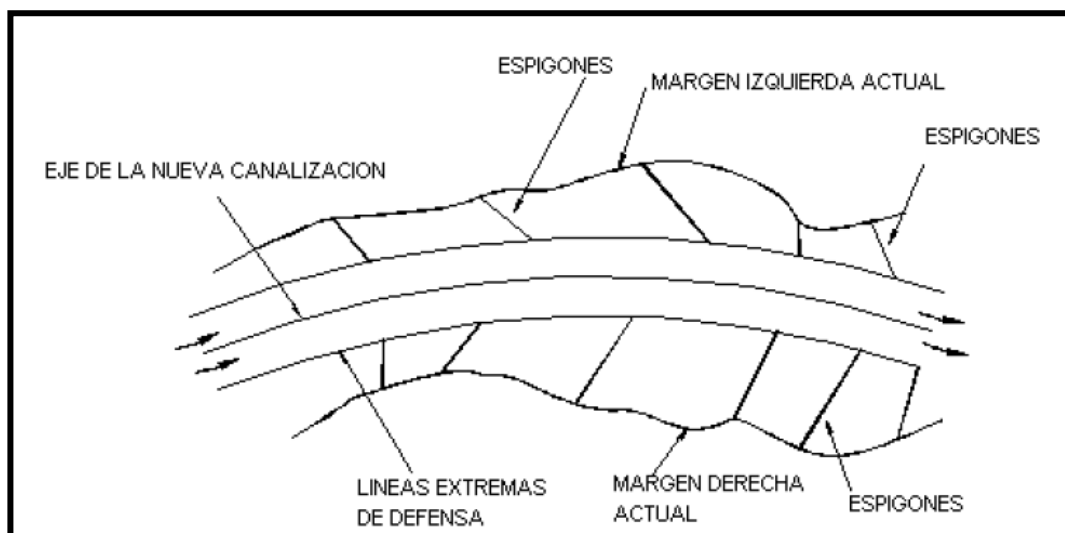


Figura N° 15 Trazo en planta del eje de un río y líneas extremas de defensa.

El ancho estable se obtiene en función del caudal dominante, características físicas del material de fondo y orillas, y de la pendiente del río, siendo ese ancho la separación entre las nuevas orillas de defensa. Además los radios de curvatura para el eje del río se encuentra en los siguientes límites:

$$2B \leq 5r \leq 8B \quad (2.25)$$

Donde B es el ancho medio de la superficie libre en los tramos rectos, en m.



Con la recomendación de radio de curvatura, las altas profundidades se posicionan cerca a la orilla externa de la curva para no formar acumulaciones de sedimentos, como islas de arena.

Dicha obra de protección debería incidir en el flujo contra la margen protegida y las margenes de las curvas situadas aguas arriba no deberan sufrir por un proceso de erosión.

#### 2.4.5.2 *Permeabilidad*

Los espigones puede ser impermeables o permeables, con respecto a los espigones impermeables permiten separar de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad, mientras que los permeables permiten que el agua pase a través de ellos con velocidad disminuida. La determinación de una permeabilidad particular del espigón solo requiere el cálculo del área no obstruida que hace frente la estructura (Brown,1983).Una recomendación sería asignar una permeabilidad no mayor al 35 % cuando la estructura esta siendo utilizada en una curva pronunciada, un alto nivel de flujo sobre el río, o una reducción significativa en velocidad de flujo en el tramo proyectado (Design of Spur-type Streambank Stabilization Structures,1983).

La mayoría de los espigones permeables se complementan con troncos de árbol y pilotes de madera formando un entramado permitiendo la sedimentación entre espigon y espigon, dando como resultado nuevos margenes en el río.

Apoyándose en los resultados de laboratorio del estudio de la FHWA que indican que para un espigón con una permeabilidad asignada, el ángulo de expansión de flujo aguas abajo de la punta del espigón varió solo con la longitud del espigón. (ver Figura N°16)

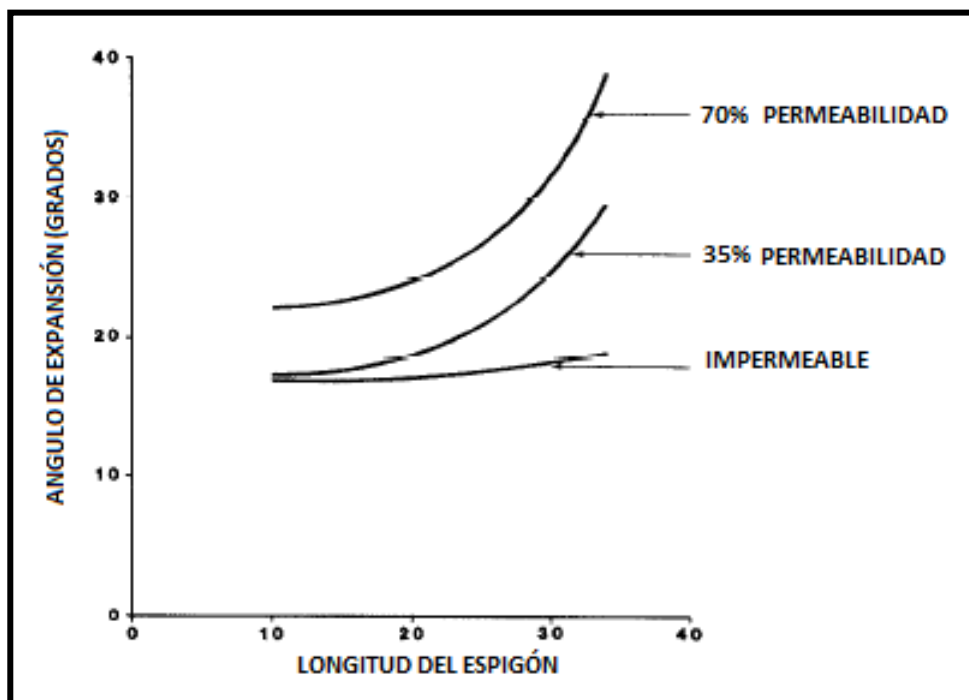


Figura N° 16 Relación entre la longitud del espigón y el ángulo de expansión para diferentes permeabilidades.

Como indica la Figura anterior el ángulo de expansión de flujo para espigones impermeables es casi constante en el valor de 17 grados. En contraste, el ángulo de expansión de flujo para los espigones permeables incrementa exponencialmente con la longitud de espigones proyectada hacia el río.

#### 2.4.5.3 Longitud del espigón ( $L$ )

La longitud total del espigón se define por una longitud de trabajo que esta dentro del cauce y una longitud de empotramiento que esta insertada dentro del margen

$$L = L_t + L_e \quad (2.27)$$

En otras palabras, la longitud de trabajo se encuentra normalmente entre los siguientes límites:

$$Y_n \leq L_t \leq B/4 \quad (2.28)$$

Donde:

Yn: Tirante o profundidad del río asociado al caudal formativo, donde se construya el espigón.

B: Ancho medio del río.

La longitud de empotramiento puede ser nula cuando el extremo del espigón y el margen hacen contacto; otra acotación, la máxima longitud de empotramiento es igual a un cuarto de longitud de trabajo.

$$L_e = 0.25 L_t \quad (2.29)$$

#### 2.4.5.4 Separación entre los espigones ( $S_s$ )

La distancia medida a lo largo de la orilla se reconoce como la separación entre espigones y depende de la longitud del espigón de aguas arriba y de su orientación, así como la configuración de la margen.

El cálculo de la separación entre espigones, se basa en la expansión teórica que sufre la corriente al circular frente al extremo del espigón, dicho ángulo " $\beta$ " varía entre  $9^\circ$  y  $11^\circ$ .

#### Separación en tramos rectos

Una recomendación para la separación entre espigones en un tramo recto, cuando la línea de defensa es paralela a la línea de margen (ver Figura N°17), es lo siguiente:

Tabla N°4 Ángulo de orientación vs Separación.

Fuente: "Estabilidad y Rectificación de cauces" Jose Antonio Maza Alvarez

Ángulo ( $\beta$ )	Separación $S_s$
$70^\circ$ a $90^\circ$	$(4.5 \text{ a } 5.5) L_t$
$60^\circ$	$(5 \text{ a } 6) L_t$

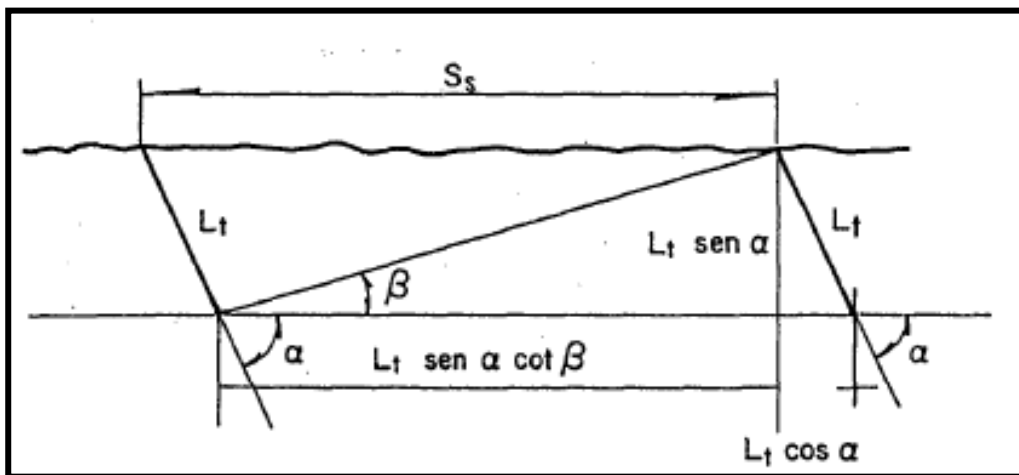


Figura N° 17 Espaciamiento de espigones en tramos rectos.

### Separación en curvas

En las curvas regulares, la separación entre espigones ubicados en los márgenes que sostienen un unico radio de curvatura (ver Figura N°18), puede variar entre los límites siguientes:

$$S_c = (2.5 \text{ a } 4) L_t \quad (2.30)$$

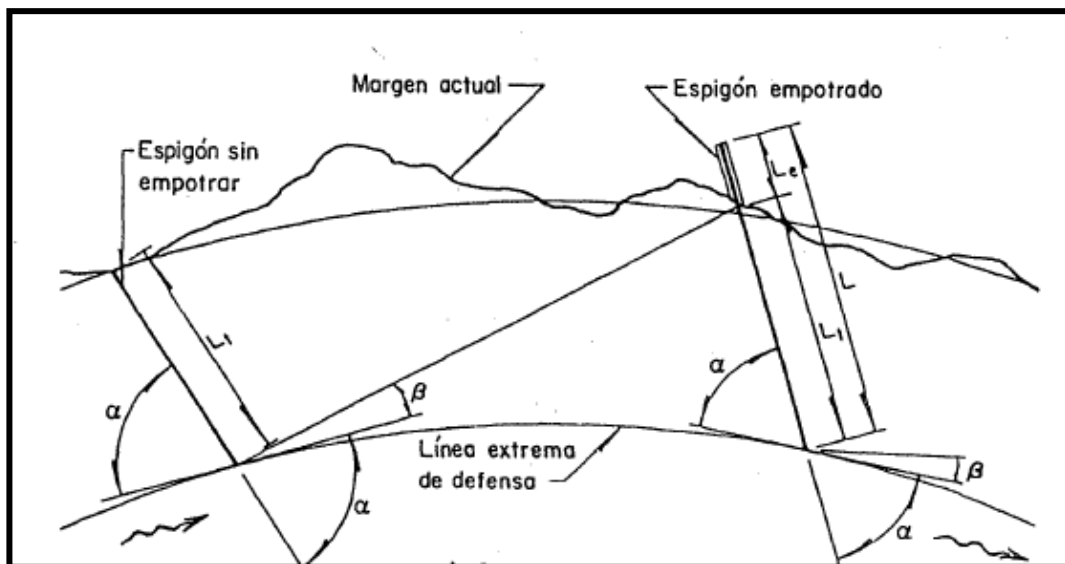


Figura N° 18 Espaciamiento en curvas regulares.

Y en las curvas irregulares, la separación entre espigones se obtiene por forma grafica (ver Figura N°19) con longitudes y angulos de orientación señaladas.

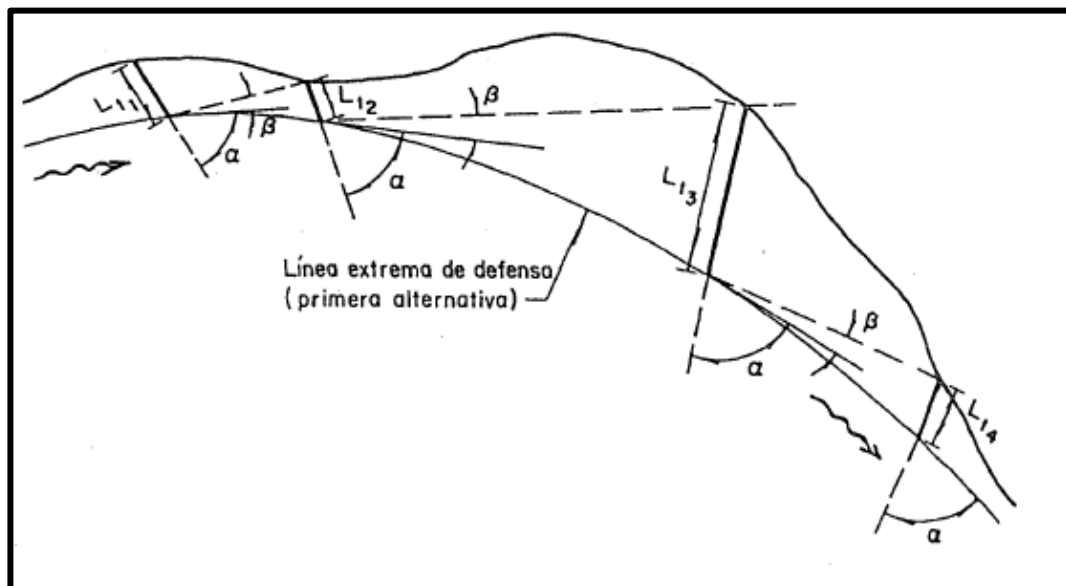


Figura N° 19 Espaciamiento en curvas irregulares.

#### 2.4.5.5 Orientación del espigon ( $\alpha$ )

El ángulo de orientación se mide con el eje longitudinal del espigón con respecto a la tangente dibujada sobre la línea extrema de defensa en el punto de contacto con el espigón y medido hacia aguas abajo. La orientación puede ser sobre aguas abajo ( $\alpha < 90^\circ$ ), aguas arriba ( $\alpha > 90^\circ$ ) y perpendicular a la dirección del flujo ( $\alpha = 90^\circ$ ). La influencia generada sobre el flujo varía diferente por cada opción de orientación y por lo tanto la socavación y sedimentación alrededor del espigón varía diferente por cada opción de orientación.

#### **Orientación perpendicular a la dirección del flujo**

Generalmente esta forma de orientación se usa para espigones impermeables para la formación de un canal central de navegación en un río. La normalidad del espigón puede ser respecto a la orilla o a la dirección del flujo.

#### **Orientación inclinada aguas abajo**

La orientación del espigón que se encuentra a favor del sentido del flujo produce erosión más cerca de la orilla. (ver Figura N°20)

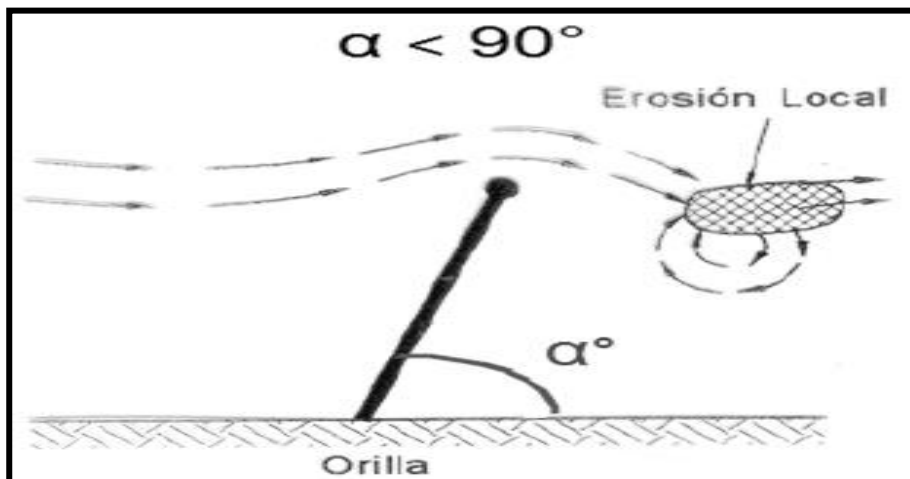


Figura N° 20 Orientación en sentido del flujo.

Por referencias bibliograficas, se recomienda que el angulo de orientación en dirección al flujo forme 70° por conveniencia para tramos rectos y curvas regulares como también, si se tiene un radio de curvatura menor de 2.5B para curvas irregulares, sus angulos de orientación serán limitados entre 30° a 70° (Maza,1995). Además, los espigones dirigidos aguas abajo presentan un mejor comportamiento desde el punto de vista de socavación, deposición, tirante del canal y alineamiento (Franco, 1987). En la siguiente tabla se puede observar angulos de orientación recomendados.(ver Tabla N°5)

Tabla N°5 Ángulo entre el espigón y la orilla aguas abajo.

Fuente: "Estabilidad y Rectificación de cauces" Jose Antonio Maza Alvarez.

Ángulo recomendado	Referencia
100° a 120°	Central Board of Irrigation and Power, 1971
100° a 110°	Mamak, 1964
90°	U.S.Army, Corps of Engineers, 1983 (en Copeland,1983)
90°	Missouri River (Lidner, 1969)
75° a 90°	Red River, Arkansas River (Lindner, 1969)
75°	U.S.Army Corps of Engineers, Los Angeles District, 1980 (en Copeland,1983)

### Orientación inclinada aguas arriba

Esta orientación presenta un efecto en contra del flujo (ver Figura N°21). Los espigones con esta orientación producen mejor escenario en lo que respecta a sedimentación de partículas sólidas y a la desviación del flujo. Los ángulos más recomendados están entre 100° y 120° (Richardson, 1990).

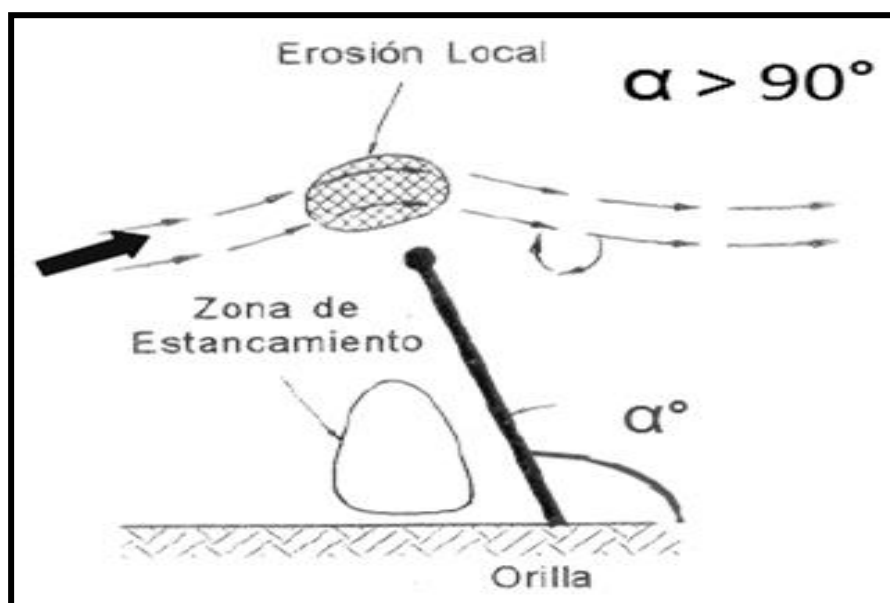


Figura N° 21 Orientación del espigón en contra del flujo.

La separación entre espigones y su función para reducir a erosión lateral serán influidos por el ángulo de orientación aguas arriba, ya que la variación del ángulo podría beneficiar o perjudicar la protección de riberas.

#### 2.4.5.6 Pendiente Longitudinal, Elevación del espigón y ancho de la cresta

La pendiente longitudinal de un espigón puede ser horizontal o también puede componer una pendiente de 25% en dirección al centro del río. Para incrementar el margen del río es común construir espigones con cresta horizontal para mejorar la navegación. Sin embargo, el espigón puede poseer una pendiente longitudinal hacia el interior del cauce para proteger o rectificar el tramo del río.

La elevación del espigón hasta la cabeza depende del tipo de río, ya que existen zonas de planices donde la elevación es igual al margen o zonas intermedias y montañosas donde la elevación es igual al nivel del agua correspondiente al gasto formativo.

El ancho de la cresta del espigón depende de los materiales de construcción y del procedimiento empleado para la construcción, ya que existe maquinarias para el transporte y colocación del material de uso con anchos específicos. Además, el ancho del espigón dependerá de las piezas que forman los espigones como los troncos, pilotes o tabla-estacados.

#### *2.4.5.7 Material de Construcción*

La construcción de espigones se realiza con una variedad de materiales y elementos. Entre ellos se puede enumerar los más usados tabla-estacados de madera o concreto, troncos de árboles y ramas, elementos prefabricados de mortero o concreto, elementos prefabricados de acero y alambre, diques de escollera, diques de gaviones y pilotes reforzados y rellenos con sacos de terreno. Además, La necesidad de colocar protecciones fluviales abarca también proteger la cimentación con algún tipo de geotextil debajo, para evitar el fenómeno de sifonaje. Existen alternativas de solución que por su material empleado presentan costo referenciales que a pesar de ser económico, podrian producir problemas ecológicos a futuro. (ver Tabla N°6)



Tabla N°6 Comparación de las alternativas de solución.

Fuente: "Uso de Geosintéticos en Defensas Ribereñas de Ríos de Selva Baja" Fernandez J.L. (2012).

Alternativas de solución	Costo Referencial (S/.) por cada 100 metros
Geobolsas y Mantas granulares	233,500
Tablestacas de Concreto Armado	959,700
Espigones de Bolsacreto	792,000
Enrocados	962,500
Pilotes Metálicos y Bloques Prefabricados	679,700
Geomallas - Gaviones	909,700
Geotubos	315,000

#### 2.4.6 Diseño geométrico en planta

Las estructuras grandes de madera necesitan un enfoque paso a paso para establecer el trazo geométrico de un esquema de espigones. La Figura muestra un tramo de meandro que ha cubierto un área erosionada y un área depositada. (Ver Figura N°22)

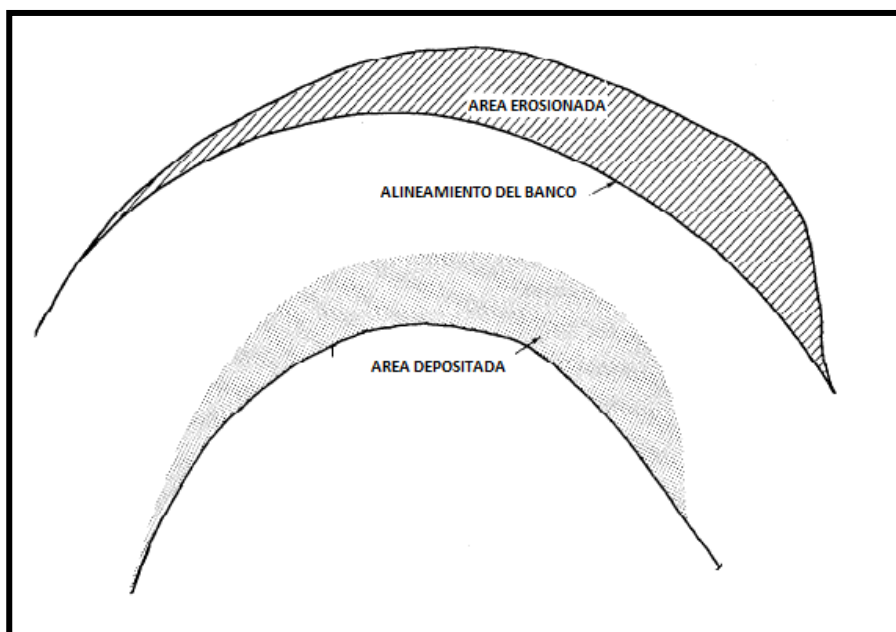


Figura N° 22 Ilustración del meandro con sus bancos erosionados y depositados.

En esta situación, se desea establecer la línea de banco que existía anteriormente frente al fenómeno de erosión mostrado. También debido a la curvatura del río y la necesidad de una deflexión de flujo positivo, será diseñado un esquema de espigones respetando los siguientes pasos:

**Paso 1:** Establecer los límites de control del flujo y el esquema de estabilización de curvas. El procedimiento usado para establecer los límites del esquema del control de flujo es ilustrado en la Figura N°23. Primero, se define el área del banco erosionado, debiendo realizarse inspecciones de campo.

Luego se señala los límites mínimos de protección. Como se ilustra, una distancia de 1.5 veces el ancho del canal es medido hacia aguas arriba de la curva, para localizar el mínimo límite de protección.

El límite aguas arriba del control de flujo o protección de banco se establece midiendo una distancia igual al ancho del canal aguas arriba de la línea de referencia. La línea de referencia aguas arriba se establece proyectando una tangente al banco convexo sobre aguas arriba del inicio de la curva. En este caso, sin embargo, la erosión del banco fue observada aguas arriba de este límite. Por lo tanto, el límite aguas arriba de protección se establece en el punto donde se observa área erosionada.

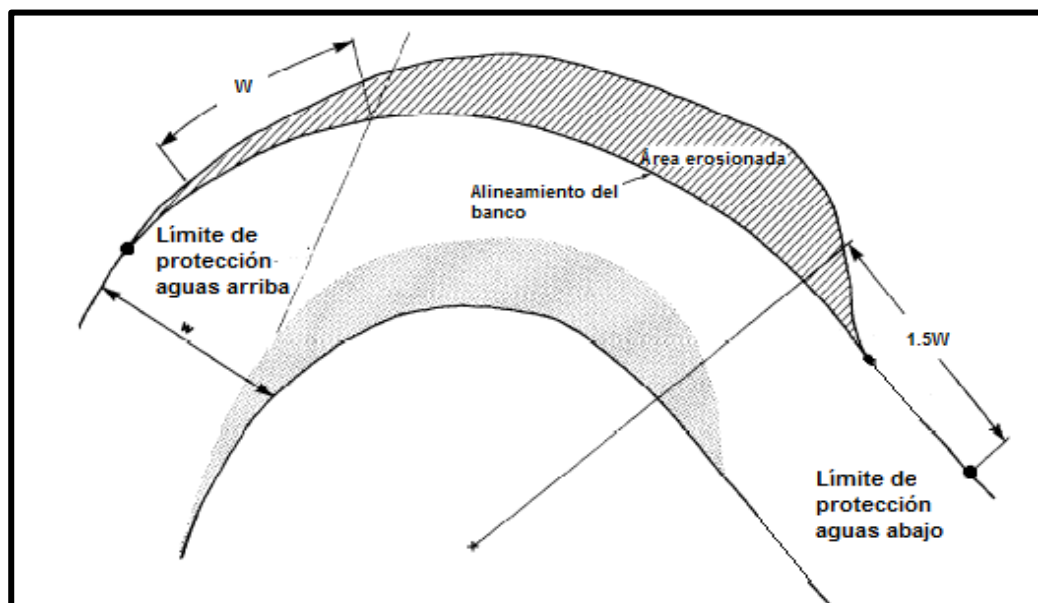


Figura N° 23 Establecimiento de los límites mínimos de protección.

**Paso 2:** Establecer el alineamiento requerido y la máxima constricción del flujo. El objetivo aquí es cambiar el alineamiento del flujo en el canal, al que existía antes de la erosión del banco e trazar el alineamiento requerido (ver Figura N°24). La línea discontinua representa un 10% de constricción del ancho del canal. Este 10% de constricción fue seleccionado aquí para minimizar la socavación local y concentración de flujo en la punta del espigón. Limitando la constricción del flujo al 10% también se minimiza la presencia de corrientes deflectoras de espigones que ingresen al puesto del banco del canal.

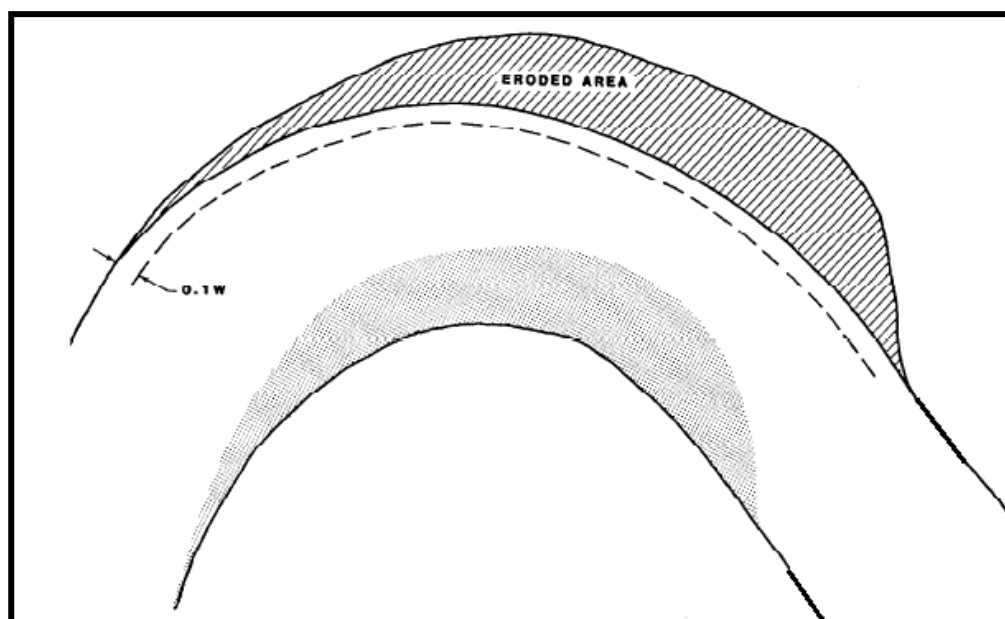


Figura N° 24 Establecimiento de la máxima constricción del flujo.

**Paso 3:** El criterio de diseño para espaciado y orientación depende de la predicción de la localización del thalweg del flujo en el canal para varias condiciones. Se considerarán tres localizaciones del thalweg que corresponderán a los niveles bajo, medio y alto del flujo. La Figura representa graficamente las tres localizaciones del thalweg (ver Figura N°25). Un completo conocimiento del flujo en cauces naturales curvos se requiere para una estimación precisa de la localización del thalweg.

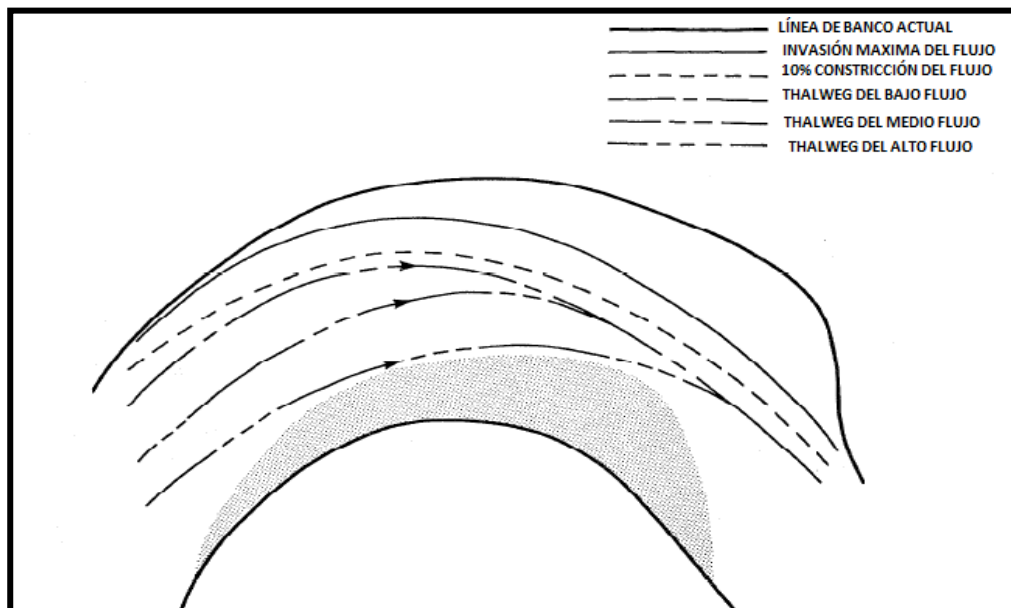


Figura N° 25 Estimar las localizaciones de thalweg por varias condiciones de flujo.

**Paso 4:** Localización y orientación del primer espigón. La Figura ilustra el procedimiento usado para localizar y orientar el primer espigón aguas arriba. Primero la línea R1 del radio de la curva es dibujada desde el centro de curvatura a través del punto, definiendo el límite aguas arriba de la protección, como se definió en el paso uno (ver Figura N°26). Luego, se traza una tangente al flujo para la línea de corriente estimada en la punta del espigón. Comúnmente, se usa la localización del thalweg para un flujo de bajo nivel, porque generalmente se sigue ese alineamiento. Un flujo tangente es ilustrado en la Figura como la línea A-A' (ver Figura N°35). El ángulo del espigón de 150° es entonces girado en una dirección aguas arriba (sentido horario) desde la línea A-A', para establecer la línea B-B, que es paralela a la deseada orientación del espigón a través de la línea del ancho constricto donde intercepta el radio de la línea (R1). La línea B-B' entonces es dibujada a través del punto definido en el límite aguas arriba de protección (Localización del punto del espigón) paralela a la línea B-B. Esta línea define la localización del centro de línea del espigón. La longitud del espigón se establece entre la línea del banco erosionada y el 10% de la línea de constricción del flujo.

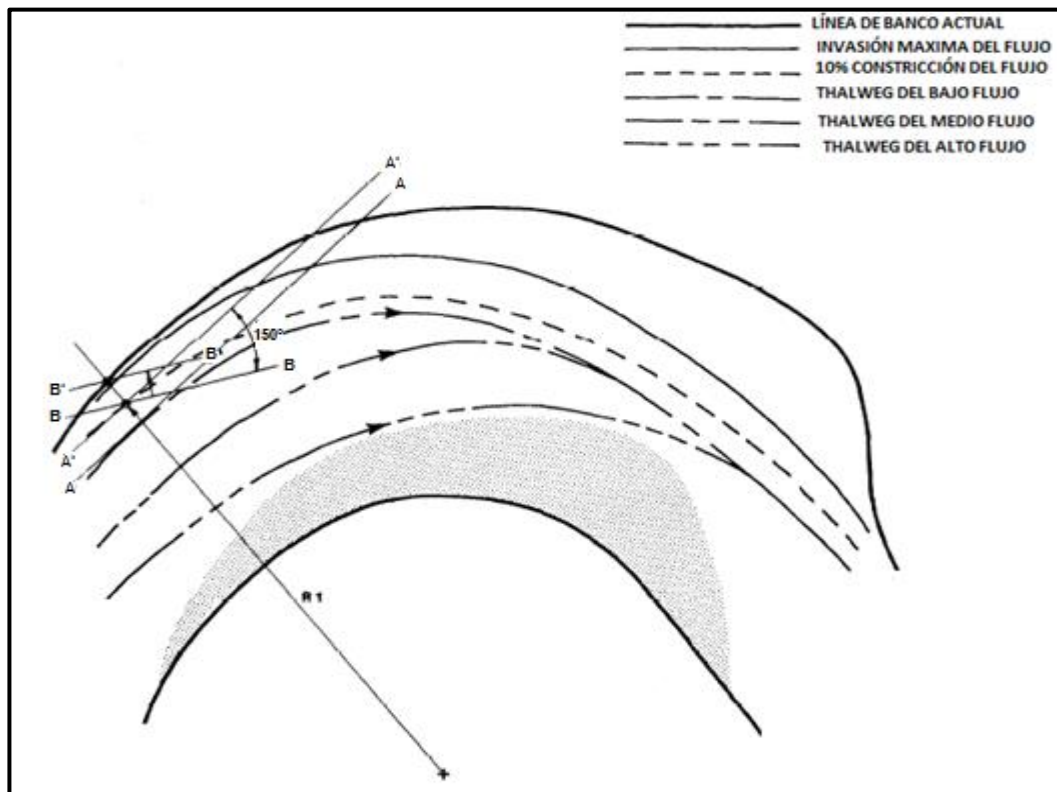


Figura N° 26 Localización y orientación del primer espigón.

**Paso 5:** El enfoque para la localización del segundo espigón es ilustrado (ver Figura N°27). Este mismo método será usado para localizar cada espigón que siga. Primero, otra línea de radio, (ver Figura N°26), es ilustrado a través de la punta del espigón anterior. La localización del próximo espigón aguas abajo depende en la orientación de una tangente al thalweg del canal donde intersecciona a la línea R2. Sin embargo, nosotros tenemos esquematizado tres líneas de flujo de thalweg representando diferentes condiciones de flujo. El apropiado thalweg de flujo es para la condición de flujo que intersecciona a la línea R2 para la punta del primer espigón como se indica en la línea A'-A' en la Figura. Desde la línea A'-A', un ángulo de expansión de 17° (determinado para espigones impermeables en 10% de constricción) es girado hacia la línea del banco cóncavo. La localización del próximo espigón aguas abajo es definido por el punto en el cual la línea rotada intersecciona la máxima línea de invasión de flujo y este punto se indica por un asterisco (\*). (ver Figura N°36)

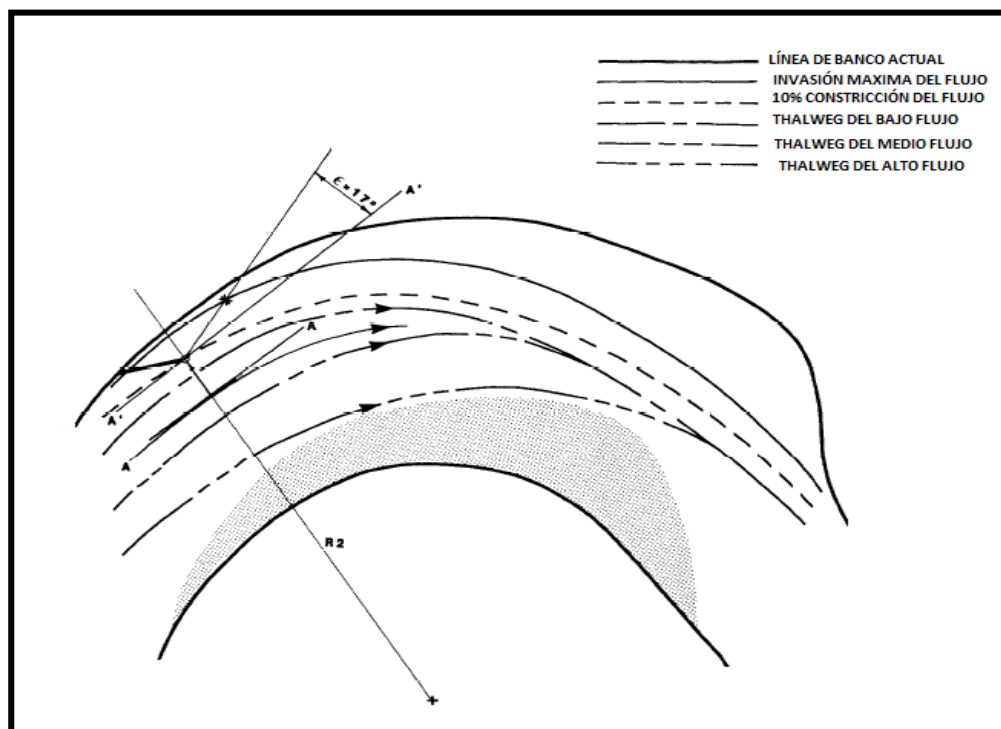


Figura N° 27 Localización del segundo espigón.

**Paso 6:** Orientación del segundo espigón y los siguientes. Se realiza de la misma manera que la orientación del primer espigón, (ver Figura N°28), el primer paso es dibujar una línea de radio  $R_3$ , a través del punto de localización del espigón (\*). Luego, una tangente de la línea de corriente dibujada por las puntas de los espigones representada como línea A-A como en el paso cuatro. La línea A-A es cambiada a lo largo de la línea  $R_3$  para la intersección con la línea de corriente formada por las puntas (Línea A'-A'). El ángulo del espigón de  $140^\circ$  es girado en sentido horario desde la línea A'-A' para establecer la línea B-B. La línea B'-B' es dibujada a través de la localización del punto del espigón (\*) brindándole una orientación fija. La línea B'-B' define el centro de la línea del segundo espigón. La longitud del espigón es establecido entre la línea del banco erosionado, y el 10% de constricción del flujo.

