

**EVALUACIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN CAUCES DE
CORRIENTES DE AGUAS SUPERFICIALES, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL
MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y ESTABILIDAD DE LAS BANCAS.**

JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2014

**EVALUACIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN CAUCES DE
CORRIENTES DE AGUAS SUPERFICIALES, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL
MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y ESTABILIDAD DE LAS BANCAS.**

JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ

**Trabajo de Aplicación presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Geotecnia**

Trabajo de Aplicación

Director

Wilfredo del Toro Rodríguez (I. C, M. Sc.)

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2014

Este nuevo esfuerzo, en búsqueda de un mayor conocimiento y crecimiento personal, no hubiera sido posible sin el apoyo de Katherine, Jorge Andrés, Alejandro y Cristina, a quienes agradeceré por siempre su infinita paciencia y su comprensión, especialmente en los momentos difíciles. Otra vez, recorrí muchos kilómetros para llegar a este punto de inicio, desde donde espero llegar a buen puerto.

CONTENIDO

	pág.
Introducción	25
1. Objetivos	27
1.1. General.	27
1.2. Objetivos específicos	27
1.3. Alcance	27
2. Fundamento teórico	29
2.1. Estabilidad de márgenes y el modelo de erosión del pie y estabilidad de las bancas (<i>bank stability and toe erosion model</i>)	31
2.2. Generalidades sobre los métodos de análisis de estabilidad de márgenes de corrientes hídricas	36
2.2.1. Estratos horizontales	36
2.2.2. Láminas verticales o dovelas	37
2.2.3. Fallas por corte en voladizo	41
2.2.4. Modelo de erosión en el pie de la margen	41

2.2.5.	Los efectos mecánicos de la vegetación en la estabilidad de las bancas	43
3.	El modelo de erosión del pie y de estabilidad de las bancas (bank stability and toe erosion model, BSTEM)	46
3.1.	Organización del BSTEM	47
3.1.1.	Módulo introduction (introducción).	49
3.1.2.	Módulo tech background (respaldo técnico)	49
3.1.3.	Módulo input geometry (entrar la geometría de la banca).	51
3.1.4.	Módulo bank material (material – tipo de suelo – que conforma la banca)	52
3.1.5.	Módulo bank vegetation and protection (vegetación y protección de la banca).	55
3.1.6.	Módulo bank model output (salida del modelo de la banca).	56
3.1.7.	Módulo toe model output (salida del modelo del pie de la banca).	57
4.	Caracterización del área de estudio	59
4.1.	Topografía	60
4.2.	Geología	63
4.2.1.	Zona del nacimiento – curso alto del río Cesar	64
4.2.2.	Zona media- curso alto – medio del río cesar. Terrazas	64

4.2.3.	Zona media – curso medio – alto. Abanicos aluviales	65
4.2.4.	Zona media a baja–curso medio a bajo del río cesar. Llanura aluvial	65
4.3.	Climatología e hidrología	66
4.4.	Hidráulica.	69
4.5.	Caracterización geotécnica de los suelos	83
4.5.1.	Aplicación de correlaciones para estimación de valores de resistencia	87
4.5.2.	Muestreo de suelos en campo y caracterización en laboratorio para medición de valores de resistencia	92
5.	Aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de la banca en corrientes superficiales (bank stability and toe erosion model).	94
5.1.	Usando valores de propiedades geotecnicas dados por correlaciones	94
5.2.	Usando valores de propiedades geotecnicas dados por mustreo de campo y análisis de laboratorio	97
5.3.	Uso de BSTEM	98
5.4.	Resultados obtenidos	122
5.4.1.	Período de retorno de 2 años.	122
5.4.2.	Período de retorno de 50 años.	130

5.5.	Falla por exfiltración desde la banca	137
5.6.	Tipos de obras de protección recomendadas.	137
5.6.1	Para la banca (parte superior de la margen).	137
5.6.2.	Para el pie de la banca (pie del talud).	139
6.	Análisis de la evolución temporal de la morfología del cauce del río cesar	140
6.1.	Búsqueda y descarga de imágenes satelitales.	140
6.2.	Construcción de la imagen multiespectral	142
6.3.	Carga de archivos en ArcGIS	146
6.4.	Análisis del cambio de alineamiento del cauce principal	149
7.	Conclusiones	165
	Bibliografía	170
	Anexos	173

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Caudales medios mensuales del río Cesar medidos en la estación Puente Salguero.	71
Tabla 2 Caudales medios mensuales, estación Salguero de IDEAM, río Cesar	72
Tabla 3. Caudales medios mensuales, estación Salguero de IDEAM, río Cesar, descontando el caudal de vertimiento del STAR "El Salguero	72
Tabla 4. Factores de corrección del coeficiente de Manning	78
Tabla 5. Coordenadas (datum WGS84) y Cotas de los puntos que definen la sección transversal o estación 14.	100
Tabla 6. Cobertura del suelo de las márgenes del río Cesar, sector Las Garzas	110
Tabla 7. Fs para estabilidad de la margen derecha en la estación 14. Tr = 2 años	129
Tabla 8. Fs para estabilidad, margen derecha en la estación 14. Tr 50 años.	132
Tabla 9. Fs para estabilidad, margen izquierda en la estación 14. Tr 50 años	132
Tabla 10. Erosión (área transversal erosionada) en la estación 14.	135

Tabla 11. Carga potencial de sedimentos aportada por las márgenes en la estación 14 (longitud aferente de 100 metros)	136
Tabla 12. Efecto de la vegetación ribereña sobre la estabilidad de la banca	136
Tabla 13. Imágenes LandSat utilizadas para el análisis	145

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 .Estrangulamiento de un meandro y Desplazamiento de meandros formación de una madre vieja (oxbow lake)	29
Figura 2. Algunos tipos de falla observados en orillas de ríos	31
Figura 3. Río La Mula, municipio de Chiriguaná, departamento del Cesar	32
Figura 4. Río Magdalena, municipio de Gamarra, departamento del Cesar	33
Figura 5. Río Animito, municipio de Curumaní, departamento del Cesar	33
Figura 6. Subdivisión de un bloque de falla en dovelas, o láminas verticales.	38
Figura 7. Segmentación de áreas de flujo local y el radio hidráulico	42
Figura 8. Interfase del sitio en internet de ARS	48
Figura 9. Interfase del BSTEM	48
Figura 10. Introducción al modelo BSTEM	49
Figura 11. Base técnica del modelo BSTEM	50
Figura 12. Módulo de definición de la geometría de la banca	52

Figura 13. Módulo de asignación de clase de material o suelo de la	54
Figura 14. Opciones para seleccionar materiales parametrizados	54
Figura 15. Interfase del submodelo RipRoot	55
Figura 16. Módulo para la selección del tipo de protección de la orilla (vegetación y obras)	56
Figura 17. Módulo de salida principal de BSTEM	57
Figura 18. Salida del Modelo del pie de la banca	58
Figura 19. Río Cesar, en el área de estudio	59
Figura 20. Río Cesar, en el área de estudio	60
Figura 21. Zona de estudio en el Río Cesar.	61
Figura 22. Río Cesar, sector Las Garzas. Tramo objeto en que se ubica la zona de estudio.	62
Figura 23. Desprendimiento de material de la banca del río Cesar (margen derecha)	63
Figura 24. Geología del nacimiento del río Cesar – Sur de la Guajira	64
Figura 25. Formaciones geológicas de la zona alta media de la cuenca del río Cesar.	66

Figura 26. Distribución espacial de la Precipitación media mensual.	67
Figura 27. Disposición de las estaciones (secciones transversales) del sector de estudio	74
Figura 28. Puente vehicular, al inicio del tramo de estudio en el presente documento	75
Figura 29. Aspecto del estribo izquierdo del puente ubicado en el sector Las Garzas, sobre el río Cesar	75
Figura 30. Definición de la estación 14 para su ingreso en HEC-RAS.	76
Figura 31. Caudales para la modelación de niveles de agua.	79
Figura 32. Condiciones de frontera (pendiente del lecho)	79
Figura 33. Asignación del régimen de flujo para la corrida y obtención de niveles de agua	80
Figura 34. Caudales extremos, Tr 2 años y 50 años, sector Las Garzas del río Cesar	81
Figura 35. Elevación del nivel de agua, para la estación 14, Tr 2 años y 50 años, sector Las Garzas del río Cesar	81
Figura 36. Velocidades de flujo promedio, Tr 2 años y 50 años, sector Las garzas del río Cesar	82

Figura 37. Esfuerzo de corte promedio en el lecho, Tr 2 años y 50 años, sector Las garzas del río Cesar	82
Figura 38. Ubicación de los sondeos SPT realizados por TGI en el río Cesar.	85
Figura 39. Resultados de la correlación del ingeniero Álvaro González sobre los suelos de la margen del río Cesar	91
Figuras 40. 6 Fases del muestreo de suelo en la banca del río Cesar, sector Las Garzas	92
Figura 41. Módulo Input Geometry, BSTEM.	95
Figura 42. Módulo Bank Material. Entrada inicial preliminar	96
Figura 43. Resultado final preliminar del análisis de estabilidad de la boca del río Cesar (estación 14, margen derecha)	96
Figura 44. Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)	100
Figura 45 Capas del subsuelo de la Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)	101
Figura 46. Superficie de falla hipotética de la Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)	101
Figura 47. Definición de la margen derecha de la estación 14 del río Cesar, sector Las Garzas.	102

Figura 48. Sección transversal ajustada con los valores de coordenadas de sección leídos por el BSTEM	103
Figura 49. Asignación de las propiedades geotécnicas del subsuelo de la estación 14	104
Figura 50. Sección con la erosión proyectada sobre el pie de la misma	106
Figura 51. Nueva sección como dato de entrada, luego que el pie del talud ha sido erosionado por la acción hidráulica	107
Figura 52. Módulo de salida de la Banca	109
Figura 53. Entrada al modulo de protección y vegetación de la banca.	111
Figura 54. Modelo RipRoot	111
Figura 55. En el ejemplo mostrado, se indica que el conjunto de raíces para las especies seleccionadas aporta 7 kPa a la cohesión natural del terreno.	112
Figura 56. Asignación de la profundidad de la grieta de tensión	113
Figura 57. Relación del número de estabilidad, el ángulo de fricción interna y el ángulo del talud o banca del río.	115
Figura 58. Análisis de estabilidad de la banca, con vegetación en su parte superior.	116
Figura 59. Análisis de estabilidad, sin vegetación en su parte superior.	117

Figura 60. Estadísticas del material fallado.	118
Figura 61. Resultados con protección sólo del pie del talud.	120
Figura 62. Resultados con protección sólo de la banca.	120
Figura 63. Resultados con protección en el pie del talud y en la banca.	121
Figura 64. Pie de talud Octubre	123
Figura 65. Pie de talud Noviembre	123
Figura 66. Pie de talud Diciembre	124
Figura 67. Pie de talud Enero	124
Figura 68. Pie de talud Febrero	125
Figura 69. Pie de talud Marzo	125
Figura 70. Pie de talud Abril	126
Figura 71. Pie de talud Mayo	126
Figura 72. Pie de talud Junio	127
Figura 73. Pie de talud Julio	127
Figura 74 Pie de talud Agosto	128

Figura 75. Pie de talud Septiembre	128
Figura 76. Cálculo de Fs en Octubre	129
Figura 77. Cálculo de Fs en Septiembre	129
Figura 78. Comportamiento del nivel del río en la estación 14, río Cesar. Tr de 2 años	130
Figura 79. Variación del Fs según la época del año, Tr de 2 años.	130
Figura 80. Comportamiento del nivel del río en la estación 14, río Cesar, Tr 50 años.	133
Figura 81. Variación del Fs según la época del año, Tr de 50 años.	133
Figura 82. Progresión se la margen derecha, Tr 50 años	134
Figura 83. Progresión se la margen izquierda, Tr 50 años	135
Figuras 84 Izquierda. Esquema de la tela sintética. Derecha. Formaleta flexible llena de concreto fluido instalada en la margen de una corriente superficial	138
Figura 85. Malla unidireccional para construir el colchón de protección	139
Figura 86. Interfase del sitio www.glovis.usgs.gov .	141
Figura 87. Selección de archivos	142
Figura 88. Fijación de bandas	142

Figura 89. Imagen en combinación (composite image) de bandas 543	143
Figura 90. Imagen satelital LandSat, RGB 123 de la zona de estudio. Color verdadero	144
Figura 91. Imagen satelital LandSat, RGB 431 de la zona de estudio. Infrarrojo	144
Figura 92. Imagen satelital LandSat, RGB 543 de la zona de estudio	144
Figura 93. Cambio de formato Paso 1	145
Figura 94. Cambio de formato, Paso 2	145
Figura 95. Tabla de contenido en ArcGIS con el arreglo de las imágenes a comparar.	146
Figura 96. LandSat 31 de julio de 1986, sector Las Garzas, río Cesar	147
Figura 97. LandSat 22 de marzo de 1988, sector Las Garzas, río Cesar	148
Figura 98. Comparación en detalle entre 1986 y 1988. Obsérvese como el amplio meandro al norte del tramo de estudio, cambió su forma	148
Figura 99. Río Cesar. 1986	149
Figura 100. Río Cesar. 1988	149
Figura 101. Comparación entre el alineamiento del canal 1986 (rojo) a 1988 imagen de 1988 (cyan).	150

Figura 102. Configuración del cauce, 31 de julio de 1986	151
Figura 103. Configuración del cauce, 22 de marzo de 1988	151
Figura 104. Configuración del cauce, 30 de diciembre de 1989	152
Figura 105. Configuración del cauce, 30 de agosto de 1997	152
Figura 106. Configuración del cauce, 27 de junio de 2000	153
Figura 107. Configuración del cauce, 22 de agosto de 2000	153
Figura 108. Configuración del cauce, 29 de enero de 2001	154
Figura 109. Configuración del cauce, 04 de octubre de 2001	154
Figura 110. Configuración del cauce, 11 de enero de 2003	155
Figura 111. Configuración del cauce, 11 de septiembre de 2007	155
Figura 112. Configuración del cauce, 13 de diciembre de 2009	156
Figura 113. Configuración del cauce, 14 de junio de 2010	156
Figura 114. Configuración del cauce, 10 de diciembre de 2011	157
Figura 115. Configuración del cauce, 09 de julio de 2013	157
Figura 116. Evolución del cauce del río Cesar en 27 años, sector Las Garzas.	158

Figura 117. Superposición de los cauces del río Cesar a lo largo de 27 años (1986 y 2013)	159
Figura 118. Imagen Google Earth, 2006	160
Figura 119. Imagen Google Earth, 2010	160
Figura 120. Imagen Google Earth, 2012	161
Figura 121. Imagen Google Earth, 2013	161
Figura 122. Vuelos C-1720 de 1976 y C-2044 de 1984 sobre el río Cesar	162
Figura 123. Vuelos C-2604 de 1996 y C-2793 de 2006 sobre el río Cesar	163
Figura 124. Variación de la conformación del cauce del río Cesar, sector Las Garzas, cruce del gasoducto de Valledupar. Fuente TGI	164

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados de la modelación en HEC-RAS	174
Anexo B. Caracterización granulométrica de los suelos del lecho y márgenes del río Cesar realizada por TGI	178
Anexo C. Estimación de parámetros de resistencia mediante correlaciones.	193
Anexo D. Esquema de las obras recomendadas en la sección estudiada.	197

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN CAUCES DE CORRIENTES DE AGUAS SUPERFICIALES, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y ESTABILIDAD DE LAS BANCAS *

AUTOR: JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ **

PALABRAS CLAVE: Erosión lateral, banca, pie de talud, estabilidad

Los procesos de desestabilización de las márgenes de corrientes superficiales, son uno de los principales agentes de cambio de la morfología fluvial, afectan propiedades, obras de infraestructura y causan conflictos entre los habitantes de las riberas. Se ha aplicado el modelo de estabilidad de la banca y de erosión del pie de la banca (BSTEM), a una sección transversal del río Cesar, que ha estado sometida a la acción de eventos climáticos extremos. El modelo se basa en métodos de equilibrio límite que aplican los criterios de falla de Mohr – Coulomb y de Fredlund, entre otros complementarios, que plantean que los parámetros de resistencia (fricción interna y resistencia al corte) son afectados cuando se tiene la acción del agua del subsuelo, lo que provoca eventualmente la pérdida de estabilidad de la banca. Se evidencia, cuantificándola en el análisis, la relación en el tiempo entre niveles altos del río y la inestabilidad de las bancas, así como la influencia positiva de la vegetación ribereña sobre la posibilidad de falla. Este proceso, evaluado de manera iterativa, permite explicar el comportamiento observado de las corrientes de agua, desde el punto de vista de la migración de los canales que las conforman. Se recomienda el tipo de medida de protección de la margen, que más aporta a la mitigación del fenómenos de erosión lateral. De manera complementaria, se recurre al estudio de la corriente sobre imágenes de sensores remotos (satelitales, fotografías aéreas) que abarcan un período de más de 27 años en su conjunto, para constatar que los cambios que predice el modelo bien pueden haber sucedido y que, por lo tanto, podrían seguir sucediendo, ante lo cual se plantea la instalación o construcción de elementos artificiales a manera de protección para mitigar los efectos de los procesos de falla geotécnica e hidráulica.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: I.C. MSc Wilfredo del Toro Rodríguez.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF MORPHOLOGICAL CHANGES IN SURFACE WATER STREAMS, THROUGH THE APPLICATION OF THE BANK STABILITY AND TOE EROSION MODEL *

AUTHOR: : JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ **

Keywords: lateral erosion, bank, toe of bank, stability

Surface streams destabilization processes are one of the main agents of change in fluvial morphology, affect land properties, infrastructure works and cause conflicts between inhabitants in both sides of the stream. The Bank Stability an Toe Erosion Model (BSTEM) has been applied to a cross section of Cesar river, that has been under the influence of extreme climate events. The model, is based on limit equilibrium methods that take into account the Mohr – Coulomb and Fredlund failure criterions, among others, that consider the values of the resistance parameters (internal friction and shear stress) are affected due to the presence of water in the subsoil, which, eventually cause the loss of bank stability. It is put in context, that there is relationship between stage levels and bank instability depending on time, as well as the positive influence of the top bank vegetation on the failure potential. This process, in an iterative scheme, allow to explain the observed behavior of natural water streams, from the point of view of migration changes of the channel to what they belong. The protection measures that better support the stability of the banks and to the reduction of the erosion potential are recommended. Complementarily, remote sensing images (satellite, air photos) were used to study the stream, along a period of more than 27 years, to verify that it is possible that changes predicted by the BSTEM might have been happened in real world and that, because of this, might continue happening and, because of this, it is proposed the installation or construction of artificial elements in order to protect the riverbank, to reduce the effects of the geotechnical and hydraulic failure.

*Degree Thesis

** Physics and Mechanics Faculty. School of Civil Engineering. Director: C. E. MSc Wilfredo del Toro Rodriguez.

INTRODUCCIÓN

Los sedimentos que son transportados por las corrientes de agua superficial son uno de los agentes contaminantes más significativos, al punto que afectan la calidad de los hábitats acuáticos, modificando la dinámica fluvial cuando la cantidad de sedimentos se presenta en exceso y también imposibilitando total o parcialmente el uso de la corriente, ya sea para abastecimiento de acueductos, recreación, pesca, entre otros fines). La erosión de las márgenes de tales corrientes es una de las principales fuentes de sedimentos, dependiendo del tamaño del cuerpo hídrico.

Los mecanismos por los cuales se presenta pérdida de suelo del tipo marginal en regímenes fluviales son (no en un orden jerárquico) la erosión fluvial, causada por la acción de las fuerzas de corte sobre el material de la banca, que provoca la remoción de grupos grandes de partículas o bloques de suelo desde la margen del río, y, la inestabilidad geotécnica, causada por el desequilibrio de fuerzas (gravedad y de fricción – cohesión) dentro de la masa de suelo que constituye la margen de la corriente. De acuerdo con Midgley (2010), las fuerzas resistentes están gobernadas por el mecanismo definido por Mohr – Coulomb, en el que el esfuerzo de corte depende de la cohesión efectiva del suelo, el esfuerzo normal causado por el peso de la masa de suelo, la presión de agua en los poros de la masa de suelo y el ángulo de fricción interna de la misma. De otra parte, las fuerzas actuantes están constituidas por el peso de la masa de suelo que conforma la orilla del río (este aumenta con la saturación de la banca).

Una de las formas de estudiar el fenómeno de erosión de las bancas de una corriente de agua superficial, es la aplicación de modelos que simulen el proceso

que se experimenta en tales sitios. El Modelo de Estabilidad de la Banca y Erosión del Pie (BSTEM, por sus siglas en inglés para *Bank Stability and Toe Erosion Model*) es uno de ellos, formulado para analizar la estabilidad y priorizar la ubicación de proyectos de estabilización de riberas. La medición de múltiples variables del suelo y de cambios ambientales es costosa en términos económicos y de tiempo, por lo que modelos como el BSTEM proveen propiedades genéricas del suelo en función de sus características, de manera tal que permiten llevar a cabo análisis aproximados sobre este tema, aunque puede incorporarse también valores reales de dichas propiedades, medidos para cada caso de estudio.

Se presenta en este documento el resultado de la aplicación del modelo BSTEM a una sección transversal localizada en un tramo del río Cesar de 1500 metros de longitud, en jurisdicción del departamento del Cesar, en límites entre los municipios de Valledupar y La Paz. Así mismo, se ofrece una evaluación sobre la escala temporal, del proceso de modificación de las márgenes del río Cesar, a partir de la comparación secuencial de imágenes de sensores remotos que cubren un período de 27 años para la zona bajo estudio.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL.

Analizar el patrón de cambio morfológico del lecho del río Cesar, en el sector Las Garzas, departamento del Cesar.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1.2.1. Determinar el grado de desplazamiento lateral del cauce del río Cesar, mediante el análisis de la erosión de las márgenes, considerando la evaluación de factores de estabilidad ante la incidencia del flujo hídrico y el tipo de suelo a través del modelo BSTEM.

1.2.2. Plantear medidas de mitigación de los efectos derivados de los cambios morfológicos en el lecho del río Cesar y sus efectos generales sobre el proceso erosivo objeto de análisis.

1.3. ALCANCE.

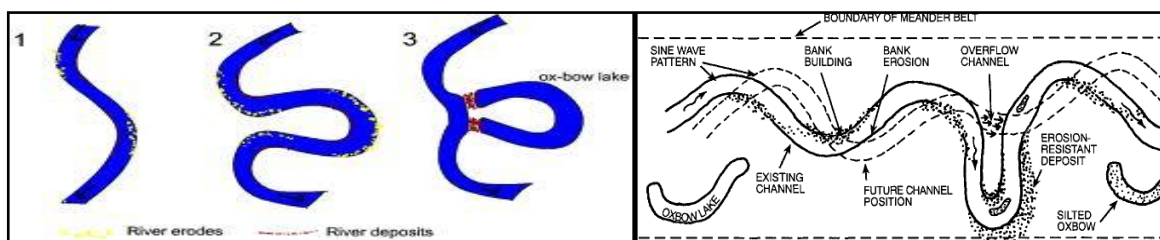
Con los objetivos planteados se persigue satisfacer la necesidad de establecer el grado en que las corrientes superficiales pueden experimentar alteración en su patrón de alineamiento del cauce principal, como consecuencia de la modificación de algunas propiedades geotécnicas y de las condiciones cambiantes del entorno natural que se manifiestan a través del régimen hidrológico (caudales, nivel

freático). Históricamente, el cambio morfológico fluvial ha resultado en la afectación de poblaciones, propiedades rurales, al punto que se han generado conflictos entre propietarios por la desaparición física de los linderos (cercados) o la destrucción de vías de comunicación terrestre, originando ello reclamos de los particulares hacia los entes de Gobierno para que se adelante la construcción de obras de mitigación, corrección, sin tener en cuenta que la mayor parte de las ocasiones las modificaciones de los cauces obedece a causas naturales, cuyos efectos difícilmente podrán ser evitados a largo plazo.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Una de las características más importantes de las cuencas hidrográficas es la existencia de redes de drenaje en donde se concentra el flujo de agua, con lo que se facilita el uso de dicho recurso para diversos fines. Por naturaleza los ríos, una vez alcanzan las zonas bajas o planas, forman meandros (curvas sucesivas y alternadas) conectadas por tramos aproximadamente rectos, todos los cuales se mueven, dado el proceso de erosión de las márgenes, ya sea longitudinalmente o transversalmente respecto a la dirección principal del río, y lo hacen a una tasa desigual porque las orillas se erosionan no uniformemente teniendo en cuenta su configuración geométrica y la naturaleza del suelo que las conforma. En los depósitos aluviales los meandros son de dos tipos: estrangulados y desplazados (Figura 1).

Figura 1 .Estrangulamiento de un meandro y Desplazamiento de meandros formación de una madre vieja (oxbow lake)



Fuente: USDA-ARS

En cada caso se tiene la ocurrencia de erosión sobre el fondo y las márgenes del lecho, lo que da origen a la migración del canal principal tanto a lo largo como a lo ancho del cauce principal. Es conocida la capacidad de erosión del fondo de toda corriente, así como la de la erosión lateral (márgenes), aunque esta última ha sido poco estudiada. No obstante, se sabe que por la acción de flujos secundarios,

especialmente en las partes externas de las curvas (meandros) se produce erosión, contribuyendo estas así a la carga de sedimento transportado en suspensión. En términos generales, los procesos de erosión en bancas se dividen en dos clases (Simon et al, 2010):

- Erosión superior: afecta la parte de la banca que está por encima del nivel de agua (erosión por causas geotécnicas), y se forma normalmente por factores como drenaje superficial, erosión superficial, oleajes y falla local de la estabilidad del talud.
- Erosión inferior: afecta la zona o porción mojada de la banca, estando esta por lo general por debajo del nivel de agua y siendo generada por el efecto del flujo (erosión por causas hidráulicas). Este proceso se origina especialmente en épocas de altas precipitaciones que originan el incremento de caudales con el correspondiente aumento en el nivel de las aguas en corrientes superficiales. Aproximadamente el 90% de los cambios en los ríos se presentan durante el 5 a 10% del tiempo en que se presentan los grandes caudales.

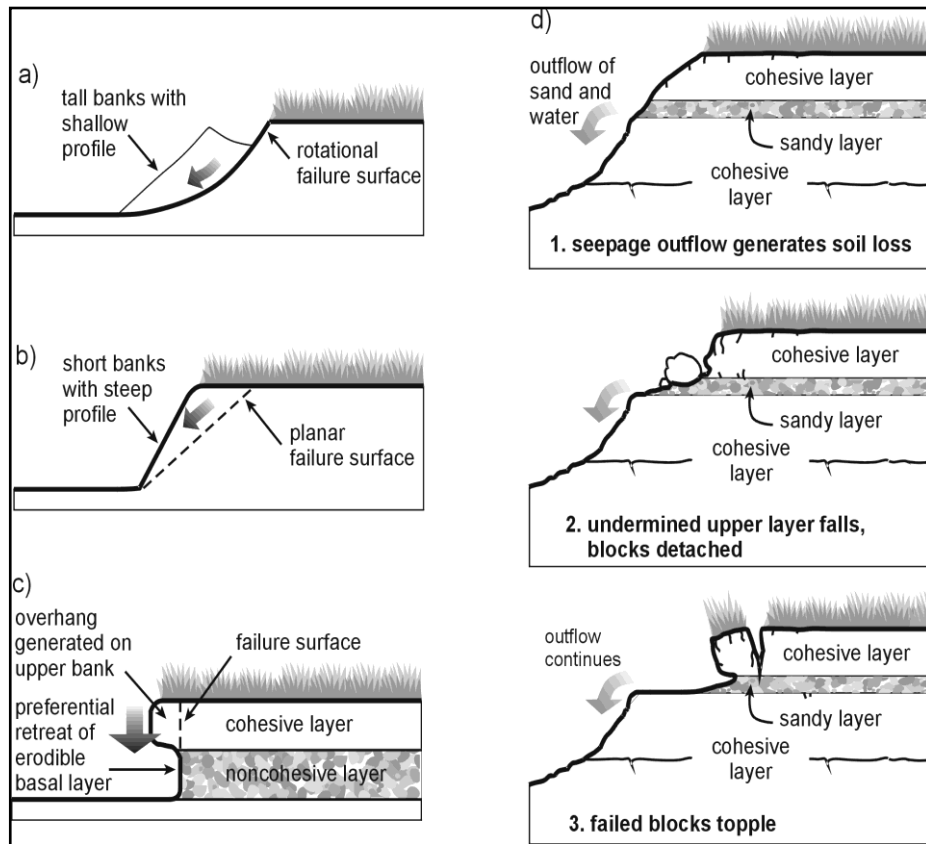
El factor más importante en la generación de un proceso de erosión hidráulica es el esfuerzo cortante. La influencia del tipo de materiales que componen las bancas es importante en la generación de tales procesos erosivos. Se tiene que los suelos cohesivos favorecen la tubificación o, cuando se encuentran en estratos, la falla por desestabilización de las capas menos erodables. Tradicionalmente se ha considerado muy difícil encontrar una fórmula para evaluar el avance de la erosión lateral debido a la heterogeneidad de los suelos. No obstante, con el paso de los años, se ha llegado a la proposición por parte de investigadores, de expresiones o métodos para evaluar el potencial erosivo lateral en una corriente de agua, de los cuales el denominado Modelo de Erosión del Pie y Estabilidad de las Bancas

(*Bank Stability and Toe Erosion Model*) ha surgido como uno que recoge varios criterios de falla de la banca. En el trabajo de aplicación que se presenta, se hace uso del modelo en citas, para estudiar un tramo de una corriente superficial en jurisdicción del departamento del Cesar.

2.1 ESTABILIDAD DE MÁRGENES Y EL MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y ESTABILIDAD DE LAS BANCAS.

De acuerdo con Simon et al (2010), la falla geotécnica de las bancas de los ríos puede ocurrir básicamente por varios mecanismos (Figura 2)

Figura 2. Algunos tipos de falla observados en orillas de ríos.



Fuente: USDA-ARS

Dependiendo de las condiciones hidráulicas y geotécnicas, se producirá alguno de los tipos de falla aludidos, tal como se observa en las Figuras 3, 4 y 5, de corrientes superficiales del departamento del Cesar. Así, se tiene que para una misma corriente hídrica, según estén dispuestas las capas de subsuelo, y la forma en que se presente la acción del flujo de las aguas en el canal (río), se podrá presentar uno o varios de los tipos de falla ilustrados, lo cual podrá dar origen a distintos grados de erosión marginal, lo que a la postre dictamina el comportamiento o evolución del patrón de drenaje que caracteriza a dicha corriente, que a su vez eventualmente dará modificaciones al medio circundante.

Figura 3. Río La Mula, municipio de Chiriguaná, departamento del Cesar



Fuente: El Autor

Figura 4. Río Magdalena, municipio de Gamarra, departamento del Cesar



Fuente: El Autor

Figura 5. Río Animito, municipio de Curumaní, departamento del Cesar



Fuente: El Autor

De acuerdo con los criterios de falla de los suelos planteados por Mohr – Coulomb, la resistencia al corte de suelos saturados puede ser descrita según la siguiente expresión:

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \Phi' \quad (1)$$

donde τ_f es la resistencia del suelo al esfuerzo de corte (kPa), c' es la cohesión efectiva, σ es el esfuerzo normal (kPa), μ_w es la presión de poros (kPa) y $\Phi' =$ ángulo de fricción interna efectivo (grados).

En canales de aguas superficiales labrados y en regiones áridas o semiáridas (como la zona de estudio), la mayor parte de las márgenes puede estar por encima de la tabla de agua y usualmente experimentará condiciones no saturadas; en estos casos, la succión (presión de poros de agua negativa) por encima de la tabla de agua tiene el efecto de aumentar la cohesión aparente del suelo, lo cual puede contribuir a la resistencia del suelo en algún grado, para lo que Fredlund et al (1978) definieron una relación funcional que describe el incremento en la resistencia del suelo con el aumento en la succión. La tasa de incremento está definida por el parámetro Φ^b , el cual generalmente está entre 10° y 20° , con un valor máximo de Φ' bajo condiciones saturadas (Fredlund y Rahardjo, 1993). De esta manera, la cohesión aparente incorpora tanto la unión electroquímica dentro de la matriz del suelo como la cohesión debida a la tensión superficial en la interfase aire – suelo del suelo no saturado:

$$c_s = c' + (\mu_s - \mu_w) \tan \Phi^b = c' + \Psi \tan \Phi^b \quad (2)$$

donde c_s es la cohesión aparente (kPa), μ_s es la presión aire-poro (kPa) y Ψ es la succión (kPa)

El término Φ^b varía para todos los suelos, y con el contenido de humedad para un suelo dado (Fredlund and Rahardjo, 1993; Simon et al., 2000). No existen datos disponibles sobre Φ^b para suelos aluviales. Sin embargo, una vez se conoce este dato (o se asume), tanto la cohesión aparente (c_s) como la cohesión efectiva (c') pueden calcularse midiendo la succión con tensiómetros u otros dispositivos y usando la ecuación 2.

Para el análisis del equilibrio de las márgenes de las corrientes de aguas superficiales, debe tenerse en cuenta que las fuerzas que provocan su inestabilidad son controladas por la altura (diferencia de nivel entre la parte más alta y el lecho del río) y pendiente (inclinación transversal respecto al flujo) de la margen, el peso unitario del suelo y la masa de agua dentro de él, y la sobrecarga impuesta por cualquier objeto colocado sobre la parte superior de la margen. Como es sabido, la relación entre las fuerzas resistentes y las actuantes es comúnmente expresada como el factor de seguridad (F_s), donde los valores mayores a 1 indican estabilidad y los menores a 1 inestabilidad.

Se considera que tres son los aspectos básicos que inciden en la estabilidad de las bancas en corrientes superficiales:

- La naturaleza del suelo, dictada por sus características geotécnicas (densidad, resistencia al corte, fricción interna, etc.)

- La presencia de agua, tanto en el canal principal del río como en el suelo (incluyendo el subsuelo) que conforma la margen.
- La presencia de vegetación en la parte superior de la margen (o, como es denominada en el BSTEM, “top of bank”), que proporciona eventualmente un aumento en la resistencia al corte del suelo.

Al describir los métodos de análisis de estabilidad de suelos en los numerales 2.2 y 2.3, los dos primeros aspectos son considerados a continuación, en tanto que el tercero se abordará en el numeral 2.4.

2.2 GENERALIDADES SOBRE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE MÁRGENES DE CORRIENTES HÍDRICAS.

2.2.1. Estratos horizontales. El método de estratos horizontales es un desarrollo del método de falla en cuña propuesto por Simon y Curini (1998) y Simon et al (2000), el cual a su vez es un refinamiento de los modelos desarrollados por Osman y Thorne (1998) y Simon et al (1991). El modelo se basa en un análisis de equilibrio límite en el que el criterio de falla de Mohr – Coulomb se usa para la porción saturada de la cuña, y el criterio de Fredlund et al (1978) se usa para la porción no saturada. Además de la presión de poros positiva y negativa, el modelo incorpora suelos estratificados, cambios en el peso unitario del suelo basado en el contenido de humedad, y la presión externa de la corriente de flujo. El modelo divide el perfil de la margen (orilla) hasta en cinco capas definidas con propiedades geotécnicas únicas.

El factor de seguridad, que denota el grado de estabilidad de la margen está dado por

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [W_i \cos \beta - \mu_{ai} L_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi_i^c)}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin[\alpha - \beta])} \quad (3)$$

Donde

c'_i = cohesión efectiva del estrato i (kPa),

L_i = longitud del plano de falla incorporado dentro de la capa i (m),

W_i = peso de la capa i (kN),

P_i = fuerza hidrostática confinante debida al nivel externo del agua (kN/m) actuando sobre la capa i,

β = ángulo del plano de falla (grados sobre la horizontal),

α = ángulo local de la margen (grados sobre la horizontal) y

I = número de capas.

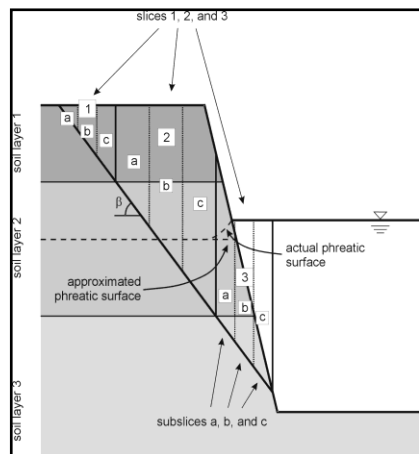
2.2.2. Láminas verticales o Dovelas. El método de las dovelas es una adaptación del método empleado en el modelo CONCEPTS (Langendoen, 2000). Como en el

método de estratos horizontales, el análisis efectuado en este caso se basa en el método de equilibrio límite, en el que se evalúan las fuerzas de corte y normales activas en segmentos del bloque de falla. La fuerza confinante debida al agua presente en el canal es modelada extendiendo la superficie de deslizamiento.

En la Figura 6 se muestra la configuración asumida de un bloque de falla y su subdivisión en dovelas.

La margen es dividida en porciones verticales, cuidando que haya el mismo número de estratos que de tales porciones. Cada porción es luego subdividida en tres subporciones para aumentar la exactitud de los cálculos del factor de seguridad (en la Figura 6, 3 estratos de suelo, 3 porciones verticales numeradas 1 a 3, cada una con literales a, b, c).

Figura 6. Subdivisión de un bloque de falla en dovelas, o láminas verticales.



Fuente: USDA-ARS

El cálculo del factor de seguridad es un proceso iterativo de 4 pasos:

1. Las fuerzas verticales que actúan sobre una dovela se suman para determinar la fuerza normal que actúa en la base de dicha dovela, N_j

2. Las fuerzas horizontales que actúan sobre una dovela se suman para determinar la fuerza normal entre dovelas, I_{nj}

3. La fuerza de corte entre dovelas, I_{sj} es calculada a partir de I_{nj} usando el método de Morgenstern y Price (1965)

4. Las fuerzas horizontales son sumadas sobre todas las dovelas para obtener el factor de seguridad, F_s

En la primera iteración, se desprecian las fuerzas normal y de corte y la fuerza normal se toma como $W_j \cos \beta$, donde W_j es el peso de la dovela j . La primera iteración arroja el F_s ordinario. Luego se obtienen las fuerzas normales interdovelas:

$$I_{n_j} = I_{n_{j-1}} - \left(c_j' L_j + (\mu_a - \mu_w)_j L_j \tan \phi_j^b - \mu_{a_j} L_j \tan \phi_j^i \right) \frac{\cos \beta}{F_s} + N_j \left(\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \phi_j^i}{F_s} \right) \quad (4)$$

y, a su turno, las fuerzas de corte interdovelas se obtienen de:

$$|s_j = 0.4 I_{n_j} \sin\left(\frac{\pi L_j}{\sum L_j}\right) \quad (5)$$

Luego de la primera iteración, la fuerza normal N_j se expresa como:

$$W_j + I_{s_{j-1}} - I_{s_j} - \sin \beta \left(\frac{c'_j L_j + (\mu_a - \mu_w)_j L_j \tan \phi'_j - \mu_{aj} L_j \tan \phi'_j}{F_s} \right) \quad (6)$$

$$\cos \beta + \frac{\tan \phi'_j \sin \beta}{F_s}$$

Para la dovela j del total de J dovelas.

Esto completa la segunda iteración. A menudo, las fuerzas interdovelas calculadas son negativas (tensión) cerca de la parte superior del bloque de falla. Puesto que el suelo no es capaz de soportar grandes esfuerzos de tensión, se asume la formación de una grieta de tensión en el último límite interdovela que esté sometida a tensión.

El factor de seguridad es determinado mediante un balance de fuerzas en las direcciones vertical y horizontal para cada subdovela y en la dirección horizontal para el bloque de falla como un todo. F_s está dado por:

$$F_s = \frac{\cos \beta \sum_{j=1}^J (c'_j L_j + (\mu_a - \mu_w)_j L_j \tan \phi_j^b + [N_j - \mu_{aj} L_j] \tan \phi_j^i)}{\sin \beta \sum_{j=1}^J (N_j) - P_j} \quad (7)$$

El modelo itera repetidamente a lo largo de las ecuaciones para los valores \ln_j , ls_j , N_j y F_s , hasta que el valor de F_s converge.

2.2.3. Fallas por corte en voladizo. El algoritmo de falla de corte en voladizo (Thome y Tovey, 1981) resulta al insertar el ángulo β con valor de 90° en la ecuación (7):

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \phi_i^b + [P_i \sin \alpha - \mu_{ai} L_i] \tan \phi_i^i)}{\sum_{i=1}^I (W_i + P_i \cos \alpha)} \quad (8)$$

De forma simple, el factor F_s es la relación entre la resistencia al corte del suelo y el peso del material en voladizo. La inclusión de los términos con α en la ecuación (8) asegura que si la margen está parcialmente o totalmente sumergida, el peso de los estratos afectados por el agua son correctamente reducidos sin tener en cuenta la superficie basal del voladizo.

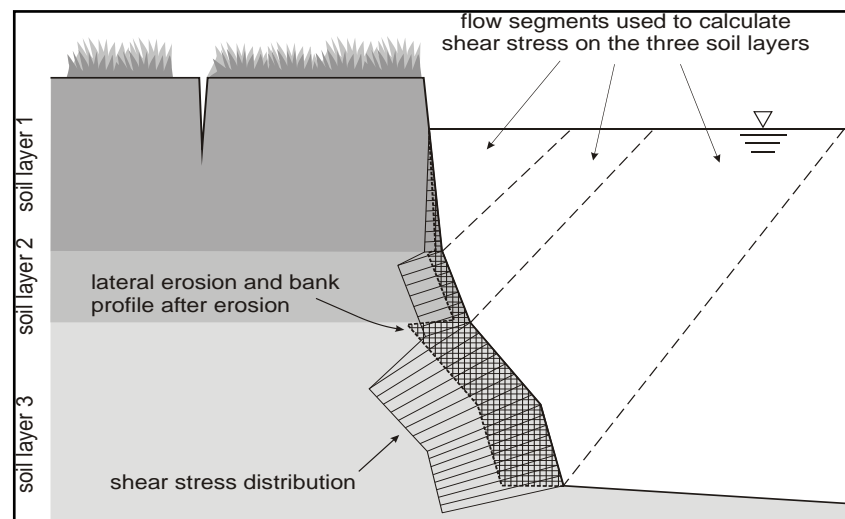
2.2.4. . Cuando se tiene la acción del flujo de agua sobre el suelo de la margen, se genera un esfuerzo (de corte) que tiene a arrancar el material de dicho sitio. Así, el esfuerzo de corte promedio en la frontera suelo-agua es expresado como:

$$\tau_o = \gamma_w R S$$

(9)

donde τ_o es el esfuerzo promedio de corte (Pa), γ_w es el peso unitario del agua, R es el radio hidráulico (m) calculado a partir de la profundidad de agua) y S es la pendiente longitudinal del canal (m/m)

Figura 7. Segmentación de áreas de flujo local y el radio hidráulico



Fuente: USDA-ARS

El esfuerzo promedio de corte ejercido por el flujo sobre cada nodo se determina dividiendo el área de flujo que circula por una sección transversal en segmentos que están afectados sólo por la rugosidad de la margen o el lecho y luego subdividiendo nuevamente para determinar el área de flujo afectada por la rugosidad de cada nodo. La línea que divide los segmentos afectados del lecho – y la margen - se asume que bisecta el ángulo promedio de la margen y el ángulo promedio del pie de la margen (Figura 7).

El radio hidráulico del flujo en cada segmento es la relación entre el área transversal de flujo y el perímetro mojado (Pn). El esfuerzo de corte por flujo en las líneas de división es despreciado cuando se determina el perímetro mojado.

