

**Apoyo a los procesos ambientales como parte del plan general para el control de la erosión en los municipios bajo la jurisdicción de la CDMB, en la subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial.**

**Joan Sebastián Duarte Flórez**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil**

**Directora**

**Hebenly Celis Leguizamo**

**MSc Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

## **Agradecimientos**

Agradezco primero que todo a Dios que me permitió culminar una etapa de mi proyecto de vida, poniendo en mi camino las personas idóneas que de alguna u otra manera me han aportado en este proceso académico, en especial mis padres, Gladys Flórez acosta y Alfonso Duarte Rincón, quienes siempre me apoyaron y alentaron para alcanzar esta meta.

Gracias a todos y cada uno de mis profesores de pregrado que me brindaron todos sus conocimientos y experiencias en el ámbito académico y laboral, los cuales me han ayudado formar un criterio como profesional. Un agradecimiento a todo el personal de la Subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial-CDMB quienes me acogieron en su despacho y me brindaron su apoyo para el desarrollo de la práctica

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	17
1 Objetivos .....	18
1.1 Objetivo General .....	18
1.2 Objetivos Específicos .....	18
2 Elaboración de Modelos Geológicos Geotécnicos, Planos de Detalle y Presupuesto .....	19
2.1 Descripción del problema: .....	19
2.1.1 Causas directas: .....	20
2.1.2 Causas indirectas. ....	20
2.1.3 Efectos directos. ....	20
2.1.4 Efectos indirectos. ....	20
2.2 Antecedentes y Justificación del Proyecto .....	21
2.3 Modelos Geológicos Geotécnicos .....	22
2.4 Categorización de la Amenaza .....	23
2.5 Resultados de Estabilidad y Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa .....	23
2.6 Obras de Mitigación Estructurales .....	25
2.7 Descripción de las obras proyectadas .....	27
2.7.1 Alternativa 1 Pantalla Anclada: .....	27
2.7.2 Anclaje. ....	28
2.7.3 Bulbo. ....	28
2.7.4 Lechada de cemento. ....	29

2.7.5	Torón.....	29
2.7.6	Zapata.....	29
2.7.7	Alternativa 2 Malla asegurada con Nails y recubierta con Biomortero.....	30
2.7.8	Nails o pernos.....	31
2.7.9	Diámetros de la perforación.....	32
2.7.10	Inclinación de las perforaciones.....	32
2.7.11	Espaciamiento.....	32
2.7.12	Refuerzos.....	32
2.7.13	Cabeza de la varilla.....	33
2.8	Elaboración de Planos de Detalle, Análisis de Precios Unitarios y Presupuesto.....	33
2.8.1	Alternativa 1.....	33
2.8.2	Alternativa 2. La alternativa 2.....	34
3	Apoyo en Estudios de Amenaza por Fenómeno de Inundación.....	34
3.1	Objetivos del Estudio de Amenaza por Inundación.....	35
3.2	Localización.....	36
3.3	Características Morfométricas.....	38
3.3.1	Área de la cuenca.....	39
3.3.2	Longitud.....	39
3.3.3	Pendiente.....	39
3.4	Análisis Hidroclimatológico.....	40
3.5	Evaluación Probabilística de Datos.....	42
3.6	Análisis Probabilísticos de Datos:.....	42
3.7	Ajuste de datos a la distribución Normal Estación San Rafael.....	43

3.8	Ajuste de datos a la distribución log-Normal de 2 parámetros Estación San Rafael .....	43
3.9	Ajuste de datos a la distribución Gumbel Estación San Rafael .....	44
3.10	Ajuste de datos a la distribución Log Gumbel Estación San Rafael .....	45
3.11	Periodo De Retorno (T).....	46
3.11.1	Creciente básico. ....	47
3.11.2	Creciente máximo. ....	47
3.12	Modelación Hidrológica.....	47
3.13	Modelación Hidráulica Matemática con Hec – Ras.....	50
3.14	Cálculo de los Perfiles de Flujo (Flujo Gradualmente Variado).....	50
3.15	Método del Paso Estándar .....	51
3.16	Procesamiento de la Información Topográfica .....	51
3.17	Parámetros para el Modelamiento.....	53
3.17.1	Geometría del Cauce.....	53
3.17.2	Caudal de Diseño y Condiciones de Frontera.....	53
3.18	Cálculo del Coeficiente de Rugosidad “n” de Manning .....	55
3.18.1	Rugosidad superficial.....	55
3.18.2	Vegetación.....	55
3.18.3	Irregularidad del canal.....	56
3.18.4	Alineamiento del canal.....	56
3.18.5	Sedimentación y socavación .....	56
3.18.6	Obstrucción .....	57
3.18.7	Tamaño y forma del canal.....	57
3.18.8	Nivel y caudal.....	57

3.18.9	Cambio estacional .....	57
3.18.10	Material en suspensión y carga de lecho .....	57
3.19	Resultados del Modelo de simulación Hidráulico.....	61
3.20	Obras De Control Del Cauce.....	67
3.21	Descripción de las obras tipo Jarillón .....	67
3.22	Descripción de los Espigones en Papayal y San José de los Chorros .....	68
3.23	Partes de un espigón.....	70
3.23.1.1	La punta del espigón .....	71
3.23.1.2	La cresta .....	71
3.23.1.3	Anclaje .....	71
3.23.1.4	Cimiento.....	71
3.24	Diseño de espigones .....	71
3.24.1.1	Variables de Flujo .....	72
3.24.1.2	Parámetros del cauce.....	72
3.24.1.3	Materiales disponibles para construcción .....	72
3.24.1.4	Posibilidad de avalanchas y otras amenazas .....	72
3.25	Elementos a diseñar.....	73
3.26	Separación entre espigones .....	75
3.27	Orientación de los espigones.....	78
3.28	Espigones inclinados hacia aguas arriba (ángulo $\alpha > 90^\circ$ ).....	78
3.29	Espigones inclinados hacia aguas abajo (ángulo $\alpha < 90^\circ$ ).....	78
3.30	Espigones ortogonales al flujo (ángulo $\alpha = 90^\circ$ ) .....	78
3.31	Altura de los espigones .....	79

3.32	Longitud de los espigones .....	79
3.33	Espigones proyectados para Papayal y San José de los Chorros .....	80
3.33.1	Materiales a utilizar.....	81
3.33.2	Longitud de los espigones.....	81
3.33.3	Ángulo de los espigones.....	81
3.33.1	Altura de los espigones. ....	81
3.33.2	Ancho de espigones.....	82
4	Conclusiones .....	83
	Referencias Bibliográficas .....	84

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización puntual del sitio en estudio en el municipio de Lebrija. ....	22
Figura 2. Localización detallada del área de estudio. El área de intervención se encuentra enmarcada en rojo. Adaptado de Google Earth 2019 .....	22
Figura 3. Resultados del análisis Estático en condiciones normales perfil A.....	24
Figura 4. Resultados del análisis Estático con obras de Estabilización .....	26
Figura 5. Pantalla anclada. ....	27
Figura 6. Detalle del anclaje. ....	28
Figura 7. Detalle de la zona de lechada. ....	28
Figura 8. Detalle del dado o zapata del anclaje .....	29
Figura 9. Detalle de malla electrosoldada.....	30
Figura 10. Sistema de Estabilización con Nails.....	30
Figura 11. Detalle del Nail o perno de anclaje.....	31
Figura 12. Tipos de Nails o pernos. ....	33
Figura 13. Cartografía General Fuente: IGAC .....	36
Figura 14. Drenajes Principales. Fuente: IDEAM .....	38
Figura 15. Estaciones en el Área de Estudio Fuente: (CDMB, 2015) .....	41
Figura 16. Caudales Distribución Normal Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia. ....	43
Figura 17. Caudales Distribución Log-Normal de 2 Parámetros Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia. ....	44
Figura 18. Caudales Distribución Gumbel Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia.....	44

Figura 19.Caudales Distribución Log-Gumbel Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia. .....	45
Figura 20.Línea de tendencia Distribución Log-Normal Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia. ....	46
Figura 21. Áreas de Influencia Hasta la Estación San Rafael, Papayal y San José los Chorros. Fuente: (CDMB, 2015) .....	49
Figura 22. Análisis del Flujo Gradualmente variado. ....	50
Figura 23. Geometría del Rio Lebrija. ....	53
Figura 24.Caudal de diseño san José de los chorros. ....	54
Figura 25. Condiciones de Frontera San José de los Chorros.....	54
Figura 26. Caudal de Diseño Rio Lebrija a la Altura de el Corregimiento de Papayal .....	54
Figura 27. Condiciones de Frontera- Sector Papayal.....	55
Figura 28. Seccion Transversal San José de los Chorros.....	62
Figura 29. Resultados Modelo Hidráulico San José de los Chorros, Perfil De Flujo.....	62
Figura 30. Resultados Modelo Hidráulico San José de los Chorros - Vista 3D .....	63
Figura 31.Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Seccion Transversal Abscisa K0+040 .....	63
Figura 32. Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Perfil de Flujo .....	63
Figura 33. Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Vista General. ....	64
Figura 34. Cota De Inundación De Acuerdo al modelo de elevación, Corregimiento Papayal. ..	65
Figura 35.Cota De Inundación De Acuerdo al modelo de elevación digital, Corregimiento San José De Los Chorros. ....	66
Figura 36. Sección Tipo Jarillón Rio Lebrija sector papayal.....	67

Figura 37. Sección Tipo Terraplén con material arcilloso compactado Río Lebrija sector san José de los chorros .....	68
Figura 38. Colocación de espigones cortos antes del primer espigón de diseño Fuente: (Pinilla, 1998) .....	74
Figura 39. Parámetros para determinar el espaciamiento entre espigones en tramos curvos Fuente: Maza (1989) .....	77
Figura 40. Sección tipo espigones Río Lebrija- San José de los chorros. ....	80

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Factores de Seguridad para categorizar la amenaza. ....	23
Tabla 2. Resultados del análisis Estático para condiciones actuales .....	24
Tabla 3. Resultados de análisis estático con obras para el perfil A .....	26
Tabla 4. Microcuencas Aferentes al Área de Estudio.....	40
Tabla 5 Caudales para diferentes periodos de retorno – Estación San Rafael.....	45
Tabla 6 Caudales Río Lebrija para la Estación San Rafael .....	46
Tabla 7 Caudales de Diseño Río Lebrija .....	48
Tabla 8. Coeficientes para la Ecuación de Cowan.....	59
Tabla 9. Separación entre espigones en tramos rectos.....	77

## **Lista de Apéndices**

**(Ver Apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Planos Lebrija alternativa 1

Apéndice B. Planos Lebrija alternativa 2

Apéndice C. Presupuesto Lebrija

Apéndice D. Modelo Hec ras Papayal

Apéndice E. Modelo Hec ras San José de los Chorros

Apéndice F. Plano Inundación Papayal

Apéndice G. Plano Inundación San José Chorros

Apéndice H. Planos de Obras de Control del cauce

## **Resumen**

**Título:** Apoyo a los procesos ambientales como parte del plan general para el control de la erosión en los municipios bajo la jurisdicción de la CDMB, en la subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial.

**Autor:** Joan Sebastián Duarte Flórez

**Palabras clave:** Erosión, Amenaza, Geotecnia, Remoción en masa, Inundación.

### **Descripción:**

En el presente artículo se muestran las actividades realizadas en el marco de la práctica empresarial desarrollada en la Corporación Autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial, en apoyo a los proyectos y programas para la prevención, conocimiento y reducción del riesgo. Se realizaron visitas técnicas en seguimiento a contratos de obra pública supervisados por la CDMB, se hizo acompañamiento a las visitas de inspección ocular y se apoyó en la elaboración de informes para dar respuesta a acciones populares interpuestas por la comunidad frente a situaciones que implican riesgo por fenómenos naturales, se apoyó en la elaboración de modelos geológicos, geotécnicos e hidráulicos así como planos de detalle para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa e inundación, se acompañó a los concejos municipales de gestión del riesgo y desastres (CMGRD) en los municipios de vetas, califonia y surata para llevar a cabo la planeación del simulacro nacional de evacuación. En la práctica se desarrollaron acciones encaminadas a la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción masa, inundación, avenidas torrenciales entre otros, y se proyectaron soluciones para el control de dichos fenómenos.

\*Trabajo De Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo, Msc Ing. Civil

### **Abstract**

**Title:** Support for environmental processes as part of the general plan for erosion control in municipalities under the jurisdiction of the CDMB, in the subdirectory of risk management and territorial security.

**Author:** Joan Sebastian Duarte Florez

**Keywords:** Erosion, Threat, Geotechnics, Mass removal, Flood.

**Description:**

This article shows the activities carried out within the framework of the business practice developed in the regional Autonomous Corporation for the defense of the Bucaramanga Plateau (CDMB), subdirectorate of risk management and territorial security, in support of projects and programs for prevention, knowledge and risk reduction. Technical visits were carried out in follow-up to public works contracts supervised by the CDMB, there was an accompaniment to the eye inspection visits and it was supported in the preparation of reports to respond to popular actions brought by the community in situations involving risk due to Natural phenomena, supported by the development of geological, geotechnical and hydraulic models as well as detailed plans for studies of threat, vulnerability and risk due to phenomena of mass removal and flooding, were accompanied by municipal councils of risk and disaster management ( CMGRD) in the municipalities of vetas, california and surata to carry out the planning of the national evacuation drill. In practice, actions aimed at assessing the threat by mass removal phenomena, flooding, torrential avenues, among others, were developed and solutions were projected to control these phenomena.

\*Degree w

\*\*Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo, Msc Ing. Civil

## **Introducción**

La CDMB dentro de su plan de acción “2016-2019” UNIDOS POR EL AMBIENTE, asigno a la subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial, el proyecto “reducción del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático en el área de jurisdicción de la CDMB”.El objetivo del proyecto fue desarrollar acciones encaminadas al conocimiento, la prevención, la reducción del riesgo, el apoyo a desastres y la adaptación al cambio climático, con miras a la mitigación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, inundación y otros en el área de jurisdicción de la CDMB.

A continuación, se describen las actividades realizadas durante la práctica laboral en la subdirección de gestión del riesgo y seguridad territorial, en las cuales brinde apoyo técnico profesional adquirido durante mi carrera universitaria, bajo la supervisión del subdirector de gestión del riesgo, y con apoyo del personal profesional especialista adscrito a la subdirección.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar un proyecto de grado para optar al título de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander en la modalidad de práctica empresarial según el reglamento académico estudiantil de pregrado de la UIS como auxiliar de ingeniería civil apoyando proyectos y programas para la ejecución de obras civiles en la subdirección de Gestión del Riesgo y Seguridad Territorial de la CDMB.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Apoyo técnico en estudios de amenaza por fenómenos de remoción en masa e inundación y proyección de medidas de mitigación.
- Apoyo a las visitas técnicas de inspección ocular realizadas a los contratos de obra pública desarrollados en el área de jurisdicción de la CDMB.
- Apoyo en la elaboración de informes técnicos de seguimiento a derechos de peticiones y acciones populares en los cuales se encuentre vinculada la entidad.

## **2 Elaboración de Modelos Geológicos Geotécnicos, Planos de Detalle y Presupuesto**

Se inició la práctica apoyando el “estudio geológico, geotécnico y diseño de medidas de mitigación para el talud sur de la calle 8 entre carreras 7 y 8, casco urbano del municipio de Lebrija”, elaborando modelos geológicos geotécnicos, en el programa Slide, para identificar la amenaza por remoción en masa que presenta el sector estudio. Una vez identificada la amenaza se proyectaron obras para la estabilización y control de la erosión del talud objeto de análisis. Anudado lo anterior y en base a el análisis de precios unitarios que posee la CDMB para cada una de las actividades identificadas para ejecutar dichas obras, se calculó el precio total directo para cada una de las alternativas planteadas.

Trabajando en la recopilación de la información secundaria y antecedentes de la base de datos de la CDMB que tenía el talud objeto de estudio, se evaluó la amenaza a fenómenos de remoción en masa que se presentan en el sector.

Procesando los resultados de la exploración geotécnica y mediante el análisis del levantamiento topográfico y estratigráfico del talud estudio, se calculó la amenaza mediante la elaboración de modelos geológicos geotécnicos debidamente calibrados con los cuales se determinaron los factores de seguridad que permitieron categorizar la amenaza en el sector estudio, siguiendo la guía metodología para estudios de amenaza por remoción en masa del servicio geológico colombiano

### **2.1 Descripción del problema:**

El sector del presente estudio presenta amenaza a fenómenos de remoción en masa, localizado en la Calle 8 entre carreras 7 y 8, sector Barrio El Pesebre, presenta una geomorfología superior a  $45^\circ$ , el cual presentó deslizamiento de tierra que desplomó cuatro viviendas, cubrió un negocio de motocicletas, lo que dejó 12 personas damnificadas el día 13 de octubre de 2011, así mismo

presenta categorización de riesgo alto de acuerdo al EOT del municipio; en la actualidad el talud sigue presentado procesos erosivos, por lo que el municipio le ha realizado seguimiento permanente, igualmente la oficina de gestión del riesgo ha suministrado de manera provisional plástico de polipropileno negro para la protección, sin embargo la erosión del talud por factores antrópicos ha aumentado poniendo en riesgo de colapso a la calle 7<sup>a</sup>, que se encuentra en la parte superior del talud. Consecuencias que genera el problema:

### **2.1.1 Causas directas:**

- Déficit en aislamiento geotécnico.
- Presentación de taludes con alto nivel de deterioro
- Mal drenaje superficial

### **2.1.2 Causas indirectas.**

- Taludes con altas y medianas pendientes.
- Incremento de presión de poros del subsuelo.

### **2.1.3 Efectos directos.**

- Deslizamiento de tierras afectando a los usuarios de la vía
- Erosión de los taludes y pérdida del suelo urbano
- Erosión por falta de obras de control de las aguas de escorrentía.

### **2.1.4 Efectos indirectos.**

- Incremento del peligro de pérdida de infraestructura socio-económica y de vidas humanas.
- Pérdida de área de expansión urbana.
- Desplazamientos forzados a otros sectores

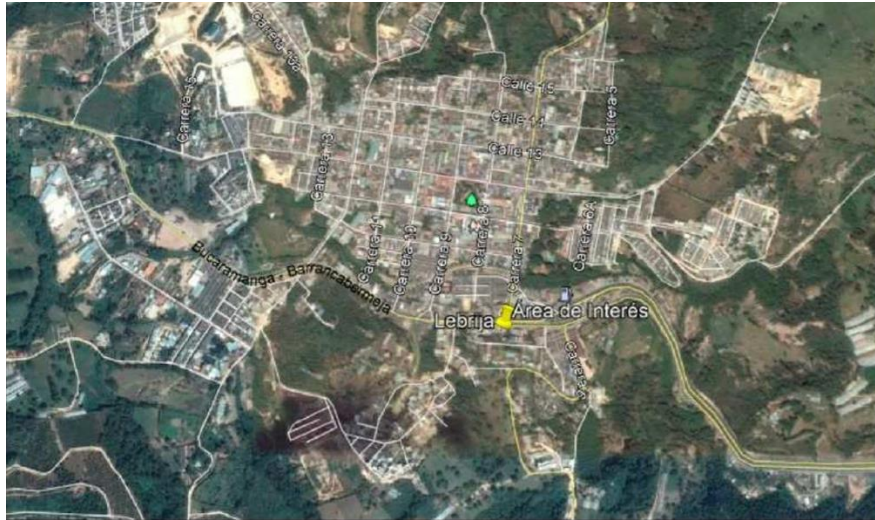
## 2.2 Antecedentes y Justificación del Proyecto

El Casco urbano del municipio de Lebrija se encuentra localizado sobre la mesa del mismo nombre el cual no presenta una topografía abrupta, sin embargo y debido a las obras de infraestructura que se han desarrollado, entre ellas la ampliación a doble calzada de la vía que comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja, en el lineamiento se generan cortes entre ellos los localizados en la calle 8, en los cuales la Concesión Zona Metropolitana de Bucaramanga genero taludes entre 10 a 18 metros de altura.