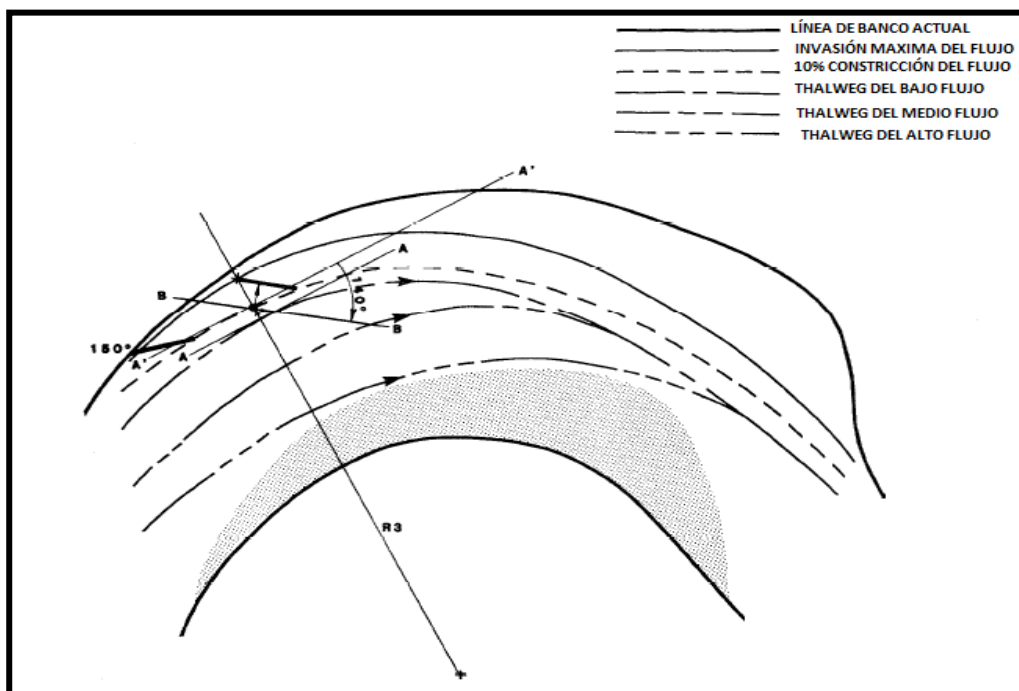


Figura N° 28 Orientación del segundo espigón.

**Paso 7:** Establecimiento de la localización y orientación de los siguientes espigones. Los pasos cinco y seis se repiten, solamente con la consideración de respetar el límite de protección aguas abajo. En la Figura, se ilustra el desarrollo final de la geometría en este punto, y los ángulos de los espigones disminuye desde 150° a 120° y permanece constante (ver Figura N°29). La razón de ello es para obtener la máxima eficiencia del flujo a través del canal curvo. Este esquema reacciona una relativa curva cerrada con una máxima eficiencia de flujo. Por ello, los espigones no tuvieron ángulos abruptos. La magnitud de este limitado ángulo del espigón debe basarse en condiciones particulares para cada tramo.





El Sistema Nacional de Gestión de Desastres (SINAGERD), elaboró un plan nacional de gestión del riesgo de desastres para el período de 2012 al, donde se registra las pérdidas humanas y de viviendas en la región selva por efecto de las inundaciones.

El instituto de Defensa Civil (INDECI) elaboró el año 2002, un estudio de mapeo de peligros de la ciudad de Puerto Maldonado, y se registra una tasa de erosión anual de 2.3 metros por año provocando el posible colapso de la carretera interoceánica, ya que el tramo de estudio comprende desde el Puerto Pastora hasta la Estación PETROPERU ubicada en la Av. Andrés Avelino Cáceres. Además, el desplazamiento lateral que ha sufrido la margen derecha del río Madre de Dios desde el año 2005, ha sido de 26 m en promedio. Este resultado se ha obtenido mediante comparación de imágenes satelitales de los años 2005 y 2011.

El LNH hizo un estudio en modelo físico de lecho móvil del río Madre de Dios, en la Zona de La Pastora, donde estudio la erosión lateral de la margen derecha, pero con alternativas de solución como geotubos, tablestacas y pilotes permeables, más aún proporcionó información referente a los estudios básicos (hidrología, mecánica de suelos, entre otros) con sus respectivas fuentes referenciales.

Con respecto a la alternativa de solución, se adquirió publicaciones científicas, libros, guías de diseño y páginas web de consulta para conocer más acerca las estructuras grandes de madera. El diseño geométrico de estas se realizó por referencia bibliográfica y la distribución de troncos con las dimensiones seleccionadas según los parámetros hidráulicos.

### 2.5.2 Trabajo de campo

Básicamente, el trabajo de campo inició con el modelo físico construido y con sus instalaciones auxiliares como los vertederos rectangulares, pozas de transición y canal de retorno. El material del lecho que se utilizó fue arena sin presencia de finos en el cauce principal y en la ribera de la margen derecha fue barro arcilla en pocas proporciones para darle estabilidad al talud y evitar su desprendimiento.

El modelo físico no distorsionado cumple con los principios de similitud geométrica, cinemática y dinámica, la similitud geométrica se cumplió con un replanteo topográfico a escala 1:60 de cada una de las dimensiones del cauce del río, así como de las estructuras de protección. La similitud cinemática se cumplió representando proporcionalmente el campo de velocidades del prototipo y modelo mediante la construcción de pozas de transición al inicio y final del modelo. La similitud dinámica se cumplió mediante a igualdad del número de Froude en prototipo y modelo, debido a que la fuerza predominante fue la gravitacional.

La calibración de modelo se consiguió mediante pruebas que permitieron reproducir en el modelo la curva nivel-descarga correspondiente a un punto referenciado en la margen derecha del río Madre de Dios. Por lo tanto, mediante los vertederos rectangulares instalados al inicio del modelo, se reprodujeron cada uno de los caudales del hidrograma de avenidas y se verificó el nivel alcanzado por el agua en el punto de referencia, de lo contrario se reguló el nivel de agua desde la poza de salida ubicada al final del modelo.

La construcción de espigones se realizó en el área de carpintería del LNH utilizando madera tipo Capirona y la colocación de espigones se realizó utilizando una estación total para su orientación y posición del eje normal, teniendo el diseño geométrico en planta dibujado en un plano a escala, y su empotramiento en la margen derecha se realizó mediante procedimientos de albañilería para evitar su volteo.

Se realizaron cinco pruebas, dos sin estructuras y tres con estructuras, replanteándose en el inicio de cada prueba el lecho del río.

La recolección de datos inició con la medición de la distribución de velocidades utilizando un instrumento denominado "vectrino" de alta resolución 3D, el cual puede medir las fluctuaciones instantáneas de velocidad en los tres ejes coordenados. Las mediciones se realizaron en diferentes secciones transversales por separaciones constantes y otras mediciones donde se ubican los espigones y alrededor del mismo.

La batimetría del cauce se midió con un instrumento topográfico denominado “Escáner Laser”, por el cual permite capturar el objetivo en una fotografía tridimensional basada en una nube de puntos. La medición se ejecutó antes y después de cada prueba con el objetivo de determinar la modificación del lecho del río con y sin espigones.

### 2.5.3 Trabajo de gabinete

La topografía y batimetría utilizada para el estudio del río Madre de Dios en el sector La Pastora, fue obtenida de un estudio realizado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica supervisado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La hidrología utilizada para el estudio también fue obtenida de la fuente mencionada

Con los trabajos de campo finalizados, se procesó en gabinete de la información de velocidades, niveles de agua. Los datos de la batimetría se procesó con el software del escáner, por el cual se obtuvo una nube de puntos que fueron exportados a un formato apropiado. Con esta información se pudo obtener profundidades de erosión, sedimentación en el cauce, erosión de las estructuras y sedimentación entre espigones. La comparación de la topografía escaneada antes y después de los ensayos permitió identificar las variaciones morfológicas del lecho del río.

## CAPITULO III: INFORMACIÓN BÁSICA DEL PROTOTIPO

Este capítulo detalla los estudios básicos efectuados e información disponible necesaria para realizar el modelamiento hidráulico mediante modelamiento físico.

### 3.1 ESTUDIO TOPOGRAFICO - BATIMETRICO

#### 3.1.1 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico comprendió las áreas situadas en ambas márgenes del río Madre de Dios, por la margen derecha el levantamiento abarcó hasta el tramo urbano de la carretera interoceánica, que se desarrolla paralelo a esta ribera, y por la margen izquierda abarcó la llanura de inundación que existe en esta zona.

Se tuvo la siguiente información:

- Levantamiento topográfico de la zona de estudio con curvas de nivel cada metro, efectuado en un área aproximada de 170 Hectáreas. (ver Foto N°6)



Foto N° 6 Imagen satelital de la zona de estudio del tramo La Pastora.

- En la llanura de inundación, de la margen izquierda del río Madre de Dios, las cotas del terreno varían entre 168.36 msnm y 205.44 msnm.

- La cota superior de los acantilados de la margen derecha, en zonas cercanas a la carretera interoceánica es cercano a 205.44 msnm.
- Un plano topográfico a escala que muestra la batimetría y topografía juntas, donde se encuentran progresivas de 0+000 a 4+000.

### 3.1.2 Levantamiento batimétrico

El levantamiento batimétrico tuvo como objetivo obtener curvas de nivel del cauce del río con el fin de estudiar las características morfológicas del tramo en estudio, y así analizar el comportamiento hidrodinámico del río para diferentes caudales.

Para su desarrollo se realizó lo siguiente:

- Levantamiento batimétrico, de aproximadamente 5,0 km de longitud, en un tramo fluvial del río Madre de Dios, con secciones transversales cada 20 m. (ver Figura N°30) Asimismo, El levantamiento batimétrico se realizó mediante el equipo de ecosonda distribuyendo una barcaza sobre el tramo del río a levantar.



Figura N° 30 Ubicación del área del levantamiento batimétrico del río Madre de Dios en una imagen satelital (color naranja).

- Mediciones limnimétricas para el control de nivel de agua en el río.

- Con las mediciones pertinentes y uso de instrumentos topográficos se obtuvo información para generar curvas de nivel cada metro a escala 1/6000. (ver Figura N°31)

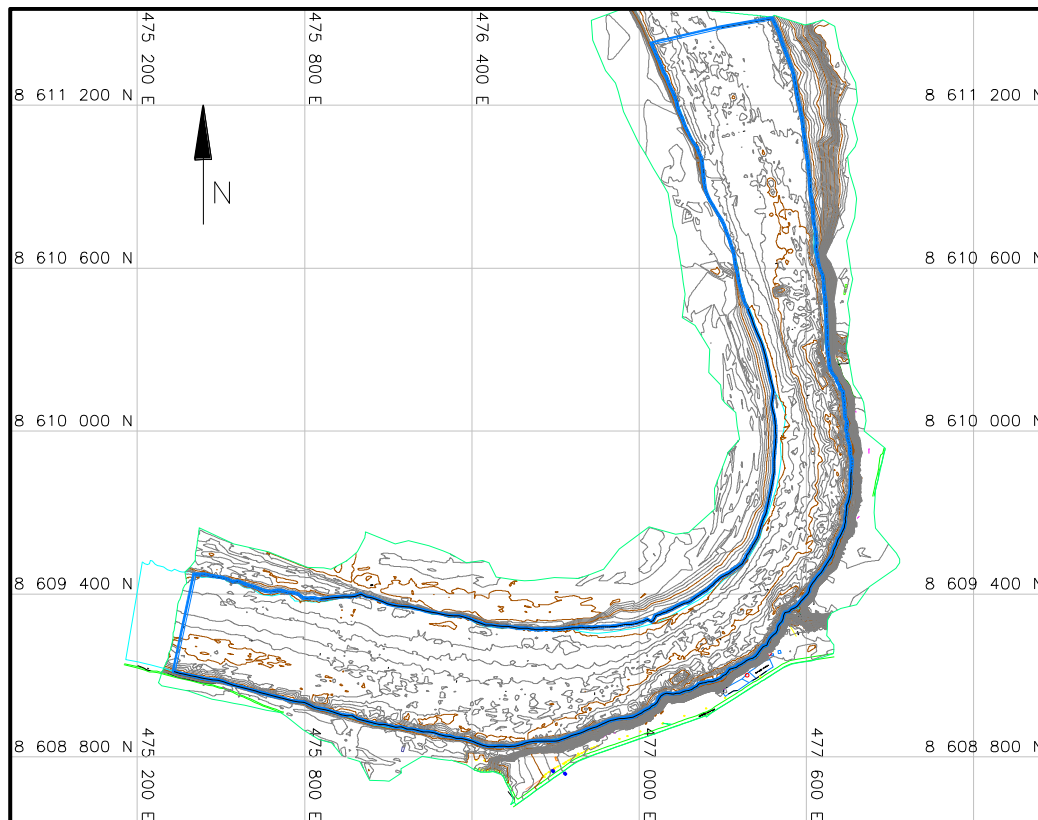


Figura N° 31 Topografía y Batimetría de la zona de estudio (Zona de La Pastora).

## 3.2 ESTUDIO GEOLÓGICO

### 3.2.1 Geología regional

La selva baja presenta formaciones geológicas que corresponden a afloramientos de rocas sedimentarias, mayormente areniscas y arcillitas, que cronológicamente van desde el Jurásico superior al Paleógeno, las cuales son cubiertas por depósitos cuaternarios no consolidados. En la región existen zonas con cobertura de suelo residual y orgánico producto de la actividad biológica de la flora y fauna, a lo que se suma la actividad humana. Los depósitos de suelos que pertenecen al cuaternario están conformados por arenas, arenas limosas y arenas arcillosas.

En los alrededores de la ciudad de Puerto Maldonado se presentan rocas de origen sedimentario con una edad que corresponde al Cuaternario reciente y antiguo.

### 3.2.2 Geodinámica externa

La erosión fluvial es uno de los fenómenos más frecuentes de geodinámica externa. El movimiento de masas de suelos de los taludes compromete la producción de derrumbes. Por lo tanto, los tipos de procesos erosivos son directamente por acción hídrica (erosión de riberas, erosión laminar y solifluxión de suelos) y por acción gravitacional (deslizamiento y reptación de suelos).

El colapso de los acantilados de la margen derecha del río Madre de Dios, en la zona La Pastora, se debe a los procesos de socavación lateral que ocurren en el fondo de la margen derecha del cauce, por encontrarse el río en curva. En el esquema se indica el proceso mencionado. (ver Figura N°32)

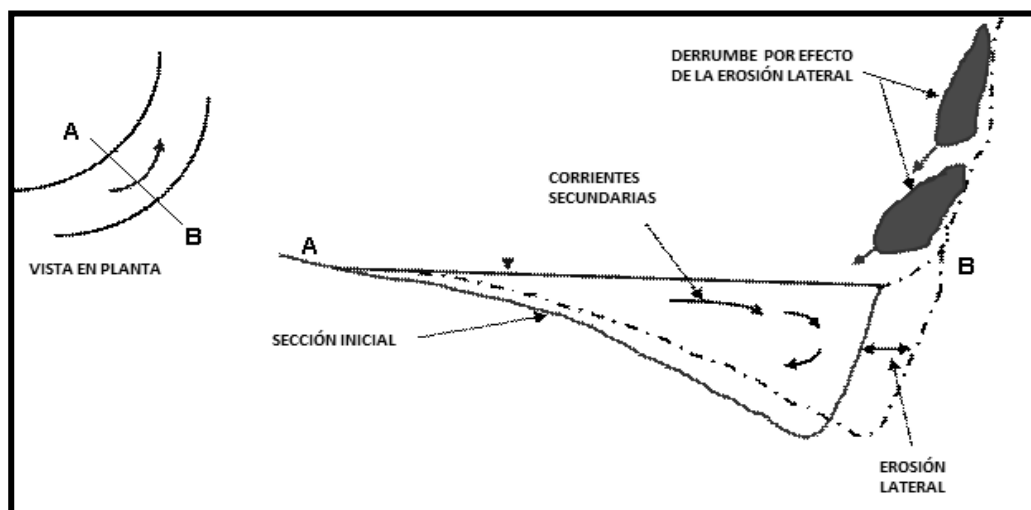


Figura N° 32 Esquema del proceso de erosión lateral sobre el río en curva y el derrumbe de masas.

Fuente: Control de erosión en suelos tropicales, Jaime Suarez Diaz.

### 3.2.3 Geotecnia

La descripción geotécnica contempla en determinar las características físicas del suelo de fundación de las riberas del río con la finalidad de evaluar la estabilidad de los taludes de la zona de estudio.

Con los estudios geológicos, se puede establecer que los taludes en el tramo La Pastora, está constituido por una terraza aluvial de material cuaternario no consolidado. Los taludes del acantilado en La Pastora presentan una altura de aproximadamente 30 metros, donde el derrumbe de material no consolidado es frecuente y la aparición de paredes verticales en la parte alta. (ver Foto N°7 y N°8).



Foto N° 7 Vista del talud en la zona de La Pastora, donde se aprecian derrumbes de material no consolidado y paredes verticales en la parte alta.



Foto N° 8 Vista desde la parte alta del talud en la zona de La Pastora, donde se aprecian derrumbes al pie de los acantilados y la deforestación alrededor del meandro La Pastora.



La clasificación SUCS para el material del talud es SM (arena limosa) y SP-SM (arena cementada pobremente graduada con limo) conteniendo mantos de arcilla de baja plasticidad. En la margen izquierda del río se posee arena SP de nula plasticidad y sin presencia de finos. Con respecto a los mantos de arcilla (CL) presentan características de material impermeable. En la margen derecha presenta SM (arena limosa) y SP-SM (arena pobremente graduada con limo) con cierta cementación, no posee plasticidad donde más de 25% en peso pasa la malla #200 (fino) y presenta un material semipermeable

Con respecto al diámetro representativo del cauce, se realizó el análisis granulométrico del material de fondo del lecho y resulto un valor de 0.16 mm ( $d_{50}$ ). Según las secciones transversales obtenidas del levantamiento topográfico se tienen taludes entre  $18^\circ$  y  $55^\circ$  con alturas entre 4 y 32 metros en las secciones transversales (Tabla 11). El plano topográfico de planta indica que los sectores críticos se encuentran entre la progresiva 1+300 y 3+750 justo donde el meandro tiene mayor radio de curvatura y se ha producido la socavación del pie del talud por erosión pluvial. La sección más crítica es en la progresiva 2+500, donde los taludes fluctúan entre  $50^\circ$  y  $55^\circ$  con altura de 30 m aproximadamente. (ver Figura N°33)

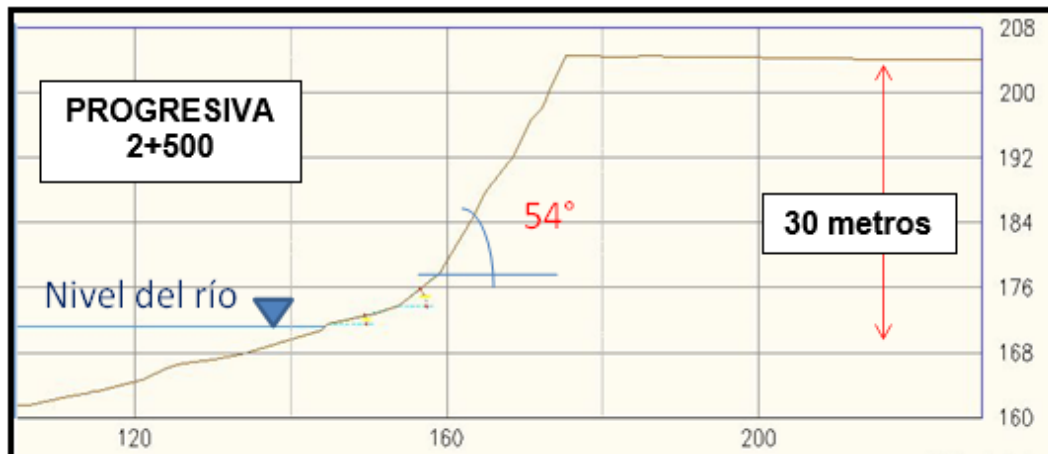


Figura N° 33 Sección Transversal Crítica del talud en la zona de la Pastora, en la progresiva 2+500 del plano topográfico (sin escala).

Entre las progresivas 0+000 hasta 1+300 y 3+750 a 4+200, las alturas y las pendientes del acantilado se reducen por lo que los taludes se hacen más estables. Las secciones transversales entre las progresivas 1+350 y 2+250 se

encuentran inmediato a la carretera interoceánica en el tramo urbano con tendencia a afectar infraestructura en cercanía. (ver Tabla N°7)

Tabla N°7 Secciones transversales en la zona de estudio (La Pastora)

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros SAC.

<b>Progresiva Hacia aguas abajo</b>	<b>Altura máxima sobre el nivel promedio del río (metros)</b>	<b>Talud promedio de la sección</b>
0+000	5	34°
0+500	5	18°
1+000	5	30°
1+500	30	36°
2+000	32	46°
2+500	30	54°
3+000	30	51°
3+500	30	48°
4+000	6	21°

### 3.3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

#### 3.3.1 Cuenca del Río Madre de Dios

La cuenca del río Madre de Dios geográficamente se ubica entre los 69°15' y 72°10' de longitud oeste, y entre los 11°19' y 14°40' de latitud sur. Además, se muestran los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Madre de Dios hasta la zona La Pastora. (ver Tabla N°8 y Foto N°9)

Tabla N°8 Parámetros Geomorfológicos de la cuenca del río Madre de Dios.

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros SAC.

Parámetros	Cuenca del Río Madre de Dios
Área hasta la zona La Pastora (km <sup>2</sup> )	56 553
Perímetro (km)	1929.48
Longitud del Cauce Principal (km)	817.071
Pendiente Promedio del Cauce Principal en la zona de estudio (%)	0.0005
Factor de Forma (adimensional)	0.45
Índice de Compacidad (adimensional)	2.29
Altitud Media (m.s.n.m.)	1442
Pendiente de la Cuenca (%)	0.0031



Foto N° 9 Imagen satelital de la cuenca del río Madre de Dios.

### 3.3.2 Caudales de diseño

Según el manual de ingeniería de ríos de José Antonio Maza Álvarez, se recomienda utilizar el caudal dominante correspondiente a un periodo de retorno de 2.2 años y el caudal asociado a un periodo de retorno ( $T_r$ ) entre 50 años y 100 años para el diseño de espigones.

El cálculo de los caudales de diseño ( $Q_{max}$ ) se realizó aplicando el programa HEC-HMS, a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas de estaciones pluviométrica ubicadas en la cuenca (Ver Tabla N°9)

Tabla N°9 Caudales máximos obtenidos a partir de datos de precipitación.

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros SAC.

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b><math>Q_{max}</math> (<math>m^3/s</math>)</b>
2.2	8003
25	12997
50	14341
100	15789

Con respecto a los datos necesarios para el diseño de espigones, se conoce los hidrogramas de avenidas para un periodo de retorno de 50 años y 100 años y los niveles de superficie del agua para estos caudales. Por ello, se optó en utilizar el hidrograma de crecidas para un periodo de retorno de 50 años. (ver Tabla N°10)

Tabla N°10 Hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 años.

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros.

<b>Caudal (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Nivel de agua (m.s.n.m)</b>
1790	4.5	171.43
4140	9	173.74
6810	13.5	176.09
9500	18	178.18
11910	22.5	179.79
12997	27	180.45
14341	31.5	181.19

## CAPITULO IV: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental es la etapa del modelamiento físico que requiere una ejecución cuidadosa para alcanzar los objetivos planteados. Por ello, en el presente capítulo se incluye la descripción del modelo físico, el material de fondo móvil utilizado, las obras auxiliares de entrada y salida; así como los ensayos realizados para los escenarios sin espigones y con espigones.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

#### 4.1.1 Ubicación de modelo

Se construyó en el área de modelos físicos del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Para determinar su ubicación, se determinó la superficie que ocuparía. En la Foto N°10 se muestra una vista satelital de la posición de modelo en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica.



Foto N° 10 Vista satelital de la posición del modelo en las instalaciones del laboratorio

El modelo físico, por presentar grandes dimensiones, funcionó al aire libre. El suministro de agua se realizó mediante un circuito formado por una cisterna, una estación de bombeo que impulsó agua hacia un tanque elevado, un conjunto de tuberías de conducción y un canal que retorna el agua hacia la cisterna. (Ver Foto N°11 y Anexo 3)



Foto N° 11 Vista aérea del Modelo Físico.

#### 4.1.2 Similitud y factores de escala

De acuerdo con el objetivo del estudio, la disponibilidad de espacio y los caudales a representar en modelo, se estableció que la escala de longitudes más adecuada (Modelo/Prototipo) es 1:60

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} = 60 \quad (4.1)$$

A partir de esta escala se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla N°11.

Tabla N°11 Relaciones asociadas entre el modelo y el prototipo para diferentes magnitudes.

Fuente: Elaboración propia

Magnitud	Símbolo	Valor Numérico
Longitud	$L_p/L_m = \lambda$	60
Velocidad	$V_p/V_m = \lambda^{0.5}$	7.746
Tiempo	$T_p/T_m = \lambda^{0.5}$	7.746
Caudales	$Q_p/Q_m = \lambda^{2.5}$	27885.48
Rugosidad	$\eta_p/\eta_m = \lambda^{0.166}$	1.979

Donde:


- $L_p, L_m$  : Longitudes en prototipo y modelo.
- $V_p, V_m$  : Velocidades en prototipo y modelo
- $T_p, T_m$  : Tiempos en prototipo y modelo
- $Q_p, Q_m$  : Caudales en prototipo y modelo
- $\eta_p/\eta_m$ : Rugosidades en prototipo y modelo




#### 4.1.3 Descripción y construcción del modelo

El modelo físico representa un tramo del río Madre de Dios, zona La Pastora, desde la progresiva 0+000 hasta la 4+380, así como espigones ubicados en su margen derecha. A continuación, se presenta las etapas de construcción del modelo físico, con una descripción y su correspondiente fotografía (ver Tabla N°12).

Tabla N°12 Etapas de la construcción del modelo físico.

Fuente: Laboratorio Nacional de Hidráulica

Etapa	Descripción	Fotografía
1	Construcción de muros perimétricos del modelo físico.	

Etapa	Descripción	Fotografía
2	Excavación de una zanja al inicio del modelo la construcción de pozas de amortiguación y transición, requisito indispensable para la similitud cinemática.	
3	Construcción de muros de albañilería dentro de las pozas.	
4	Construcción de los muros de apoyo y colocación de los tanques vertederos.	
5	Revestimiento de los muros perimetrales, para evitar las filtraciones de agua. También se colocaron los puntos de referencia para el replanteo de lecho del río y la instalación de los espigones de protección.	



Etapa	Descripción	Fotografía
6	Construcción de la poza de sedimentación ubicada al final del modelo, para la decantación de los sedimentos transportados por el río	

#### 4.1.3.1 Estructuras auxiliares de entrada al modelo

Está formado por las estructuras que permiten el ingreso y suministro gradual, uniforme y permanente de agua al modelo. Comprende lo siguiente:

- Dos cisternas rectangulares que se ubican dentro de la División Didáctica (ver Foto N°12).



Foto N° 12 Cisternas en el área de didáctica con sus respectivas profundidades.

-Un tanque elevado de 5 m de altura y 18 m<sup>3</sup> de capacidad, que dispone de una tubería de alimentación de 14 pulgadas y 4 tuberías de abastecimiento de 12 pulgadas, 10 pulgadas, 8 pulgadas y 6 pulgadas. (ver Foto N°13)



Foto N° 13 Tanque elevado permanente para el almacenamiento de agua junto a las tuberías de impulsión con sus respectivas válvulas.

- Una estación de bombeo de agua formada de 5 bombas cuyas características se indican en la Tabla N°13 y se muestran en la Foto N°14.

Tabla N°13 Características de las cuatro electrobombas.

Fuente: Especificaciones técnicas de las electrobombas del laboratorio.

<b>Bomba 1</b>	<b>Bomba 3</b>	<b>Bomba 5</b>
- Serie: L386284	- Serie: 122764M	- Serie: NV760M4
- Caudal: 200 L/s.	- Caudal: 200 L/s.	- Caudal: 10 L/s.
- Altura: 9 m.	- Altura: 10 m.	- Altura: 3 m.
- Potencia: 50 HP	- Potencia: 50 HP	- Potencia: 10 HP
<b>Bomba 2</b>	<b>Bomba 4</b>	
- Serie: L386285	- Serie: 122831M	
- Caudal: 200 L/s.	- Caudal: 100 L/s.	
- Altura: 9 m.	- Altura: 10 m.	
- Potencia: 50 HP	- Potencia: 20 HP	



Foto N° 14 Ubicación de las 4 electrobombas y bomba centrífuga en el área de didáctica para el abastecimiento del modelo físico.

- Dos tanques vertederos, que permiten regular el caudal de ensayo; una poza de disipación de energía y una poza de transición, que permiten el ingreso gradual y uniforme de agua al modelo.



Foto N° 15 Ingreso del modelo hidráulico con vertederos rectangulares.

#### 4.1.3.2 Estructura auxiliar de salida del modelo

Comprende la sección de control ubicada al final del modelo, que permite variar el nivel de agua y las pozas de sedimentación que retuvieron el material sólido transportado por el agua durante las pruebas, de esta manera se evitó colmatarse los canales de retorno de agua y la cisterna (ver Foto N°16 y N°17).



Foto N° 16 Salida del modelo hidráulico con la poza de sedimentación.



Foto N° 17 Regulación del nivel de agua a la salida del modelo físico.

4.1.3.3 Determinación del material del lecho móvil

La granulometría del lecho del río Madre de Dios, en la zona de La Pastora se determinó del Estudio de Mecánica de Suelos de corredor Vial interoceánico Sur, Tramo 3, Puente Inambari – Iñapari, Defensas Ribereñas Zona La Pastora, Km 480+070 -km 480+910. Esta se presenta en la Tabla N°14 y Figura N°34 y corresponde a la muestra D-6, de la ribera del Madre de Dios, zona La Pastora.

Tabla N°14 Análisis granulométrico por tamizado del material de lecho del prototipo.

Tamiz	Abertura de Malla (mm)	Parcial	Acumulado	
		Retenido	Retenido	Pasa
1 1/2"	38.100			100.0
1"	25.400	20.0%	20.0%	80.0
3/4"	19.050	9.1%	29.1%	70.9
1/2"	12.700	7.5%	36.6%	63.4
3/8"	9.525	3.5%	40.1%	59.9
1/4"	6.350	3.7%	43.8%	56.2
N° 4	4.760	2.1%	45.9%	54.1
N° 10	2.000	1.8%	47.7%	52.3
N° 20	0.840	0.2%	47.9%	52.1
N° 30	0.590	1.7%	49.6%	50.4
N° 40	0.426	1.6%	51.3%	48.7
N° 60	0.250	23.5%	74.8%	25.2
N° 100	0.149	19.0%	93.8%	6.2
N° 200	0.074	5.7%	99.5%	0.5

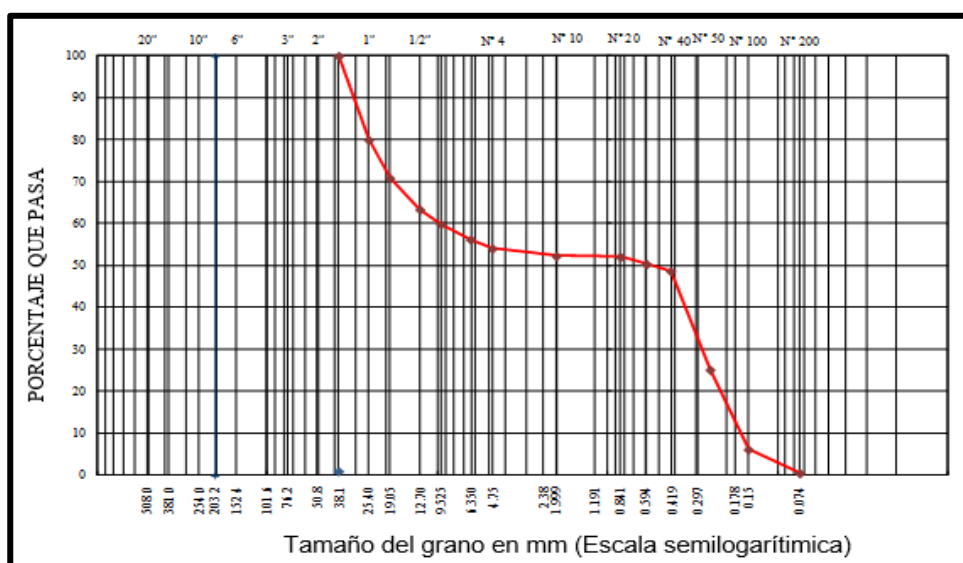


Figura N° 34 Curva granulométrica del material de fondo en prototipo.

De acuerdo con los resultados se concluye que el material está formado principalmente por arenas limosas, clasificadas como SM y SP, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Asimismo, el diámetro representativo del material es 0.59 mm.

Para determinar la granulometría del lecho del río, a escala del modelo, se tuvo en cuenta que este debe ser escala modelo las dimensiones de los tamices, por ello se utilizó los tamices del N°8 a la N°200. De acuerdo con los resultados se concluye que el material esta formado principalmente de arena gruesa, media y fina. Esta se muestra en la Tabla N°15 y Figura N°35.

Tabla N°15 Granulometría del material del lecho del río Madre de Dios, del modelo La Pastora.

Abertura		Peso parcial retenido (g)	(%) Acumulado	
Prototipo (pulg.)	Modelo (mm)		Retenido	Que pasa
8	2.36	22.3	0.7	99.3
10	2	9.4	1.1	98.9
16	1.18	32.0	2.1	97.9
20	0.85	113.2	5.9	94.1
40	0.426	382.1	18.6	81.4
50	0.3	244.9	26.8	73.2
60	0.25	308.6	37.1	62.9
80	0.18	688.0	60.0	40.0
100	0.15	750.3	85.0	15.0
200	0.075	278.1	94.3	5.7
Cazola		171.4	100.0	0.0

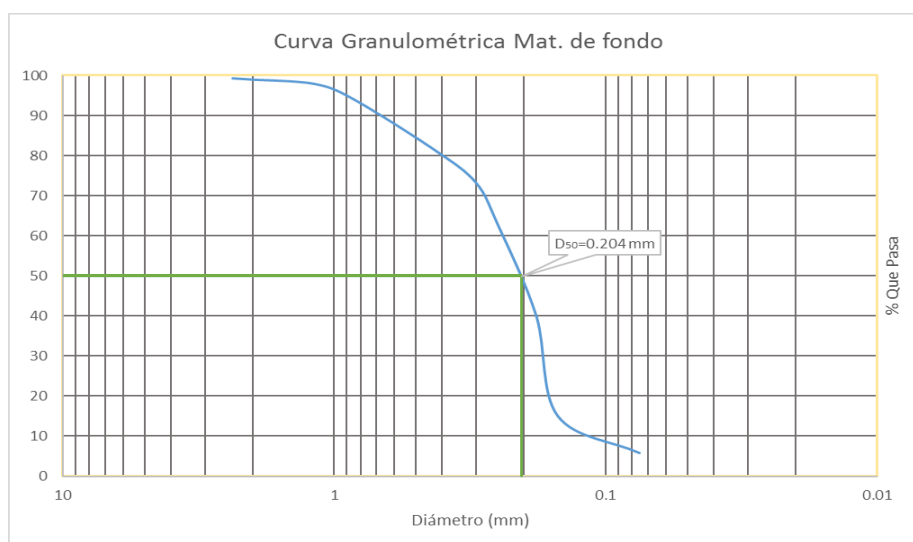


Figura N° 35 Curva Granulométrica del material del lecho del río Madre de Dios, del modelo La Pastora.

Para determinar un material alternativo para representar el lecho móvil, se analizaron los parámetros hidráulicos característicos de la sección crítica del cauce como el tirante, pendiente y ancho superficial.

Para mantener el movimiento de partículas en el modelo se utilizó la profundidad para el arrastre de sedimentos.

Las características del tramo del río en estudio provenientes del estudio hidráulico de corredor Vial interoceánico Sur, Tramo 3, Puente Inambari – Iñapari, Defensas Ribereñas Zona La Pastora, Km 480+070 -km 480+910 fueron:

- a) El ancho superficial promedio en estiaje varió aproximadamente entre 250 metros a 430 metros.
- b) La profundidad del río en la zona del thalweg, en épocas de estiaje, tuvo un orden de magnitud que varió entre 10 metros a 15 metros.
- c) La pendiente media del cauce (S) fue aproximadamente 0.00023.
- d) Del análisis granulométrico del material superficial del cauce se determinó que el diámetro representativo ( $d'$ ) fue 0.59 mm.
- e) La temperatura ambiental fue 25°C, correspondiente una viscosidad cinemática ( $\nu$ ) igual a  $8.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Se pretende diseñar el modelo hidráulico con la profundidad crítica de arrastre y este puede obtenerse del grafico de Shields o de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\rho_{material} &= 2650 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_{agua} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ \Delta &= \frac{\rho_{material} - \rho_{agua}}{\rho_{agua}} = 1.65 \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ \nu &= 8.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned} \quad (4.2)$$

Determinando el diámetro específico ( $D^*$ ):

$$\begin{aligned}D^* &= d' \left( \frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} \\ D^* &= 4.05\end{aligned} \quad (4.3)$$

Como el diagrama de Shields permite calcular el esfuerzo cortante crítico:

$$\begin{aligned}\tau_{*c} &= 0.135 D^{*-0.392} e^{-0.02 D^{*2}} + 0.05 (1 - e^{-0.068 D^*}) \\ \tau_{*c} &= 0.084\end{aligned} \quad (4.4)$$

Calculando la profundidad crítica de arrastre de sedimentos:

$$\tau_{*c} = \frac{Y_{oc}' S}{\Delta d'} \quad (4.5)$$

$$Y_{oc}' = 9.663 \text{ m}$$

Se necesita un tirante mínimo de 9.66 metros para que el material granular empiece a moverse. Además, la relación:

$$\frac{Y_{oc}'}{d'} = 603.95 \tag{4.6}$$

Con la relación de la profundidad crítica de arrastre y el diámetro representativo del lecho ( $Y_{oc}/d$ ) y el número de Reynolds en condiciones críticas, se obtiene el parámetro "Z". (ver Figura N°36)

$$Re_{cr} = d' \frac{\sqrt{gY_{oc}'S}}{\nu} = 2.36 \tag{4.7}$$

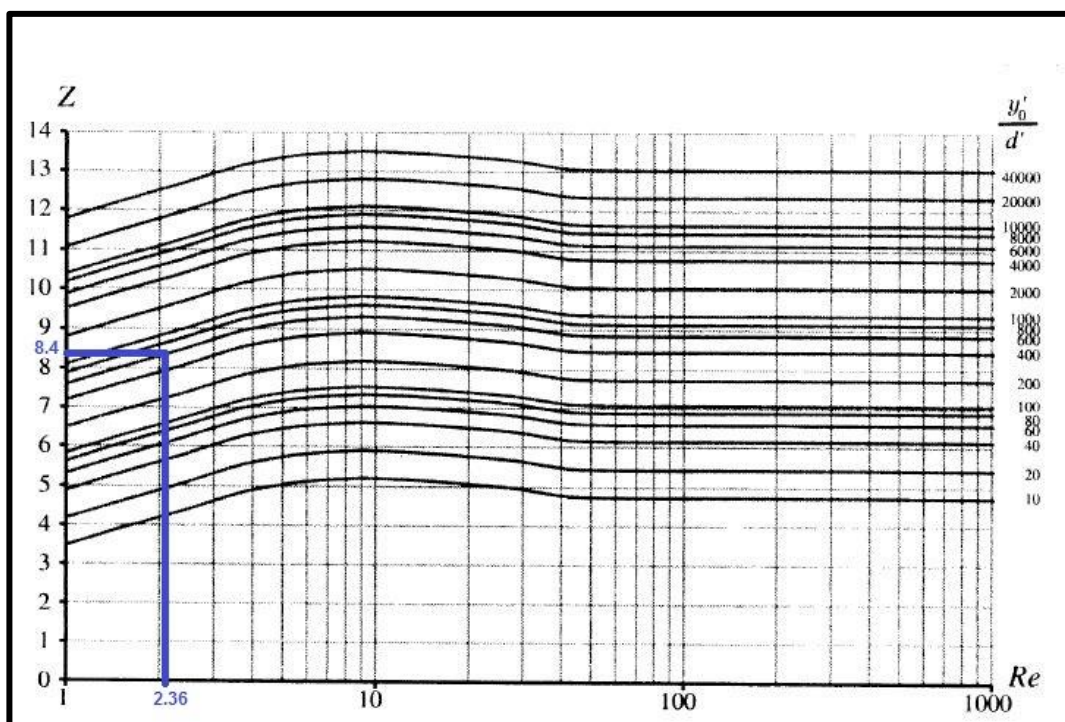


Figura N° 36 Solución gráfica generalizada para la obtención de valor "Z".