2.2.5. . Los efectos mecánicos de la vegetación en la estabilidad de las bancas. Generalmente, los suelos son resistentes ante esfuerzos de compresión, pero no ante los de tensión. De otra parte, las raíces de árboles y de especies herbáceas son fuertes ante esfuerzos de tensión pero no ante los de tensión. Como consecuencia, un suelo que contenga raíces en su matriz es un medio compuesto (mixto), dotado de una resistencia mejorada (Thorne, 1990), que ha sido cuantificada por numerosos autores usando experimentos en laboratorios y en campo.

Wu et al(1979), con base en trabajos de Waldron (1977) propusieron una ecuación ampliamente usada por quienes evalúan este aspecto de la resistencia de los suelos, para estimar el aumento en la misma (C_r) como una función de la resistencia a la tensión de las raíces, la densidad superficial y distorsión de las raíces durante el proceso de corte. Dicha expresión es:

$$c_r = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^{n=N} (A_r T_r)_n [\sin(90 - \zeta) + \cos(90 - \zeta) \tan \phi'] \quad (10)$$

Donde, C_r es la cohesión debida las raíces (kPa), T_r es la resistencia a la tensión de las raíces (Kpa), A_r es al área de las raíces en el plano de la superficie de corte,

A es el área de la superficie de corte, ϕ' es el ángulo de fricción del suelo (grados), N es el número total de raíces que cruzan el plano de corte, y

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tan \theta + \cot \chi}\right), \quad (11)$$

donde θ es el ángulo de distorsión de corte (grados) y χ es la orientación inicial de la fibra respecto al plano de falla (grados).

Posteriormente, Pollen y Simon (2005) determinaron que la expresión propuesta por Wu tiende a sobreestimar el refuerzo aportado por las raíces, debido a que se asume que la resistencia total a la tensión de las raíces es movilizada durante el corte del suelo y que todas las raíces se rompen simultáneamente. La corrección se realizó por Pollen y Simon al proponer RipRoot, un modelo de fibras empaquetadas, que tiene en cuenta la ruptura progresiva de las raíces durante la falla de la masa de suelo, siendo gobernado tanto por el número y clase de raíces presentes en la banca del río como por las fuerzas actuantes sobre dicha banca.

Al comparar RipRoot contra el modelo de disposición perpendicular de las raíces planteado por Wu, se encontró por parte de Pollen y Simon (2005) mediante ensayos de corte directo en suelo con y sin raíces en su interior, que la exactitud había sido mejorada en un orden de magnitud, pero que aún se tiene un grado de error, el cual es explicado, en primer lugar, por el hecho de que las bancas de canales erosionados sugieren que cuando un suelo reforzado con raíces se corta, ocurren dos mecanismos de falla: rompimiento de la raíz y extracción de la raíz. Ennos (1990) estableció que la fuerza de extracción es función de la resistencia de las uniones entre el suelo y la raíz, y es dada por

$$F_P = \pi * d * T_f * L_r, \text{ donde} \quad (12)$$

F_P es la fuerza de extracción de una raíz individual (N)

d es el diámetro de la raíz (m)

T_f es la resistencia al corte del suelo (ecuación 1)

L_r es la longitud de la raíz (m), la cual – si no se dispone de datos de campo - puede ser estimada usando la expresión $L_r = 0.123 * d^{0.7}$ (Pollen, 2007).

Una segunda explicación para el error aludido es que se ha considerado por varios autores que el término $[\sin(90 - \zeta) + \cos(90 - \zeta) \tan \phi]$ en la ecuación 10 anterior tiene un valor aproximado constante de 1.2, sobre lo que expertos del Laboratorio Nacional de Suelos de Estados Unidos de Norteamérica conceptúan que esta consideración es sesgada, puesto que dicho término varía de -1 (cuando ζ vale 180°) hasta un máximo (cuando ζ tiende a 0°), encontrando finalmente que el término en cuestión es independiente del ángulo del plano de falla, habiéndose implementado dentro del modelo BSTEM el cálculo de este término con base solamente en el ángulo de fricción.

3. EL MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y DE ESTABILIDAD DE LAS BANCAS (*BANK STABILITY AND TOE EROSION MODEL, BSTEM*)

El modelo ha sido desarrollado por el Laboratorio Nacional de Suelos, del Servicio de Investigación sobre Agricultura, adscrito al Departamento de Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica (Agricultural Research Service, ARS), NSL, ARS y USDA por sus siglas en inglés respectivamente, así como con la participación del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Mississippi. Los autores del modelo son los investigadores Andrew Simon, Robert Thomas, Andrea Curini y Natasha Bankhead.

De acuerdo con los autores del modelo, conocido como BSTEM, combina los tres métodos de equilibrio límite mencionados en el numeral 2, para calcular el factor de seguridad de márgenes multiestratificadas. El modelo puede adaptarse fácilmente para incorporar los efectos de medidas de estabilización (geotextiles, enrocados, vegetación). La versión usada en este documento asume que se presentan condiciones hidrostáticas bajo la tabla de agua y una interpolación lineal de la succión matricial por encima de la misma tabla (a menos que el usuario disponga de sus propios datos de presión de poros). Con el trasfondo teórico citado en el numeral 2, para este trabajo de aplicación se usó la versión 5.2. del BSTEM, el cual está elaborado como una serie de instrucciones (macro) programadas por sus autores en el aplicativo Excel de la empresa Microsoft, el cual puede ser consultado en el Servicio de Investigación sobre Agricultura, del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica¹ (Figura 8), de donde es posible obtener una copia del archivo magnético correspondiente (ejecutable), el cual debe ser instalado en un equipo de computación que contenga la aplicación Microsoft Excel. Se advierte que las hojas del libro

¹ <http://www.ars.usda.gov>

magnético obtenido están protegidas y no es posible su modificación tal como le es presentado al usuario común, siendo sólo factible modificar aquellos campos de información (celdas) que están bajo la gobernabilidad de dicho usuario (datos de entrada).

3.1 ORGANIZACIÓN DEL BSTEM.

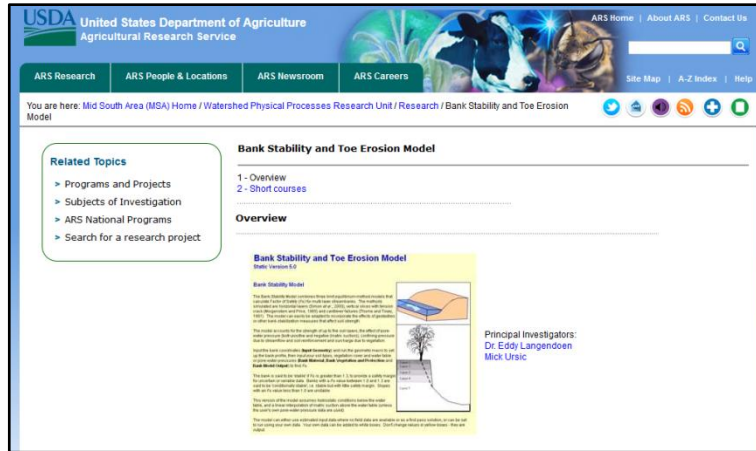
Una descripción simple de la forma en que el modelo está organizado es como se presenta a continuación y en las Figuras 9 a 18.

Como puede apreciarse en la Figura 5, la interfase principal de BSTEM está dispuesta en 9 hojas, o módulos, denominados

- Introducción,
- Tech Background,
- Model use and FAQ,
- Input Geometry,
- Bank Material,
- Bank Vegetation and Protection,
- Bank Model Output,
- Toe Model Output
- Unit Converter.

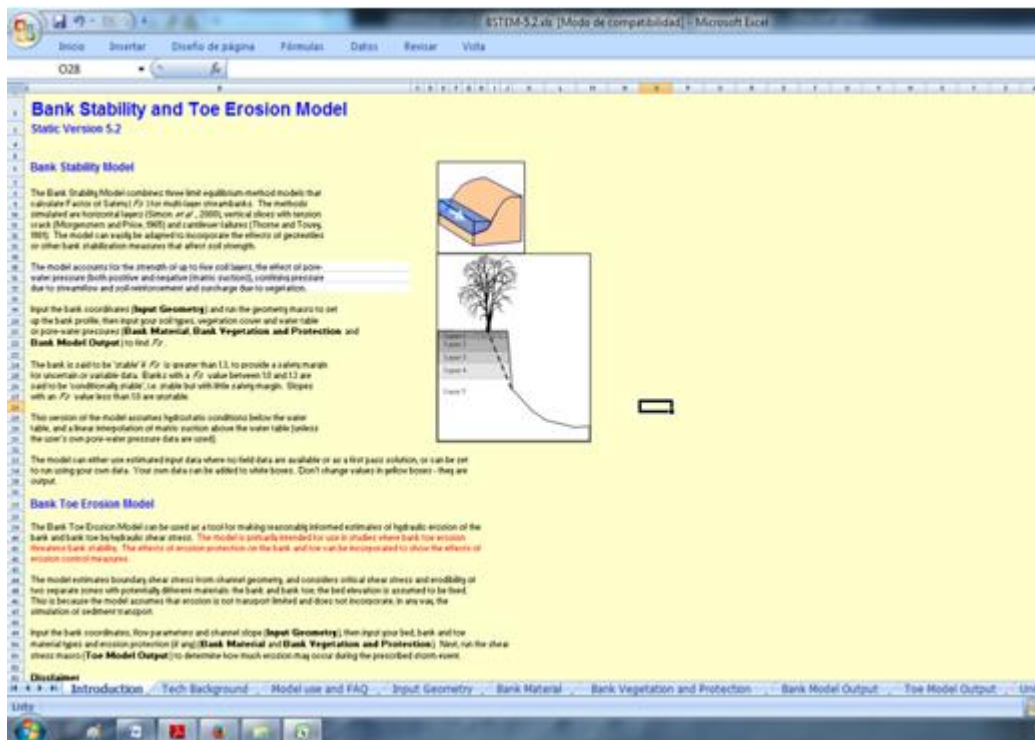
La función que presta cada módulo se explica a continuación:

Figura 8. Interfase del sitio en internet de ARS



Fuente: USDA – ARS

Figura 9. Interfase del BSTEM



Fuente: USDA-ARS

3.1.1. Módulo Introduction (Introducción). En esta hoja (Figura 6) se ofrece una descripción general del modelo, aludiendo a los métodos de equilibrio límite como fundamento principal del mismo para el análisis de la estabilidad de la banca y a consideraciones referentes a la erodabilidad y el esfuerzo de corte en el lecho de la corriente. Se presentan así mismo las fuentes de la información usada para este componente del modelo.

Figura 10. Introducción al modelo BSTEM

Bank Stability and Toe Erosion Model

Static Version 5.2

Bank Stability Model

The Bank Stability Model combines three limit equilibrium-method models that calculate Factor of Safety (F_s) for multi-layer streambanks. The methods simulated are horizontal layers (Simon *et al.*, 2000), vertical slices with tension crack (Morgenstern and Price, 1965) and cantilever failures (Thorne and Tovey, 1981). The model can easily be adapted to incorporate the effects of geotextiles or other bank stabilization measures that affect soil strength.

The model accounts for the strength of up to five soil layers, the effect of pore-water pressure (both positive and negative (matric suction)), confining pressure due to streamflow and soil reinforcement and surcharge due to vegetation.

Input the bank coordinates (**Input Geometry**) and run the geometry macro to set up the bank profile, then input your soil types, vegetation cover and water table or pore-water pressures (**Bank Material, Bank Vegetation and Protection** and **Bank Model Output**) to find F_s .

The bank is said to be 'stable' if F_s is greater than 1.3, to provide a safety margin for uncertain or variable data. Banks with a F_s value between 1.0 and 1.3 are said to be 'conditionally stable', i.e. stable but with little safety margin. Slopes with an F_s value less than 1.0 are unstable.

This version of the model assumes hydrostatic conditions below the water table, and a linear interpolation of matric suction above the water table (unless the user's own pore-water pressure data are used).

The model can either use estimated input data where no field data are available or as a first pass solution, or can be set to run using your own data. Your own data can be added to white boxes. Don't change values in yellow boxes - they are output.

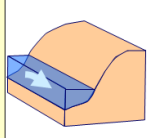
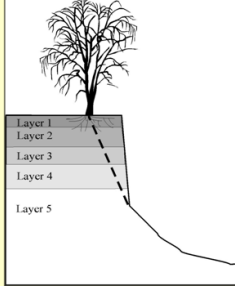
Bank Toe Erosion Model

The Bank Toe Erosion Model can be used as a tool for making reasonably informed estimates of hydraulic erosion of the bank and bank toe by hydraulic shear stress. The model is primarily intended for use in studies where bank toe erosion threatens bank stability. The effects of erosion protection on the bank and toe can be incorporated to show the effects of erosion control measures.

The model estimates boundary shear stress from channel geometry, and considers critical shear stress and erodibility of two separate zones with potentially different materials: the bank and bank toe; the bed elevation is assumed to be fixed. This is because the model assumes that erosion is not transport limited and does not incorporate, in any way, the simulation of sediment transport.

Input the bank coordinates, flow parameters and channel slope (**Input Geometry**), then input your bed, bank and toe material types and erosion protection (if any) (**Bank Material** and **Bank Vegetation and Protection**). Next, run the shear stress macro (**Toe Model Output**) to determine how much erosion may occur during the prescribed storm event.

Disclaimer

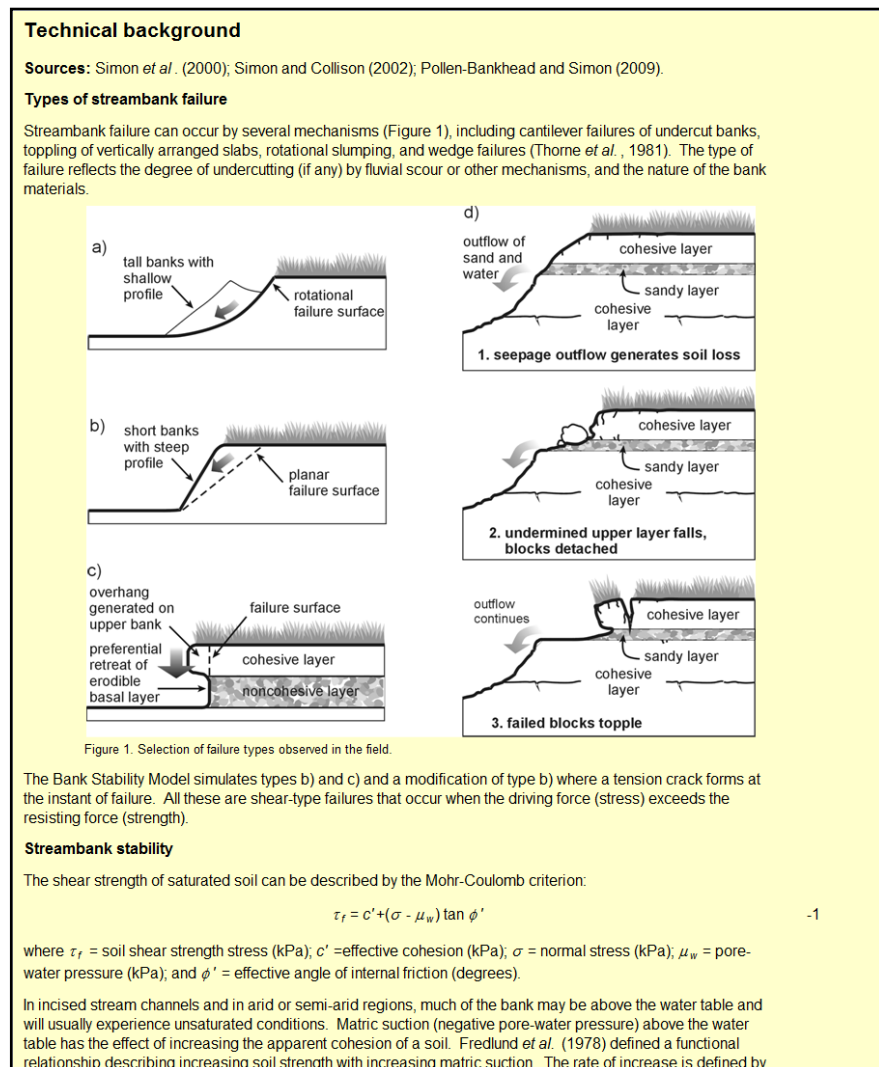



Fuente: USDA-ARS

3.1.2. Módulo Tech Background (Respaldo técnico). En esta hoja (Figura 7) se ofrece el sustento técnico principal del modelo, representado por los criterios de

falla del suelo y los métodos de análisis de la estabilidad de la banca de una corriente de agua superficial y del pie de la misma, incluyendo los aspectos relacionados con la influencia de la vegetación presente en la orilla o margen (top of bank) (ver numeral 2 del presente documento). Como en la anterior hoja, se tienen las fuentes de información técnica contempladas para el modelo.

Figura 11. Base técnica del modelo BSTEM



Fuente: USDA-ARS

3.1.3. Módulo Input Geometry (entrar la geometría de la banca). En esta hoja se puede definir, mediante coordenadas en un plano vertical o por dimensiones físicas, la forma de la banca y del pie de la misma. Por defecto, el modelo sólo acepta que las coordenadas tengan dirección izquierda – derecha, por lo que para la margen derecha (que por naturaleza avanza desde la derecha hacia la izquierda), se toma el sentido contrario, ya que el análisis de estabilidad tiene en cuenta el efecto de la geometría de la banca y la fuerza de corte ejercida por el flujo de agua sobre la misma. Así mismo, se definen las principales características del flujo como nivel de la lámina de agua, pendiente longitudinal del lecho, longitud del tramo de corriente bajo estudio (normalmente entre dos secciones transversales) y la duración del flujo.

También se debe establecer la posición del que se considere sea el punto superior del pie de la banca o talud, con el objetivo de diferenciar apropiadamente las dos partes que conforman la orilla de la corriente (banca o talud y pie de la banca o pie del talud), las cuales están sometidas a procesos erosivos diferenciados. En este componente del modelo se definen hasta cinco capas horizontales que se considere conforman la banca, teniendo presente que para cada una se conozcan las propiedades geotécnicas necesarias (ver el Módulo Bank Material).

En forma gráfica, en este mismo módulo se presenta la explicación o definición de los principales puntos que definen la geometría de la banca, siendo estos: Bank Top y Bank Edge, respectivamente parte superior de la banca (el punto A) y borde de la banca (el punto B); cambios de pendiente en la banca (puntos C a P), top of toe (parte superior del pie del talud, Punto Q), cambios de pendiente en el pie del talud (puntos R a U), parte inferior o base del pie del talud (punto V) y punto final (generalmente hacia el punto medio de la sección transversal). En la figura 8 se muestra la interfase del módulo de Geometría de la sección.

Figura 12. Módulo de definición de la geometría de la banca

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

- 1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box- cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.
- 2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)
- 3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount, otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the **View Bank Geometry** button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

Option A

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A			<input type="checkbox"/>
B			<input type="checkbox"/>
C			<input type="checkbox"/>
D			<input type="checkbox"/>
E			<input type="checkbox"/>
F			<input type="checkbox"/>
G			<input type="checkbox"/>
H			<input type="checkbox"/>
I			<input type="checkbox"/>
J			<input type="checkbox"/>
K			<input type="checkbox"/>
L			<input type="checkbox"/>
M			<input type="checkbox"/>
N			<input type="checkbox"/>
O			<input type="checkbox"/>
P			<input type="checkbox"/>
Q			<input type="checkbox"/>
R			<input type="checkbox"/>
S			<input type="checkbox"/>
T			<input type="checkbox"/>
U			<input type="checkbox"/>
V			<input type="checkbox"/>
W			<input type="checkbox"/>

Shear emergence elev

Shear surface angle

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Input shear surface angle

Bank layer thickness (m)

Elevation of layer base

Top Layer (m)

Layer 1 #|VALOR!

Layer 2 #|VALOR!

Layer 3 #|VALOR!

Layer 4 #|VALOR!

Layer 5 #|VALOR!

Bottom Layer

Parallel layers, starting from point B

Channel and flow parameters

Input reach length (m)

Input reach slope (m/m)

Input elevation of flow (m)

Input duration of flow (hrs)

View Bank Geometry

Run Bank Geometry Macro

Definition of points used in bank profile

A - bank top: place beyond start of shear surface
 B - bank edge
 C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)
 Q - top of bank toe
 R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)
 V - base of bank toe
 W - end point (typically mid point of channel)

Notes:
 Bank profile may overhang. If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and Q. The shear surface emergence point must not be on a horizontal section - the elevation of this point must be unique or an error message will display.

Fuente: USDA-ARS

3.1.4. Módulo Bank Material (material, o tipo de suelo, que conforma la banca). En este se definen los valores de las características geotécnicas del suelo que conforma cada una de las cinco capas con que se ha definido a la banca en el módulo anterior, además del pie de esta.

Las propiedades – ya sea medidas en laboratorio o estimadas a través de correlaciones – son:

- Para la banca (hasta 5 capas), ángulo de fricción (grados), cohesión (kPa), peso unitario saturado (kN/m^3), parámetro Φ^b (ver numeral 2.1) y
- Para el pie de la banca, esfuerzo crítico de corte, T_c (Pa) y el coeficiente de erodabilidad (cm^3/Ns). Estos dos parámetros pueden calcularse en este mismo módulo, a partir del tamaño del grano representativo del material que compone la banca, pudiéndose definir para cada una de las capas (máximo 5) en que se es posible subdividir aquella.

Alternativamente, de no conocerse el valor de las propiedades geotécnicas citadas, el módulo ofrece la posibilidad de seleccionar entre un máximo de 16 materiales parametrizados, cuyas propiedades han sido valoradas por los autores del modelo.

Obviamente, debe tenerse especial cuidado al momento de escoger esta opción, ya que seguramente los resultados no serán tan representativos de la realidad, aspecto este que se adiciona a las desviaciones que de por sí puede entregar el mismo modelo.

En la Figura 9 se aprecia la interfase del módulo descrito, mientras que en la Figura 10 se observa la ventana (para la primera capa) de selección de los materiales definidos por defecto en el modelo, siendo esto posible para las 5 capas de la banca (Bank Material) y el pie del talud (Bank Toe Material).

Figura 13. Módulo de asignación de clase de material o suelo de la banca

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material: Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4, Layer 5. Bank Toe Material: Own data.

Bank and bank-toe material data tables.

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

Material Descriptors			Bank Model Input Data				Groundwater Model Input Data					Toe Model Input Data			
Bank material type	Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ' (degrees)	Cohesion c' (kPa)	Saturated unit weight γ^b (kN/m^3)	ϕ^b (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)	Hydraulic Conductivity K_{sat} (m/s)	Bulk Modulus (Pa)	Porosity	Specific Gravity	van Genuchten α (m^{-1})	van Genuchten n	τ_c (Pa)	k (cm^2/Ns)
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.556E+08	0.280	0.090	3.5237	2.3286	498	0.004
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.556E+08	0.280	0.090	3.5237	2.3286	124	0.009
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	3.160E-03	1.354E+08	0.420	0.070	3.5237	2.3286	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0	-	7.439E-05	1.354E+08	0.475	0.230	3.5237	3.1769	Coarse (0.71 mm) or Fine (0.18 mm)	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0	-	1.139E-06	6.056E+07	0.380	0.333	4.0563	2.3286		
6a, 6b and 6c	Silt	-	30.0	3.0	18.0	15.0	-	5.064E-06	1.049E+07	0.480	0.050	0.6577	1.6788	Erodible (0.100 Pa).	
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.0	10.0	18.0	15.0	-	9.473E-07	1.354E+06	0.420	0.070	1.5812	1.4158	Moderate (5.00 Pa), or	
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	20.0	15.0	18.0	15.0	-	1.708E-06	5.417E+06	0.420	0.070	1.4962	1.2531	Resistant (50.0 Pa)	
9	Own data layer 1														
	Own data layer 2														
	Own data layer 3														
	Own data layer 4														
	Own data layer 5														
	Own data Bank Toe														

Need to know the critical shear stress (τ_c)? Input non-cohesive particle diameter (mm) Critical Shear Stress τ_c (Pa)

Need to know the erodibility coefficient (k)? Input critical shear stress τ_c (Pa) Erodibility Coefficient (cm^2/Ns)

Data Sources: Bank Model data sources.

Fuente: USD-ARS

Figura 14. Opciones para seleccionar materiales parametrizados

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material: Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4, Layer 5. Bank Toe Material: Own data.

Bank and bank-toe material data tables.

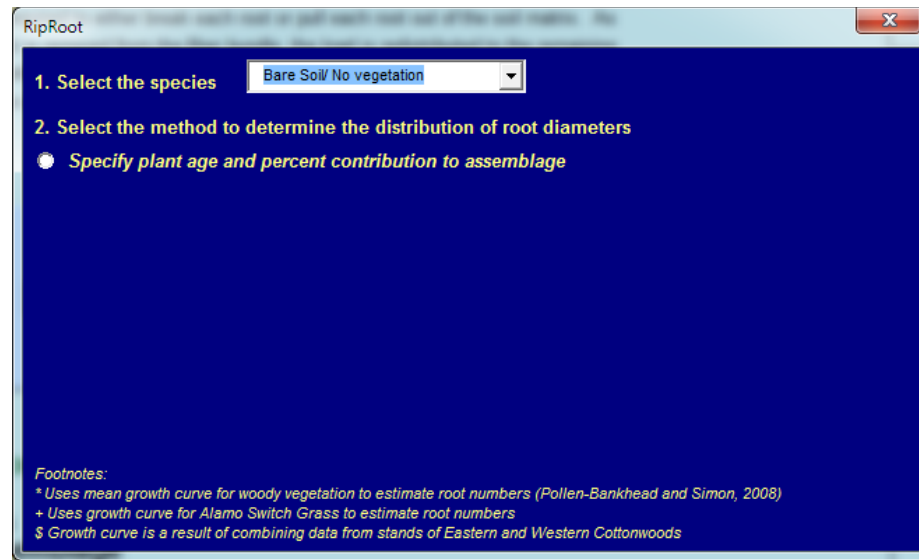
These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

Material Descriptors			Bank Model Input Data			
Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ' (degrees)	Cohesion c' (kPa)	Saturated unit weight γ^b (kN/m^3)	ϕ^b (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)
Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-
Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-
Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-
4a and 4b	Angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0
6a, 6b and 6c	Silt	-	30.0	3.0	18.0	15.0
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.0	10.0	18.0	15.0
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	20.0	15.0	18.0	15.0

Fuente: USDA-ARS

3.1.5. Módulo Bank Vegetation and Protection (Vegetación y Protección de la Banca). En este aparte del aplicativo, se utiliza el submodelo RipRoot, que simula los efectos mecánicos de la vegetación (ver numeral 2.4 y Figura 11). Para ello, este submodelo contiene información alusiva al tipo de vegetación presente en la parte superior de la banca (orilla del río) así como, si se desea, el tipo de protección con que se ha dotado o dotará la margen, ya sea con el fin de evaluar el impacto de una medida actual de mitigación de la erosión o del riesgo de desestabilización o una que se vaya a instalar en un futuro cercano (Figura 12).

Figura 15. Interfase del submodelo RipRoot



Fuente: USDA-ARS

En cuanto a las especies vegetales, se ha parametrizado un total de 23 opciones (que incluye la de no vegetación) y una para ingresar datos propios en caso se disponga de la información apropiada sobre el sistema radicular de la zona de estudio (resistencia a la tensión de las raíces y el número de raíces por cada uno de siete rangos de diámetro de las mismas, desde 0 a 40 mm).

En cuanto al tipo de protección, se tiene la opción de seleccionar entre 7 clases de medidas de protección (biomecánicas o civiles) o la específica si se conocen los valores de esfuerzo permisible de corte de los materiales de construcción a emplear en dicha medida de mitigación o protección.

Figura 16. Módulo para la selección del tipo de protección de la orilla (vegetación y obras)

Simulate the mechanical effects of *bank top* vegetation on bank stability using a root-reinforcement model

RipRoot (Pollen and Simon, 2005) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snapping of roots and the slipping of roots through the soil matrix, by determining the minimum applied load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Waldron (1977), Wu et al. (1979) and Waldron and Dakessian (1981).

**Run
Root-Reinforcement
Model**

Root-Reinforcement Model Output

List of Species
Percent of Assemblage

Added cohesion due to roots, c_r kPa

References and Data Sources:

Pollen N. 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena* 69, 197-205.

Pollen N, Simon A. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41: W07025.

Protect the bank and/or bank-toe against *hydraulic erosion* by adding treatments (or select "own data" and add values below

Protection

Bank Protection: Bank Toe Protection:

Bank and bank-toe protection data table

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white box.

Bank and Bank-Toe Protection Descriptors		
Protection type	Description	Permissible shear stress (Pa)
1	No protection	-
2	Coir fiber	108
3	Geotextile (synthetic)	144
4	Jute net	22
5	Large Woody Debris	192
6	Live fascine	100
7	Plant cuttings	17
8	Rip Rap (D_{50} 0.256 m)	204
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	Own Data	<input type="text"/>

Data Sources:

Allen HH, Fischenich JC. 1999. *Coir geotextile roll and wetland plants for streambank erosion control*. EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-04). U.S. Army Engineer Research Development Center, Vicksburg, MS. (<http://el.erc.usace.army.mil>)

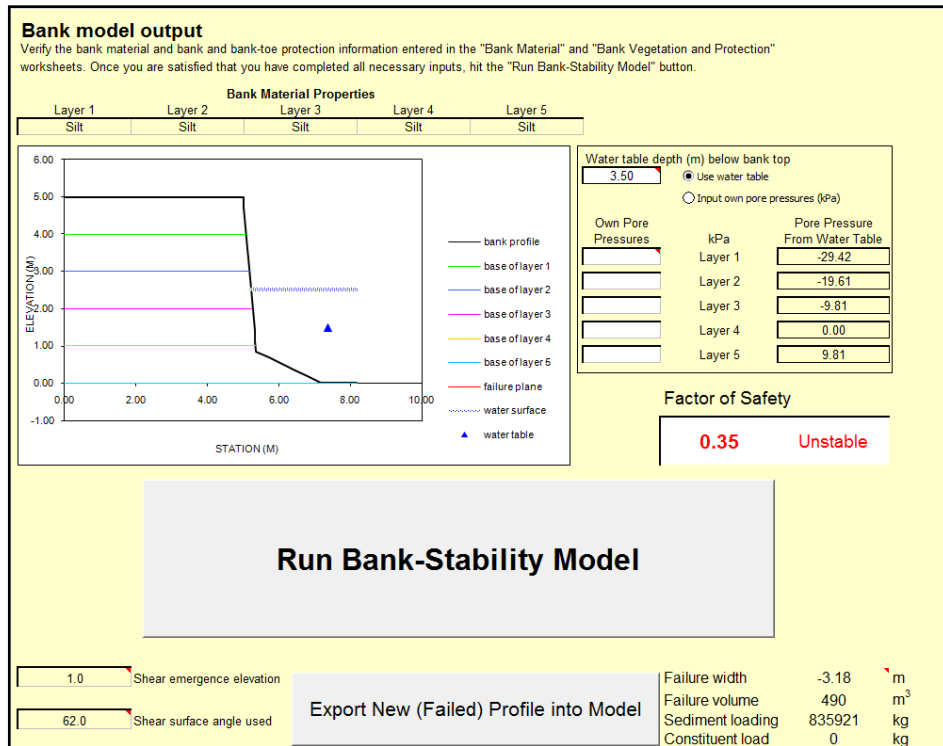
Austin DN, Theisin MS. 1994. *BMW extends vegetation performance limits*. *Geotechnical Fabrics Report*

Fuente: USDA-ARS

3.1.6. Módulo Bank Model Output (Salida del modelo de la banca). En este módulo, es en donde se visualizan los resultados del proceso de modelación efectuado, luego de haber ingresado los parámetros de flujo y geotécnicos que caracterizan al tramo de la corriente superficial bajo análisis. Es aquí donde se obtiene la valoración del Factor de Seguridad (Fs), objetivo principal del modelo BSTEM, permitiendo así estimar el grado de estabilidad de la margen, ya sea en condiciones naturales o luego de aplicar una eventual medida artificial de protección. En la figura 13 se observa el aspecto del módulo de salida.

56

Figura 17. Módulo de salida principal de BSTEM



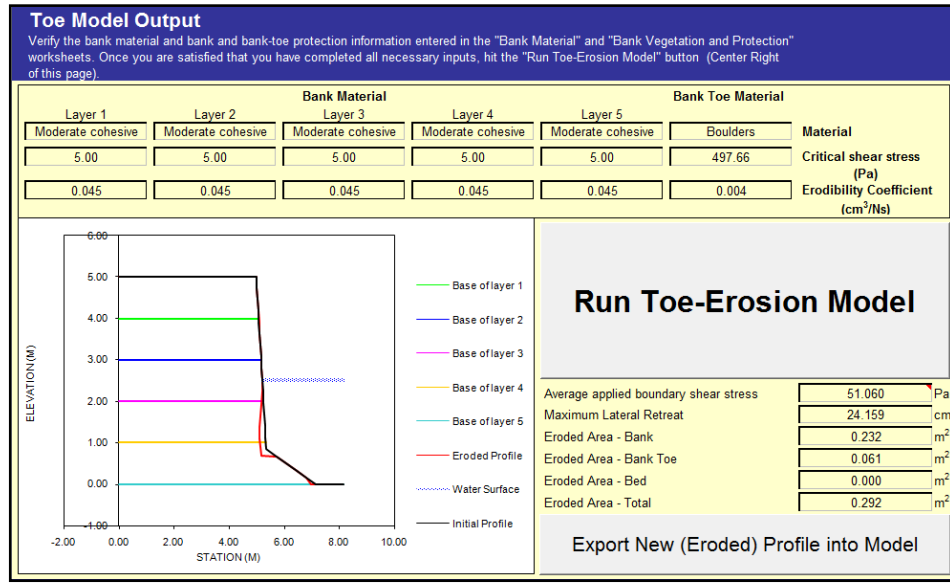
Fuente: USDA-ARS

Aquí también se informa sobre la cantidad de material (por volumen en m³, y como carga de sedimento en kg) aportada al flujo en el tramo, que el modelo calcula se desprendería de la margen como consecuencia de las condiciones que la desestabilizarían o provocarían su falla.

3.1.7. Módulo Toe Model Output (Salida del modelo del pie de la banca). De manera similar al anterior módulo, en este se visualizan los efectos de las condiciones de equilibrio que actúan sobre el pie del talud o de la banca, en función del coeficiente de erodabilidad y el esfuerzo crítico de corte que se definieron en el módulo de material de la banca (Bank Material). Se presenta información sobre el área transversal erodada (en m²) en el pie del talud, como

consecuencia de las condiciones de flujo impuestas por la lámina de agua que circula en el canal contemplado. En la figura 14 se observa el aspecto general de la interfase.

Figura 18. Salida del Modelo del pie de la banca



Fuente: USDA-ARS

Es importante destacar que en los módulos de salida de la banca y del pie de la banca es posible exportar, si se presenta falla o inestabilidad, las nuevas características de la sección transversal de la corriente superficial, con lo que opcionalmente se podrá reiniciar el proceso de forma iterativa, lo cual agrega la dimensión temporal al uso del modelo.

4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El río Cesar es una corriente de agua superficial que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta, en el departamento de la Guajira, discurre predominantemente en sentido Noreste – Suroeste por su valle aluvial, hasta llegar al río Magdalena atravesando previamente una gran expansión del cauce en una depresión del terreno que da forma a la ciénaga de Zapatosa.

El sector de estudio específicamente y en las Figuras 19 y 20 se observa un aspecto de las márgenes del río Cesar en la zona en cuestión y la localización del río se puede observar en la Figura 21.

Figura 19. Río Cesar, en el área de estudio



Fuente: El Autor

Figura 20. Río Cesar, en el área de estudio

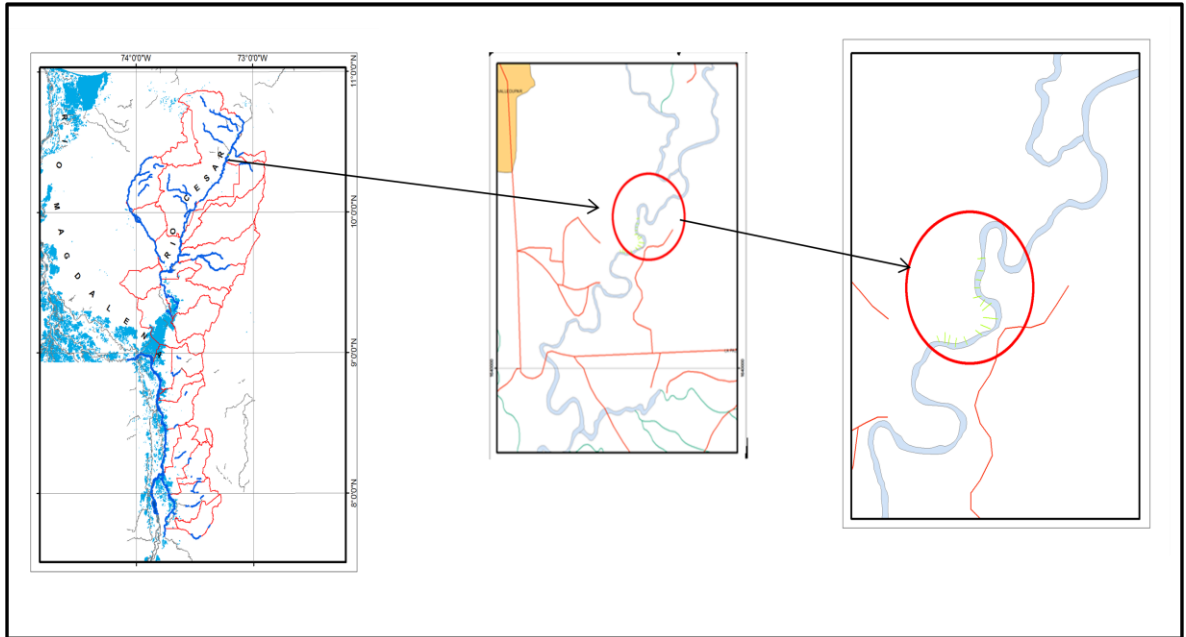


Fuente: El Autor

4.1. TOPOGRAFÍA.

Desde el punto de vista topográfico, la cuenca del río abarca 3 departamentos (Guajira, donde el cauce principal nace a una altura de 2584 metros sobre el nivel del mar, Magdalena y Cesar) cubriendo una extensión superficial de 17812 kilómetros cuadrados. El punto más alto de la cuenca se ubica en la Sierra Nevada de Santa Marta, en el Pico la Reina (5440 metros sobre el nivel del mar) y corresponde a la subcuenca del río Guatapurí, el cual abastece, entre otras localidades, a la ciudad capital del departamento, Valledupar. El río Cesar recorre la llanura aluvial del mismo nombre, hasta alcanzar su punto de desembocadura en cercanías a la ciudad de El Banco en el departamento del Magdalena, luego de atravesar la Ciénaga de Zapatosa.

Figura 21. Zona de estudio en el Río Cesar.



Fuente: El Autor

La zona bajo estudio está constituida por un tramo del río Cesar localizado al paso de esta corriente por la zona suroriental de la ciudad de Valledupar, a una altitud de aproximadamente 115 metros sobre el nivel del mar, entre las coordenadas planas 1'095.265E; 1'643.710N y 1'094.755E; 1'642.900N (Datum Magna Sirgas), en inmediaciones de los predios El Guamo (margen izquierda) y El Carmen (margen derecha).

El tramo del río Cesar en cuestión fue seleccionado para la aplicación del modelo BSTEM, dado que ha experimentado cambios relativamente acentuados en su alineamiento a lo largo de al menos los últimos 20 años, y está caracterizado por poseer numerosos meandros y rectas conectándolos. En la Figura 22 (satelital) se observa el aspecto del tramo fluvial en que se ha desarrollado el trabajo de aplicación.

Figura 22. Río Cesar, sector Las Garzas. Tramo objeto en que se ubica la zona de estudio.



Fuente: Google Earth (Google Inc.)

La zona aledaña a la corriente ha sido dedicada históricamente a la ganadería extensiva, y cultivo de pastos, aunque se tiene la presencia de una cobertura arbórea dispersa, conformada por individuos de gran porte (10 a 20 metros de altura), aunque en la margen aumenta su densidad. Existen algunos caminos antiguos de acceso al área, utilizados por los propietarios de los predios rurales de la zona.

El cauce principal del río Cesar a esta altura posee un ancho promedio de 60 a 70 metros, aun cuando hay secciones con más de 100 metros de una orilla a la otra, y otras de menos de alrededor de 50 metros, mientras que la profundidad de la sección oscila entre los 4 y 5 metros.

El patrón de drenaje del río en este sector es sinuoso, con curvas amplias, de aproximadamente 90 a 150 metros de radio, distanciadas entre 130 y 500 metros entre sí y sólo existen dos afluentes de importancia, aunque están ubicados aguas

arriba del sector (ríos Guatapurí y Pereira), incidiendo en la configuración o alineamiento del cauce principal una vez se incorporan a este. Los taludes o márgenes del cauce principal están bien definidos, aunque hay tramos en los que se presentan desprendimientos de suelo que provocan la ampliación de la sección en sentido horizontal, tal como se ilustra en la Figura 23, para la zona estudiada.

Figura 23. Desprendimiento de material de la banca del río Cesar (margen derecha)



Fuente: El Autor

4.2. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, el río Cesar recorre predominantemente la formación llanura aluvial (Qlla), aunque en su nacimiento (Sierra Nevada de Santa Marta) y en su desembocadura (depresión momposina) se tiene la presencia de otras más.

hasta de 3 m de diámetro, compuestos en su mayor parte por rocas intrusivas de grano medio a grueso, embebidos en una matriz arenosa. En general, el espesor de estas terrazas no es mayor de 25 m y, en algunos casos, puede tener de 10 a 15 m.”. Con relación a estas formaciones, el río Cesar discurre por el borde de la terraza baja.

4.2.3. Zona media – curso medio – alto. Abanicos aluviales (Qcal). Esta formación no tiene una presencia predominante, aunque sí existen unidades que se destacan por su cercanía al cauce principal del río Cesar, tal como el caso del abanico aluvial del río Guatapurí (Sierra nevada de Santa Marta) y, en menor medida, los de los ríos Manaure y Chiriamo (Serranía de los Motilones). Está formada por cantos y bloques angulares a subredondeados hasta de 3 m de diámetro, compuestos en su mayor parte por fragmentos de rocas intrusivas de grano medio a grueso, color rosado, embebidos en una matriz arenosa. En la zona de estudio, el abanico aluvial del río Guatapurí entra – en algunos tramos cortos – en contacto directo con la margen derecha del cauce principal del río Cesar.

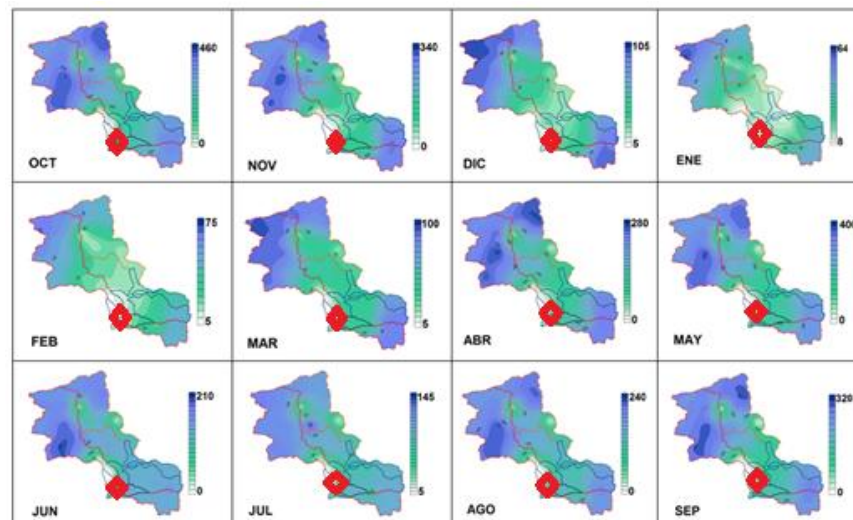
4.2.4. Zona media a baja – curso medio a bajo del río Cesar. Llanura aluvial (Qlla). Es la unidad que predomina en la cuenca del río Cesar, constituyendo el valle central del mismo, y aproximadamente el 50% a 60% del territorio departamental.. Estos sedimentos, de espesores variables, se caracterizan por una granulometría fina, compuesta por arenas, limos y arcillas que generalmente están cubiertas por un delgado nivel de gravas finas de algunos centímetros de espesor.