La problemática del sector surge a raíz de evento acontecido el día 13 de octubre de 2011, donde se presentó deslizamiento de tierra que desplomó cuatro viviendas, cubrió un negocio de motocicletas, lo que dejó 12 personas damnificadas, razón por la cual los Habitantes del sector alto del talud interpusieron una acción popular con radicado 2013-0923, con el fin de proteger y salvaguardar su integridad física y económica.

Igualmente, durante el tiempo la problemática ha ido creciendo ya que ha ocurrido una erosión retrogresiva, la cual ha generado perdida de recurso suelo, tal es el hecho que la problemática está al borde de la calle 7ª, y si no se realiza su intervención se causaría un daño a esta infraestructura.

Es por eso y con el base al fallo de la acción popular con radicado 2013-0923 que la CDMB realizo los estudios y el diseño de las obras de mitigación con el fin de dar solución a la problemática y de esta manera garantizar la estabilidad de los terrenos, obras que deben ser desarrolladas por el municipio de Lebrija. En las ilustraciones 1 y 2 se muestra la localización del talud estudio.



**Figura 1.** Localización puntual del sitio en estudio en el municipio de Lebrija. Adaptado de GoogleEarth 2019



**Figura 2.** Localización detallada del área de estudio. El área de intervención se encuentra enmarcada en rojo. Adaptado de Google Earth 2019

### 2.3 Modelos Geológicos Geotécnicos

De acuerdo el levantamiento topográfico, los resultados de la exploración y caracterización geotécnica, levantamiento Geológico, geomorfológico y morfométrico, se estableció un modelo geológico geotécnico representado en 7 perfiles, los cuales fueron distribuidos en toda la zona de estudio. Para el análisis de estabilidad del modelo geológico, se utilizó el software SLIDE v6.0 de la firma ROCSCIENCE, el cual es un producto que utiliza la teoría de equilibrio límite y elementos finitos, analizando superficies de falla circulares las cuales, son características del movimiento

analizado en el presente proyecto, debido a su formación geológica y las características puntuales del suelo.

## 2.4 Categorización de la Amenaza

“La evaluación de la amenaza se deberá realizar teniendo en cuenta la situación actual y futura bajo condiciones normales (periodo de retorno 1 año) y extremas (periodo de retorno 50 años) de los agentes detonantes de niveles de agua y sismo a las que podrán estar expuestas las zonas de estudio, sin tener en cuenta las medidas de mitigación del riesgo” (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015)

La aceleración crítica para considerar en los análisis de tipo pseudo estático deberá estar de acuerdo con el análisis sobre sismología realizado y no podrá ser menor a los establecidos en el Título H de la Norma Sismo Resistente NSR-10, debidamente justificada. A su vez se deben identificar y evaluar las sobrecargas para cada escenario planteado.

Tabla 1.  
*Factores de Seguridad para categorizar la amenaza.*

Categoría	Factores Seguridad	
	Condición Extrema Pseudo Estático	Condición Normal Estático
Amenaza Baja	$FS > 1,2$	$FS > 1,5$
Amenaza Media	$1,0 < FS < 1,2$	$1,25 < FS < 1,5$
Amenaza Alta	$FS < 1,0$	$FS < 1,25$

Nota: categorización de la amenaza según Servicio Geológico colombiano, 2015

## 2.5 Resultados de Estabilidad y Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa

De acuerdo con los escenarios planteados se presentan los trabajos realizados para determinar la amenaza por fenómenos de movimientos en masa en el sector de análisis, implementándose metodologías determinísticas, estas consisten en la modelación geológica geotécnica de la masa de suelo con parámetros puntuales obtenidos de los ensayos de laboratorio, para la determinación

de los factores de seguridad por deslizamiento y la clasificación de la amenaza. A continuación, se presentan como ejemplo los resultados obtenidos del modelo geológico geotécnico para el perfil A, el que fue analizado por 5 métodos de análisis de estabilidad de taludes los cuales son los más usados en este campo.

Tabla 2.  
Resultados del análisis Estático para condiciones actuales

Sección A: Escenario Estático Actual			
Método	FS Determinístico	FS Referencia	Categorización de la Amenaza
Ordinary/Felleniu	0.887	1.5	Alta
Bishop Simplified	0.315	1.5	Alta
Janbu Corrected	0.272	1.5	Alta
Spencer	0.311	1.5	Alta
Gle/Morgenstern-Price	0.325	1.5	Alta

Nota: Resultados obtenidos del modelo para el perfil A.

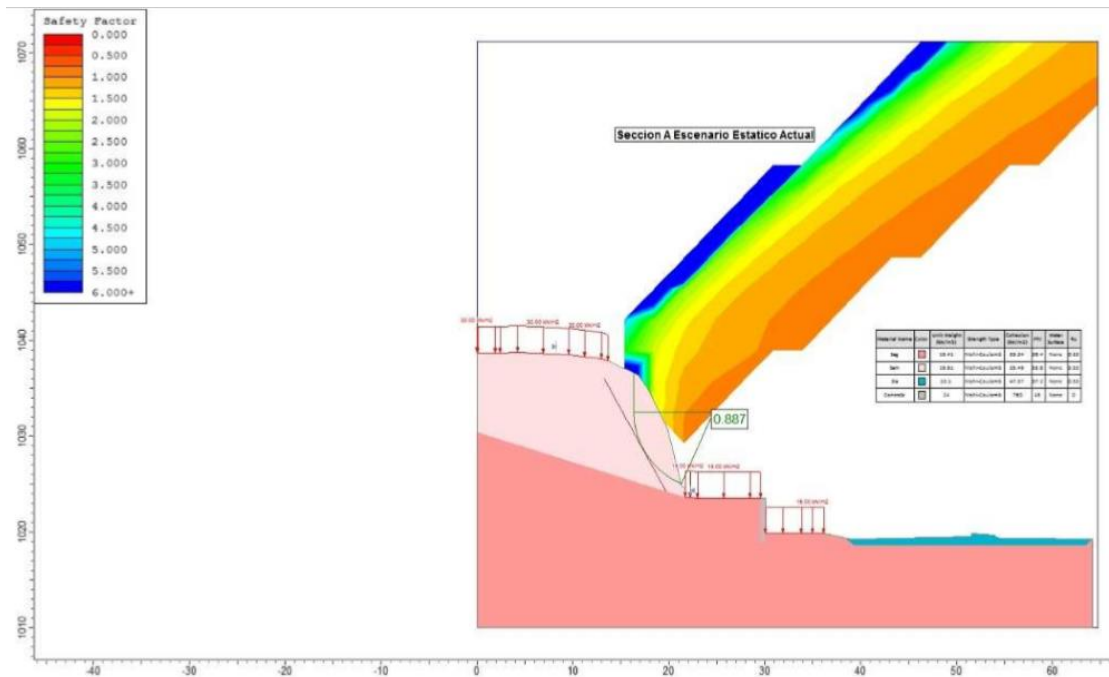


Figura 3. Resultados del análisis Estático en condiciones normales perfil A.

## 2.6 Obras de Mitigación Estructurales

Debido a que en cada sección transversal analizada se encontraron condiciones de inestabilidad se establecieron medidas para mitigar la amenaza a fenómenos de remoción en masa con el objetivo de mejorar las condiciones de estabilidad y disminuir directamente el riesgo.

Previamente identificado el sector crítico, se establecen medidas para eliminar la amenaza y garantizar la estabilidad de los taludes en el caso de que se presentaran condiciones de lluvias fuertes acompañadas de un evento sísmico.

De acuerdo a los resultados de la amenaza ante fenómenos de remoción en masa se requiere implementar obras geotécnicas de estabilización, mitigación y prevención, por lo cual se plantearon dos alternativas, la primera consiste en la estabilización del sector por medio de una pantalla anclada con anclajes activo de 30 toneladas de 15 metros de longitud los cuales tienen un bulbo de 9 metros, la segunda alternativa consiste en una pantalla anclada con sistema de estabilización tipo soil nails (pernos) de 15 metros de longitud espaciados tanto en la horizontal como en la vertical cada 2 metros en los sectores críticos como se aprecian en los planos de detalle. ( Ver apéndice A y B )

En la siguiente figura se observan el modelo geológico-geotécnico, para el perfil A, con los sistemas de estabilización proyectados, más adelante descritos, para mitigar la amenaza analizando fallas circulares locales sobre los sectores más representativos, mostrando los factores de seguridad por los métodos de Bishop, Jambu, Spencer, LE/Morgenstern-Price y Ordinary/Fellenius, concluyendo en la estabilización de los sectores críticos mediante las medidas geotécnicas propuestas con factores de seguridad superiores a 1.2 en un escenario dinámico y superiores a 1.5 en condiciones normales a actuales.

Tabla 3.  
Resultados de análisis estático con obras para el perfil A

Sección A: escenario estático actual con obras de estabilización tipo anclajes activos			
Método	FS Determinístico	FS Referencia	Categorización de la Amenaza
Ordinary/Fellenius	2.320	1.5	Baja
Bishop Simplified	1.720	1.5	Baja
Janbu Corrected	1.608	1.5	Baja
Spencer	2.673	1.5	Baja
Gle/Morgenstern-Price	2.207	1.5	Baja

Nota : Resultados obtenidos para el factor de seguridad por diferentes metodos de analisis de equilibrio limite

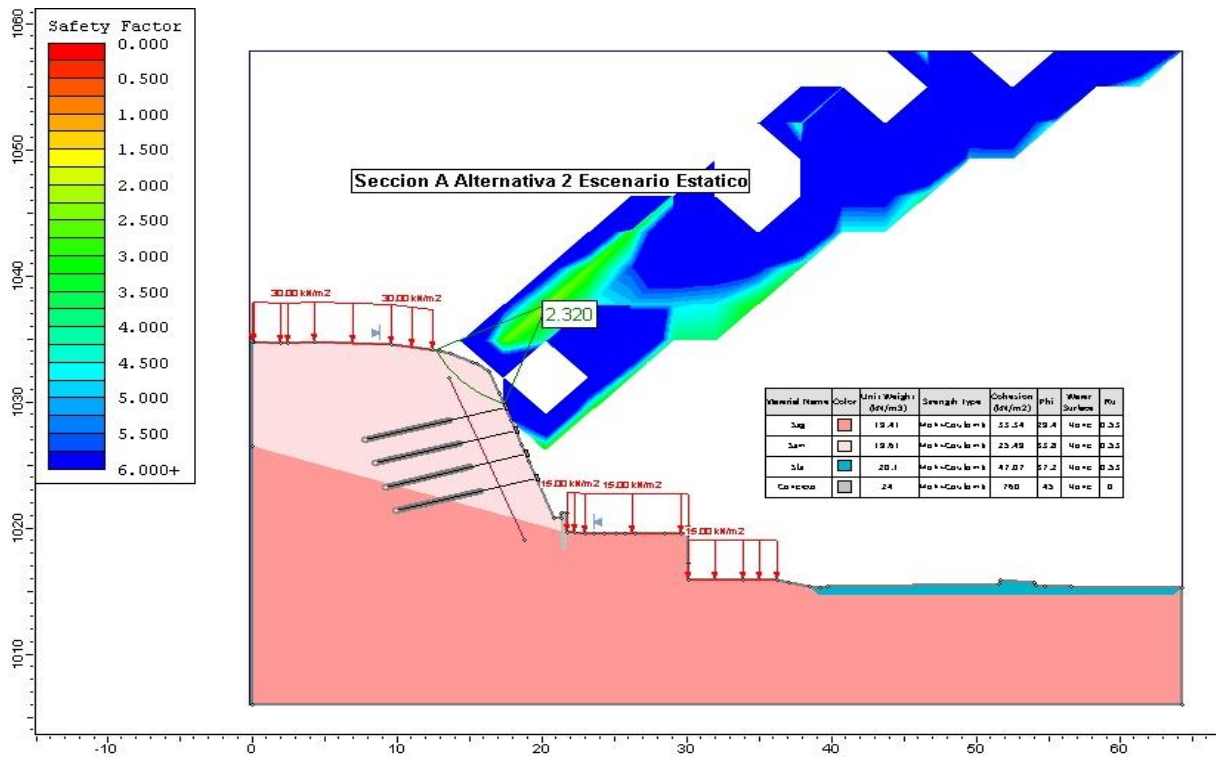
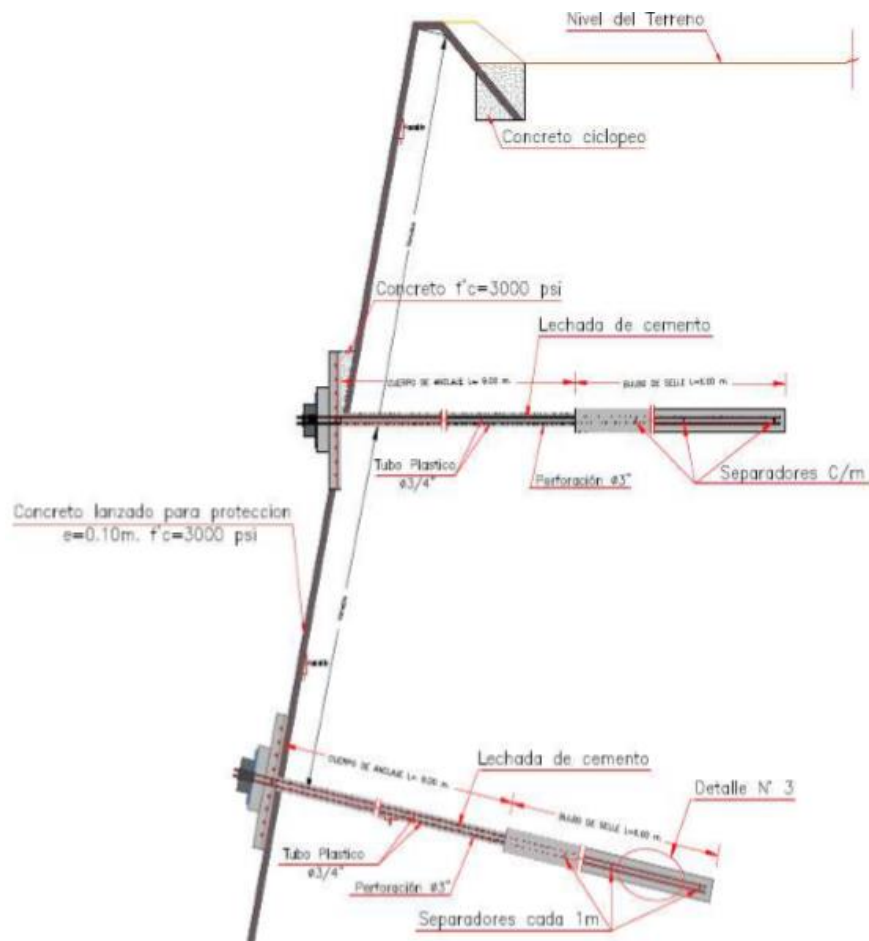


Figura 4. Resultados del análisis Estático con obras de Estabilización tipo anclajes activos para el Perfil A.

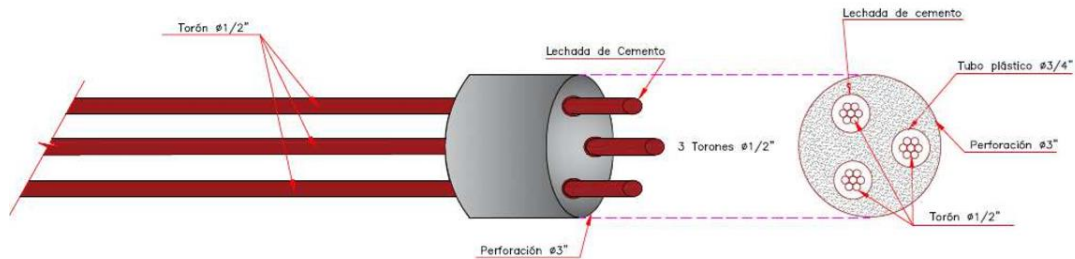
## 2.7 Descripción de las obras proyectadas

**2.7.1 Alternativa 1 Pantalla Anclada:** Este tipo de obra constituye un medio esencial para garantizar la estabilidad de sectores críticos con pendientes significativas, logrando utilizar soporte mediante anclajes que introducen estados de tensiones, esfuerzos y deformaciones adicionales a la masa de suelos mejorando la estabilidad general ya que una vez instalados se presentan hasta alcanzar una carga admisible, son lo cual se comprime el terreno entre la zona del anclaje y el apoyo superficial de la pantalla



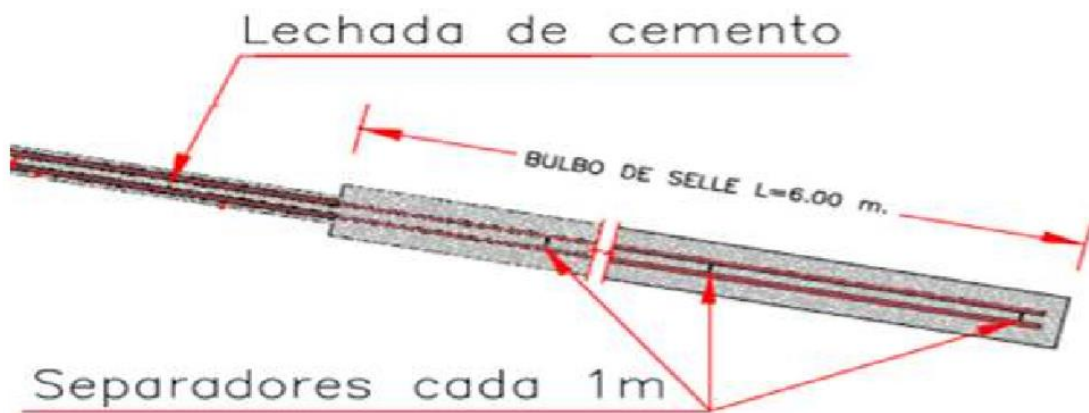
**Figura 5.** Pantalla anclada.

**2.7.2 Anclaje.** Es un elemento estructural utilizado para efectuar cargas de tensión y esfuerzos a la masa del suelo posterior a su instalación. La resistencia para cada uno de los anclajes proyectados es de 300 Kn con una longitud de 15 metros.



**Figura 6.** Detalle del anclaje.

**2.7.3 Bulbo.** El bulbo es el encargado de transmitir esfuerzos en el sistema, debe ubicarse por detrás de las superficies de falla del terreno. La resistencia de la zona de anclaje se establece por la adherencia entre la lechada con el acero y la adherencia del bulbo del anclaje con el terreno que lo rodea. Para el presente proyecto se propuso una longitud de bulbo de 6 metros.