Fuente: "Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño" Ramón Fuentes Aguilar

El valor de Z se obtuvo de la intersección del valor de Número de Reynolds en condiciones de arrastre de sedimentos con la curva correspondiente de la relación de la ecuación 3.6 e interceptar una recta horizontal al eje de abscisas de la Figura N°69.

$$Z = 8.4$$

Asimismo, la solución gráfica generalizada (Fuentes y Carrasquel, 1978) permite obtener los resultados de ecuaciones de diseño para las escalas como el



parámetro “Z” (Figura N°36) y el factor de escala “ $1/\lambda_x$ ” (Figura N°37), como escala definida en el modelo físico es la escala “ $1/\lambda_y$ ” de 60.

$$\frac{1}{\lambda_y} = 60$$

En la Figura N°70, solo se considera como datos el parámetro “Z” y el factor de escala “ $1/\lambda_y$ ” para obtener una curva representativa que permita obtener el factor de escala “ $1/\lambda_x$ ”.

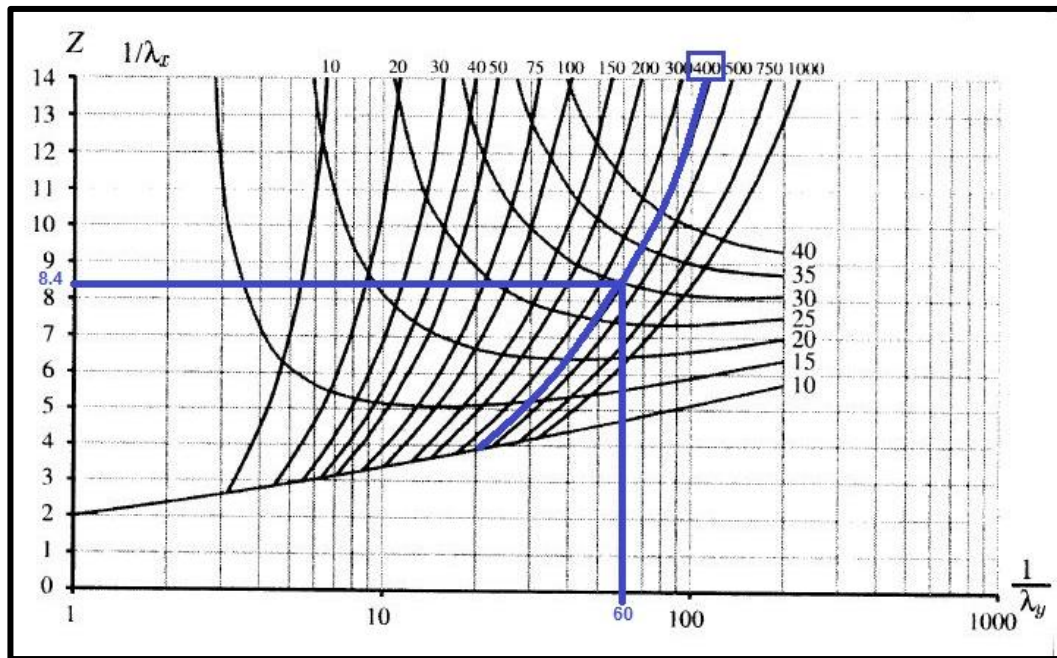


Figura N° 37 Solución gráfica generalizada para la obtención de valor “ $\lambda_x$ ”.

Fuente: “Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño” Ramón Fuentes Aguilar

En la Figura N°46, luego de interceptar el factor de escala “ $1/\lambda_x$ ” con el parámetro “Z”, se obtendrá una curva representativa para obtener el factor de escala “ $1/\lambda_y$ ”.

$$\frac{1}{\lambda_x} = 400$$

Entonces:

$$n = \frac{\lambda_y}{\lambda_x} = 6.66 \quad (4.8)$$

De la ecuación de diseño para escalas para obtener el factor de escala entre materiales entre el modelo y prototipo, se tiene:

$$\lambda_{\gamma_s} = (\lambda_y n)^{1.5} \quad (4.9)$$

Por lo tanto:

$$\lambda_{\gamma_s} = 0.0021$$

Además:

$$\gamma'_s = 1 + (\Delta)(\lambda_{\gamma_s}) \quad (4.10)$$

$$\gamma'_s = 1.0035 \text{ g/cm}^3$$

De acuerdo con los resultados, el material que pudo utilizarse para representar el lecho móvil fue poliuretano ( $\gamma'_s \approx 1.05\text{g/cm}^3$ ) según la Tabla N°16, pero por la dificultad de conseguirlo en gran cantidad, así como por su costo, se decidió utilizar arena limosa de granulometría equivalente a la escala de longitudes, la cual se obtuvo de la cantera Lurín, ubicado en el distrito del mismo nombre, provincia y departamento de Lima.

Tabla N°16 Pesos específico relativo de algunos materiales.

Fuente: Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño, Ramon Fuentes Aguilar

Material	Peso específico relativo ( $\gamma'_s/\gamma_{\text{agua}}$ )
Antracita	1.40 a 1.7
Bakelita	1.35 a 2.05
Carbón	1.20 a 1.50
Acrílico	1.10 a 1.20
Poliuretano	1.03 a 1.05
Arena	2.6 a 2.7

En la Foto N°18, se presenta la arena limosa utilizada para representar el lecho móvil del río. En la Foto N°19, se muestra el desarrollo del talud de la margen derecha, para representar a escala reducida el talud.



Foto N° 18 Vista del material representativo para el fondo del modelo.



Foto N° 19 Lecho móvil a escala modelo con presencia de arena limosa en fondo y manto arcilloso en la ribera.

#### 4.1.3.4 Replanteo del lecho del río

Para esta labor fue necesario colocar BMs (punto de control) que sirvieron para el replanteo y referenciación de la topografía y espigones de protección, estos se muestran en la Tabla N°17 y Figura N°38.

Tabla N°17 BMs con elevación y coordenadas en prototipo.

Fuente: Laboratorio Nacional de Hidráulica.

PUNTO	COTA (msnm.)	ESTE (m.)	NORTE (m.)
BM5	207.6125	476142	8610217
BM3	211.8594	476151	8610194
BM2	152.6531	476127	8610184
BM1	156.8913	476132	8610198
BM4	207.6125	476154	8610223
A	--	477036	8609635

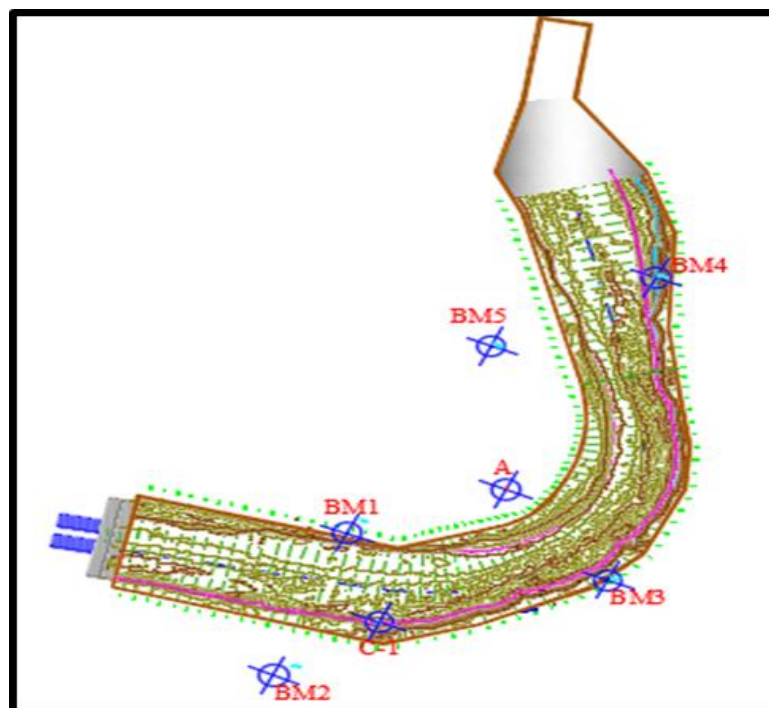


Figura N° 38 Modelo físico con sus respectivos BMs.

Para el replanteo del cauce se utilizó la batimetría adquirida por parte del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Las secciones transversales se representaron a cada un metro en los tramos rectos, mientras que en el tramo curvo la separación fue de 50 centímetros.

Para el replanteo del lecho del río en el modelo se realizó lo siguiente:

- a) Se fijaron las secciones transversales sobre los muros perimétricos del modelo. Sobre la cara interior del muro de la margen derecha se referenció la ubicación del eje del modelo (Lectura cero de la sección transversal), tal como se observa en la Figura N°39.

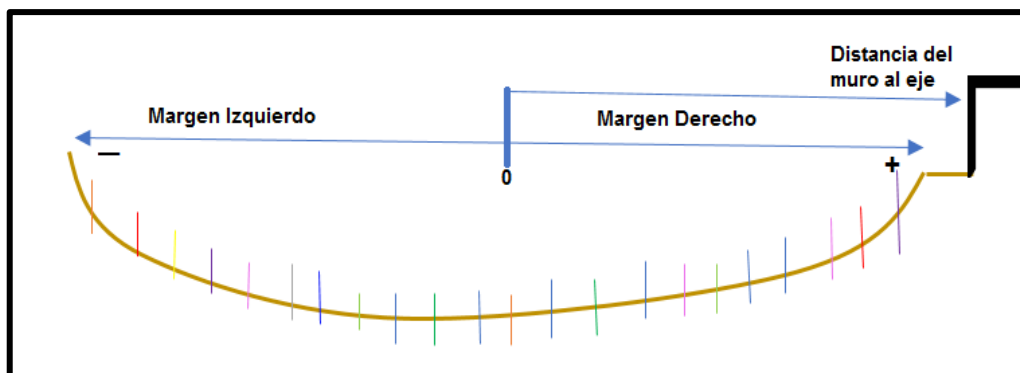


Figura N° 39 Ubicación del eje del modelo y representación de los tarugos.

- b) En cada sección transversal se colocó una regla graduada, en la cual se señalaba el eje del modelo. Esta referencia permitió colocar los tarugos sobre la superficie del terreno, cada uno de los cuales y de acuerdo con su color, representaba una cota específica. (Ver Foto N°20)



Foto N° 20 Regla que se coloca en cada sección transversal para la colocación de tarugos.

- c) Con una varilla metálica de 1/2" de diámetro, se introdujo sobre el carro deslizante ubicado sobre la regla graduada, esto permitió fijar en el terreno la ubicación de cada tarugo, según el color y la cota que le correspondía. (Ver Foto N°21)



Foto N° 21 Colocación de tarugos mediante la regla y varilla metálica.

- d) Utilizando un nivel de ingeniero con especificaciones técnicas definidas (ver Tabla N°18) y tomando como referencia el BM más cercano, se le dio la cota a cada tarugo colocado sobre el terreno. (Ver Foto N°22)



Foto N° 22 Nivelación de tarugos utilizando el nivel de ingeniero.

Tabla N°18 Especificaciones técnicas del nivel de ingeniero PENTAX modelo AFL-321

Fuente: Laboratorio Nacional de Hidráulica.

ESPECIFICACIONES	PENTAX MODELO AFL - 321
<b>Aumentos</b>	32x
<b>Factor de multiplicación</b>	100
<b>Precisión de la reflexión</b>	± 0.3"
<b>Desviación estandar*</b>	± 0.8 mm
<b>Un kilometro en nivelación de doble recorrido</b>	± 0.4 mm

- e) Finalmente, con los tarugos nivelados, se perfiló cada sección transversal con labores de eliminación y relleno, según corresponda. (Ver Foto N°23)



Foto N° 23 Representación en modelo del lecho del cauce.

Según lo mencionado en el subcapítulo 3.3., el estudio se realizará con la porción ascendente del hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 de años. (ver Tabla N°19, en el Anexo 6 se presenta el hidrograma completo)

Tabla N°19 Caudales en prototipo y modelo utilizados en las pruebas

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros SAC.

Caudal en prototipo (m <sup>3</sup> /s.)	Tiempo en prototipo (horas)	Nivel de agua (m.s.n.m.)	Caudal en modelo (L/s.)	Tiempo en modelo (horas)
1790	4.5	171.43	64.19	0.6
4140	9	173.74	148.46	1.2
6810	13.5	176.09	244.21	1.7
9500	18	178.18	340.68	2.3
11910	22.5	179..79	427.10	2.9
12997	27	180.45	466.06	3.5
14341	31.5	181.19	514.28	4.1

#### 4.2 EQUIPOS DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para cumplir con los objetivos planteados, en cada prueba se midió la batimetría del lecho del río, el nivel y velocidad del agua y el caudal de ingreso al modelo. Se describe a continuación el procedimiento seguido a cada caso:

#### 4.2.1 Batimetría

La batimetría o superficie del lecho del río se midió con un escáner Laser (Focus3D X330) con tecnología 3D, el cual es un instrumento que emite un láser con un alcance de 330 metros, un campo de visión de 270° en vertical y 360° en horizontal y captura 50 000 puntos por segundo. Además, cuenta con un GPS integrado.

El procedimiento para el levantamiento de la superficie del río consistió en ubicar una poligonal cerrada de puntos de control que permitan colocar la estación del escáner laser, y permitir que los puntos de control se ubiquen o se materialicen en lugares visibles para el escáner laser (ver Foto N°24). Luego, del levantamiento de campo se preparó un armado y depuración de nube de puntos para la exportación del levantamiento en formato de diseño asistido por computadora (CAD).

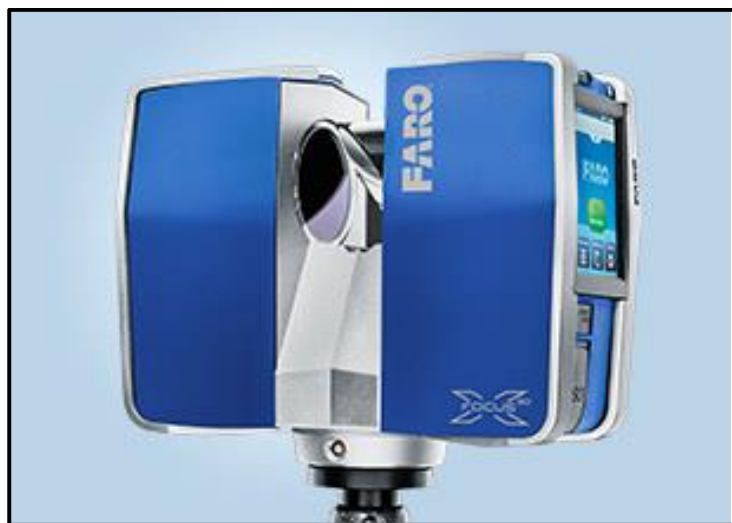


Foto N° 24 Estación del Escáner laser modelo Focus3D X330.

#### 4.2.2 Nivel del agua

El nivel del agua se midió utilizando un limnómetro, apoyado en el puente de medición (ver Foto N°25).





Foto N° 25 Uso de la mira limnimétrica para medir el nivel de agua

Para determinar la cota alcanzada por el agua, se realizó el mismo procedimiento aplicado para el replanteo del lecho móvil, es decir, se utilizó el nivel de ingeniero Pentax (ver Foto N°26) para establecer un plano horizontal que relacione la distancia vertical del nivel alcanzado por el agua con la distancia vertical a un BM de referencia.



Foto N° 26 Nivel de ingeniero PENTAX modelo AFL-321.

### 4.2.3 Caudal

Debido a la magnitud del caudal aplicado en los ensayos, se utilizaron dos vertederos rectangulares de pared delgada y descarga libre, cuyos anchos eran de 1,0 m y 1,2 m (ver Foto N°27).



Foto N° 27 Descarga de agua sobre los dos vertederos rectangulares de ingreso al modelo.

La carga de agua alcanzada en cada vertedero se midió con limnímetros colocados a uno de sus lados, como puede verse en la Foto N°16, cuyas lecturas cero coincidían con la cresta del vertedero.

La magnitud del caudal se determinó aplicando la relación:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d * LcH^{1.5} \quad (4.11)$$

Donde:

Q: Descarga (m<sup>3</sup>/s)

Cd\*: Coeficiente de descarga

g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

H: Carga de agua respecto al nivel de la cresta del vertedero (m)

Lc: Longitud de la cresta del vertedero (m)

La regulación del caudal de ingreso a los tanques vertedero se realizó mediante válvulas tipo mariposa y tipo compuerta. (ver Foto N°28)



Foto N° 28 Válvula tipo mariposa (Lado izquierdo) y tipo compuerta (Lado derecho) para la regulación del caudal que ingresa al modelo.

#### 4.2.4. Velocidad

La medición de velocidades se realizó mediante un instrumento 3D de alta resolución denominado Vectrino, que utiliza el sistema ADV (Acoustic Doppler Velocity) y mide las fluctuaciones instantáneas de velocidad. Este equipo genera pequeñas pulsaciones que se reflejan en el agua debido a las impurezas que contiene, el cambio de frecuencia o de tono permite calcular la velocidad de flujo. (ver Figura N°40)

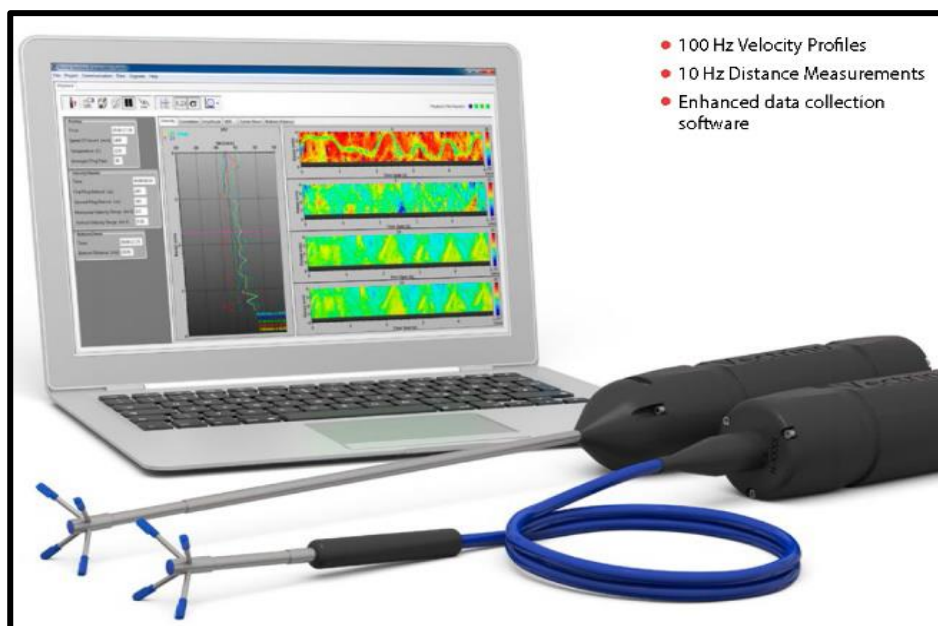


Figura N° 40 Instrumento Sonda Vectrino – Nortek AS.

Las principales componentes del Vectrino son:

- La sonda: Consiste en 4 transductores que funcionan como receptor y 1 como transmisor.
- Modulo electrónico: Procesa y digitaliza la señal y controla la potencia (hardware).
- Interfaz de usuario: Registra y almacena la información (software).

Además, el vectrino fue colocado sobre un soporte metálico con libertad de desplazamiento a lo largo del puente de medición (ver Foto N°29).



Foto N° 29 Soporte (puente metálico) para la medición de velocidades de flujo en cada sección transversal.

El perfilador Vectrino proporciona perfiles de velocidades en tres componentes de dirección ( $V_x, V_y, V_z$ ) con resolución de 1mm en un rango de 3cm a 4cm con señales de captura hechas con una sonda de frecuencia de 100Hz, toda esta información fue enviada a una laptop. (ver Figura N°41)

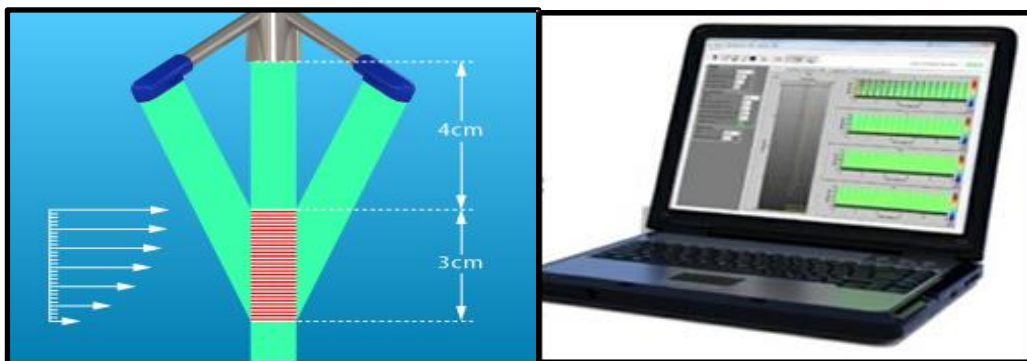


Figura N° 41 Columna de agua para el análisis (lado izquierdo) y una laptop portátil con la interfaz de usuario (lado derecho).

### 4.3 ANÁLISIS DE ESPIGONES DE TRONCOS DE ÁRBOL COMO ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN

Como ya se ha mencionado, los espigones construidos con troncos de árbol representan una alternativa de protección contra la erosión en ríos amazónicos. En la margen derecha del río Madre de Dios, en la zona de La Pastora, la permanente erosión ha puesto en riesgo la estabilidad de la carretera interoceánica, por lo que en esta tesis proponemos colocar este tipo de espigones.

#### 4.3.1 Diseño

##### 4.3.1.1 Consideraciones de diseño

- a) La colocación de espigones hace que el thalweg se traslade hacia la margen izquierda del río, contribuyendo de esta forma en reducir la erosión que se produce en la margen derecha.
- b) El diseño de los espigones se realizó según las características hidráulicas del río.
- c) El tipo de madera elegida para el diseño de espigón fue la madera Capirona de la especie *Calycophyllum spruceanum* (Benth), el cual crece en los bosques de Amazonas, San Martín, Huánuco, Loreto, Madre de Dios y Ucayali. (ver Tabla N°20)

Tabla N°20 Características de la madera Capirona

Fuente: Guía de Procesamiento Industrial-LKS.

<b>Capirona</b>	
Densidad Básica	0.76 gr/cm <sup>3</sup>
Diámetro del tronco	0.5 a 1.5 metros
Altura del tronco	15 a 35 metros

- d) De forma conservadora, se utilizó la densidad seca de la madera en los cálculos de balance de fuerzas del diseño por estabilidad.
- e) Para el trazo geométrico en planta de los espigones, la extensión de protección se estableció en función al ancho estable del río.

- f) De acuerdo con los resultados obtenidos, se modificó en cada prueba el trazo en planta, longitud de trabajo, separación, permeabilidad entre otros de los espigones.
- g) El análisis de estabilidad de la estructura de madera lo realizó el Ingeniero Luis Antony Huaranca en sus tesis denominado “Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño de estabilidad de grandes estructuras de madera para defensas ribereñas aplicado al tramo La Pastora del rio Madre de Dios – Perú. (Huaranca, 2018)

#### 4.3.1.2 Geometría del espigón

Cada espigón presentó la forma de un paralelepípedo rectangular que establece la estabilidad en contra al volteo de la estructura, debido al momento generado por la fuerza de arrastre y las presiones hidrostáticas. La geometría del espigón favorece la colocación y mantenimiento del mismo, así también ayuda a crear hábitats y refugios para peces e invertebrados permitiendo la restauración de ecosistemas biológicos. (ver Foto N°30)

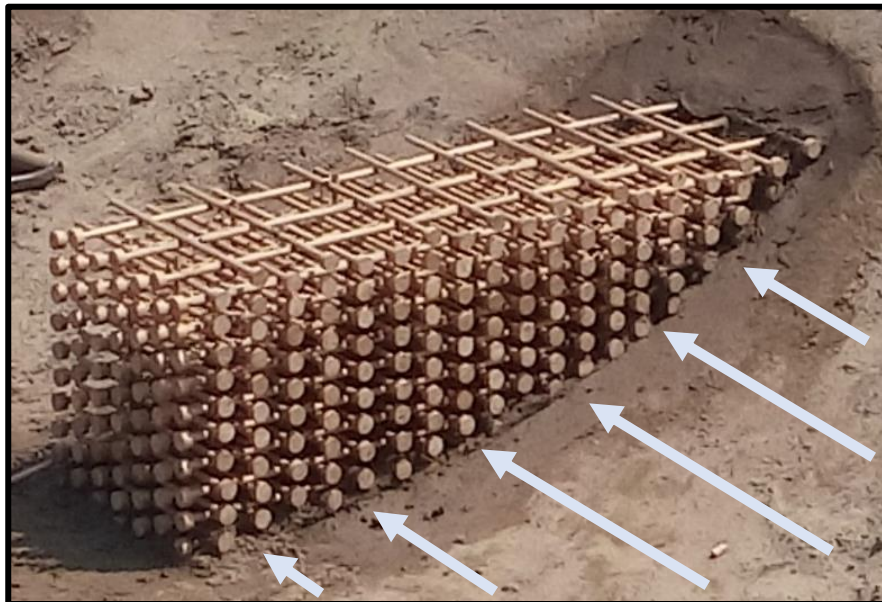


Foto N° 30 Vista general de la geometría del espigón.

El caudal para un periodo de retorno de 50 años produce un tirante de diseño ( $Y_d$ ) de 20 metros y un borde libre aproximadamente de 2 metros. El ancho del espigón depende de la longitud del tronco en dirección al flujo y la longitud del espigón,

que es la suma de la longitud de trabajo, cuyo valor depende del alineamiento del banco para el trazo en planta, y la longitud de empotramiento, cuyo valor varía entre el 10% al 15% de la longitud de trabajo. La geometría estructural del espigón es del tipo escalonado, cuyo extremo se adaptó a la inclinación del talud, según su altura de diseño. (ver Figura N°42)

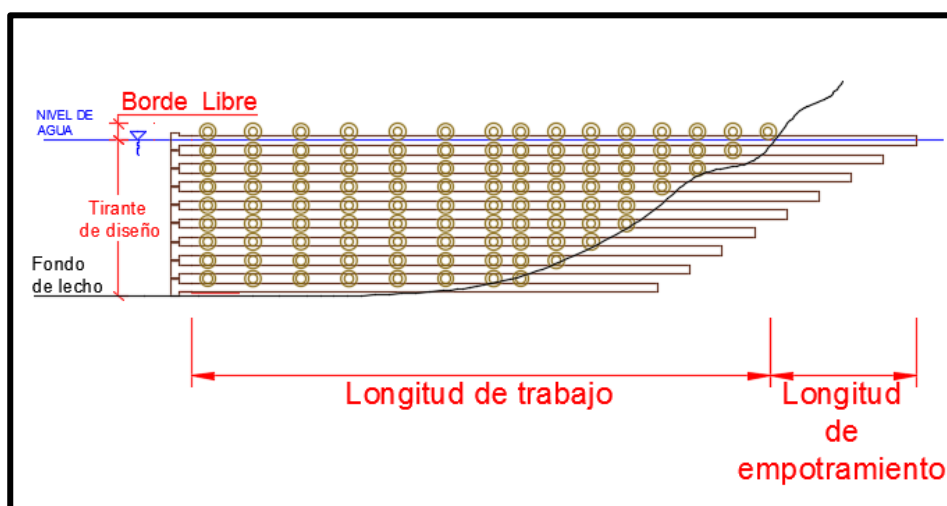


Figura N° 42 Representación esquemática de la geometría de un espigón dentro del talud.

Un sistema de espigones depende de varios componentes para producir una forma geométrica cuando se combinan. Estos incluyen la extensión y longitud de trabajo, así como el espaciamiento y orientación de los espigones. Esta explicación se presenta en la guía de diseño de estructuras de estabilización de banco de ríos. (Brown, 1985)

#### 4.3.1.3 Distribución del entramado de troncos

El entramado presentó un ordenamiento particular. El extremo con raíces de los troncos se orientó en dirección aguas arriba del flujo, con el objetivo de disminuir la velocidad y acumular sedimentos y palizada (Ingeniería de atascos de troncos). La distribución presenta tres tipos de troncos denominados: Troncos perpendiculares al flujo, troncos orientados en la dirección del flujo y pilotes, los dos primeros tipos con su fajo de raíces (ver Figura N°43). Fundamentalmente, el diseño considera cuatro dimensiones del tipo de árbol seleccionado para la geometría del espigón: diámetro del tronco, diámetro promedio de la raíz, altura promedio de la raíz y altura del tronco.

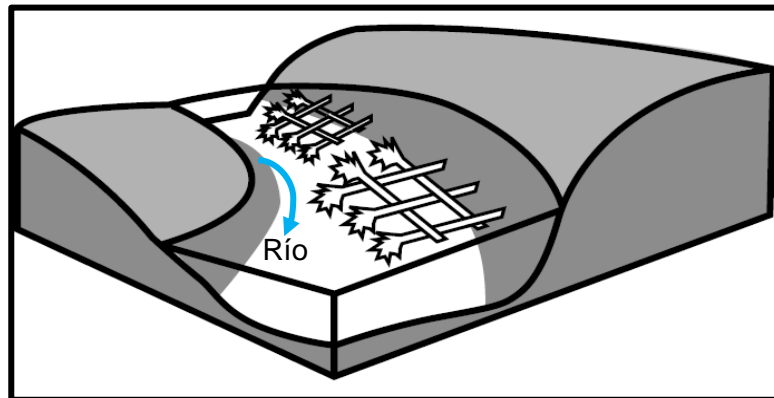


Figura N° 43 Representación esquemática de la distribución del entramado de troncos sobre el talud.

Según lo mencionado en el capítulo 2, la permeabilidad es el porcentaje de área no obstruido con respecto al área de la cara del espigón aguas arriba y perpendicular al flujo que encierra el entramado de troncos, en la cual no se considera la obstrucción de materiales flotantes, escombros u otros.

La distribución del entramado de troncos para cada espigón posee tres tramos con diferentes permeabilidades que disminuyen según se acercan al talud y depende de la longitud de trabajo del espigón, asimismo se verificó la permeabilidad de cada espigón. (ver Tabla N°21 y Figura N°44)

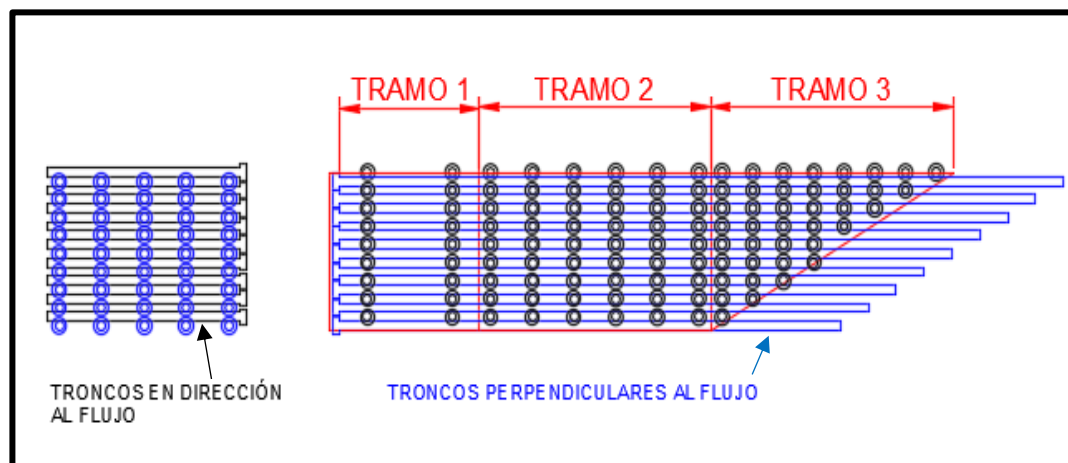


Figura N° 44 Vista perfil (lado izquierdo) y frontal (lado derecho) de un espigón representativo.



Tabla N°21 Chequeo de permeabilidad de un espigón

Fuente: Elaboración propia.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Área Total ( $A_5$ )	225.6	490.8	434.5
Área obstruida por troncos en dirección del flujo ( $A_1$ )	25.3	109.7	67.5
Área obstruida por troncos perpendiculares al flujo ( $A_2$ )	125.5	276.8	206.9
Área obstruida por troncos parcialmente sumergido ( $A_3$ )	0	0	0
Área total obstruida ( $A_4=A_1+A_2+A_3$ )	150.8	386.5	274.4
Área total libre ( $A_6=A_5-A_4$ )	74.8	104.3	160.1
Permeabilidad ( $A_6/A_5$ )	33%	21%	37%
Permeabilidad Total ( $\Sigma A_6/\Sigma A_5$ )			29%

El objetivo de disminuir la permeabilidad cerca al talud es disminuir la erosión en la punta del espigón y evitar la formación de un flujo recirculante que acelere la erosión lateral. (Brown, 1985)

Además, la permeabilidad del espigón afecta la longitud de la ribera o banco protegido aguas abajo del espigón, también el ángulo de expansión de flujo incrementa con el aumento de la permeabilidad de diferentes maneras, donde a mayor permeabilidad, menor es la longitud de protección de banco aguas abajo del espigón. Por ello, en una curva aguda para una permeabilidad de 0% hasta el 35%, el ángulo de expansión de flujo debe permanecer constante.

Finalmente, la distribución del entramado de troncos en forma perpendicular y en dirección al flujo permite el ingreso transversal de troncos auxiliares para un sistema de anclaje entre el espigón y el lecho del río.

#### 4.3.1.4 Trazo geométrico en planta de lo espigones

El trazo geométrico en planta inició con la extensión de la protección sobre la curva del meandro. Primeramente, la forma del meandro se ajustó a varias curvas para conseguir el alineamiento representativo del río, utilizando la metodología de Lagasse para estudiar el desplazamiento del meandro, la cual consistió en trazar una circunferencia cerca a la orilla exterior para el curso del río, y donde el río

debe mantener su geometría natural bajo el alineamiento representativo para evitar cambios drásticos por el ajuste (Lagasse y entre otros, 2004). Luego de la selección del conjunto curvas se ajustó a dos curvas por el método de mínimos cuadrados, cuyo objetivo era ajustar a una curva representativa la orilla exterior del río.

Básicamente, el uso de un radio de curvatura causa cambios severos en la geometría natural del río según el ajuste, por ello se optó por dos radios de curvatura para representar mejor el meandro según los resultados de una prueba inicial. (Ver Figura N°45)

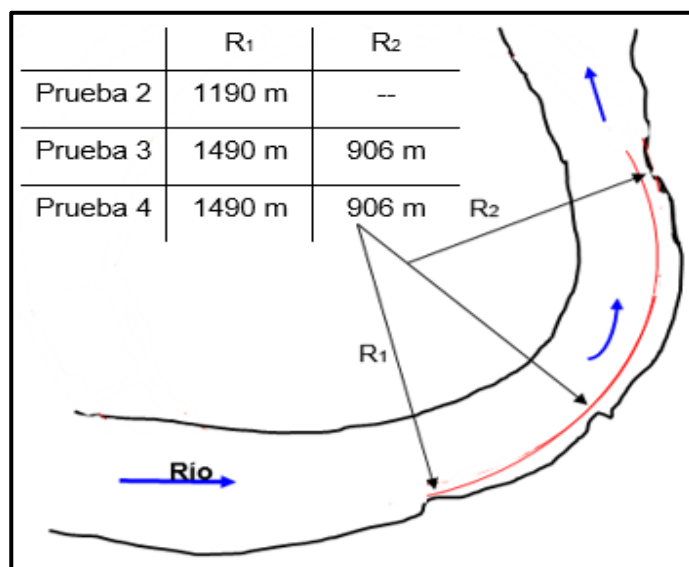


Figura N° 45 Radios de curvatura representativo del meandro en escala prototipo.

Luego de ajustar la geometría del cauce natural del río en dos curvas, se calculó las longitudes de trabajo para los espigones, además se optó en seleccionar una longitud alrededor del 20% del ancho del río (Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures, 1985). La extensión del radio de curvatura hacia los puntos donde inician los espigones permite obtener los ejes normales de estos con la intersección a la circunferencia de ajuste para comenzar el trazo con su respectiva orientación. (ver Figura N°46 y Anexo 5)

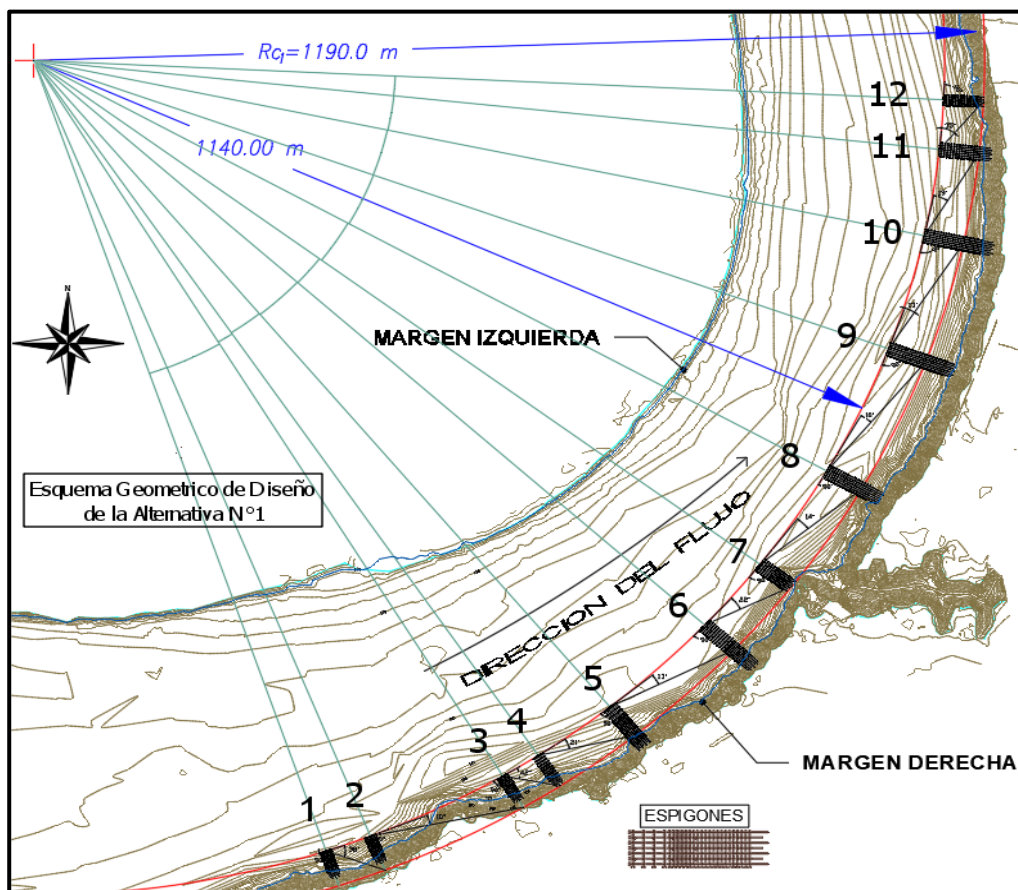


Figura N° 46 Extensión de radio de curvatura hacia los puntos donde inicia los espigones.

La orientación de cada espigón permite ubicar el eje normal donde se colocará el siguiente espigón, asimismo, la orientación del primer espigón que haría contacto con la corriente presenta mayor importancia sobre los siguientes espigones para el comportamiento del flujo, por lo que se iteraron ángulos de orientación que permitieron encontrar el óptimo.