En el norte del departamento, entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá, el río Cesar es el principal aportante junto con los afluentes que vienen de estos dos accidentes topográficos.” (subraya fuera de texto). De otra parte “En

Guatapurí y Seco que nacen en la Sierra nevada de Santa Marta y las de los de los ríos Chiriaimo, Marquezote, Pereira, Mocho y Chiriaimo, que nacen en la Sierra de Los Motilones.

El comportamiento de las precipitaciones es predominantemente bimodal, con los valores pico ocurriendo en los meses de mayo (400 mm) y octubre (460 mm), mientras que los de menor precipitación entre estos meses, son Enero (64 mm) y Julio (145 mm). La distribución espacial a nivel mensual es como se muestra en la Figura 26, en la que el punto de color rojo indica la localización del tramo analizado en el presente documento

Figura 26. Distribución espacial de la Precipitación media mensual.



Fuente: CORPOCESAR, 2011, p 173

En cuanto al régimen de temperaturas, en la cuenca alta del río se experimentan máximos en el rango de 28 (Octubre) a 30 (Febrero a Abril y Junio a Septiembre) grados centígrados, y mínimos por debajo de 0 grados centígrados (en los picos

de la Sierra Nevada de Santa Marta). La humedad relativa (medida solamente en las estaciones ubicadas en la parte plana de la cuenca, cerca a Valledupar) oscila entre 64% y 79%, en tanto que el brillo solar mensual está en el rango de 213 a 283 horas.

Para la velocidad del viento sólo se dispone de datos tomados en el Aeropuerto Alfonso López de Valledupar (cerca a la zona de estudio) en donde oscila entre 2.7 m/s (Septiembre) y 5.8 m/s (Febrero).

Así, la conjunción de los factores antes mencionados, inciden para que se presenten las siguientes unidades climáticas en la cuenca superior del río Cesar, de acuerdo con la Clasificación de Caldas – Lang (CORPOCESAR, 2011): Cálido Árido, Cálido Semiárido, Cálido Semihúmedo, Templado Húmedo, Templado Superhúmedo, Frío Húmedo, Frío Superhúmedo, Páramo Bajo Superhúmedo, Páramo Alto Superhúmedo y Nival, lo cual hace de la cuenca del río Cesar una de las pocas que, en el país, posee todos los climas.

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca aporta caudales medios mensuales de 3.8 m³/seg (Febrero) y 78 m³/seg (Octubre), medidos en la estación limnigráfica de IDEAM denominada Puente Salguero, localizada justo aguas abajo de la zona de estudio (caudal medio mensual es la media aritmética de los caudales promedios diarios para cada mes). En esta estación se tiene la influencia del vertimiento de las aguas residuales de la ciudad de Valledupar tratadas en la planta El Salguero, por lo que es conveniente descontar lo allí aportado para conocer el caudal que circula por el río inmediatamente aguas arriba de la estación Salguero.

Los caudales medios que son registrados por el IDEAM en la estación Puente Salguero (2803703) se muestran en la Tabla 1. Considerando que los eventos que causan inestabilidad en las márgenes de una corriente superficial se presentan en temporadas durante las cuales se suceden altas precipitaciones que generan aumentos extremos de nivel y, por ende, de la cantidad de agua que circula por la red de drenaje y que finalmente llega al cauce principal, se ha tomado la información que sobre caudales extremos se ha evaluado para esta corriente (CORPOCESAR, 2011). De esta manera, el caudal mensual del río Cesar, para diversos períodos de retorno, a la altura de la estación Puente Salguero es como se indica en la Tabla No. 2.

Como se ha citado, el sector bajo estudio en el presente documento se ubica aguas arriba de la estación El Salguero operada por IDEAM. En esta estación se tiene la influencia del vertimiento de aguas residuales del sistema de tratamiento de aguas residuales El Salguero, de la ciudad de Valledupar, operado por la Empresa de Servicios Públicos de Valledupar S.A. E.S.P., el cual en promedio es de 700 litros/segundo (CORPOCESAR), con lo que el caudal que circula por el cauce del río Cesar aguas arriba de la estación Salguero es el que se indica en la Tabla 3.

4.4. HIDRÁULICA.

El modelo BSTEM se aplica a secciones transversales de una corriente superficial para el cálculo del potencial de retroceso de la margen, debido a la erosión o a fallas de estabilidad, como consecuencia de la interacción de fuerzas actuantes (debidas al flujo y al peso del suelo de la orilla) y fuerzas resistentes (debidas a las propiedades intrínsecas geotécnicas del suelo y al peso de la columna de agua (del río sobre la margen). Esencialmente, BSTEM trabaja con algunas de las

propiedades geotécnicas del suelo (ver numeral 3.1.4.) y con las propiedades de flujo del canal o cauce de la corriente, específicamente, la pendiente del canal y la profundidad de flujo, entre otros aspectos.

Para el caso bajo análisis se seleccionó un tramo del río Cesar, a su paso por la zona suroriental de la ciudad de Valledupar, el cual ha sido descrito de manera general en el numeral 3. se efectuó el levantamiento topográfico de la planimetría y la altimetría de 1500 metros lineales del cauce principal del río, con secciones espaciadas 100 metros en promedio, con el objetivo de caracterizar la geometría del río en este sector, y tener así uno de los insumos para la aplicación del modelo (pendiente longitudinal y de las márgenes).

La información reseñada sirvió para llevar a cabo la modelación hidráulica que generara los niveles predominantes del río y así disponer de la lámina de agua que estaría actuando sobre las márgenes como eventual factor detonante, de los procesos de inestabilidad de las mismas (otro de los insumos de BSTEM).

La modelación se desarrolló con ayuda del programa de computación HEC-RAS², el cual es de autoría del Instituto de Recursos Hídricos del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica. HEC RAS permite realizar, entre otros, análisis unidimensionales de flujo permanente, flujo no permanente y transporte de sedimentos.

² <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Tabla 1. Caudales medios mensuales del río Cesar medidos en la estación Puente Salguero.

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES																			
VALORES MEDIOS MENSUALES DE CAUDALES (m3/seg)																			
FECHA DE PROCESO:		10/20/2010					ESTACION: 2803703 PTE SALGUERO												
LATITUD: 1023 N		TIPO EST: LG			DEPTO: CESAR														
LONGITUD: 7314W		ENTIDAD: 1 - IDEAM			MUNICIPIO: VALLEDUPAR			FECHA-INSTALACION 1962-DIC											
ELEVACION: 0113 m.s.n.m		REGIONAL: 5 MAGDALENA			CORRIENTE: CESAR			FECHA-SUSPENSION											
ANO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL				
1959	2	1	2,540	1,370	1,040	8,850	19.11	26.19	6	15.06	26.77	26	46.52	6	45.51	20.95	6	20.01	
1960	2	1	3,460	3,600	6,240	11.77	35.22	42.18	6	23.49	51.22	46	48.91	6	39.79	62.97	6	31.23	
1961	2	1	5,310	3,120	2,350	10.85	25.42	37.79	6	37.62	22.93	53	69.27	6	103.8	41.32	6	34.44	
1962	2	1	4,187	2,271	2,450	13.62	50.47	49.41	6	32.07	41.87	37	62.35	6	43.51	19.98	6	29.97	
1963	4	9	6,900	2,500	2,270	6	33.55	64.44	47.76	26.53	23.29	72	69.75	6	34.37	36.31	6	36.31	
1964	2	1	3,670	4,030	2,170	7.870	42.18	66.56	6	43.91	34.55	42	42.67	6	24.05	26.19	6	28.32	
1965	4	9	3,138	3,101	0.528	0.54	25.16	20.32	2,816	10.01	31	37.44	52.65	22.19	17.39				
1966	4	9	4,317	1,436	0.348	5.809	43.14	91.93	51	22.38	43	81.27	102.5	116.1	6	46.91			
1967	4	9	42.57	14.37	5.874	7.564	11.79	17.09	10.73	7.180	13	24.95	50.91	16.23	6	18.5			
1968	2	1	2,270	1,590	1,060	6,380	48.75	21.28	6	5,030	12.32	46	74.1	45.98	11.5	23			
1969	2	1	4,268	2,125	2,177	38.6	55.26	92.57	33.14	57.44	69	189.3	214.7	71.56	69.14				
1970	2	1	55.64	14.6	9.377	6,743	39.37	38.91	36.81	55.71	75	86.79	113.8	103.7	53.02				
1971	2	1	29.43	10.66	6.210	8,327	71.32	16.42	6,484	16.01	37	83.25	68.07	12.29	30.47				
1972	2	1	8,000	4,933	4,921	6	32.03	72.89	61.76	12.97	25.51	31	40.98	1	14.74	5,700	26.28		
1973	2	1	2,168	1,080	1,313	6	5,956	1,984	14.05	6,777	30.58	96	111	114.7	24.11	34.14			
1974	2	1	8,548	3,350	2,294	2,567	73.38	21.29	6,145	18.62	51	66.95	144	27.24	35.45				
1975	2	1	9,700	4,836	2,813	0.997	16.69	11.08	19.77	16.54	41	84.27	123.6	54.39	32.15				
1976	2	1	17.86	6,538	3,545	1	10.21	16.39	25.5	6,716	8,481	13	85.18	46.67	4,900	1	20.43		
1977	2	1	1,745	0,946	0,723	1,093	37.16	41.48	3,135	4,671	12	43.81	80.23	9,077	19.63				
1978	2	1	2,323	2,864	5,161	69.56	46.01	26.94	13	15.41	20	48.17	40.81	10.46	25.06				
1979	2	1	4,281	2,529	1,803	11.08	52.77	80.19	21.26	18.98	92	131.6	8	133.1	35.66	1	48.75		
1980	2	1	16.16	10.05	6,077	8,947	31.31	27.73	12.82	27.48	21	57.19	38.25	12.8	1	22.51			
1981	2	1	7,252	4,975	6,775	6	47.12	232.8	142	1	40.81	43.48	70	125.6	6	110.9	27.45	7	71.59
1982	2	1	4,000	3,100	2,050	6	20.46	205.8	166.8	6	30.3	26.23	21	78.8	6	16.3	8,795	48.66	
1983	2	1	5,200	1,221	3,729	26.55	50.13	41.26	1	20.1	29.04	24	42.93	1	38.11	6,297	1	24.04	
1984	2	1	2,169	2,297	1,368	2,190	5,232	6,873	1	9,474	14.15	65	76	1	113.6	14.26	1	26.05	
1985	2	1	5,226	2,732	2,026	3,967	26.43	31.38	1	4,545	9,829	20	94.01	1	72.15	38.73	1	25.94	
1986	2	1	6,800	6,768	6,748	1	24.96	79.58	78.52	1	9,271	10.18	42	117,828	8	34.72	9,555	1	35.58
1987	2	1	5,332	3,382	3,558	20.47	101.7	61.07	1	23.84	26.85	24	147.1	8	108.6	46.47	1	47.72	
1988	1	1	13.22	5,055	4,219	14.69	38.47	52	1	27.75	88.64	157	181.1	8	152.3	39.53	64.51		
1989	1	1	15.38	8,896	9,226	5,237	32.77	22.1	10.98	21.47	54	41.12	32.24	61.12	8	26.25			
1990	1	1	6,123	3,861	2,448	13.51	55.53	27.99	6	14.97	29	38	145.2	8	113.3	39.72	1	40.82	
1991	1	1	10.07	6,439	5,897	1	5,520	18.73	10.36	1	5,848	10.13	27	41.1	8	29.18	7,177	1	14.77
1992	1	1	4,584	3,972	2,777	4,153	28.35	20.24	1	13.74	13	40	34.53	18.97	10.24	1	16.23		
1993	1	1	4,694	3,293	2,355	9,840	79.87	32.73	11.09	20.39	38	20.91	1	40.09	16.69	23.31			
1994	2	1	9,600	7,700	8,200	14.7	23	14.7	6,600	9,100	29	70.8	8	47.6	17	21.49			
1995	1	1	18.1	4,700	8,100	11.5	28.9	53.4	8	18.6	63.6	63	128	8	53.5	16.2	1	39	
1996	1	1			4,500	3	37.1	36	36	39.1	45.5	42	62.5	8	75.2	23.8	37.34		
1997	1	1	8,736	4,578	3,028	11.06	30.21	30.1	10.95	5,186	20	*	24.59	4,962	13.96				
1998	1	1	2,726	3,543	2,347	13.19	63.3	31.92	1	31.87	32.05	51	49.53	8	26.84	66.7	8	31.27	
1999	1	1	8,322	5,960	4,607	10.14	20.12	20.5	19.44	20.29	82	112	121.5	79.42	42.05				
2000	1	1	12.62	6,025	4,106	4,227	32.56	14.06	1	11.34	11.1	20	45.72	72.31	16.31	20.85			
2001	1	1	5,318	2,962	3,509	2,874	52.81	11.46	8,151	10.94	13	40.58	70.4	13.15	19.64				
2002	1	1	4,680	2,573	2,224	4,665	*	53.33	8	5,514	10.06	20	31.59	17.15	4,869	14.24			
2003	1	1	2,297	1,857	2,239	28.24	15.07	37.26	11.4	12.04	49	98.62	123.8	41.09	35.26				
2004	1	1	6,399	3,221	2,449	10.89	63.64	18.04	10.95	11.17	42	57.42	8	118.1	13.73	29.8			
2005	1	1	5,339	3,284	2,547	8,845	39.47	59.77	42.48	16.57	30	120.5	8	109	32.83	39.18			
2006	1	1	8,787	5,058	4,985	19.91	90	33.88	18.44	20.36	21	38.13	29.4	9,965	24.99				
2007	1	1	3,963	2,889	10.24	1	34.88	147.5	105.6	3	22.09	23.81	46	121.8	3	87.83	15.68	51.89	
2008	1	1	5,051	3,498	3,365	1	7,885	29.42	26.37	20.86	23.13	42	123.8	8	83.93	25.36	32.85		
MEDIOS			8,785	4,403	3,807	13.85	51.2	42.36	18.56	24.11	43	78.26	73.06	29.02	32.51				
MAXIMOS			55.64	14.6	10.24	69.56	232.8	166.8	51	88.64	157	189.3	214.7	116.1	232.8				
MINIMOS			1,745	0,946	0,348	0,54	1,984	6,873	2,816	4,671	12	20.91	14.74	4,869	0,35				

Fuente: CORPOCESAR, p 379.

Tabla 2 Caudales medios mensuales, estación Salguero de IDEAM, río Cesar. m³/s

Tr	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
2	6.2	4.1	3.6	12.3	42.6	37.1
25	26.3	13.1	10.1	51.9	166.8	130.5
50	31.3	15.3	11.7	61.8	197.6	153.7
100	36.3	17.6	13.3	71.5	228.2	176.7
250	42.8	20.5	15.4	84.4	268.5	207
500	47.7	22.7	16.9	94.1	299	229.8
Tr	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2	16.3	22.2	40.1	68.5	64.6	26.5
25	52	72.4	118.6	186.3	193.6	101.2
50	60.8	84.8	138.1	215.5	225.7	119.7
100	69.6	97.2	157.4	244.6	257.5	138.1
250	81.2	113.4	182.9	282.8	299.4	162.4
500	89.9	125.7	202.1	311.7	331	180.7

Fuente: CORPOCESAR, p. 380.

Tabla 3. Caudales medios mensuales, estación Salguero de IDEAM, río Cesar, descontando el caudal de vertimiento del STAR “El Salguero”. m³/seg

Tr	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
2	5.5	3.4	2.9	11.6	41.9	36.4
25	25.6	12.4	9.4	51.2	166.1	129.8
50	30.6	14.6	11	61.1	196.9	153
100	35.6	16.9	12.6	70.8	227.5	176
250	42.1	19.8	14.7	83.7	267.8	206.3
500	47	22	16.2	93.4	298.3	229.1
Tr	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2	15.6	21.5	39.4	67.8	63.9	25.8
25	51.3	71.7	117.9	185.6	192.9	100.5
50	60.1	84.1	137.4	214.8	225	119
100	68.9	96.5	156.7	243.9	256.8	137.4
250	80.5	112.7	182.2	282.1	298.7	161.7
500	89.2	125	201.4	311	330.3	180

Fuente: El Autor

De manera específica, el módulo de flujo permanente tienen el propósito de calcular perfiles de la superficie de agua para flujo permanente gradualmente

variado (caudal constante con profundidad variable a lo largo del canal). También, el sistema permite manejar una red completa de canales, sistemas dendríticos o un cauce de río, en régimen subcrítico, supercrítico o una mezcla de perfiles de regímenes de flujo. Para cumplir con lo anterior, se llevó a cabo en forma previa el levantamiento topográfico en mención, durante los días 7 y 8 de agosto de 2013. El resultado del mismo se encuentra en el Anexo A

El equipo utilizado fue nivel de precisión marca Topcon, jalones, mira, receptor del sistema de posicionamiento Garmin 60CSx, cinta métrica (50 metros) y estacas de madera. Se trazó un total de 15 secciones transversales, distribuidas en forma aproximadamente uniforme a lo largo del tramo, las que una vez calculada la cartera de nivelación correspondiente, se procedió a graficar en el software HEC-RAS.

Así mismo, se elaboró la cartografía en planta, para mostrar la ubicación de tales estaciones. Si bien se enumeraron en forma ascendente inicialmente (1 a 15), para su introducción en HEC-RAS dicha identificación se hace al contrario y cada sección es llamada “estación”, así, la sección 1 se numera en este caso como la estación 15, la sección 2 se numera como la estación 14 y así sucesivamente.

Como dato de entrada para HEC-RAS se tomó la siguiente información: Caudales medios mensuales (Tabla 2) del río a su paso por el tramo específico de estudio. En este caso se seleccionaron los períodos de retorno de 2 y 50 años, las secciones transversales al cauce principal del río Cesar y la configuración georreferenciada de las mismas.

En la Figura 27 se puede observar la disposición espacial en planta de las 15 estaciones consideradas para el presente documento. Para la aplicación del modelo BSTEM se seleccionó la estación 14, segunda de aguas arriba hacia aguas abajo, localizada en un tramo rectilíneo, entre dos meandros amplios del río. Se tomó esta sección dado que dicho tramo, a pesar de ser esencialmente rectilíneo, sí ha estado experimentando cambios en su conformación morfológica (ver capítulo 6) y porque en sus inmediaciones se localiza como componente de la infraestructura vial proyectada para la región norte del Cesar, un puente vial que nunca ha estado en funcionamiento (dado que los propietarios de los predios ribereños no han concertado con el Gobierno Nacional los términos de negociación), y que comunicaría a los centros urbanos de Valledupar y La Paz (Figura 28). Si el río continúa experimentando cambios en las márgenes, el puente podría continuar siendo afectado en su estructura de soporte, parcialmente socavada tal como se observa en la Figura 29, así como perder utilidad al quedar eventualmente aislado por estrangulamiento del meandro cercano aguas arriba (Capítulo 6).

Figura 27. Disposición de las estaciones (secciones transversales) del sector de estudio



Fuente: El Autor

Figura 28. Puente vehicular, al inicio del tramo de estudio en el presente documento



Fuente: El Autor

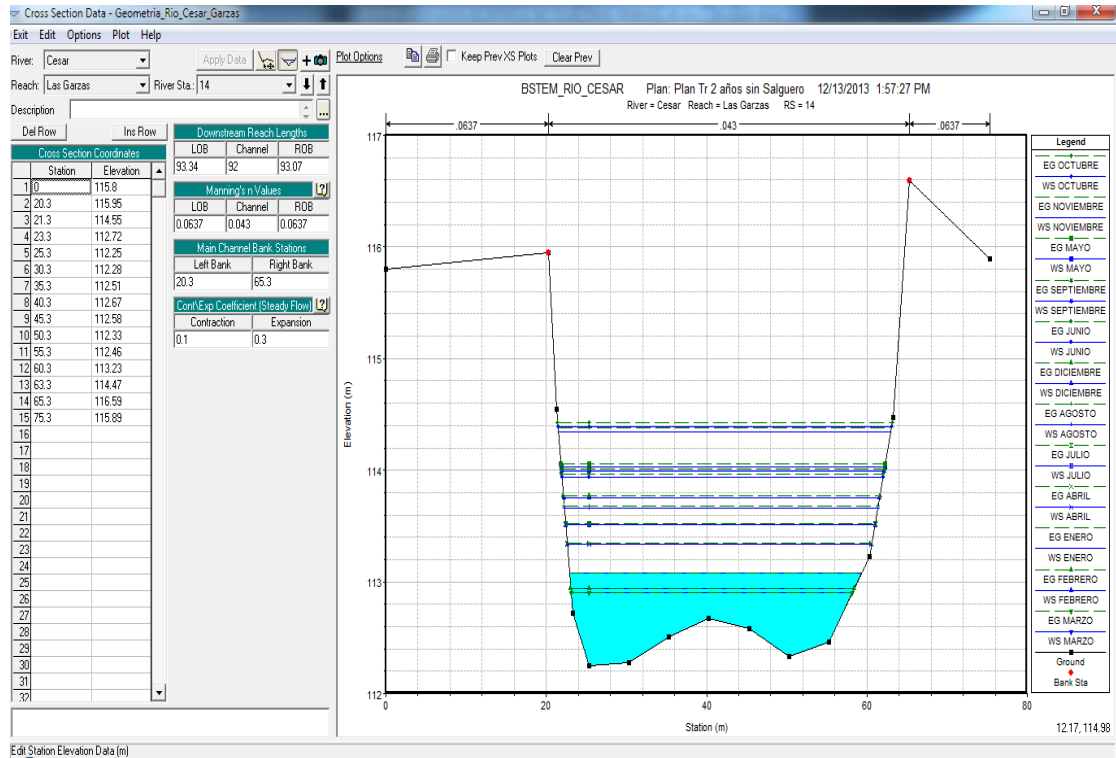
Figura 29. Aspecto del estribo izquierdo del puente ubicado en el sector Las Garzas, sobre el río Cesar



Fuente: El Autor

La sección o estación 14, tal como se ingresó a HEC-RAS se puede apreciar en la Figura 30. Las demás estaciones pueden encontrarse en el Anexo A

Figura 30. Definición de la estación 14 para su ingreso en HEC-RAS.



Fuente: El Autor

Como se observa, es preciso definir tanto la geometría de la sección transversal con base en el levantamiento topográfico, como el coeficiente de rugosidad de la superficie de flujo (banca y lecho) de acuerdo con el parámetro fijado en 1889 por el ingeniero irlandés Robert Manning.

En general, al examinar las secciones transversales levantadas se establece que la banca del río Cesar, en el sector bajo estudio, posee una altura que oscila

alrededor de los 4 a 4.5 metros, aspecto este principal para el análisis en el modelo BSTEM. En la figura 9, se presentan en forma gráfica las 15 secciones transversales o estaciones, según se obtuvo en el levantamiento topográfico y se analizó en HEC-RAS En cuanto a la rugosidad de las secciones del tramo, que se expresa a través del coeficiente definido por el ingeniero Robert Manning (1889), luego de examinar en campo su composición se determinó que para las bancas este tiene un valor de 0.0637 mientras que para el lecho tiene un valor de 0.043. El cálculo para la obtención de estos valores se basó en la metodología de Cowan (1956) según se encuentra en la documentación disponible para el tema (Arcement et al., 2005, p. 9), y se muestra a continuación:

$$n=(n_b +n_1 +n_2 +n_3 +n_4)*m, \text{ donde} \quad (13)$$

- n_b =un valor básico de n para canales rectos, uniformes, suaves, en materiales naturales
- n_1 =factor de corrección para el efecto de las irregularidades de la superficie
- n_2 = factor de corrección para las variaciones en la forma y tamaño de la sección transversal del canal
- n_3 =valor por obstrucciones
- n_4 =valor por vegetación y condiciones de flujo
- m =factor de corrección por meandros del canal

De la información que se tiene como criterios para cada factor de corrección se tiene lo siguiente (Tabla 4), tanto para el canal principal como para la llanura de inundación (parte externa del canal principal) a partir del conocimiento de campo:

Tabla 4 Factores de corrección del coeficiente de Manning

Factor	Canal	Llanura de inundación
nb	0.03	-
n1	0.006	0.003
n2	0	-
n3	0.003	0.01
n4	0.01	0.03
m	1.3	1
n	0.0637	0.043
S= Ls/Lrecta	17642.43	1.96196601
	8992.22	
S > 1.5. Sinuosidad severa		

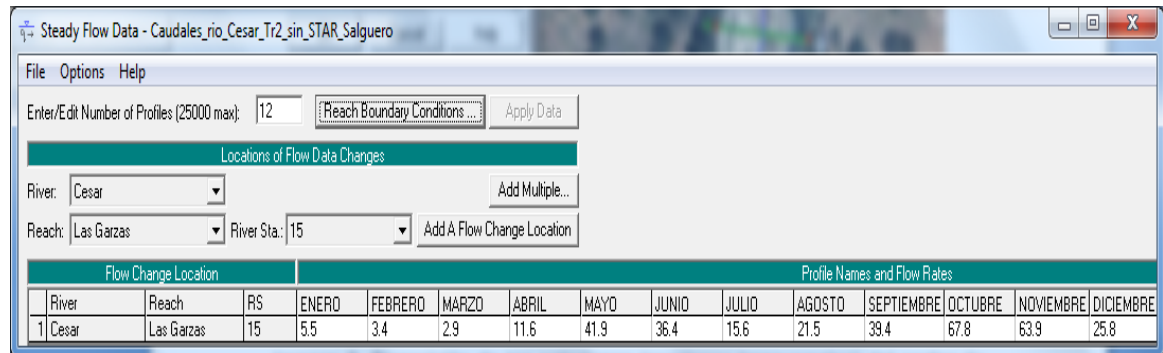
Fuente: El Autor

La sinuosidad del canal principal de una corriente se basa en la medición de la longitud total a lo largo de la línea de flujo entre dos puntos y la longitud medida en línea recta entre tales puntos. Para el caso del área de estudio, se tomó un tramo de poco más de 17 kilómetros, obteniéndose un factor de 1.96, que indica un grado severo de sinuosidad. Es importante destacar que este parámetro tiene una gran influencia en el comportamiento hidráulico de una corriente, en especial en el grado de incidencia del flujo sobre las márgenes del canal principal.

Los caudales seleccionados (Tabla 3) son característicos del flujo permanente gradualmente variado, por lo que se ingresan en el módulo *Steady Flow Data* (Datos de Flujo Permanente, Figura 31), definiendo como condiciones de frontera la pendiente aguas abajo del tramo, para lo cual se tomó la pendiente promedio a lo largo de los 1500 metros lineales del levantamiento topográfico, siendo esta entre 0,0011 y 0.0012 (Figura 32)-. Como se mencionó, el coeficiente de

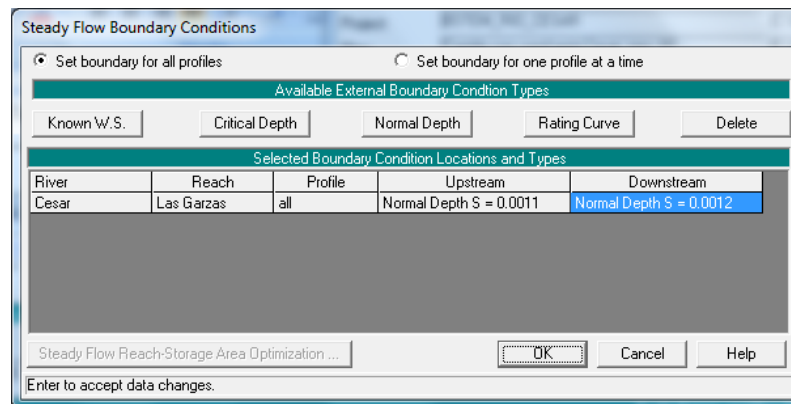
rugosidad de Manning se evaluó siguiendo la metodología definida por Cowan (Arcement et al., 2005), de la cual se obtuvo un valor de 0.0637 para la planicie de inundación y 0.043 para el canal principal.

Figura 31. Caudales para la modelación de niveles de agua.



Fuente: El Autor

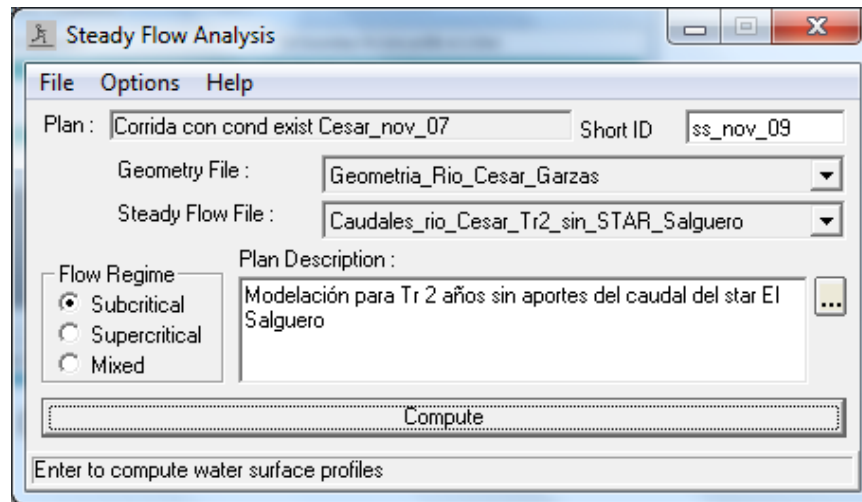
Figura 32. Condiciones de frontera (pendiente del lecho)



Fuente: El Autor

Dadas las condiciones naturales del cauce, en él se sucede flujo subcrítico, por lo que se asignó dicha condición para efectuar la corrida del programa HEC-RAS (Figura 33).

Figura 33. Asignación del régimen de flujo para la corrida y obtención de niveles de agua



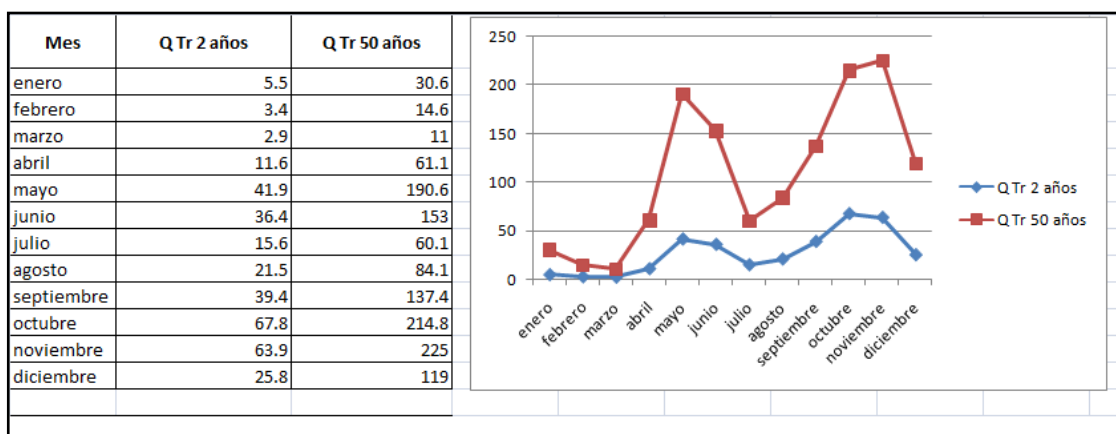
Fuente: El Autor

Al procesar en HEC-RAS, la información de caudales extremos para los períodos de retorno de 2 y 50 años, abarcando un período anual (12 meses), se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 34 a 37, descriptivas de las condiciones del régimen hidráulico en condiciones extremas para períodos de retorno de 2 y 50 años, para el caso de la estación 14. En estas se observa que los niveles de agua que serían alcanzados dentro del canal principal del río Cesar a la cota de la superficie de agua de la estación 14 en el sector Las Garzas, están en el rango de 112.91 msnm a 114.39 msnm para los meses de Marzo y Octubre respectivamente con Tr 2 años, y de 113.32 msnm a 116.18 msnm para los meses de Marzo y Noviembre respectivamente para Tr 50 años, con lo que las velocidades de flujo características de estos flujos alcanzarían máximos de 0.93 m/seg (Octubre) para Tr 2 años y 1.49 m/seg (Noviembre) para Tr 50 años.

También, se obtiene de la modelación con HEC-RAS que se generarían hidráulicamente esfuerzos de corte global máximos en el lecho, de 13.26 N/m²

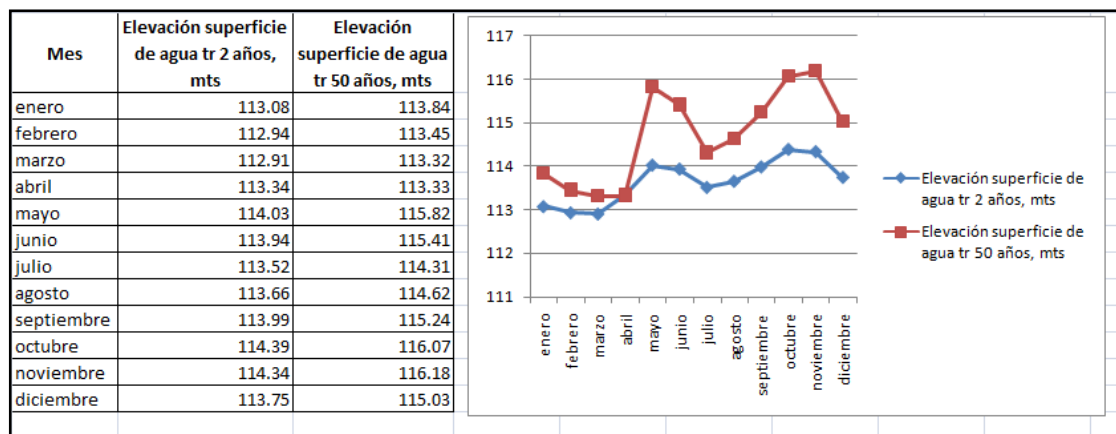
(Octubre) para Tr 2 años y 27 37 N/m² (Noviembre) para Tr 50 años, seguidos de un segundo pico en el mes de mayo en ambos casos, lo cual indica que es en estas épocas en las que cabría esperar mayores posibilidades de falla de las márgenes.

Figura 34. Caudales extremos, Tr 2 años y 50 años, sector Las Garzas del río Cesar



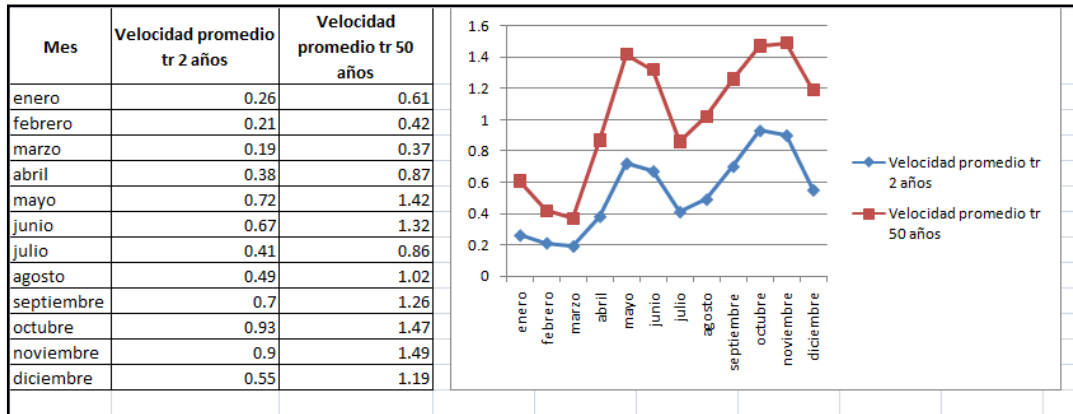
Fuente: El Autor

Figura 35. Elevación del nivel de agua, para la estación 14, Tr 2 años y 50 años, sector Las Garzas del río Cesar



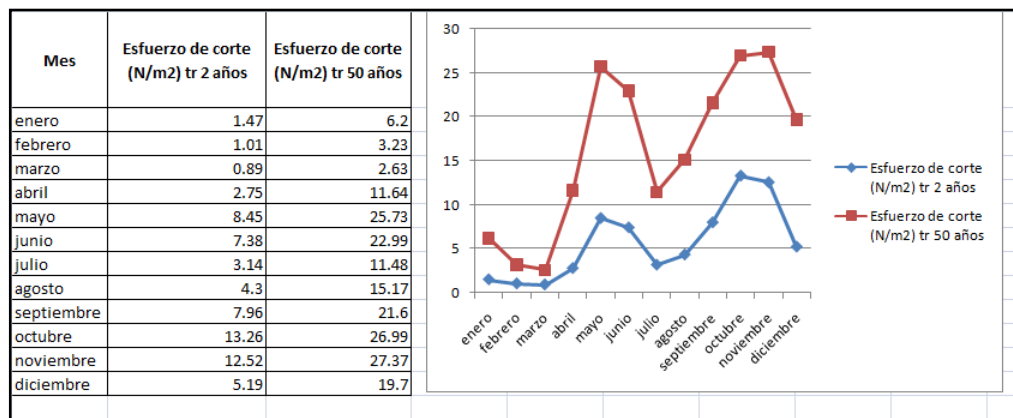
Fuente: El Autor

Figura 36. Velocidades de flujo promedio, Tr 2 años y 50 años, sector Las garzas del río Cesar



Fuente: El Autor

Figura 37. Esfuerzo de corte promedio en el lecho, Tr 2 años y 50 años, sector Las garzas del río Cesar



Fuente: El Autor

El resultado obtenido con el procesamiento en HEC-RAS se muestra en el Anexo A, en donde se puede ver la totalidad de los perfiles (transversales y longitudinales) generados con la información de entrada anteriormente reseñada.

4.5. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS SUELOS.

Las propiedades de interés para el caso de aplicación del modelo BSTEM son la cohesión efectiva, el ángulo efectivo de fricción interna, la presión de poros, los cuales inciden en el valor de la resistencia del suelo al esfuerzo de corte, T_f , (ecuación 1). Existen varios métodos para levantar información acerca de estas propiedades geotécnicas, siendo estos esencialmente el muestreo en campo y medición en ensayos de laboratorio y el uso de correlaciones a partir de algunos parámetros del suelo obtenidos en campo.

Para el uso de correlaciones se ha aplicado en el presente trabajo, un modelo desarrollado por otros investigadores (González, 1999) para la obtención de las propiedades geotécnicas del suelo, junto a datos de campo tomados en la zona de estudio por agencias especializadas del gobierno y el autor del presente documento.

Para el área de estudio se dispone de una serie de resultados de sondeos para caracterización granulométrica y de ensayos de penetración estándar (SPT), realizados para la compañía Transportadora de Gas Internacional (TGI), en ambos márgenes del río Cesar. TGI opera el gasoducto central Ballenas – Barrancabermeja, el cual posee un ramal que distribuye gas natural a la ciudad capital del departamento del Cesar.

Debido a la restricción en el carácter de la información, la empresa citada solicitó al autor sólo hacer mención de los resultados de la caracterización de suelos, no habiendo facilitado documentación distinta a la constituida por los resultados de la caracterización granulométrica, un plano en planta a escala muy general y un

estudio comparativo de fotografías aéreas del área del proyecto (ambos tamaño carta), no permitiendo la publicación de los datos del SPT.

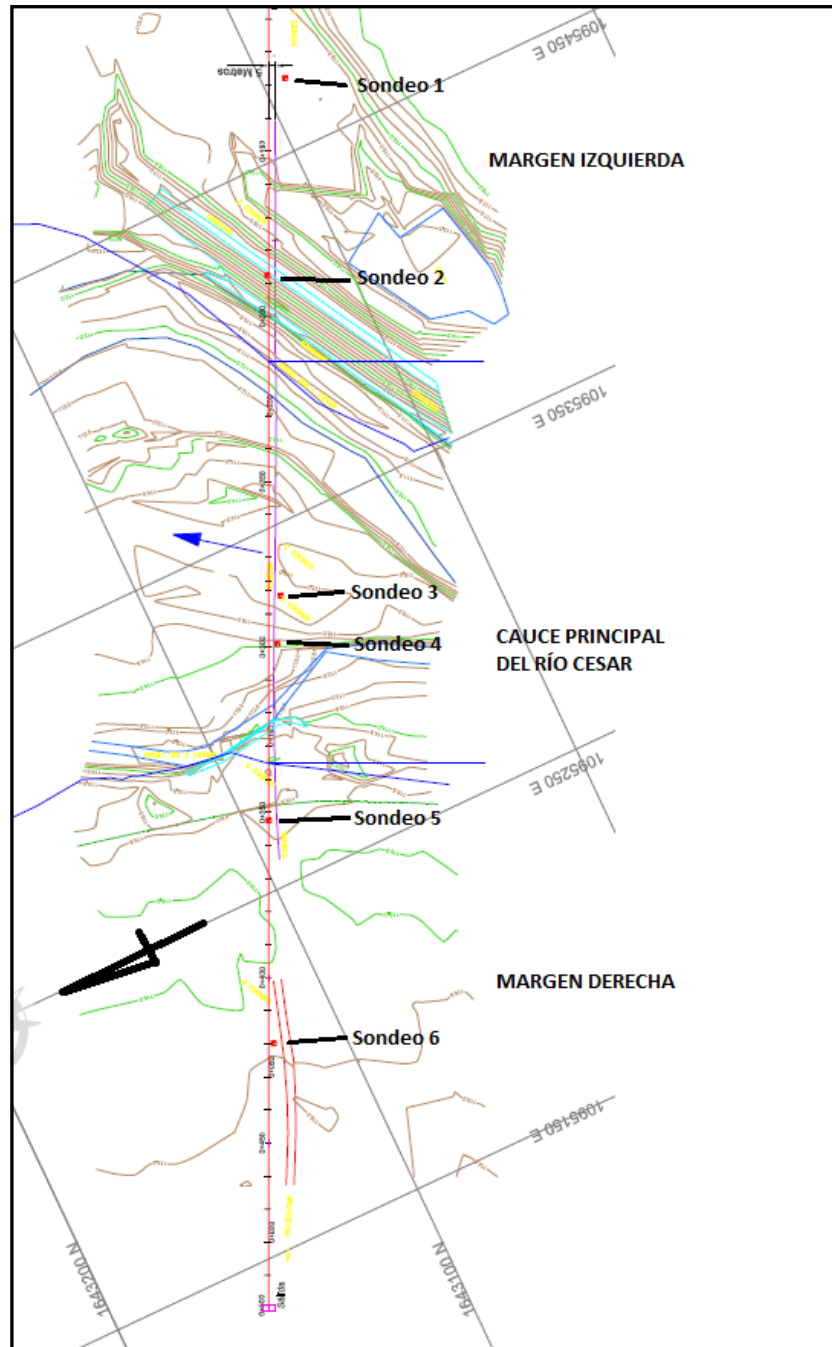
Como antecedente del trabajo realizado por TGI, es preciso mencionar que en el mes de diciembre de 2010, con ocasión de la ocurrencia de lluvias de gran intensidad en todo el país, que superaron los registros históricos, se presentó una serie de caudales de gran magnitud en el río Cesar que provocaron que el día 15 de este mes se produjera socavación extrema del cauce (fondo y márgenes) al punto que el ramal del gasoducto quedó expuesto al flujo directamente. Durante los trabajos de reparación de la línea de conducción de gas, mediante un proyecto de cruce subfluvial con perforación horizontal, autorizado en su componente ambiental por la Corporación Autónoma Regional del Cesar, se llevó a cabo en forma previa una investigación geotécnica por parte de TGI, a través de la realización de 6 ensayos de penetración estándar, con los cuales se clasificaron los suelos de la zona.