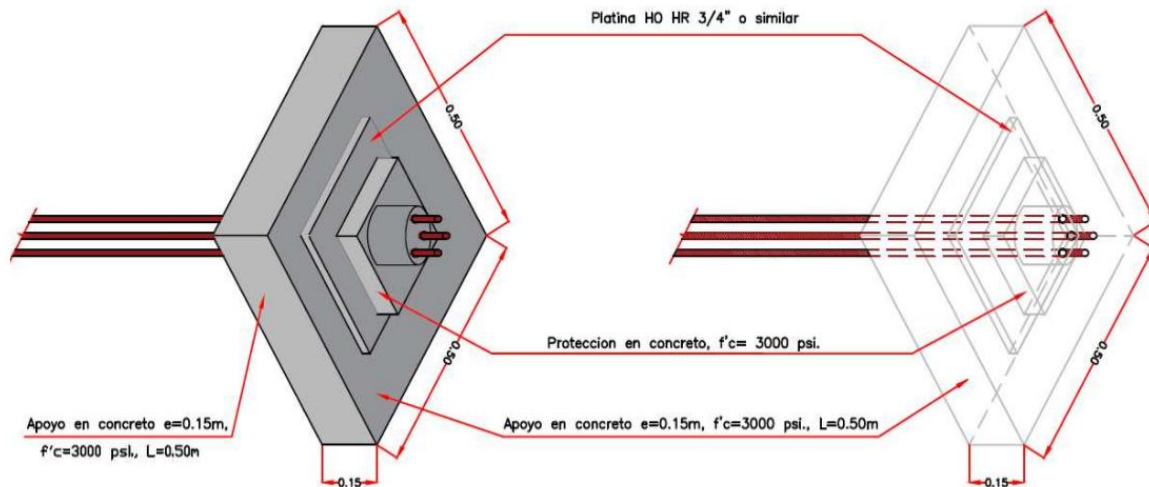


**Figura 7.** Detalle de la zona de lechada.

**2.7.4 Lechada de cemento.** Generalmente compuesto a base de relaciones de cemento-agua, en algunos casos mortero de cemento, cuyo objetivo es el de proteger el acero en la zona libre y en la zona del bulbo.

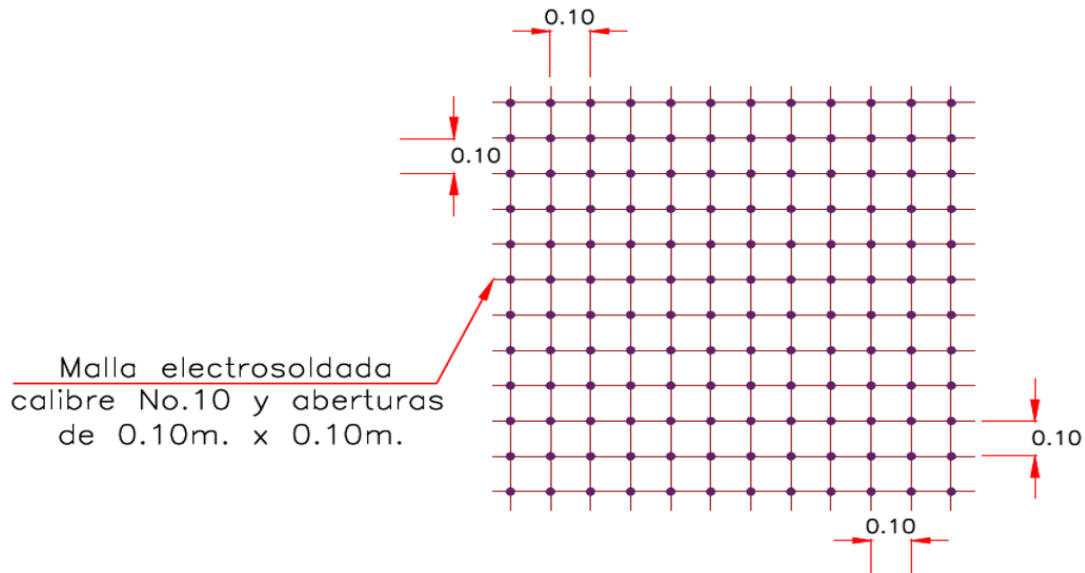
**2.7.5 Torón.** Es un tensor, barra o cordón de acero, el cual transmite la tensión desde el punto de apoyo hasta el suelo. Se proyectaron de a 3 torones de 0.6 pulgadas por anclaje.

**2.7.6 Zapata.** Es la estructura de apoyo y sobre la cual se distribuye la acción exterior, su geometría es cuadrada con lados de 1.5 m y espesor de 0.2 m.



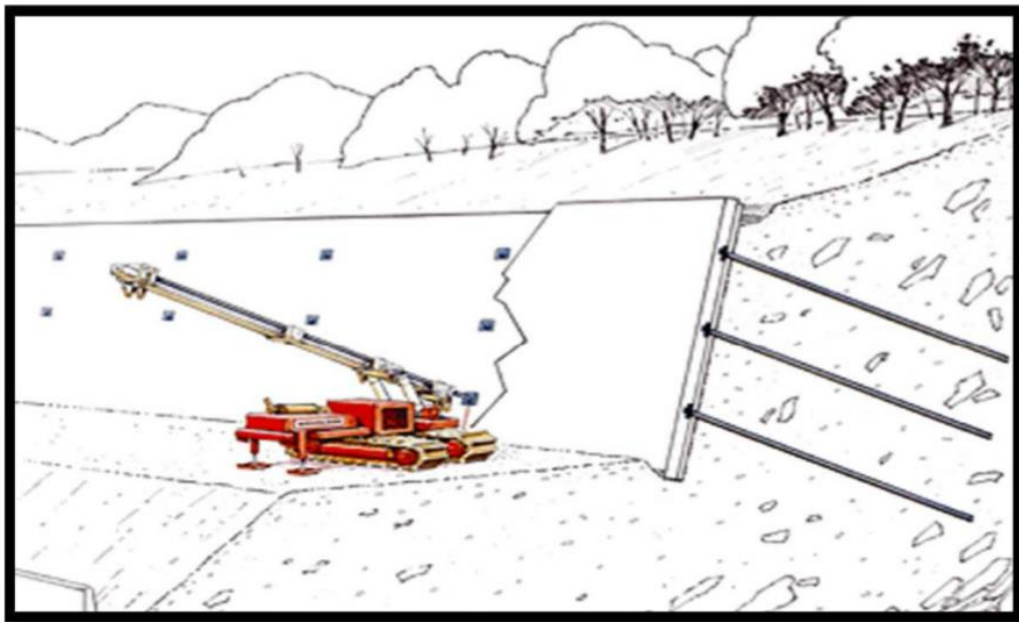
**Figura 8.** Detalle del dado o zapata del anclaje

La zapata se construye en concreto de  $f'c=3000$  psi con malla refuerzo en acero de  $\emptyset 3/4''$ ,  $f_y=60.000$  psi y aberturas de  $0.1m \times 0.1m$



**Figura 9.** Detalle de malla electrosoldada

**2.7.7 Alternativa 2 Malla asegurada con Nails y recubierta con Biomortero:** el proceso consiste en la inclusión de una malla de alta densidad en la cara del talud expuesto, sostenida por nails, los cuales serán un apoyo para el aumento de la resistencia del suelo y de esta manera proteger el talud de los deslizamientos, pero también de la erosión con un concreto lanzado.



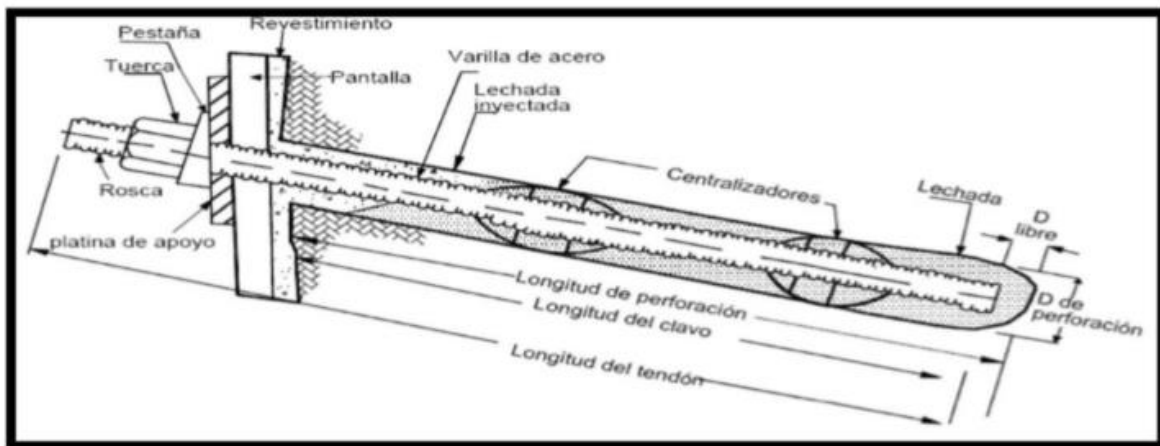
**Figura 10.** Sistema de Estabilización con Nails.

El sistema utiliza procedimientos similares a los de los muros anclados con la diferencia de que los refuerzos no son pretensados, sino que actúan en forma pasiva, ya que las inclusiones pasivas de refuerzo dentro del suelo generan soporte a las estructuras, en este caso a la malla de alta densidad

**2.7.8 Nails o pernos.** Se instala un arreglo de clavos, los cuales son inclusiones pasivas colocadas en un sistema de grilla para crear una masa coherente estable.

Los Clavos pueden ser varillas de acero, tubos o cables que se introducen dentro del suelo natural o la roca blanda y son inyectados dentro de huecos pre perforados. Generalmente son espaciados a distancias relativamente pequeñas, en este caso se proyectaron para un espaciamiento tanto vertical como horizontal a una distancia de 2 metros.

Los nails no son tensionados, pero deben estar cercanamente espaciados para que trabajen en grupo y para que le den soporte a la malla de recubrimiento del talud expuesto.



**Figura 11.** Detalle del Nail o perno de anclaje.

Se instala un arreglo de clavos, los cuales son inclusiones pasivas colocadas en un sistema de grilla para crear una masa coherente estable. Los Clavos pueden ser varillas de acero, tubos o cables que se introducen dentro del suelo natural o la roca blanda y son inyectados dentro de huecos

pre perforados. Generalmente son espaciados a distancias relativamente pequeñas. Los nails no son tensionados, pero deben estar cercanamente espaciados para que trabajen en grupo y para que le den soporte a la malla de recubrimiento del talud expuesto.

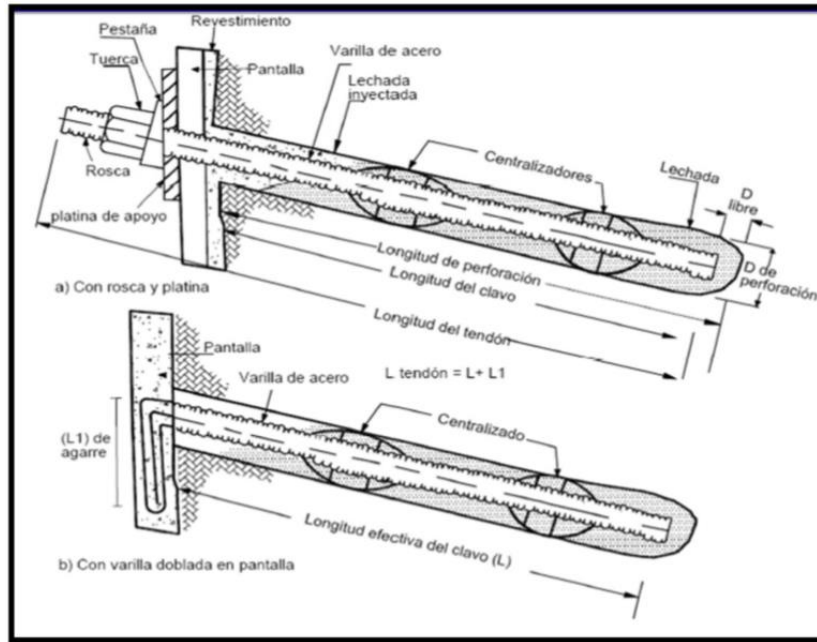
**2.7.9 Diámetros de la perforación** Los diámetros de las perforaciones varían entre 3 y 12 pulgadas y los diámetros más comunes son los de 5 a 8 pulgadas. Se proyectaron perforaciones de 6 pulgadas.

**2.7.10 Inclinación de las perforaciones** La inclinación de las perforaciones varía generalmente de 10° a 20° y la típica es de 15°. Las inclinaciones de menos de 10° no son recomendables por la dificultad para inyectar la lechada

**2.7.11 Espaciamiento** Los espaciamientos varían generalmente entre 1 y 3 metros. Entre mayor sea el espaciamiento mayor es la carga sobre los nails y menor su efectividad como estructura de contención. El espaciamiento horizontal es comúnmente el mismo vertical.

**2.7.12 Refuerzos.** El componente principal de un clavo es una varilla de acero sólida, la cual se coloca en las perforaciones pre excavadas y luego se inyecta. Se utilizan generalmente varillas con resistencia a la tensión de 420 a 520 MPa (grado 60 o 75). Se utilizan diámetros entre 19 y 43 milímetros (varillas número 6 a número 14).

**2.7.13 Cabeza de la varilla.** La platina puede quedar embebida en el concreto o apoyada sobre la superficie de la pantalla de concreto armado. Con frecuencia se dobla la varilla para que quede unida a la pantalla superficial.



**Figura 12.** Tipos de Nails o pernos.

## 2.8 Elaboración de Planos de Detalle, Análisis de Precios Unitarios y Presupuesto

Para el estudio en mención se elaboraron un total de 16 planos de detalle para las dos alternativas propuestas y se elaboró el presupuesto necesario para ejecutar dichas obras. los planos y el presupuesto para cada alternativa pueden ser consultados en el CD-ROM (Ver apéndices A, B y C.)

**2.8.1 Alternativa 1:** La alternativa 1 plantea la construcción de la siguiente obra de ingeniería:

- Construcción de una pantalla anclada.
- Construcción de canal de recolección de aguas perimetral a la pantalla

Esta alternativa mejora las condiciones actuales de toda el área del talud y mejora la calidad de vida para los residentes en este sitio, generando seguridad a los habitantes de las viviendas ubicadas en la corona del talud.

El costo total de esta alternativa a costo directo corresponde a: \$2.361.012.223,37

**2.8.2 Alternativa 2.** La alternativa 2 se plantea con la siguiente construcción:

- Malla asegurada con Nails recubriendo la cara de los taludes con concreto lanzado.
- Manejo de aguas superficiales mediante canal ubicado al pie del talud.

Para la alternativa 2 se calcularon los costos aproximados de las obras de estabilización, cuyo valor total a costo directo corresponde a: \$1.984.853.912,42

Los planos y el presupuesto de cada alternativa pueden ser consultado en los Apéndices A y B Estudio pesebre Lebrija.

### **3 Apoyo en Estudios de Amenaza por Fenómeno de Inundación**

Se elaboraron modelos de simulación hidráulica y planos de detalle para estudios de amenaza por inundación del rio Lebrija y Cachira del espíritu santo a la altura de los corregimientos de Papayal, San José de los Chorros y San Rafael para análisis hidráulico y proyección de obras de control del cauce. A continuación, se mencionan los estudios hechos para la fundación panamericana para el desarrollo:

1). Contrato de precio global fijo para fortalecer el componente de gestión socio ambiental a través de la realización de un estudio que permita evaluar la amenaza ante fenómeno de inundación y diseño de medidas de mitigación para conocimiento del riesgo en las zonas con potencial hidrocarburífero aledañas a los centros poblados de papayal y san José de los chorros en el

municipio de Rio negro - Santander. Contrato n° tdse-scto-46-551-10-19 -ingsol s.a.s-cdmb-anh-fulcode

2). Contrato de precio global fijo para realizar el fortalecimiento del componente de la capacidad institucional del sistema nacional ambiental y así mismo la gestión de la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga-cdmb, desde su accionar, mediante la realización de un estudio que permita evidenciar el riesgo del departamento de Santander. Tdse-scto-46-528-09-19 icosan s.a.s -cdmb-anh-fulcode.

En los siguientes apartados se explica concisamente el trabajo hecho, la metodología y los resultados de dichos modelos de simulación hidráulica para el río Lebrija en el bajo Rionegro a la altura de los corregimientos Papayal y San José de los Chorros (Ver apéndices D y E).

### **3.1 Objetivos del Estudio de Amenaza por Inundación**

- Evaluar la amenaza por inundación del Río Lebrija sobre los centros poblados de Papayal y San José de los Chorros del Municipio de Rionegro Santander, y establecer las obras de ingeniería necesarias para la mitigación de la amenaza.
- Calcular los caudales máximos del Río Lebrija a la altura de los centros poblados de Papayal y San José de los Chorros, siguiendo las especificaciones de las Normas Geotécnicas de la CDMB.
- Realizar el levantamiento topográfico y batimétrico del Río Lebrija, a la altura de los centros poblados de Papayal y San José de los Chorros.
- Realizar la modelación hidráulica del cauce y determinar los niveles máximos de inundación.
- Establecer y diseñar las obras de control de cauce necesarias para la mitigación de la amenaza ante fenómeno de inundación en los sectores de interés.

- Mediante el análisis de los resultados emitir las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

### 3.2 Localización

La zona a estudiar se localiza en el municipio de Rionegro departamento de Santander, en coordenadas (planas) aproximadas: X: 1.045.0000 (Este) Y: 1.338.000 (Norte), geo-referenciadas en las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC a escala 1:100.000, en las planchas 96; 97; 109; 110 y 120, como se observa en la Figura 15.



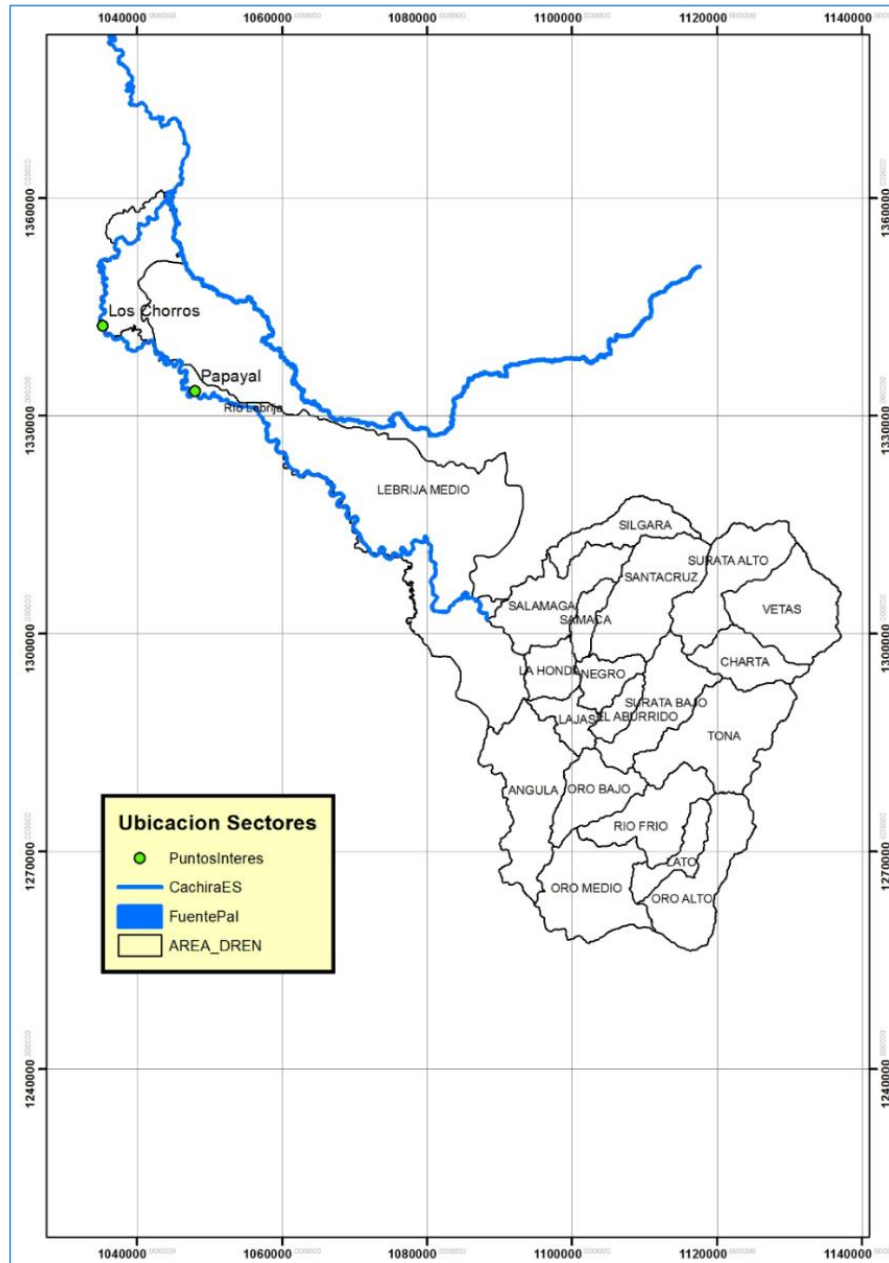
**Figura 13.** Cartografía General Adaptado del instituto de Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Para el cálculo de caudal, en el sector del proyecto se utiliza información secundaria hasta los puntos de interés. Se recurre a la información de las características biofísicas del estudio Plan de Ordenamiento cuenca Río Lebrija medio y alto y por medios indirectos se obtiene el caudal ajustando la probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno.