La orientación de los primeros espigones fue condicionada por la presencia de un punto rígido de vegetación que se comportó como un deflector del flujo. (ver Figura N°47)

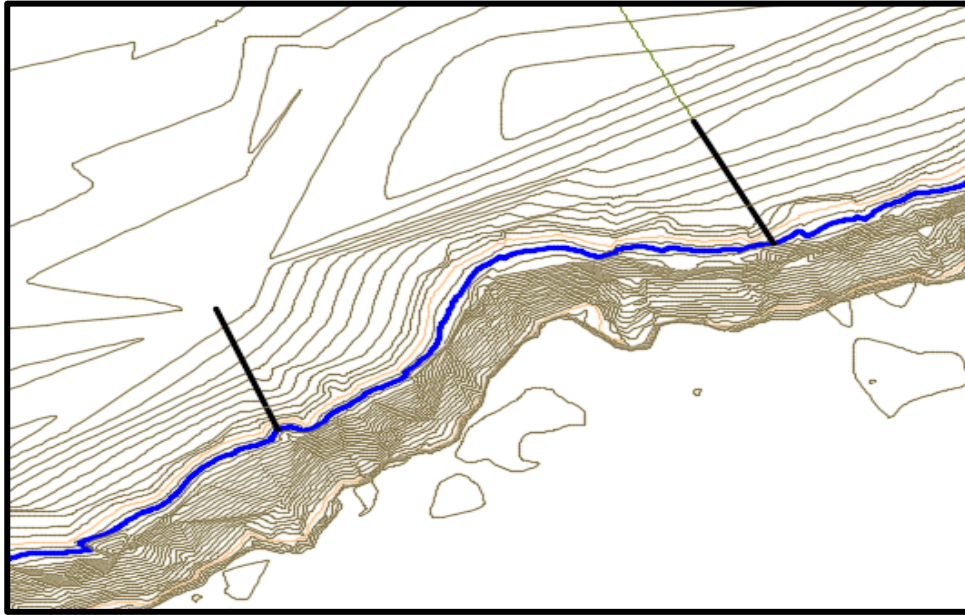


Figura N° 47 Orientación perpendicular del primer y segundo espigón con un punto rígido de vegetación.

Finalmente, los espigones intermedios mantuvieron la orientación en dirección perpendicular al flujo para las tres pruebas con estructuras de protección. (Ver Figura N°48)

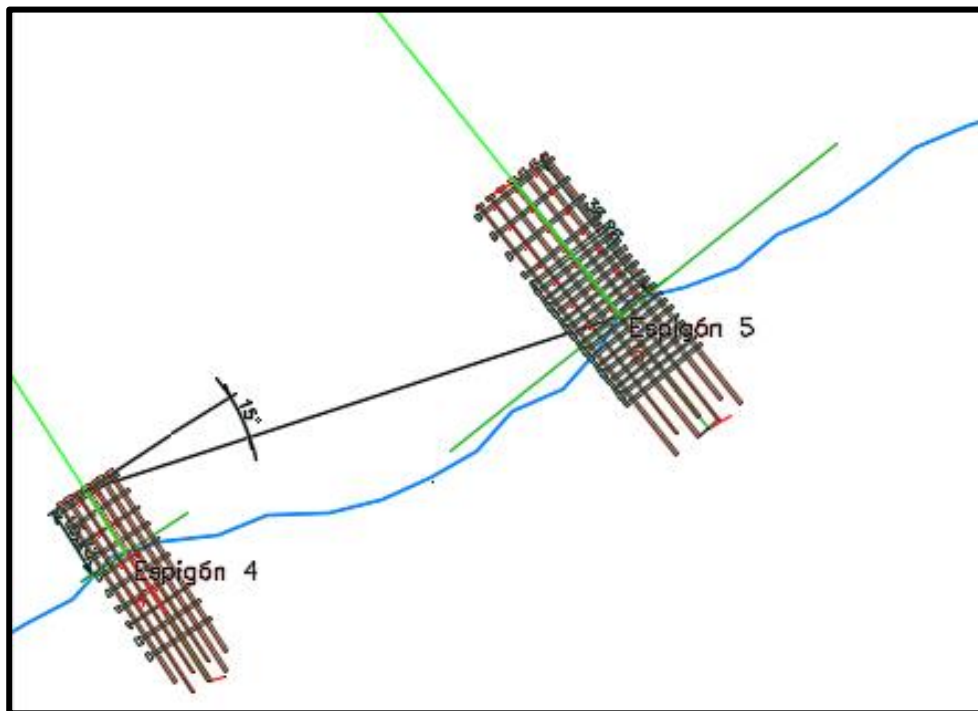


Figura N° 48 Trazo de ejes normales según los ángulos de desviación de flujo.

#### 4.3.1.5 Longitud y Separación de los espigones

Se halló la longitud de trabajo (Lt) de cada espigón por prueba, definida por el ajuste de curva y la separación (Ss) que existe entre los espigones, y, por el ángulo de desviación de flujo. (ver Tabla N°22)

Tabla N°22 Longitud y separación de los espigones en escala modelo

Fuente: Elaboración propia.

N°	Prueba #2		Prueba #3		Prueba #4	
	Lt (m)	Ss (m)	Lt (m)	Ss (m)	Lt (m)	Ss (m)
1	28.68	---	51.6	---	40.5	---
2	28.296	61.62	48	175.08	42.6	137.7
3	27.78	193.32	70.08	144	62.1	111.18
4	34.8	54.702	67.2	144	57	123.42
5	51.498	116.52	41.88	144	62.52	123.42
6	67.8	170.28	52.8	143.28	29.88	130.32
7	53.802	112.68	62.58	155.1	52.92	155.22
8	76.2	159.18	64.5	155.1	60.6	155.22
9	68.82	192.3	58.2	155.1	63.48	155.22
10	75.12	168	45.6	155.1	55.98	155.22
11	55.698	124.68	63.6	155.1	52.2	155.22
12	39.702	70.92	---	---	51.48	155.22

La mayoría de los espigones establecidos en la Tabla N°22 son orientados perpendiculares en dirección a flujo para evitar la influencia del flujo helicoidal sobre la ribera del río, excepto el primer y último espigón, para la segunda prueba, tuvieron una orientación de 120° en dirección aguas abajo de la ribera.

#### 4.3.1.6 Altura de los espigones

Los espigones se comportaron como espigones sumergidos durante la prueba N°2 y como espigones no sumergidos durante las pruebas N°3 y N°4. Las crestas de los espigones fueron horizontales debido a que el proceso constructivo fue más sencillo. Asimismo, la cota de la cresta fue establecida entre el nivel de estiaje ( $Q_{\text{estiaje}} = 1790 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el nivel de la avenida de diseño ( $Q_{\text{avenida}} = 14341 \text{ m}^3/\text{s}$ ), obteniendo su altura máxima sobre el eje longitudinal en el extremo del espigón. Finalmente, para evitar el sumergimiento, se optó por incrementar la altura del espigón en 2 metros sobre la cota máxima del agua. (ver Tabla N°23)

Tabla N°23 Altura máxima de los espigones en su eje longitudinal en escala prototipo

Fuente: Elaboración propia.

	Prueba #2	Prueba #3	Prueba #4
N°	Hmax (m)	Hmax (m)	Hmax (m)
1	20.19	18.75	19.2
2	18.192	18.702	18
3	15.498	20.202	20.202
4	15.84	19.44	20.202
5	20.1	21.192	19.998
6	19.8	23.202	20.898
7	21.438	21.3	22.2
8	21.198	22.2	21.702
9	22.2	21.498	21.798
10	21.3	21.702	21.6
11	21.498	21.198	21.498
12	21.198	--	21.3
	Sumergidos	No Sumergidos	

Finalmente, se puede visualizar las cotas de agua y de cresta presente en los tres sistemas de espigones (ver Anexo N°7).

#### 4.3.1.7 Ancho de cresta

El ancho de cresta ( $A_c$ ) del espigón es aproximadamente la altura de agua, que para efectos de trabajo se define como la altura para un caudal de diseño con periodo de retorno establecido con 50 años (Brown, 1985). Se optó por establecer un ancho de 20 metros en escala prototipo.

#### 4.3.2 Construcción

La construcción de los espigones requirió conocer las características de la madera a utilizar y las dimensiones del diseño geométrico según las condiciones hidráulicas del prototipo. En el modelo físico, los espigones también fueron representados en escala 1:60 de acuerdo a los planos de cada espigón.

La construcción de los espigones fue realizada en el taller de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica. (ver Foto N°31)



Foto N° 31 Taller de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Se utilizaron cilindros de madera de 1 cm de diámetro para los troncos y 2,5 cm de diámetro para la raíz, donde la densidad es  $0.76 \text{ g/cm}^3$  (Capirona) permitiendo

una buena resistencia mecánica en la construcción de espigones. A continuación, se describe el procedimiento de construcción de los espigones:

- a) Se elaboraron los planos de planta, perfil y elevación del sistema de espigones con las dimensiones correspondientes en escala de modelo (ver Figura N°49).

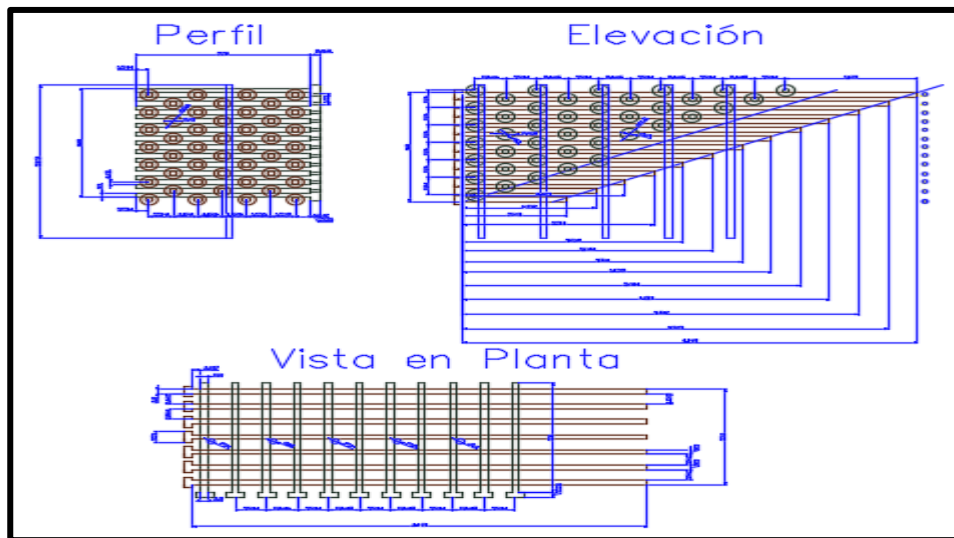


Figura N° 49 Esquema representativo de un espigón de prueba.

- b) Se adquirieron los palitos para los troncos y las raíces con los diámetros mencionados.

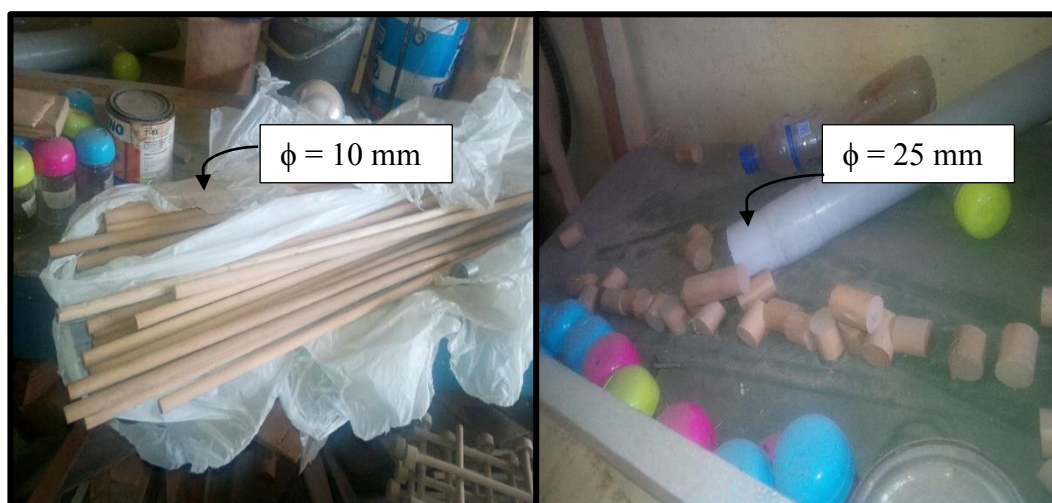


Foto N° 32 Madera utilizada para la construcción de espigones.



- c) Se entramaron los troncos en dirección al flujo y perpendicular a este con pequeños troncos (tarugos) de 5mm de diámetro los que permitieron fijar los troncos de una capa con la siguiente. (ver Foto N°33)



Foto N° 33 Perforación de los troncos para colocar tarugos (lado izquierdo) y un tronco con tarugos colocados para la fijación.

- d) Se cortaron los troncos de acuerdo con las diferentes longitudes que se presentaban en las diferentes capas que forman el espigón y la inclinación del talud sobre el cual son empotrados. (ver Foto N°34)



Foto N° 34 Colocación del tronco en la sierra de banda (lado izquierdo) y corte de troncos para diferentes longitudes (lado derecho).

- e) Se colocó a cada tronco, con la ayuda de pegamento instantáneo, un tronco que representó a las raíces del árbol. (ver Foto N°35)



Foto N° 35 Proceso de pegado y unión del tronco (1 mm) con la raíz representativa (2.5 mm).

- f) Finalmente, se unieron los troncos con raíces mediante el pegamento y los tarugos formando los entramados que dan forma al espigón. (ver Foto N°36)



Foto N° 36 Espigones formado por entramados de troncos con raíces.

Es importante mencionar que se fabricaron nuevos espigones para cada prueba, ya que el esfuerzo de arrastre y la fuerza hidrostática que actuaba sobre estos lo debilitaban, no pudiendo ser reutilizados.

#### 4.3.3 Colocación

Terminado el replanteo del lecho del río y la construcción de espigones, se procedió a colocarlos de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- a) De los planos de diseño se obtuvieron los ángulos de orientación y la distancia polar del inicio y el punto medio del espigón sobre el eje transversal del espigón. (ver Figura N°50)

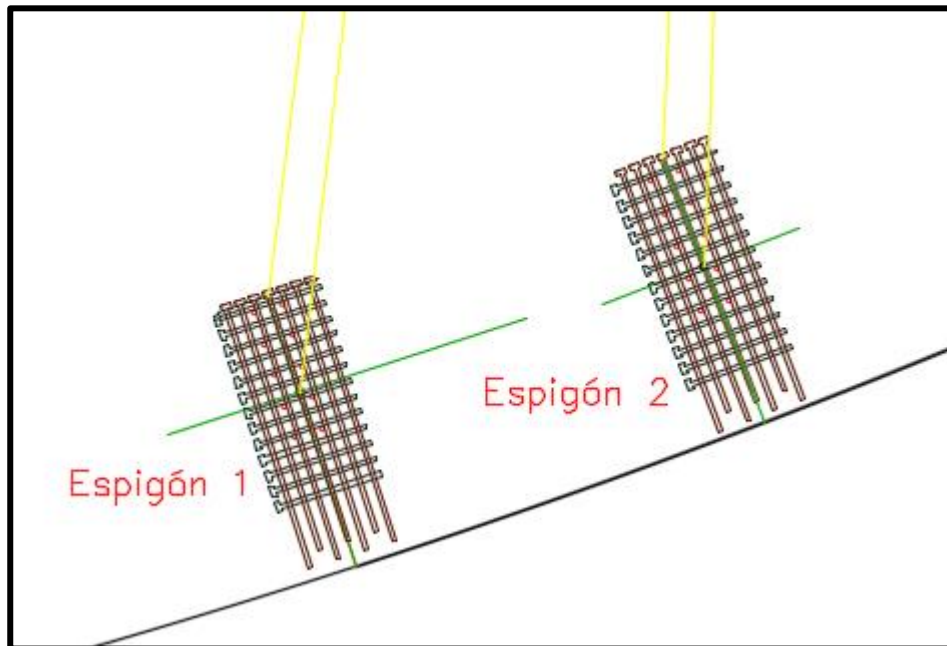


Figura N° 50 Ubicación de ejes normales sobre los espigones.

- b) Con la información recopilada de los planos y utilizando una estación total, se replanteó el eje normal de cada espigón en el modelo, marcándolos sobre los muros laterales para su fácil replanteo. (ver Figura N°51 y Anexo 4)

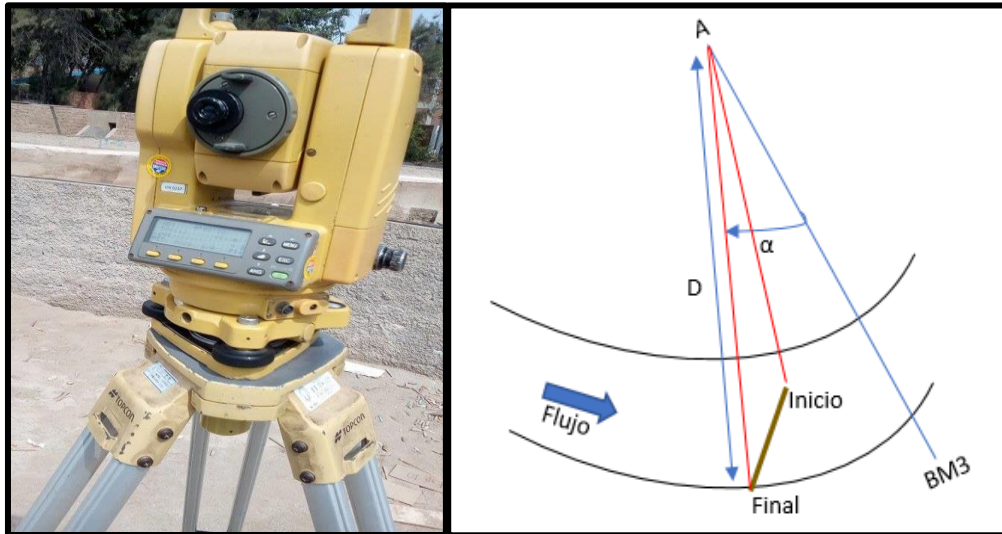


Figura N° 51 Estación total TOPCOM serie gpt 3000 (izquierda) y un esquema característico para la colocar y orientar los espigones.

- c) Ubicado el eje del espigón, se procedió a excavar las dimensiones necesarias para colocarlo y empotrarlo en el talud del río. (ver Foto N°37)



Foto N° 37 Excavación de material de lecho.

- d) Se colocaron los espigones, de acuerdo con su eje, punto inicial y punto medio. Para establecer la cota del espigón se utilizó un nivel de ingeniero. El procedimiento consistía en colocar la mira sobre la cabeza del espigón y verificar la cota prestablecida tomando como referencia el BM más cercano. (ver Foto N°38)



Foto N° 38 Nivelación de espigones con una regla metálica ubicada en el eje normal.

- e) Se colocaron troncos auxiliares a través de los espigones, para fijar su posición sobre el lecho del río con mortero colocado en la base del espigón a manera de anclaje. (ver Foto N°39)



Foto N° 39 Uso de pilotes de madera y mortero para empotrar el espigón sobre el lecho del río.

- f) Finalmente, la colocación de espigones terminó con el amarre entre los pilotes y el entramado de troncos, utilizando alambres dúctiles, finalmente, se reconstruyó el talud con arcilla y arena, según el replanteo de lecho. (ver Foto N°40)



Foto N° 40 Reconstrucción del talud (izquierda) y colocación del sistema de espigones (derecha).

#### 4.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración se realizó verificando que se reproduzcan en el modelo los niveles de agua medidos en el prototipo para diferentes caudales respecto a un punto de control denominado C-1, cuya ubicación se muestra en la Tabla N°24.

Tabla N°24 Coordenadas UTM del punto C-1 en el prototipo.

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros.

Punto de Control	Norte (m)	Este (m)
C-1	8608850	476481

Se calibraron los caudales mostrados en la Tabla N°25.

Tabla N°25 Caudales en el prototipo utilizados en la calibración del modelo.

Fuente: Memoria descriptiva del diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros.

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel de agua (msnm)
4,140	173.74
9,500	178.18
14,341	181.19

Para cada caudal, se midió el nivel de agua en el punto de control C-1, verificándose que fue necesario modificar el nivel de la sección de control ubicada a la salida del modelo, hasta alcanzar valores similares del prototipo. (ver Foto N°41)

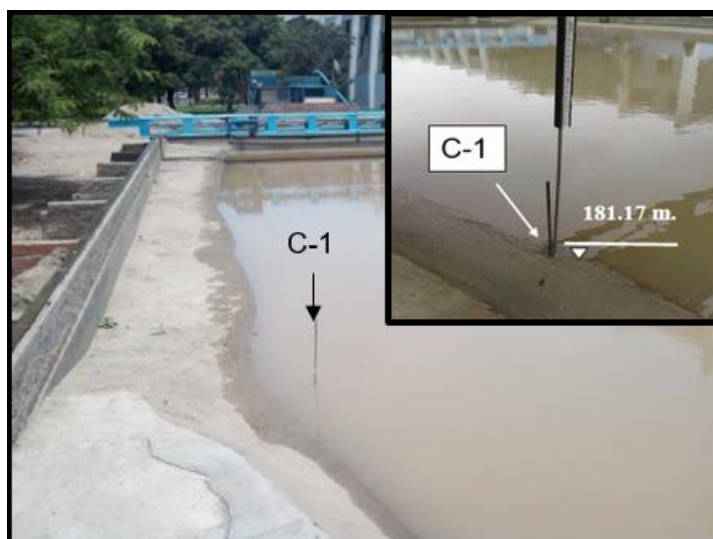


Foto N° 41 Nivel de agua en el punto de control C-1.

## 4.5 EJECUCIÓN DE PRUEBAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

### 4.5.1 Programación de pruebas

La primera prueba se realizó considerando la condición del cauce sin espigones. Para comparar los efectos que se producen en el cauce, al inicio y al final de esta prueba se escaneó el lecho del río.

Las demás pruebas se realizaron con espigones, los cuales se fueron modificando en cantidad y características con el objetivo de encontrar el sistema que mejor proteja el talud de la margen derecha del río. Luego de cada prueba se escaneó el lecho del río. Asimismo, la duración de las pruebas se registró después de cada

prueba para examinar la eficiencia de trabajo. En la Tabla N°26 se muestra el cronograma de las pruebas realizadas.

Tabla N°26 Cronograma de pruebas en el modelo físico.

Fuente: Elaboración propia.

Prueba	Condición	Fecha de operación	Duración de prueba
1	Sin espigones	22/09/2016	13 horas
2	Con 12 espigones	27/10/2016	15 horas
3	Con 11 espigones	20/12/2016	21 horas
4	Con 12 espigones	24/02/2017	25 horas

#### 4.5.2 Descripción de una prueba típica en el modelo

Se llenó el modelo físico lentamente utilizando un caudal de descarga de 80 l/s. Una vez que todo el lecho del río se cubría de agua sin producir erosión, se procedía a incrementar gradualmente el caudal hasta alcanzar el primer caudal del hidrograma de ensayo. (ver Foto N°42)



Foto N° 42 Lámina de agua en regulación sobre el modelo físico.

En la Tabla N°27 se muestra el hidrograma de caudales ensayados.



Tabla N°27 Caudales ensayados en las diferentes pruebas.

Fuente: Diseño de defensas riberas zona La Pastora, PRZ Ingenieros SAC.

Caudal en prototipo (m <sup>3</sup> /s.)	Tiempo en prototipo (horas)	Nivel de agua (m.s.n.m.)
1790	4.5	171.43
4140	9	173.74
6810	13.5	176.09
9500	18	178.18
11910	22.5	179.79
12997	27	180.45
14341	31.5	181.19

Cuando se alcanzó la condición de flujo permanente para el último caudal, se inició la medición de velocidades y niveles de agua mediante el uso del vectrino y nivel de ingeniero respectivamente hasta que termine el hidrograma de avenida.

#### 4.5.2.1 Procedimiento para el registro de velocidades

- a) Se instaló el vectrino en el soporte colocado sobre el puente de medición, el cual permitió su desplazamiento en toda su longitud (Ver Foto N°43).



Foto N° 43 Puente y soporte metálico en el cual se instaló el vectrino.

- b) Se trasladó el puente hasta la sección de medición, colocándose en dirección perpendicular al sentido del flujo.
- c) Con la ayuda de una cinta métrica sobre el puente metálico, se midió la abscisa inicial y final del ancho superficial de la sección, la cara interna del muro y seis abscisas más distribuidas según se muestra en la Figura N°52 y la Tabla N°28.

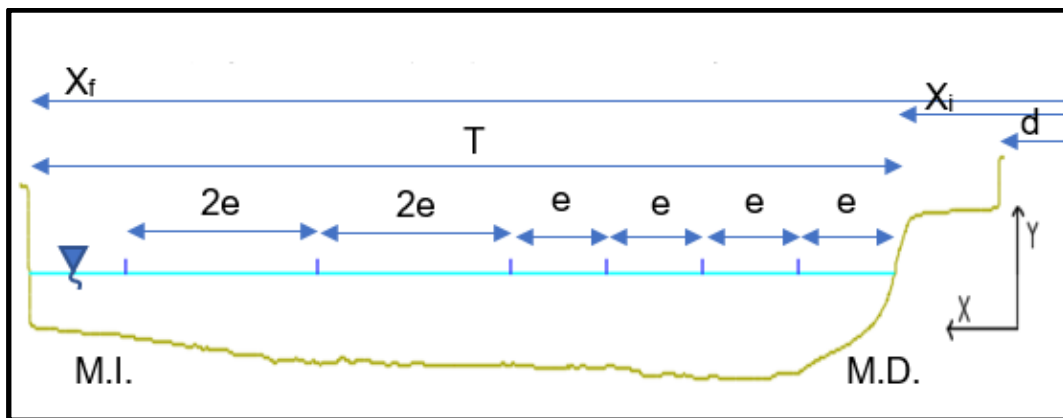


Figura N° 52 Representación de una sección típica para la medición de velocidades.

Tabla N°28 Configuración de una sección de medición para posicionar el instrumento.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Valor
Sección	0+360
Abscisa Inicial	$X_i$
Abscisa Final	$X_f$
Ancho Superficial ( $X_f - X_i$ )	T
Número de divisiones	9
Espaciamiento	e
Abscisa de la cara interna del muro en el margen derecho.	d
Abscisa número seis ( $X_5 + e$ )	$X_6$
Abscisa número cinco ( $X_4 + e$ )	$X_5$
Abscisa número cuatro ( $X_3 + e$ )	$X_4$
Abscisa número tres ( $X_2 + e$ )	$X_3$
Abscisa número dos ( $X_1 + 2e$ )	$X_2$
Abscisa número uno ( $X_f + 2e$ )	$X_1$

- d) Con el vectrino se midió, en cada posición horizontal ( $X_1$  a  $X_6$ ), el perfil de velocidades considerando un desplazamiento vertical de 3,5 cm. La colocación correcta del vectrino es cuando el transmisor de color rojo se orienta en el sentido aguas abajo del flujo (Ver Foto N°44)



Foto N° 44 Posición correcta del vectrino para medir velocidades.

Para esta actividad fue necesaria la participación de dos asistentes, uno encargado de operar el software en una laptop para capturar la información y otro encargado de mover el vectrino sobre el puente metálico. (ver Foto N°45)



Foto N° 45 Asistentes de operación del vectrino en el modelo físico.

Previamente, se debe medir el nivel de agua y tirante de agua para la medición de velocidades por prueba. (ver Figura N°53)

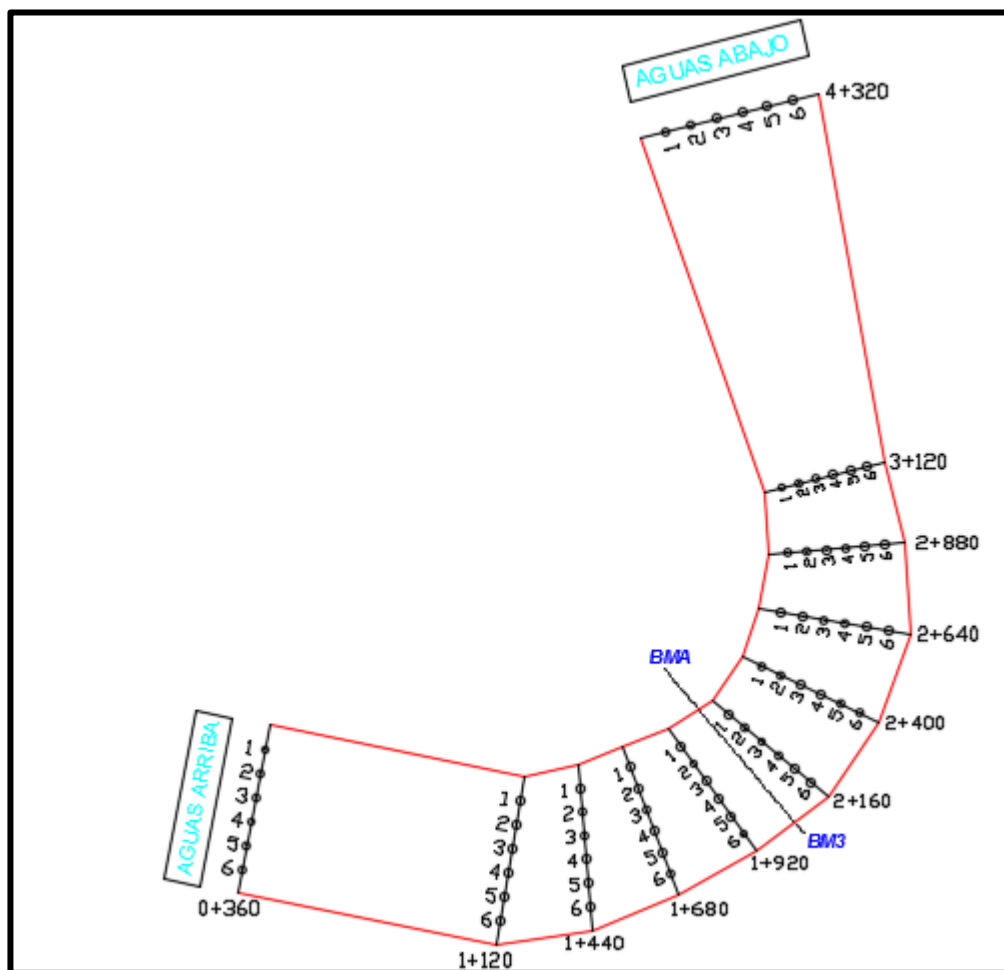


Figura N° 53 Ubicación de puntos de medición de velocidades

#### 4.5.2.2 Procedimiento para el registro de niveles de agua

- Se instaló el nivel de ingeniero a una distancia adecuada entre la sección de medición y el BM de control.
- Se leyó la lectura de la mira milimétrica cuando se colocó sobre el BM de control y en los puntos  $X_i$ ;  $X_1$ ;  $X_2$ ;  $X_3$ ;  $X_4$ ;  $X_5$ ;  $X_6$  y  $X_f$  de la sección de medición.
- Se calculó la cota del nivel del agua aplicando la relación 4.12.

$$Cota Real = Cota BM + [Lectura BM - Lectura obtenida] \lambda \quad (4.12)$$

Donde:

- Cota Real: Nivel de agua obtenido. [m]
- Cota BM: Cota del punto de control. [m]
- Lectura BM: valor observado en la mira para el BM. [m]
- Lectura del punto: valor observado en la mira para el nivel de agua. [m]
- $\lambda$ : Escala de longitudes.

#### 4.5.3 Procesamiento de datos recolectados

Una vez culminado el trabajo de campo, se procedió a realizar los trabajos de gabinete con el procesamiento de los datos medidos.

##### 4.5.3.1 Batimetría

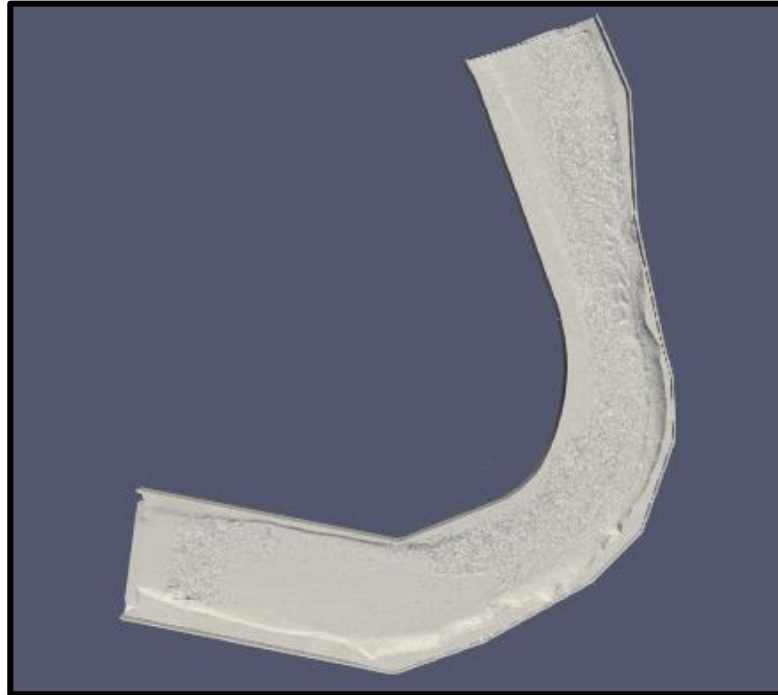
El procesamiento de la información recogida por el escáner laser 3D del modelo fue realizado por la empresa “INCAD Service Ingeniería Internacional”, siguiendo las etapas mostradas en la Tabla N°29.

Tabla N°29 Etapas principales del levantamiento con Laser Escáner 3D.

Fuente: Propuesta de servicio de Escaneó Láser 3D por INCAD service.

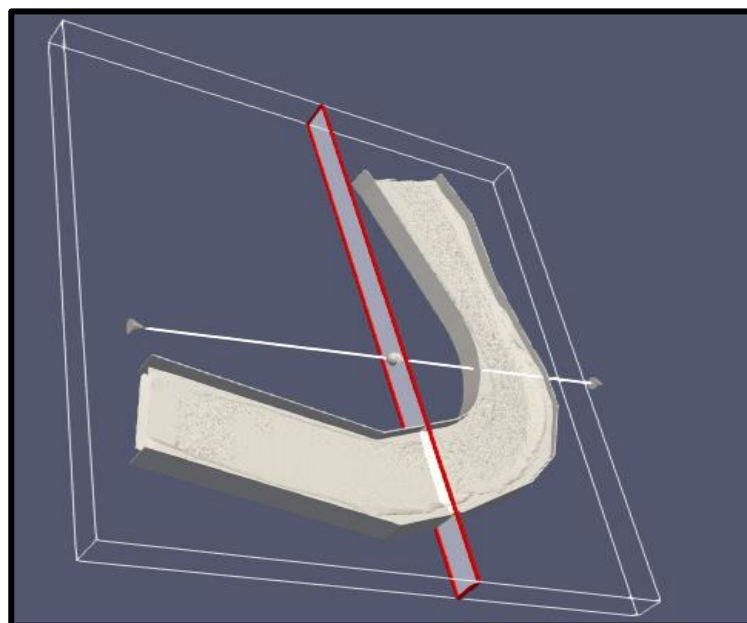
ETAPA	DESCRIPCIÓN
1	Levantamiento en campo con láser escáner 3D. (1 a 2 horas)
2	Armado y depuración de nube de puntos.
3	Exportación a formato requerido para el estudio.
4	Envío de información para el estudio.
5	Reunión para la revisión de resultados.

Se exportaron los datos recogidos en formato (dxf, xyz, stl). El levantamiento presentó una nube de puntos de precisión milimétrica (+/- 2 mm), requiriendo usar la aplicación multiplataforma “Paraview” para el postproceso de generación de sólido. (ver Figura N°54)



*Figura N° 54 Batimetría del lecho representado como superficie.*

El procesamiento de la batimetría incluyó el uso de la herramienta “Slice” para extraer secciones transversales y exportarlo a una hoja de cálculo para visualizar los fenómenos de erosión o sedimentación del lecho del río, sin y con espigones. (Ver Figura N°55)



*Figura N° 55 Plano de corte de la superficie generada en Paraview.*

Finalmente, la exportación de cada sección transversal fue en formato .csv para abrirlo en una hoja de cálculo y plotear las secciones transversales desde una vista aguas arriba. (ver Figura N°56)

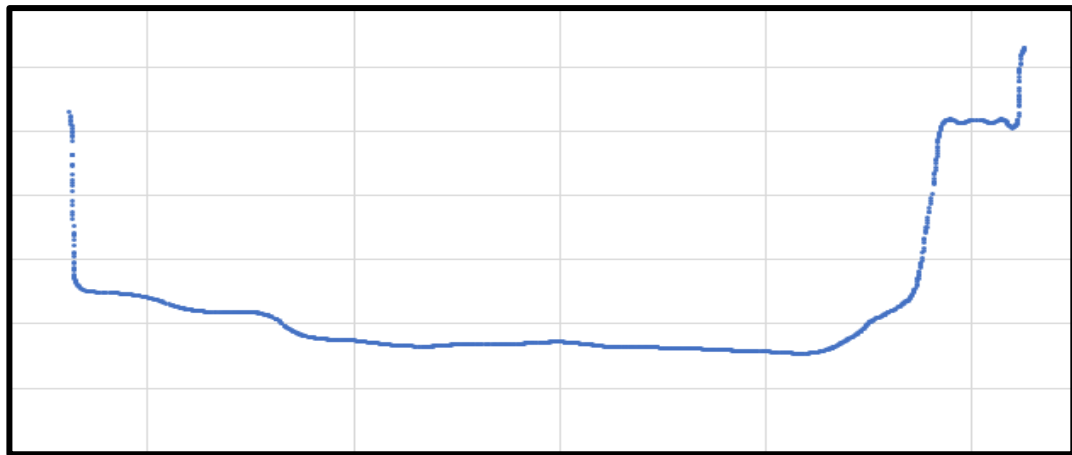


Figura N° 56 Sección Transversal dibujado en una hoja de cálculo.

#### 4.5.3.2 Velocidad

El procesamiento de velocidades consistió en convertir la información medida por el vectrino, en los diferentes puntos de medición, en perfiles de velocidad que permitieron hallar las velocidades medias y superficiales. Debido a la gran cantidad de información registrada, se tuvo que utilizar para el procesamiento, los programas Matlab y Microsoft Excel.

Cada archivo de medición realizado con el vectrino registró las velocidades en las tres direcciones (x,y,z), donde técnicamente la dirección Z1 y Z2 deben ser equivalentes en valor. Según lo mencionado para el registro de velocidades, se explicó que la cantidad de puntos de medición es seis por sección transversal.

Para ver las velocidades, se abrió el archivo con Matlab para visualizar las velocidades en las tres direcciones en una matriz de 9400 filas y 35 columnas para cada dirección y luego de un procesamiento se exporta a Excel para visualizar las velocidades en las tres direcciones. (ver Figura N°57)

H (m)	Vx		Suavi. Exp.	Vy		Vz1		Vz2	
	m/s	mm/s	mm/s	m/s	mm/s	m/s	mm/s	m/s	mm/s
12.6	3.33	3326.18	3326.18	-0.55	-554.35	0.04	38.85	0.05	50.78
12.54	3.31	3306.81	3322.31	-0.57	-568.87	0.06	64.45	0.05	53.33
12.48	3.29	3290.56	3315.96	-0.56	-560.54	0.07	66.67	0.06	60.79
12.42	3.34	3339.70	3320.71	-0.56	-557.04	0.06	59.09	0.07	66.82
12.36	3.38	3377.57	3332.08	-0.54	-535.70	0.06	60.16	0.07	66.48
12.3	3.33	3328.51	3331.37	-0.53	-530.45	0.06	60.08	0.07	67.94
12.24	3.33	3334.33	3331.96	-0.53	-532.49	0.07	75.00	0.07	71.30
12.18	3.34	3339.34	3333.44	-0.53	-528.30	0.07	69.93	0.07	70.39
12.12	3.35	3352.18	3337.18	-0.54	-536.50	0.07	72.18	0.07	68.37
12.06	3.37	3365.60	3342.87	-0.52	-522.57	0.08	75.93	0.07	71.35
12	3.37	3371.91	3348.68	-0.51	-512.23	0.08	77.55	0.08	78.55
11.94	3.38	3375.53	3354.05	-0.50	-496.35	0.08	81.06	0.08	78.95
11.88	3.37	3367.81	3356.80	-0.50	-500.21	0.09	90.01	0.09	89.02
11.82	3.34	3340.25	3353.49	-0.49	-489.18	0.09	94.72	0.09	89.16
11.76	3.37	3371.95	3357.18	-0.52	-521.44	0.09	90.52	0.08	80.90
11.7	3.38	3377.69	3361.28	-0.49	-493.62	0.09	91.20	0.09	90.85
11.64	3.38	3383.04	3365.63	-0.50	-499.27	0.09	87.37	0.09	94.27
11.58	3.37	3367.41	3365.99	-0.51	-508.63	0.10	97.82	0.10	98.32
11.52	3.36	3357.22	3364.24	-0.51	-507.73	0.09	91.12	0.09	94.43
11.46	3.35	3350.03	3361.39	-0.52	-520.54	0.09	94.34	0.09	88.46
11.4	3.34	3338.53	3356.82	-0.53	-527.26	0.09	88.98	0.10	96.55
11.34	3.30	3296.01	3344.66	-0.54	-541.88	0.09	86.58	0.09	88.58
11.28	3.33	3334.92	3342.71	-0.53	-531.05	0.09	89.78	0.09	89.58
11.22	3.31	3312.52	3336.67	-0.52	-517.72	0.09	92.49	0.09	90.30
11.16	3.34	3342.88	3337.91	-0.53	-528.15	0.10	101.26	0.10	95.09

Figura N° 57 Archivo de velocidades en las tres direcciones luego del procesamiento.