En la Figura 38 se muestra la ubicación de los sondeos a que se ha hecho alusión, observándose que los sondeos 1 y 2 se localizaron en la margen izquierda del río Cesar (Municipio de La Paz), los sondeos 3 y 4 se ubicaron en el lecho del río y los sondeos 5 y 6 se ubicaron en la margen derecha de la corriente. La profundidad de los sondeos 1, 2 y 4 fue de 11 metros, la del sondeo 3 fue de 13 metros, y la de los sondeos 5 y 6, fue de 12 metros.

Respecto al tramo para el cual se llevó a cabo la modelación hidráulica en HEC-RAS (sector Las Garzas del río Cesar), estos sondeos se ubican, a la altura de la estación 7, aproximadamente en el punto medio de dicho tramo. De los obtenidos por TGI, el resultado considerado como representativo de las márgenes del río

Cesar corresponde al sondeo 5, del cual se presenta la información detallada en el Anexo B.

Figura 38. Ubicación de los sondeos SPT realizados por TGI en el río Cesar.



Fuente: TGI – Seccional Valledupar

De acuerdo con la información total evaluada por TGI, los suelos de las inmediaciones de las márgenes del río Cesar son como se detalla a continuación:

Sondeo 1: a 70 metros de la orilla izquierda.

- 0 a 2 metros: arena limosa parda
- 2 a 6 metros: arena limosa gris
- 6 a 8.5 metros: grava arenosa parda con vetas grises
- 8.5 a 11 metros: grava areno-limosa gris oscura

Sondeo 2, sobre la orilla izquierda.

- 0 a 2 metros: arena limo-gravosa parda
- 2 a 4.5 metros: grava areno-limosa gris
- 4.5 a 7 metros: arena limo-gravosa parda
- 7 a 11 metros: grava arenosa parda con vetas grises

Sondeo 3. Lecho del río Cesar – izquierda

- 0 a 5.5 metros: arena limosa amarilla – grano grueso
- 5.5 a 8 metros: grava areno limosa amarilla con vetas grises
- 8 a 11.5 metros: grava arenosa parda con vetas grises oscuras
- 11.5 a 13 metros: grava arenosa gris oscuro

Sondeo 4: lecho del río Cesar – derecha

- 0 a 6 metros: arena limosa amarilla – grano grueso
- 6 a 8 metros: grava areno limosa gris con vetas amarillas
- 8 a 11 metros: grava arenosa parda con vetas grises oscuras

Sondeo 5: a 15 metros de la orilla derecha

- 0 a 1 metro: grava arenosa amarilla
- 1 a 4.5 metros: arena limosa gris
- 4.5 a 7 metros: arena limosa gris
- 7 a 12 metros: grava areno-limosa gris

Sondeo 6: a 85 metros de la orilla derecha

- 0 a 1 metro: arena limo gravosa amarilla
- 1 a 4 metros: arena limosa gris
- 4 a 6.5 metros: arena limo gravosa gris
- 8 a 12 metros: grava areno limosa gris

En los cuadros del Anexo B se encuentra el resultado de la clasificación de suelos efectuada por TGI.

4.5.1. Aplicación de correlaciones para estimación de valores de resistencia. Debido a que en la caracterización efectuada por TGI no se determinaron los valores necesarios para la aplicación del BSTEM, y con el único objetivo de disponer de información índice en forma inicial, se recurrió al uso de un método que recomienda la aplicación de correlaciones, para la estimación de los parámetros c' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal (kPa), u_w = presión de poros (kPa), Φ' = ángulo de fricción interna efectivo (grados), el cual ha sido definido por el ingeniero civil Alvaro J. Gonzalez G. Esta correlación, de acuerdo con su autor es “ ... un método aproximado de evaluación de los parámetros efectivos de resistencia c' y f' , mediante el empleo de los datos de SPT (N en golpes/pie). Aunque el método provee valores estimados, se obtienen resultados razonables útiles iniciales, especialmente para materiales granulares o

intermedios, siendo menos aproximados para materiales cohesivos.”, aunque debe tomarse con precaución el resultado de dicha correlación. El método parte del resultado del ensayo de penetración estándar como principal insumo, el número de golpes necesario para que el muestreador del ensayo penetre una determinada distancia (18 pulgadas, o 45.72 cm) en el suelo bajo análisis, en conteos por cada 6 pulgadas (6, 12, 18), y tomando en cuenta sólo las últimas 12 pulgadas. Así, el valor de N registrado es el que corresponde a cada pie de penetración.

El ensayo establece que deben tenerse en cuenta varios factores de corrección a la energía teórica de referencia, E_r (que depende de la altura de caída del martillo del ensayo), además de una serie de correcciones del valor de N tomado en campo, lo cual se sugiere por parte de Joseph K. Bowles (1988) se haga de acuerdo con la siguiente expresión (Fuente: Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el spt. X jornadas geotecnicas de la ingeniería colombiana):

$$N_{crr} = N \times C_n \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \quad (14)$$

En la cual :

N_{crr} = valor de N corregido

N = valor de N de campo

C_n = factor de corrección por confinamiento efectivo

η_1 = factor por energía del martillo ($0.45 \leq \eta_1 \leq 1$)

η_2 = factor por longitud de la varilla ($0.75 \leq \eta_2 \leq 1$)

η_3 = factor por revestimiento interno de tomamuestras ($0.8 \leq \eta_3 \leq 1$)

η_4 = factor por diámetro de la perforación (> 1 para $D > 5''$, = 1.15 para $D=8''$)

El Ingeniero Álvaro González G., recomienda que las correcciones η_2 , η_3 y η_4 se tomen igual a 1 y que sólo se tomen en cuenta η_1 y C_n . En el caso de C_n se propone por el mismo autor contemplar las siguientes expresiones:

$$\text{Peck} \quad C_n = \log(20/R_s)/\log(20) \quad (15)$$

$$\text{Seed} \quad C_n = 1 - 1.25\log(R_s) \quad (16)$$

$$\text{Meyerhof-Ishihara} \quad C_n = 1.7/(0.7+R_s) \quad (17)$$

$$\text{Liao-Whitman} \quad C_n = (1/R_s)^{0.5} \quad (18)$$

$$\text{Skempton} \quad C_n = 2/(1+R_s) \quad (19)$$

$$\text{Seed-Idriss} \quad C_n = 1 - K \cdot \log R_s, \text{ para } K=1.41 \text{ con } R_s < 1; K=0.92 \text{ con } R_s \geq 1 \quad (20)$$

$$\text{González (Logaritmo)} \quad C_n = \log(10/R_s) \quad (21)$$

$$\text{Schmertmann} \quad C_n = 32.5/(10.2+20.3R_s) \quad (22)$$

Esta corrección por confinamiento se ha estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia dado por $\sigma_{vr}' = 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmósfera} = p_a$, como función del parámetro R_s , a su vez definido por la expresión $R_s = \sigma_v'/p_a$

El método propuesto por González [9], para obtener valores aproximados de valores efectivos de resistencia c' y f' con SPT se desarrolla como se relaciona a continuación:

a) Obtener el valor de N (golpes/pie) en campo, con la profundidad respectiva e identificar al tipo de suelo en el cual se hizo el ensayo.

b) Asignar al ensayo la profundidad media entre las dos lecturas de golpes que se usen.

c) Obtener o estimar el valor del peso unitario total de la muestra, preferentemente en el sitio. Esta se puede obtener de la muestra de la cuchara perdida, pero corrigiendo el área por la compresión que sufre la muestra al entrar al muestreador.

d) Obtener lo más fiablemente posible la posición del nivel piezométrico.

e) Calcular el valor de los esfuerzos totales (s), la presión de poros (u_w) y los esfuerzos efectivos ($s' = s - u_w$) para toda la columna de ensayo. Hay que tener en cuenta que el material puede estar saturado y la presión de poros puede ser negativa hasta la altura de capilaridad.

f) El valor de N_{45} para Colombia se corrige por confinamiento con la formulación de C_n de Seed- Idriss (Marcuson), Fórmula (5f), teniendo cuidado que $C_n \leq 2$.

g) Se obtiene el valor de f_{eq}' con la fórmula de Kishida (8c).

h) Se calcula el valor de $\tau = \sigma' \tan(\phi_{eq}')$

) Se agrupan los valores de τ y σ' por tipos de materiales

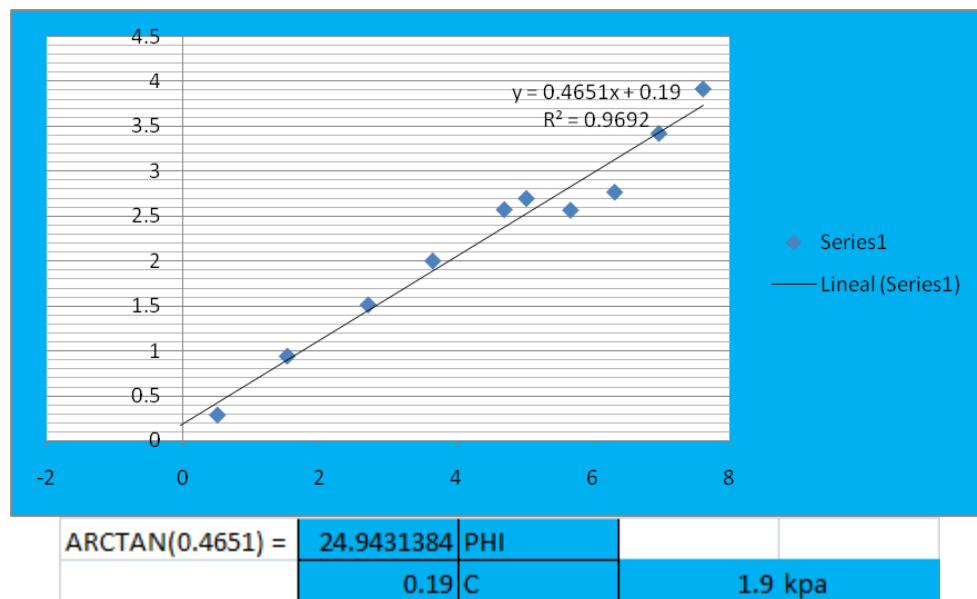
j) Se hace la regresión τ vs σ' para cada tipo de material y se obtienen c' y $\tan\phi'$. Si en la regresión resulta $c' < 0$, se obliga a la regresión a pasar por cero.

k) Se puede obtener el f' mínimo de cada material haciendo $\phi' \text{ mínimo} = \phi_{eq}' \text{ mínimo}$

l) Se colocan los resultados en un diagrama $c' - \tan\phi'$ y si son materiales del mismo origen geológico, los puntos normalmente se alinean en forma aproximada.

De esta manera, aplicando el método planteado por González, se tiene que la cohesión efectiva del perfil de suelo en la margen derecha del río Cesar, a la altura de la zona de estudio, es de 1.9 kpa y el ángulo de fricción efectivo es 24.94° (Figura 39). En el Anexo C se incluyen los cálculos de los parámetros en cuestión, según la metodología descrita.

Figura 39. Resultados de la correlación del ingeniero Álvaro González sobre los suelos de la margen del río Cesar



Fuente: El Autor

No obstante lo anterior, el método sólo ofrece valores estimados (es una correlación) que, aunque pueden ser útiles inicialmente, es recomendable la caracterización directa de la cohesión y la fricción internas efectivas. En virtud de lo anterior, se recurrió a la medición de tales propiedades a partir del muestreo en campo del suelo que compone las márgenes del río Cesar.

4.5.2. Muestreo de suelos en campo y caracterización en laboratorio para medición de valores de resistencia. Se tomaron dos muestras ubicadas a 1.3 y 2.7 metros de profundidad, sobre la margen - banca - del río Cesar. En la Figura 40 se puede apreciar aspectos de la actividad de muestreo aludida, la cual se llevó a cabo el 17 de noviembre de 2013, una vez fue posible acceder al sitio, luego de la temporada invernal del segundo semestre de 2013

Figura 40. 6 Fases del muestreo de suelo en la banca del río Cesar, sector Las Garzas



Fuente: El Autor

Las dos muestras se tomaron con la ayuda de sendos tubos de PVC de 4" de diámetro, con una longitud de 60 cm, que fueron hincados dentro del suelo a 1.3 m y 2.7 metros de profundidad, sellándose sus extremos con parafina y colocando tapones de PVC para aumentar el grado de preservación. Las muestras fueron transportadas hasta el Laboratorio de Suelos, de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander (LabUFPS), con sede en Ocaña, en el departamento de Norte de Santander, en donde se llevaron a cabo pruebas de corte directo, granulometría y clasificación, obteniéndose los siguientes resultados.

- Para la muestra 1 (1.3 metros de profundidad): Ángulo de fricción interna efectivo (ϕ') 36.72 °, Cohesión efectiva, (C') 5.814 kPa, Peso unitario saturado (γ_{sat}) 19.84 kN/m³, y D_{50} de 0.058 mm.
- Para la muestra 2 (2.7 metros de profundidad): Ángulo de fricción interna efectivo: (ϕ') 17.04 °, Cohesión efectiva, (C') 40.12 kPa, Peso unitario saturado (γ_{sat}) 21.12 kN/m³, y $D_{50} = 0.190$ mm

Como puede apreciarse, los valores de las propiedades geotécnicas de interés para la aplicación de BSTEM obtenidos mediante la correlación planteada por el ingeniero Álvaro González son bastante diferentes a los obtenidos en laboratorio, siendo conservadores en cuanto a la estimación de la cohesión efectiva. Así mismo, también se obtuvieron valores del ángulo de fricción interna de hasta 69 ° cuando se aplicó la correlación a dos estratos de los identificados en el muestreo de la empresa TGI. Por lo anterior, se conceptúa que debe usarse la serie de resultados entregados por el LabUFPS, que se incluyen en el Anexo B.

5. APLICACIÓN DEL MODELO DE EROSIÓN DEL PIE Y ESTABILIDAD DE LA BANCA EN CORRIENTES SUPERFICIALES (*BANK STABILITY AND TOE EROSION MODEL*).

El siguiente paso en el análisis de estabilidad de la banca del río Cesar es el de ingresar los datos de resistencia del suelo, junto a la geometría de la sección o estación seleccionada (estación 14 del levantamiento topográfico, segunda de aguas arriba hacia aguas abajo en el tramo de 1500 metros de longitud modelado en HEC-RAS) en la aplicación BSTEM.

5.1 USANDO VALORES DE PROPIEDADES GEOTECNICAS DADOS POR CORRELACIONES.

Para el efecto, se ha tomado como una evaluación inicial la condición de nivel del río más alto, lo que ocurre para el mes de Octubre, cuando se tienen 2.12 metros de profundidad respecto al fondo del lecho, aspecto que es mostrado en la Figura 41 en donde se tiene la definición de la Geometría de la sección, según lo anotado en el Capítulo 3.

Así mismo, se ingresan los datos de propiedades geotécnicas obtenidos con la correlación propuesta por el ingeniero González, según se ilustra en la Figura 42. Al procesar la información así configurada se obtiene que la banca tiene un factor de seguridad de 9.11, tal como se muestra en la Figura 43, denotando estabilidad.

Figura 41. Módulo Input Geometry, BSTEM.

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

- 1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box- cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.
- 2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)
- 3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount, otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

Option A

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A	0.00	4.13	<input type="checkbox"/>
B	4.13	4.13	<input type="checkbox"/>
C	4.27	3.99	<input type="checkbox"/>
D	4.41	3.84	<input type="checkbox"/>
E	4.54	3.70	<input type="checkbox"/>
F	4.68	3.55	<input type="checkbox"/>
G	4.82	3.41	<input type="checkbox"/>
H	4.96	3.26	<input type="checkbox"/>
I	5.10	3.12	<input type="checkbox"/>
J	5.24	2.98	<input type="checkbox"/>
K	5.37	2.83	<input type="checkbox"/>
L	5.51	2.69	<input type="checkbox"/>
M	5.65	2.54	<input type="checkbox"/>
N	5.79	2.40	<input type="checkbox"/>
O	5.93	2.26	<input type="checkbox"/>
P	6.07	2.11	<input type="checkbox"/>
Q	6.20	1.97	<input checked="" type="checkbox"/>
R	7.18	1.57	<input type="checkbox"/>
S	8.15	1.18	<input type="checkbox"/>
T	9.12	0.79	<input type="checkbox"/>
U	10.10	0.39	<input type="checkbox"/>
V	11.07	0.00	<input type="checkbox"/>
W	12.07	0.00	<input type="checkbox"/>

Shear emergence elev:

Shear surface angle:

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Input shear surface angle

Bank layer thickness (m)

Layer	Thickness (m)	Elevation of layer base (m)
Layer 1	1.00	3.13
Layer 2	1.00	2.13
Layer 3	1.00	1.13
Layer 4	0.50	0.63
Layer 5	0.63	0.00

Bottom Layer

Parallel layers, starting from point B

Definition of points used in bank profile

Notes:
 Bank profile may overhang. If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and Q.
 The shear surface emergence point must not be on a horizontal section- the elevation of this point must be unique or an error message will display.

Channel and flow parameters

Input reach length (m)

Input reach slope (m/m)

Input elevation of flow (m)

Input duration of flow (hrs)

View Bank Geometry

Run Bank Geometry Macro

Fuente: El Autor

El resultado preliminar denota una gran estabilidad de la margen (FS= 9.11), tal vez debida a que las propiedades del material no favorecen la caída del bloque superior de la margen y a que en la parte inferior el talud no es muy pronunciado. No obstante, dado que los valores de las propiedades geotécnicas son estimados deberá tomarse con bastante precaución esta información sobre equilibrio de la banca en condiciones hidrológicas extremas. La línea roja de la gráfica anterior, señala el plano por donde eventualmente fallaría el suelo.

Figura 42. Módulo Bank Material. Entrada inicial preliminar

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material: Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4, Layer 5
 Bank Toe Material: Own data

Bank and bank-toe material data tables.
 These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

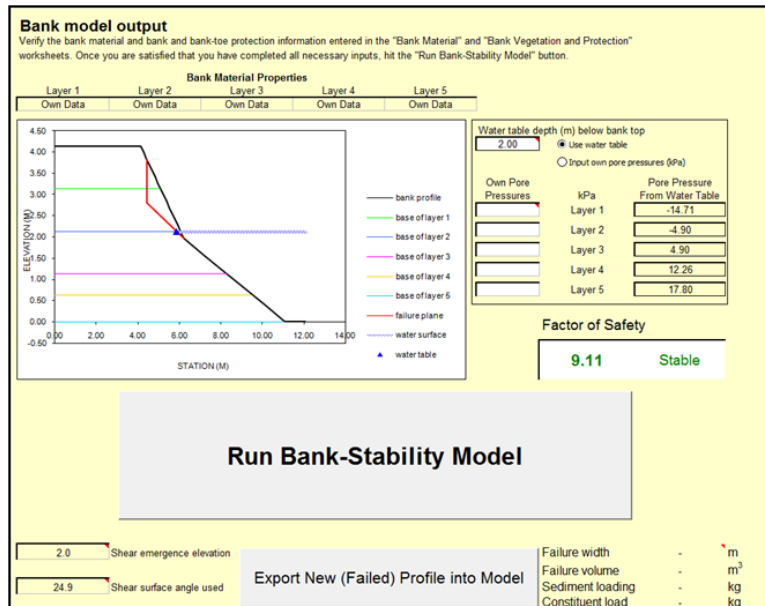
Material Descriptors		Bank Model Input Data					Groundwater Model Input Data					Toe Model Input Data			
Bank material type	Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ' (degrees)	Cohesion c' (kPa)	Saturated unit weight (kN/m^3)	β' (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)	Hydraulic Conductivity K_{sat} (m/s)	Bank porosity n	Porosity n	Friction angle ϕ' (degrees)	SW Generation n	τ_c (Pa)	k (cm^2/ks)	
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.556E+06	0.780	0.090	3.5237	2.3296	498	0.004
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.556E+06	0.780	0.090	3.5237	2.3296	124	0.009
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	3.160E-03	1.354E+06	0.780	0.090	3.5237	2.3296	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0	-	7.439E-05	1.354E+06	0.780	0.090	3.5237	3.1769	Coarse (0.71 mm) or Fine (0.18 mm)	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0	-	1.130E-06	6.856E+07	0.780	0.090	4.0563	2.3296	Erodible (0.100 Pa), Moderate (5.00 Pa), or Resistant (50.0 Pa)	
6a, 6b and 6c	Silt	-	30.0	3.0	18.0	15.0	-	5.904E-06	1.649E+07	0.780	0.090	6.6377	1.6708		
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.0	10.0	18.0	15.0	-	8.473E-07	1.354E+06	0.780	0.090	1.5812	1.4150		
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	20.0	15.0	18.0	15.0	-	1.700E-06	5.417E+06	0.780	0.090	1.4962	1.2531		
	Own data layer 1		24.9	1.9	2.1	15.0								0.75	0.034
	Own data layer 2		24.9	1.9	2.3	15.0								0.06	0.408
9	Own data layer 3		24.9	1.9	2.3	15.0								0.06	0.408
	Own data layer 4		24.9	1.9	2.3	15.0								0.06	0.408
	Own data layer 5		24.9	1.9	2.3	15.0								0.06	0.408
	Own data Bank Toe													0.06	0.408

Need to know the critical shear stress (τ_c) ?
 Input non-cohesive particle diameter (mm) 9.000
 Critical Shear Stress τ_c (Pa) 8.75

Need to know the erodibility coefficient (k) ?
 Input critical shear stress τ_c (Pa) 0.060
 Erodibility Coefficient (cm^2/ks) 0.408

Fuente: El Autor

Figura 43. Resultado final preliminar del análisis de estabilidad de la banca del río Cesar (estación 14, margen derecha)



Fuente: El Autor

5.2 USANDO VALORES DE PROPIEDADES GEOTECNICAS DADOS POR MUESTREO DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO.

El uso de datos medidos en campo siempre será la mejor alternativa al momento de realizar análisis relacionados con el entorno natural, ya que ello reduce el grado de incertidumbre.

Para la aplicación del BSTEM en el presente trabajo, se recurre a los valores de las propiedades geotécnicas reportadas por el laboratorio de suelos de la UFPS de Ocaña (Capítulo 4). Se tiene que el suelo de la margen se caracteriza por:

Para la muestra 1 (1.3 metros de profundidad):

- Ángulo de fricción interna efectivo: $\phi' = 36.72^\circ$
- Cohesión efectiva, $C' = 5.814 \text{ kPa}$
- Peso unitario saturado: $\gamma_{\text{sat}} = 19.84 \text{ kN/m}^3$
- $D_{50} = 0.058 \text{ mm}$

Para la muestra 2 (2.7 metros de profundidad):

- Ángulo de fricción interna efectivo: $\phi' = 17.04^\circ$
- Cohesión efectiva, $C' = 40.12 \text{ kPa}$
- Peso unitario saturado: $\gamma_{\text{sat}} = 21.12 \text{ kN/m}^3$
- $D_{50} = 0.190 \text{ mm}$

5.3 USO DE BSTEM.

Se toma la sección transversal seleccionada (estación 14), de la cual se asignaron los puntos que definen la configuración geométrica de la margen derecha e izquierda. Es preciso mencionar que para el uso de BSTEM se debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Sólo se debe ingresar, por cada vez que se aplique, una sola de las márgenes y no las dos en forma simultánea.
- Cada sección se deberá ingresar con sus coordenadas de izquierda a derecha. En el caso de la margen derecha, aún cuando su geometría (desde la parte superior hasta la inferior) discurre de derecha a izquierda, por definición el modelo sólo la acepta de izquierda a derecha.
- La elevación del fondo de la sección (parte más baja del lecho) debe ser superior a la de la parte inferior de la capa de subsuelo que lo contiene
- Conviene definir un punto externo a la sección (conocido como punto A) lo suficientemente alejado del borde de la sección (punto B).
- Para cada capa de subsuelo debe conocerse el ángulo de fricción interna y la cohesión efectivos, el peso unitario saturado y el diámetro representativo de las partículas.

El planteamiento general para la aplicación del BSTEM en el presente trabajo es el siguiente:

- Modelación de la estabilidad en condiciones existentes, con vegetación en la parte superior de la banca.

- Estimación de la cantidad de material erosionado, en caso de que se presente la falla
- Efectos de la protección del pie del talud de la banca
- Efectos de la protección de la banca
- Efectos de la protección simultánea del pie del talud y de la banca.

El enfoque dado a la aplicación del BSTEM, corresponde al sugerido por los autores del modelo (Simon, Thomas, Curinian, 2010) y básicamente consiste de los siguientes pasos:

1. Ingresar la geometría de la sección y las condiciones hidráulicas. Se establecen las coordenadas (x,y) de los puntos que de manera principal configuran la margen a modelar. En primera instancia se asignó la elevación del nivel de agua en la corriente en 114.39 msnm, correspondiente a un caudal con período de retorno (Tr) de 2 años para el mes de Octubre (67.8 m³/seg, Tabla 3). En este sentido, para el presente trabajo se tomaron los puntos levantados topográficamente, según se muestra en la Tabla 5.

En la Tabla 5 se muestra, en la columna *Station*, las distancias horizontales desde el punto extremo izquierdo (fuera del lecho) hasta cada punto principal que define la sección. Son estas distancias las que se ingresan, inicialmente junto con la correspondiente elevación (*Position Z*), a la aplicación BSTEM. Las celdas de color azul y rojo, respectivamente indican la posición de los hombros (*edge of bank izquierdo y derecho* de la sección).

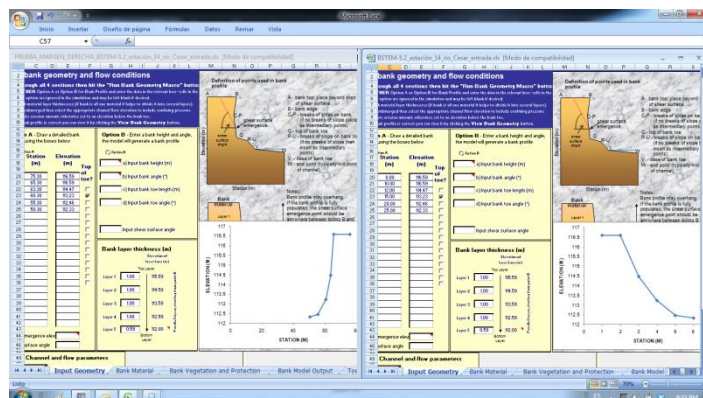
Tabla 5. Coordenadas (datum WGS84) y Cotas de los puntos que definen la sección transversal o estación 14.

ID	Position X	Position Y	Position Z	Station
1	1095298.973	1643578.385	115.8	0
2	1095278.787	1643580.166	115.95	20.3
3	1095277.791	1643580.254	114.55	21.3
4	1095275.799	1643580.43	112.72	23.3
5	1095273.807	1643580.605	112.25	25.3
6	1095268.826	1643581.045	112.28	30.3
7	1095263.845	1643581.484	112.51	35.3
8	1095258.865	1643581.924	112.67	40.3
9	1095253.884	1643582.363	112.58	45.3
10	1095248.903	1643582.803	112.33	50.3
11	1095243.923	1643583.242	112.46	55.3
12	1095238.942	1643583.682	113.23	60.3
13	1095235.954	1643583.945	114.47	63.3
14	1095233.961	1643584.121	116.59	65.3
15	1095224	1643585	115.89	75.3

Fuente: El Autor

Recuérdese que para la margen derecha se deberá ingresar las distancias invirtiendo la dirección de izquierda a derecha. En las Figuras 44 a 46 se ilustra el efecto de ingresar la margen derecha siguiendo las coordenadas como se presentan en la naturaleza (es decir, de izquierda a derecha).

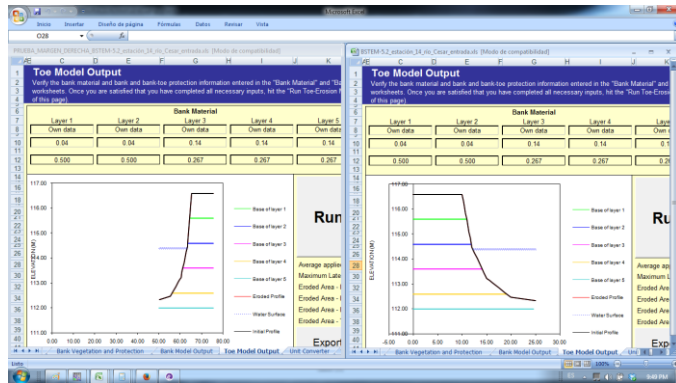
Figura 44. Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)



Fuente: El Autor

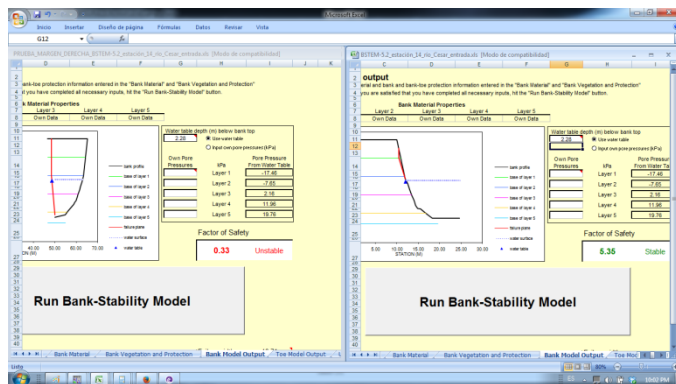
Se llama la atención cómo, si se ingresara la margen derecha como normalmente se dibuja (mirando el río en dirección aguas abajo), la superficie de falla se calcularía por el modelo BSTEM de manera inconsistente, ya que al momento de realizarse el análisis de estabilidad, dicho plano se dibuja por el modelo para la parte de la sección ocupada por el agua y no por el subsuelo (Figura 43)

Figura 45 Capas del subsuelo de la Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)



Fuente: El Autor

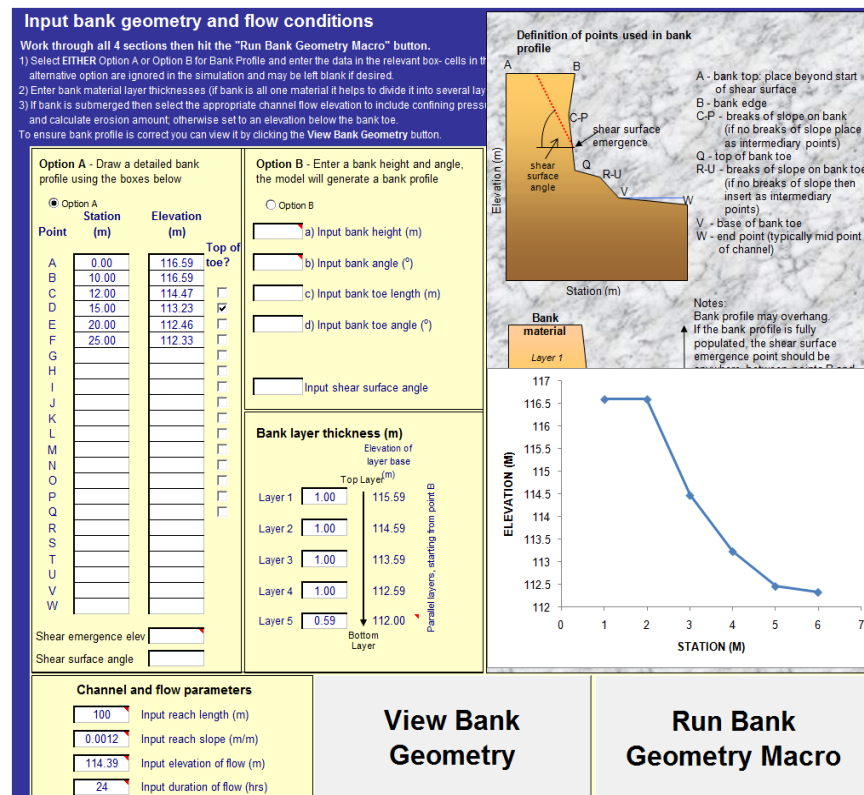
Figura 46. Superficie de falla hipotética de la Margen derecha (ingresada en forma incorrecta a la izquierda y de forma correcta a la derecha)



Fuente: El Autor

2. Se asignan los espesores de las 5 capas que, como máximo conforman el subsuelo de la margen, de acuerdo con lo observado en campo. En el caso del presente trabajo, tomando en cuenta los resultados del muestreo en campo, se consideró adecuado dividir en dos capas de 1 metro de espesor para el material que representa la muestra 1, y en dos capas de 1 metro y una de 0.59 metros de espesor para el material que representa la muestra 2, como en la Figura 447 Se oprime el botón *View Bank Geometry* y la gráfica que muestra la forma de la sección se ajusta, tal como se observa en la Figura 48 (obsérvese el valor ajustado de las abcisas).

Figura 47. Definición de la margen derecha de la estación 14 del río Cesar, sector Las Garzas.



Fuente: El Autor

Figura 48. Sección transversal ajustada con los valores de coordenadas de sección leídos por el BSTEM

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.

2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)

3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount, otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

Option A

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A	0.00	116.59	<input type="checkbox"/>
B	10.00	116.59	<input type="checkbox"/>
C	12.00	114.47	<input type="checkbox"/>
D	15.00	113.23	<input checked="" type="checkbox"/>
E	20.00	112.46	<input type="checkbox"/>
F	25.00	112.33	<input type="checkbox"/>
G			<input type="checkbox"/>
H			<input type="checkbox"/>
I			<input type="checkbox"/>
J			<input type="checkbox"/>
K			<input type="checkbox"/>
L			<input type="checkbox"/>
M			<input type="checkbox"/>
N			<input type="checkbox"/>
O			<input type="checkbox"/>
P			<input type="checkbox"/>
Q			<input type="checkbox"/>
R			<input type="checkbox"/>
S			<input type="checkbox"/>
T			<input type="checkbox"/>
U			<input type="checkbox"/>
V			<input type="checkbox"/>
W			<input type="checkbox"/>

Shear emergence elev:

Shear surface angle:

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Input shear surface angle

Bank layer thickness (m)

Layer	Thickness (m)	Elevation of layer base
Layer 1	1.00	115.59
Layer 2	1.00	114.59
Layer 3	1.00	113.59
Layer 4	1.00	112.59
Layer 5	0.59	112.00

Bottom Layer

Channel and flow parameters

Input reach length (m)

Input reach slope (m/m)

Input elevation of flow (m)

Input duration of flow (hrs)

View Bank Geometry

Run Bank Geometry Macro

Definition of points used in bank profile

A - bank top: place beyond start of shear surface
 B - bank edge
 C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)
 Q - top of bank toe
 R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)
 V - base of bank toe
 W - end point (typically mid point of channel)

Notes:
 Bank profile may overhang.
 If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be...

Station (m)	Elevation (m)
0	116.59
10	116.59
12	114.47
15	113.23
20	112.46
25	112.33

Fuente: El Autor

3. Se oprime el botón Run Bank Geometry Macro para que el modelo reconozca los datos de entrada y se produzca la incorporación de los mismos en las diferentes hojas electrónicas que hacen parte de BSTEM.

4. Se toma el módulo *Bank Material* y se ingresan en las celdas allí indicadas los valores de las propiedades geotécnicas (numeral 4.2), tal como se observa en la Figura 49.

Figura 49. Asignación de las propiedades geotécnicas del subsuelo de la estación 14

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material **Bank Toe Materi**

Layer 1 Layer 2 Layer 3 Layer 4 Layer 5 Bank Toe Materi

Own data Own data Own data Own data Own data Own data

Bank and bank-toe material data tables.
 These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

Material Descriptors			Bank Model Input Data					Toe Model Input Data	
Bank material type	Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ' (degrees)	Cohesion c' (kPa)	Saturated unit weight (kN/m^3)	ϕ^b (degrees)	Chemical concentration (kg/kg)	τ_c (Pa)	k (cm^3/Ns)
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	498	0.004
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	124	0.009
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	36.0	0.0	18.0	15.0	-	Coarse (0.71 mm) or Fine (0.18 mm)	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	27.0	0.0	18.0	15.0	-	Erodible (0.100 Pa), Moderate (5.00 Pa), or Resistant (50.0 Pa)	
6a, 6b and 6c	Silt	-	30.0	3.0	18.0	15.0	-	0.04	0.500
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.0	10.0	18.0	15.0	-	0.04	0.500
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	20.0	15.0	18.0	15.0	-	0.14	0.267
9	Own data layer 1		36.7	5.8	19.8	15.0		0.14	0.267
	Own data layer 2		36.7	5.8	19.8	15.0		0.14	0.267
	Own data layer 3		17.0	40.1	21.1	15.0		0.14	0.267
	Own data layer 4		17.0	40.1	21.1	15.0		0.14	0.267
	Own data layer 5		17.0	40.1	21.1	15.0		0.14	0.267
	Own data Bank Toe							0.14	0.267

Need to know the critical shear stress (τ_c) ?

Input non-cohesive particle diameter (mm)

Critical Shear Stress τ_c (Pa)

Need to know the erodibility coefficient (k) ?

Input critical shear stress τ_c (Pa)

Erodibility Coefficient (cm^3/Ns)

Fuente: El Autor

Para la obtención de los valores para el pie del talud (extremo derecho de la Figura 25) se ingresa el valor del diámetro de la partícula que representa la muestra de suelo (Figuras 34 y 35), en este caso, 0.058 mm para la muestra 1 y 0,190 mm para la muestra 2, en la celda del recuadro *Need to know the critical shear stress (T_c)?* , con el objetivo de que el modelo calcule el esfuerzo crítico y, con este valor, se calcula el coeficiente de erodabilidad en el recuadro *Need to know the erodibility coefficient (k)?*. Estos dos valores estimados por el BSTEM son los que se ingresan para cada capa en las dos columnas de la derecha de este módulo.

5. Se pasa al módulo *Toe Model Output*, en donde se ofrece una vista simplificada de la margen analizada (Figura 50), así como la posición de la lámina de agua en el canal del río (línea azul claro horizontal), la disposición de las cinco capas horizontales en que se ha subdividido la margen, cada una representada por una línea de color (verde, azul, fucsia, amarillo, cyan).

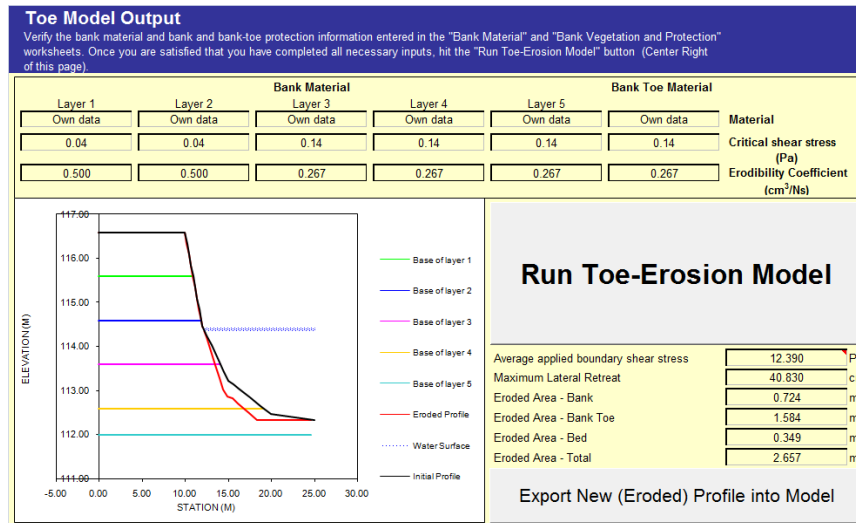
En la parte superior de este módulo se muestra, para cada capa (*Layer 1 a Layer 5*) tres casillas que indican si se escogió el material específicamente muestreado (*Own data*) o alguno de los de la lista parametrizada por defecto en el Modelo, el valor del esfuerzo crítico de corte (Pa) y el valor de coeficiente de erodabilidad (cm^3/Ns).

Se oprime el botón *Run Toe Erosion Model* y como resultado de los cálculos que realiza la aplicación se muestra mediante una línea roja, en la ventana gráfica de que representa la margen, una proyección de la forma que esta adoptaría al sufrir la erosión por efecto del flujo de las aguas (Figura 50). Esta forma se deriva de la geometría de la sección, de la lámina de agua y de los valores de resistencia al corte y de potencial de erodabilidad que caracterizan los suelos en esta parte de la sección.

Acto seguido, se oprime el botón *Export New (eroded) Profile into Model*, para que la nueva sección (erodada en el pie) sea la que se analice, con lo que el BSTEM pasa al módulo *Input Geometry* (Figura 51) en donde nuevamente se corre la opción de *Run Bank Geometry Macro* (antes, se verifica que no haya – o se eliminan – valores de ángulo de la superficie de falla así como el punto de salida de la falla, con el objetivo de que sea el mismo programa el que calcule

estos dos parámetros de acuerdo con las características del material y del perfil ajustado)

Figura 50. Sección con la erosión proyectada sobre el pie de la misma



Fuente: El Autor

Debe observarse que al tenerse la nueva sección como dato de entrada, esta ha sido redefinida en cuanto a que ahora posee un mayor número de puntos que la definen, siendo necesario prestar atención a la ubicación del punto que constituye el inicio del pie del talud (*Top of Toe*) que, por defecto, es el punto Q de la sección (ver columna izquierda del módulo *Input Geometry* y casilla con una marca de verificación - ✓ - en *Top of toe?*).

Si por alguna razón, se considera que el punto Q seleccionado por el aplicativo no es el correcto, se tiene la opción de escoger otro, analizando cuidadosamente la forma de la sección, ya que de ello dependerá el resultado final del análisis de estabilidad.

Figura 51. Nueva sección como dato de entrada, luego que el pie del talud ha sido erosionado por la acción hidráulica

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.
 1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.
 2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers)
 3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount; otherwise set to an elevation below the bank toe.
 To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A	0.00	116.59	<input type="checkbox"/>
B	10.00	116.59	<input type="checkbox"/>
C	10.24	116.34	<input type="checkbox"/>
D	10.47	116.09	<input type="checkbox"/>
E	10.71	115.84	<input type="checkbox"/>
F	10.94	115.59	<input type="checkbox"/>
G	11.18	115.34	<input type="checkbox"/>
H	11.42	115.09	<input type="checkbox"/>
I	11.65	114.84	<input type="checkbox"/>
J	11.89	114.59	<input type="checkbox"/>
K	12.00	114.47	<input type="checkbox"/>
L	12.51	114.20	<input type="checkbox"/>
M	13.01	113.89	<input type="checkbox"/>
N	13.50	113.58	<input type="checkbox"/>
O	14.00	113.28	<input type="checkbox"/>
P	14.41	113.03	<input type="checkbox"/>
Q	14.91	112.87	<input type="checkbox"/>
R	15.58	112.83	<input type="checkbox"/>
S	16.20	112.71	<input type="checkbox"/>
T	17.45	112.49	<input type="checkbox"/>
U	18.34	112.33	<input type="checkbox"/>
V	19.63	112.33	<input type="checkbox"/>
W	24.65	112.33	<input type="checkbox"/>

Shear emergence elev:
 Shear surface angle:

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

a) Input bank height (m)
 b) Input bank angle (°)
 c) Input bank toe length (m)
 d) Input bank toe angle (°)
 Input shear surface angle

Bank layer thickness (m)

Layer	Thickness (m)	Elevation of layer base
Layer 1	1.00	115.59
Layer 2	1.00	114.59
Layer 3	1.00	113.59
Layer 4	1.00	112.59
Layer 5	0.59	112.00

Bottom Layer

Channel and flow parameters

100 Input reach length (m)
 0.0012 Input reach slope (m/m)
 114.39 Input elevation of flow (m)
 24 Input duration of flow (hrs)

Definition of points used in bank profile

Notes:
 Bank profile may overhang
 If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be

View Bank Geometry **Run Bank Geometry Macro**

Fuente: El Autor

6. Luego de correr la instrucción macro de la geometría de la banca, se pasa al módulo *Bank Model Output* en el que se lleva a cabo el análisis de estabilidad de la margen. En primera instancia, se asigna la posición de la tabla de agua (*water table*) que tiene incidencia en el grado de resistencia al corte del subsuelo, ya que en presencia de agua esta se reduce, de manera que entran en acción los esfuerzos efectivos.