La zona de interés se localiza en la cuenca media del Río Lebrija, que incluye los municipios de Rionegro, Sabana de Torres y Puerto Wilches. Esta subcuenca corresponde al área Suroriental de la Cuenca Superior del Río Lebrija y se ha dividido en la microcuenca Lebrija medio.

La zona de estudio corresponde a un sector de baja pendiente, donde la fuente Río Lebrija se desborda inundando los sectores aledaños dentro de los que figuran Papayal y San José de los Chorros.

### 3.3 Características Morfométricas



**Figura 14.** Drenajes Principales. Fuente: IDEAM

El área de drenaje de interés se encuentra ubicado en la subcuenca del Río Lebrija, cuya delimitación oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, se presenta en la Figura 16 ; no obstante, para el análisis de los caudales de diseño, debe tenerse en cuenta que el Río Cáchira sufrió una desviación total, por lo cual, actualmente es aportante

directo del Río Lebrija, con zona de confluencia aguas arriba de la vía nacional conocida como ruta del sol, por lo cual, su área aferente debe sumarse a la cuenca del Río Lebrija.

Las características principales de las cuencas se definen como datos morfométricos, los cuales son de gran importancia en la obtención y generación de caudales. Como parte de estas características se encuentra el área de drenaje, la longitud de la fuente hídrica, la pendiente y el tiempo de concentración.

**3.3.1 Área de la cuenca.** Es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica. Identificadas las fuentes a analizar se determinaron los puntos y tramos de cada una de las fuentes.

**3.3.2 Longitud.** Se toma la longitud del cauce principal desde la parte más alta hasta la entrega o punto de interés.

**3.3.3 Pendiente.** Determina, de manera indirecta, la capacidad de concentración del agua y la producción de caudales pico de escorrentía superficial altos en la cuenca. Dado que el cauce principal es el desagüe de la cuenca, este parámetro también determina la rapidez de producción del caudal pico de escorrentía superficial y la capacidad de concentración de la referida descarga.

Tabla 4.  
*Microcuencas Aferentes al Área de Estudio*

Microcuencas	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (m)
Lebrija Medio	789.455552	318371.87
Silgará	81.581177	58805.77
Santacruz	171.708456	62128.37
Salamaga	133.773005	72577.81
Samacá	33.503246	31073.92
Charta	77.806744	43976.24
Suratá Bajo	124.60734	63752.43
La Honda	50.680178	33186.50
Río Negro	48.225832	34616.06
El Aburrido	32.091301	28399.69
Tona	194.213756	75395.08
Lajas	44.404426	40611.52
Angula	189.16334	84091.23
Río Frío	118.896102	60967.80
Lato	51.176303	47179.04
Oro Alto	144.832609	66928.22
Vetas	158.173816	55224.49
Suratá Alto	137.64053	64792.08
Oro Bajo	89.441694	47488.98
Oro Medio	167.037979	66427.02

Nota: Área de las microcuencas aferentes al área de estudio adaptado del plan de ordenamiento y manejo de cuencas sector bajo rio negro (POMCA,2015)

### 3.4 Análisis Hidroclimatológico

A continuación, se genera una descripción de la información disponible para el análisis y comprensión de los principales procesos que se realizan, y se presenta el desarrollo de las actividades realizadas:

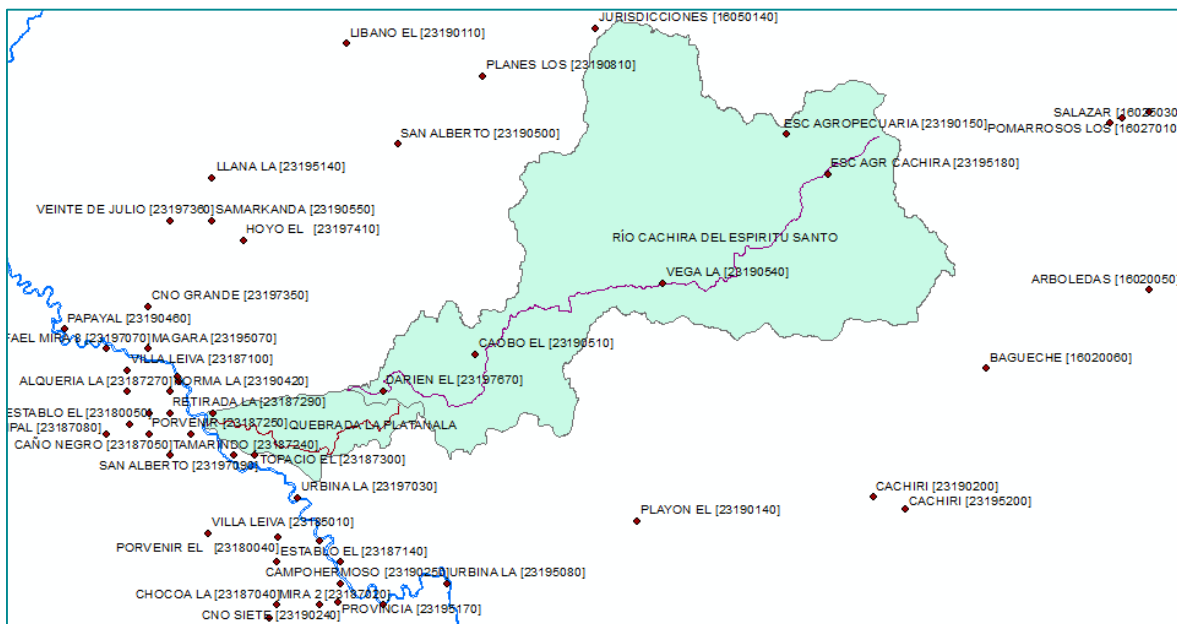
- Ubicación de estaciones hidro-climatológicas, realizada por medio de cartografía.
- Estimación de caudales para diferentes periodos de retorno.

Para evaluar los efectos de la precipitación y su aporte en la crecida del caudal de los cauces, se deben establecer sus características medibles, las cuales son determinadas mediante parámetros

como duración de la lluvia, intensidad, volumen, frecuencia y tiempo entre precipitaciones y, adicionalmente, será de interés conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia. A continuación, se describe el análisis para caracterizar las lluvias en las cuencas de aplicación, debido a que éstos serán parte de los insumos principales para la posterior modelación hidráulica.

Basados en la información de las estaciones climatológicas del IDEAM, se procede a identificar las estaciones representativas del área de estudio. Se realizó un filtro de las estaciones con información importante para el desarrollo del estudio en el cual se tuvo en cuenta aquellas con información en su serie de datos mínimo de 10 años. Analizada esta información se procedió a identificar todas las que contenían los datos con el mismo periodo con el fin de generar una coherencia en los años analizados.

Para el análisis y cálculo de caudales máximos se utilizó como insumo la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones escogidas como representativas, de las cuales se toman los valores reportados sin complemento de información por obedecer a eventos máximos.



**Figura 15.** Estaciones en el Área de Estudio Fuente: (CDMB, 2015)

La estación San Rafael (limnimétrica) registra información de caudales y niveles del Río Lebrija, teniendo en cuenta que para el presente estudio se realizará su modelamiento hidráulico, se analizará la información disponible de caudales en dicha estación.

Del estudio de la ANI (2015) a continuación se presenta el análisis de frecuencias de eventos máximos para el Río Lebrija (estación San Rafael), el cual es un procedimiento para estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos hidro-climáticos. El análisis de frecuencia de información hidrológica relaciona los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (CHOW, 1994); en general se realiza ajustando el comportamiento de los datos observados a una distribución teórica de probabilidad, entre las que se pueden mencionar la Normal, Gumbel, Pearson, Log Normal, Log-Pearson o EV3.

### **3.5 Evaluación Probabilística de Datos**

Los estudios hidrológicos parten de valores extremos (máximos). Para la determinación de éstos se conocen dos distribuciones comúnmente usadas: la distribución de Gumbel tipo I y la distribución Normal.

En el presente estudio se utilizó la distribución de valores extremos Gumbel tipo I, normal, log normal y log Gumbel, comúnmente utilizados y de bastante aceptación en el medio, que es un caso especial de la distribución GEV de tres parámetros descrita por el British Flood Studies Report en 1975.

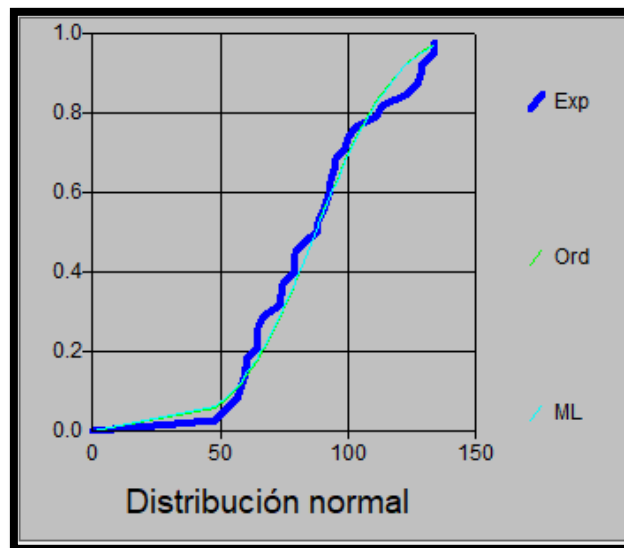
### **3.6 Análisis Probabilísticos de Datos:**

En estudios hidráulicos se requiere determinar la magnitud de las características hidrológicas principales, que incidan con cierta frecuencia en la ocurrencia de valores máximos de precipitación durante un período de tiempo determinado. Para esto, se deben analizar estadísticamente las

observaciones realizadas en los puestos de medida, verificando con qué frecuencia tomaría cada una de ellas determinado valor. Posteriormente, se pueden evaluar las probabilidades teóricas.

Para este cálculo se utiliza el software HidroEsta, este se alimenta con los datos de precipitación máxima en 24 horas. Primero el programa verifica la bondad de ajuste escogida, y determina su confiabilidad de acuerdo al número de datos y valores. Este software fue desarrollado por Villon Bejar, Máximo. Software para cálculos hidrológicos y su uso es libre.

### 3.7 Ajuste de datos a la distribución Normal Estación San Rafael

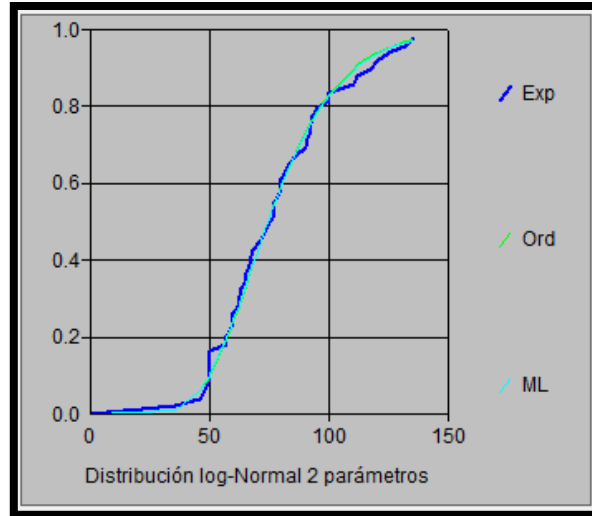


**Figura 16.** Caudales Distribución Normal Estación San Rafael.

El Delta teórico 0.0858, es menor que el Delta tabular 0.2236; por tanto, los datos se ajustan a la distribución Normal, con un nivel de significación del 5%.

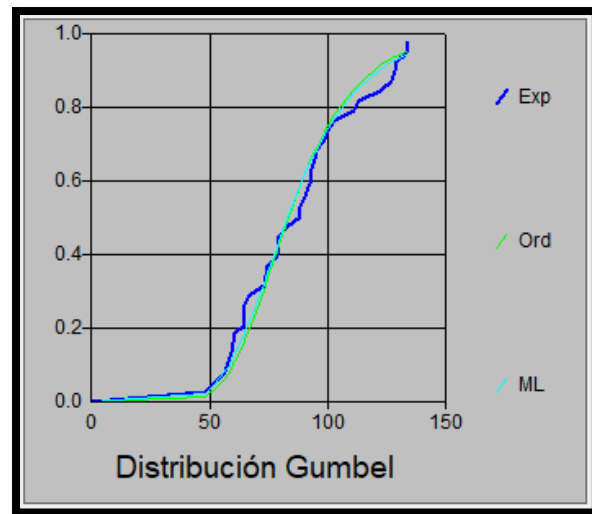
### 3.8 Ajuste de datos a la distribución log-Normal de 2 parámetros Estación San Rafael

Como el delta teórico 0.0780, es menor que el delta tabular 0.2236; los datos se ajustan a la distribución log Normal de 2 parámetros, con un nivel de significación del 5%.



**Figura 17.** Caudales Distribución Log-Normal de 2 Parámetros Estación San Rafael.

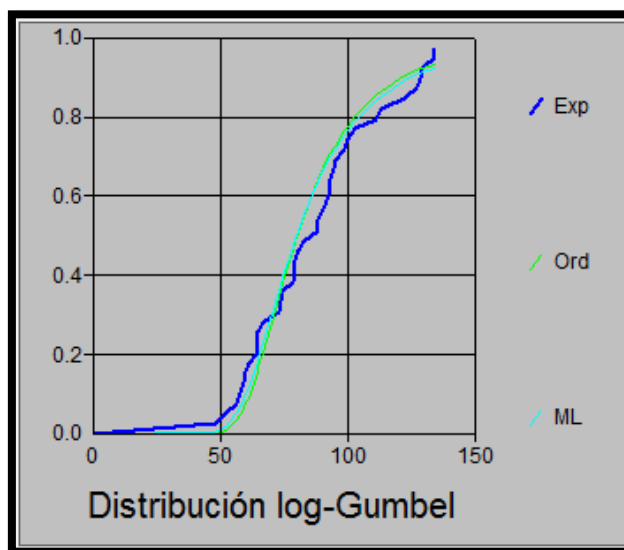
### 3.9 Ajuste de datos a la distribución Gumbel Estación San Rafael



**Figura 18.** Caudales Distribución Gumbel Estación San Rafael.

Como el delta teórico 0.0951, es menor que el delta tabular 0.2236. Los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significación del 5%.

### 3.10 Ajuste de datos a la distribución Log Gumbel Estación San Rafael



**Figura 19.** Caudales Distribución Log-Gumbel Estación San Rafael

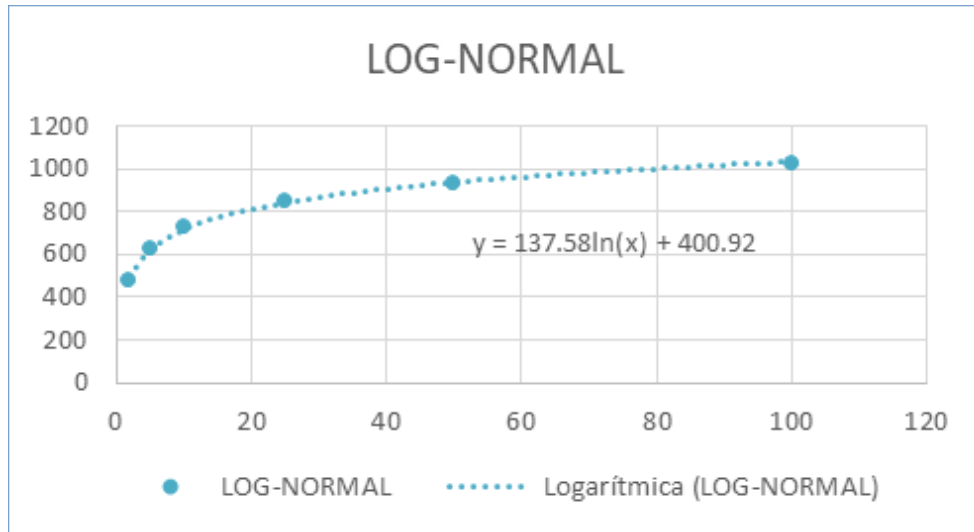
Como el delta teórico de 0.1373, es menor que el delta tabular de 0.2236, los datos se ajustan a la distribución log Gumbel, con un nivel de significación del 5%.

Definida la confiabilidad de la distribución para la estación se procede a calcular el valor máximo para los diferentes períodos de retorno, con la ayuda del mismo software. En el presente estudio se utilizó la distribución de valores extremos **Log-Normal de 2 parámetros** para la estación San Rafael.

Tabla 5  
*Caudales para diferentes periodos de retorno – Estación San Rafael*

Periodo de Retorno Tr (años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PER	LOG-NORMAL
2	506.6	480.0	481.2	535.6	480.4
5	649.1	646.0	635.9	642.0	631.8
10	723.7	755.8	732.7	672.9	729.2
25	803.2	894.6	849.9	689.9	849.7
50	854.6	997.6	931.5	694.5	937.8
100	900.8	10099.8	1010.9	696.0	1024.8

Nota : Caudales de diseño para el modelamiento hidraulico.



**Figura 20.** Línea de tendencia Distribución Log-Normal Estación San Rafael. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la distribución log-Normal se obtienen los caudales para la estación san Rafael de acuerdo a la tabla siguiente.

Tabla 6  
*Caudales Río Lebrija para la Estación San Rafael*

Periodo Retorno	Caudal estimado m <sup>3</sup> /s
100	1024.80
500	1255.92

Fuente: Elaboracion propia.

### 3.11 Periodo De Retorno (T)

El período de retorno es un término probabilístico, conocido también como intervalo de recurrencia o frecuencia de diseño, que corresponde al intervalo de tiempo en el cual se espera que un evento dado sea igualado o excedido una sola vez en promedio.

Otros autores utilizan la probabilidad asociada de ocurrencia del evento, conocida como probabilidad de excedencia anual que corresponde al inverso del período de retorno (1/T) expresado como porcentaje.

De acuerdo a la normatividad vigente, para la determinación de los niveles máximos de inundación se deben utilizar periodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, de acuerdo a las siguientes definiciones.

**3.11.1 Creciente básico.** La creciente básica se define como la creciente que solo tiene 1% de posibilidad de ocurrencia en un año, equivalente a una creciente con periodo de retorno de 100 años.