Luego, se dividió la cantidad de datos registrados en diferentes filas que representan porciones del perfil de velocidad y se unió en una hoja de cálculo. Finalmente, la velocidad media se calculó mediante el método integral. (ver Figura N°58)

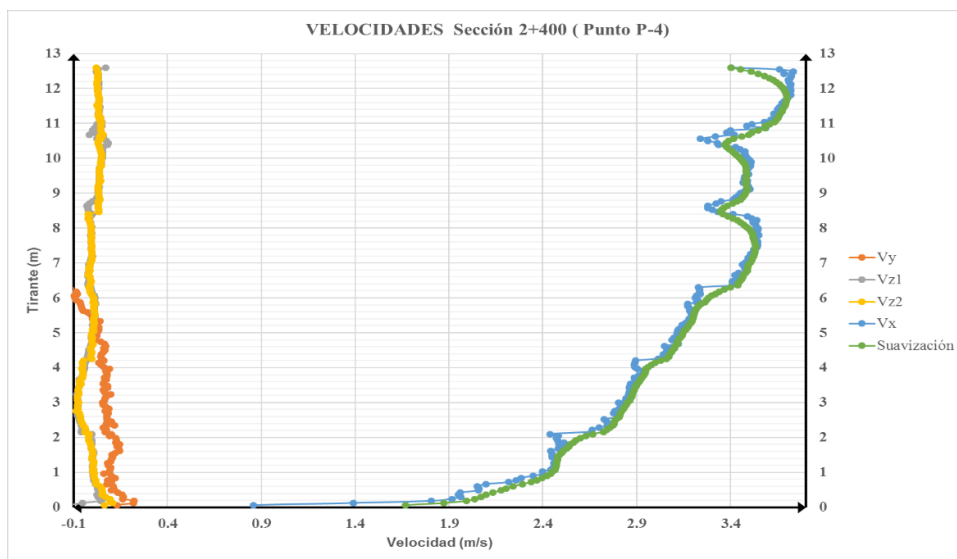


Figura N° 58 Perfil de velocidad en las tres direcciones con la velocidad promedio ponderada.



#### 4.5.3.3 Niveles y tirantes de agua

Con el nivel de ingeniero y los BMs establecidos, se procedió a calcular los tirantes de agua, en cada punto de medición, mediante la diferencia de la cota de agua con la cota del lecho del río. (ver Tabla N°30)

Tabla N°30 Tirantes de agua para una sección típica.

Fuente: Elaboración propia.

Sección	Nivel de agua (m)	Cota de terreno (m)	TIRANTE (Prototipo)
ORILLA (Izquierda)	177.239	177.239	0.000
P1	176.039	165.369	10.670
P2	175.319	164.861	10.458
P3	174.839	165.746	9.093
P4	174.839	167.459	7.380
P5	174.599	168.500	6.099
P6	175.439	170.214	5.225
ORILLA (Derecha)	176.999	176.999	0.000

## CAPITULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de las pruebas realizadas se analizaron en el contexto de controlar las altas velocidades en el tramo curvo, con el objetivo de evaluar la protección de la ribera derecha por efecto directo de la implementación de espigones.

El modelamiento físico como herramienta de investigación permite analizar los datos obtenidos en las pruebas, además, de la posibilidad de generalizar a otros estudios similares con la misma metodología experimental. Asimismo, el uso de hojas de cálculo permitió el análisis e interpretación de resultados ya que la cantidad de información obtenida fue vasta y necesitó ser evaluada en gráficos descriptivos. Fue necesario identificar el efecto del fenómeno en estudio (erosión lateral) mediante la comparación de resultados morfológicos e hidráulicos en condiciones sin protección y con protección de espigones y determinar la efectividad de la mejor alternativa.

Asimismo, se realizó la prueba 2,3 y 4 para optimizar la protección del margen derecho, con cambios específicos en la disposición de espigones, donde la prueba N°3, se modificó el ángulo de expansión del primer espigón a 120° y la prueba N°4, se modificó la separación de espigones para regular la erosión lateral del margen derecho.

### 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Para realizar el análisis comparativo entre las cuatro pruebas, se midieron, para el caudal con periodo de retorno de 50 años, las velocidades medias, niveles de agua y la morfología del cauce en los puntos de estudio indicados en el capítulo IV.

#### 5.1.1 Velocidad media del flujo

En las cuatro pruebas, se midió el perfil de velocidades en cada sección de medición según la configuración indicada en el subcapítulo 4.5.2.1. Se observó que los perfiles de velocidad presentaron saltos en cada altura medida, por lo que se optó por calcular la velocidad ponderada del perfil. También, se calculó la velocidad media en cada sección de medición, como se presenta en las Tablas N°

31; 32; 33 y 34. La ubicación de estas se muestra en las Figuras N° 59; 60; 61 y 62. Los resultados se presentan en escala prototipo.

Tabla N°31 Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°1.

PRUEBA N°1	Velocidad media (m/s)					
	V <sub>6</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>
0+360	2.09	2.4	2.71	2.56	2.79	2.4
1+200	1.7	2.32	2.17	2.48	2.48	2.32
1+440	1.94	2.09	2.32	2.71	2.56	2.48
1+680	2.48	2.63	2.71	2.87	2.94	2.17
1+920	2.48	2.71	2.87	3.10	2.94	2.32
2+160	2.63	2.79	2.94	2.87	2.63	0.31
2+400	3.18	3.10	3.02	2.87	1.94	0.23
2+640	3.18	2.94	2.79	2.40	2.01	0.31
2+880	3.25	2.71	2.63	2.17	1.78	0.00
3+120	3.72	2.94	2.63	2.56	2.17	0.15
4+320	2.01	2.48	2.32	2.48	2.25	0.62

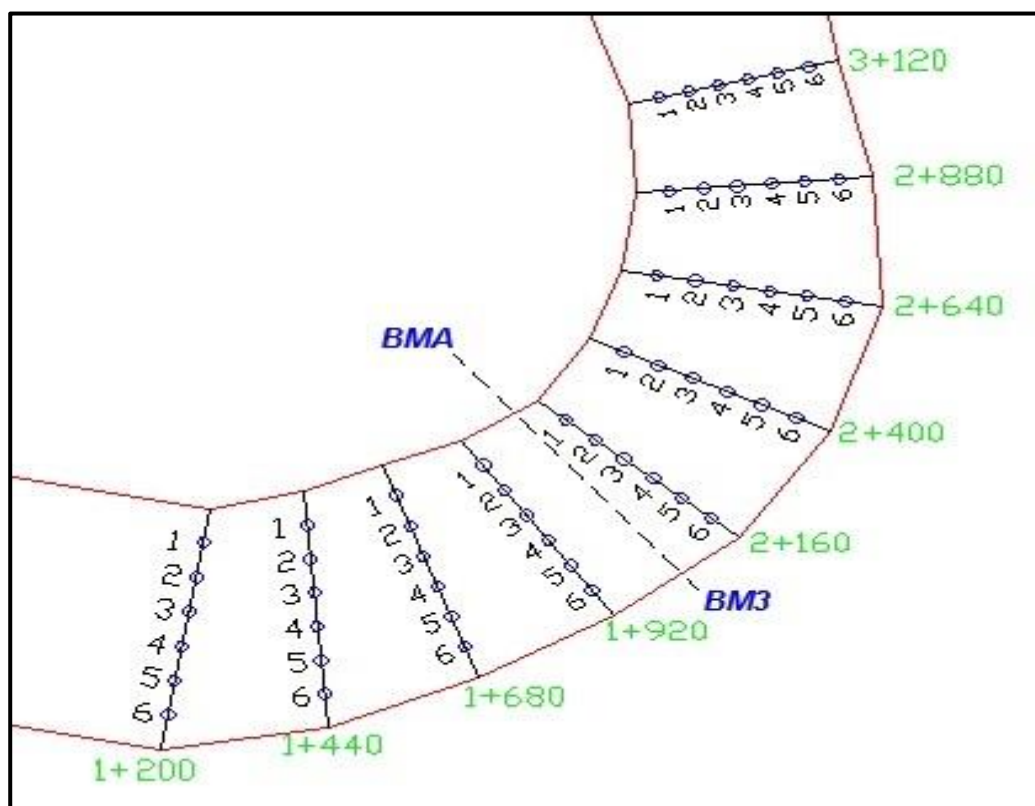


Figura N° 59 Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°1.

- $V_n$ : Velocidad media del flujo en el punto de medición número "n"

Tabla N°32 Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°2.

PRUEBA N°2	Velocidad media (m/s)					
	$V_6$	$V_5$	$V_4$	$V_3$	$V_2$	$V_1$
<b>0+360</b>	2	2.48	2.4	2.25	2.48	2.48
<b>1+200</b>	1.7	2.09	2.09	2.17	2.25	2.4
<b>1+440</b>	1.78	2.17	2.32	2.48	2.4	2.48
<i>Espigón 1 y 2</i>						
<b>1+680</b>	2.71	2.87	3.18	2.87	2.79	0.46
<i>Espigón 3 y 4</i>						
<b>1+920</b>	1.7	3.10	3.10	3.10	2.87	1.70
<i>Espigón 5 y 6</i>						
<b>2+160</b>	1.08	3.25	3.25	3.33	3.10	1.55
<i>Espigón 7 y 8</i>						
<b>2+400</b>	1.01	3.49	3.72	3.41	2.56	0.08
<i>Espigón 9</i>						
<b>2+640</b>	0.93	4.11	3.72	3.18	2.32	0.08
<i>Espigón 10,11 y 12</i>						
<b>2+880</b>	3.18	3.95	3.72	2.94	1.63	0.15
<b>3+120</b>	4.42	4.26	3.95	2.79	2.17	1.16
<b>4+320</b>	2.17	2.25	2.56	2.48	2.56	0.77

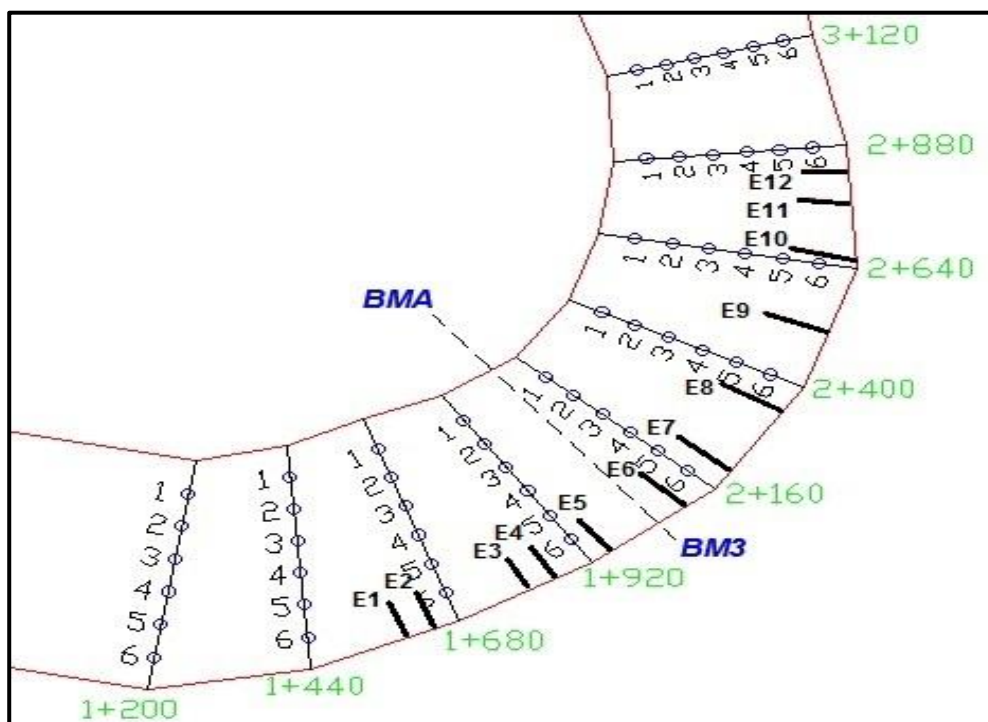


Figura N° 60 Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°2.

- E<sub>n</sub>: Espigón Número “n”

Tabla N°33 Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N°3.

PRUEBA N°3	Velocidad media (m/s)					
	V <sub>6</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>
<b>0+360</b>	2.1	2.25	2.25	2.4	2.25	2.00
<b>1+200</b>	1.78	2.09	2.09	2.4	2.25	2.00
<b>1+440</b>	1.94	2.25	2.17	2.25	2.32	1.55
<i>Espigón 1</i>						
<b>1+680</b>	1.24	2.56	2.56	2.71	2.56	0.39
<i>Espigón 2</i>						
<b>1+920</b>	0.54	3.02	3.02	3.10	2.79	0.39
<i>Espigón 3 y 4</i>						
<b>2+160</b>	1.16	3.10	3.10	2.94	2.63	0.39
<i>Espigón 5 y 6</i>						
<b>2+400</b>	1.55	3.49	3.18	3.25	2.71	0.08
<i>Espigón 7 y 8</i>						
<b>2+640</b>	0.70	3.80	3.49	3.10	2.17	0.00
<i>Espigón 9 y 10</i>						
<b>2+880</b>	0.85	3.80	3.56	2.94	1.47	0.00
<i>Espigón 11</i>						
<b>3+120</b>	2.09	4.11	3.87	3.18	1.63	0.08
<b>4+320</b>	2.09	2.25	2.25	2.09	2.32	0.46

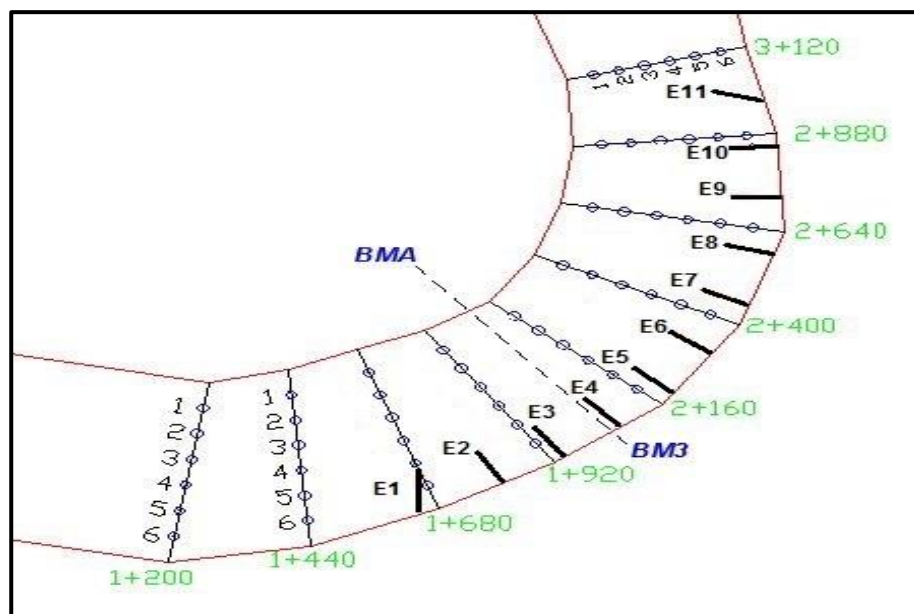


Figura N° 61 Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°3.

Tabla N°34 Velocidades medias para los puntos de medición de la prueba N4.

PRUEBA N°4	Velocidad media (m/s)					
	V <sub>6</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>
<b>Sección de estudio</b>						
<b>0+360</b>	2.1	2.59	2.63	2.87	2.8	2.5
<b>1+200</b>	2.48	2.4	2.32	2.17	2.32	2.01
<b>1+440</b>	1.63	1.94	2.01	2.17	2.25	1.01
<i>Espigón 1</i>						
<b>1+680</b>	1.39	2.56	2.56	2.56	2.56	0.08
<i>Espigón 2 y 3</i>						
<b>1+920</b>	0.39	2.94	2.87	2.71	2.56	0.31
<i>Espigón 4 y 5</i>						
<b>2+160</b>	0.85	3.10	3.02	2.87	2.48	0.08
<i>Espigón 6 y 7</i>						
<b>2+400</b>	1.24	3.33	3.02	2.87	1.39	0.00
<i>Espigón 8 y 9</i>						
<b>2+640</b>	0.93	3.72	3.49	3.02	1.55	0.00
<i>Espigón 10</i>						
<b>2+880</b>	1.63	3.87	3.41	3.02	1.70	0.00
<i>Espigón 11 y 12</i>						
<b>3+120</b>	2.32	2.94	3.80	3.02	2.01	0.15
<b>4+320</b>	2.25	2.40	2.01	2.09	2.09	0.31

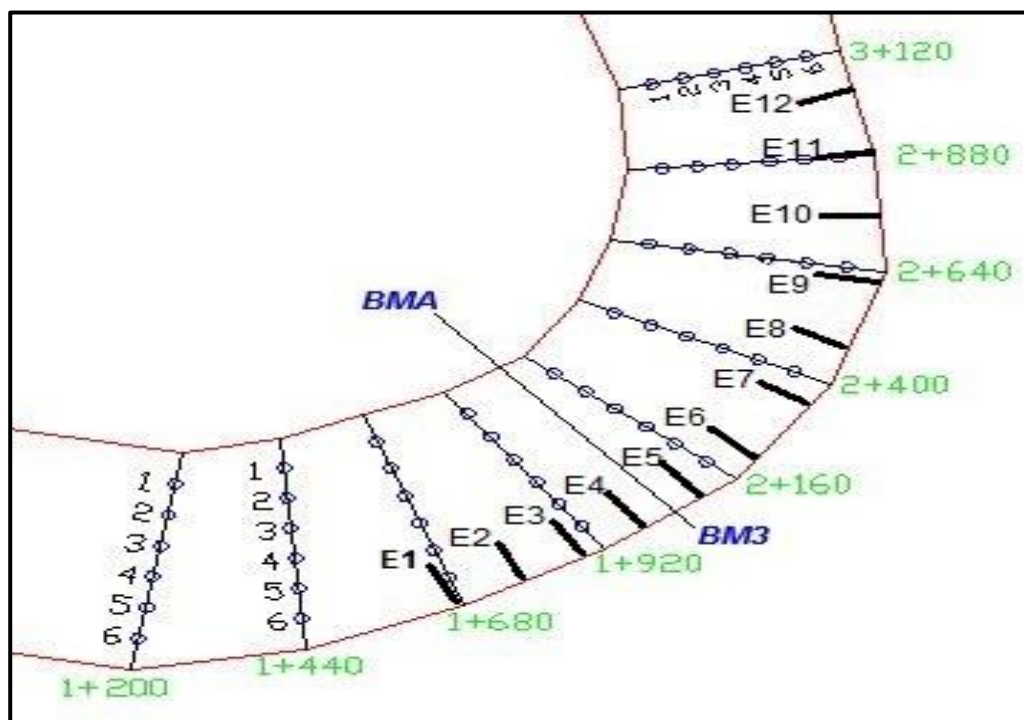


Figura N° 62 Ubicación de puntos de medición y espigones en planta de la prueba N°4.

Con respecto a la segunda, tercera y cuarta prueba, se muestran los espigones ubicados en diferentes posiciones para disminuir la erosión en la margen derecha. Asimismo, la posición de los puntos de medición de velocidades para las secciones de estudio (0+360, 1+200, 1+440, 1+680, 1+920, 2+160, 2+400, 2+640, 2+880, 3+120 y 4+320) en el Anexo 2.

#### 5.1.2 Tirante y Nivel de agua

La medición de los niveles de agua permitió determinar los tirantes según los niveles de fondo del lecho del río. Se midieron los niveles y tirantes de agua promedio en cada punto ( $Y_6$ ,  $Y_5$ ,  $Y_4$ ,  $Y_3$ ,  $Y_2$ ,  $Y_1$ ) de secciones de estudio (0+360, 1+200, 1+440, 1+680, 1+920, 2+160, 2+400, 2+640, 2+880, 3+120 y 4+320) para las cuatro pruebas realizadas.

Tabla N°35 Tirantes de agua para la prueba N°1.

Sección de estudio	Tirante de agua (m)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	10.1	9.7	9.1	7.4	6.8	5.8
1+200	10	8.4	7.9	7.4	6.7	7.4
1+440	13.6	12.2	12.2	11	9.8	9.9
1+680	14.8	12.8	11.2	10.5	9.4	6.8
1+920	13.3	13.8	12	10.3	9.2	8
2+160	15.1	13.1	11.4	10.4	9.2	7.3
2+400	15.8	15.3	12.9	9.4	8	5.6
2+640	11.8	14.9	12.4	17.3	9.7	7.3
2+880	14.5	15	12.2	10.6	8.8	5.9
3+120	17.5	14.6	12.1	8.6	6.5	0.4
4+320	13.6	18.5	12.1	5.7	3.2	0.1

Y<sub>n</sub>: Tirante de agua en el punto de medición número “n”.

Tabla N°36 Tirantes de agua para la prueba N°2.

Sección de estudio	Tirante de agua (m)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	11.6	12.3	11.3	9.8	8.7	7
1+200	11.1	10.6	10	9.5	8.8	8.3
1+440	13.1	11.3	11.2	10.2	9.4	9.4
1+680	13.8	11.5	10	9.5	8.4	6.2
1+920	12.1	12.5	10.8	9.3	8.3	7.3
2+160	14.9	13.2	11.9	10.7	9.6	7.7
2+400	15.6	14.3	11.6	8.3	7.3	5.2
2+640	12.1	14.5	12.7	17.7	10	7.6
2+880	14.9	15.8	13.3	11.8	9.9	6.2
3+120	17.2	14.3	12.7	9	6.8	0.4
4+320	11.5	15.8	11.4	6.2	3.5	0

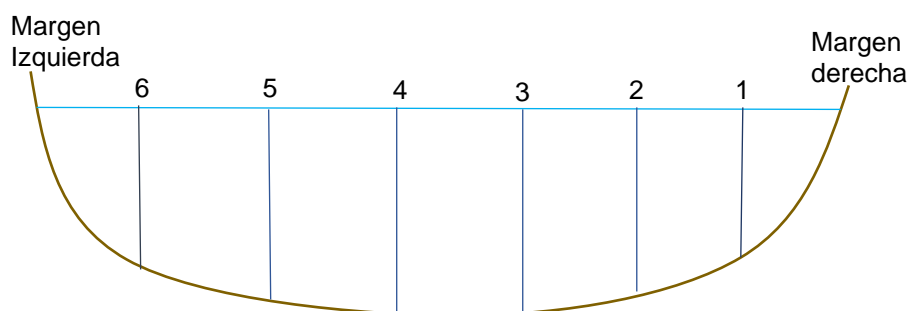




Tabla N°37 Tirantes de agua para la prueba N°3.

Sección de estudio	Tirante de agua (m)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	11.8	12.4	11.6	9.9	8.9	7.1
1+200	11.2	11	10.3	9.7	8.7	8.4
1+440	13.4	12.1	11.9	10.7	9.7	9.7
1+680	14.1	11.8	10.4	9.9	8.7	6.3
1+920	13.2	13.5	11.8	10.1	8.9	7.6
2+160	15.5	13.5	11.9	11	10	7.9
2+400	15.6	14.3	11.6	8.3	7.3	5.2
2+640	13.4	15.7	13.3	18.1	10.3	7.9
2+880	15.6	16.3	13.7	12.1	10.4	6.8
3+120	17.2	14	12.3	8.8	6.5	0.3
4+320	11.5	15.8	11.1	6.1	3.4	0

Tabla N°38 Tirantes de agua para los puntos de medición de cada sección de estudio para la prueba N°4.

Sección de estudio	Tirante de agua (m)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	15.3	15.8	15	13.3	12.2	10
1+200	14.8	14.2	13.7	13.3	12.5	12.1
1+440	16.7	14.9	14.9	13.7	12.5	12.5
1+680	17.5	15.2	13.8	13.2	12.2	9.7
1+920	16	16.6	14.8	13.1	11.9	10.4
2+160	18.3	16.4	14.8	13.7	12.7	10.5
2+400	18	17.4	15.1	11.8	10.6	8.3
2+640	15.4	17.2	14.8	19.9	12.3	9.8
2+880	17.3	17.9	15.2	13.6	11.8	8.4
3+120	19.6	16.5	14.7	11	8.9	2.8
4+320	11.5	15.8	10.3	5	4.7	1

Asimismo, se realizó cuadros separados con respecto a los niveles y tirantes de agua para observar el efecto de la disminución del nivel por efecto de la curvatura del río, para ubicar los puntos de medición de tirantes ver las Figura N°59, 60, 61 y 62 para las cuatro pruebas.

Tabla N°39 Nivel de agua para la prueba N°1.

Sección de estudio	Niveles de agua, NA (msnm.)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	176	175.3	174.8	174.8	174.6	175.4
1+200	176.4	175.2	175.1	175	175	175.9
1+440	177.6	178.1	178.2	178.3	178.3	178.4
1+680	177.8	178.2	178.2	178.3	178.3	178.1
1+920	178	178	177.9	177.9	177.9	177.9
2+160	177.1	176.9	176.9	176.8	177.1	177
2+400	177.6	177.6	177.8	177.9	177.8	177.9
2+640	177.4	177.4	177.4	177.4	177.5	176.2
2+880	177.1	176.7	176.7	176.7	176.7	176.7
3+120	176.9	176.9	176.9	176.7	177.5	177.4
4+320	175.7	175.7	175.6	175.3	176	175.8

NA<sub>n</sub>: Nivel de agua en el punto de medición número “n”.

Tabla N°40 Nivel de agua para la prueba N°2.

Sección de estudio	Niveles de agua, NA (msnm.)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	177	177.2	177.1	177.2	177.2	177.2
1+200	177.3	177.3	177.2	177.2	177.2	177
1+440	178	177.8	177.5	177.2	177.2	177.1
1+680	177.2	177.2	177.2	177.1	177	177.1
1+920	177.3	177.1	176.9	176.7	176.6	176.7
2+160	177.5	177.3	177.3	177.3	177.2	176.9
2+400	177.3	176.9	176.7	176.6	176.8	177.7
2+640	177.8	177.8	177.8	177.7	177.2	176.5
2+880	177.4	177.8	177.8	177.8	177.5	177.1
3+120	176.9	177.2	177.3	177.3	177.2	177.1
4+320	175.7	176.1	176	175.9	175.7	175.4

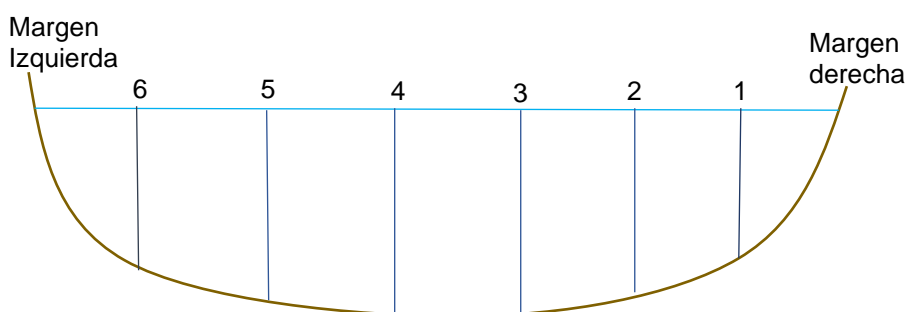


Tabla N°41 Nivel de agua para la prueba N°3.

Sección de estudio	Niveles de agua, NA (msnm.)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	177.1	177.2	177.4	177.4	177.4	177.4
1+200	177.1	177.6	177.5	177.4	177.2	177.4
1+440	178.2	178.2	178	178	178	177.4
1+680	177.4	177.5	177.6	177.5	177.4	177.4
1+920	177.7	177.7	177.7	177.7	177.6	177.8
2+160	177.7	177.7	177.6	177.4	177.5	177.5
2+400	177.3	176.9	176.7	176.6	176.8	177.7
2+640	178	178	178.1	178.3	178.4	177.8
2+880	178	178.3	178.1	178.1	178	177.8
3+120	176.8	176.9	177.1	176.9	176.9	177.1
4+320	175.6	175.8	175.8	175.6	175.4	175.4

Tabla N°42 Nivel de agua para la prueba N°4.

Sección de estudio	Niveles de agua, NA (msnm.)					
	6	5	4	3	2	1
0+360	180.2	180.7	180.8	180.7	180.7	180.7
1+200	181	181	181	180.9	180.8	180.7
1+440	181	181	181	180.9	180.8	180.7
1+680	180.8	181	180.9	180.9	180.8	180.7
1+920	180.5	180.7	180.7	180.7	180.7	180.6
2+160	180.3	180.4	180.3	180.2	180.4	180.3
2+400	180.4	180.3	180.2	180.1	179.9	180.1
2+640	180	180.1	179.9	179.8	179.8	179.8
2+880	179.6	179.7	179.7	179.6	179.6	179.5
3+120	179.3	179.3	179.3	179.4	179.4	179.5
4+320	178.1	178.2	178	178	177.9	177.8

### 5.1.3 Nivel de lecho

El escaneo del lecho del río antes y después de cada prueba, permitió obtener la morfología del cauce (Subcapítulo 4.5.3.1), de esta manera se pudo establecer la erosión y sedimentación que se produjo cerca de la ribera derecha, en el tramo en curva, para cada alternativa de protección con espigones con espigones.

Se escanearon cinco superficies:

1. Situación inicial del lecho del río, sin espigones de protección ( $S_0$ ).
2. Lecho del río luego de la prueba N°1 ( $S_1$ ).
3. Lecho del río luego de la prueba N°2 ( $S_2$ ).
4. Lecho del río luego de la prueba N°3 ( $S_3$ ).
5. Lecho del río luego de la prueba N°4 ( $S_4$ ).

A continuación, la información extraída del escáner laser se grafican mediante el software “Paraview”, a continuación, se muestran las siguientes Figuras representativas de la superficie para cada prueba realizada.

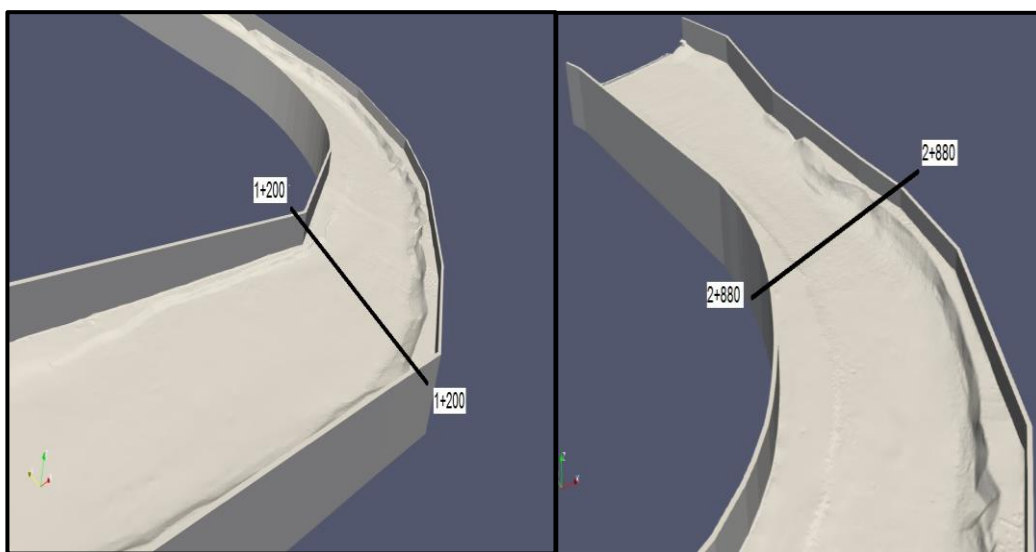


Figura N° 63 Superficie  $S_0$  con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo

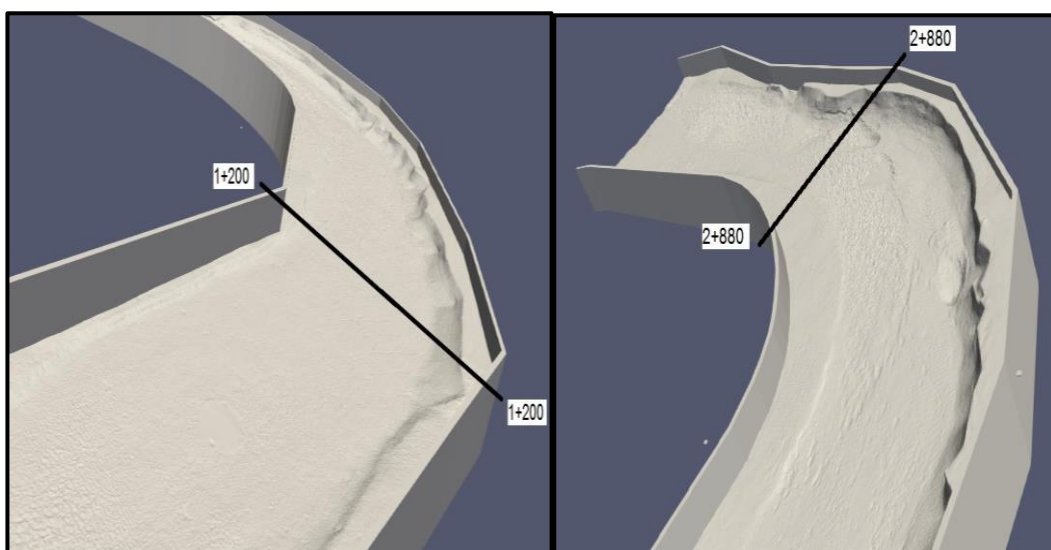


Figura N° 64 Superficie  $S_1$  con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo

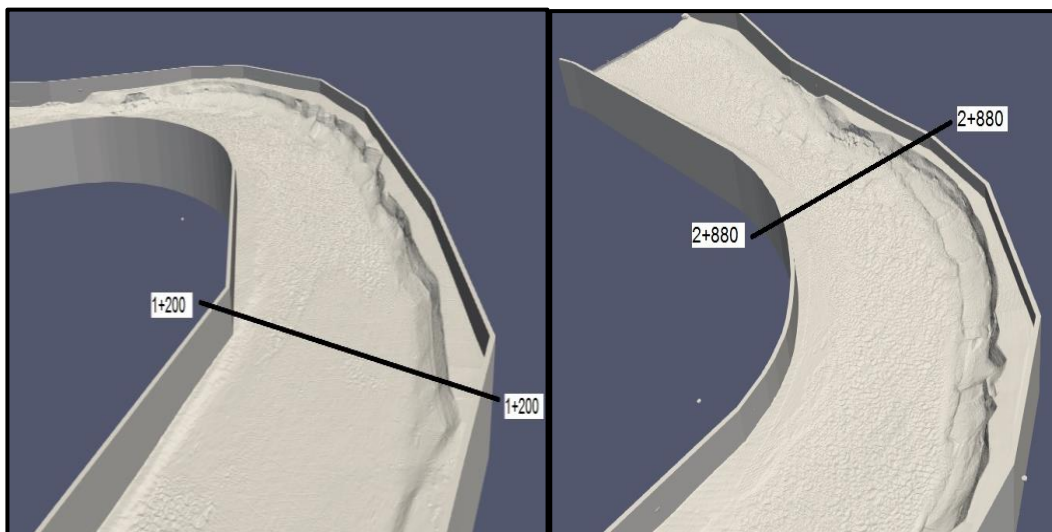


Figura N° 65 Superficie  $S_2$  con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo

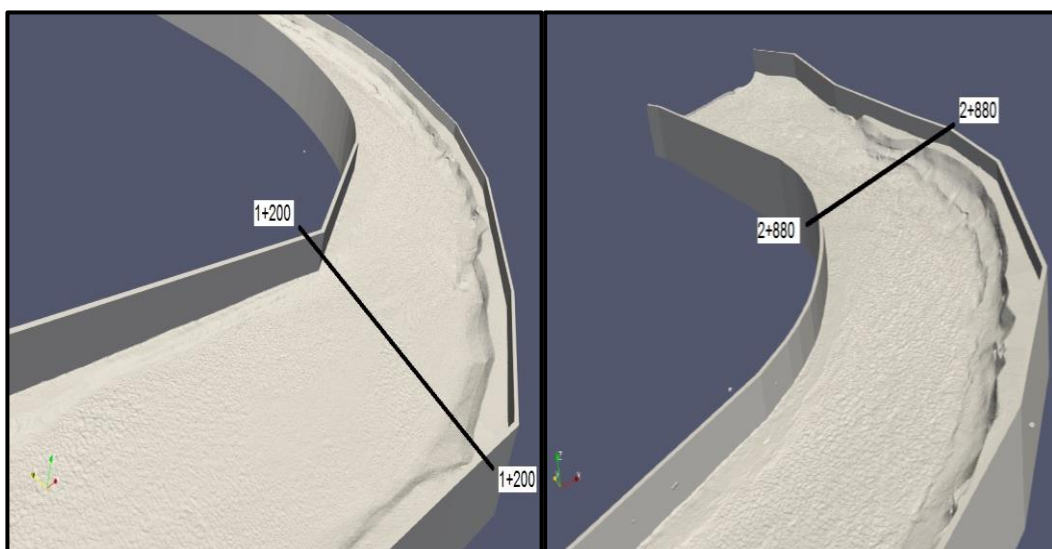


Figura N° 66 Superficie  $S_3$  con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo

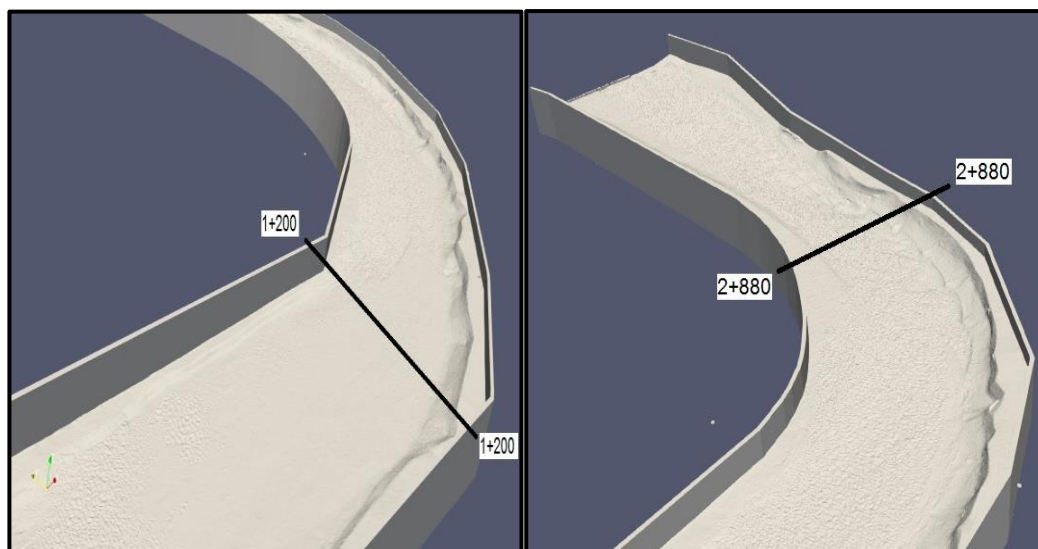


Figura N° 67 Superficie  $S_4$  con vista al tramo inicial (lado izquierdo) y tramo final (lado derecho) del modelo

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE RESULTADOS

### 5.2.1 Análisis de velocidades

En las Tablas N° 41, 42 y 43 se muestran los valores comparativos de las velocidades medias para el escenario sin espigones (prueba N°1) con respecto a los escenarios con espigones (pruebas N°2; N°3 y N°4). Asimismo, se calculó la dispersión entre la velocidad media con espigones y sin espigones para establecer la zona de la ribera con más efectividad en reducir la velocidad del flujo cerca al margen derecho.