Para la preparación de este documento, se optó por colocar la posición de la tabla de agua a la misma altura de la lámina de agua en el río, habida cuenta de la naturaleza predominantemente granular (aunque fina) y no plástica del subsuelo. Si el suelo tuviera la capacidad de retener la tabla de agua en posiciones altas una vez el nivel del agua en el canal ha descendido (suelos de poca permeabilidad), o

si se experimentan ascensos y descensos de nivel en muy pocas horas que provoquen cambios rápidos de la tabla de agua, alternativamente, se podría llevar a cabo el análisis simulando tales condiciones.

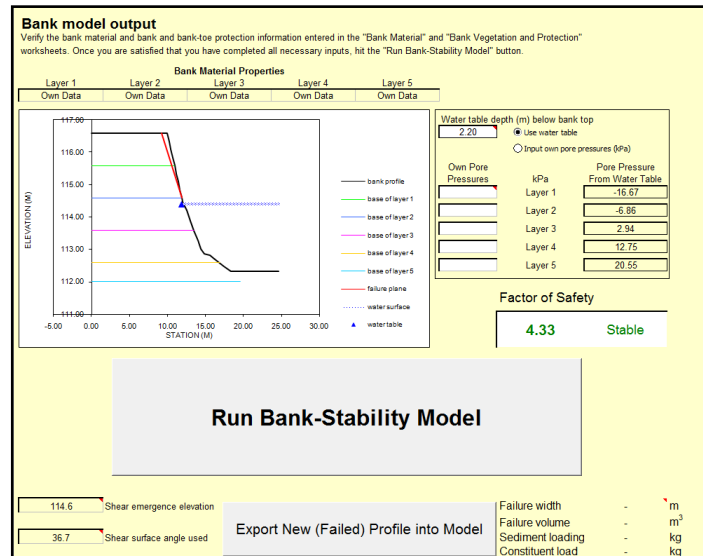
A partir del trabajo de campo realizado por el autor del presente escrito, como funcionario de la Corporación Autónoma Regional del Cesar, se ha observado que los niveles de agua subterránea en la llanura aluvial del río Cesar son propensos a cambios en corto tiempo, luego de eventos extremos relacionados con crecidas de caudales circulantes por algunas de las corrientes superficiales de la región, situación que no se ha modelado aquí, ya que es preciso conocer acerca de las propiedades hidrogeológicas del subsuelo, aspecto que está fuera del alcance propuesto a la presente investigación.

Una vez se ha asignado la posición de la tabla de agua (nivel freático) se oprime el botón *Run Bank-Stability Model*, para correr la rutina de estabilidad en la cual se basa el modelo BSTEM. (Figura 52)

Obsérvese cómo, en esta oportunidad, a diferencia del análisis preliminar llevado a cabo usando valores de propiedades geotécnicas estimadas mediante correlaciones (numeral 4.1), se obtiene un factor de seguridad de 4.33, más cercano a los valores que normalmente cabría esperar.

Este resultado, parcial aún (ver ítem 7 siguiente), indica condiciones de estabilidad que hacen pensar que la banca no fallaría.

Figura 52. Módulo de salida de la Banca



Fuente: El Autor

7. El enfoque adoptado en el presente trabajo, tuvo en cuenta que en forma previa al análisis de estabilidad de la banca (obviando el paso anterior) se tiene la opción de especificar que la parte superior de la orilla (*Top of Bank*) está cubierta de vegetación, ya sea total o parcialmente, cuáles son las especies arbóreas o arbustivas presentes y el porcentaje ponderado que ocupan en esa parte del río. Debido a que el BSTEM sólo tiene definidas las especies que los autores del modelo contemplaron, se recurrió a la comparación de estas (a nivel de familia) con las reportadas por estudios oficiales realizados para el río Cesar (CORPOCESAR, 2011).

Además, al recorrer las márgenes de la corriente durante el trabajo de campo, en el tramo de 1500 metros seleccionado para dar aplicación al BSTEM se plantea lo siguiente, como cobertura vegetal en ambas márgenes la indicada en la Tabla 6.

Tabla 6. Cobertura del suelo de las márgenes del río Cesar, sector Las Garzas

Familia	Especie observada	Especie seleccionada en BSTEM	% de ocupación estimado
	Pastos de sabana, riparios	Dry Meadow	30
Moraceae	Brosimum allicastrum	Eastern Sycamore	25
Salicaceae	Casearia corimbosa	Black Willow	30
	Suelo desnudo	Bare soils/No vegetation	15

Fuente: El Autor, CORPOCESAR, 2011

De esta manera, antes de pasar al módulo Bank Output Model, se abre el módulo *Bank Vegetation and Protection* (Protección y Vegetación de la Banca), en donde se tiene la posibilidad de asignar alternativamente o simultáneamente (según sea el caso) tanto la cobertura vegetal como las medidas de protección que se desee instalar.

En este caso, se asigna la cobertura sin protección adicional en la banca, que es como ocurre en la realidad en el tramo en que la sección 14 se encuentra localizada, usando el submodelo RipRoot, al cual se accede oprimiendo el botón *Run Root-Reinforcement Model* (modelo de refuerzo radicular), en el cual se asignan la cobertura con la información tal como se ha especificado en la Tabla 10 (Figuras 53 y 54)

Figura 53. Entrada al modulo de protección y vegetación de la banca.

Simulate the mechanical effects of bank top vegetation on bank stability using a root-reinforcement model

RipRoot (Pollen and Simon, 2005) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snagging of roots and the sloping of roots through the soil matrix, by determining the minimum applied load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Waldron (1977), Wu et al. (1973) and Waldron and Dakessian (1981).

Run Root-Reinforcement Model

Root-Reinforcement Model Output

List of Species
Percent of Assemblage
Added cohesion due to roots, c_r [] kPa

References and Data Sources:

Pollen N. 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Calena* 69: 197-205.

Pollen N, Simon A. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41: W07025.

Protect the bank and/or bank-toe against hydraulic erosion by adding treatments (or select "own data" and add values below)

Protection: Bank Protection [No protection] Bank Toe Protection [No protection]

Bank and bank-toe protection data table

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white box.

Protection type	Description	Permissible shear stress (Pa)
1	No protection	-
2	Coir fiber	108
3	Geotextile (synthetic)	144
4	Jute net	22
5	Large Woody Debris	192
6	Live fascines	100
7	Plant cuttings	17
8	Rip Rap (D_{75} 0.256 m)	204
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	Own Data	[]

Data Sources:

Allen HK, Fischreich JC. 1999. Coir geotextile roll and seedland plants for streambank erosion control. EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN EMRRP-SR-04), U.S. Army Engineer Research Development Center, Vicksburg, MS. (<http://rel.erc.usace.army.mil>)

Austin DN, Theisen MS. 1994. BMW extends vegetation performance limits. *Geotechnical Fabrica Report*

Fuente: El Autor

En el modelo RipRoot se selecciona, una por vez, las opciones de cobertura del suelo, definiendo además del porcentaje de ocupación del terreno (estimado o medido) el tiempo durante el cual dicha cobertura ha permanecido en el sector. Para este caso, luego de analizar la evolución temporal de la ribera del río Cesar (Capítulo 6) se opta por asignar un lapso de 30 años. Este aspecto determina el sistema radicular que estaría presente en el subsuelo de las márgenes del río y que por lo tanto estaría aportando a la resistencia del suelo.

Figura 54. Modelo RipRoot

RipRoot

1. Select the species [Meadow, Dry +]

2. Select the method to determine the distribution of root diameters

Specify plant age and percent contribution to assemblage [30] years [30] %

Input the number of roots in each of seven size classes

Click to add another species | You have assembled 30 % of your assemblage | Click when you are finished entering assemblage data

Footnotes:

* Uses mean growth curve for woody vegetation to estimate root numbers (Pollen-Bankhead and Simon, 2008)

+ Uses growth curve for *Alamo Switch Grass* to estimate root numbers

§ Growth curve is a result of combining data from stands of Eastern and Western Cottonwoods

Fuente: El Autor

Para adicionar las especies se oprime el botón *Click to add another species*, y cuando se haya finalizado de entrar los datos del ensamblaje de la cobertura (100%), se oprime el botón *Click when you are finished entering assemblage data*. Si se dispone de información sobre caracterización del sistema radicular (diámetro y número de las raíces por rango de diámetros, de 0 a 40 mm), esta información se podrá ingresar en la opción *Input the number of roots in each of seven size clases*. Al finalizar la entrada de la información sobre las raíces o las especies vegetales presentes, se informa por parte del programa cuál es la cohesión adicional aportada al suelo por el sistema radicular (C_r) que se encuentra presente en la parte superior de la banca del río (Figura 55). En este mismo cuadro se podría escoger, si se desea en este paso, el tipo de medida de mitigación que podría ayudar a estabilizar (o prevenir la desestabilización) de la banca. No obstante, conviene antes, y fue el enfoque dado en el presente trabajo, conocer si la banca es estable sólo con la vegetación presente en su parte superior, para luego - si ello se amerita - proponer la construcción de obras que complementen la labor que presta la vegetación.

Figura 55. En el ejemplo mostrado, se indica que el conjunto de raíces para las especies seleccionadas aporta 7 kPa a la cohesión natural del terreno.

Simulate the mechanical effects of bank top vegetation on bank stability using a root-reinforcement model

RipRoot (Pollen and Simon, 2005) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snapping of roots and the slipping of roots through the soil matrix, by determining the minimum applied load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Waldron (1977), Wu et al. (1979) and Waldron and Dakessian (1981).

Protect the bank and/or bank-toe against hydraulic erosion by adding treatments (or select "own data" and add values below)

**Run
Root-Reinforcement
Model**

Root-Reinforcement Model Output

List of Species Bare Soil/ No vegetation; Dry Meadow; Eastern Sycamore; Black Will
Percent of Assemblage 15; 30; 25; 30;

Added cohesion due to roots, C_r kPa

Protection

Bank Protection Bank Toe Protection

No protection No protection

Bank and bank-toe protection data table

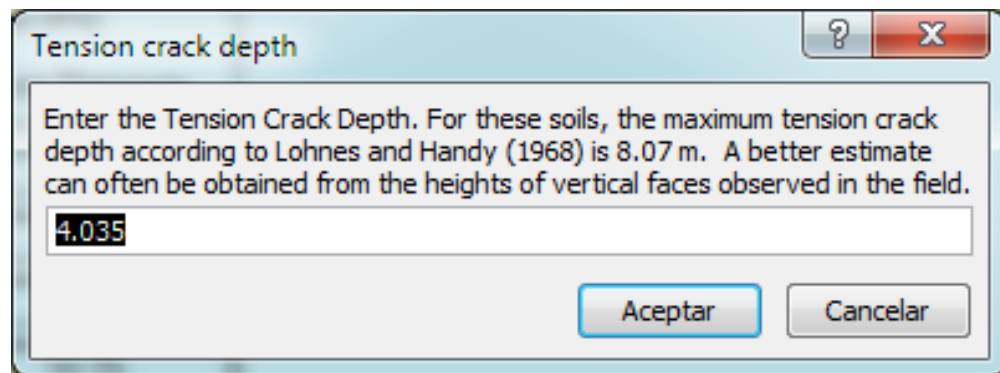
These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white box.

Bank and Bank-Toe Protection Descriptors		
Protection type	Description	Permissible shear stress (Pa)
1	No protection	-
2	Coir fiber	108
3	Geotextile (synthetic)	144
4	Jute net	22
5	Large Woody Debris	192
6	Live fascine	100
7	Plant cuttings	17
8	Rip Rap (D_{50} 0.256 m)	204
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	Own Data	<input style="width: 50px;" type="text"/>

Fuente: El Autor

8. Se toma, entonces, el módulo *Bank Model Output*, para examinar la estabilidad de la banca tomando en cuenta el efecto que sobre la estabilidad de la banca produce la vegetación y su sistema radicular presentes en ella. Se introduce la posición de la tabla de agua, se corre la macro *Run Bank-Stability Model* (botón) y, después se ofrece la posibilidad de definir si existe o no grieta de tensión (*Tension crack*), mediante la escogencia de un valor que represente la profundidad que la grieta puede alcanzar. El modelo sugiere, de acuerdo con criterios escogidos por los investigadores Lohnes y Hardy en 1968, cuál es la profundidad máxima que la grieta puede alcanzar para el tipo de suelos que se está analizando. En el caso de los materiales muestreados, con las propiedades evaluadas el modelo señaló que la máxima profundidad está alrededor de 8 metros (Figura 56), pero a la vez, el modelo sugiere un valor equivalente a la mitad de dicha cifra si no se dispone de información más detallada, recomendando a la vez tener en cuenta para ello la altura de la banca.

Figura 56. Asignación de la profundidad de la grieta de tensión



Fuente: El Autor

No obstante lo anterior, y de acuerdo con la literatura, las grietas de tensión no podrán superar la mitad de la altura de la banca puesto que de contemplarse de esta manera puede resultar en la obtención de valores negativos del peso del

bloque de falla, lo cual es imposible (Darby et al., 1995). Aplicando algunos criterios que investigadores ha definido al respecto (Amiri et al., 2010) se tiene que la profundidad de la grieta de tensión puede definirse mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{N} \gamma_s^a C_a^b, \text{ donde} \quad (23)$$

K = profundidad de la grieta de tensión

N = número de estabilidad

γ_s = peso específico del suelo

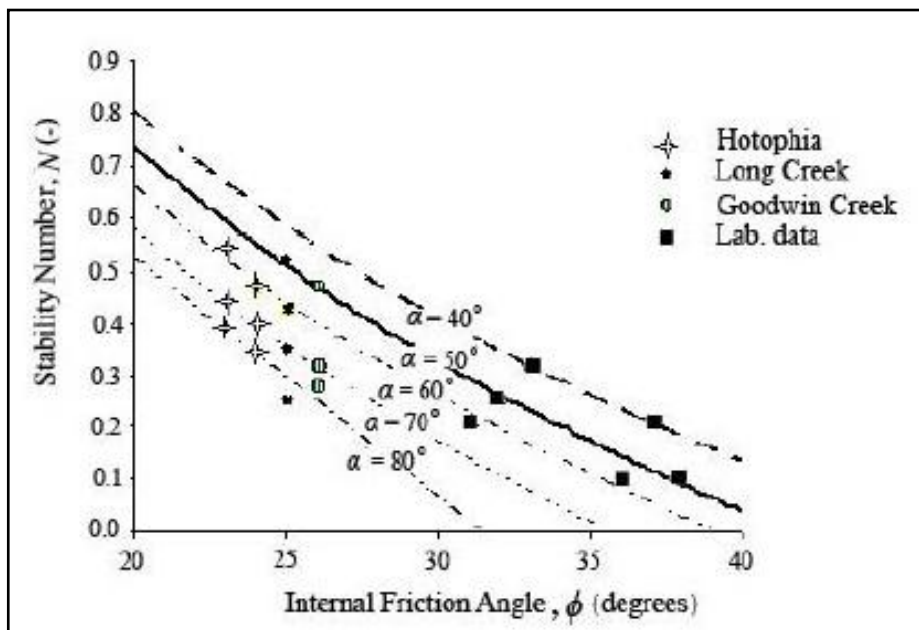
C_a = cohesión aparente

a, b = -1, 1 respectivamente

De esta manera, se propuso (Amiri et al., 2010) una familia de curvas, la cual se presenta en la Figura 57, que relacionan el número de estabilidad (N) con el ángulo de la superficie del talud o margen (α , en la Figura) y el ángulo de fricción interna del material. Así, al evaluar este aspecto con los valores de las propiedades geotécnicas para la muestra que corresponde con el estrato superior (muestra 1) y teniendo en cuenta que el ángulo de la superficie del talud o banca de manera general se encontró entre 46° y 90° (a media que se produjo la variación con diversos caudales), se obtiene que el número de estabilidad varía de 0.04 a 0.2, con lo que la profundidad de la grieta de tensión, en teoría varía de 0.6 metros a 1.6 metros.

Para el presente trabajo se adoptó el criterio de escoger la peor condición para la profundidad máxima de la grieta de tensión, representada por la mitad de la altura de la banca, es decir, 2 metros aproximadamente, aunque se varió de acuerdo con la posición del nivel freático cuando el mismo era inferior a 2 metros desde la superficie. Una vez se estima (o calcula) la profundidad de la grieta de tensión, el modelo ofrece como resultado final el valor del factor de seguridad (F_s), informando a la vez cuál habría sido este valor si no se hubiese considerado la grieta de tensión, señalando mediante una línea roja la posición (ángulo y punto de salida sobre la banca) del plano o superficie de falla.

Figura 57. Relación del número de estabilidad, el ángulo de fricción interna y el ángulo del talud o banca del río.

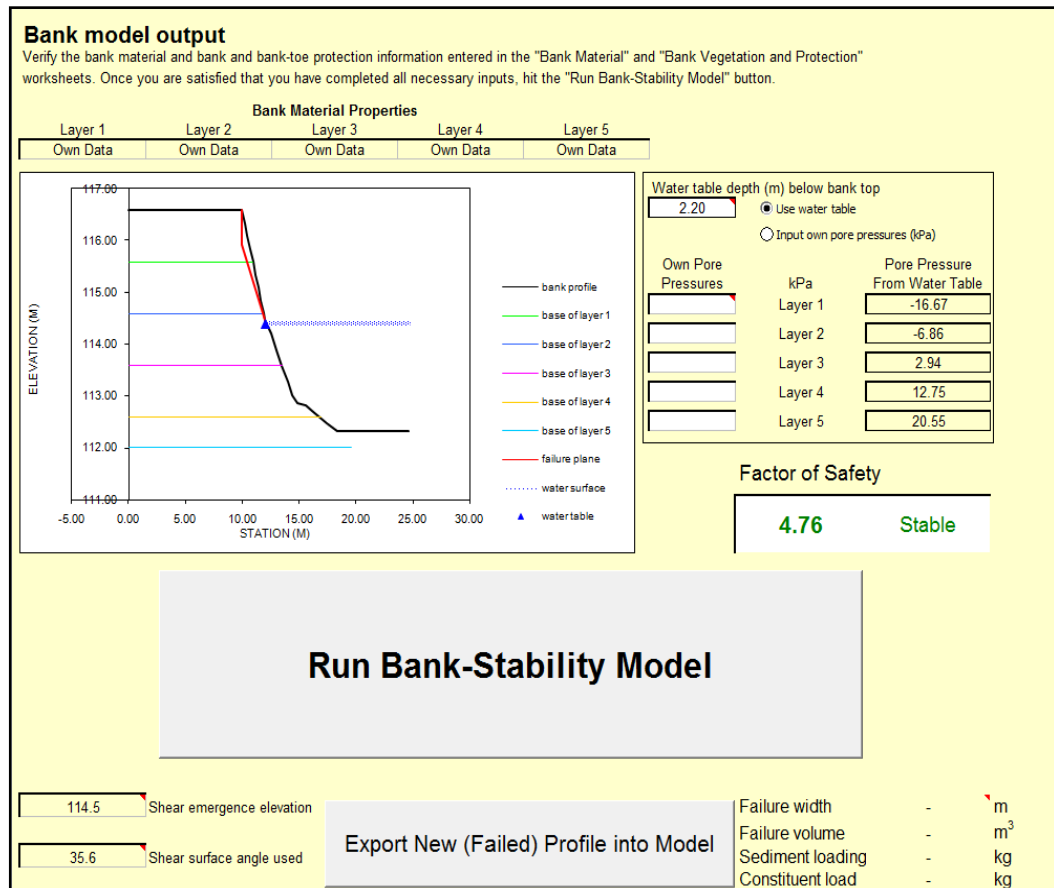


Fuente: Amiri et al., 2010, p. 5.

Si el Factor es superior a 1 se informa que la banca es estable (Figura 58), si el factor es inferior a 1 se informa que la banca es inestable. También se señala

cuando las condiciones de estabilidad condicionada, lo cual ocurre para F_s ligeramente mayor a 1.

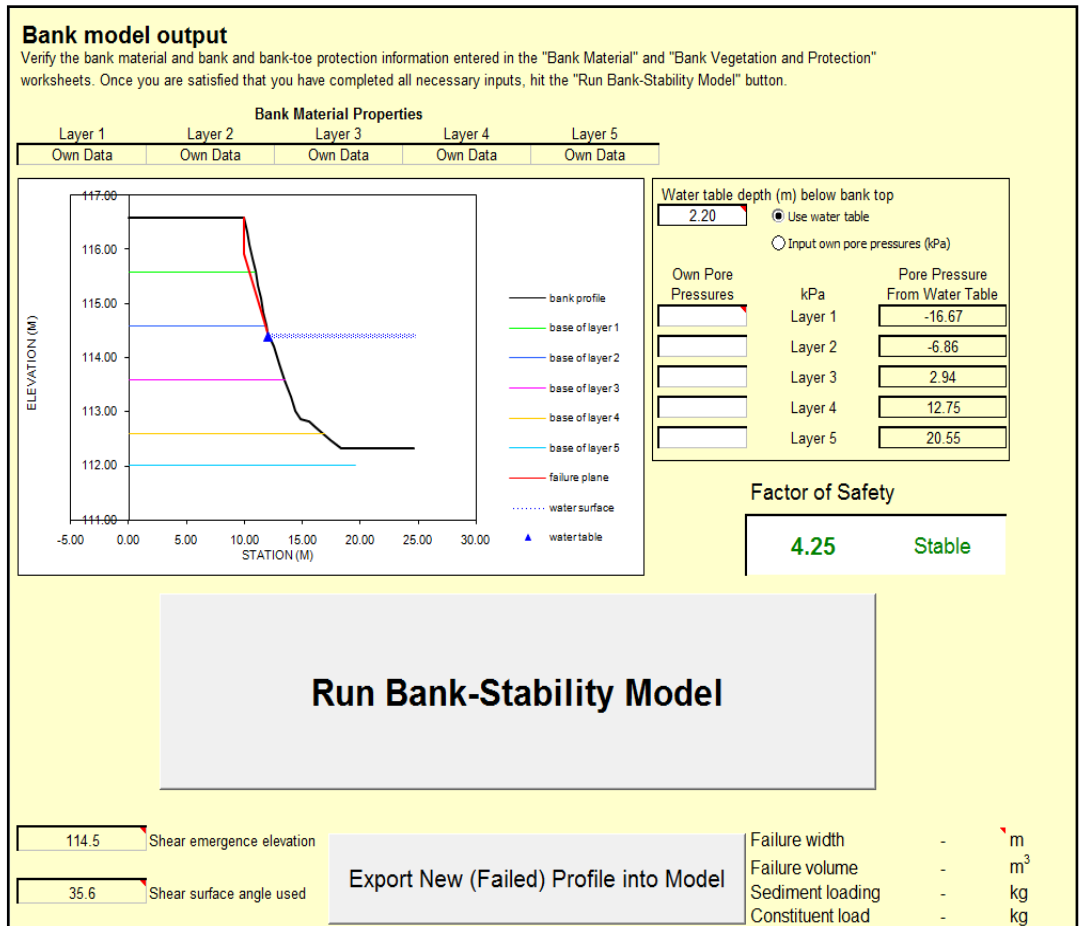
Figura 58. Análisis de estabilidad de la banca, con vegetación en su parte superior.



Fuente: El Autor

En la situación sin vegetación sobre la banca, y con la grieta de tensión se obtiene también condición de estabilidad (Figura 59). Obsérvese cómo, al contemplar la presencia de vegetación sobre la banca del río, el factor de seguridad aumenta de 4.25 a 4.76, mostrando el efecto de disponer de elementos que aporten a la resistencia del suelo (sistema radicular).

Figura 59. Análisis de estabilidad, sin vegetación en su parte superior.

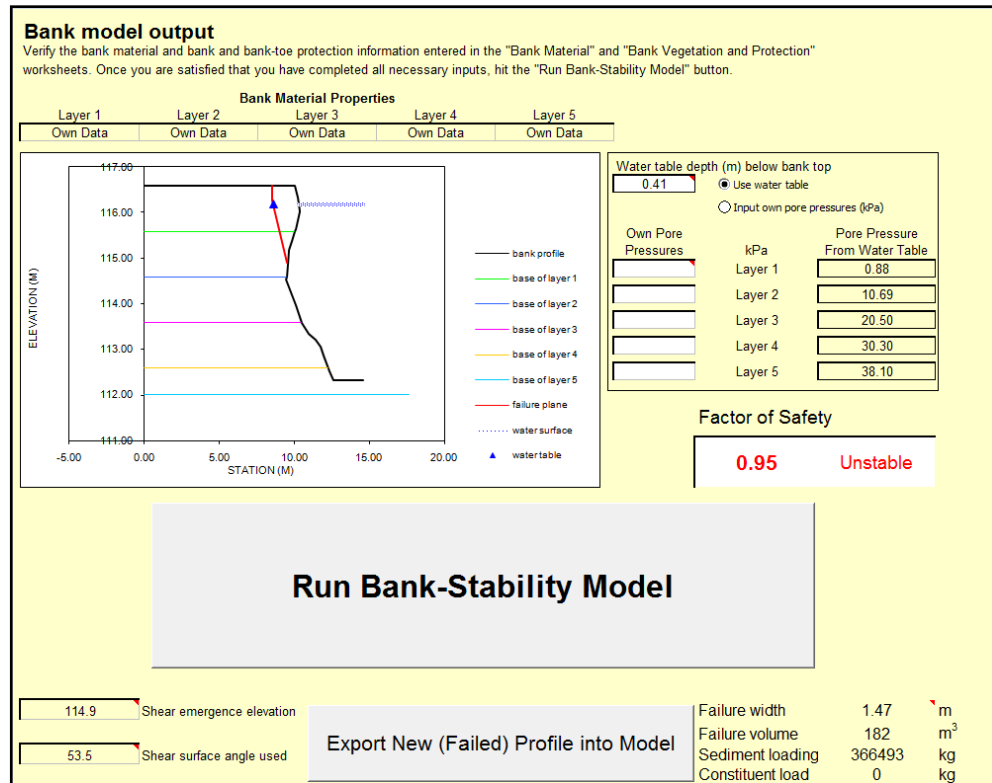


Fuente: El Autor

Como resultado del análisis de estabilidad, se tiene el cálculo por parte de BSTEM de las siguientes variables que se informan en la parte inferior izquierda del módulo *Bank Output Mode* (Figura 60):

- Ancho (en sentido transversal) de la falla (mts)
- Volumen de (el material de) la falla m³
- Carga de sedimento generada (Kg)

Figura 60. Estadísticas del material fallado.



Fuente: El Autor

9. Luego, se puede (si así se desea) evaluar la situación de erodabilidad del pie del talud y de la margen si se instalasen medidas de protección, para examinar el impacto sobre la evolución de la margen en términos de cantidad de sedimento erosionado y potencialmente aportado a la corriente (si el flujo subsecuente tiene la capacidad de arrastrarlo).

Para ello, luego del análisis de erodabilidad del pie (paso 5 anterior) y en el módulo de *Bank Vegetation and Protection*, además de la asignación de la vegetación riparia, se toman las opciones *Bank Protection* y *Bank Toe Protection* (Figura 53). Así, el enfoque dado a este aspecto es como sigue:

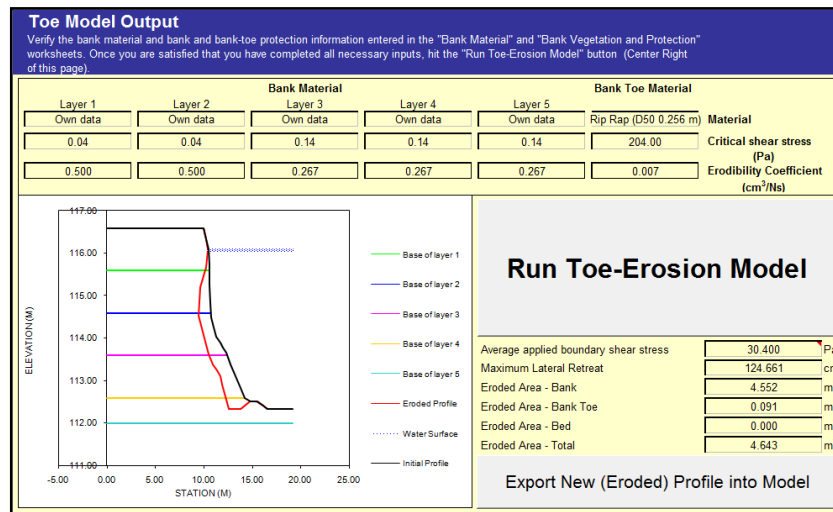
- Protección del pie del talud: se escogió la alternativa de enrocado con tamaño medio de 25.6 cm (Rip Rap); sin protección en la banca.
- Protección de la banca: se tomó la alternativa de geotextil sintético, sin protección del pie del talud.
- Protección integral (simultánea) del pie del talud y de la banca: combinación de las dos anteriores

En todos los casos, las opciones de protección son suministradas por el modelo BSTEM de un abanico de 7, en función del esfuerzo de corte que las mismas permiten se ejerza sobre su superficie. Estas opciones son: Sin protección (No protection), Tejdos a base de fibra de cáscara de coco (coir fiber), Geotextil sintético (geotextile – synthetic), Red de fique (jute net), Restos de vegetación maderable (large woody debris), Fajinas vivas (live fascine), Injertos de plantas (plant cuttings) y Enrocado (Rip Rap).

El tipo de vegetación presente en la banca, que ha incidido en el valor del coeficiente de rugosidad evaluado, aplicando la metodología de Cowan debe tenerse en cuenta si se quiere tomar la opción de protección con vegetación natural (plant cuttings). Para cada opción se genera automáticamente en el módulo de *Toe Erosion Model* una evaluación de la cantidad de material que sería erosionado de la margen (pie, banca o ambas). Así, se tiene entonces una estimación sobre el beneficio relativo de las medidas de protección en el momento en que las mismas se quieran instalar (Figuras 61, 6 y 63), informándose también sobre el esfuerzo de corte promedio aplicado, la máxima recesión o retroceso de la margen, y el área transversal erodada en la banca, el pie del talud y el lecho (m^2). Se destaca que cuando sólo hay protección del pie del talud, el área erodada sería de $4.6 m^2$, mientras que si sólo se protege la banca, la erosión alcanzaría a

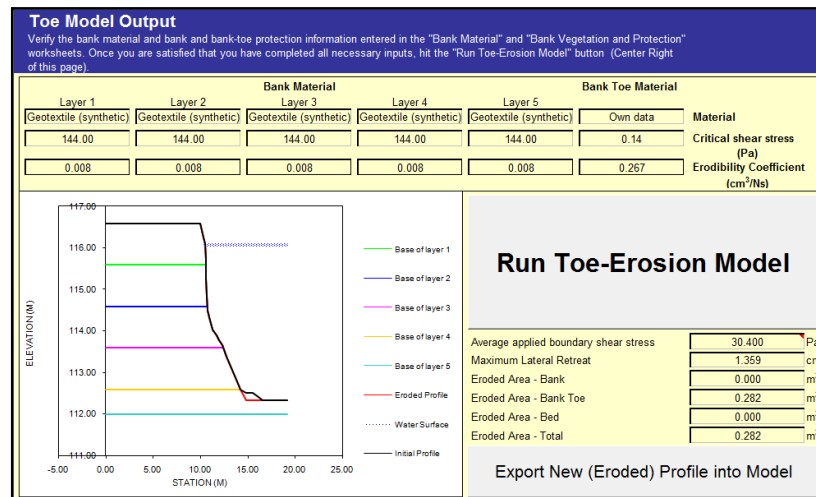
afectar a 0.3 m² de la sección transversal (margen derecha). Cuando la protección es total, no hay afectación.

Figura 61. Resultados con protección sólo del pie del talud.



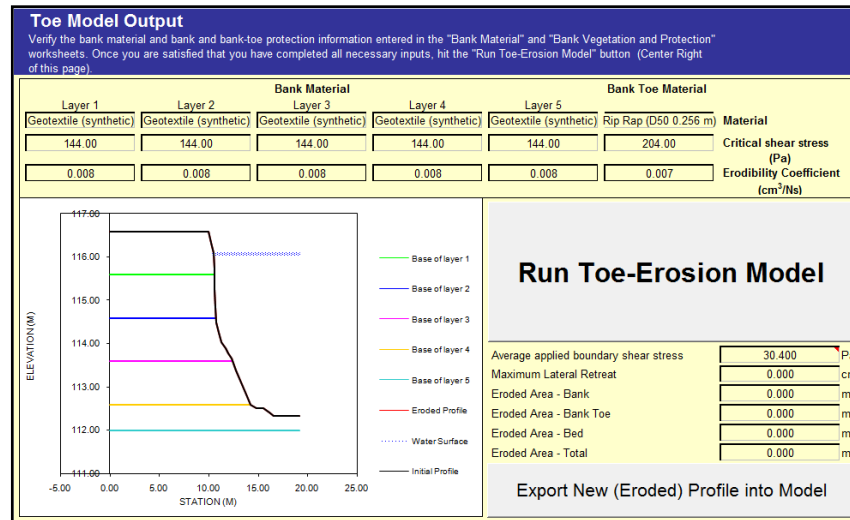
Fuente: El Autor

Figura 62. Resultados con protección sólo de la banca.



Fuente: El Autor

Figura 63. Resultados con protección en el pie del talud y en la banca.



Fuente: El Autor

10. El siguiente paso lo constituye el exportar la nueva situación de la margen (sin protección obviamente), en caso que se haya presentado la falla (el perfil seguirá la línea roja donde esta se presente), para lo cual se oprime el botón *Export New (Failed) Profile into Model*, es decir, se podría continuar el análisis de la evolución de la margen tomando en cuenta un nuevo caudal. Si no se presenta falla ($F_s > 1$) se debe tomar la sección tal como resulta del análisis de estabilidad y se corre el modelo con el nuevo caudal.

Este proceso tiene, entonces, la posibilidad de ser iterativo, si así se desea. Para el presente trabajo se tomó la serie de caudales medios mensuales (es decir, los caudales diarios representativos de la situación promedio para cada mes) como base del proceso iterativo con el fin de hacer una proyección de la evolución de la banca.

5.4 Resultados obtenidos.

Se procesó información correspondiente al comportamiento hidráulico del río Cesar en el sector Las Garzas, para caudales medios mensuales con períodos de retorno de 2 y 50 años. Estos datos se tradujeron en los correspondientes niveles (elevación del agua) en el río, que, junto a la información sobre caracterización geotécnica de la margen, así como una consideración sobre la cobertura vegetal de la misma, fueron los datos de entrada del modelo BSTEM..

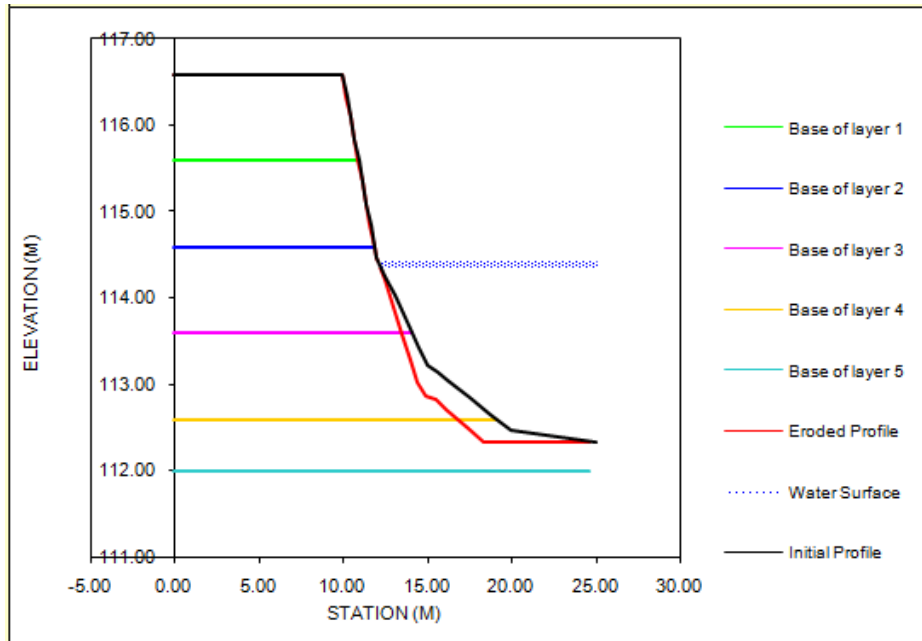
5.4.1. Período de retorno de 2 años. Para el caso de los niveles de agua en el río correspondientes a un período de retorno de 2 años, estos tuvieron una variación máxima de 1.48 metros (entre Octubre y Marzo). Al examinar esta variación (Figura 78) y compararla con la que experimenta el F_s de estabilidad (Figura 79), se observa que este tiene una descenso desde 4.76 hasta 1.50 entre Octubre y Septiembre. Los datos obtenidos en la aplicación del BSTEM se observan en la Tabla 7.

Al tenerse valores de F_s siempre que indican siempre estabilidad ($F_s > 1.2$), dicho descenso se atribuye al proceso de erosión lateral que extraería material del pie del talud que fue alterando la geometría de la sección transversal.

En las Figuras 64 a 75, se observa la progresión de la configuración de la margen derecha como resultado de la interacción con los niveles del río.

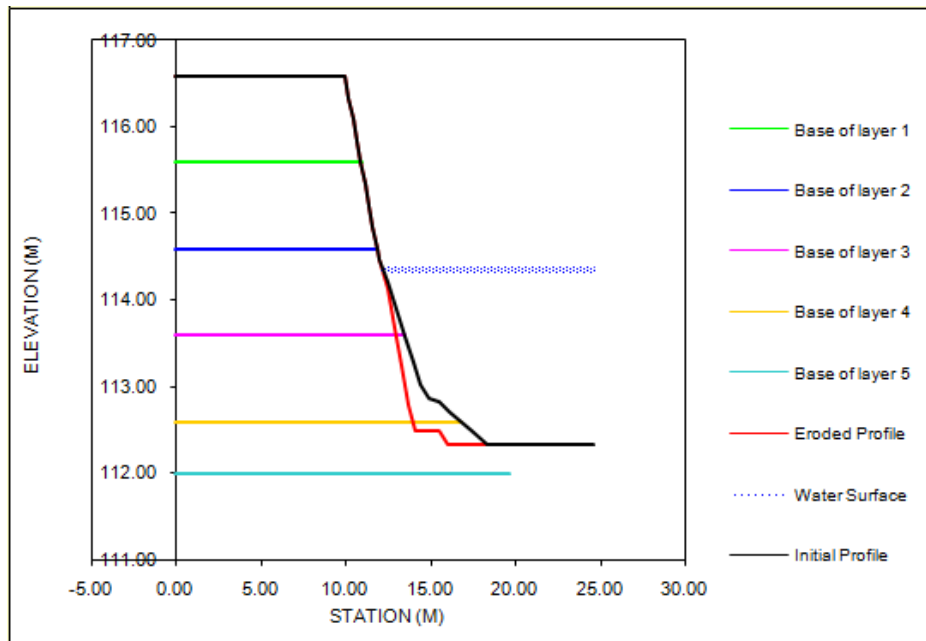
De acuerdo con el BSTEM no se produciría la falla de la banca pero sí la socavación del pie de la misma, en la cantidad de 7.3 m^2 .