**3.11.2 Creciente máximo.** La creciente máxima o súper-creciente es la que tiene un 0.2% de probabilidad de ocurrencia en un año, equivalente a una creciente con periodo de retorno de 500 años.

### **3.12 Modelación Hidrológica**

Las relaciones área-caudal son ecuaciones que correlacionan las características morfométricas de la cuenca hidrográfica, en especial el área de la cuenca, con variables hidro climatológicas, en algunos casos se presentan en los EIA fórmulas que resultan de la combinación entre diferentes modelos o aproximaciones; por ejemplo, entre el número de curva y las precipitaciones entre cuencas.

Las correlaciones área – caudal, buscan trasladar la información de una cuenca instrumentada a otra no instrumentada (e incluso a la misma cuenca, como ocurre en los sectores de Papayal y San José de los Chorros).

La cuenca instrumentada se conoce como cuenca pivote. Para que la metodología no presente grandes niveles de error, se debe asegurar que las cuencas presenten condiciones hidrometeorológicas similares (precipitación, humedad relativa, temperatura, etc.); las características morfométricas sean similares (pendiente, alturas, área, perímetro, factor de forma, etc.).

La primera ecuación relaciona directamente el área con el caudal de la siguiente manera:

$$Q_x = Q_p \cdot (A_x / A_p)$$

Donde:

$Q_p$  es el caudal de la cuenca pivote en  $m^3/s$

$Q_x$  es el caudal de la cuenca sin información en  $m^3/s$

$A_p$  es el área de la cuenca pivote en  $Km^2$

$A_x$  es el área de la cuenca sin información en  $Km^2$

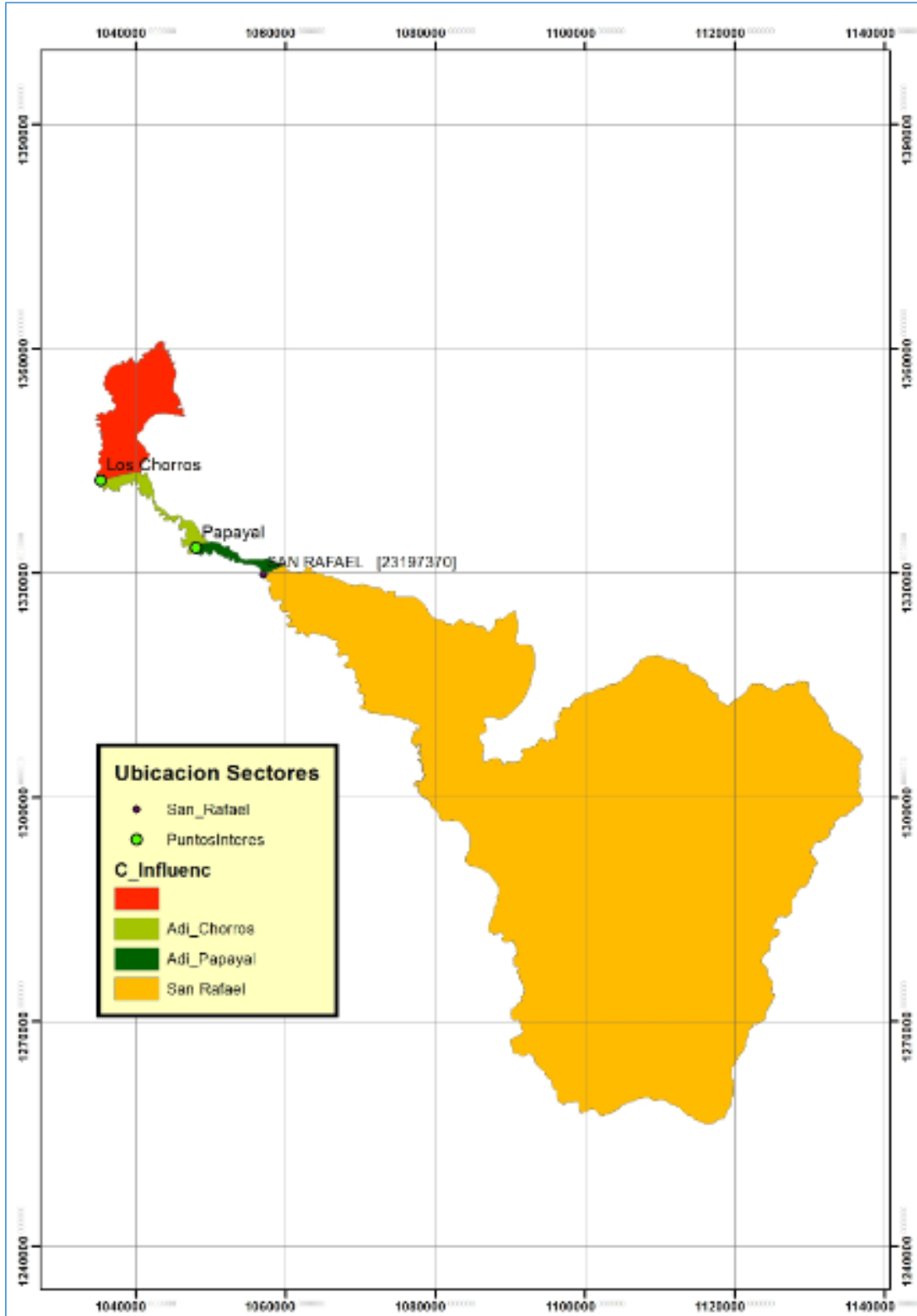
De acuerdo a lo anterior se necesita delimitar las áreas hasta la zona de estudio, o sea área hasta los centros poblados de Papayal y San José de los Chorros. En la Figura 21 se puede observar las áreas de influencia, de la estación San Rafael y las áreas adicionales hasta Papayal y hasta San José de los Chorros.

Tabla 7

*Caudales de Diseño Río Lebrija*

<b>Cuenca</b>	<b>Área Aferente Km<sup>2</sup></b>	<b>Caudal Tr 100 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal Tr 500 m<sup>3</sup>/s</b>
Estación San Rafael	2682.50	1024.80	1255.92
Sector Papayal	2696.46	1030.13	1262.45
Sector San José de los Chorros	2720.12	1039.17	1273.53

Nota: Caudales para el diseño del modelo hidráulico.



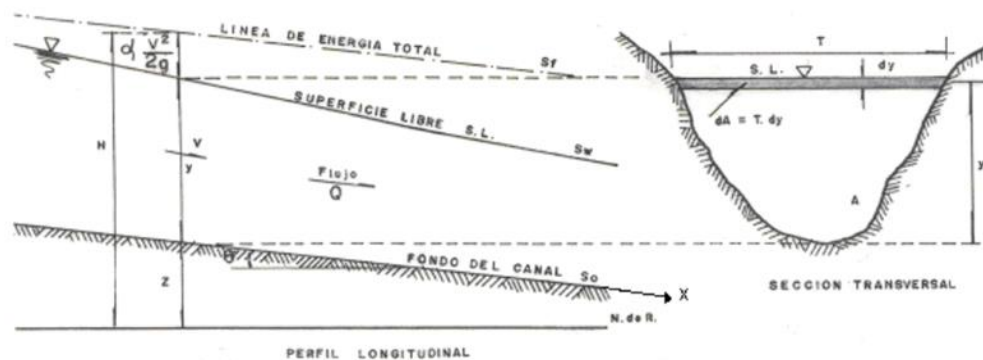
**Figura 21.** Áreas de Influencia Hasta la Estación San Rafael, Papayal y San José los Chorros.  
Fuente: (CDMB, 2015)

### 3.13 Modelación Hidráulica Matemática con Hec – Ras

El análisis hidráulico se realizó empleando el software HEC-RAS del U.S. Army Corp., de los Estados Unidos, desarrollado para calcular perfiles de flujo gradualmente variado en un canal con secciones transversales regulares o irregulares.

El programa calcula los perfiles de flujo empleando el método del paso estándar, la modelación matemática se realizó tomando las secciones transversales de acuerdo con las características mencionadas anteriormente.

### 3.14 Cálculo de los Perfiles de Flujo (Flujo Gradualmente Variado)



**Figura 22.** Análisis del Flujo Gradualmente variado.

Un flujo gradualmente variado constituye una clase del flujo permanente no uniforme, en el cual existe una variación continua a lo largo del canal, de la profundidad del flujo y de igual forma en el área, la velocidad, el perímetro mojado, el radio hidráulico, entre otros (CHOW, 2010).

La posible forma que pueda tener la superficie libre está en función de las profundidades real, normal y crítica. Para el análisis de este tipo de flujos, el HEC-RAS, presenta las siguientes consideraciones:

- El flujo es permanente, es decir, constante en el tiempo.

- La distribución de presiones en cada sección transversal del canal es hidrostática (líneas de corriente paralelas).
- La pendiente del canal es pequeña y uniforme.

Para el cálculo de la línea de energía, se permite el uso de las ecuaciones de flujo uniforme, que consideran que la pérdida de energía por fricción es la más importante.

En el análisis del flujo en canales, es necesario predecir cuál es el comportamiento de los perfiles de la lámina de agua. Esto se puede hacer con un análisis del comportamiento de la pendiente de la superficie del agua en función de las variables geométricas e hidráulicas del flujo.

### **3.15 Método del Paso Estándar**

El flujo gradualmente variado es calculado en el HEC-RAS empleando el método del paso estándar, el cuál es una de las metodologías más aplicadas para el cálculo tanto de perfiles de flujo en canales prismáticos como en aquellos de geometría variada.

El método consiste en estimar la profundidad del flujo en las diferentes secciones transversales, iniciando a partir de los datos de profundidad conocidos para una sección, que en la mayoría de los casos corresponde a la sección de control.

Si el flujo es subcrítico los cálculos se inician desde aguas abajo y se desarrollan hacia aguas arriba y si es supercrítico se parte de aguas arriba continuándose hacia aguas abajo. Se determina por un método de convergencia, la profundidad del flujo en cada sección transversal localizada en una determinada abscisa de forma que satisfaga las relaciones de energía en el cauce.

### **3.16 Procesamiento de la Información Topográfica**

A partir de la topografía y batimetría levantada para el Río Lebrija para los sectores de Papayal y San José de los Chorros, con secciones transversales espaciadas cada 10 m, se constituyó el modelo geométrico del cauce.

Con estas secciones transversales, se construyeron los perfiles del fondo del lecho para determinar los sitios en los cuales el flujo, por efecto de la pendiente presenta niveles altos.

Las secciones transversales utilizadas para el modelamiento hidráulico se ubicaron mirando hacia aguas arriba, es decir, en el mismo sentido en el cual se numeran ascendentemente.

Una vez constituido el modelo geométrico del cauce, se determinaron los parámetros hidráulicos de las secciones transversales, con base en la geometría obtenida de la topografía.

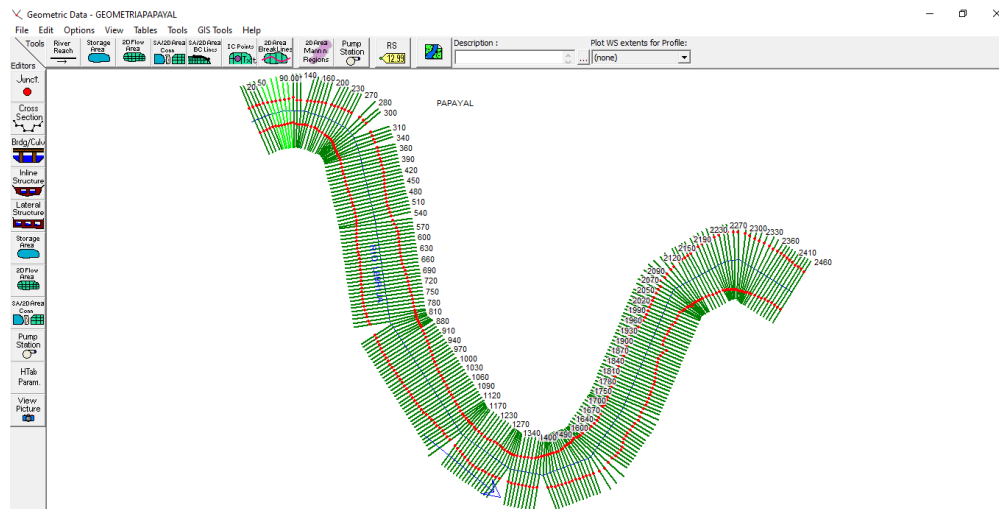
De acuerdo con los valores típicos, se estimaron los coeficientes de rugosidad de los cauces por el método de Cowan.

Una vez lo anterior, se calcularon los perfiles del flujo para los periodos de retorno de 100 y 500 años, empleando los caudales de diseño de la tabla 7.

Asumiendo que el flujo se comporta como un flujo gradualmente variado, para cada sección transversal se definieron los niveles correspondientes asociados a los caudales de cada periodo de retorno. Del cálculo hidráulico, para cada sección transversal se estimó el área hidráulica, la velocidad del flujo, el ancho de la sección y el número de Froude, entre otros parámetros.

### 3.17 Parámetros para el Modelamiento

**3.17.1 Geometría del Cauce.** El modelo hidráulico consta de dos elementos fundamentales, que son por un lado la geometría del cauce, y por otra, las condiciones de flujo, definidas por el caudal y las condiciones de contorno. La combinación de distintas geometrías y condiciones de flujo provoca diferentes resultados, que pueden ser analizados por separado o conjuntamente. Esta es la filosofía de la estructura del proyecto Hec-Ras, donde un único proyecto puede contener m multiplicidad de cálculos distintos.



**Figura 23.** Geometría del Rio Lebrija

**3.17.2 Caudal de Diseño y Condiciones de Frontera.** Se ingresan los caudales de diseño calculados en el apartado anterior (Tabla.7) y se establecen como condiciones de frontera, las alturas normales de la lámina de agua, tanto aguas arriba como aguas abajo, para lo cual, el software Hec RAS posee una herramienta que calcula las alturas normales esperadas, con base en la pendiente promedio del cauce del rio Lebrija en su respectivo sector (Ver figuras 26, 27, 28 y 29).

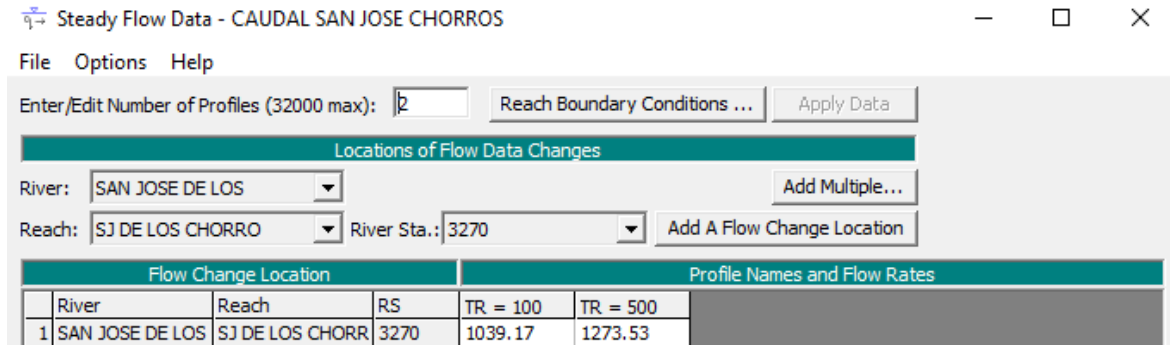


Figura 24. Caudal de diseño san José de los chorros.

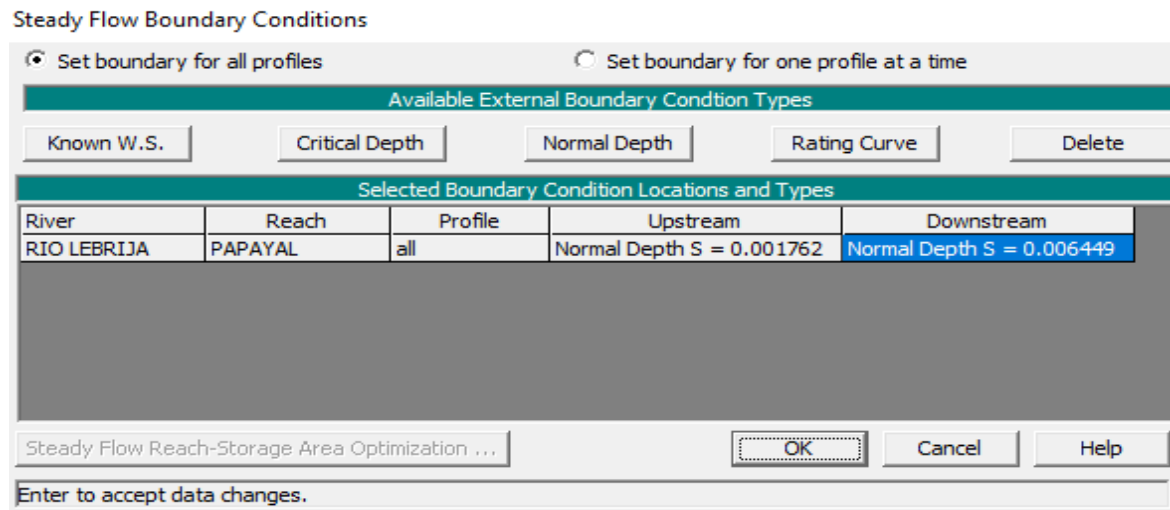


Figura 25. Condiciones de Frontera San José de los Chorros

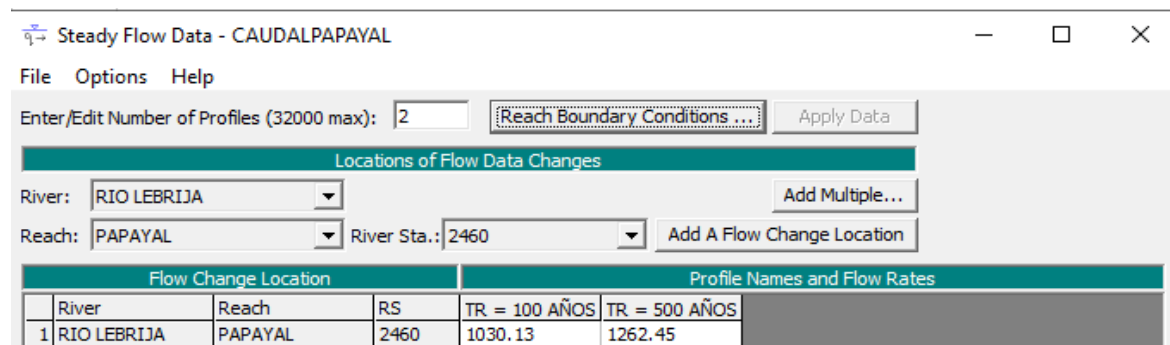


Figura 26. Caudal de Diseño Rio Lebrija a la Altura de el Corregimiento de Papayal

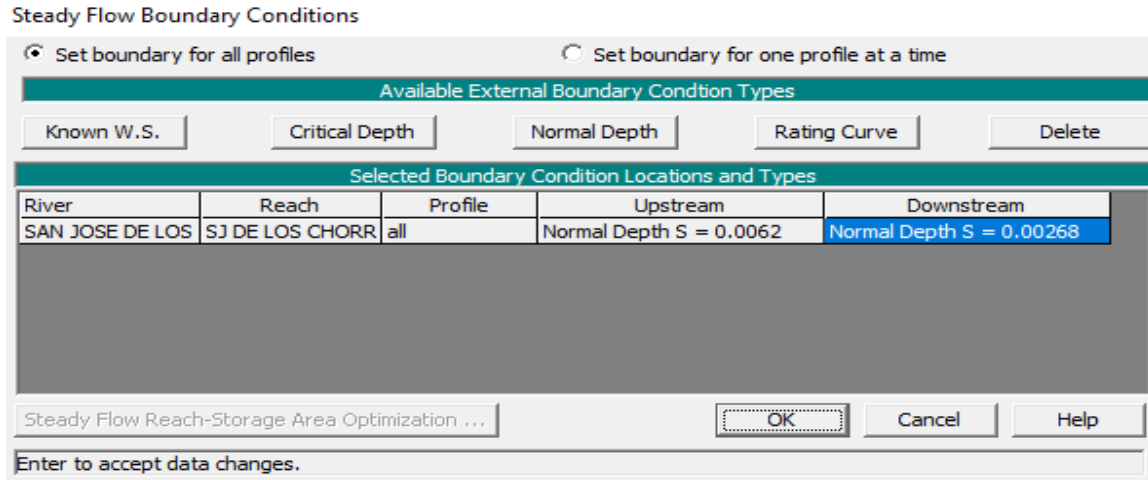


Figura 27. Condiciones de Frontera- Sector Papayal

### 3.18 Cálculo del Coeficiente de Rugosidad “ $n$ ” de Manning

El valor del coeficiente de rugosidad “ $n$ ” para la ecuación de Manning dentro de un canal es muy variable y depende de un cierto número de factores que se describen a continuación.