-El análisis de velocidades será realizado de manera cuantitativa (Tabla N°48; 49 y 50) y cualitativa (Figura N°68 y 69) para una mejor comprensión y discusión de los resultados.

Tabla N° 43 Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 2 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5.

Sección de estudio	Punto 6		Variación Porcentual	Punto 5		Variación Porcentual
	V <sub>6</sub> (m/s)			V <sub>5</sub> (m/s)		
	Con espigones (Prueba 2)	Sin espigones (Prueba 1)		Con espigones (Prueba 2)	Sin espigones (Prueba 1)	
0+360	2	2.09	-4.3%	2.48	2.40	3.23%
1+200	1.70	1.70	0.00%	2.09	2.32	-10.00%
1+440	1.78	1.94	-8.00%	2.17	2.09	3.70%
1+680	2.31	2.48	9.38%	2.87	2.63	8.82%
1+920	1.70	2.48	-31.45%	3.10	2.71	14.29%
2+160	1.08	2.63	-58.82%	3.25	2.79	16.67%
2+400	1.01	3.18	-68.29%	3.49	3.10	12.50%
2+640	0.93	3.18	-70.73%	4.11	2.94	39.47%
2+880	3.18	3.25	-2.38%	3.95	2.71	45.71%
3+120	4.42	3.72	18.75%	4.26	2.94	44.74%
4+320	2.17	2.01	7.69%	2.25	2.48	-9.38%

- V<sub>n</sub>: Velocidad media del flujo en el punto de medición número “n”

Tabla N°44 Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 3 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5.

Sección de estudio	Punto 6		Variación Porcentual	Punto 5		Variación Porcentual
	V <sub>6</sub> (m/s)			V <sub>5</sub> (m/s)		
	Con espigones (Prueba 3)	Sin espigones (Prueba 1)		Con espigones (Prueba 3)	Sin espigones (Prueba 1)	
0+360	2.1	2.09	0.48%	2.25	2.40	-6.45%
1+200	1.78	1.70	4.55%	2.09	2.32	-10.00%
1+440	1.94	1.94	0.00%	2.25	2.09	7.41%
1+680	1.24	2.48	-50.00%	2.56	2.63	-2.94%
1+920	0.54	2.48	-78.13%	3.02	2.71	11.43%
2+160	1.16	2.63	-55.88%	3.10	2.79	11.11%
2+400	1.55	3.18	-51.22%	3.49	3.10	12.50%
2+640	0.70	3.18	-78.05%	3.80	2.94	28.95%
2+880	0.85	3.25	-73.81%	3.80	2.71	40.00%
3+120	2.09	3.72	-43.75%	4.11	2.94	39.47%
4+320	2.09	2.01	3.85%	2.25	2.48	-9.38%



Tabla N°45 Comparación de velocidades medias obtenida en la Prueba 4 respecto a la Prueba 1 (sin espigones) para los puntos 6 y 5..

Sección de estudio	Punto 6		Variación Porcentual	Punto 5		Variación Porcentual
	V <sub>6</sub> (m/s)			V <sub>5</sub> (m/s)		
	Con espigones (Prueba 4)	Sin espigones (Prueba 1)		Con espigones (Prueba 4)	Sin espigones (Prueba 1)	
0+360	2.10	2.09	0.48%	2.79	2.40	7.16%
1+200	2.48	1.70	45.45%	2.40	2.32	3.33%
1+440	1.63	1.94	-16.00%	1.94	2.09	-7.41%
1+680	1.39	2.48	-43.75%	2.56	2.63	-2.94%
1+920	0.39	2.48	-84.38%	2.94	2.71	8.57%
2+160	0.85	2.63	-67.65%	3.10	2.79	11.11%
2+400	1.24	3.18	-60.98%	3.33	3.10	7.50%
2+640	0.93	3.18	-70.73%	3.72	2.94	26.32%
2+880	1.63	3.25	-50.00%	3.87	2.71	42.86%
3+120	2.32	3.72	-37.50%	2.94	2.94	0.00%
4+320	2.25	2.01	11.54%	2.40	2.48	-3.12%

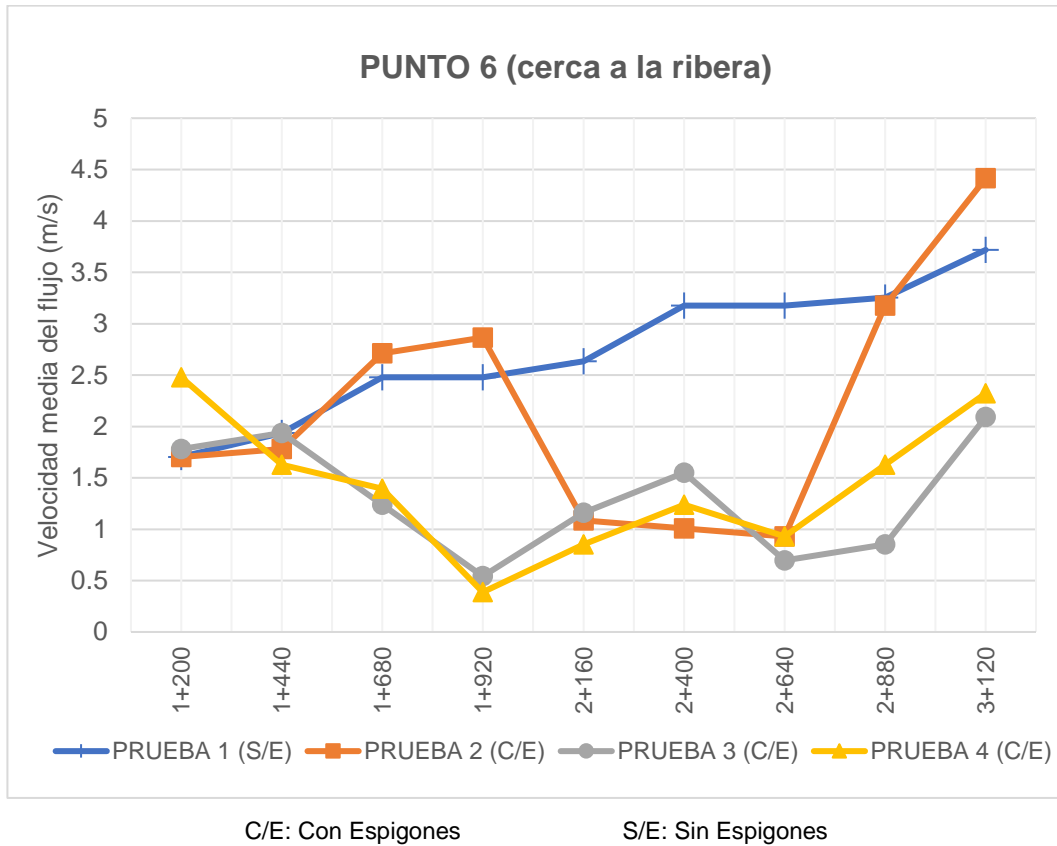


Figura N° 68 Esquema de velocidades cercana a la superficie sobre el punto 6 en las cuatro pruebas.

El análisis de velocidades en el punto 6 para las nueve secciones de estudio desde la 1+200 hasta la 3+120, porque son nueve secciones ubicada en la curva del río, se describió la variación en magnitud de la velocidad media y la cantidad de secciones que posean dicha variación, con respecto a las velocidades de la prueba N°1. Bajo este enfoque, para la prueba N°3 y N°4 se puede observar que las velocidades medias disminuyeron en mayor magnitud desde a sección 1+680 hasta la 3+120).

Asimismo, vemos que la mayor disminución de velocidades cerca de la margen derecha, por la presencia de los espigones, se produce en la prueba N°4.

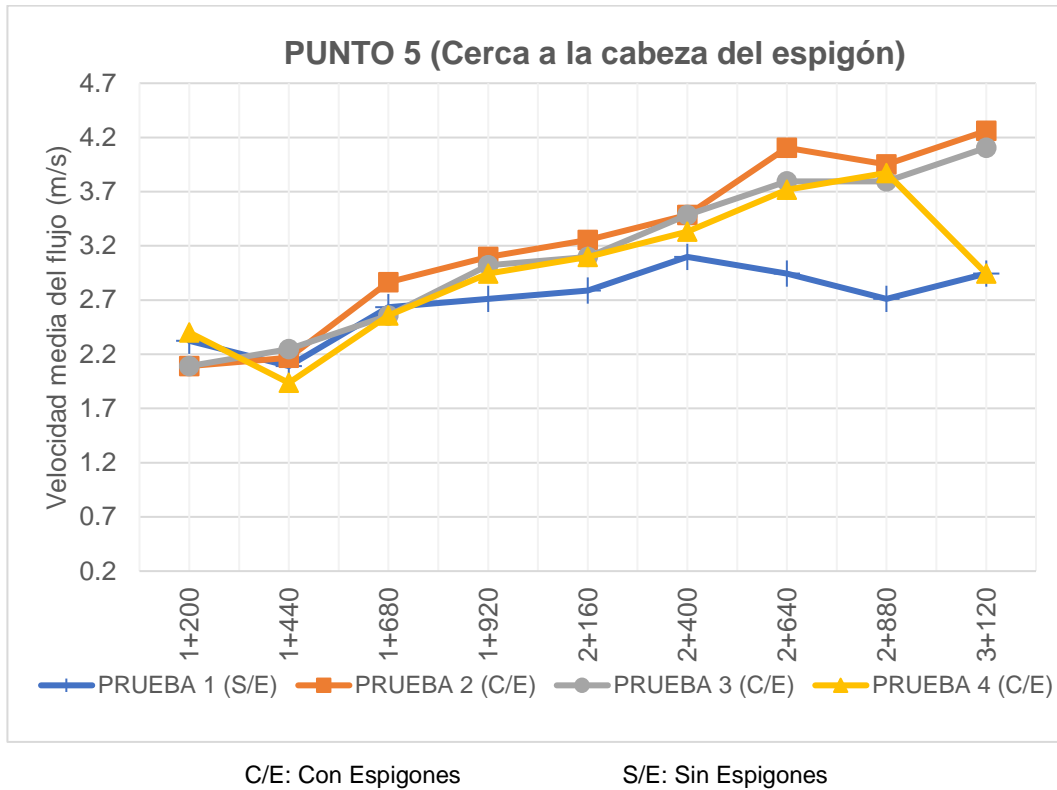
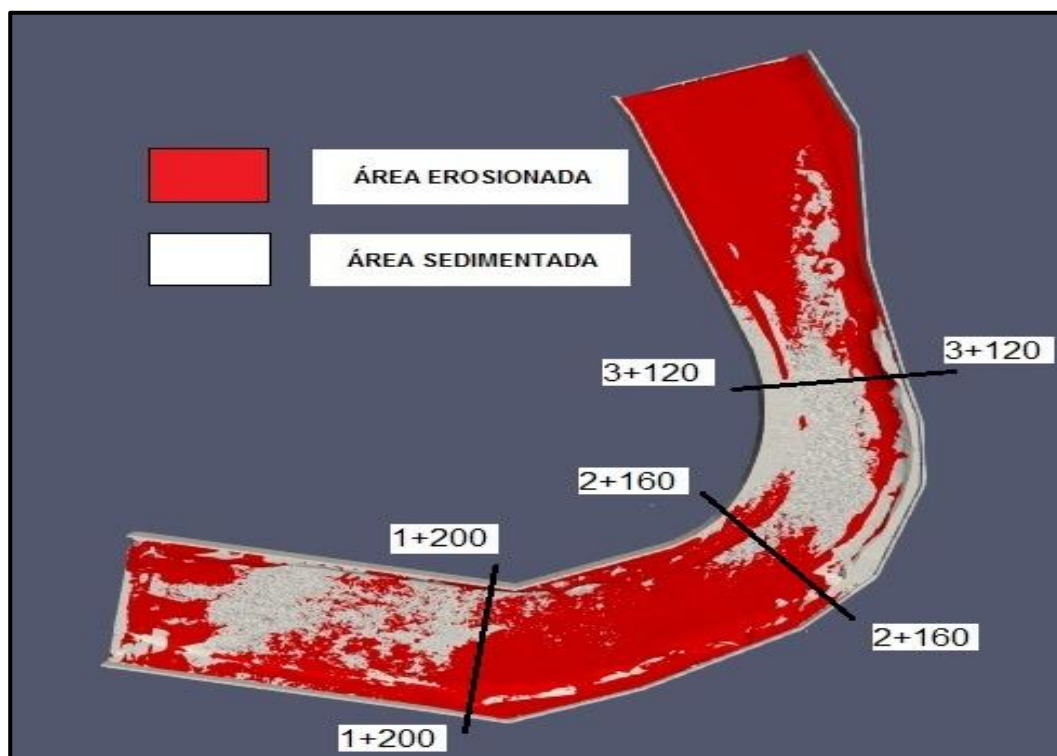


Figura N° 69 Esquema de velocidades media del flujo sobre el punto 5 en las cuatro pruebas.

En el análisis del punto 5, se observa el aumento de la velocidad media en mayor cantidad de secciones respecto a las velocidades registradas en la prueba N°1. Las velocidades aumentaron en la prueba N°2, desde la sección 1+440 hasta la 3+120. En las pruebas N°3 y N°4, la velocidad principalmente se incrementó, pero en menor magnitud. Como comentario a la descripción anterior, se puede observar un mayor aumento de velocidades en lejanía de la ribera del margen derecho debido a la posición de espigones en la prueba N°2 y con respecto a las demás alternativas aumentaron con la mayoría de secciones en relación a la prueba N°1.

### 5.2.2 Variación de la profundidad de erosión

Con el objetivo de verificar la efectividad de la alternativa de protección ("Ingeniería de atascos de troncos"), se estableció gráficos descriptivos (secciones transversales) de los resultados morfológicos reproducidos por el escaneo laser, para observar la variación de profundidad de erosión, cerca de la ribera del margen derecho del río. Además, se ploteó la variación de niveles de lecho en vista en planta para las cuatro pruebas con respecto a la superficie original.



*Figura N° 70 Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°1.*

De manera cualitativa, se aprecia que el área erosionada entre las secciones 1+200 y 2+160 es abundante, mientras existe un área sedimentada de gran amplitud sobre el margen izquierdo entre las secciones 2+160 y 3+120 con zonas de erosión menor sobre el margen derecho.

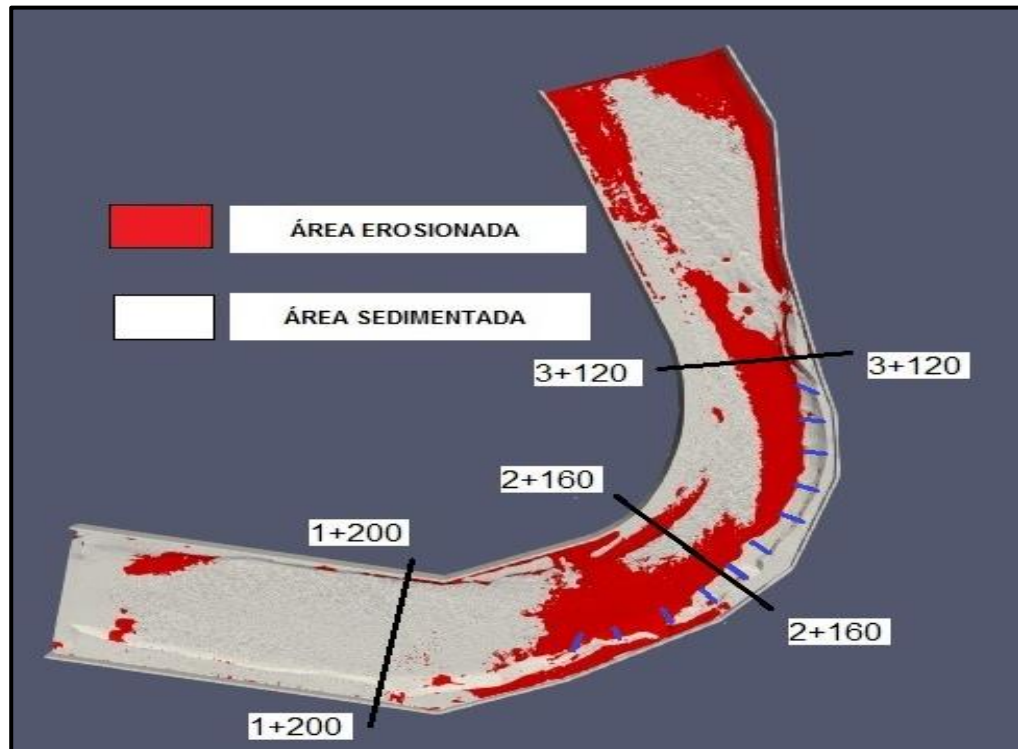


Figura N° 71 Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°2.

En la comparación de superficies  $S_2$  y  $S_0$ , donde el segundo sistema de espigones tuvo una modificación con respecto al ángulo del primer espigón se aprecia que el área erosionada entre las secciones 1+200 y 2+160 aumentó en extensión cerca de la ribera del margen respecto al caso anterior, mientras existe un área sedimentada de regular extensión sobre la ribera del margen derecho entre las secciones 2+160 y 3+120, donde se aprecia menos playas de sedimentos respecto al caso anterior.

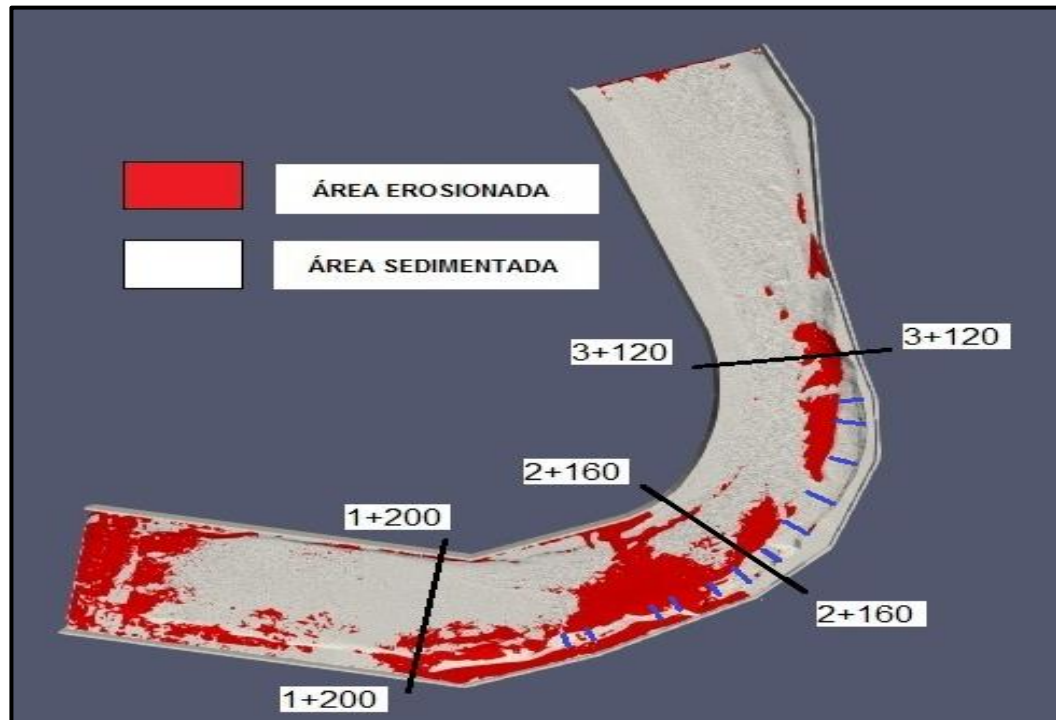


Figura N° 72 Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°3.

En la comparación de superficies  $S_3$  y  $S_0$ , y con la implementación del primer sistema de espigones, se aprecia que el área erosionada entre las secciones 1+200 y 2+160 ha disminuido, asimismo existe un área sedimentada de gran extensión sobre la ribera del margen derecho entre las secciones 2+160 y 3+120 con zonas de erosión aguas debajo de la sección B-B. Afortunadamente, la alternativa de protección redujo la erosión lateral sobre la ribera entre las secciones 1+200, 2+160 y 3+120, pero aumento la erosión en aguas abajo del acantilado cercano a la sección 3+120.

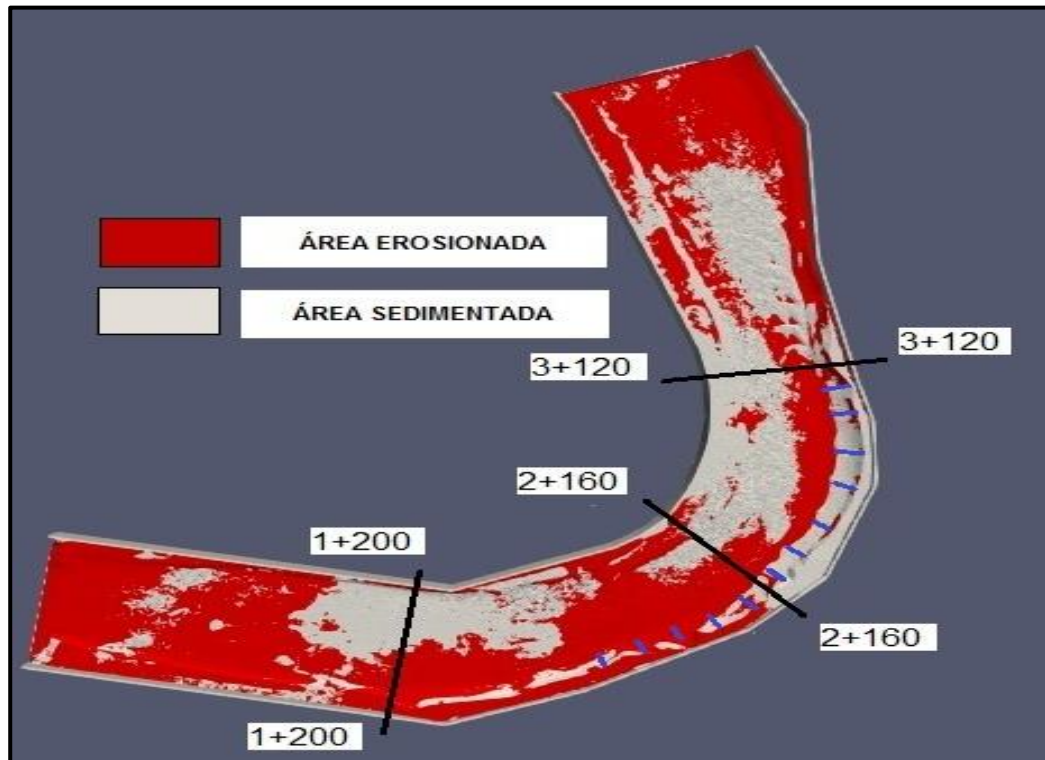


Figura N° 73 Vista en planta de la variación de nivel de lecho luego de la Prueba N°4.

Finalmente, el tercer sistema de espigones con modificaciones en separación y ángulo de orientación para ciertos espigones permitió observar que el área erosionada entre la sección 1+200 y 2+160 aumentó sobre la ribera del margen derecho con respecto a las anteriores alternativas. Asimismo, el área depositada entre la sección 2+160 y 3+120 amplió su extensión gradualmente con playas de material de lecho y cumpliendo la función de proteger la ribera con nuevos márgenes para el cauce.

Asimismo, la comparación de la morfología del cauce se interpretó mediante la comparación de secciones transversales como un análisis cuantitativo que permita identificar la variación de profundidad de erosión cerca de la ribera del margen derecho entre las cinco superficies ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ ), mediante la verificación de niveles de elevación en el eje vertical.

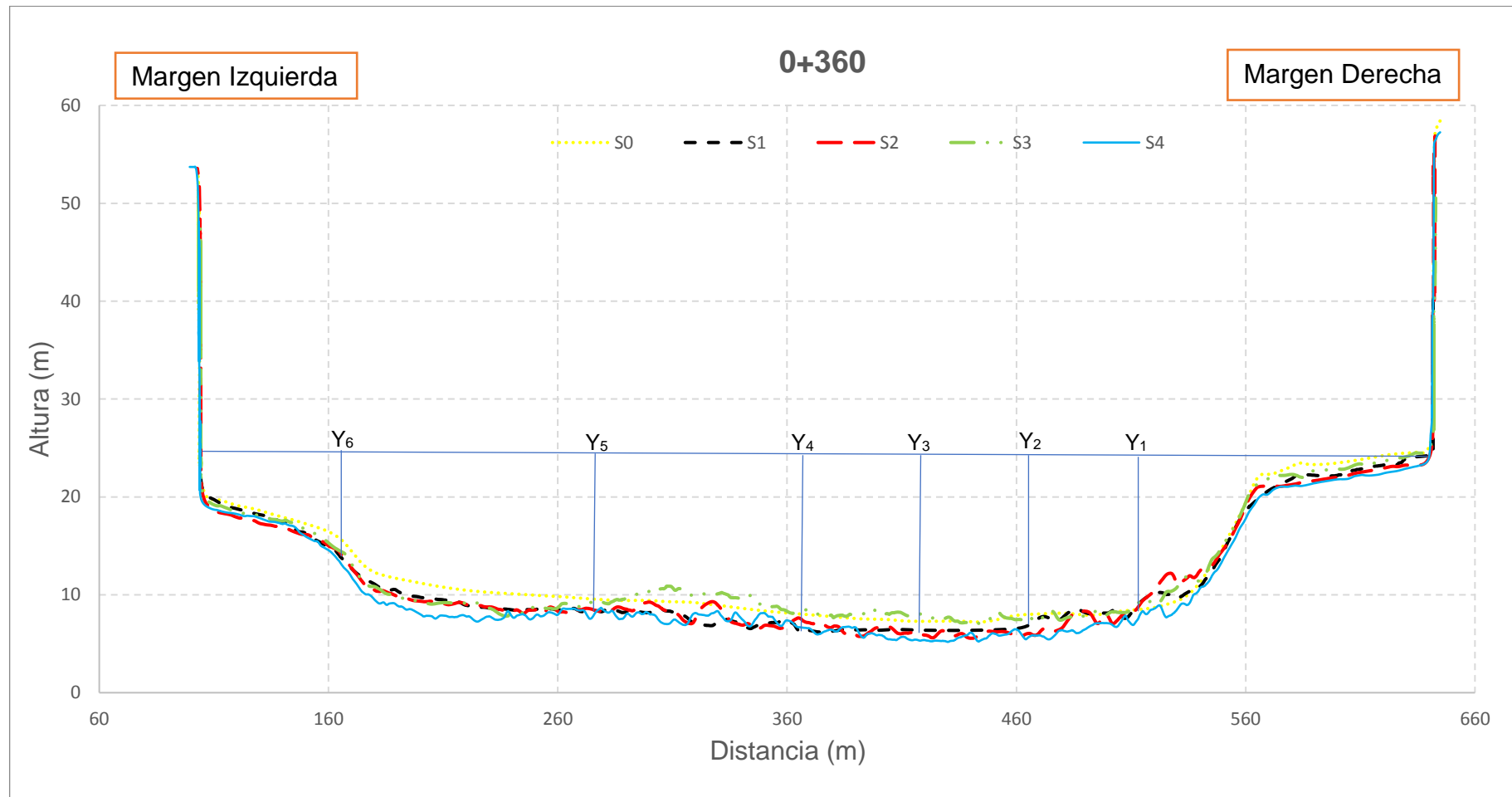


Figura N° 74 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "0+360".



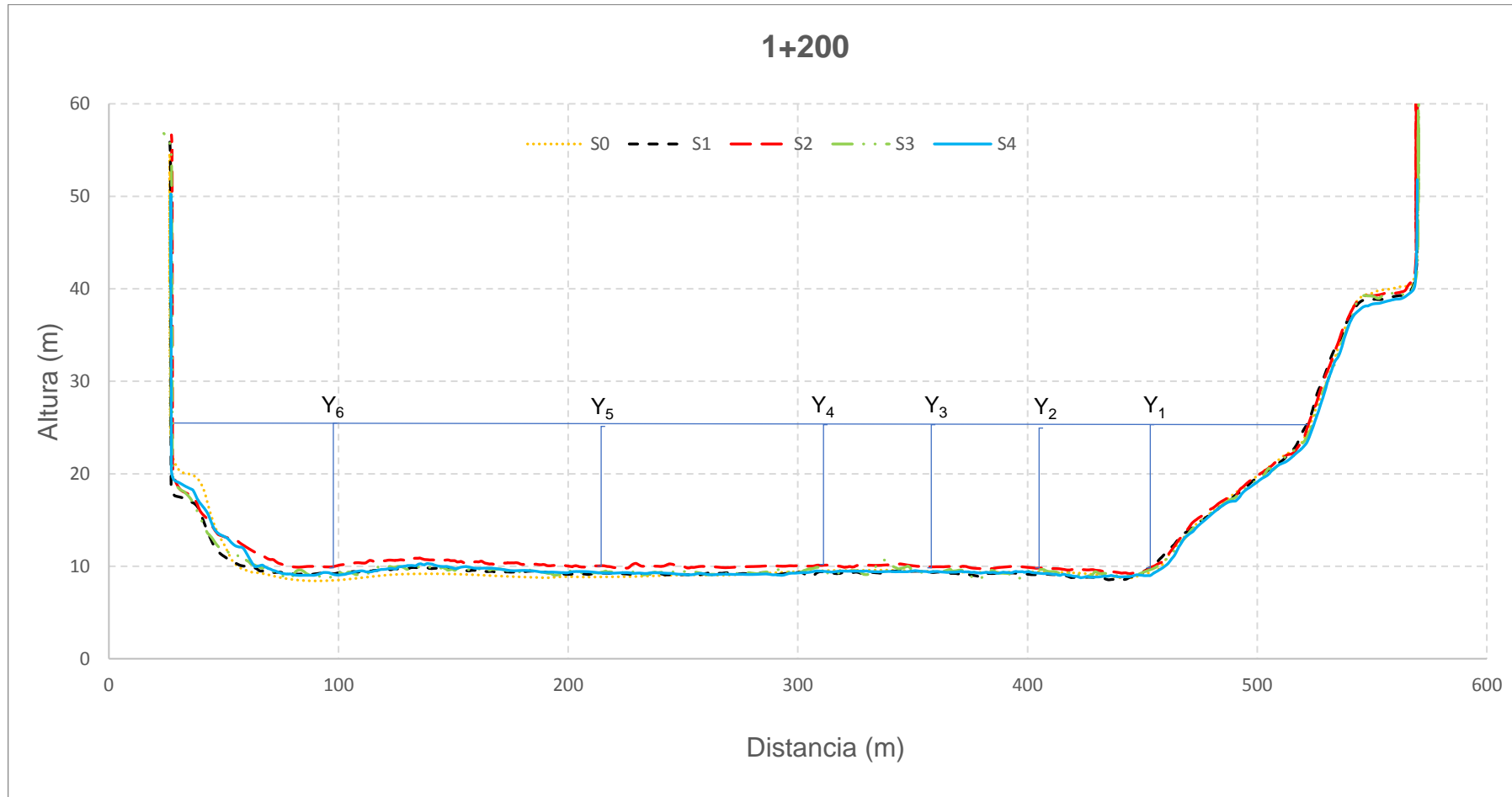


Figura N° 75 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "1+200".

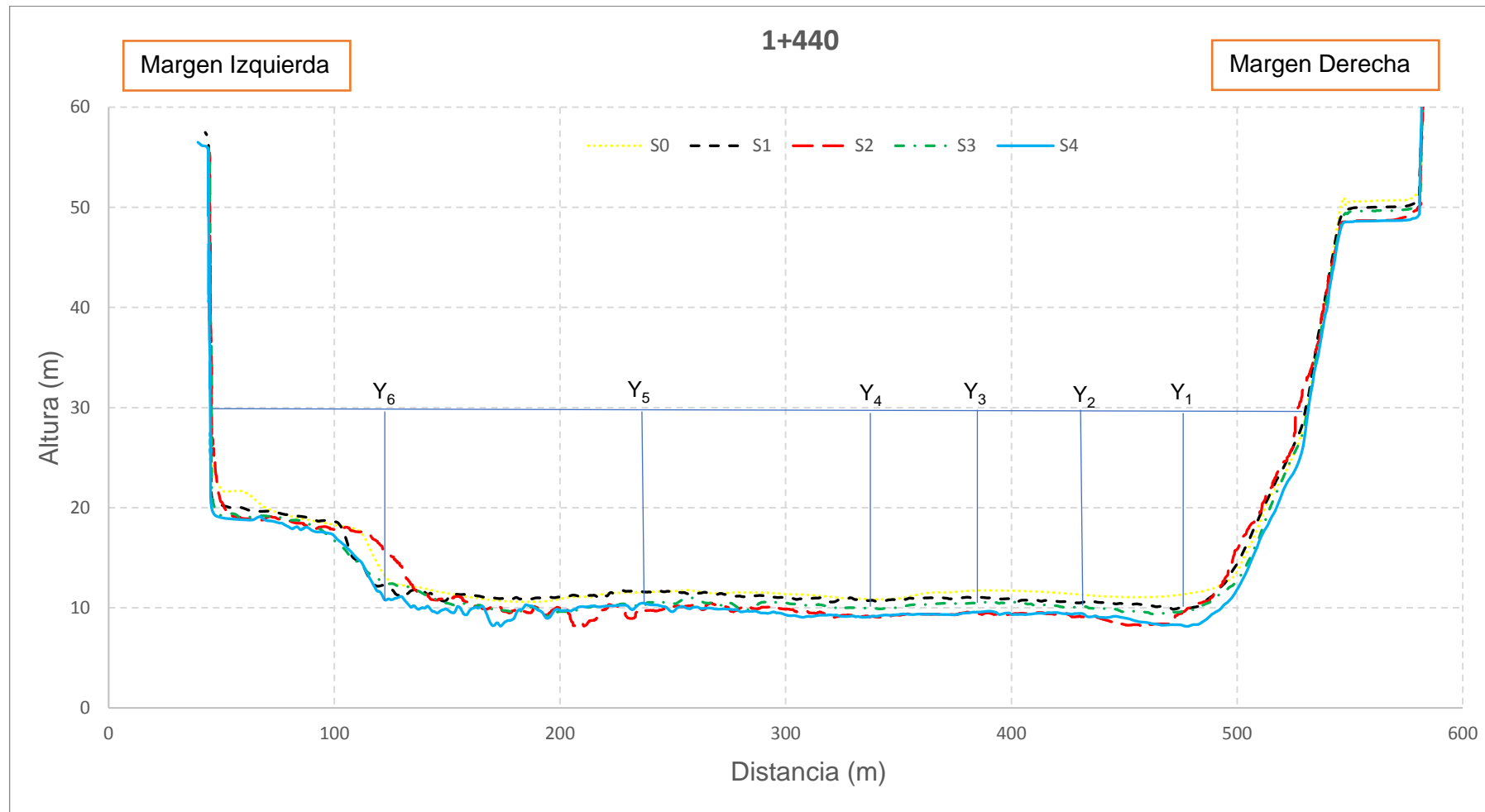


Figura N° 76 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "1+440".

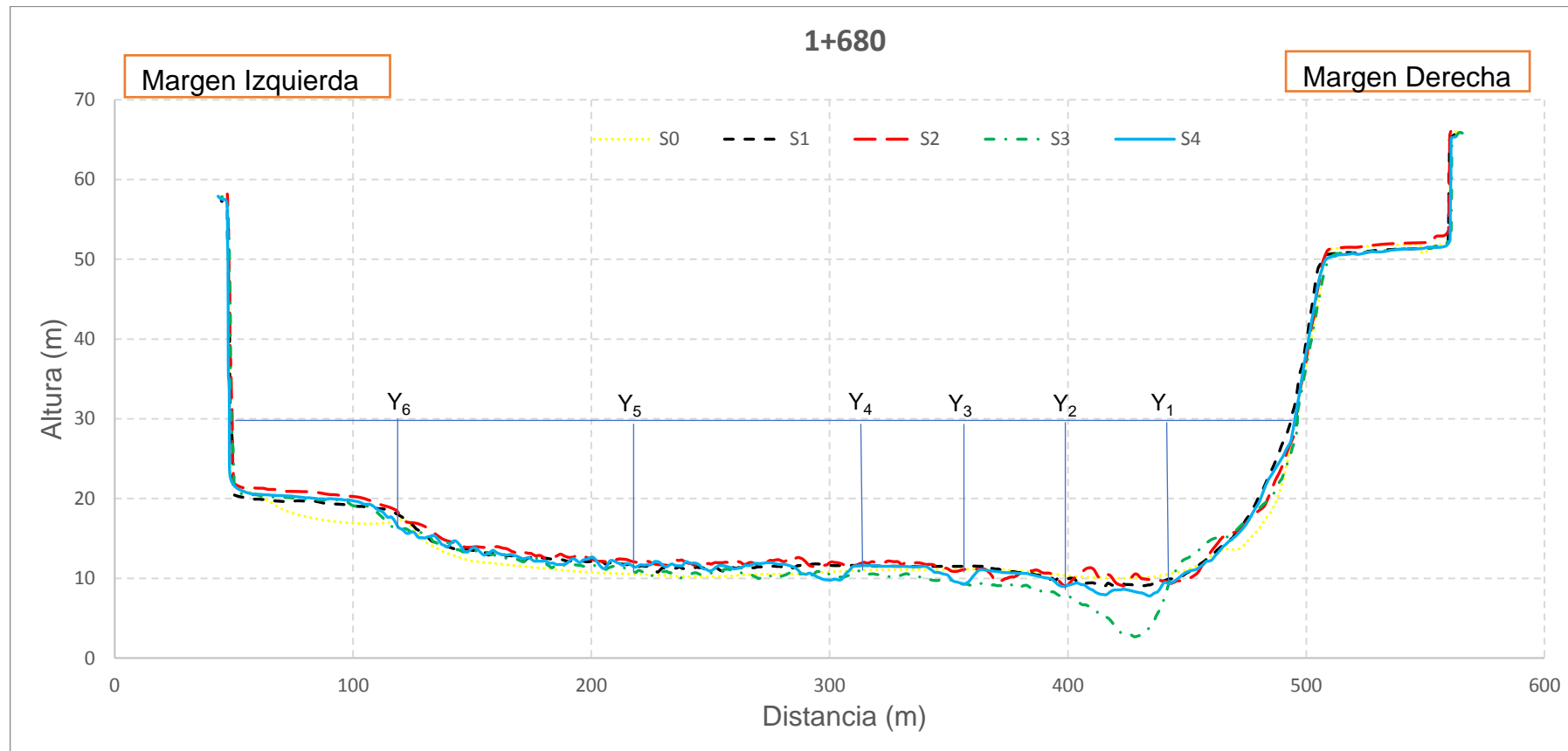


Figura N° 77 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "1+680".

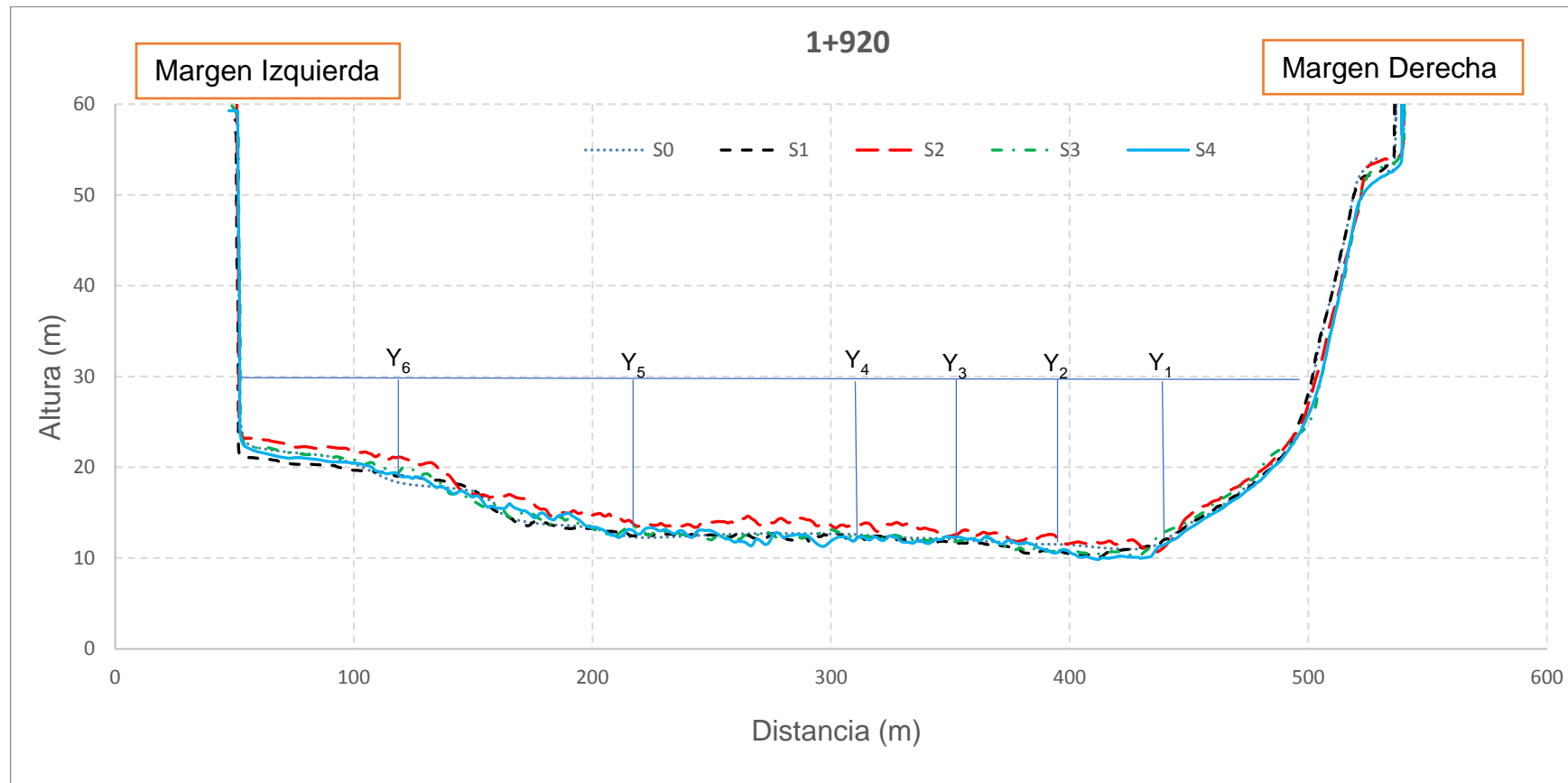


Figura N° 78 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "1+920".