Figura 64. Pie de talud Octubre



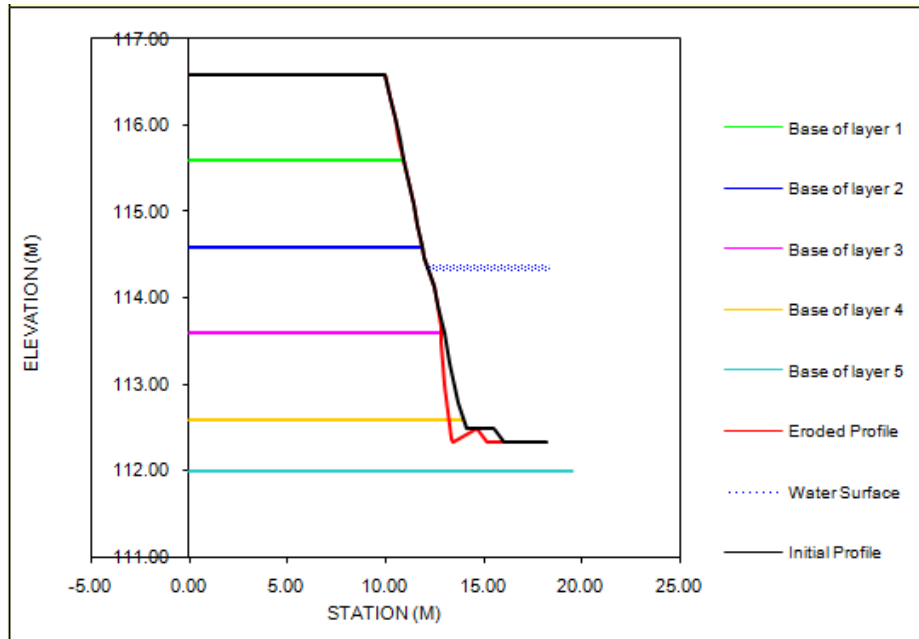
Fuente: El Autor

Figura 65. Pie de talud Noviembre



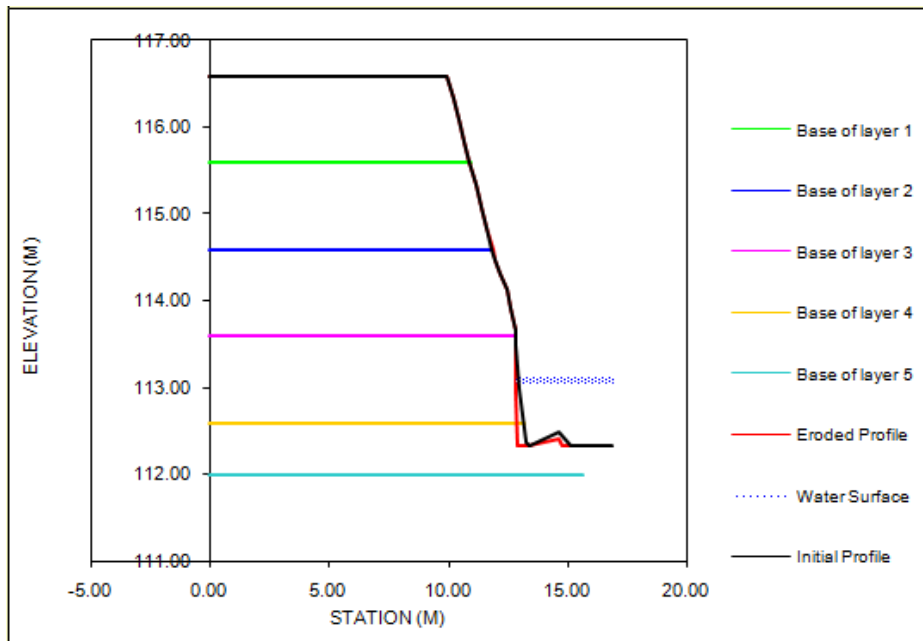
Fuente: El Autor

Figura 66. Pie de talud Diciembre



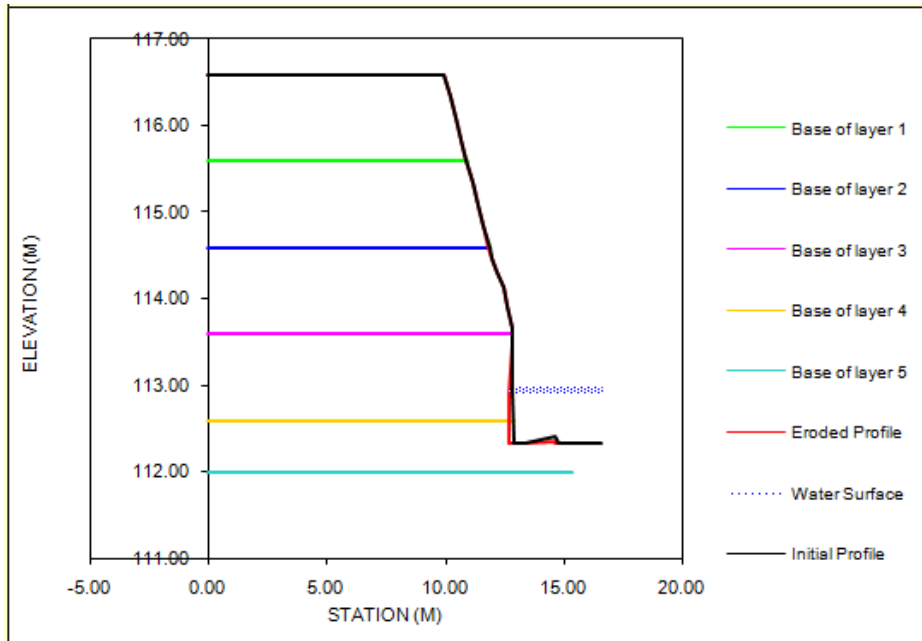
Fuente: El Autor

Figura 67. Pie de talud Enero



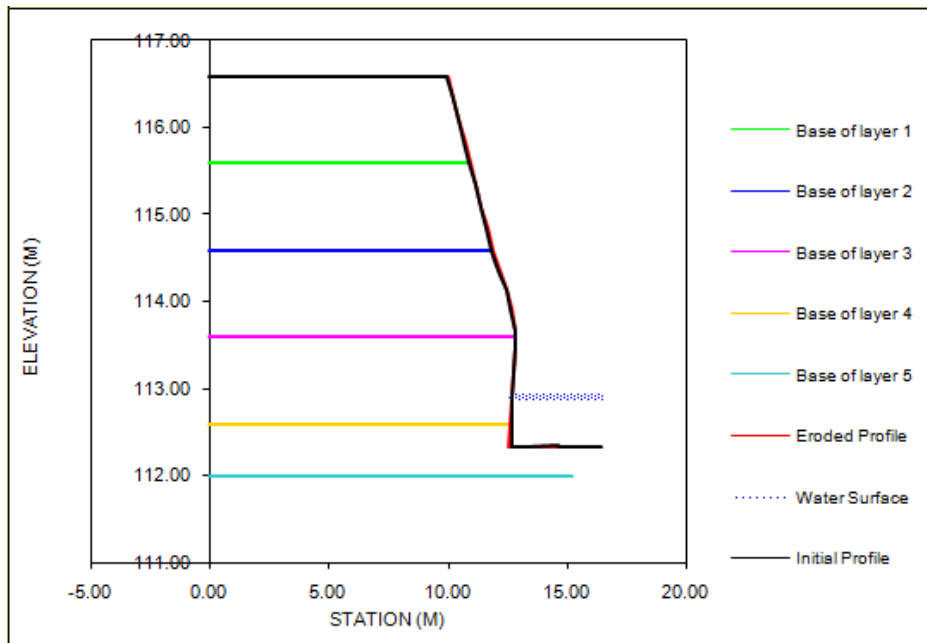
Fuente: El Autor

Figura 68. Pie de talud Febrero



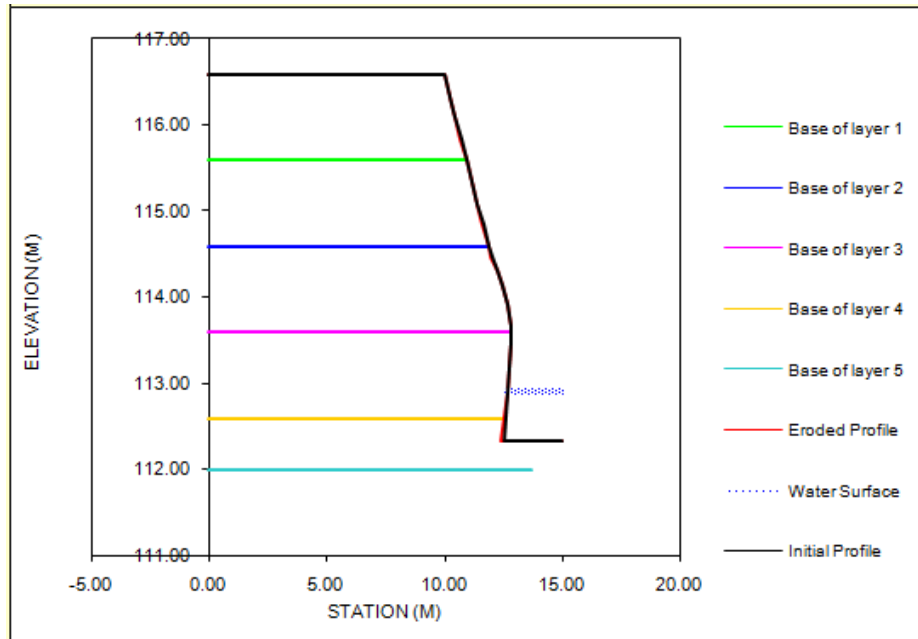
Fuente: El Autor

Figura 69. Pie de talud Marzo



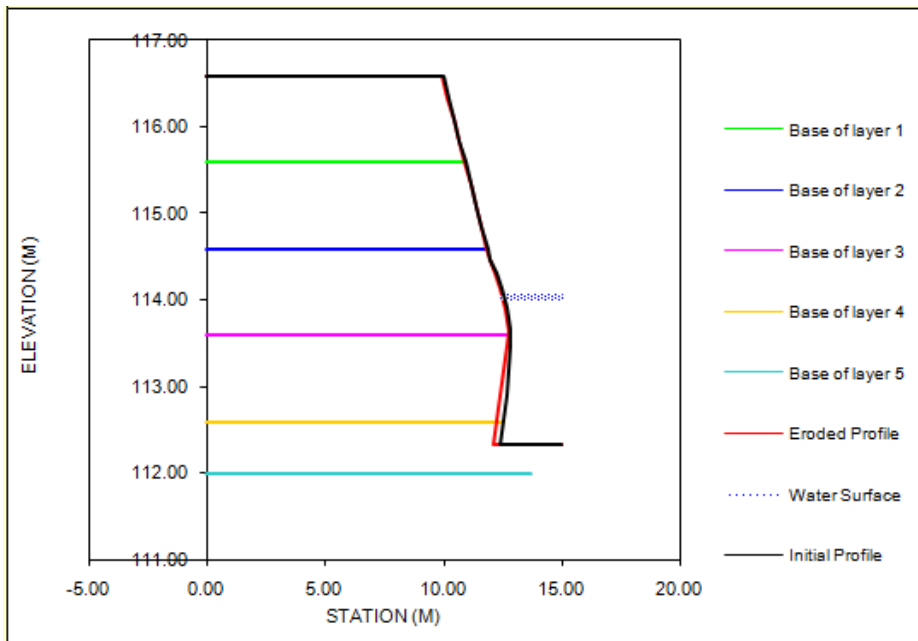
Fuente: El Autor

Figura 70. Pie de talud Abril



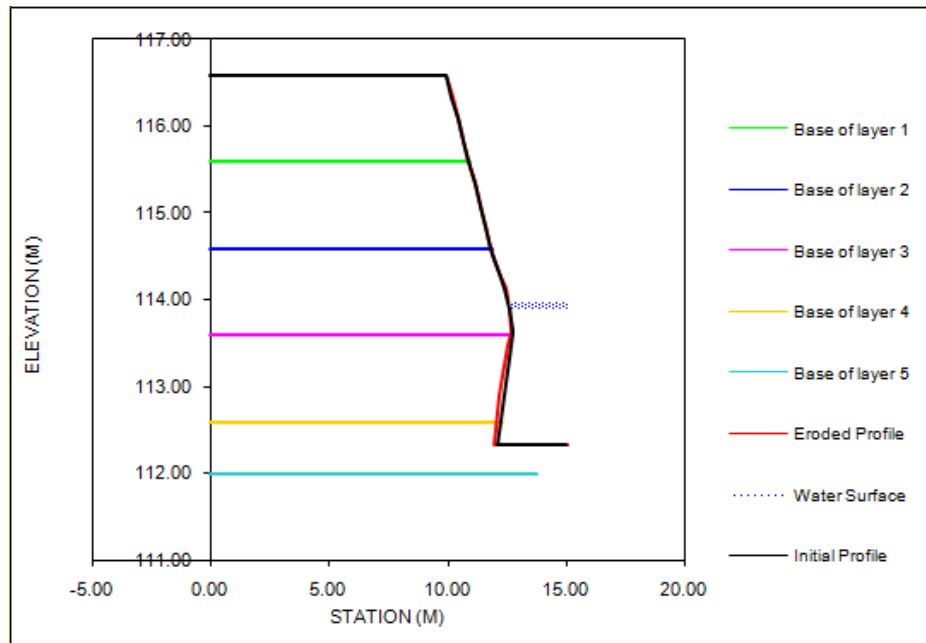
Fuente: El Autor

Figura 71. Pie de talud Mayo



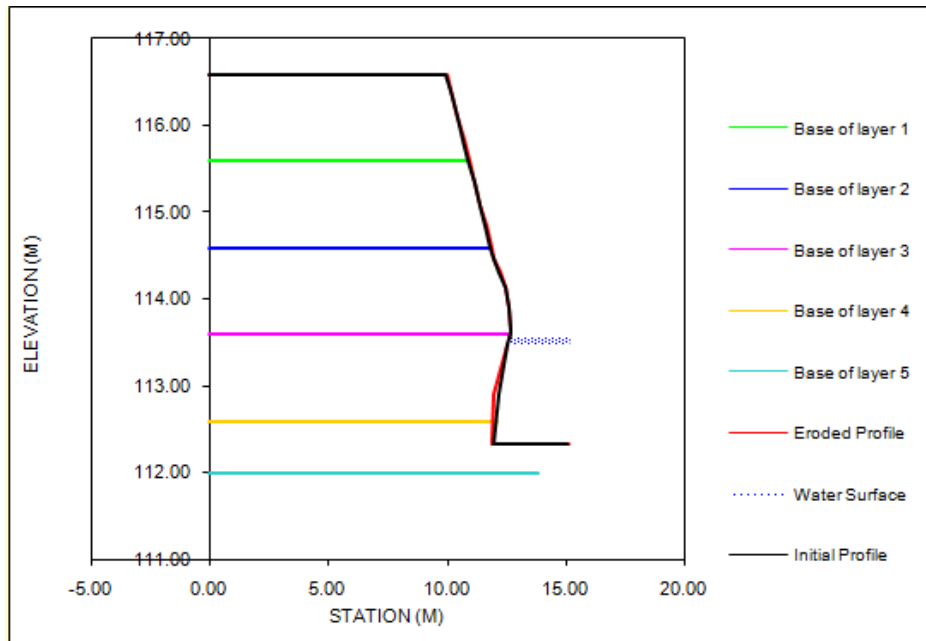
Fuente: El Autor

Figura 72. Pie de talud Junio



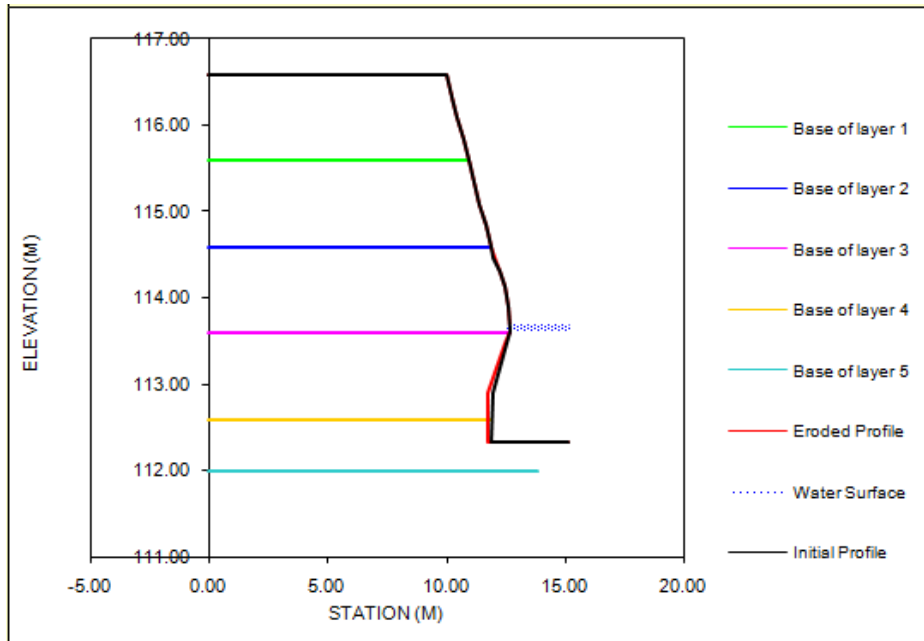
Fuente: El Autor

Figura 73. Pie de talud Julio



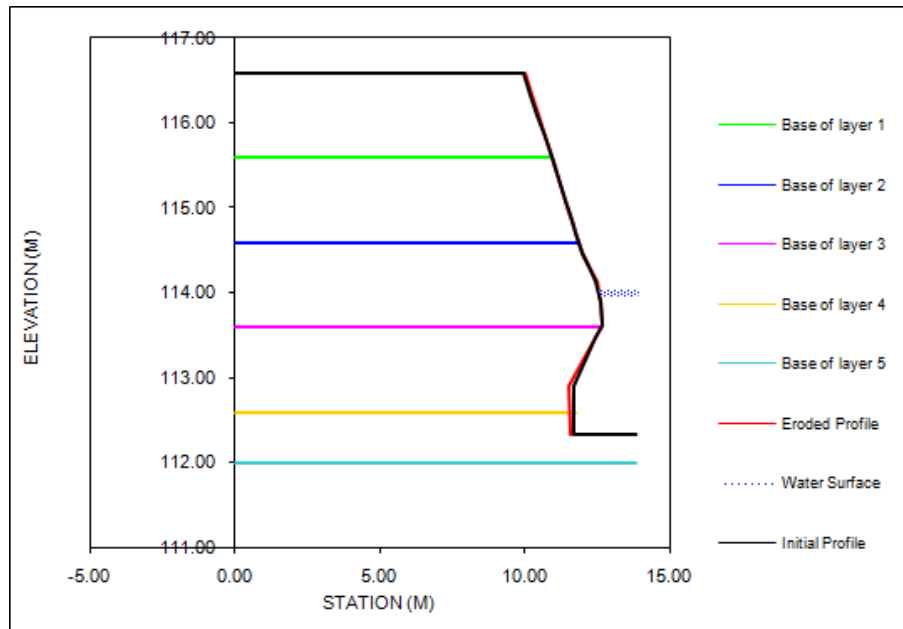
Fuente: El Autor

Figura 74 Pie de talud Agosto



Fuente: El Autor

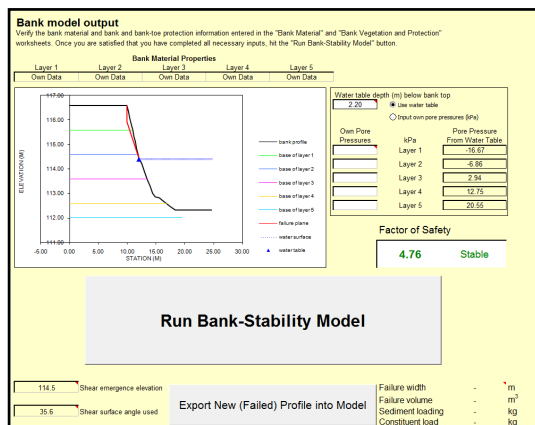
Figura 75. Pie de talud Septiembre



Fuente: El Autor

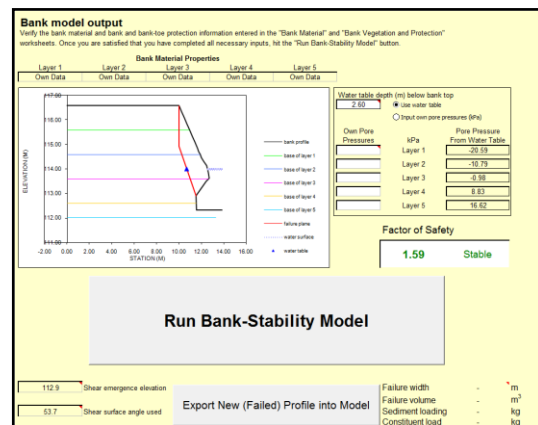
A manera de ejemplo, en las Figuras 76 y 77, respectivamente se incluyen los resultados de los análisis de estabilidad de la margen derecha para Octubre (inicio de la iteración) y septiembre (final de la iteración), incluyendo en esta oportunidad la superficie de falla y el cálculo del Factor de Seguridad, así como se tiene arranque de material de la margen. La forma de la sección en la Figura 77 resulta de la acción de los diversos niveles de agua en el río, el agua subterránea, la vegetación ribereña y los factores geotécnicos intrínsecos del suelo

Figura 76. Cálculo de Fs en Octubre



Fuente: El Autor

Figura 77. Cálculo de Fs en Septiembre



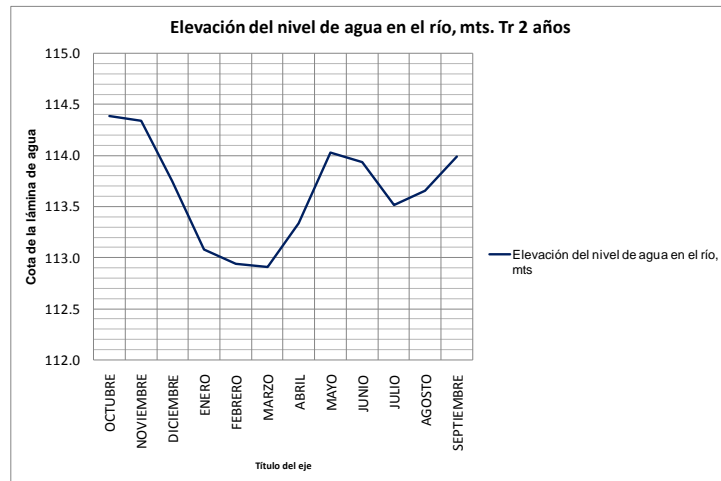
Fuente: El Autor

Tabla 7. Fs para estabilidad de la margen derecha en la estación 14. Tr = 2 años

Factores de seguridad para estabilidad de la margen derecha, estación 14, río Cesar. Tr 2 años Se ha contemplado la presencia de cobertura vegetal (pastos, árboles y suelo desnudo sobre la margen)							
MES	Tr, años	NAF, mts	Elevación del nivel de agua en el río, mts	Cota superior de pie del talud, Q, mts	Cohesión aportada por el sistema radicular, Cr, kPa	Fs con grieta de tensión	Fs sin grieta de tensión
OCTUBRE	2	2.20	114.39	113.23	5.3	4.76	5.58
NOVIEMBRE	2	2.25	114.34	112.87	5.4	4.78	5.22
DICIEMBRE	2	2.84	113.75	112.79	6.3	3.16	3.85
ENERO	2	3.51	113.08	112.99	7.0	2.83	3.31
FEBRERO	2	3.65	112.94	112.93	7.2	2.73	2.98
MARZO	2	3.68	112.91	112.91	7.3	2.56	2.78
ABRIL	2	3.25	113.34	112.91	6.7	2.39	2.63
MAYO	2	2.56	114.03	112.91	5.9	2.20	2.50
JUNIO	2	2.65	113.94	112.91	6.1	2.00	2.35
JULIO	2	3.07	113.52	112.91	6.5	1.85	2.19
AGOSTO	2	2.93	113.66	112.91	6.4	1.71	2.10
SEPTIEMBRE	2	2.60	113.99	113.49	6.0	1.59	2.03

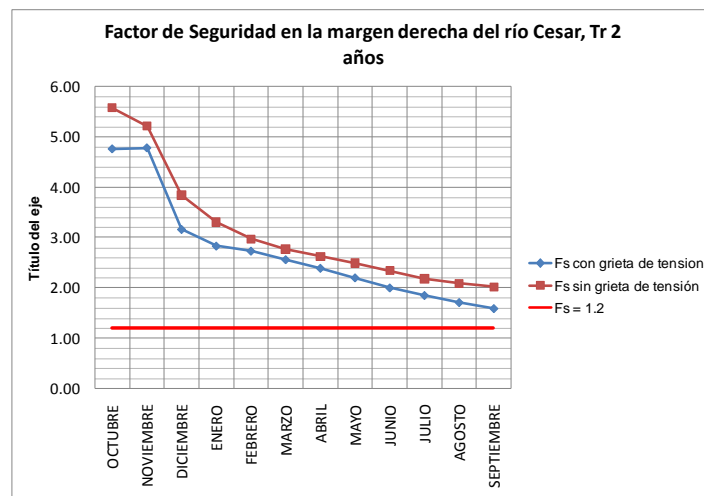
Fuente: El Autor

Figura 78. Comportamiento del nivel del río en la estación 14, río Cesar. Tr de 2 años



Fuente: El Autor

Figura 79. Variación del Fs según la época del año, Tr de 2 años.



Fuente: El Autor

5.4.2. Período de retorno de 50 años. Una circunstancia diferente se presenta para el caso de caudales extremos de mayor magnitud, correspondientes a 50 años de período de retorno, para los que la variación del nivel de agua en el río

(Figura 80) estuvo en el orden de 2.86 metros (entre Noviembre y Marzo), que representó una variación del Fs de mayor complejidad (Figura 78). Como se observa, para este régimen de caudales se hizo la comparación entre el comportamiento de ambas márgenes, evidenciándose que cuando se contempla la grieta de tensión (líneas de color rojo) el Fs es menor que cuando esta variable no entra en el análisis (líneas de color verde), lo cual es de esperar la mayor parte del tiempo.

Más interesante es examinar la variación que experimenta el Fs respecto a la variación del nivel de agua en el río. Es obvio que al sucederse los cambios de nivel en el canal principal, y por consiguiente del nivel freático en cada margen, la resistencia del suelo cambia también lo cual afecta la estabilidad, eventualmente reflejándose en la falla del talud.

Para el caso de la margen derecha (Tabla 8, Figura 81), en el mes de Noviembre se produce socavación del pie del talud y equilibrio condicional de la banca ($F_s = 1.05$), lo cual conlleva a que posteriormente (Diciembre, aún con nivel alto de agua en el río) se tenga un aumento en las posibilidades de falla, lo cual se refleja en un descenso fuerte en el Fs, al punto que su valor cae por debajo de 1 ($F_s = 0.71$), prediciéndose la desestabilización del talud.

La conformación de la sección sigue una evolución que responde a los cambios de nivel de agua en el río y a la erosión lateral que ello conlleva, de manera tal que posteriormente a tenerse el segundo máximo de niveles (Mayo) se predice una nueva falla del talud (Mayo a Septiembre, con estabilidad condicional en Mayo y Agosto, para el caso con grieta de tensión superficial. En el caso sin grieta de tensión el Fs también experimenta descensos hasta la estabilidad condicional en

los meses de Diciembre y Junio). Algo similar ocurre, pero en menor grado, con la margen izquierda (Tabla 9, Figura 81), ya que esta es superada por los niveles de agua en el río en los meses de Octubre, Noviembre y Mayo (en teoría el río desbordaría esta margen), lo cual contribuye a la erosión lateral, pero dada su configuración geométrica (es de menor altura) sólo se tendría la falla por desestabilización en los meses de Diciembre y Julio (sin grieta de tensión, también se tendría estabilidad condicional en los meses de Diciembre y Julio, aunque el modelo predice falla también en el mes de Mayo).

Tabla 8. Fs para estabilidad, margen derecha en la estación 14. Tr 50 años.

Factores de seguridad para estabilidad de la margen derecha, estación 14, río Cesar. Tr 50 años								
Se ha contemplado la presencia de cobertura vegetal (pastos, árboles y suelo desnudo sobre la margen DERECHA)								
MES	Tr, años	MARGEN	NAF-MD mts	Elevación del nivel de agua en el río	Cota superior de pie del talud, Q, mts	Cohesión aportada por el sistema radicular, Cr	Fs con grieta de tensión. MD	Fs sin grieta de tensión. MD
OCTUBRE	50	MD	0.52	116.07	113.23	4.3	2.17	2.35
NOVIEMBRE		MD	0.41	116.18	112.59	4.3	1.05	1.35
DICIEMBRE		MD	1.56	115.03	113.07	4.3	0.71	1.01
ENERO		MD	2.75	113.84	112.91	5	1.41	2.92
FEBRERO		MD	3.14	113.45	112.97	6.2	2.17	3.25
MARZO		MD	3.27	113.32	112.97	6.6	2.95	3.14
ABRIL		MD	2.26	114.33	112.89	6.7	2.32	2.6
MAYO		MD	0.77	115.82	112.59	5.4	1.02	1.66
JUNIO		MD	1.18	115.41	112.86	4.3	0.72	1.05
JULIO		MD	2.28	114.49	114.17	4.9	0.88	1.31
AGOSTO		MD	1.97	114.62	113.08	5.4	1.02	2.12
SEPTIEMBRE		MD	1.35	115.24	112.80	5	0.76	1.49

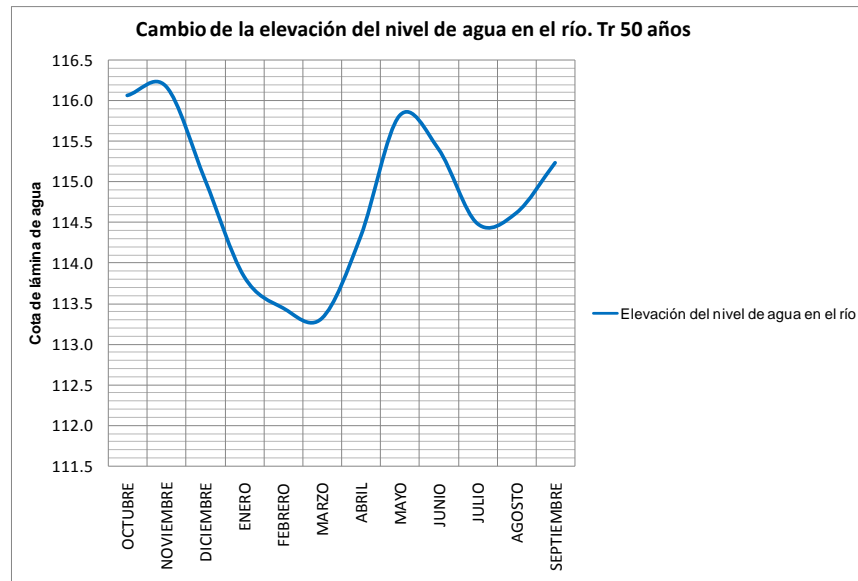
Fuente: El Autor

Tabla 9. Fs para estabilidad, margen izquierda en la estación 14. Tr 50 años.

Factores de seguridad para estabilidad de la margen izquierda, estación 14, río Cesar. Tr 50 años								
Se ha contemplado la presencia de cobertura vegetal (pastos, árboles y suelo desnudo sobre la margen IZQUIERDA)								
MES	Tr, años	MARGEN	NAF-MI, mts	Elevación del nivel de agua en el río	Cota superior de pie del talud, Q, mts	Cohesión aportada por el sistema radicular, Cr	Fs con grieta de tensión. MI	Fs sin grieta de tensión. MI
OCTUBRE	50	MI	-0.17	116.07	112.72	4.6		4.05
NOVIEMBRE		MI	-0.28	116.18	113.13	4.4		3.87
DICIEMBRE		MI	0.66	115.03	112.84	4.4	0.9	1.08
ENERO		MI	1.89	113.84	112.81	4.3	3.96	3.96
FEBRERO		MI	2.28	113.45	112.81	5	2.98	3.7
MARZO		MI	2.41	113.32	112.61	5.7	3.05	3.85
ABRIL		MI	1.4	114.33	112.61	6	2.42	2.8
MAYO		MI	-0.11	115.82	112.73	5		0.5
JUNIO		MI	0.15	115.41	112.82	4.3	1.39	1.39
JULIO		MI	1.25	114.49	112.94	4.3	0.72	1.1
AGOSTO		MI	0.95	114.62	112.82	5	1.5	1.92
SEPTIEMBRE		MI	0.33	115.24	113.07	4.8	1.43	1.43

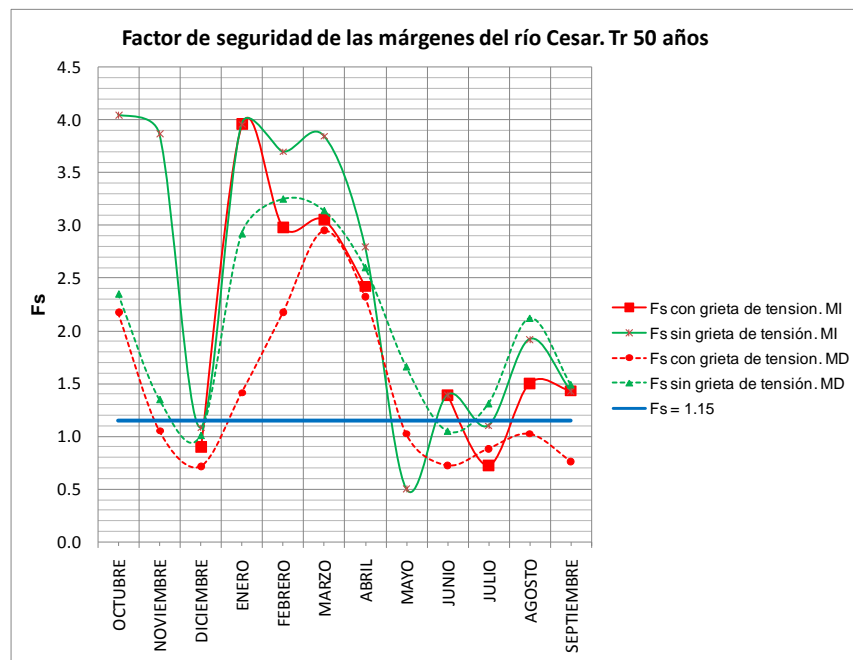
Fuente: El Autor

Figura 80. Comportamiento del nivel del río en la estación 14, río Cesar, Tr 50 años.



Fuente: El Autor

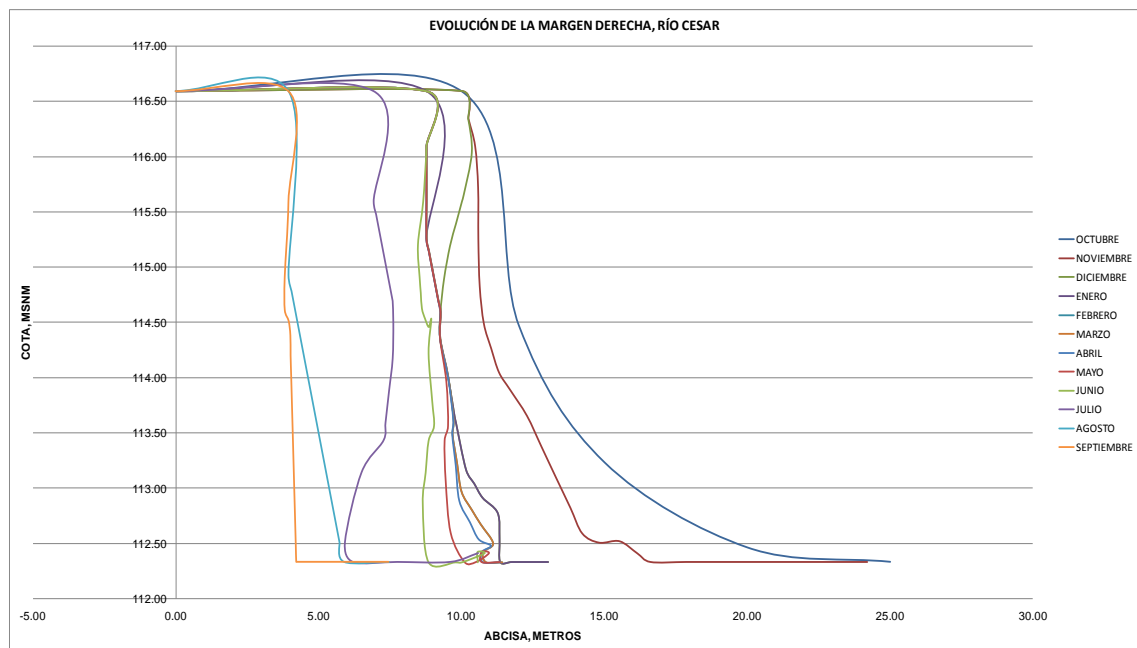
Figura 81. Variación del Fs según la época del año, Tr de 50 años.



Fuente: El Autor

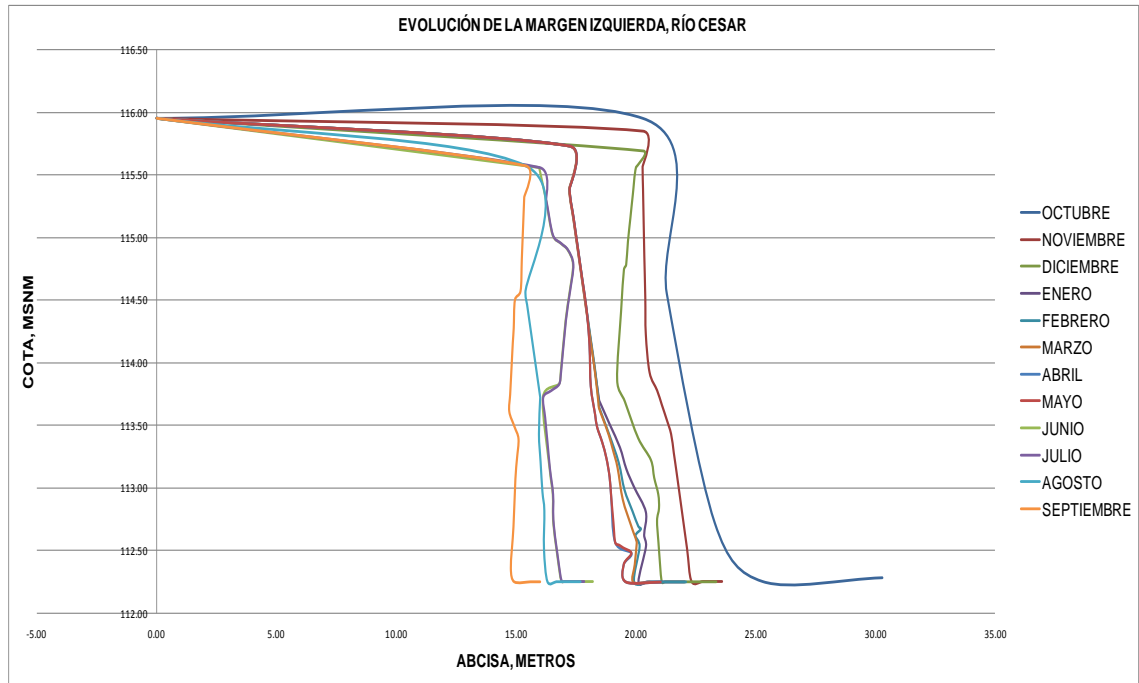
En las Figuras 82 y 83, se presenta la progresión de la conformación de ambas márgenes (derecha e izquierda respectivamente) para el período de retorno de 50 años, según predice el BSTEM. La carga en volumen de sedimento aportado, también en teoría, debido a la erosión de las dos orillas sería en total de 2562 m³ (642 m³ en la izquierda y 1920 m³ en la derecha) en tanto que la sección transversal se ampliaría en la cantidad de 43.99 m² en total (15.42 m² en la banca y 3.29 m² en el pie, sobre la margen izquierda; 18.28 m² en la banca y 6.44 m² en el pie sobre la margen derecha) según se deduce de las Tablas 10 y 11. La carga en peso de sedimento que potencialmente podría aportarse al flujo, a lo largo del tramo de 100 metros contemplado en forma aferente para la estación 14 es de 4962.5 toneladas (1103.5 ton aportadas por la margen izquierda y 3859 toneladas aportadas por la margen derecha).

Figura 82. Progresión se la margen derecha, Tr 50 años



Fuente: El Autor

Figura 83. Progresión se la margen izquierda, Tr 50 años



Fuente: El Autor

Tabla 10. Erosión (área transversal erosionada) en la estación 14.

MES	MARGEN	Esfuerzo de Corte, Pa, τ	Retroceso horizontal, cm	Área erodada, m ²			
				Banca	Pie	Lecho	Total
OCTUBRE	MD	26.22	89.574	3.937	2.393	0.378	6.708
	MI	25.3	73.502	3.253	0.0584	0.004	3.3154
NOVIEMBRE	MD	30.24	118.208	4.824	0.42		5.244
	MI	25.45	121.446	2.709	0.715		3.424
DICIEMBRE	MD	19.2	55.213	1.345	0.477		1.822
	MI	18.5	81.813	1.437	0.443		1.88
ENERO	MD	11.07	58.689	0.311	0.26		0.571
	MI	8.27	37.608	0.312	0.121		0.433
FEBRERO	MD	5.09	9.712	0.042	0.172		0.214
	MI	3.25	10.869	0.074	0.067		0.141
MARZO	MD	4.17	9.139	0.028	0.139		0.167
	MI	4.26	12.054	0.068	0.06		0.128
ABRIL	MD	10.64	35.267	0.365	0.363		0.728
	MI	10.34	35.485	0.635	0.107		0.742
MAYO	MD	17.07	80.436	1.729	0.152		1.881
	MI	38.75	146.894	3.608	0.376	0.122	4.106
JUNIO	MD	41.83	273.446	4.004	0.966	0.052	5.022
	MI	13.61	97.889	1.141	0.374		1.515
JULIO	MD	10.62	58.53	0.129	0.417	0.016	0.562
	MI	11.01	54.75	0.3	0.304		0.604
AGOSTO	MD	14.28	49.763	0.444	0.392		0.836
	MI	11.68	68.711	0.641	0.332		0.973
SEPTIEMBRE	MD	20.98	83.553	1.122	0.277		1.399
	MI	17.03	81.04	1.243	0.336		1.579

Fuente: El Autor

Tabla 11. Carga potencial de sedimentos aportada por las márgenes en la estación 14 (longitud aferente de 100 metros)

MES	MARGEN	ANCHO DE FALLA, M	VOLUMEN DE FALLA, M3	CARGA DE SEDIMENTO, KG	OBSERVACIÓN
NOVIEMBRE	MD	1.77	236.00	477,175.00	ESTABILIDAD CONDICIONAL. LA FALLA SERIA EVENTUAL
	MI				
DICIEMBRE	MD	1.23	207.00	408,267.00	
	MI	3.08	308.00	620,245.00	
MAYO	MD	0.57	70.00	140,947.00	ESTABILIDAD CONDICIONAL. LA FALLA SERIA EVENTUAL
	MI	1.25	11.00	22,042.00	
JUNIO	MD	1.86	258.00	512,867.00	
	MI				
JULIO	MD	2.97	1,046.00	2,117,602.00	
	MI	0.59	323.00	461,261.00	
AGOSTO	MD	0.16	25.00	47,747.00	ESTABILIDAD CONDICIONAL. LA FALLA SERIA EVENTUAL
	MI				
SEPTIEMBRE	MD	0.49	78.00	154,310.00	
	MI				

Fuente: El Autor

Por último, es preciso mencionar que al hacer una evaluación del comportamiento del factor de seguridad para estabilidad de la banca, desde el punto de vista de la influencia de la vegetación presente en su parte superior (*Top Vegetation*), se encontró que, como se ha mencionado, la cohesión aportada por el sistema radicular mejora las condiciones del suelo, aunque lo hace con un ligero aumento en el factor de seguridad, siendo del orden del 3% en promedio para el caso de Tr 2 años. En la Tabla 12 se muestra algunos ejemplos de lo aquí comentado.

Tabla 12. Efecto de la vegetación ribereña sobre la estabilidad de la banca

MES	N VEGETACIÓN	VEGETACIÓN	VARIACIÓN PORCENTU	MES	N VEGETACIÓN	VEGETACIÓN	VARIACIÓN PORCENTU
			AL				AL
OCTUBRE	4.25	4.76	12%	OCTUBRE	1.66	1.98	19%
NOVIEMBRE	4.63	4.78	3%	NOVIEMBRE	0.95	1.05	11%
DICIEMBRE	3.08	3.16	3%	DICIEMBRE	0.71	0.71	0%
ENERO	2.74	2.83	3%	TR 50 AÑOS			
FEBRERO	2.64	2.63	0%				
MARZO	2.56	2.56	0%				
ABRIL	2.32	2.39	3%				
MAYO	2.13	2.2	3%				
JUNIO	1.95	2	3%				
JULIO	1.85	1.85	0%				
AGOSTO	1.71	1.71	0%				
SEPTIEMBRE	1.59	1.59	0%				
TR 2 AÑOS							

Fuente: El Autor

5.5. FALLA POR EXFILTRACIÓN DESDE LA BANCA.

Como complemento a la falla por erosión del pie y la banca (hidráulica y geotécnica) se tiene el efecto erosivo del flujo subsuperficial desde el interior de la banca hacia la pared de esta, especialmente cuando hay descensos rápidos del nivel del río. El flujo aludido provoca inestabilidad de la banca debido al aumento en la presión en la interfase agua-suelo, a las fuerzas del gradiente de exfiltración y por erosión debida a la exfiltración misma. Así, el resultado es la movilización de partículas de suelo desde la pared de la banca, máxime si esta posee capas de alta conductividad hidráulica. No obstante, es un mecanismo que es difícil atribuir como factor activo de erosión, ya que es sutil, intermitente y no siempre se presenta de la misma forma (Midgley, 2010) ; sus efectos pueden quedar ocultos por los de la erosión hidráulica y la geotécnica. El modelo BSTEM no contempla la evaluación directa de este mecanismo de falla de la banca.

5.6. TIPOS DE OBRAS DE PROTECCIÓN RECOMENDADAS.

Siguiendo lo planteado en la formulación de la propuesta del presente trabajo de aplicación, a manera de propuesta de medidas de protección, se señalan los siguientes tipos de obras como medidas de protección que podrían construirse sobre la margen del río Cesar para reducir la posibilidad de falla de la margen, de acuerdo con las opciones tomadas en la aplicación del BSTEM:

5.6.1 Para la banca (parte superior de la margen): Se recomienda una geoestructura (Ramírez, 2013) compuesta por una formaleta flexible de tela sintética de doble capa, unida por puntos de filtración entretejidos que se fabrican con fibras de nylon y/o poliéster de alta tenacidad. Se debe llenar con concreto de agregado fino o mortero fluido, lo cual hace que sea una solución simple y

económica para el control de erosión. Este elemento se encuentra en presentaciones de Ancho de 2.92 m y Largo de 100 m. (Figura 84).