#### 3.18.1 Rugosidad superficial

Se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. En general, granos finos dan como resultado un valor relativamente bajo de  $n$ , y granos gruesos, un valor alto de  $n$ . Los cantos rodados grandes a menudo se concentran en el fondo de la corriente, haciendo que este sea más rugoso que sus bancas e incrementando el valor de  $n$  para los niveles bajos.

#### 3.18.2 Vegetación

Puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, la densidad, la distribución y el tipo de vegetación.

### **3.18.3 Irregularidad del canal**

Las irregularidades del canal incluyen irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de esta a lo largo del canal. En canales naturales, tales irregularidades por lo general son producidas por la presencia de barras de arena, ondas de arena, crestas y depresiones y fosos y montículos en el lecho del canal. En general un cambio gradual y uniforme en la sección transversal o en su tamaño y forma no produce efectos apreciables en el valor de  $n$ , pero cambios abruptos o alternaciones de secciones grandes y pequeñas requieren el uso de un valor grande de  $n$ .

### **3.18.4 Alineamiento del canal**

Curvas suaves con radios grandes producirán valores de  $n$  relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementarán el  $n$ . La curvatura puede inducir la acumulación de material flotante y por consiguiente incrementar indirectamente el valor de  $n$ .

### **3.18.5 Sedimentación y socavación**

La sedimentación puede cambiar un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto que la socavación puede hacer lo contrario e incrementar el  $n$ . Sin embargo, el efecto dominante de la sedimentación dependerá de la naturaleza del material depositado. La cantidad y uniformidad de la socavación dependerán del material que conforma el perímetro mojado, Así, un lecho de arena o de gravas se erosionará más uniformemente que un lecho de arcillas. La energía utilizada para erosionar y mover el material en suspensión o por saltación a lo largo del lecho también incrementará el valor de  $n$ . El efecto de la socavación no es importante siempre y cuando la erosión del lecho del canal, causada por velocidades altas progresa igual y uniformemente.

### **3.18.6 Obstrucción**

La presencia de obstrucciones de troncos, de pilas de puente y estructuras similares tiende a incrementar el “ $n$ ”. La magnitud de este aumento depende de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.

### **3.18.7 Tamaño y forma del canal**

No existe evidencia definitiva acerca del tamaño y la forma del canal como factores importantes que afecten el valor de  $n$ .

### **3.18.8 Nivel y caudal**

En la mayoría de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento en el nivel y en el caudal. Cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados. Sin embargo, el valor de  $n$  puede ser grande en niveles altos si las bancas están cubiertas por pastos o son rugosas. Cuando el caudal es muy alto, la corriente puede rebosar sus bancas y una parte del flujo se localizará en la planicie de inundación y allí el  $n$  por lo general es mayor que el del canal en sí y su magnitud depende de la condición superficial o de la vegetación.

### **3.18.9 Cambio estacional**

Debido al crecimiento estacional de plantas acuáticas, hierbas, malezas, sauces y árboles en el canal o en las bancas, el valor de  $n$  puede aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva. Este cambio estacional puede producir cambios en otros factores.

### **3.18.10 Material en suspensión y carga de lecho**

El material en suspensión y la carga de lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning, Cowan desarrolló un procedimiento para estimar el valor de  $n$  el cual puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$n = (n_m + n_i + n_v + n_o + n_{ve}) * m_m$$

Donde:

$n_m$ : Valor básico de  $n$  para canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados.

$n_i$ : Valor que debe agregarse a  $n_m$  para corregir el efecto de las rugosidades superficiales.

$n_v$ : Valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal

$n_o$ : Valor para considerar las obstrucciones.

$n_{ve}$ : Valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo.

$m_m$ : Factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

Los valores apropiados de  $n_m$ ,  $n_i$ ,  $n_v$ ,  $n_o$ ,  $n_{ve}$  y  $m_m$  pueden seleccionarse de la Tabla 8.

Al establecer el valor de  $n_i$ , se considera que el grado de irregularidad es liso para superficies comparables con el mejor obtenible en los materiales involucrados; menor para canales artificiales bien dragados, con taludes laterales ligeramente erosionados o socavados en canales artificiales o canales de drenaje; moderado para canales mediana a pobremente dragados, taludes laterales moderadamente derrumbados o erosionados de canales artificiales o canales de drenaje; y severos para bancas muy derrumbadas de cauces naturales o con taludes laterales muy erosionados o muy derrumbados en canales artificiales o canales de drenaje, y canales artificiales excavados en roca con superficies deformes, con entrantes y salientes e irregulares.

Tabla 8.  
*Coefficientes para la Ecuación de Cowan*

<b>Condiciones del canal</b>			<b>Valores</b>
nm1	Para canales en	Tierra roca	0.020
nm2	Para canales en	cortada	0.025
nm3	Para canales en	grava fina	0.024
nm4	Para canales en	grava gruesa	0.028
nm5	Para canales en	tierras arenosas	0.023
ni1	irregularidades de seccion	liso	0.000
ni2	irregularidades de seccion	menor	0.005
ni3	irregularidades de seccion	moderada	0.010
ni4	irregularidades de seccion	severa	0.015
<b>Condiciones del canal</b>			<b>Valores</b>
nv1	Variaciones entre secciones	gradual	0.000
nv2	Variaciones entre secciones	alternante ocasional	0.005
nv3	Variaciones entre secciones	frecuentemente alterna	0.010
nv4	Variaciones entre secciones	muy frecuentemente alterna	0.015
no1	Obstrucciones	despreciable	0.000
no2	Obstrucciones	menor	0.012
no3	Obstrucciones	apreciable	0.025
no4	Obstrucciones	severa	0.055
nve1	Vegetación	nula	0.000
nve2	Vegetacion	baja	0.007
nve3	Vegetacion	media	0.017
nve4	Vegetacion	alta	0.037
nve5	Vegetacion	muy alta	0.075
mm1	cantidad de meandros		1.000
mm2	cantidad de meandros		1.150
mm3	cantidad de meandros		1.300

Nota : parámetros para determinar el coeficiente de Manning por el método de Cowan.

Al establecer el valor de  $n_v$ , se considera que el carácter de las variaciones en tamaño y forma de la sección transversal es gradual cuando el cambio en el tamaño o en la forma ocurre de manera gradual, alternante ocasional cuando las secciones grandes y pequeñas se alternan ocasionalmente

o cuando los cambios en la forma causan el cambio de la corriente principal de un lado a otro, y frecuentemente alterna cuando las secciones grandes y pequeñas se alternan con frecuencia o cuando los cambios en la forma causan frecuentes cambios de la corriente principal de un lado a otro.

Al establecer el valor de  $n_o$  se consideran la presencia y las características de obstrucciones como depósitos de basura, palos, raíces expuestas, cantos rodados y troncos caídos y atascados. Para juzgar el efecto relativo de las obstrucciones se debe considerar hasta qué punto las obstrucciones ocupan o reducen el promedio del área mojada, la naturaleza de las obstrucciones y la posición y el espaciamiento, transversal y longitudinal, de las obstrucciones en los tramos bajo consideración.

Al establecer el valor de  $n_{ve}$  se considera el grado del efecto de la vegetación:

- **Bajo:** Crecimientos densos de pastos o malezas flexibles donde la profundidad promedio de flujo es de dos a tres veces la altura de la vegetación. Varas flexibles de planta jóvenes donde la profundidad promedio de flujo es de tres a cuatro veces la altura de la vegetación.
- **Medio:** Césped cuando la profundidad promedio de flujo es una a dos veces la altura de la vegetación. Pastos con tallo, maleza o plantas jóvenes con cubierta moderada cuando la profundidad promedio de flujo es de dos a tres veces la altura de la vegetación. Crecimientos de matorrales, moderadamente densos, a lo largo de los taludes laterales de un canal sin vegetación importante a lo largo del fondo del canal, cuando el radio hidráulico es mayor que 2 pies.
- **Alto:** Prados de césped cuando la profundidad promedio es más o menos igual a la altura de la vegetación. Plantas jóvenes con crecimiento intermedio de malezas y

matorrales, sin vegetación en el follaje, cuando el radio hidráulico es mayor que 2 pies. Matorrales con intercalaciones de algunas malezas con follaje completo a lo largo de los taludes laterales sin vegetación importante a lo largo del fondo del canal, cuando el radio hidráulico es mayor que 2 pies.

- **Muy alto:** Pastos cuando la profundidad promedio del flujo es menor que la mitad de la altura de la vegetación. Matorrales con crecimientos intercalados de malezas con follaje completo a lo largo de los taludes laterales o crecimientos densos de plantas de hojas anchas en el fondo del canal, con cualquier valor de radio hidráulico hasta 10 o 15 pies. Árboles en la estación de crecimiento con intercalaciones de malezas y matorrales, todos con follaje completo, con cualquier valor de radio hidráulico hasta 10 o 15 pies.

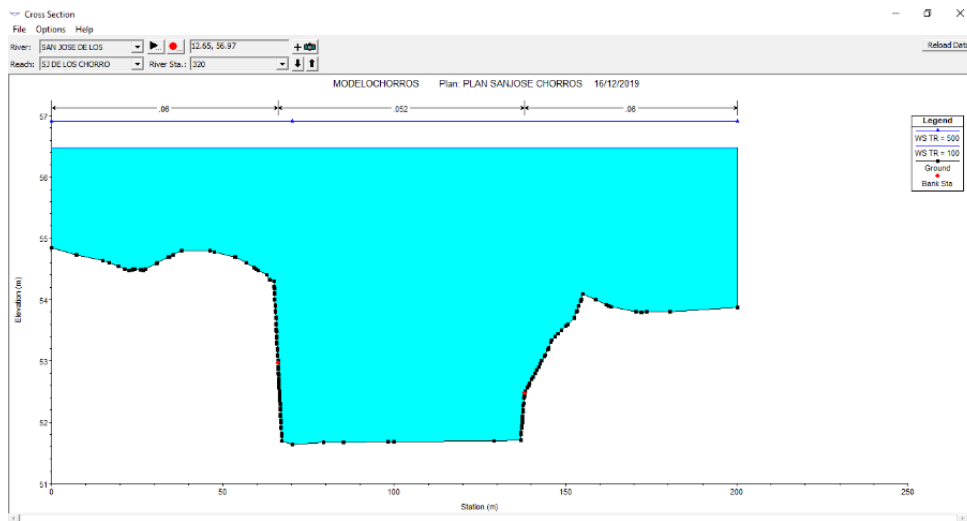
Al establecer el valor de  $m_m$  el grado de los efectos por meandros depende de la relación entre la longitud con meandros y la longitud recta del tramo del canal. Los meandros se consideran menores para relaciones de 1 a 1.2, apreciables para relaciones de 1.2 a 1.5, y severos para relaciones de 1.5 y mayores.

Utilizando el método de Cowan se determinó el coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de Manning para el Río Lebrija, en el sector de papayal correspondiente a  $n = 0.071$  y  $0.083$  para el cauce principal y márgenes del río. Y en el sector de Papayal un coeficiente  $n = 0.062$  y  $n = 0.050$  para el cauce principal y márgenes respectivamente.

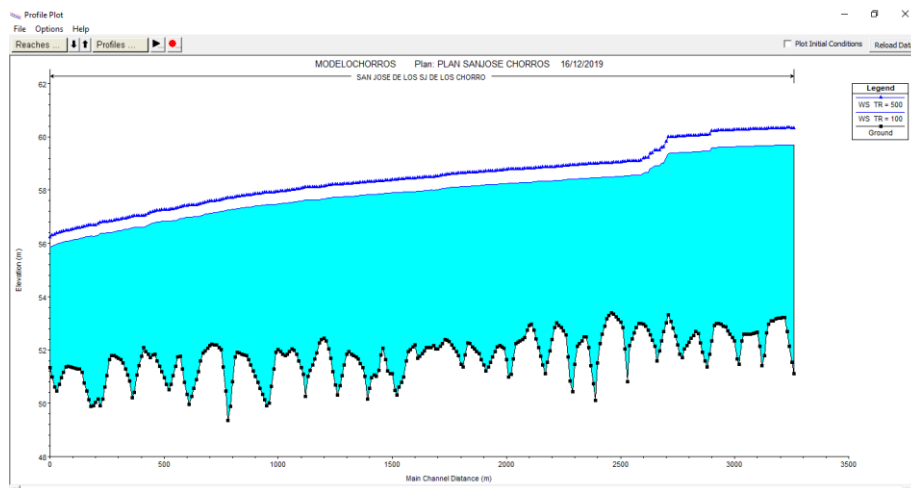
### 3.19 Resultados del Modelo de simulación Hidráulico

Una vez alimentado el software con los datos de entrada debidamente calibrados y descritos anteriormente, se ejecuta el modelo y se observa que el río Lebrija tanto el sector de San José de los chorros como en papayal existe una amenaza latente por inundación para los caudales de diseño, correspondientes a periodos de retorno de 100 y 500 años, establecidos por las Normas

Geotécnicas CDMB vigentes. A continuación, se presentan algunas secciones transversales, perfil longitudinal y vista general con la altura de la lámina de agua calculada por el programa para cada sector y se genera planos de inundación para cada sector. Los modelos pueden ser consultados en el CD-ROM en los apéndices D y E.



**Figura 28.** Seccion Transversal San José de los Chorros



**Figura 29.** Resultados Modelo Hidráulico San José de los Chorros, Perfil De Flujo.

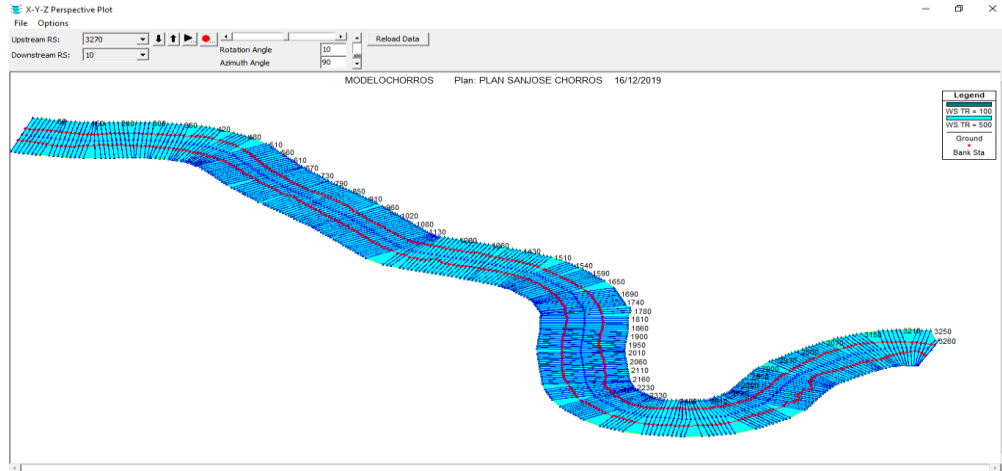


Figura 30. Resultados Modelo Hidráulico San José de los Chorros - Vista 3D

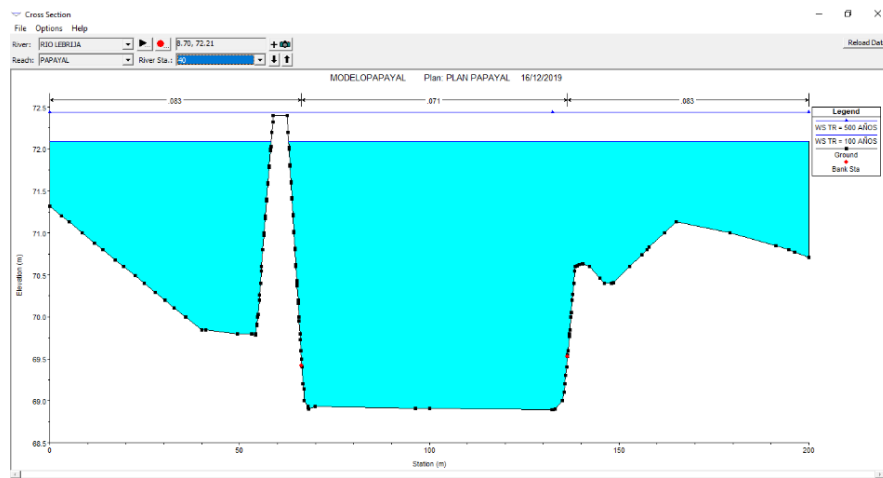


Figura 31. Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Sección Transversal Abscisa K0+040

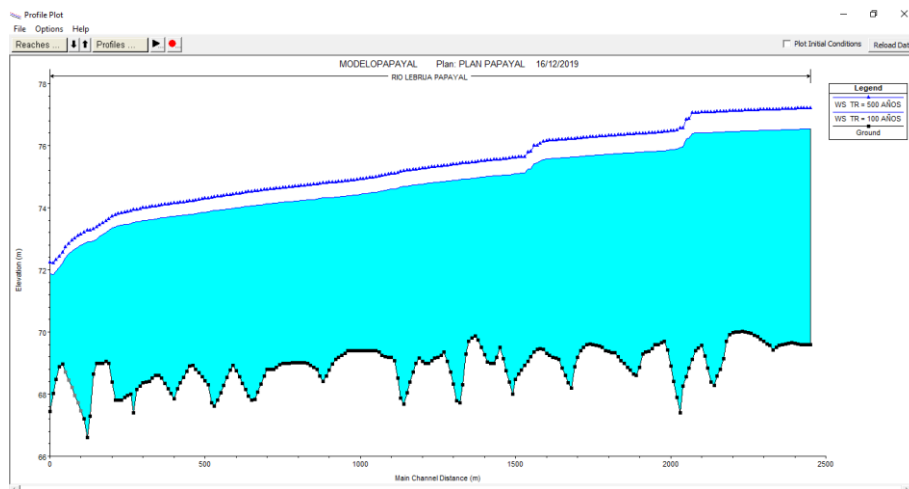


Figura 32. Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Perfil de Flujo

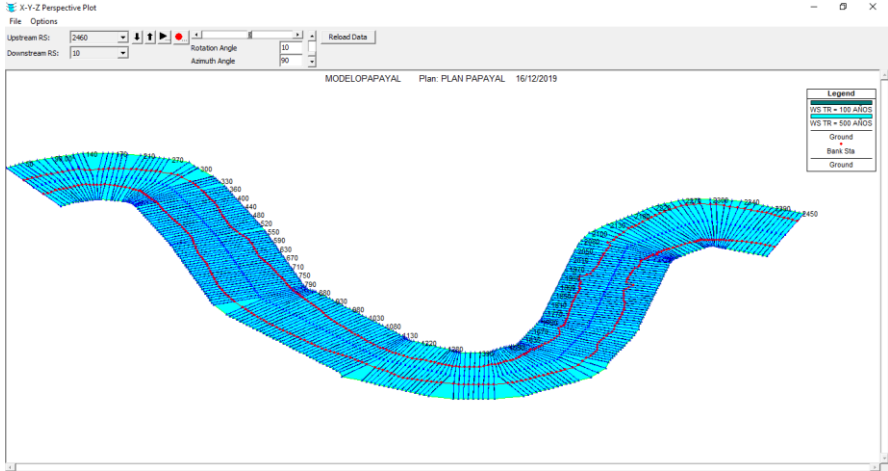


Figura 33. Resultados Modelo Hidráulico Papayal. Vista General.