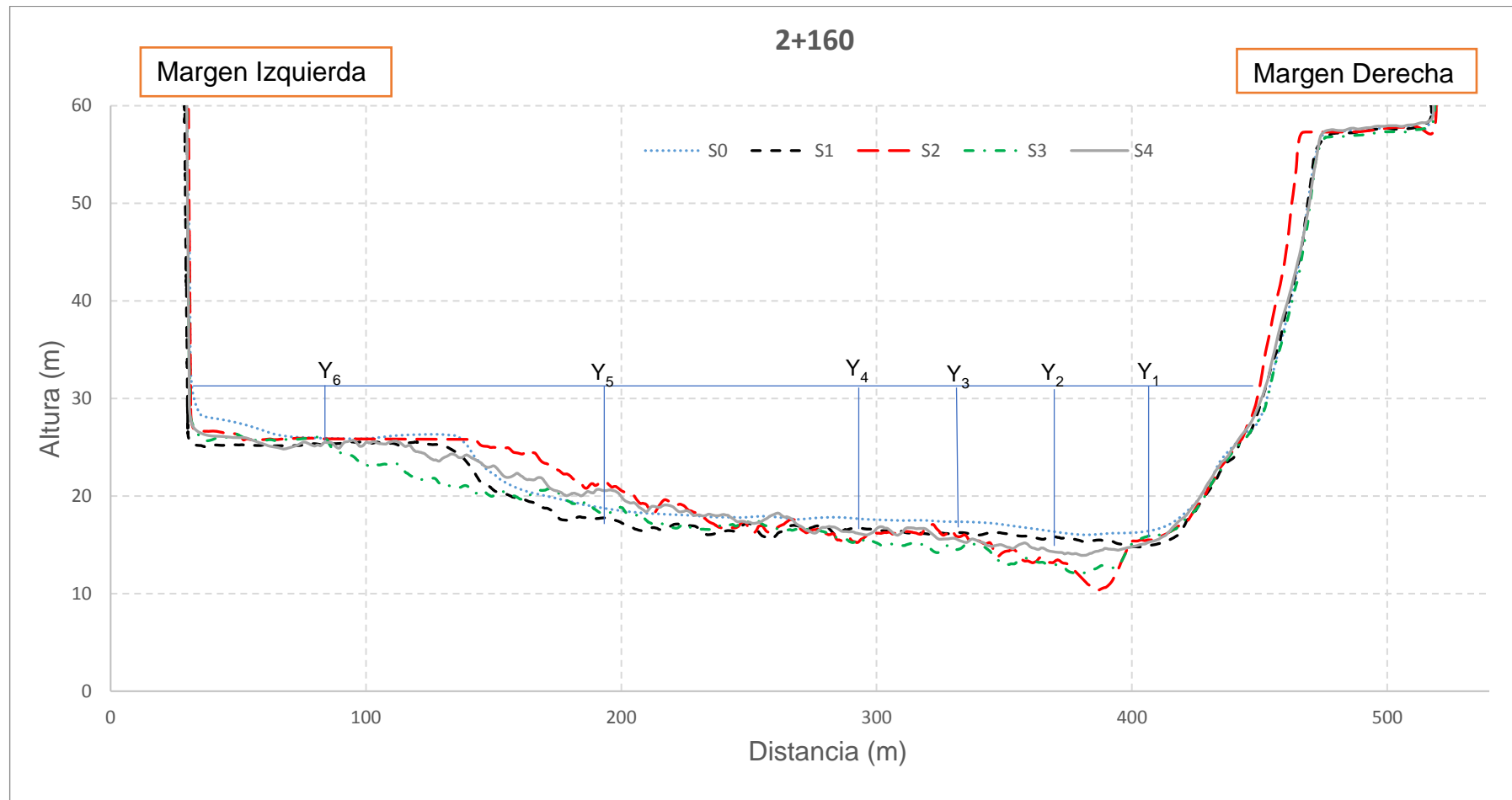


Figura N° 79 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "2+160".

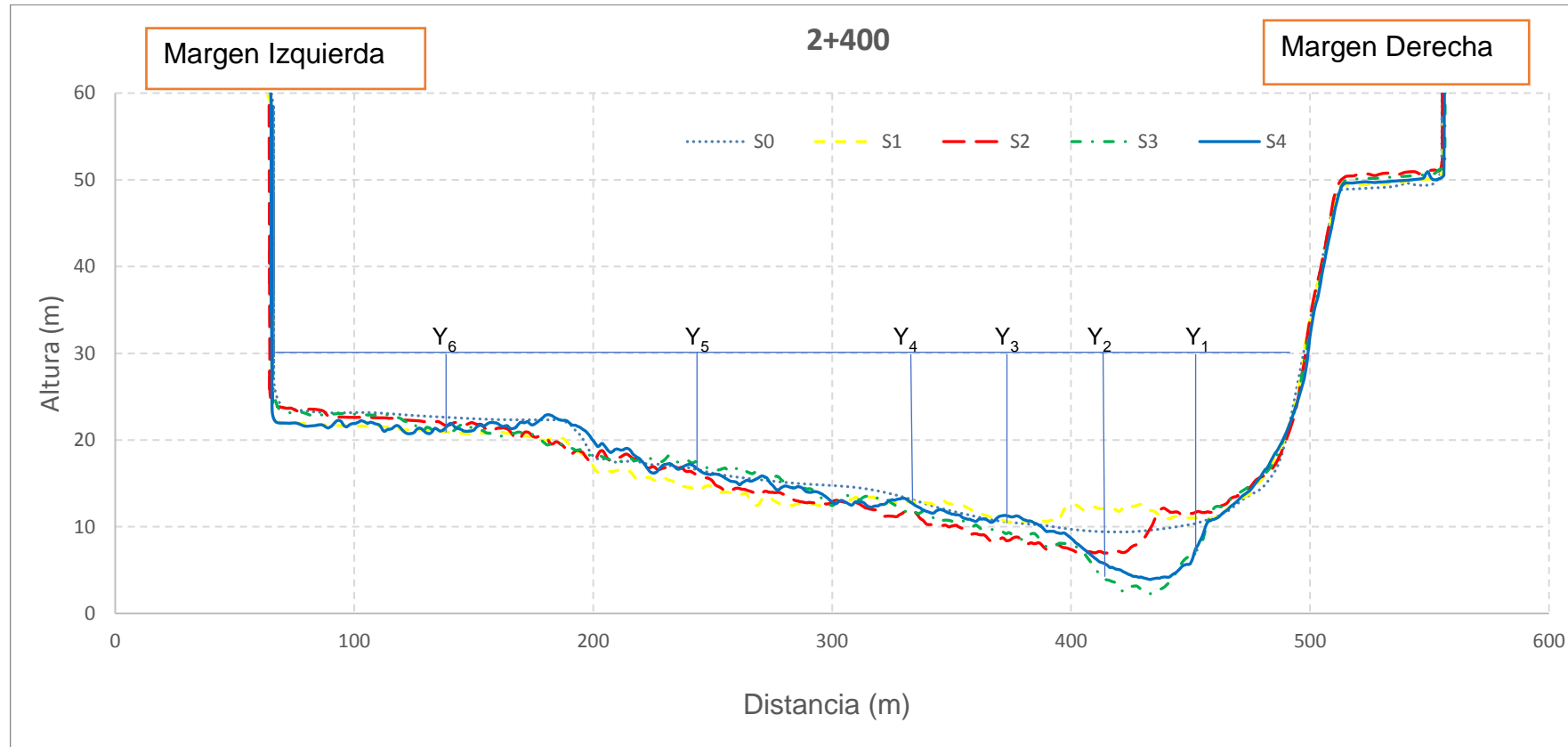


Figura N° 80 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "2+400".

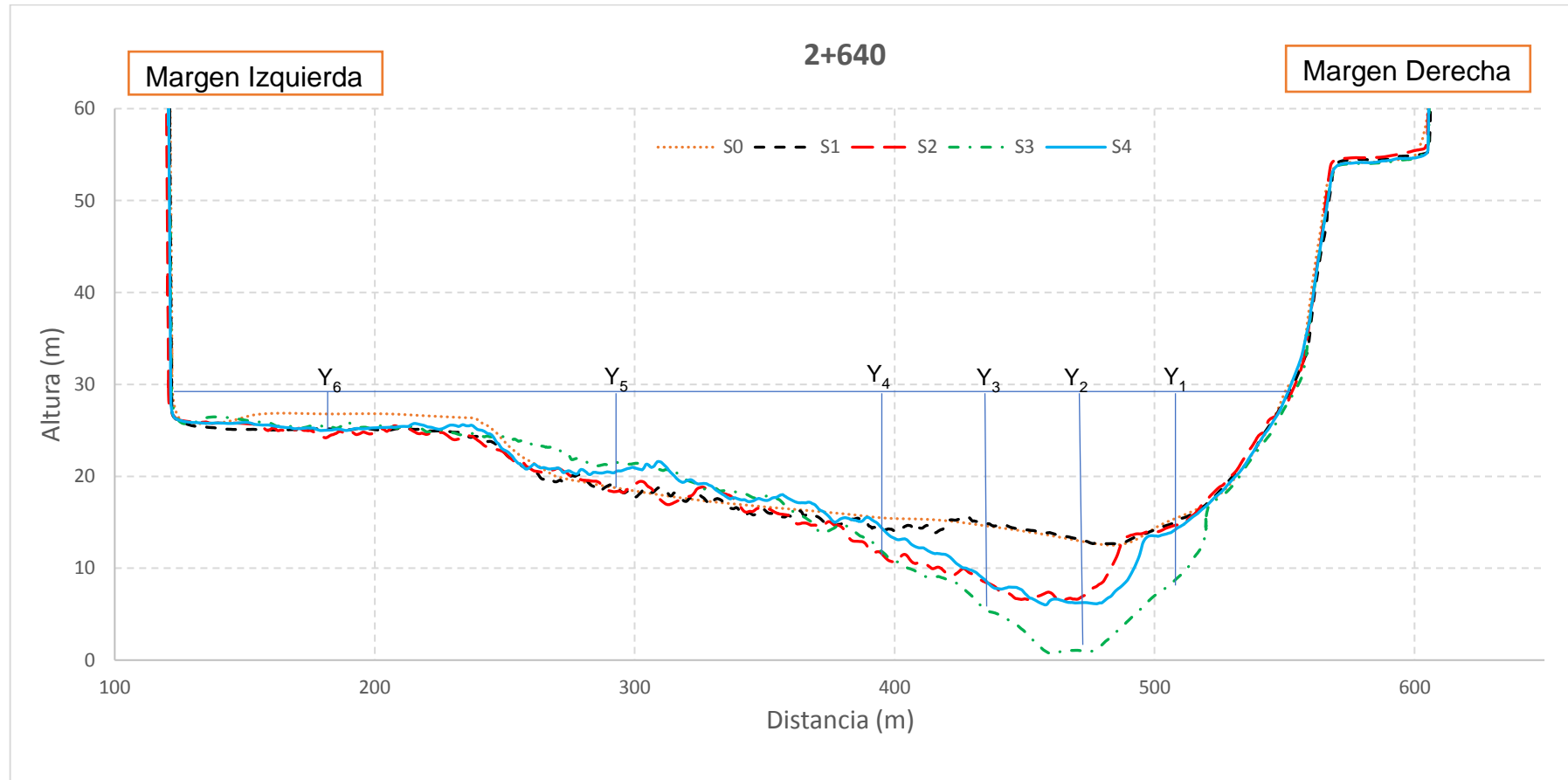


Figura N° 81 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "2+640".

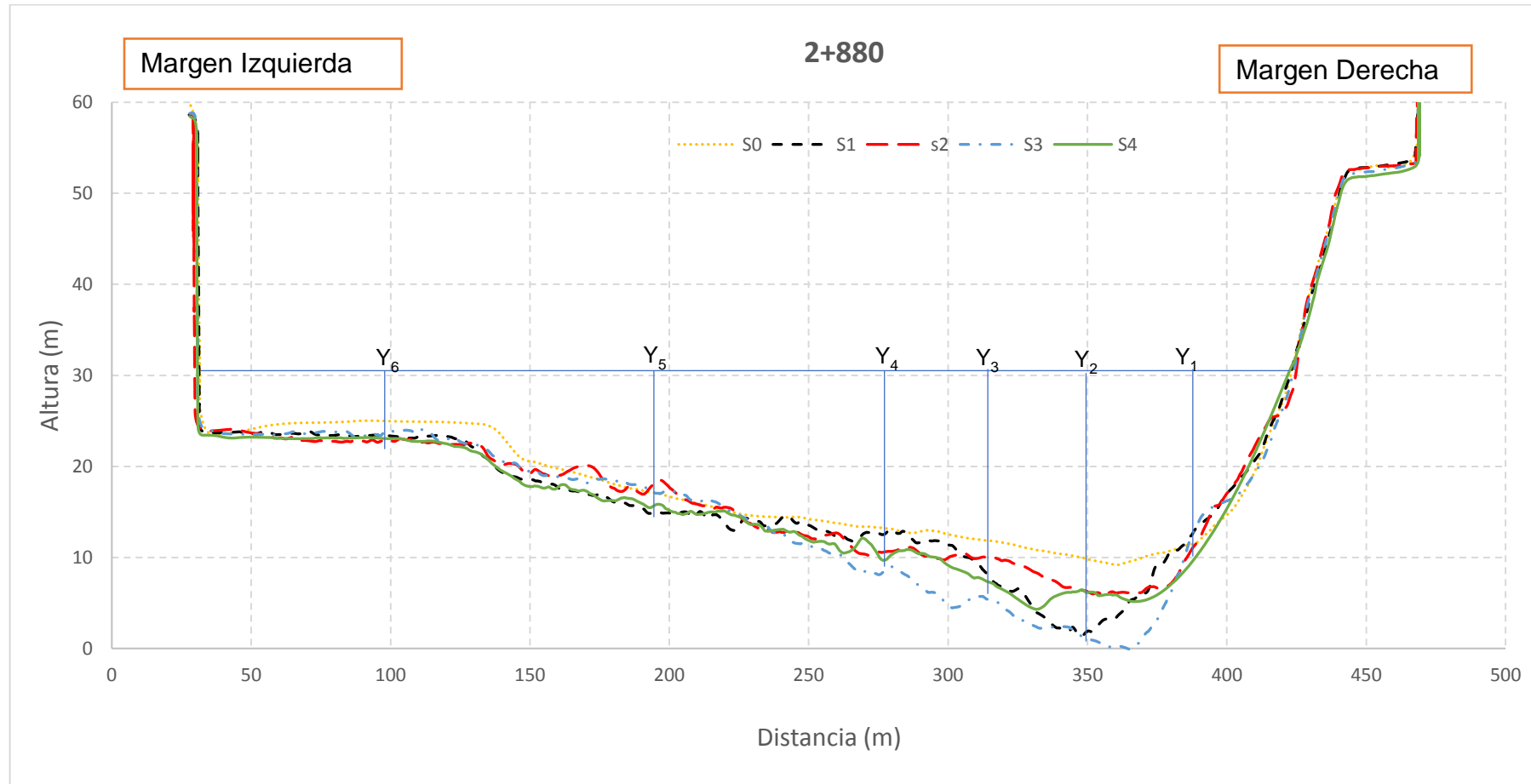


Figura N° 82 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "2+880".



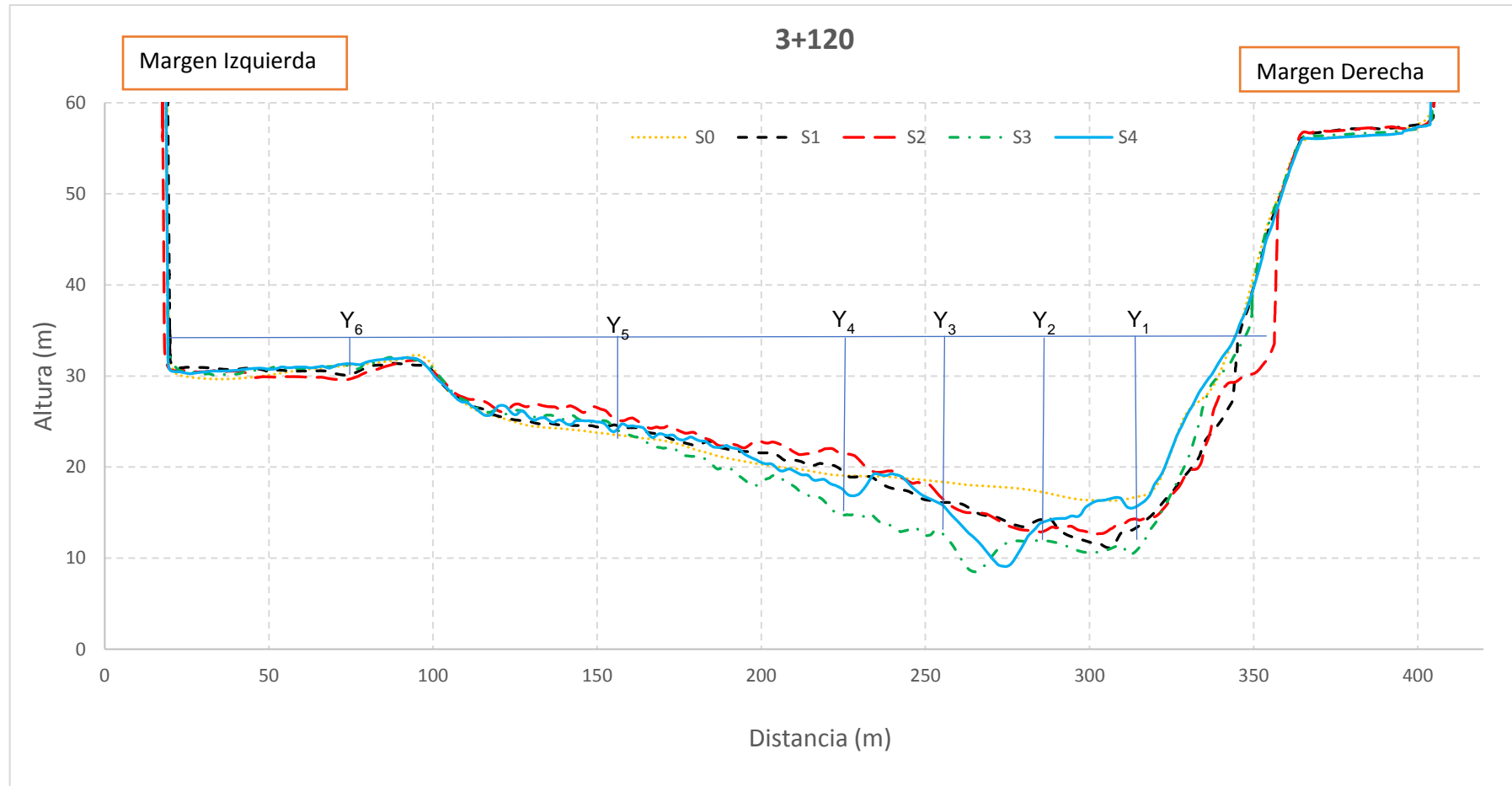


Figura N° 83 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "3+120".

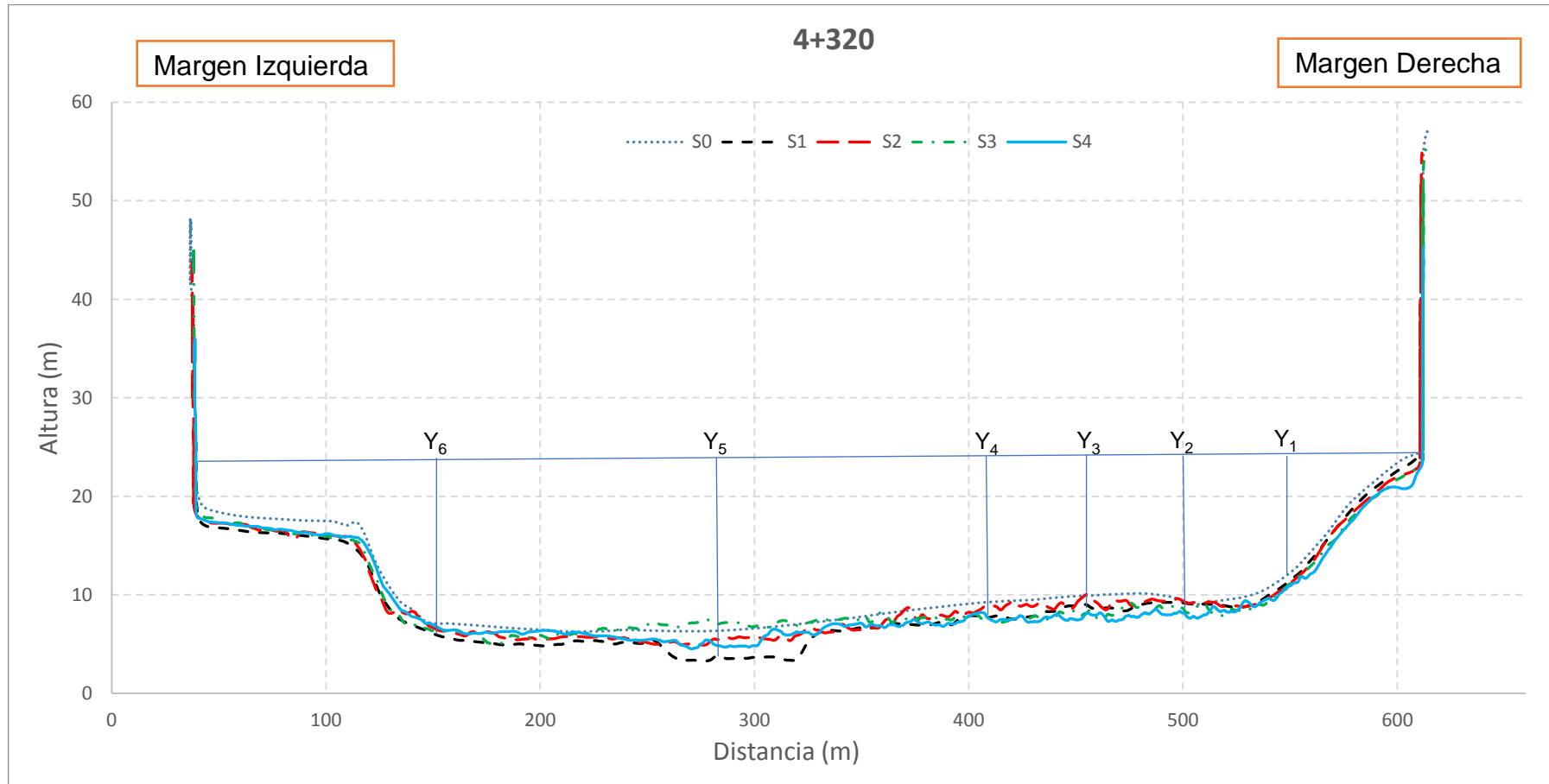


Figura N° 84 Comparación morfológica del cauce para la sección transversal "4+320".

### 5.2.3 Discusión de resultados

#### 5.2.3.1 Interpretación de velocidades medias

Luego de obtener el valor de las variaciones promedio de velocidades medias por sección de medición, se implementó como tramo de protección el tramo desde la sección 1+440 hasta la sección 2+880, ya que los espigones de protección se ubican entre dichas secciones. El estudio permitió obtener las siguientes variaciones promedio de velocidades medias obtenidas en el punto 6 (punto cercano a la orilla exterior) en porcentaje por prueba, respecto a la prueba N°1 (Tabla N°44).

Tabla N°46 Resumen de dispersión promedio de velocidades.

Comparación	Variación promedio de velocidades medias obtenidas en el punto 6 ( $\Delta V_{m_6}$ )
Prueba N°2	-26.17%
Prueba N°3	-55.29%
Prueba N°4	-56.21%

Según la Tabla N°45 y el análisis cualitativo de la Figura N°68, la prueba N°4 permitió una mejor reducción de velocidad de flujo cerca de la ribera de la margen derecha, debido a la función de los espigones permeables. Aunque la prueba N°3 presenta una reducción de velocidad menor en 1% que la prueba N°4, por ello, se pueden considerar efectivas las alternativas de protección de la prueba N°3 y N°4.

$$\Delta V = \frac{(\text{Velocidad con espigones} - \text{Velocidad sin espigones})}{\text{Velocidad sin espigones}} * 100\% \quad (5.1)$$

#### 5.2.3.2 Interpretación de la variación de profundidad de erosión

La efectividad de la alternativa de protección se reflejó en la prueba N°4 con la colocación de “Espigones fabricados con troncos de árbol”, ya que la profundidad del cauce fue pronunciada con una variación de cotas entre la prueba N°1 y la prueba N°4 de 4 m a 6 m. Asimismo, se estableció un registro fotográfico del estado de la morfología del cauce antes y después de la simulación del flujo en las cuatro pruebas. (Anexo 1)

## CONCLUSIONES

- En el modelo físico La Pastora, fue posible probar que los espigones de troncos de madera son eficientes para el funcionamiento de protección de riberas.
- Para la investigación mediante un modelo físico, fue importante y necesario disponer de información básica (Topografía, Geología e Hidrología) para representar las condiciones iniciales en el prototipo.
- La madera que fue modelada para la fabricación de los espigones de tronco de árbol fue la capirona, debido a que es más densa y predomina en los diferentes bosques de la región selva peruana.
- La variación de la velocidad media permitió comparar la disminución de velocidad a la ribera de la margen derecha del río. La mejor variación promedio se obtuvo en la prueba N°4 con -64.5%. Sin embargo, en la prueba N°3 obtuvo una variación promedio de -56.21%. Asimismo, la comparación de velocidades permitió identificar el aumento de velocidad media en la punta del espigón con una variación en aumento entre 16% a 23%, lo cual indica el alejamiento de las fuerzas que producen erosión en la margen derecha del río.
- La morfología escaneada del cauce permitió comparar la profundización de erosión cerca de la margen derecha del río. La efectividad de protección de los sistemas de espigones ensayados se determinó por la mayor cantidad de superficie sedimentada, de acuerdo con esa consideración, el sistema de espigones planteados en la prueba N°3 es la que cumple con esa condición. La disposición de los espigones ensayados en la Prueba N°3 determino el área erosionada con menor extensión.
- En la Prueba N°3 y Prueba N°4, se concluye que la erosión lateral se traslada al eje principal del río, ya que se presenta zonas depositadas de sedimentos entre espigones (playas). Sin embargo, se obtiene una velocidad media mayor cerca al margen derecho en la Prueba N°3 con respecto a la Prueba N°4, esto se puede visualizar en la Figura N°78.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas adicionales que permitan optimizar los resultados obtenidos con el sistema de espigones ensayados en la Prueba N°2, en lo que se refiere a orientación o longitud de los espigones.
- Se recomienda realizar otras pruebas que permitan disminuir la erosión que se observa entre las progresivas 2+640 al 3+120.
- Es recomendable que los gobiernos regionales implementen el uso de estas estructuras para proteger las riberas de los ríos amazónicos, por ser menos costosas y porque permiten implementar la revegetación de riberas erosionables y rehabilitar el hábitat de la zona.
- Se recomienda realizar otras tesis de investigación similares, pero referidas a otros casos particulares que se presenten en ríos de la selva de nuestro país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbe, T. B., A. Brooks, and D. R. Montgomery (2003), Wood in river restoration and management, in *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, editado por S. Gregory, K. L. Boyer, and A. M. Gurnell.
2. Brooks, A. P., T. Howell, T. B. Abbe, and A. Arthington (2006), Confronting hysteresis: Wood based river rehabilitation in highly altered riverine landscapes of south-eastern Australia, *Geomorphology*.
3. Brown A. Scott (1985), *Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures*, Federal highway Administration Office of Engineering & Highway Operations R&D Structures Division Mc Lean, Virginia.
4. Fernández J. L. (2012), *Uso de Geosintéticos en Defensas ribereñas de ríos de Selva Baja*, tesis para optar el grado de ingeniero civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Tomo I.
5. Fuentes A. Ramón (2002), *Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño*, Edición de Lilian Salinas Ayala, primera edición, Chile.
6. Gallisdorfer, M.S., Bennett, S.J., Atkinson, J.F., (...), Simon, A., Langendoen, E.J. (2014), Physical-scale model designs for engineered log jams in rivers. *Journal of Hydro-Environment Research* 8(2).
7. Huaranca, A.Q. (2018), *Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño de estabilidad de grandes estructuras de madera para defensas ribereñas aplicado al tramo La Pastora del río Madre de Dios – Perú, Puno, Perú*.
8. Knutson M., Fealko J. (2014), *Reclamation Managing Water in the West*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
9. Lagasse, P.F., Spitz, W.J., Zevenbergen, L.W., Zochmann, D.W. and Owen Ayres & Associates Inc. (2004), *Handbook for predicting stream meander migration – NCHRP report 533*, Washington D.C, USA.
10. Maza A. José Antonio, García F. Manuel, Olvera S. M René (1995), *Estabilización y rectificación de ríos*, UNAM, Instituto de Ingeniería, Mexico.
11. Novak P., Guinot V., Jeffrey A. and Reeve D. E. (2010), *Hydraulic modelling – an introduction: principles, methods and applications*, Taylor & Francis e-Library.
12. Przedwojski B. (1995), Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes, *Journal of Hydraulic Research* 33(2).
13. Rocha F. Arturo (2009), *Consideraciones sobre las defensas fluviales con espigones*, edición Instituto de Construcción y Gerencia, Arequipa.

14. Suarez D. Jaime (2001), Control de Erosión en suelos tropicales, División Editorial y de Publicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
15. Thorne C.R., Murphey J.B., Little W.C. (1983), Stream channel stability - Appendix D, Bank Stability and Bank Material Properties in the Bluffline Streams of Northwest Mississippi U.S. Department of Agriculture Sedimentation Laboratory, Oxford.

# ANEXO 1: Panel Fotográfico



### PRUEBA N°1: Modelo físico sin espigones antes del ensayo.



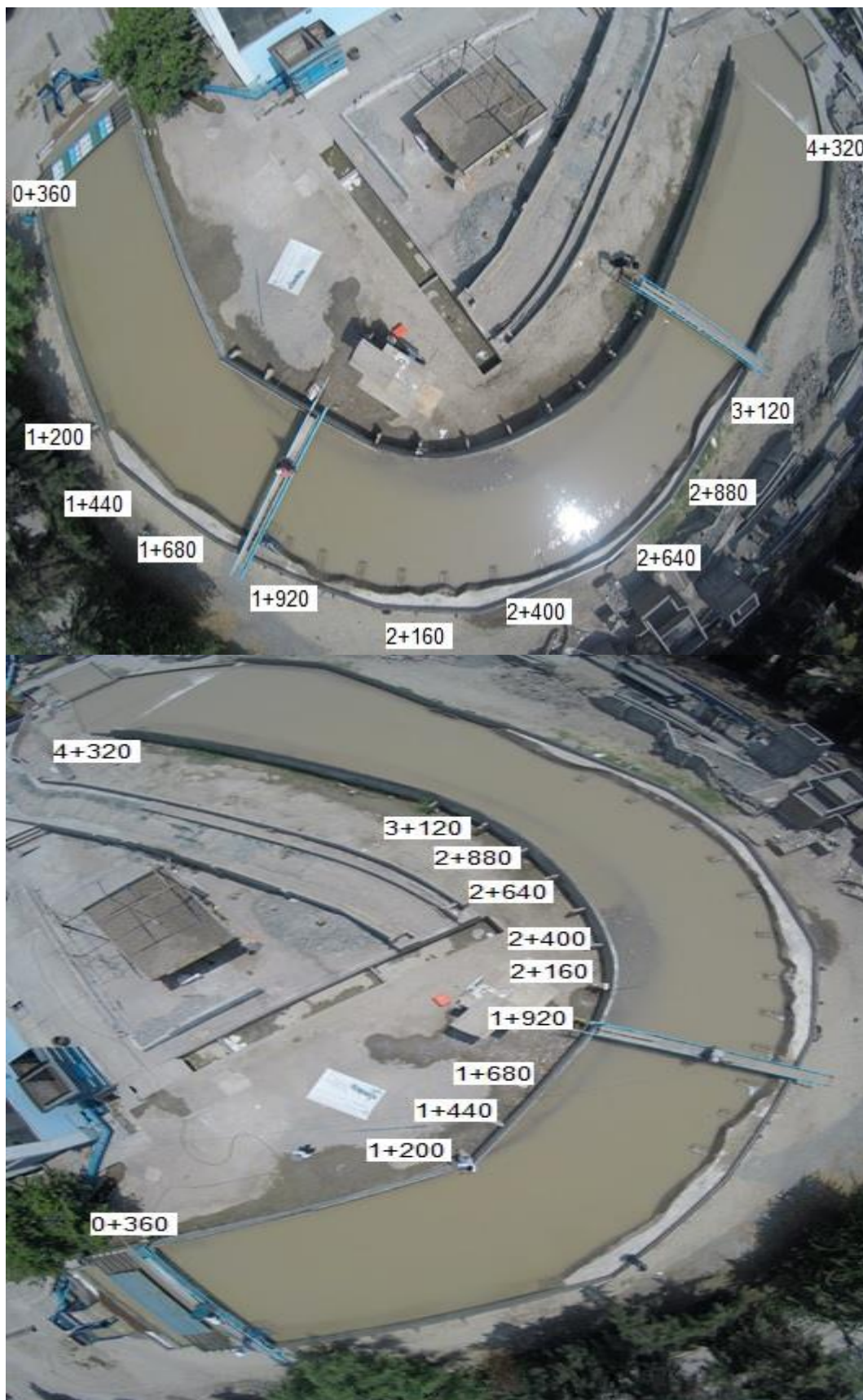
## PRUEBA N°2: Modelo físico con espigones en pleno ensayo experimental.



### PRUEBA N°3: Modelo físico con espigones después del ensayo.



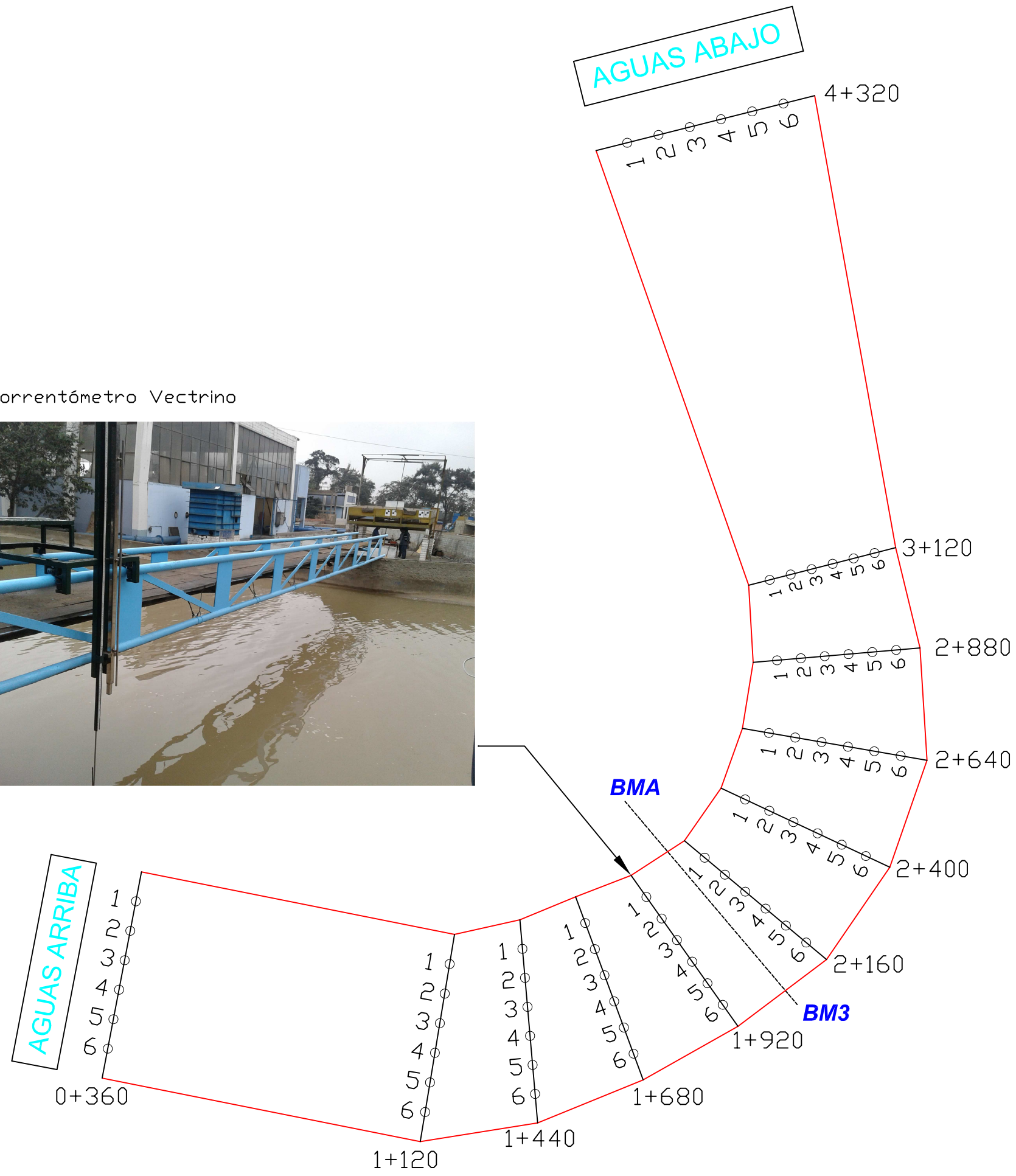
### PRUEBA N°4: Vista en planta del modelo físico en pleno ensayo



# ANEXO 2:

## Ubicación de puntos de medición de velocidad en el modelo físico

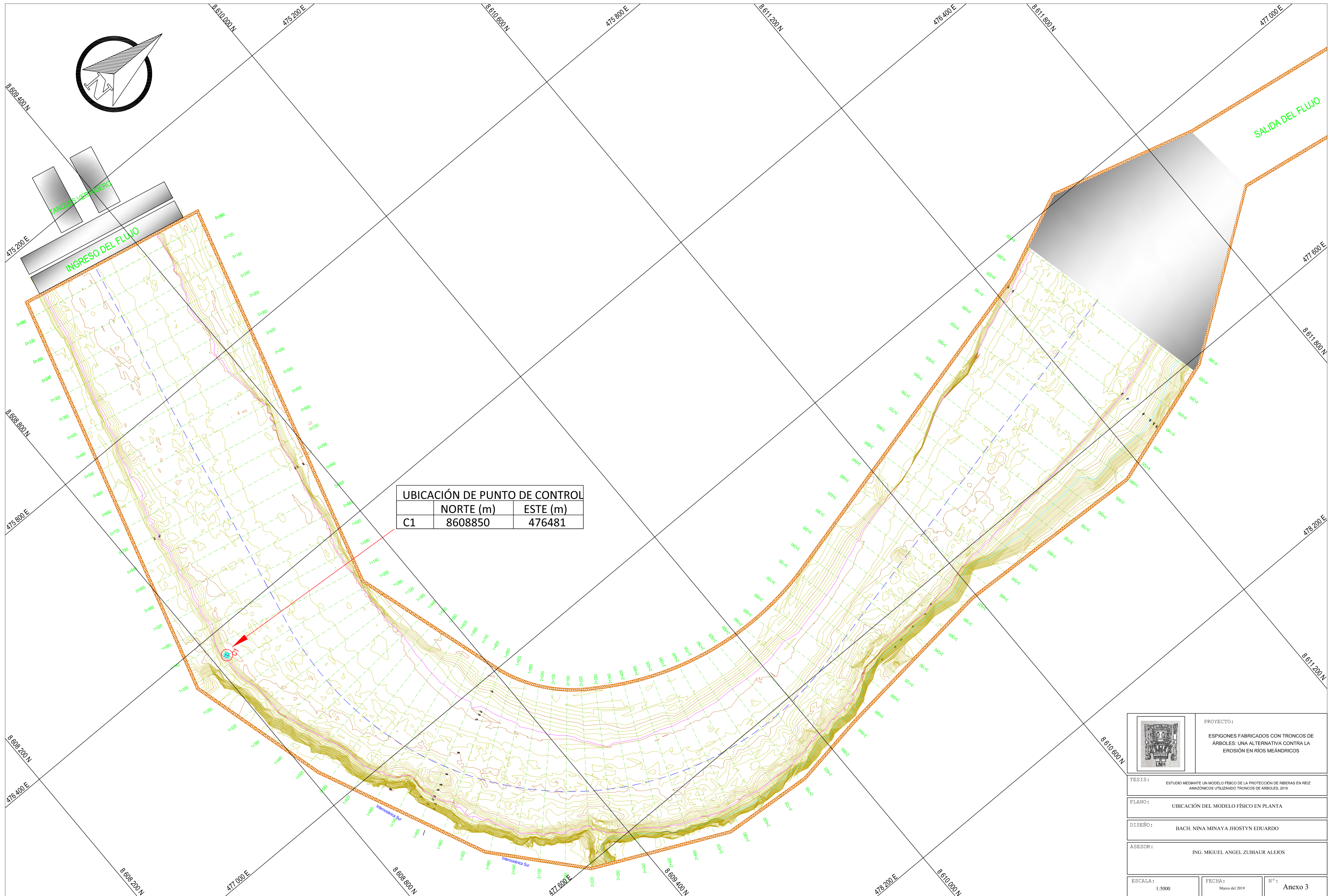
Correntómetro VECTRINO



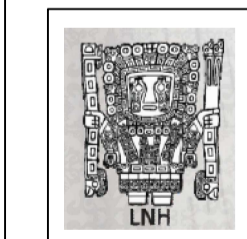
Obs:  
 1.- En el presente plano, se ubican once secciones de medición para las cuatro pruebas del modelo físico.  
 2.- En la fotografía, se puede observar el procedimiento de medición de velocidades sobre el puente metálico con el correntómetro vectrino.