Para el tramo de 100 metros de largo, aferente a la estación (sección transversal) 14 analizada, se requeriría cubrir 920 m², siendo por lo tanto necesario el contar con 3 unidades de dicho geotextil. Este material tiene las siguientes ventajas, según catálogos comerciales (PAVCO, 2011): alto desempeño ante diferentes presiones hidrostáticas por los puntos de filtración; buen comportamiento a la socavación y gran capacidad de soporte porque se adapta fácilmente a los diferentes perfiles del suelo; reduce el efecto del oleaje y es más resistente a diferentes velocidades de flujo; minimiza el tiempo de construcción porque es liviano y fácil de instalar; no requiere mano de obra ni maquinaria especializada; flexible, puede ser instalado en condiciones secas o bajo el agua.

Figura 84 Izquierda. Esquema de la tela sintética. Derecha. Formaleta flexible llena de concreto fluido instalada en la margen de una corriente superficial



Fuente: [15

]

5.6.2. Para el pie de la banca (pie del talud). Se recomienda la instalación de colchones de piedra, armados con material pétreo de hasta 25 cm de diámetro, colocado dentro de una malla de polietileno. La malla sintética (PAVCO, 2011) es una estructura bidimensional o unidimensional, elaborada a base de polímeros, que está conformada por una red regular de costillas conectadas de forma integrada por extrusión, con aberturas de suficiente tamaño para permitir la trabazón del suelo, piedra u otro material geotécnico circundante. Típicamente, el colchón se arma como una gavión de 0.3 m de espesor, 1 m de ancho y longitudes variables (según necesidades del proyecto), envueltos en malla uniaxial de polietileno de alta resistencia. Presenta la ventaja de ser un material totalmente inerte el cual no sufre procesos de corrosión o de descomposición (Figura 85). Para el caso de la zona aferente a la estación 14 (100 metros de largo) tomando el punto superior del pie del talud a una cota de 113.23 msnm, se requieren 1250 metros cuadrados de malla uniaxial para la conformación del colchón.

En el Anexo D se encuentran los esquemas de las obras que se han recomendado para la estación 14.

Figura 85. Malla unidireccional para construir el colchón de protección



Fuente: TGI

6. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA MORFOLOGÍA DEL CAUCE DEL RÍO CESAR

Para complementar el análisis realizado mediante la aplicación del modelo BSTEM y de esta manera determinar en alguna medida la relación entre dichos cambios y la naturaleza del suelo del cual están conformadas las márgenes de la corriente, se recurrió al uso de imágenes de sensores remotos y su procesamiento digital mediante programas computarizados especializados, tales como MultiSpec Application (versión 3.3) y ArcGIS (versión 10.0).

El procedimiento adoptado se explica a continuación.

6.1 BÚSQUEDA Y DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES.

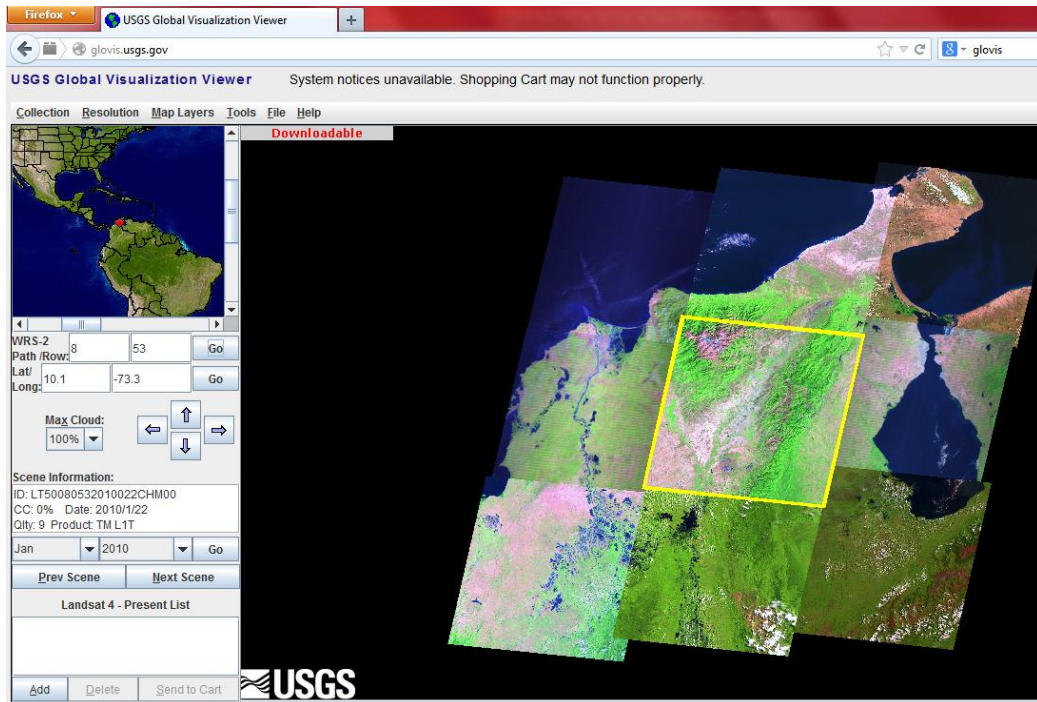
Para la consecución de las imágenes se recurrió a las que se encuentran disponibles por parte del Servicio Geológico de Estados Unidos de Norteamérica³ a través del Visualizador Global⁴. Se seleccionaron imágenes que tuvieran como máximo un 20 % de cobertura de nubes, con el objetivo de disminuir la posibilidad de obstrucción visual en la zona de estudio.

En la Figura 86 se muestra la interfase gráfica mediante la cual se puede acceder a la base de datos de imágenes capturadas por la serie de satélites LANDSAT (4 a 7 ETM+) .

³ www.usgs.gov

⁴ <http://glovis.usgs.gov/>

Figura 86. Interfase del sitio www.glovis.usgs.gov.



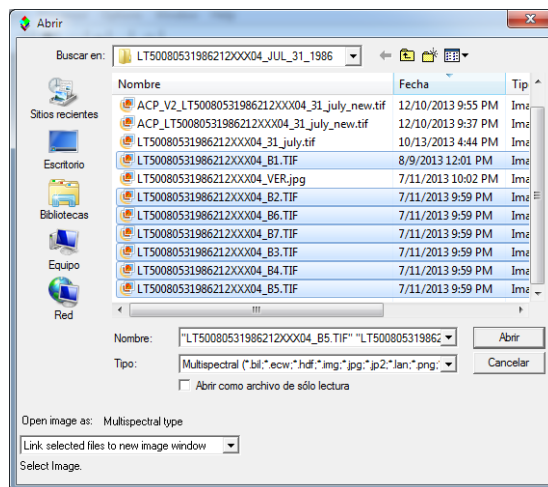
Fuente: GLOVIS - USGS

Cada imagen LandSat, cuya resolución espacial es de 30 metros, está codificada principalmente por el número de fila y columna que ocupa en una grilla que cubre todo el planeta y, en el caso de la zona de estudio, corresponde a la fila 8, columna 53, por lo que la imagen que la contiene es la 853. En la interfase es posible seleccionar el porcentaje de nubosidad que contiene la imagen, la fecha de toma (mes, año), debiéndose establecer si la imagen posee información en las diferentes bandas espectrales (numeradas de 1 a 10), en función del modelo o versión del satélite LandSat (1 a 7). El resultado de la descarga de información es un archivo comprimido que a su vez contiene un archivo digital por cada una de las bandas en cuestión (para la misma zona de estudio). No obstante lo anterior, cada imagen por sí sola no ofrece la posibilidad de visualizar su contenido en forma clara, habida cuenta que sólo posee una banda espectral, por lo que es preciso construir una sola imagen a partir de las diversas bandas

6.2 CONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN MULTIESPECTRAL.

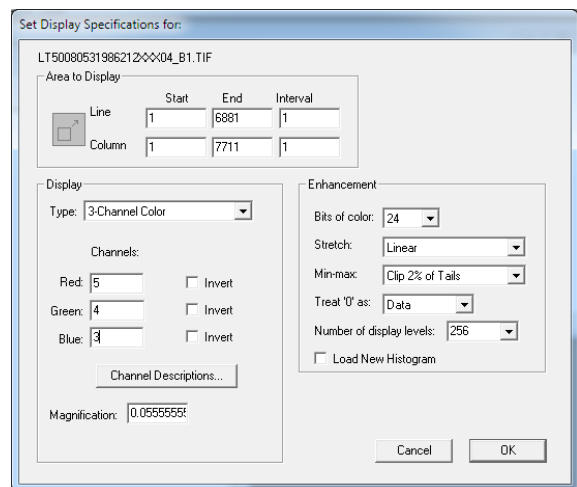
Las 7 (o más) bandas deben integrarse para formar una imagen multiespectral, que servirá para determinar diversas propiedades del sector geográfico que está representando. Para esto se procesaron en el software MultiSpec Application (versión 3.3), de uso libre, creado por investigadores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y de Computación, el Laboratorio para Aplicación de Sensores Remotos y la organización de Tecnologías de Información, todos de la Universidad de Purdue en West Lafayette, Indiana, Estados Unidos de Norteamérica. En primer lugar se abren los archivos que corresponden con las bandas de interés, como se ilustra en la Figura 87, activando la opción *Link to image in active window*, para que todas se integren en una sola, luego, con la opción *Display* del menú Processor tal como se indica en la Figura 88, se asigna la combinación 543 en el campo *Channels*, lo cual hará que las imágenes monocromáticas (escala de gris) se muestren como lo indica la Figura 89.

Figura 87. Selección de archivos



Fuente: El Autor

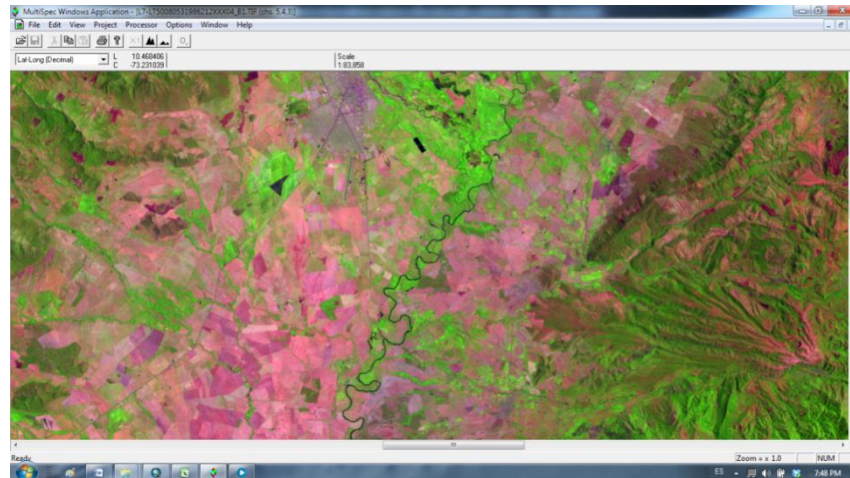
Figura 88. Fijación de bandas



Fuente: El Autor

Aprovechando las potencialidades que ofrecen estas imágenes, se tomó la combinación 5-4-3 (es decir, la banda 5 se tomó por el canal Rojo, la banda 4 se tomó por el canal Verde y la banda 3 se tomó por el canal Azul), la cual permite resaltar y diferenciar con bastante claridad los cuerpos hídricos del resto de las coberturas terrestres (en las imágenes más recientes, tomadas por el satélite Landsat 8, el último enviado por el gobierno de Estados Unidos de Norteamérica, se debe tomar la combinación 654 para tener el mismo efecto) . En las figuras 90 a 91 se ilustra, respectivamente, cómo para una misma zona geográfica, la disposición en color verdadero (dada por la combinación RGB 123) no permite diferenciar los cuerpos de agua con la claridad con que lo hacen las otras dos imágenes (combinación 432 para infrarrojo) y (543).

Figura 89. Imagen en combinación (composite image) de bandas 543



Fuente: El autor

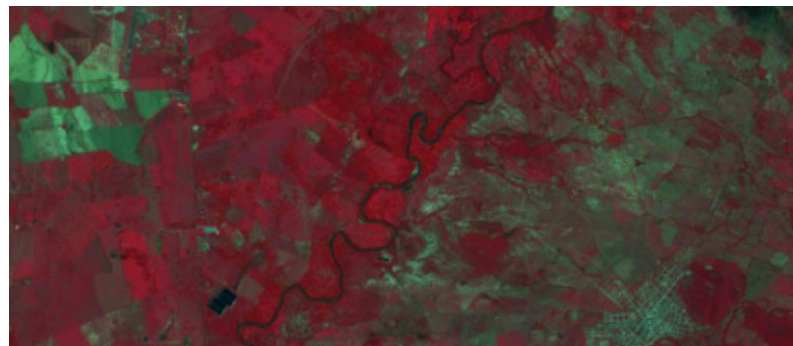
Por último, en la opción *Change image file format* del submenú *Reformat* en el menú *Processor* se cambia el tipo de archivo a uno con extensión *tiff* para su incorporación posterior en ArcGIS (Figuras 93 y 94).

Figura 90. Imagen satelital LandSat, RGB 123 de la zona de estudio. Color verdadero



Fuente: El Autor

Figura 91. Imagen satelital LandSat, RGB 431 de la zona de estudio. Infrarrojo



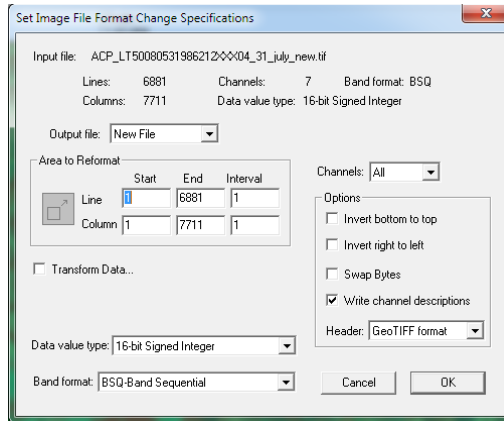
Fuente: El Autor

Figura 92. Imagen satelital LandSat, RGB 543 de la zona de estudio

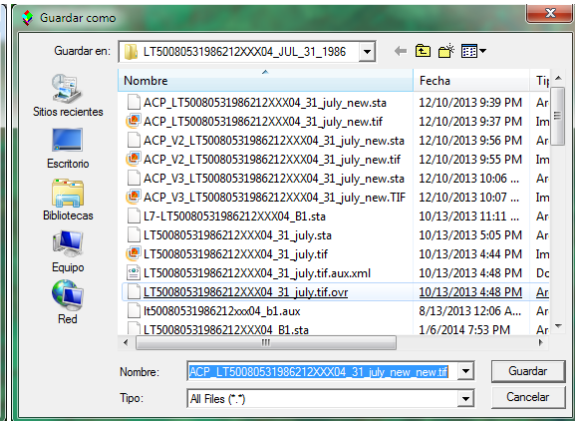


Fuente: El Autor

Figura 93. Cambio de formato Paso 1 Figura 94. Cambio de formato, Paso 2



Fuente: El Autor



Fuente: El Autor

De esta manera se logró conformar un archivo compuesto por las imágenes LandSat relacionadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Imágenes LandSat utilizadas para el análisis

Código de la imagen	Fecha de Toma
LT 500 8053 1986 212 XXX 04	31 julio, 1986
LT 400 8053 1988 082 XXX 02	22 marzo, 1988
LT 500 8053 1989 364 XXX 02	30 diciembre, 1989
LT 500 8053 1997 242 XXX 03	30 agosto, 1997
LE 700 8053 2000 179 EDC 01	27 junio, 2000
LT 500 8053 2000 235 XXX 02	22 agosto, 2000
LT 500 8053 2001 029 XXX 01	29 enero, 2001
LE 700 8053 2001 277 EDC 00	04 octubre, 2001
LE 700 8053 2003 011 AGS 00	11 enero, 2003
LT 500 8053 2007 254 CDM 00	11 septiembre, 2007
LE 700 8053 2009 347 EDC 00	13 diciembre, 2009
LE 700 8053 2010 014 EDC 00	14 junio, 2010
LE 700 8053 2010 030 EDC 00	30 junio, 2010
LT 500 8053 2011 041 CHM 00	10 diciembre, 2011
LC 800 8053 2013 174 LGN 00	23 junio, 2013
LC 800 8053 2013 190 LGN 00	09 julio, 2013

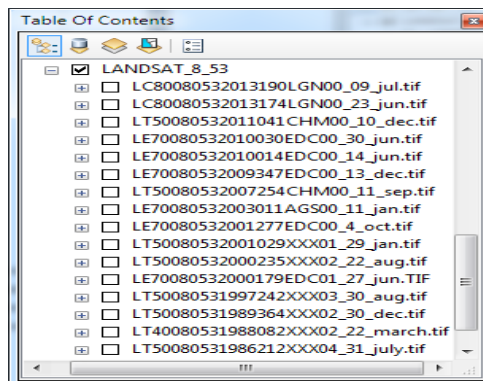
Fuente: USGS – EL Autor

6.3 CARGA DE ARCHIVOS EN ARCGIS.

Una vez descargadas las imágenes por defecto (*raw image*) y construidas las correspondientes imágenes multiespectrales, se cargaron en el software ArcGIS versión 9.2 (software para sistemas de información geográfica, de la empresa ESRI, Inc), licenciado a la Corporación Autónoma Regional del Cesar, para proceder a realizar el análisis multitemporal correspondiente, para la zona de estudio. Gracias a que las imágenes al descargarse del portal del Servicio Geológico de Estados Unidos de Norteamérica contienen todas la correspondiente georreferenciación, la comparación se hizo superponiendo a manera de capas las 16 imágenes, lo cual posibilita la determinación de cambios de los diversos elementos espaciales que conforman las imágenes. A continuación se siguió el siguiente procedimiento:

En ArcGIS se adicionan las imágenes como capas (*layers*) o temas (*themes*) y se ordenan cronológicamente, con la más antigua (1986) en la parte inferior y la más reciente (2013) en la parte superior, tal como se muestra en la Figura 95.

Figura 95. Tabla de contenido en ArcGIS con el arreglo de las imágenes a comparar.

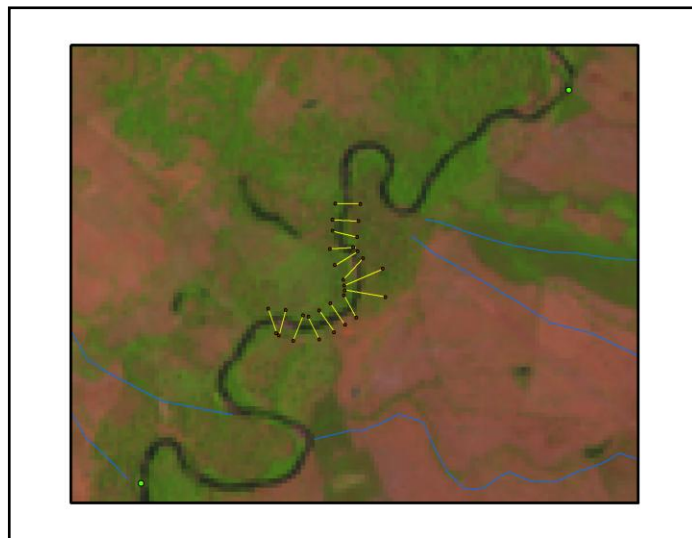


Fuente: El Autor

A continuación, se procede a activar (encender) una a una cada imagen comenzando por la más antigua (31 de julio de 1986), con el objetivo de comprobar su utilidad para el propósito perseguido.

Se hace un enfoque sobre la zona de estudio (entre las coordenadas extremas $73^{\circ} 11'40''W$; $10^{\circ} 25' 20'' N$ y $73^{\circ} 13' 12''W$; $10^{\circ} 23' 55''N$) con el resultado mostrado en la Figura 96, en la que además se han mostrado las secciones transversales que hacen parte del tramo de 1500 metros contemplado en el presente trabajo.

Figura 96. LandSat 31 de julio de 1986, sector Las Garzas, río Cesar



Fuente: El Autor

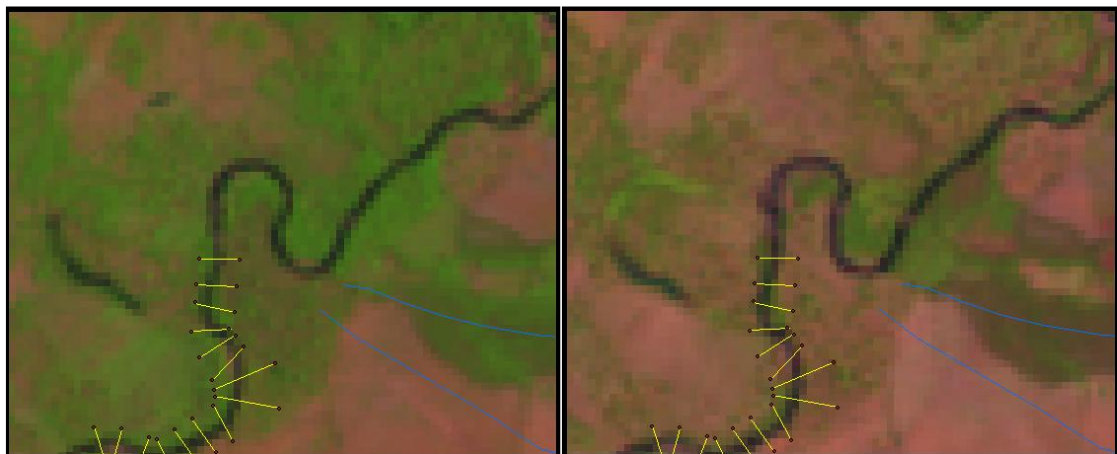
Al activar la segunda imagen más antigua (22 de marzo de 1988) se establece que en esta zona el alineamiento del río Cesar experimentó cambios en algunos de los meandros localizados al norte del sector de estudio (Figura 97), tal como se aprecia en la comparación de la zona en detalle (Figura 98).

Figura 97. LandSat 22 de marzo de 1988, sector Las Garzas, río Cesar



Fuente: El Autor

Figura 98. Comparación en detalle entre 1986 y 1988. Obsérvese como el amplio meandro al norte del tramo de estudio, cambió su forma.



Fuente: El Autor

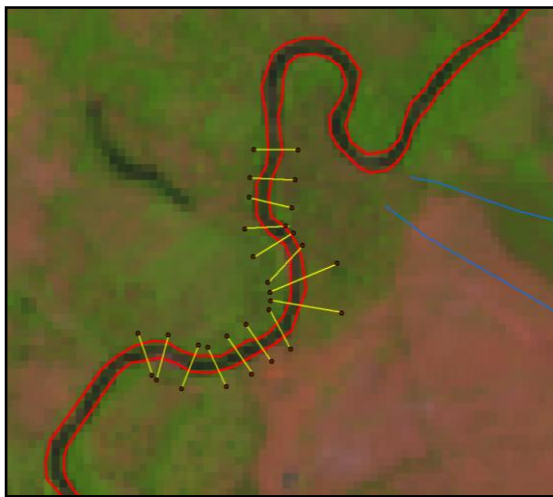
De esta forma se tiene una visión general a medida que se avanza en esta labor de comparación secuencial de las imágenes.

6.4 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE ALINEAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL

Para definir un patrón de cambio, se procede a crear lo que en ArcGIS se denomina temas (capas) para dibujar y representar con ellos el alineamiento que siguió el río Cesar al momento de la toma de cada imagen. Se digitaliza, entonces,, siguiendo la dirección de cada margen.

En el presente trabajo se optó por tomar los pixeles que denotan la extensión del cauce (lámina de agua) para simplificar el proceso, seleccionando los dos puntos extremos del área de comparación (numeral 6.3). A manera de ejemplo ilustrativo se incluye la Figura 99 para 1986 (líneas rojas para las márgenes) y la Figura 100 para 1988 (líneas cyan para las márgenes).

Figura 99. Río Cesar. 1986



Fuente: El Autor

Figura 100. Río Cesar. 1988



Fuente: El Autor

El trazado de cada margen se hizo tomando los pixeles que mejor las representan.

En la Figura 101 se muestra la comparación de los dos cauces.

Figura 101. Comparación entre el alineamiento del canal 1986 (rojo) a 1988, imagen de 1988 (cyan).

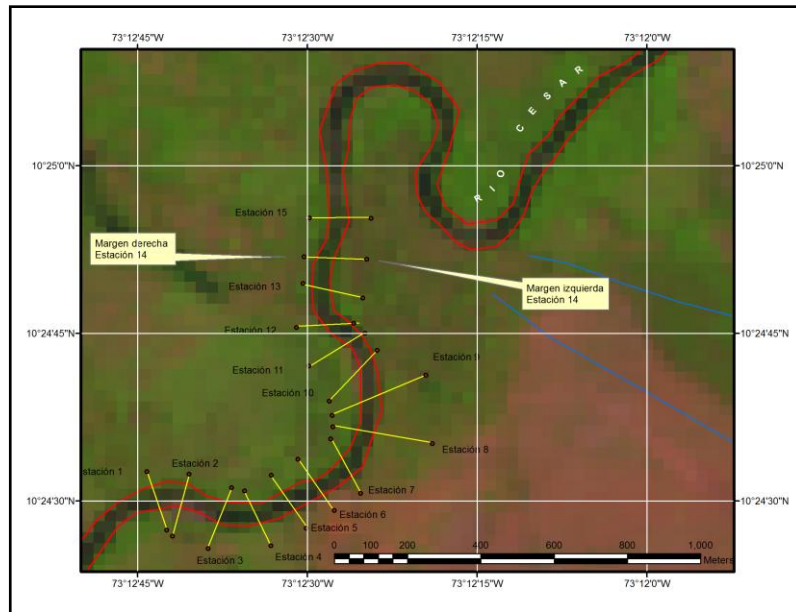


Fuente: El Autor

De esta manera, se digitalizó el alineamiento del canal del río Cesar sobre cada una de las imágenes contempladas con lo que se tiene el panorama de la evolución de la morfología del cauce principal del río Cesar, a lo largo de los últimos 27 años, a su paso por el sector suroriental de la ciudad de Valledupar, más exactamente en el sector llamado Las Garzas y aún más, extendiendo el análisis visual hacia aguas arriba (aguas debajo de la desembocadura del río Guatapurí).

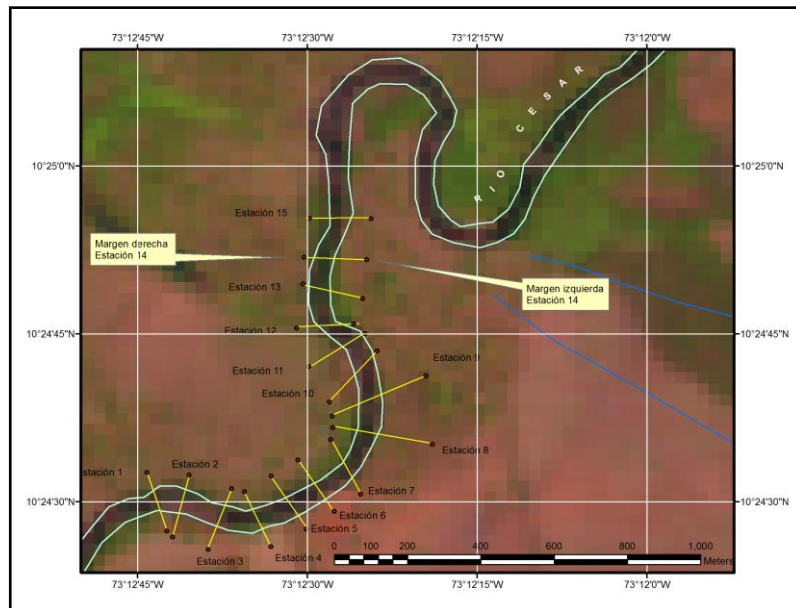
El resultado obtenido para cada imagen es el que se indica en las Imágenes 102 a 115..