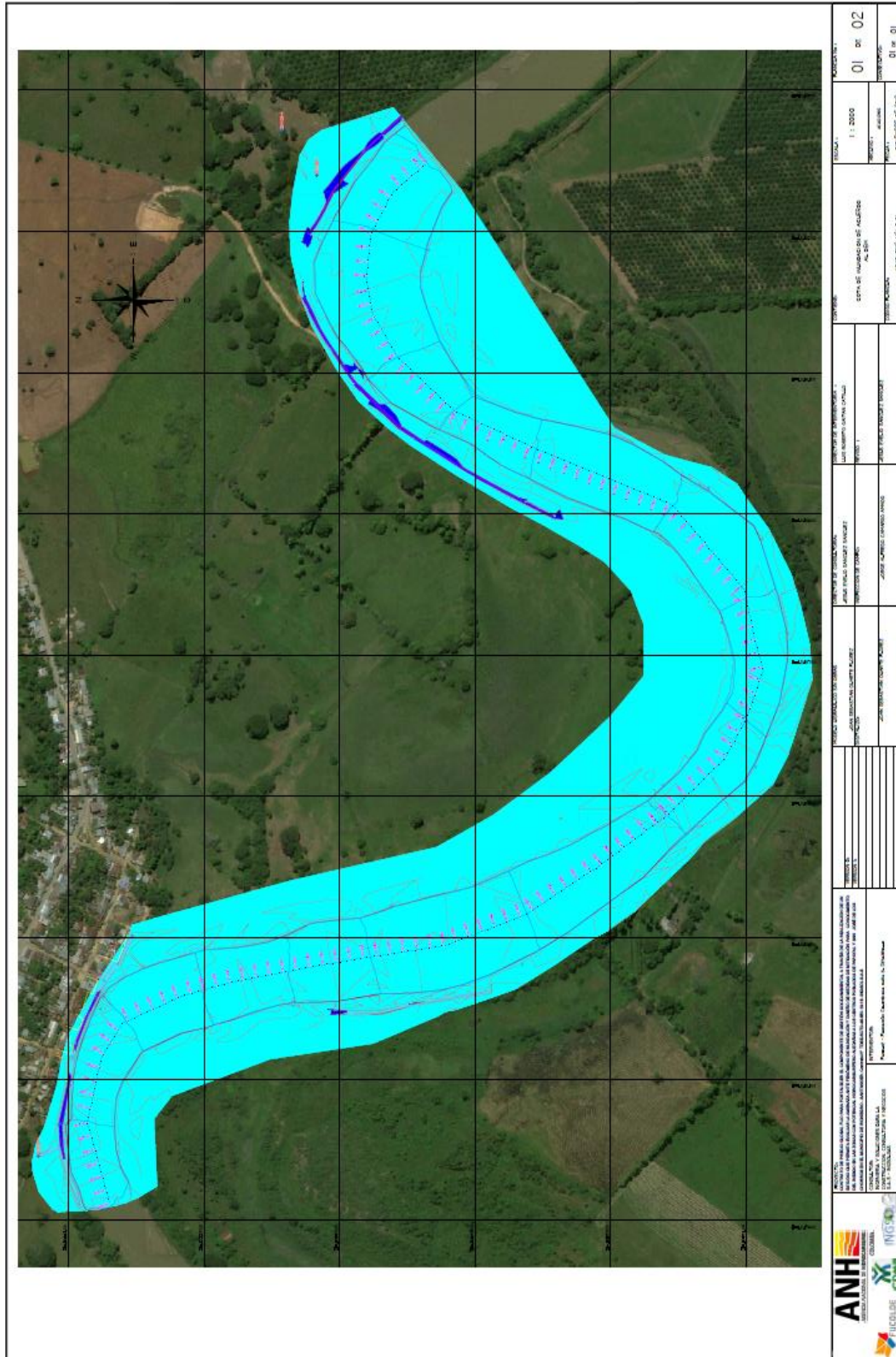


Figura 34. Cota De Inundación De Acuerdo al modelo de elevación, Corregimiento Papayal.

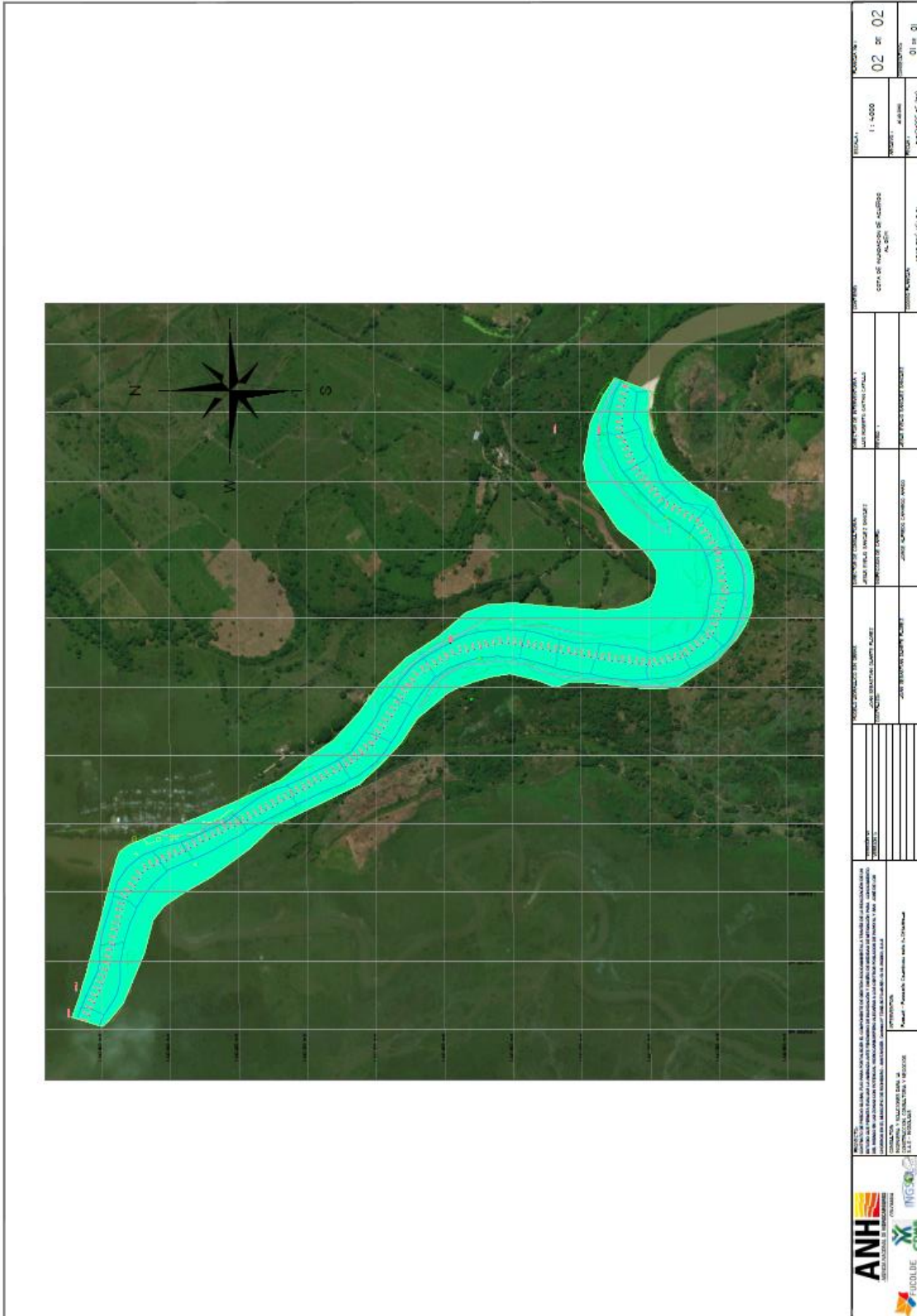


Figura 35. Cota De Inundación De Acuerdo al modelo de elevación digital, Corregimiento San José De Los Chorros.

### 3.20 Obras De Control Del Cauce

#### 3.21 Descripción de las obras tipo Jarillón

Hoy en día existe incertidumbre y preocupación por parte de la comunidad del corregimiento San José de los chorros debido a que en los últimos años la creciente del Río Lebrija ha venido socavando y deteriorando el Jarillón que actualmente rodea el corregimiento, el cual puede fallar e inundar todo el sector. Por otro lado, en papayal en el año 2014 las precipitaciones aumentaron el caudal de los ríos que caen al Lebrija, y éste ocasiono inundaciones en el bajo Rionegro.

Por lo anterior y en base a los resultados de los modelos de simulación hidráulica, se requieren proyectar obras de control de cauce, enfocadas en mitigar la amenaza de inundación del Río Lebrija en el sector de papayal y San José de los chorros.

Para esto se recomiendan barreras paralelas al cauce que alcancen la altura de la lámina de agua estimada para la creciente máxima (Periodo de Retorno  $T = 500$  años), de modo que se garantice como mínimo la contención de la creciente correspondiente a un periodo de retorno  $T = 100$  años.

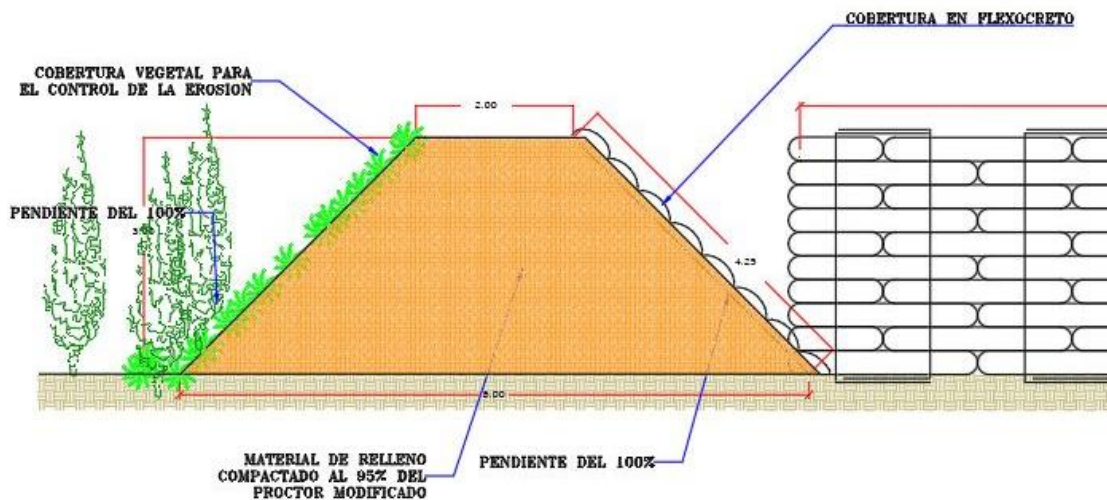
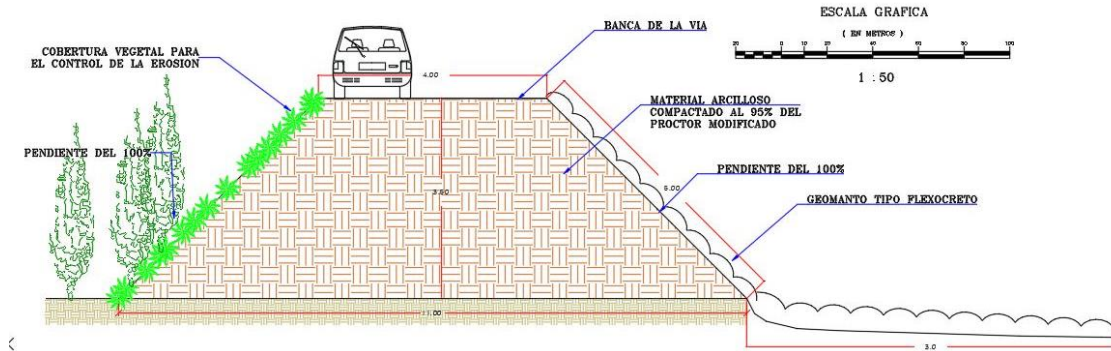


Figura 36. Sección Tipo Jarillón Río Lebrija sector papayal



**Figura 37.** Sección Tipo Terraplén con material arcilloso compactado Río Lebrija sector san José de los chorros

Debido a que en la zona no se cuenta con disponibilidad de rocas para la construcción de gaviones y que por la longitud de las franjas de cauce a intervenir es inviable la construcción de muros en concreto reforzado, se recomienda la conformación de barreras tipo Jarillón (papayal) y terraplén carretable (san José de los chorros) con material de préstamo del corregimiento de papayal ya que en el material de préstamo en el corregimiento de san José de los chorros no posee características de resistencia y compactación necesaria para realizar dicha obra.

Tanto en la San José como en papayal, se recomienda que el Jarillón se conforme con capas de 0.40 m, compactadas al 95% del Proctor modificado.

Adicionalmente, para protección de las caras húmedas en los tramos que el Jarillón está al borde del río Lebrija, se proyecta la instalación de una capa superior en geo-estructura tipo flexocreto, que protegerá lo de los procesos de erosión lateral y socavación de cauce. El flexocreto se extenderá en una longitud adicional de 3 m sobre el cauce.

### 3.22 Descripción de los Espigones en Papayal y San José de los Chorros

Se proyecto complementar las obras de control de cauce del Río Lebrija tanto en papayal como en San José de chorros, mediante la instalación de barreras tipo espigón sobre la cara externa de los meandros en los sectores críticos señalados en los planos de obras de mitigación a la amenaza por inundación (Ver apéndice H), cuyos parámetros técnicos se describen a continuación.

En una corriente o río se presentan dos tipos básicos de erosión: Profundización del cauce y erosión lateral. El equilibrio del cauce está controlado por el balance entre la carga de sedimentos depositada y la capacidad de transporte del flujo. En todos los casos, aún en las corrientes más estables se presentan fenómenos de erosión y se puede requerir la construcción de obras de control tanto lateral como de fondo.

La estabilización de los alineamientos de las riberas de los canales de los ríos debe cumplir una o más de los siguientes objetivos:

- a. Paso seguro y expedito del flujo de las crecientes.
- b. Transporte eficiente de la carga suspendida y la carga de fondo.
- c. Cauce estable del río con mínima erosión lateral.
- d. Profundidad suficiente y buen cauce para navegación.
- e. Dirección del flujo a través de un sector definido del río.

Las principales estructuras utilizadas para la estabilización de las riberas son las siguientes:

- Espigones cortos
- Espigones largos
- Diques longitudinales
- Estructuras retardadoras
- Revestimiento de los taludes de las riberas
- Muros de contención.

Debido a que el Río Cáchira del Espíritu Santo, en el tramo de interés, presenta un ancho de sección variable entre 100 m y 140 m, se recomienda la instalación de espigones largos.

Los espigones son estructuras relativamente sólidas alargadas que se colocan para desviar la corriente de agua o controlar el arrastre de materiales del fondo. Un espigón es una estructura construida a un ángulo con la dirección de flujo, anclada en la orilla del canal y en algunas ocasiones, con una cabeza para el manejo del flujo en la punta.

La turbulencia generada por los espigones puede producir remolinos o vórtices fuertes que generen a su vez socavación, la cual representa un problema de estabilidad para la estructura del espigón.

Los espigones pueden construirse con bloques de roca, bloques de concreto, gaviones, hexápodos, tetrápodos, pilotes de acero, madera, bambú, bolsacreto o combinaciones de varios materiales. Los espigones de enrocado tienen generalmente una sección trapezoidal. Los materiales de gran tamaño se acumulan unos sobre otros, formando una estructura alargada.

El objetivo del espigón es desviar la corriente del río alejándola de zonas críticas para prevenir la erosión de la orilla y establecer un canal más estable. Ellos se utilizan también en ríos anchos trenzados para establecer un canal bien definido que no sufra ni agradación ni degradación y que mantenga su localización de año en año. En este caso los espigones pueden tener diques muy largos en su punta junto al agua para ayudar a definir el canal del río. Los espigones se utilizan, además, en ríos meándricos para controlar el flujo en la entrada o salida de la curva, como es el caso del Río Cáchira del Espíritu Santo.

### **3.23 Partes de un espigón**

Un espigón consta de cuatro elementos así:

### **3.23.1.1 *La punta del espigón***

La cual constituye el punto crítico para su socavación por la concentración de corrientes y la velocidad del agua en este punto. La socavación de la cimentación de la punta depende de la sección del río con o sin espigones, de la inclinación de los taludes y de los caudales del río.

### **3.23.1.2 *La cresta***

Puede ascender hacia la orilla o ser horizontal además puede ser sumergida o levantada con respecto al nivel del agua de diseño. Si la cresta es desbordable debe proveerse de un sistema de protección contra la socavación en el lado aguas abajo.

### **3.23.1.3 *Anclaje***

El anclaje depende de la situación real del sitio ante la posibilidad de que el agua pase por detrás del espigón.

### **3.23.1.4 *Cimiento***

Es el factor que determina la durabilidad del espigón. El cimiento a su vez está constituido por la fundación propiamente dicha y por un tapete o colchón, como protección contra la socavación.

Para evitar la destrucción o barrida de los espigones es recomendable profundizarlos hasta la profundidad de socavación estimada.

Un espigón de alta flexibilidad va adaptándose al terreno a medida que se produce la socavación. La obra cede en la parte erosionada, se flexiona y adopta la nueva forma del terreno. Puede ocurrir, sin embargo, que la flexibilidad del espigón no sea lo suficientemente alta y tienda a romperse por flexión para ser arrastrada por el río, o que la fuerza de la creciente sea tal que arrastre totalmente el espigón.

## **3.24 *Diseño de espigones***

El diseño de un grupo de espigones es una función de los siguientes factores:

### **3.24.1.1 Variables de Flujo**

- Profundidades de aguas mínimas, normales y máximas.
- Cantidad de carga suspendida con relación a la carga de fondo.

### **3.24.1.2 Parámetros del cauce**

- Pendiente y velocidad del río.
- Características del material de fondo (arcilla, limos, arena, grava, cantos, guijarros).
- Tamaño del canal (ancho y sección).

### **3.24.1.3 Materiales disponibles para construcción**

Previamente al diseño debe analizarse las posibilidades de materiales para su construcción.

### **3.24.1.4 Posibilidad de avalanchas y otras amenazas**

Ha ocurrido un número muy alto de fallas de espigones que justifican un replanteo total de los sistemas de análisis, diseño y construcción empleados hasta ahora.

Para evitar la destrucción y/o arrastre de los espigones deben tenerse en cuenta las siguientes características:

- Conocimiento del régimen hidráulico del río.
- Cálculo de socavación del cauce con el espigón.
- Diseño de una cimentación con la profundidad adecuada.
- Diseño hidráulico del espigón.
- Diseño estructural (resistencia y flexibilidad) del espigón.
  