	<p>PROYECTO:                  ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEÁNDRICOS</p>	
<p>TESIS: ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA PROTECCIÓN DE RIBERAS EN RÍOS AMAZÓNICOS UTILIZANDO TRONCOS DE ÁRBOLES, 2019</p>		
<p>PLANO: UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE VELOCIDADES</p>		
<p>DISEÑO: BACH. NINA MINAYA JHOSTYN EDUARDO</p>		
<p>ASESOR: ING. MIGUEL ANGEL ZUBIAUR ALEJOS</p>		
<p>ESCALA: 1:5000</p>	<p>FECHA: Mayo del 2018</p>	<p>Nº: 1/4</p>

# ANEXO 3: Ubicación en planta del modelo físico "La Pastora"



UBICACIÓN DE PUNTO DE CONTROL		
	NORTE (m)	ESTE (m)
C1	8608850	476481



PROYECTO:  
 ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE  
 ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA  
 EROSIÓN EN RÍOS MEÁNDRICOS

TESIS: ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA PROTECCIÓN DE RIBERAS EN RÍOS  
 AMAZONICOS UTILIZANDO TRONCOS DE ARBOLES, 2019

PLANO: UBICACIÓN DEL MODELO FÍSICO EN PLANTA

DISEÑO: BACH. NINA MINAYA JHOSTYN EDUARDO

ASESOR: ING. MIGUEL ANGEL ZUBIAUR ALEJOS

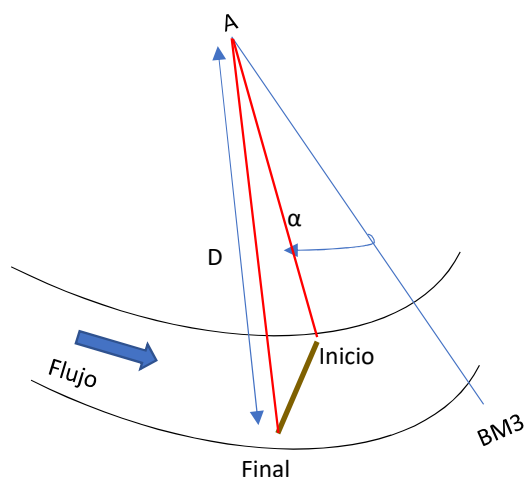
ESCALA: 1:5000	FECHA: Marzo del 2019	Nº: Anexo 3
-------------------	--------------------------	----------------



# ANEXO 4: Orientación de la Distribución de espigones

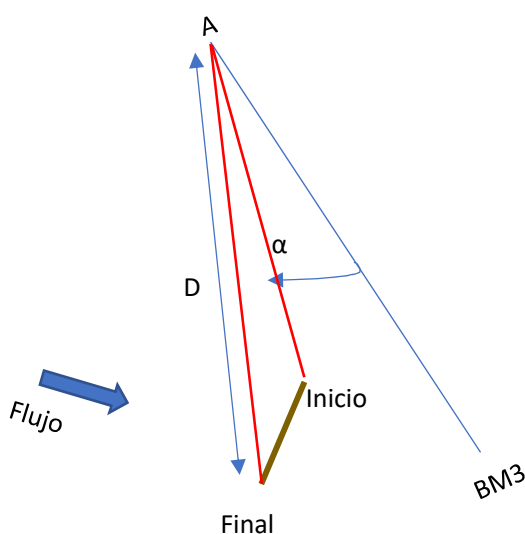
ORIENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESPIGONES DE LA PRUEBA N°2

#Espigón	PUNTO VISADO	ÁNGULO ( $\alpha$ )	DISTANCIA (D) en metros	
			Prototipo	Modelo
1	Inicio	47°24'49"	687.14	11.45
	Final	46°24'24"	713.12	11.89
2	Inicio	42°51'55"	662.09	11.03
	Final	41°53'48"	687.99	11.47
3	Inicio	27°4'46"	595.09	9.92
	Final	26°17'50"	621.60	10.36
4	Inicio	22°10'57"	580.06	9.67
	Final	21°18'47"	613.66	10.23
5	Inicio	11°10'59"	555.17	9.25
	Final	10°19'33"	605.94	10.10
6	Inicio	354°7'42"	538.77	8.98
	Final	353°59'6"	606.61	10.11
7	Inicio	342°40'11"	542.07	9.03
	Final	343°6'45"	595.73	9.93
8	Inicio	327°2'7"	565.43	9.42
	Final	328°32'29"	640.00	10.67
9	Inicio	309°54'40"	618.76	10.31
	Final	312°25'2"	700.60	11.68
10	Inicio	296°50'57"	682.20	11.37
	Final	299°19'27"	750.66	12.51
11	Inicio	288°14'18"	736.28	12.27
	Final	290°9'25"	785.86	13.10
12	Inicio	283°42'6"	768.96	12.82
	Final	285°5'12"	803.84	13.40



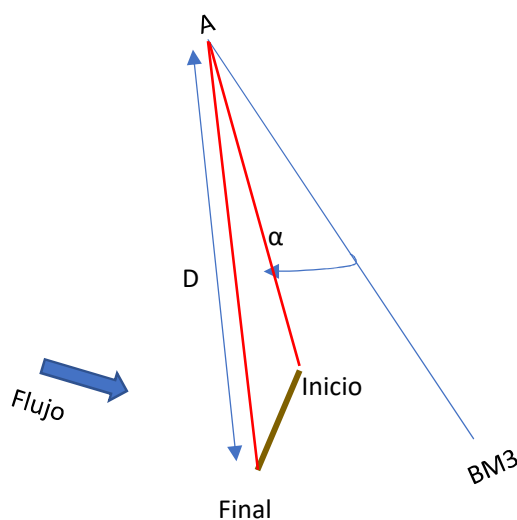
ORIENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESPIGONES DE LA PRUEBA N°3

#Espigón	PUNTO VISADO	ÁNGULO ( $\alpha$ )	DISTANCIA (D) en metros	
			Prototipo	Modelo
1	Inicio	39°47'37"	622.12	10.37
	Final	40°22'53"	673.29	11.22
2	Inicio	26°44'38"	574.17	9.57
	Final	25°32'54"	620.55	10.34
3	Inicio	12°43'8"	546.39	9.11
	Final	11°54'28"	615.96	10.27
4	Inicio	357°58'29"	540.14	9.00
	Final	358°12'9"	607.34	10.12
5	Inicio	343°26'42"	556.20	9.27
	Final	344°12'57"	597.39	9.96
6	Inicio	330°10'34"	582.70	9.71
	Final	331°13'26"	634.36	10.57
7	Inicio	316°43'43"	615.43	10.26
	Final	318°12'20"	679.72	11.33
8	Inicio	304°19'5"	663.64	11.06
	Final	54°1'50"	724.93	12.08
9	Inicio	67°6'29"	712.98	11.88
	Final	65°35'10"	738.46	12.31
10	Inicio	77°39'22"	765.02	12.75
	Final	76°28'59"	807.72	13.46
11	Inicio	89°36'15"	829.79	13.83
	Final	86°14'20"	869.22	14.49

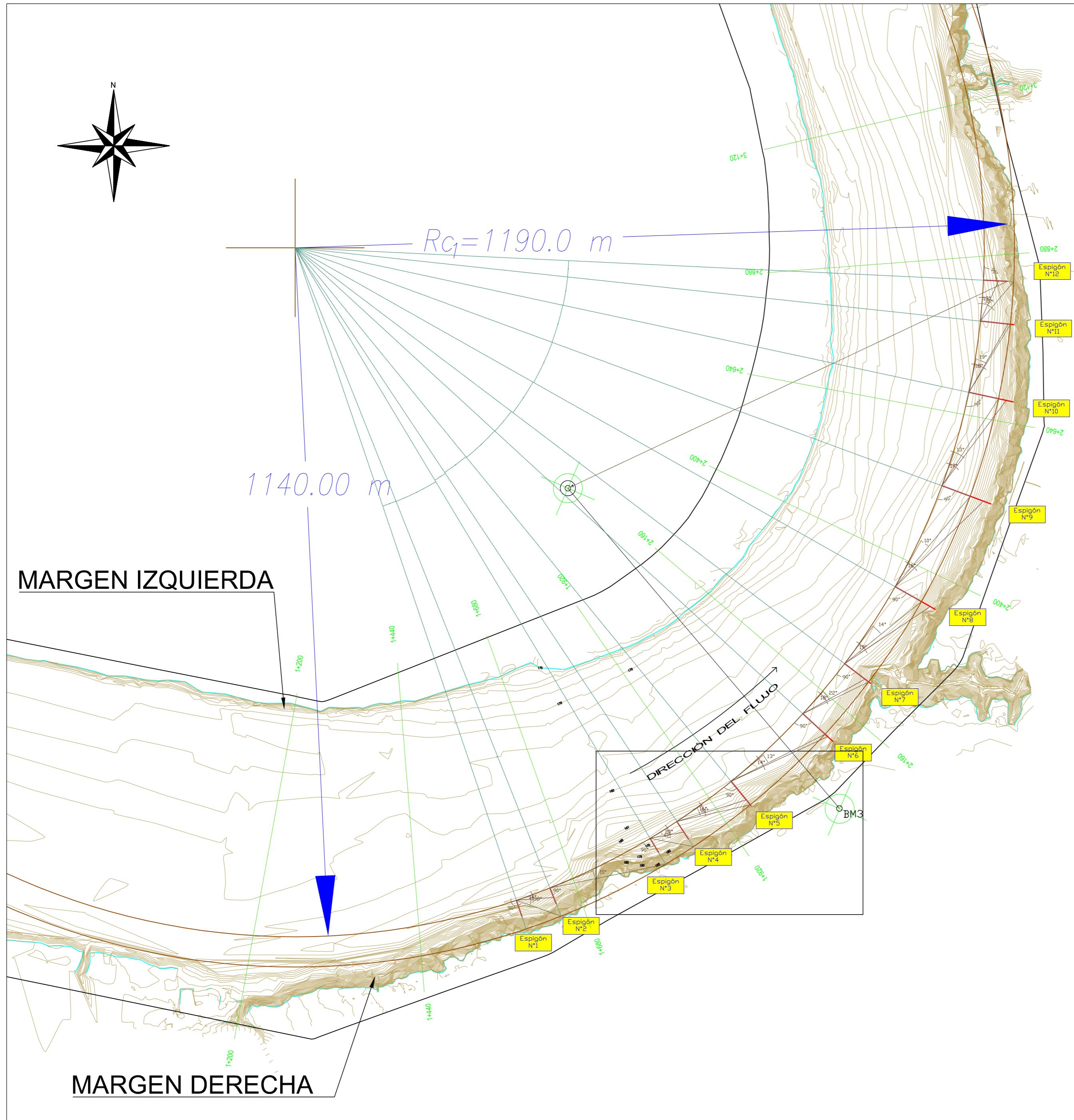


ORIENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESPIGONES DE LA PRUEBA N°4

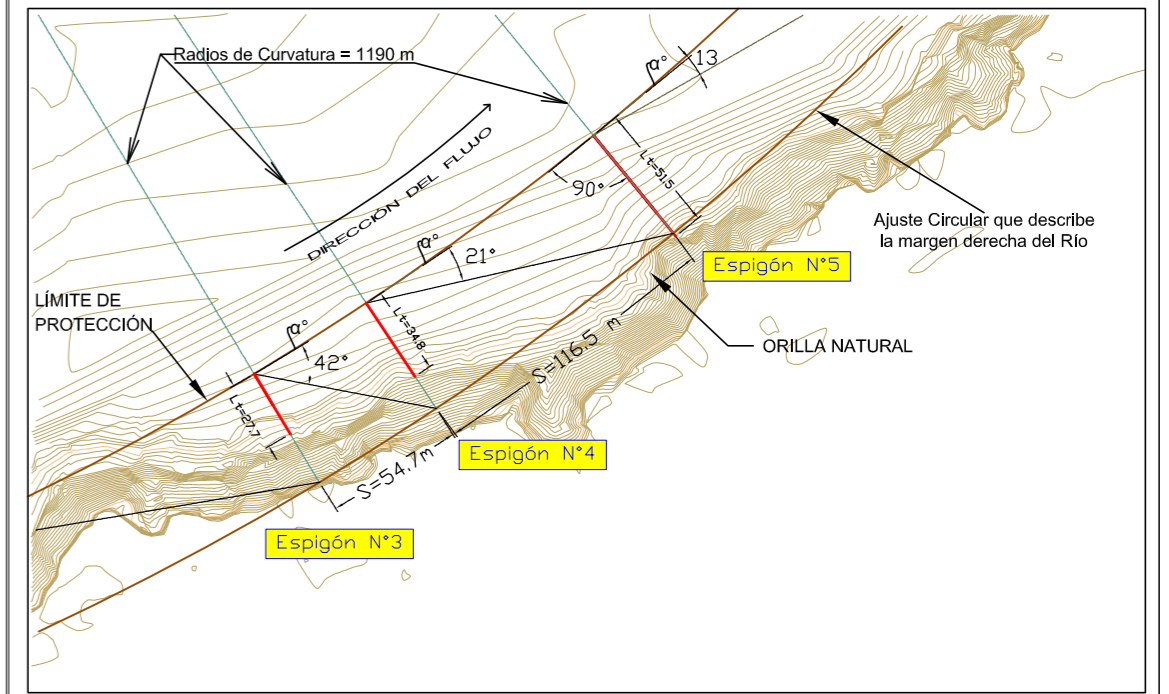
#Espigón	PUNTO VISADO	ÁNGULO ( $\alpha$ )	DISTANCIA (D) en metros	
			Prototipo	Modelo
1	Inicio	41°18'33"	630.84	10.51
	Final	39°55'3"	668.09	11.13
2	Inicio	29°27'37"	584.03	9.73
	Final	28°18'47"	624.84	10.41
3	Inicio	18°55'36"	557.85	9.30
	Final	17°50'43"	619.00	10.32
4	Inicio	6°31'37"	543.15	9.05
	Final	6°13'32"	600.11	10.00
5	Inicio	353°53'5"	544.77	9.08
	Final	354°22'12"	607.05	10.12
6	Inicio	341°7'16"	561.99	9.37
	Final	341°35'17"	591.51	9.86
7	Inicio	326°55'26"	591.13	9.85
	Final	31°57'42"	666.55	11.11
8	Inicio	46°15'50"	629.88	10.50
	Final	44°47'4"	688.08	11.47
9	Inicio	58°24'39"	675.58	11.26
	Final	56°45'59"	735.77	12.26
10	Inicio	69°35'52"	725.69	12.09
	Final	68°8'14"	778.32	12.97
11	Inicio	79°57'17"	778.07	12.97
	Final	78°38'28"	826.92	13.78
12	Inicio	89°37'12"	830.88	13.85
	Final	88°24'25"	879.14	14.65



# ANEXO 5: Distribución en planta de espigones



### DETALLE ESPACIAMIENTO



### CUADRO DE INFORMACIÓN GEOMÉTRICA

ESPIGÓN	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación de Flujo (α)	Espaciamiento entre espigones
1	28.7 m	90°	1190.0 m	1-2	38°	61.6 m
2	28.3 m	90°	1190.0 m	2-3	10°	193.3 m
3	27.8 m	90°	1190.0 m	3-4	42°	54.7 m
4	34.8 m	90°	1190.0 m	4-5	21°	116.5 m
5	51.5 m	90°	1190.0 m	5-6	13°	170.3 m
6	67.8 m	90°	1190.0 m	6-7	22°	112.7 m
7	53.8 m	90°	1190.0 m	7-8	14°	159.2 m
8	76.2 m	90°	1190.0 m	8-9	10°	192.3 m
9	86.8 m	90°	1190.0 m	9-10	13°	168.0 m
10	75.1 m	90°	1190.0 m	10-11	19°	124.7 m
11	55.7 m	90°	1190.0 m	11-12	35°	70.9 m
12	39.7 m	90°	1190.0 m			

**PROYECTO:**  
 ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEANDRÍCOS

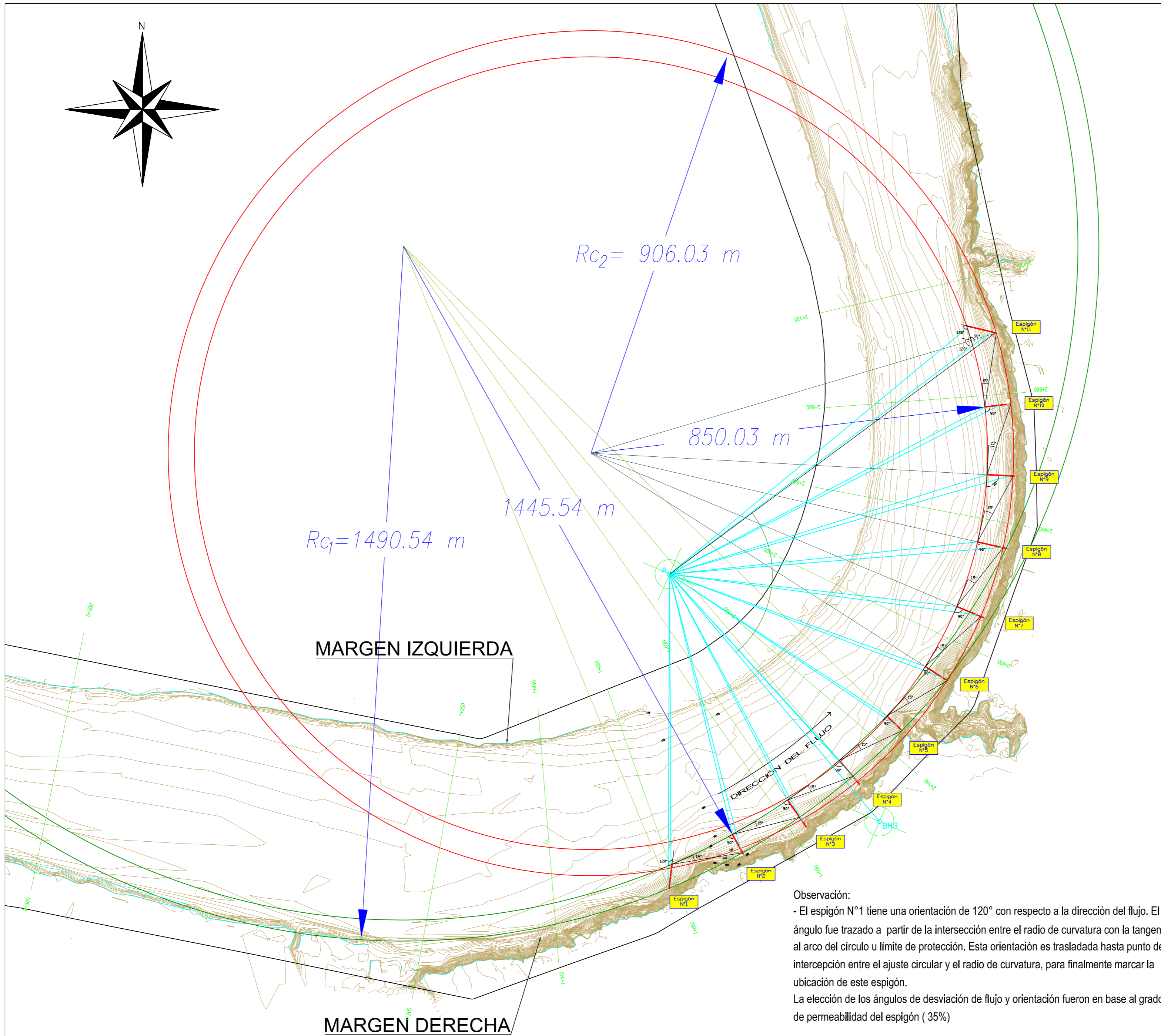
**TESIS:**  
 ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA PROTECCIÓN DE RIBERAS AMAZONICAS UTILIZANDO TRONCOS DE ARBOLES, 2019

**PLANO:**  
 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE ESPIGONES - ALTERNATIVA N°1

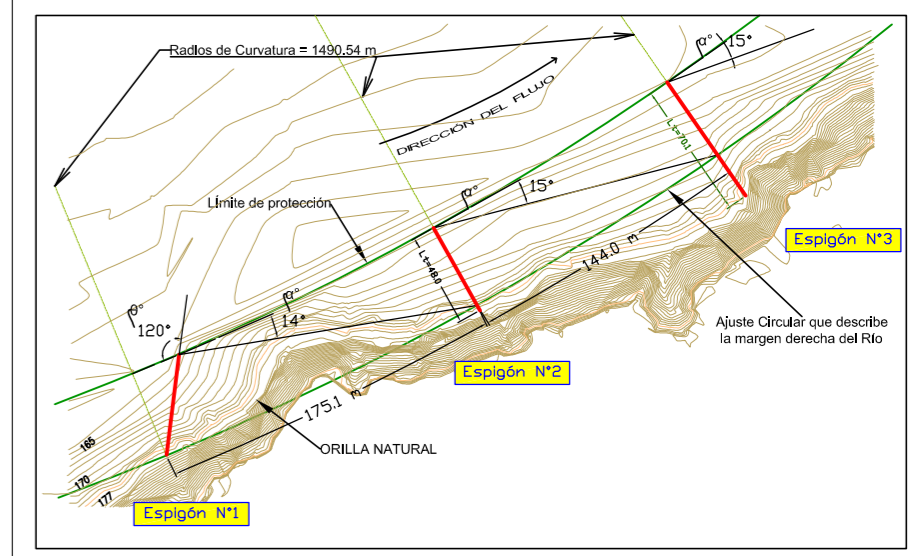
**TESISTA:**  
 BACH. JHOSELYN EDUARDO NINA MINAYA

**ASESOR:**  
 ING. Miguel Angel Zubizarre Alejos

**ESCALA:** 1:5000      **FECHA:** 01/04/2019      **N°:** Anexo 5.1

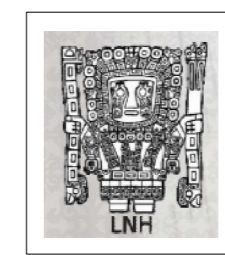


**DETALLE ESPACIAMIENTO**



**CUADRO DE INFORMACIÓN GEOMÉTRICA**

ESPIGÓN	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación de Flujo (α)	Espaciamento entre espigones
1	51.6 m	120°	1490.5	1-2	14°	175.1 m
2	48.0 m	90°	1490.5 m	2-3	15°	144.0 m
3	70.1 m	90°	1490.5 m	3-4	15°	144.0 m
4	67.2 m	90°	1490.5 m	4-5	15°	144.0 m
5	41.9 m	90°	906.0 m	5-6	15°	143.3 m
6	52.8 m	90°	906.0 m	6-7	15°	155.1 m
7	62.6 m	90°	906.0 m	7-8	15°	155.1 m
8	64.5 m	90°	906.0 m	8-9	15°	155.1 m
9	58.2 m	90°	906.0 m	9-10	15°	155.1 m
10	45.6 m	90°	906.0 m	10-11	15°	155.1 m
11	63.6 m	120°	906.0 m			



PROYECTO:  
 ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEÁNDRICOS

TESIS: ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA PROTECCIÓN DE RIBERAS EN RÍOS AMAZÓNICOS UTILIZANDO TRONCOS DE ÁRBOLES

PLANO: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE ESPIGONES - ALTERNATIVA N°2

TESISTA: BACH. JHOSLYN EDUARDO NINA MINAYA

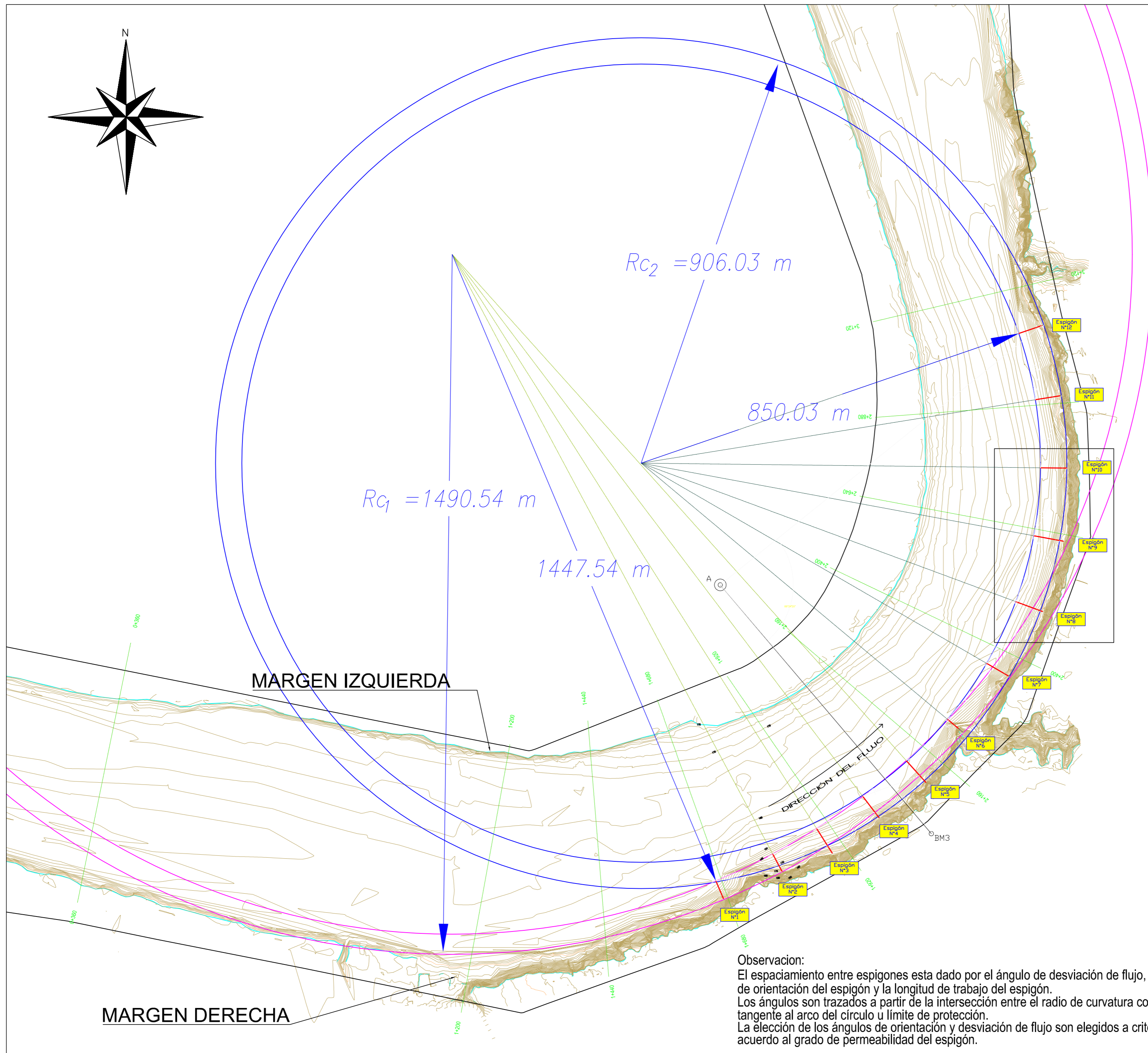
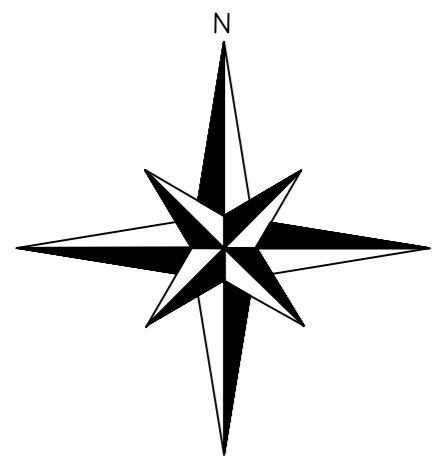
ASESORES: ING. MIGUEL ANGEL ZUBIAUR ALEJOS

ESCALA: 1:6000

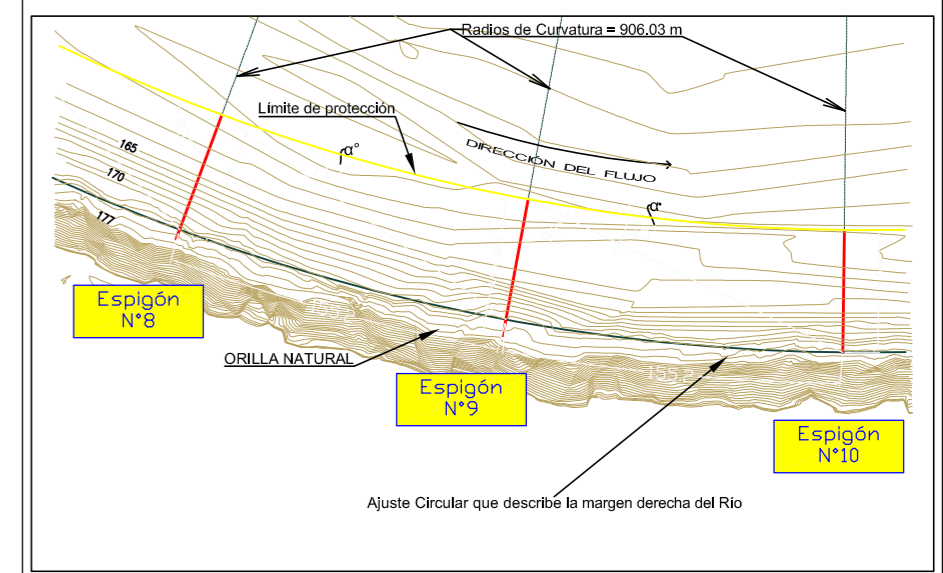
FECHA: 01/04/2019

N°: Anexo 5.2

Observación:  
 - El espigón N°1 tiene una orientación de 120° con respecto a la dirección del flujo. El ángulo fue trazado a partir de la intersección entre el radio de curvatura con la tangente al arco del círculo u límite de protección. Esta orientación es trasladada hasta punto de intersección entre el ajuste circular y el radio de curvatura, para finalmente marcar la ubicación de este espigón.  
 La elección de los ángulos de desviación de flujo y orientación fueron en base al grado de permeabilidad del espigón ( 35%)

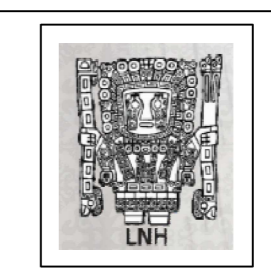


### DETALLE ESPACIAMIENTO



### CUADRO DE INFORMACIÓN GEOMÉTRICA

ESPIGÓN	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación de Flujo (α)	Espaciamento entre espigones
1	40.5 m	90°	1490.5 m	1-2	15°	137.7 m
2	42.6 m	90°	1490.5 m	2-3	19°	111.2 m
3	62.1 m	90°	1490.5 m	3-4	17°	123.4 m
4	57.0 m	90°	1490.5 m	4-5	17°	123.4 m
5	62.5 m	90°	1490.5 m	5-6	16°	130.3 m
6	29.9 m	90°	906.0 m	6-7	15°	155.2 m
7	52.9 m	90°	906.0 m	7-8	15°	155.2 m
8	60.6 m	90°	906.0 m	8-9	15°	155.2 m
9	63.5 m	90°	906.0 m	9-10	15°	155.2 m
10	56.0 m	90°	906.0 m	10-11	15°	155.2 m
11	52.2 m	90°	906.0 m	11-12	15°	155.2 m
12	51.5 m	90°	906.0 m			



PROYECTO:  
**ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEÁNDRICOS**

TESIS: ESTUDIO MEDIANTE UN MODELO FÍSICO DE LA PROTECCIÓN DE RIBERAS AMAZÓNICAS UTILIZANDO TRONCOS DE ARBOLES

PLANO: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE ESPIGONES - ALTERNATIVA N°3

DISEÑO: BACH. JHOSTYN EDUARDO NINA MINAYA

ASESORES: ING. JHOSTYN EDUARDO NINA MINAYA

ESCALA: 1:6000

FECHA: 01/04/2019

N°: Anexo 5.3

Observación:  
 El espaciamento entre espigones esta dado por el ángulo de desviación de flujo, ángulo de orientación del espigón y la longitud de trabajo del espigón. Los ángulos son trazados a partir de la intersección entre el radio de curvatura con la tangente al arco del círculo u límite de protección. La elección de los ángulos de orientación y desviación de flujo son elegidos a criterio de acuerdo al grado de permeabilidad del espigón.

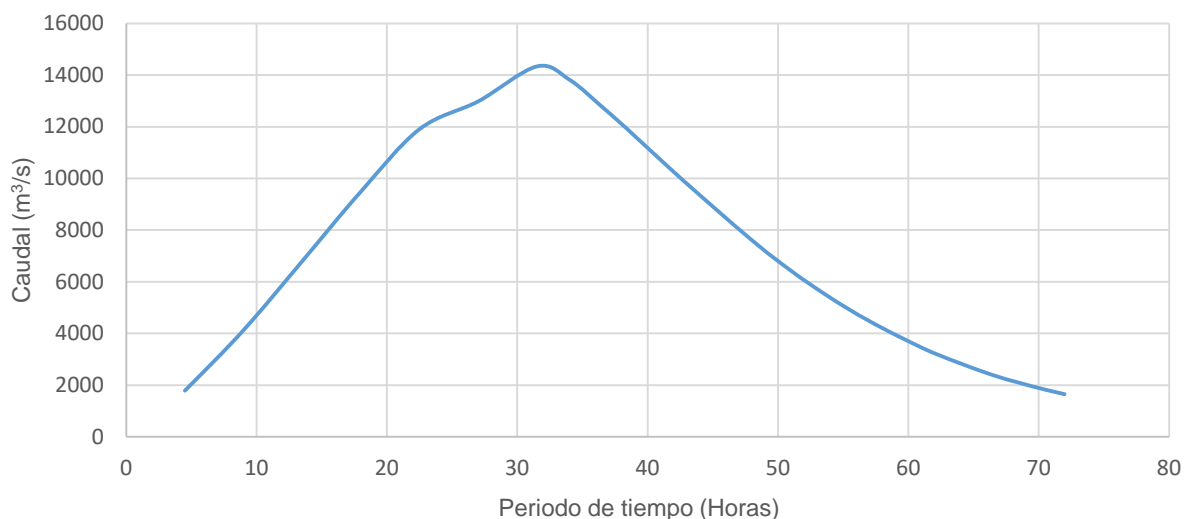


# ANEXO 6: Hidrograma de caudales avenidas ( $T_r = 50$ años)

**Q<sub>50</sub> = 14 341 m<sup>3</sup>/s**

**HIDROGRAMA DE CAUDALES AVENIDAS  
MODELO FÍSICO CON LECHO MÓVIL RÍO MADRE DE DIOS**

Prueba N°	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo (horas)
1,2,3,4	1790	4.5
	4140	9
	6810	13.5
	9500	18
	11910	22.5
	12997	27
	<b>14341</b>	<b>31.5</b>
	13820	34.0
	12760	36.5
	11620	39.1
	10440	41.6
	9300	44.1
	8190	46.7
	7120	49.2
	6170	51.7
	5310	54.3
	4540	56.8
	3870	59.3
	3270	61.8
	2770	64.4
2320	66.9	
1970	69.4	
1650	72.0	



# ANEXO 7: Elevación del nivel de agua y nivel de cresta del sistema de espigones para la prueba N°2, N°3 y N°4

**TABLA DE COTAS DE AGUA Y CRESTA DEL SISTEMA DE ESPIGÓN PARA  
LA PRUEBA N°2**

# Espigón	Progresiva	Elevación de Agua (m.s.n.m.)	Elevación de cresta (m.s.n.m.)	Altura (m)
1	1+560	182.3	180.3	20.19
2	1+6212	182.1	180.9	18.19
3	1+815	182.2	180.9	15.49
4	1+870	182	181.8	15.84
5	1+986	181.9	180.9	20.1
6	2+156	181.5	180.8	19.8
7	2+269	181.1	180.8	21.44
8	2+428	181.3	180.2	21.19
9	2+621	181.4	180.2	22.2
10	2+689	181.6	180.2	21.3
11	2+793	181.1	180.2	21.49
12	2+864	180.9	179.9	21.19

**TABLA DE COTAS DE AGUA Y CRESTA DEL SISTEMA DE ESPIGÓN PARA  
LA PRUEBA N°3**

# Espigón	Progresiva	Elevación de Agua (m.s.n.m.)	Elevación de cresta (m.s.n.m.)	Altura (m)
1	1+670	182.3	184.2	18.75
2	1+845	182	184.2	18.7
3	1+989	181.8	184.2	20.2
4	2+113	181.7	184	19.44
5	2+277	181.6	184	21.19
6	2+377	181.6	184	23.2
7	2+523	181.5	183.8	21.3
8	2+638	181.5	183.8	22.2
9	2+753	181.4	183.8	21.49
10	2+868	181.4	183.6	21.7
11	3+023	181.3	183.6	21.19

**TABLA DE COTAS DE AGUA Y CRESTA DEL SISTEMA DE ESPIGÓN PARA  
LA PRUEBA N°4**

# Espigón	Progresiva	Elevación de Agua (m.s.n.m.)	Elevación de cresta (m.s.n.m.)	Altura (m)
1	1+675	182.6	184.2	19.2
2	1+813	182.3	184.2	18
3	1+913	182.2	184.2	20.2
4	2+026	182.1	184	20.2
5	2+140	182	184	19.99
6	2+260	181.9	184	20.89
7	2+385	181.9	183.8	22.2
8	2+500	181.8	183.8	21.7
9	2+616	181.8	183.8	21.79
10	2+771	181.7	183.6	21.6
11	2+926	181.7	183.6	21.49
12	3+041	181.6	183.6	21.3