- El espigón no debe causar un cambio brusco en la dirección de la corriente, sino por el contrario producir un cambio suave. Los espigones son efectivos solamente si el espaciamiento entre ellos no es muy grande.

### 3.25 Elementos a diseñar

Los puntos más importantes a tomar en cuenta al diseñar una protección basado en espigones son:

- Localización en planta. Radios de las curvas, longitud de las tangentes, ancho estable del río.
- Longitud de los espigones.
- Elevación de la cresta de los espigones.
- Espaciamiento entre espigones.
- Número de espigones.
- Pendiente de la corona.
- Angulo de orientación respecto a la orilla.
- Taludes laterales de los espigones.
- Permeabilidad del espigón.
- Características y tamaño de los Materiales para la construcción de los espigones.
- Determinación de las condiciones de flujo alrededor de los espigones.
- Predicción de la socavación.
- Localización en planta

Al proyectar una obra de defensa ya sea protegiendo la orilla actual, o bien, en una margen nueva (al hacer una rectificación) se requiere trazar en planta el eje del río y en las orillas dibujar una línea paralela al eje a la cual llegarán los extremos de los espigones. La longitud de cada espigón, estará dada por la distancia de la orilla real a esa línea. La separación entre las nuevas orillas, es decir el ancho B, estará dado por el estudio de estabilidad de la corriente, el cual tomará en cuenta si el tramo será navegable, el cambio de pendiente si se rectifica el río, etc.

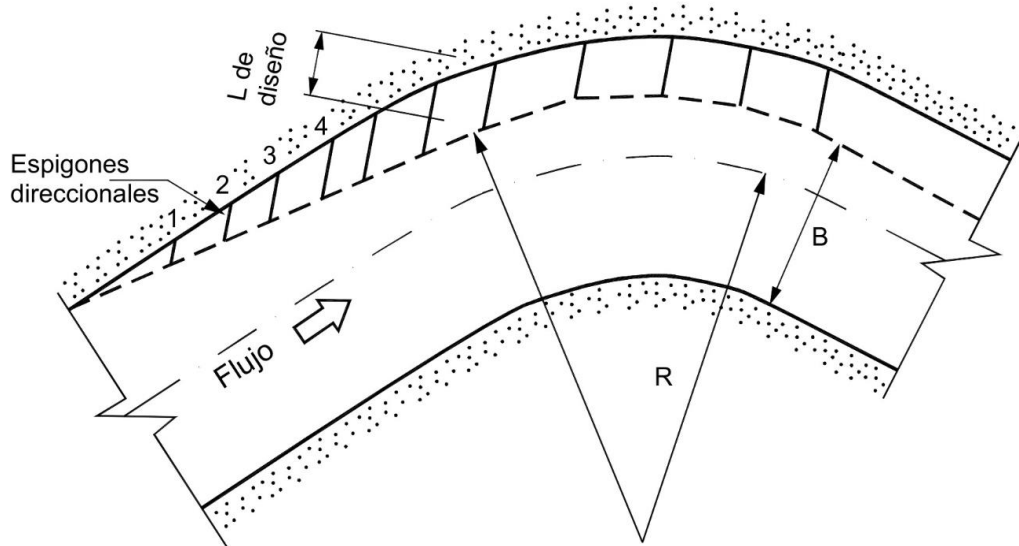
Cuando se trata de una rectificación en cauces formados por arenas y limos, conviene dentro de lo posible, que los radios de las curvas nuevas, medidos hasta el eje del río tengan la longitud  $R$  siguiente:

$$2.5 B < R < 8B$$

Donde:

$R$  = Radio de Curva.

$B$  = Ancho del río.



**Figura 38.** Colocación de espigones cortos antes del primer espigón de diseño Fuente: (Pinilla, 1998)

Al respetar los radios anteriores, la defensa que se haga sobre la base de espigones, trabajará eficientemente. Si los radios de curvatura son menores, la separación de los espigones disminuye y económicamente es preferible construir una defensa marginal apoyada en la orilla. Si los radios son mayores, el río tiende a formar un cauce con menores radios dentro de la curva y no todos los espigones trabajan eficientemente.

Cuando solo se desea proteger las orillas actuales de un río, y no se desea hacer trabajos de rectificación, la línea que une los extremos de los espigones deberá trazarse lo más uniformemente posible, aunque no necesariamente tendrá un radio único.

Los proyectos de este tipo son los más comunes en la primera etapa de desarrollo de una región ya que se trata de fijar las orillas al menor costo posible. La selección de la línea que une los extremos de los espigones incluye en la longitud de los mismos y ésta, junto con la orientación que se les dé, determina la separación, entre ellos.

Al protegerse, ya sea una sola curva, o un tramo completo, los primeros tres espigones de agua arriba deben tener longitud variable. El primero deberá ser de la menor longitud posible (igual al tirante), y los otros aumentar uniformemente, de tal manera que el cuarto tenga ya la longitud de proyecto. La pendiente longitudinal de la corona debe ser uniforme en todos ellos y por lo tanto la misma de los demás espigones.

Por último, conviene aclarar que, aunque la línea teórica que une los extremos de los espigones pueda tener diversos radios de curvatura, nunca deberá tener un tramo en que su radio de curvatura se mida hacia la orilla exterior. Todos los radios de esa línea se deberán medir hacia el mismo lado; es decir, hacia el interior de la curva.

### **3.26 Separación entre espigones**

La separación entre espigones se mide en la orilla entre los puntos de arranque de cada uno y depende primordialmente de la longitud del espigón de aguas arriba de su orientación y de la localización de la orilla.

Para calcularla se toma en cuenta la inclinación del espigón respectivo a la orilla de aguas abajo y la ampliación teórica de la corriente al pasar por el extremo del espigón. El ángulo de esa desviación es de  $9^\circ$  a  $14^\circ$ .

La longitud de anclaje debe ser mayor cuando las orillas son de poca altura, con el objeto de evitar que la corriente pueda desviarse por detrás de los espigones.

Generalmente, se construye primero el espigón localizado más aguas arriba y luego los espigones subsiguientes hacia aguas abajo. Esto se hace con el objetivo de poder construir los espigones en aguas bajas y calmadas.

Los espigones se construyen en grupos mínimo de cuatro espigones seguidos. Una de las decisiones más importante del diseño es la separación entre espigones individuales. Los espigones deben colocarse a una distancia tal que la acción conjunta de ellos pueda separar el eje de flujo de la orilla, se debiliten las corrientes entre espigones y se promueva entonces, sedimentación en los espacios entre ellos. Si los espigones están demasiado separados, las corrientes pueden atacar la orilla que se pretende proteger entre dos espigones, generándose erosión o produciéndose meanderización de la corriente. La construcción de espigones muy cerca unos de los otros, produce un sistema menos eficiente y más costoso.

Generalmente la distancia entre espigones está relacionada con el ancho del río la longitud del espigón, la velocidad del flujo, el ángulo  $\alpha$  y la curvatura de la orilla.

Las recomendaciones de Maza Álvarez (1989) son las siguientes:

- **Separación en tramos rectos:** Cuando se requieran construir espigones en tramos rectos y sin empotramiento en la margen, la separación deberá ser la que se indica en la tabla 9.

- **Separación en curvas:** Para la localización de espigones en curva, Maza (1989) recomienda suponer un ángulo  $\beta$  de  $9^\circ$  a  $14^\circ$  de desviación de la corriente para la colocación del siguiente espigón.

Si la curva es regular y tiene un único radio de curvatura, la separación que se ha probado con buenos resultados es  $S_p = (2.5 \text{ a } 4) \cdot L_t$ ; para radios de curvatura mayores de cuatro B se han usado separaciones de  $4 \cdot L_t$ . Si la curva es irregular o con un radio de curvatura pequeña la separación de espigones necesariamente debe encontrarse en forma gráfica.

Tabla 9.  
Separación entre espigones en tramos rectos

Angulo de orientación	Separación $S_p$
90 a 70 grados	(5.1 a 6.3) $L_t$ , (5.2 a 6.4) $L_{to}$
60 grados	(5 a 6) $L_t$ , (5.7 a 6.9) $L_{to}$

Fuente: Maza (1989)

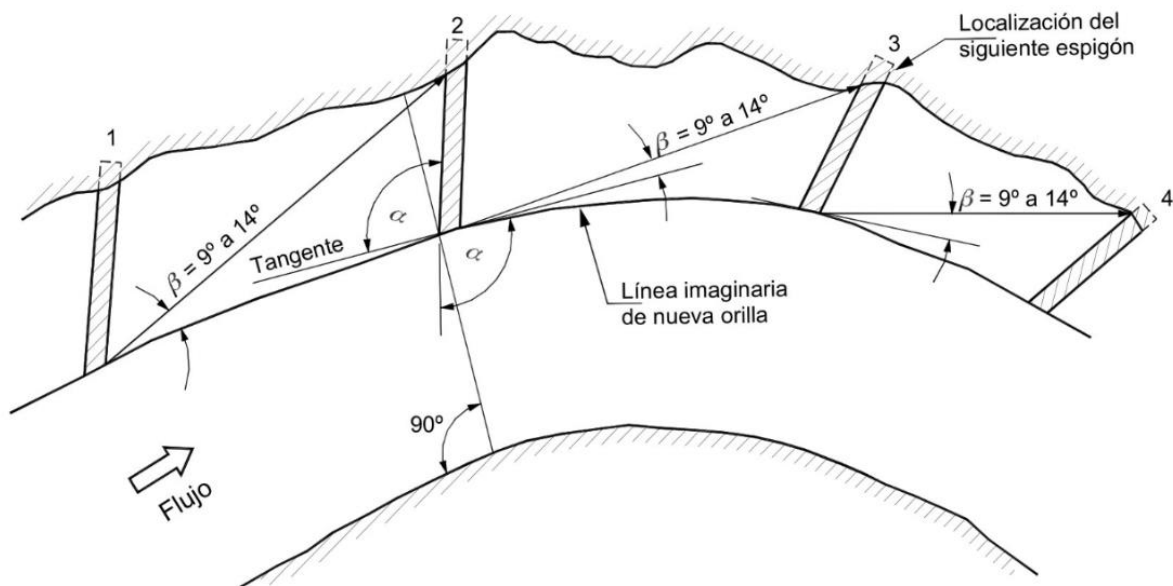


Figura 39. Parámetros para determinar el espaciamiento entre espigones en tramos curvos Fuente: Maza (1989)

### **3.27 Orientación de los espigones**

La orientación de los espigones se mide por el ángulo que forma hacia aguas abajo, el eje longitudinal del mismo con la tangente a la orilla en el punto de arranque.

Se debe analizar tres tipos de espigones así:

### **3.28 Espigones inclinados hacia aguas arriba (ángulo $\alpha > 90^\circ$ ).**

A estos espigones se les llama espigones deflectores porque según algunos autores repelen el flujo hacia el centro del cauce. La mayoría de las referencias en la literatura recomiendan para este tipo de espigones, inclinaciones entre  $100^\circ$  y  $120^\circ$  (Beckstead, 1975). Derrick (1998) recomienda limitar el ángulo de inclinación a  $110^\circ$ .

### **3.29 Espigones inclinados hacia aguas abajo (ángulo $\alpha < 90^\circ$ )**

Algunos autores recomiendan ángulos de inclinación de  $70^\circ$ , porque según ellos se disminuye la socavación en la cabeza del espigón.

Según Maza en un tramo recto, en una curva regular, conviene que los espigones formen un ángulo de  $70^\circ$  con la dirección de la corriente. Si la curva es irregular y aún más si tiene un radio de curvatura menor de  $2.5*B$ , los ángulos de orientación serán menores de  $70^\circ$  y pueden alcanzar valores hasta de unos  $30^\circ$ .

### **3.30 Espigones ortogonales al flujo (ángulo $\alpha = 90^\circ$ )**

Un espigón a  $90$  grados protege en forma similar los lados aguas abajo y arriba del espigón. Estos espigones son más cortos, pero poseen menores ventajas de sedimentación que los inclinados hacia aguas arriba, sin embargo, son utilizados con frecuencia en los casos en los cuales se requiere controlar un canal navegable.

### **3.31 Altura de los espigones**

Los espigones pueden ser sumergidos o no sumergidos. Aunque los espigones sumergidos presentan una mayor socavación aguas abajo del espigón, la socavación en la punta es menor y se adaptan mejor a las condiciones de inundaciones. Sin embargo, algunos autores recomiendan que los espigones permeables o sólidos trabajen en condiciones no sumergidas para disminuir la socavación lateral la cual puede destruir los espigones (Felices, 2007). Los espigones permeables funcionan mejor sumergidos porque crean alteraciones menores al flujo.

Algunos investigadores recomiendan que no se permita que el flujo pase por encima del espigón para evitar socavación lateral del mismo.

Para propósitos de navegación en Holanda la altura de los espigones se construye entre 0.3 y 1.3 metros por encima del valor medio de agua anual.

Maza (1989) recomienda pendientes longitudinales de la cresta entre 10% y 25%, sin embargo, otros autores difieren de su apreciación y prefieren espigones con muy poca pendiente en la cresta.

La utilización de espigones de baja altura disminuye la sedimentación, pero forman unas áreas de aguas bajas entre espigones que facilitan la vida acuática.

### **3.32 Longitud de los espigones**

La longitud total de un espigón se divide en longitud de anclaje o empotramiento y longitud del trabajo. La primera es la que está dentro de la margen y la segunda la que está dentro de la corriente.

La longitud de los espigones se determina con base a buen juicio de ingeniería, basándose principalmente en el estudio de la morfología de la corriente, características del thalweg y comportamiento de la corriente (Felices, 2007).

Cuando la curva es uniforme (rectificación) todos los espigones tienen la misma longitud, ángulo de orientación y por lo tanto la separación entre ellos es la misma

La longitud de trabajo, medida sobre la corona, se selecciona independientemente y se ha comprobado que conviene que esté dentro de los límites siguientes:

$$h < L < B/4$$

Donde:

B = ancho medio del cauce, y

h = tirante medio; ambos para el gasto dominante.

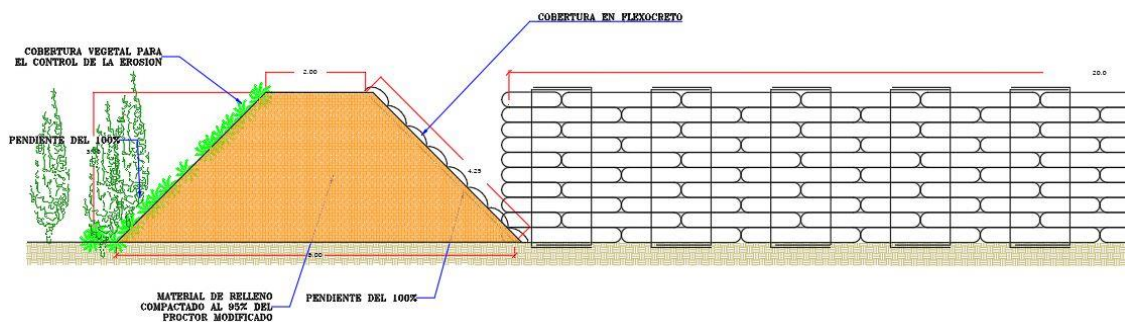
L = longitud efectiva del espigón.

Los espigones se pueden construir en ocasiones sin tener longitud de anclaje; es decir, sin que penetren dentro de la margen, apoyados únicamente a la orilla.

La máxima longitud de empotramiento es igual a  $L/4$ .

### 3.33 Espigones proyectados para Papayal y San José de los Chorros

Con base en los parámetros técnicos planteados, tomados de la experiencia de diversos diseñadores a lo largo de los años, así como la experiencia propia de la CDMB en la construcción de espigones en Papayal y San José de los Chorros en años anteriores, se optó por proyectar espigones con las siguientes características:



**Figura 40.** Sección tipo espigones Río Lebrija- San José de los chorros.

**3.33.1 Materiales a utilizar.** Se proyectan espigones con cuerpo en bolsas tipo INVIAS, de 2.40 m (largo) X 1.20 m (ancho) X 0.40 m (alto), rellenas en suelo – cemento. Se recomienda un porcentaje de cemento del 30%, de modo que la mezcla obtenga una buena resistencia a la abrasión, ya que se espera que los sacos se degraden con el paso de los meses, ante las condiciones climáticas de la región, tal como ha ocurrido en obras similares instaladas en la región por parte de la CDMB.

**3.33.2 Longitud de los espigones.** Con base en los parámetros técnicos descritos anteriormente, así como en la experiencia de obras similares adelantadas en la región y específicamente en papayal, se proyecta una longitud de diseño de 20.4 m, empotrados 3 m al interior del Jarillón; es decir, con 17 m de longitud efectiva en el cauce.

Debe tenerse en cuenta que los primeros 4 espigones, es decir, los localizados más aguas arriba, tendrán longitudes menores, de acuerdo a la geometría del cauce con base en la metodología gráfica descrita, de modo que no se generen turbulencias indeseadas que disminuyan la sedimentación en este tramo.

**3.33.3 Ángulo de los espigones.** Para el cauce del Rio Lebrija en ambos sectores, la CDMB reporta que espigones anteriores instalados a 45° hacia aguas abajo, lograron propiciar la sedimentación, conformando una playa o lecho de protección en este sector.

**3.33.1 Altura de los espigones.** Sé proyectan espigones con 3 m de altura libre en papayal y 4m en San José de los chorros.

**3.33.2 Ancho de espigones.** Se establece como ancho 2.4 m, en concordancia con la mayor longitud de los sacos tipo INVIAS, cuya sección ha funcionado correctamente en obras de este tipo instaladas anteriormente en el Río Lebrija y el Río Cáchira.

## 4 Conclusiones

En la elaboración de modelos geológicos geotécnicos e hidráulicos para los estudios de amenaza por fenómenos de remoción en masa e inundación se afianzaron los conocimientos previstos en la línea de suelos e hidráulica así mismo se comprendieron las metodologías que deben ser implementadas, el análisis de información primaria e insumos que se deben contar para generar respuesta a estos estudios.

En la realización de los modelos geológicos geotécnicos es importante elaborar un plan de caracterización del suelo para obtener resultados adecuados del Factor de seguridad (FS)

Es importante realizar un análisis estadístico de todos los datos encontrados en campo y seleccionar valores para el modelo geológico geotécnico que representen mejor el comportamiento mecánico de los suelos.

El modelo Hec-Ras posee todas las capacidades necesarias para realizar una simulación del comportamiento dinámico de un cauce bajo condiciones previstas, necesarias para realizar estudios de amenaza por inundación. Los datos para dichos modelos presentan la disposición de editar, modificar y visualizarse en pantalla, y además el programa cuenta con la capacidad para interactuar con modelos digitales de terreno (DEM) aumentando la eficacia del análisis relativo a parámetros topográficos es decir ingresando con mayor precisión la geometría del cauce.

### Referencias Bibliográficas

CDMB. (2015). plan de ordenamiento y manejo de cuencas lebrija bajo. santander.

Chow, V. T. (2010). Hidraulica de canales abiertos. Bogota: McGraw.

Felices, A. R. (2007). Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones.

Arequipa, Peru.

Pinilla, A. R. (1998). Diseño de alternativas de proteccion de orillas de la margen del rio lebrija Sector SAn rafael de los chorros (Tesis - Especialista en ingenieria de Recurso Hidrico y de suelos). Bucaramanga, Republica de Colombia.

Servicio Geologico Colombiano (SGC). (2015). Guia metodologica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogota.DC, Colombia.