Figura 102. Configuración del cauce, 31 de julio de 1986



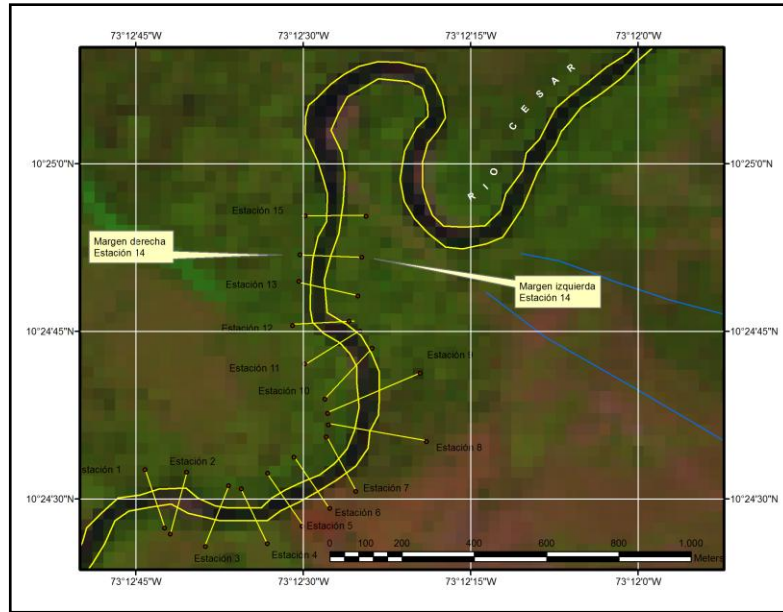
Fuente: El Autor

Figura 103. Configuración del cauce, 22 de marzo de 1988



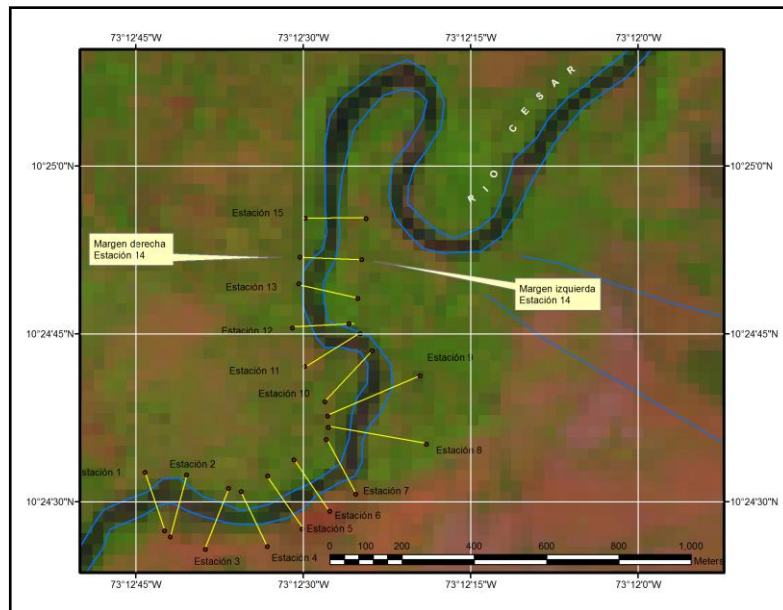
Fuente: El Autor

Figura 104. Configuración del cauce, 30 de diciembre de 1989



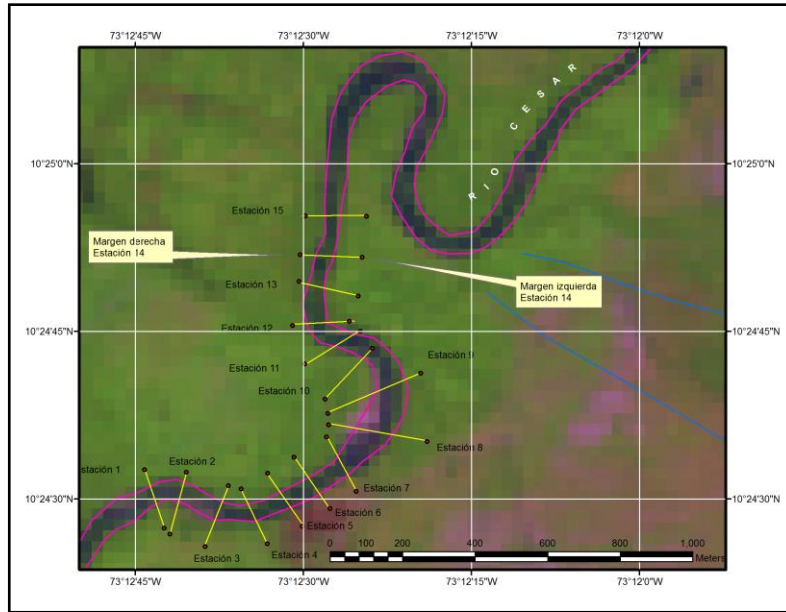
Fuente: El Autor

Figura 105. Configuración del cauce, 30 de agosto de 1997



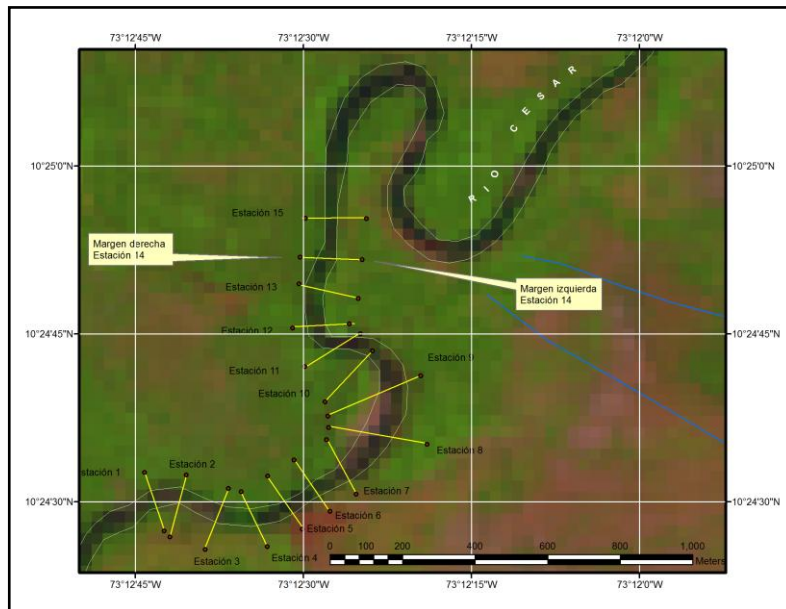
Fuente: El Autor

Figura 106. Configuración del cauce, 27 de junio de 2000



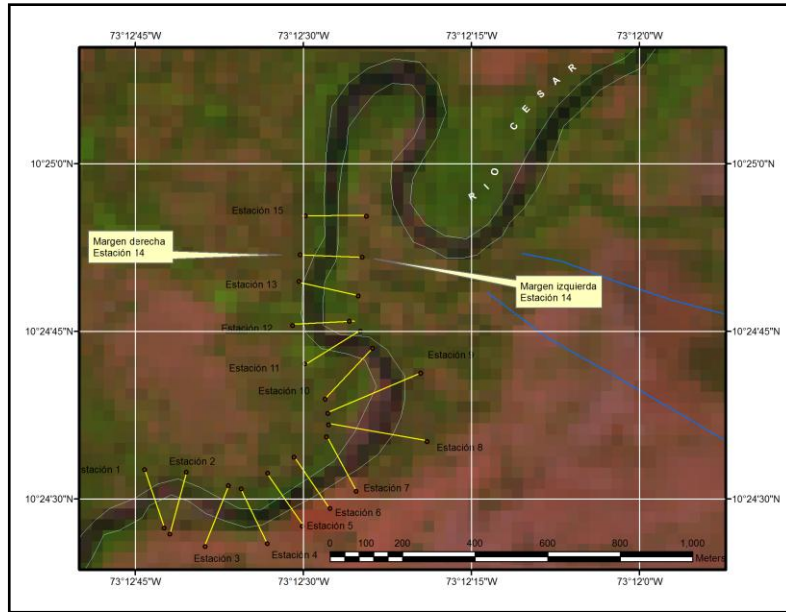
Fuente: El Autor

Figura 107. Configuración del cauce, 22 de agosto de 2000



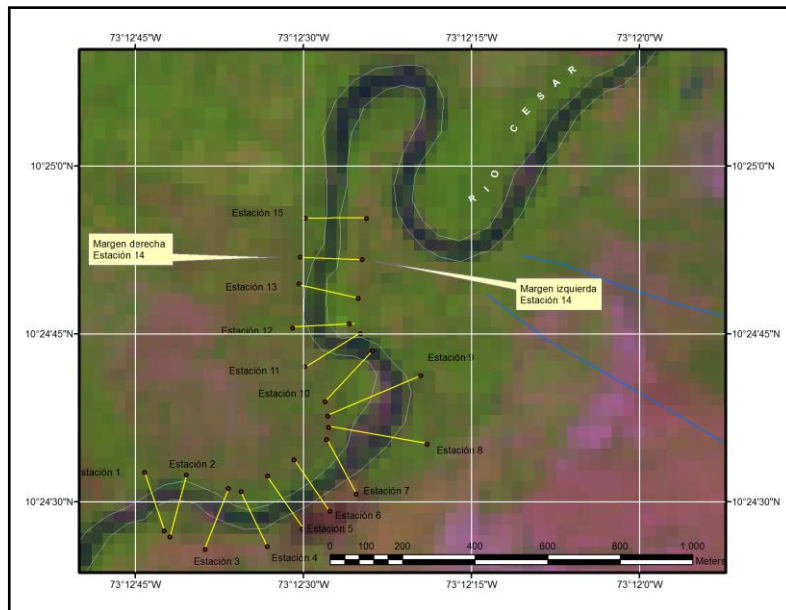
Fuente: El Autor

Figura 108. Configuración del cauce, 29 de enero de 2001



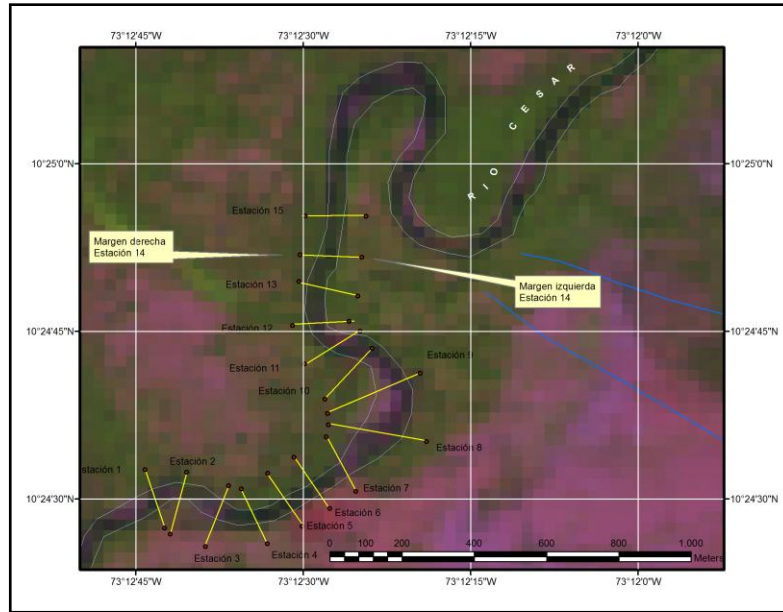
Fuente: El Autor

Figura 109. Configuración del cauce, 04 de octubre de 2001



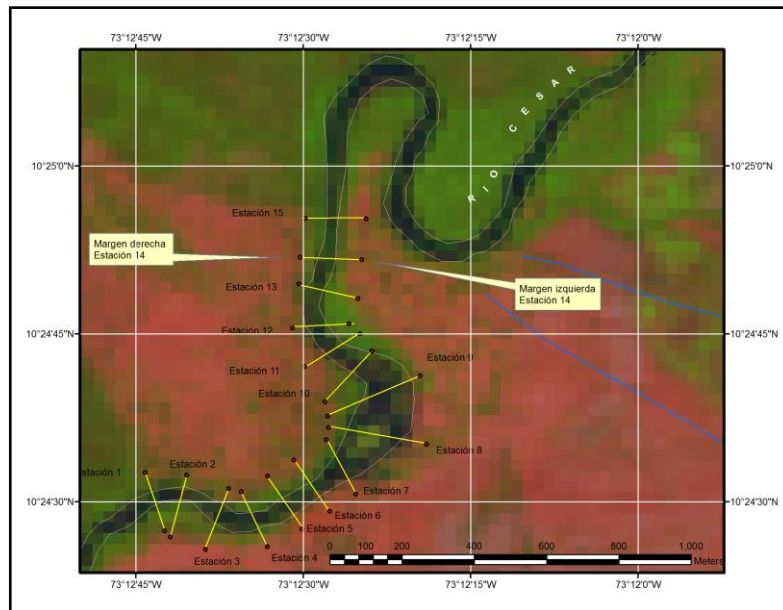
Fuente: El Autor

Figura 110. Configuración del cauce, 11 de enero de 2003



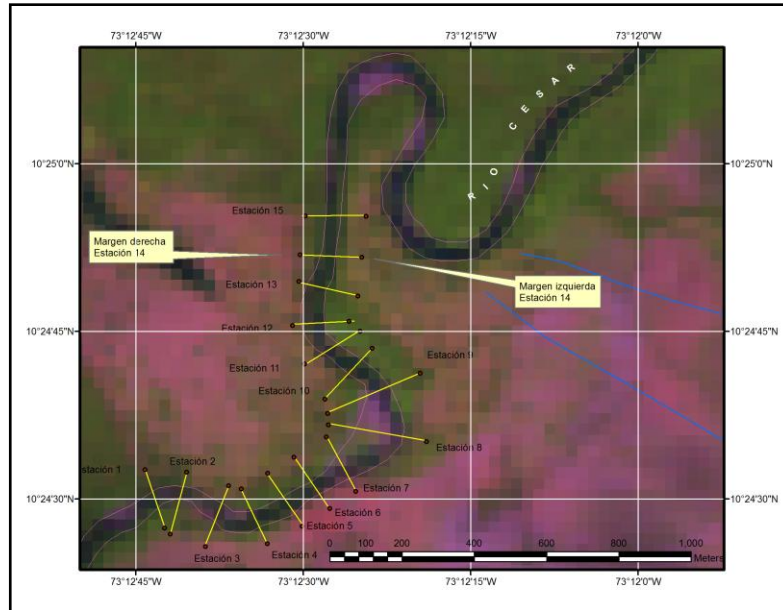
Fuente: El Autor

Figura 111. Configuración del cauce, 11 de septiembre de 2007



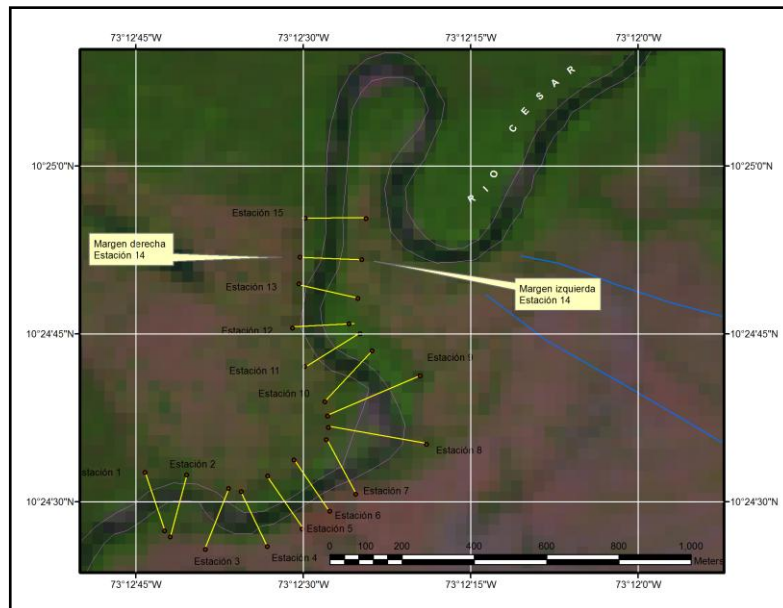
Fuente: El Autor

Figura 112. Configuración del cauce, 13 de diciembre de 2009



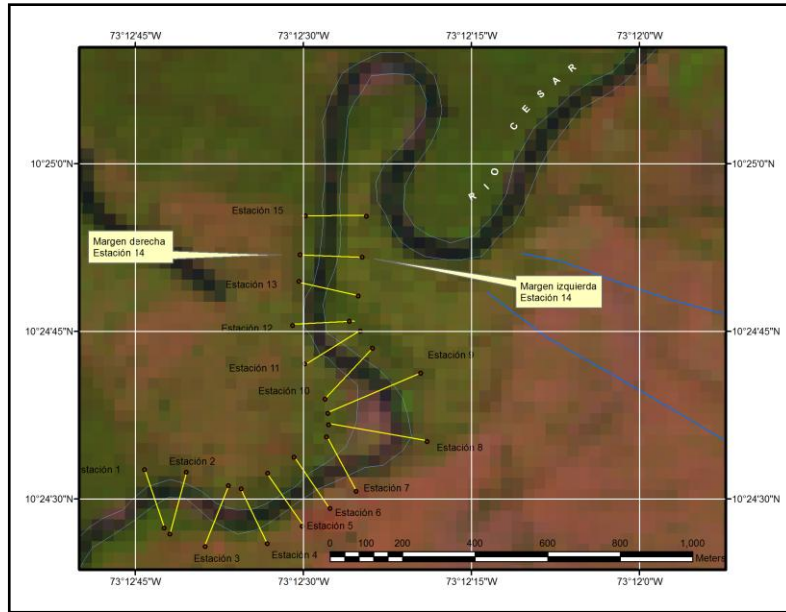
Fuente: El Autor

Figura 113. Configuración del cauce, 14 de junio de 2010



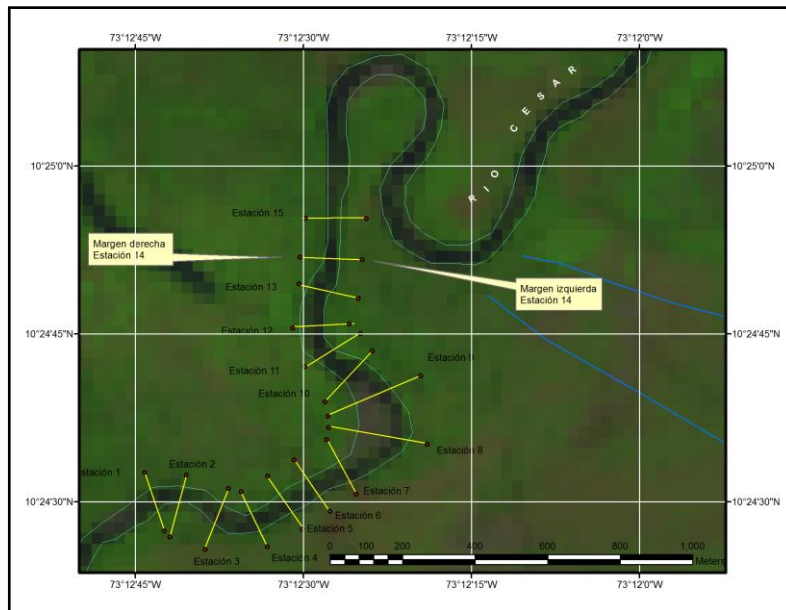
Fuente: El Autor

Figura 114. Configuración del cauce, 10 de diciembre de 2011



Fuente: El Autor

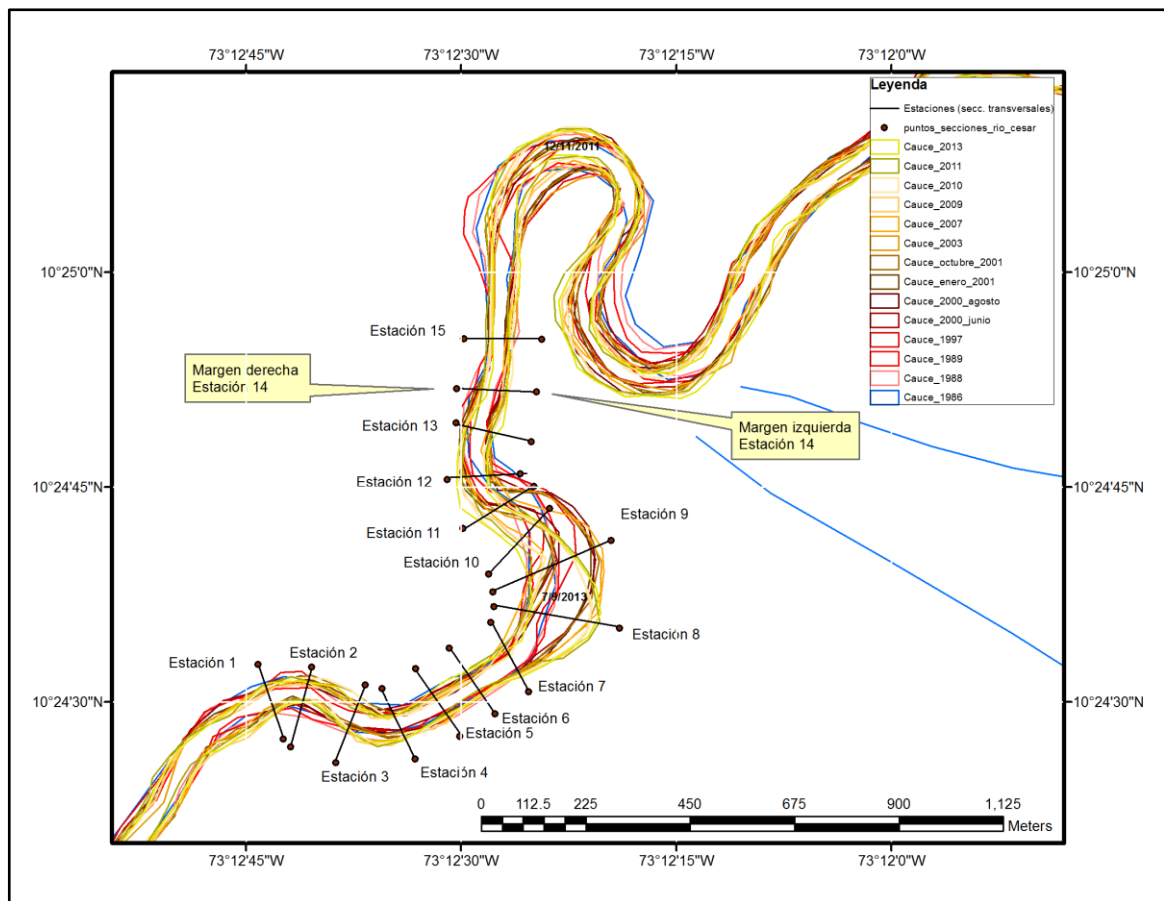
Figura 115. Configuración del cauce, 09 de julio de 2013



Fuente: El Autor

En la Figura 116 se muestran los distintos cauces que fue posible determinar, dando una idea de la modificación progresiva de las márgenes, a la altura de lo que en el presente trabajo se denominó Estación 14, en la cual se aplicó el BSTEM, se ha obtenido que las variaciones son de menor magnitud, aunque ciertamente sí se han presentado, estimándose (con mediciones sobre las imágenes) que tales variaciones han sido en promedio de 25 metros. Se destaca que aunque la sección 14 se ubica en un tramo rectilíneo, también ha sufrido migración lateral en ambas márgenes, lo cual señala que no necesariamente los meandros experimentan este importante proceso.

Figura 116. Evolución del cauce del río Cesar en 27 años, sector Las Garzas.

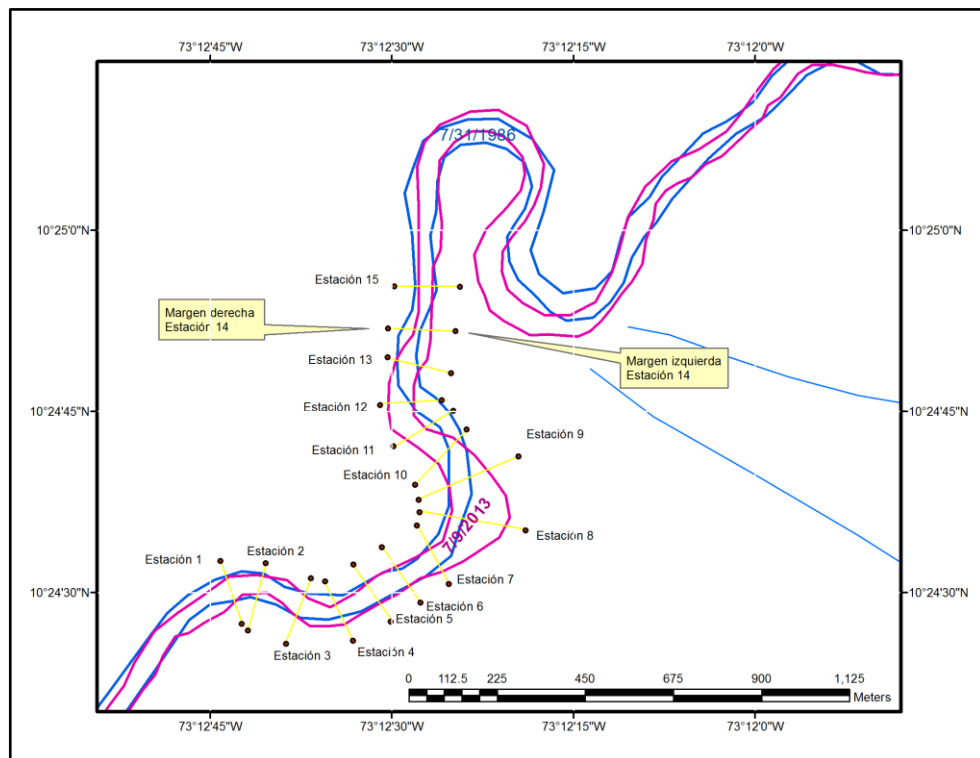


Fuente: El Autor

Si se superponen las líneas que se han digitalizado para representar las márgenes del río, tal como se ilustra en la Figura 117, se determina que en el tramo específico en que se ha aplicado el BSTEM, para el período 1986 (línea de color azul) a 2013 (línea de color fucsia); se puede comprobar el cambio acentuado que se ha tenido en los meandros ubicados inmediatamente aguas arriba y en medio del tramo en que se aplicó el BSTEM.

Se evidencia así que el desplazamiento lateral ha sido moderado, en promedio, mientras que en otros tramos (curvas) el río ha sufrido modificaciones más significativas.

Figura 117. Superposición de los cauces del río Cesar a lo largo de 27 años (1986 y 2013)



Fuente: El Autor

Es de resaltar que en el período mencionado ocurrieron eventos extremos de precipitaciones que resultaron en grandes crecientes de caudal (iguales o superiores a las modeladas en el presente trabajo) entre 2010 y 2011, cuando los niveles del río Cesar aumentaron dramáticamente inundando la planicie aledaña, aunque se tuvo un período corto intermedio, de aparente “verano”, en el que disminuyeron los niveles de los ríos de la región y por consiguiente, el del río Cesar al ser el destino final de la red hidrográfica del norte del departamento del Cesar. Como consecuencia de tales eventos (popularmente conocidos como “la ola invernal”) el cauce del río Cesar experimentó cambios significativos, tal como se observa, de manera complementaria a lo mostrado antes en el presente escrito, en el conjunto de Figuras 118 a 121, tomadas del aplicativo Google Earth, sobre la zona de estudio y que corresponden a los años 2006, 2010, 2102 y 2013. Las líneas de color amarillo, cyan, naranja y verde se han trazado sobre la margen derecha desde el mismo lugar en el terreno hasta el punto más cercano de la margen derecha, midiendo cada una 82 mts, 80 mts, 91 mts y 92 mts, lo cual es una nueva evidencia de que aún en este tramo rectilíneo del río Cesar sí se han presentado cambios en la conformación de sus márgenes.

Figura 118. Imagen Google Earth, 2006 Figura 119. Imagen Google Earth, 2010

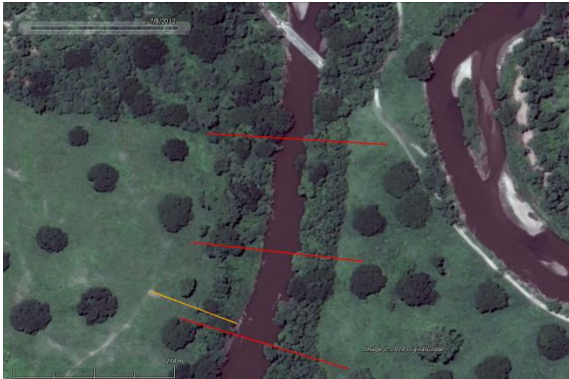


Fuente: Google Earth



Fuente: Google Earth

Figura 120. Imagen Google Earth, 2012 Figura 121. Imagen Google Earth, 2013



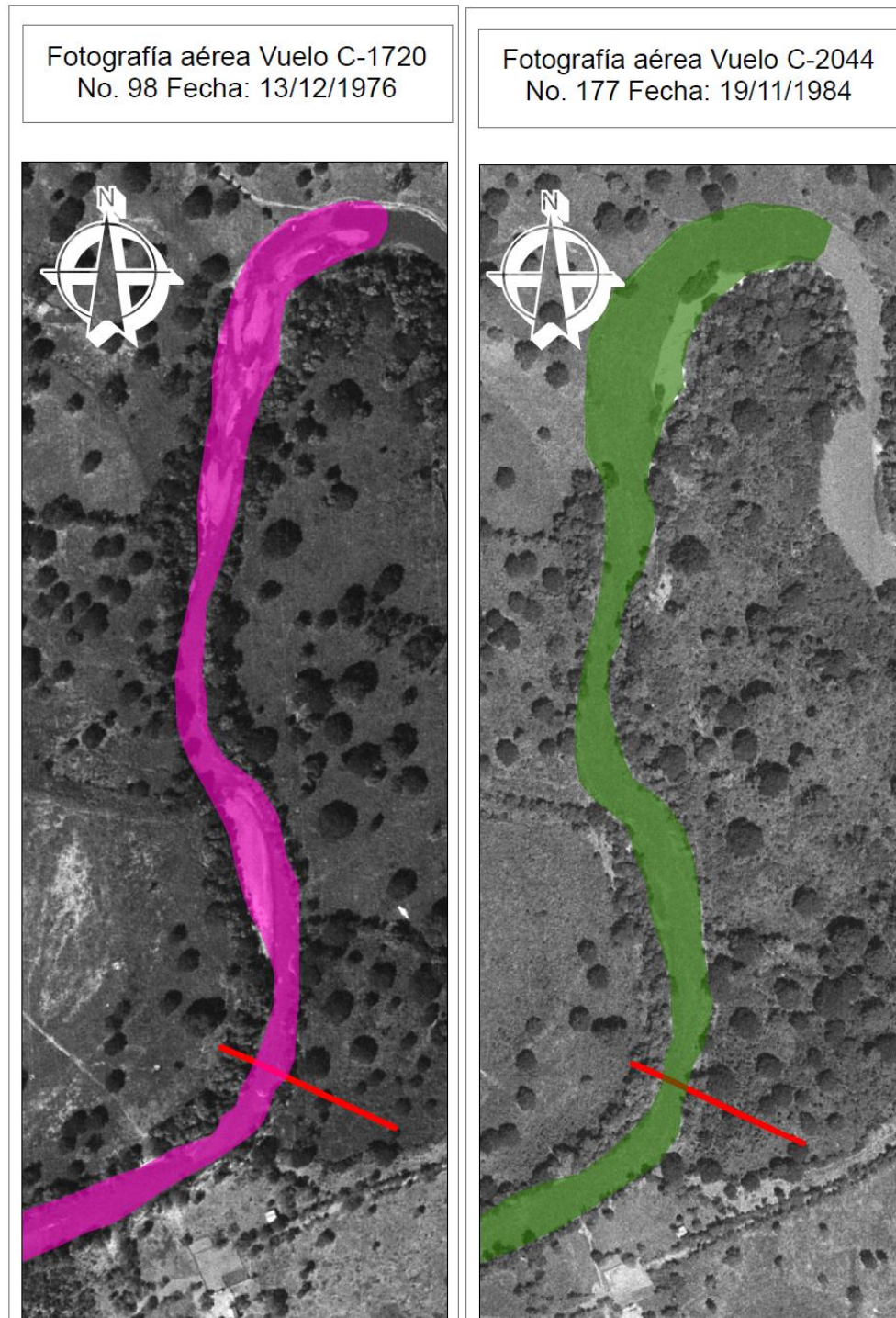
Fuente: Google Earth



Fuente: Google Earth

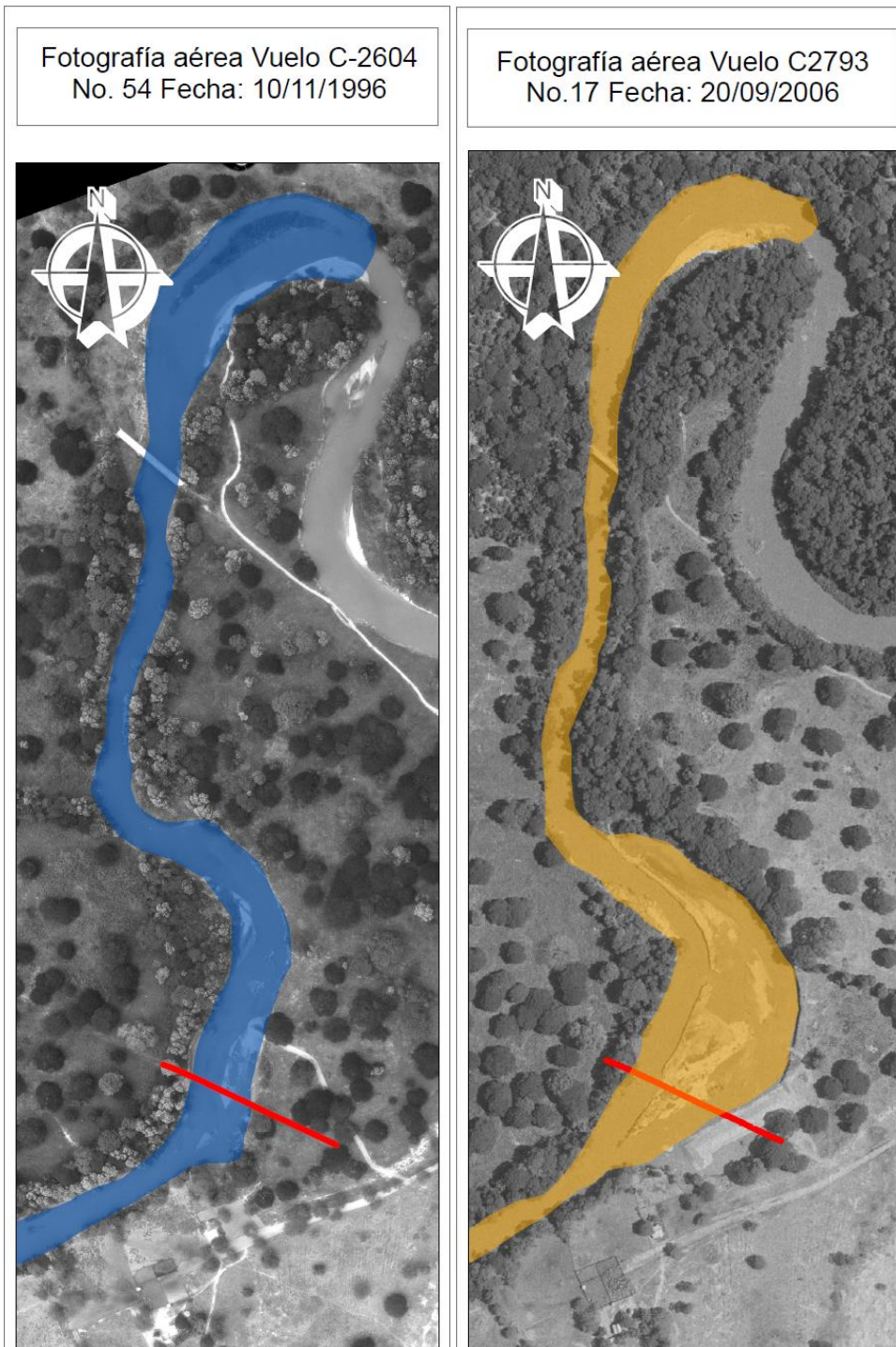
Análisis realizados por otros autores (TGI) sobre fotografías aéreas, también evidencian la evolución temporal (entre 1975 y 2006, es decir, en un lapso de 31 años) del cauce del río Cesar en el sector Las Garzas. En las Figuras 122 y 123, que cubren el sector en que se localizan las estaciones 15 a 5 del levantamiento topográfico realizado para el presente trabajo) pertenecientes a la evaluación de la divagación del cauce aludido, realizada por la empresa Transportadora de Gas Internacional, a raíz de la necesidad de reparar el ramal del gasoducto central Ballenas – Barrancabermeja que alimenta a la ciudad de Valledupar y que resultó afectado por la socavación del lecho del río Cesar durante la llamada ola invernal de 2010 a 2011, dos años consecutivos de precipitaciones extremas ocasionadas por la Oscilación del Pacífico Sur, conocida como El Niño – La Niña), se muestra que las márgenes han sufrido constate cambio, de menor grado en los sectores rectilíneos (como el analizado en el presente documento) y de hasta más de 100 metros en otros (véase la curva amplia que se dirige a la izquierda de norte a sur). De la misma evaluación se tiene la comparación de los diversos cauces, mostrada en la Figura 124, en la cual el autor del presente trabajo ha deducido que el desplazamiento predominante de la margen izquierda a la altura del cruce del gasoducto que alimenta a Valledupar a llevado a que el ancho de la sección en este punto pasara de 42 metros a 122 metros

Figura 122. Vuelos C-1720 de 1976 y C-2044 de 1984 sobre el río Cesar



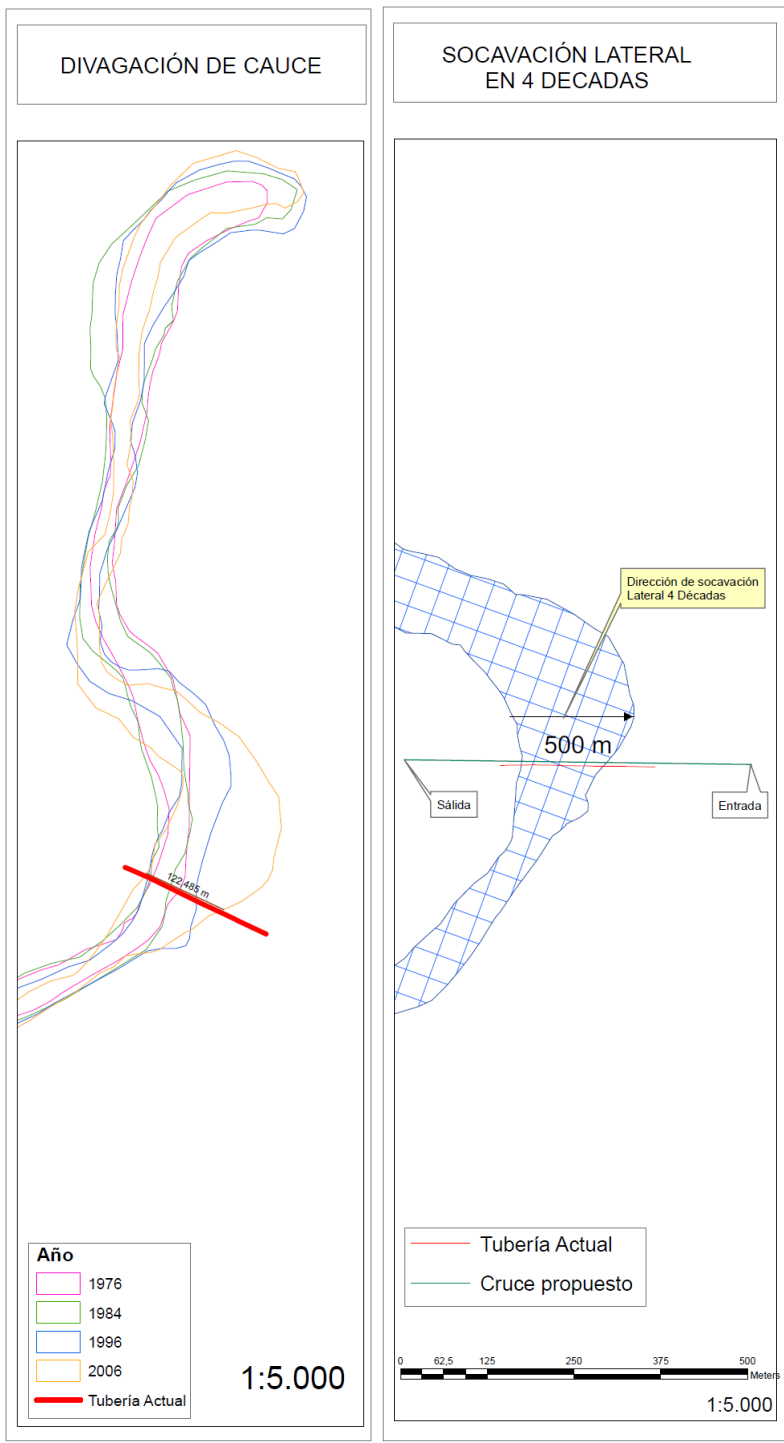
Fuente: TGI

Figura 123. Vuelos C-2604 de 1996 y C-2793 de 2006 sobre el río Cesar



Fuente: TGI

Figura 124. Variación de la conformación del cauce del río Cesar, sector Las Garzas, cruce del gasoducto de Valledupar. Fuente TGI



Fuente: TGI

7. CONCLUSIONES

Se aplicó el modelo HEC-RAS a un tramo de 1500 metros de longitud del río Cesar en el sector Las Garzas, para caudales con periodo de retorno 2 y 50 años determinándose que la máxima variación lámina de agua del río respectivamente, es de 1.48 y 2.85 metros. Esta variación podría actuar como factor detonante de la inestabilidad de las márgenes del río, a lo largo del año.

De acuerdo con lo obtenido con la aplicación del BSTEM, para el periodo de retorno de 50 años, al tenerse láminas de agua altas, de hasta 3.9 metros, que podrían variar hasta 1 metro, se pueden esperar condiciones que provoquen la falla del talud. Esto como consecuencia tanto de las fuerzas erosivas en el pie del talud como de los cambios en el nivel freático (oscilaciones amplias) que contribuyen a que la resistencia al corte disminuya cuando tales niveles son altos.

Se obtiene desde el punto de vista teórico, para TR de 50 años que luego que el nivel del río alcanza las cotas cercanas a 116.18 metros (Noviembre) y 115.82 metros (Mayo), la falla del talud se puede presentar, al descender dicho nivel a 115.03 metros (Diciembre) y 115.41 metros (Junio), cuando ambas márgenes pueden fallar (con $F_s = 0.71$ para la derecha y 0.9 para la izquierda), y descender 114.49 metros (Julio), cuando la falla se puede presentar con $F_s = 0.72$ para la MD y $F_s = 0.72$ para la MI.

La presencia de vegetación en la parte superior mejora las condiciones de resistencia del suelo, al aumentar la cohesión, debido al efecto provocado por el sistema radicular de dicha vegetación, en el orden del 3% para los caudales

moderados (Tr 2 años) y 15% para el caso de los caudales altos (Tr 50 años). No obstante, aunque la mejora puede darse por la presencia de las raíces en la masa de suelo, debe tenerse en cuenta que el peso de la vegetación – si es de gran porte – se suma al de dicha masa, incidiendo eventualmente en la falla, aspecto este que se recomienda sea evaluado en otras investigaciones.

El retroceso anual calculado teóricamente por el modelo BSTEM ha sido estimado preliminarmente, a la altura de la estación 14 contemplada aquí, en alrededor de 8.2 metros para la margen izquierda y 9.2 metros para la margen derecha.

La carga en volumen de sedimento aportado, también en teoría, 2562 m³ (642 m³ en la izquierda y 1920 m³ en la derecha). Así mismo, la carga de sedimento que potencialmente podría aportarse al flujo, a lo largo del tramo de 100 metros es de 4962.5 toneladas (1103.5 ton aportadas por la margen izquierda y 3859 toneladas aportadas por la margen derecha).

La sección transversal se ampliaría en la cantidad de 43.99 m² en total : M.I: 15.42 m² banca y 3.29 m² pie M.D: 18.28 m² banca y 6.44 m² pie.

Al examinar el comportamiento de las márgenes desde el punto de vista del factor de seguridad y relacionando este aspecto con el régimen hidrológico, se evidencia que hay un retraso (secuencial) entre el pico de caudal (y por ende del nivel del río) y los valores mínimos del Fs, situación que se mantiene para cada pico del hidrograma anual de caudales. Se propone en el presente trabajo la siguiente explicación:

- La falla se produce después que el nivel de agua alcanza una posición alta. Luego de erosionarse progresivamente la margen en conjunto con niveles altos del río la afectación del pie se incrementa, aumentando el grado de desestabilización de la parte superior de la margen (banca).
- En este proceso, el material del pie del talud es arrancado de su posición, dejando poco a poco sin soporte a la banca, que aún puede estar soportada parcialmente por el empuje que ejerce el agua.
- Al descender el nivel en el río, la parte superior no está más bajo la acción de la fuerza que supone el empuje del agua que circula en el río, eventualmente siendo llevada a la falla a lo largo de la superficie calculada por el modelo. El proceso continúa hasta que se tienen nuevamente condiciones de estabilidad, en función de la geometría que adopta la margen y de la variación de niveles del río.
- En el proceso analizado se estableció una variación del factor de seguridad relacionado con la estabilidad de las márgenes de entre 3 y 4 órdenes de magnitud.

Se debe tener en cuenta que existe otro mecanismo (no contemplado por el BSTEM) que puede coadyuvar a la falla del material que conforma la banca, siendo este el de la exfiltración de agua desde el subsuelo hacia la pared de la misma, pero cuyos efectos podrían quedar ocultos por los resultados de los mecanismos de falla por erosión hidráulica y geotécnica, que son los analizados

por el BSTEM, por lo que se requiere profundizar en este tema en posteriores investigaciones.

Tal como se evaluó con el BSTEM, la colocación de obras o elementos que busquen proteger la margen , ya sea en el pie del talud , en la banca o de manera integral en ambos componentes de la margen, representan una mejora en la estabilidad de la misma, al experimentarse aumento en el factor de seguridad (estabilidad) según se desprende de los resultados de la modelación con protección (ítem 9 del numeral 5.3 del presente documento), en donde se tiene que la cantidad de sedimento que se desprendería es mayor si sólo se proteger el pie del talud, respecto a la cantidad erodada si sólo se protegiese la banca (obviamente, no hay arranque de material si la protección es total).

En el presente Trabajo sólo se contemplaron las medidas del tipo riprap para el pie del talud (en un colchón con malla sintética) y geotextil (rellena de concreto) en la banca. Se considera que al aportar mayor resistencia al esfuerzo de corte permisible, estas medidas son las más efectivas (los restos de troncos ofrecen una resistencia comparable, aunque se tiene el problema de que pueden generar represamientos (ramas, hojas, troncos) que pueden perjudicar la conformación de la sección al inducir corrientes locales),

En el análisis de los cambios del alineamiento del río Cesar , el uso de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica ha demostrado ser de mucha utilidad para análisis multitemporales de corrientes hídricas superficiales.

El resultado preliminar arrojado por el modelo BSTEM respecto al retroceso de las márgenes del río es comparable a la magnitud de los cambios experimentados por estas según se ha establecido con la ayuda de las imágenes satelitales (20 metros en promedio).

Es aconsejable el uso de escenas de alta resolución espacial con el fin de establecer con mayor precisión el grado de correlación entre ambos métodos (modelos geotécnicos e imágenes de sensores remotos).

Es posible determinar las secciones o tramos más propensas al cambio por migración lateral del canal de la corriente, lo cual es de gran ayuda para escoger las zonas a las cuales aplicar el modelo BSTE; optimizando así el muestreo de suelos, o también, analizar aquellos tramos cercanos a infraestructura.

BIBLIOGRAFÍA

AMIRI-TOKALDANY, E., DOVOODI, M. H., DARBY , S. E. y TAGHAVI, M. A method to estimate failure plane angle and tension crack depth. River Flow. [en línea]. 8 p. 2010. Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) - © 2010 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7. Disponible en internet en: http://vzb.baw.de/e-medien/river-flow-2010/PDF/B5/B5_03.pdf

ARCEMENT, JR, G.J. y SCHNEIDER, V.R. Water-supply Paper. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains 2339, Metric Version, [en línea]. 67 p. 2005. Disponible en internet en <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/wsp2339.pdf>

CORPOCESAR – UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO. Caracterización e impactos ambientales por vertimientos en tramos de la cuenca media y baja del río Cesar., Valledupar. 2011. 175 p.

CORPOCESAR – UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA. Estudio de hidrosedimentología del río Cesar desde la desembocadura del río Badillo hasta el centro poblado de las Pitillas, Valledupar. 2011. 457 p.

DARBY, Stephen E. y THORNE, Colin R. Bank stability algorithm for numerical modeling of channel width adjustment. [en línea]. 81 p. 1995. Disponible en http://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/8thFISC/Poster_Simon.pdf

GEOSISTEMAS PAVCO. Flexocreto. [en línea]. 2011. Disponible en internet en <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=178>

GEOSISTEMAS PAVCO. "Geocolchones". 2011. [en línea].. Disponible en internet en <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=181>

GONZÁLEZ G., Álvaro J. Estimativos de parametros efectivos de resistencia con el spt. X jornadas geotécnicas de la ingenieria colombiana - SCI –SCG. [en línea]. 12 p. 1999. Disponible en internet en <http://www.scg.org.co/wp-content/uploads/estimativos-de-parametros-de-resistencia-con-spt.pdf>

INGEOMINAS. Mapa Geológico del Departamento de La Guajira, Escala 1:250.000 Memoria Explicativa, 2003

INGEOMINAS. Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Cesar, Escala 1:250.000 Memoria Explicativa, 1999.

MIDGLEY, Taber Leon. Stability of composite streambanks: modeling and subsurface flow field experiments. [en línea]. 73 p. 2010. Disponible en internet en http://biosystems.okstate.edu/Home/gareyf/Midgley_Thesis.pdf

RAMÍREZ ARENAS, Mario. Apuntes de Clase: Geosintéticos. 47 p. 2013.. Universidad Industrial de Santander.

SIMON, Andrew, BANKHEAD, Natasha y THOMAS, Robert. Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting streambank loading rates and potential load reductions. [en línea]. 11 p. 2010.. Disponible en internet en http://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/10C_Simon_3_1_10_paper.pdf

SIMON, Andrew y POLLEN, Natasha. A model of streambank stability incorporating hydraulic erosion and the effects of riparian vegetation. [en línea]. 8 p. 2006. Disponible en internet en http://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/8thFISC/Poster_Simon.pdf

SIMON, Andrew. Lateral Channel Response: Channel Widening and Bank Stability [en línea]. 75 p. Disponible en internet en <http://www.eng.buffalo.edu/glp/events/summer2008/week1/full/9-LateralProcesses-Banks.pdf>

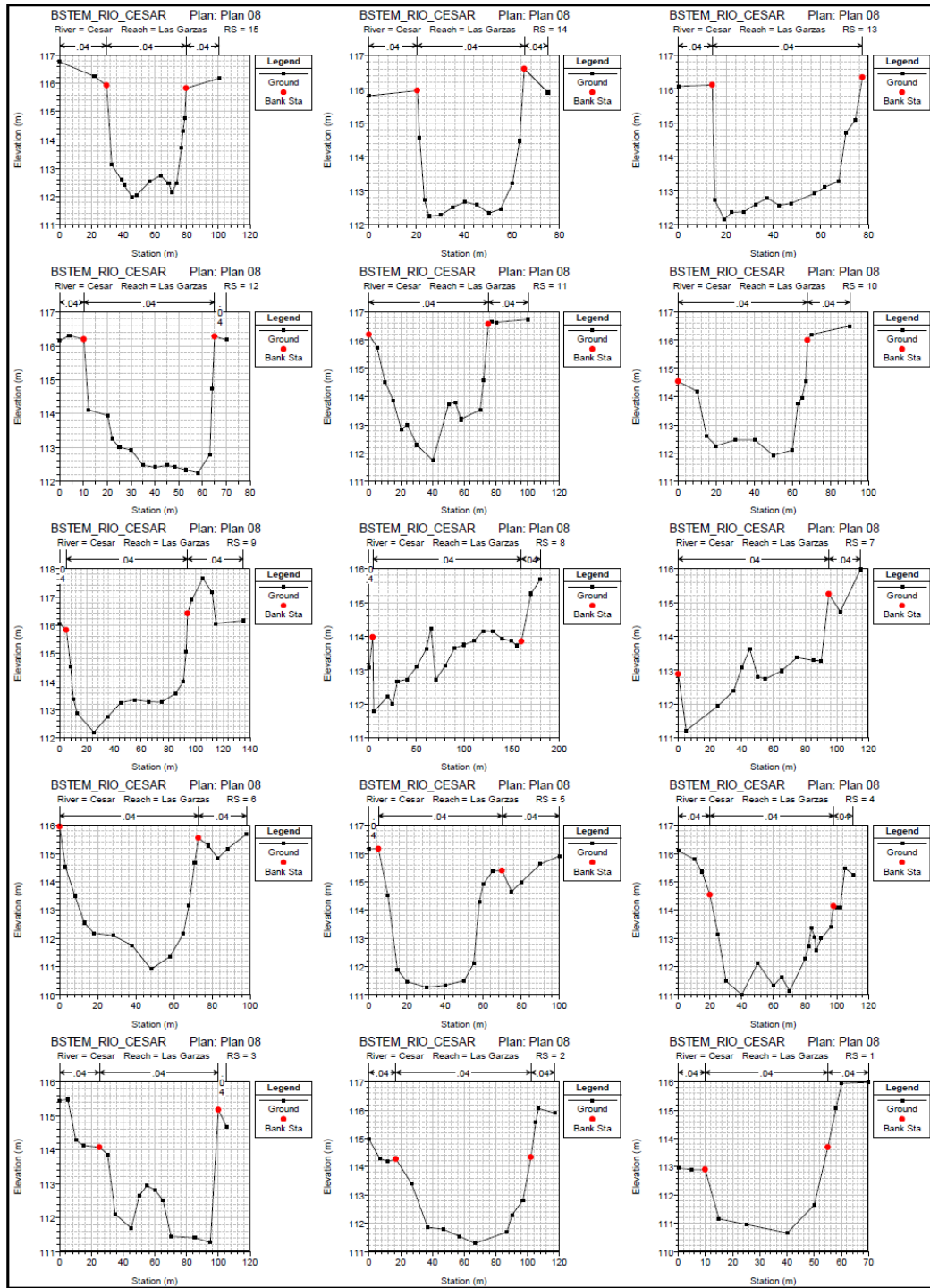
TRANSPORTADORA DE GAS INTERNACIONAL, TGI. Análisis Multiemporal de Digavación del cauce del río Cesar y Plano de Cruce Subfluvial Dirigido Río Cesar. Ingeniería Detallada del Río Cesar, Valledupar PK 3+850, 2010.

USDA-ARS, SIMON, Andrew, THOMAS, Robert, CURINIAND, Andrea y BANKHEAD, Natasha. Bank- Stability and Toe- Erosion Model, BSTEM Example Use. [en línea]. 55 p. Disponible en internet en <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5044>

ANEXOS

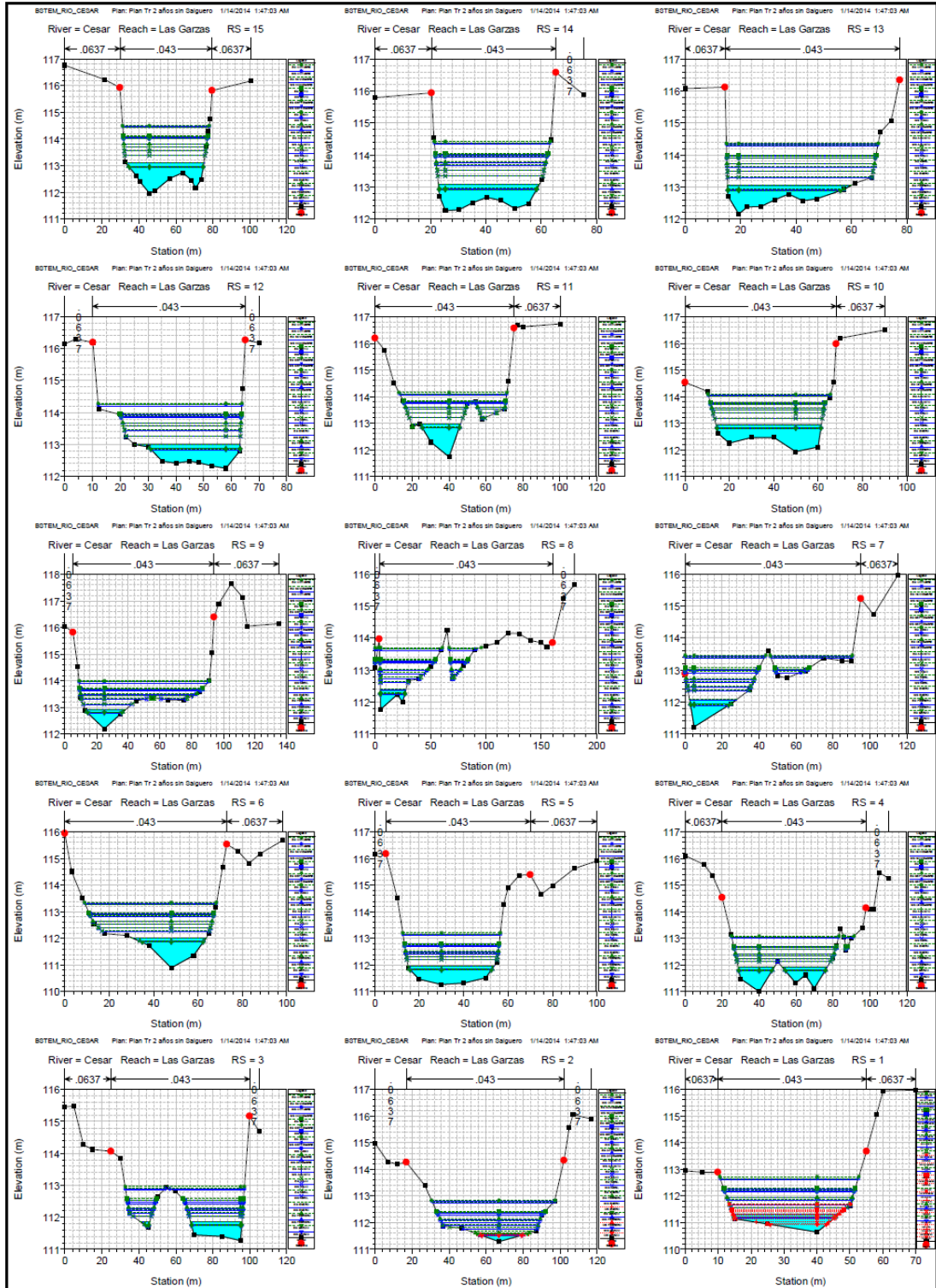
ANEXO A. Resultados de la modelación en HEC-RAS

Conformación de las 15 secciones transversales del tramo del río Cesar. Analizado con HEC-RAS



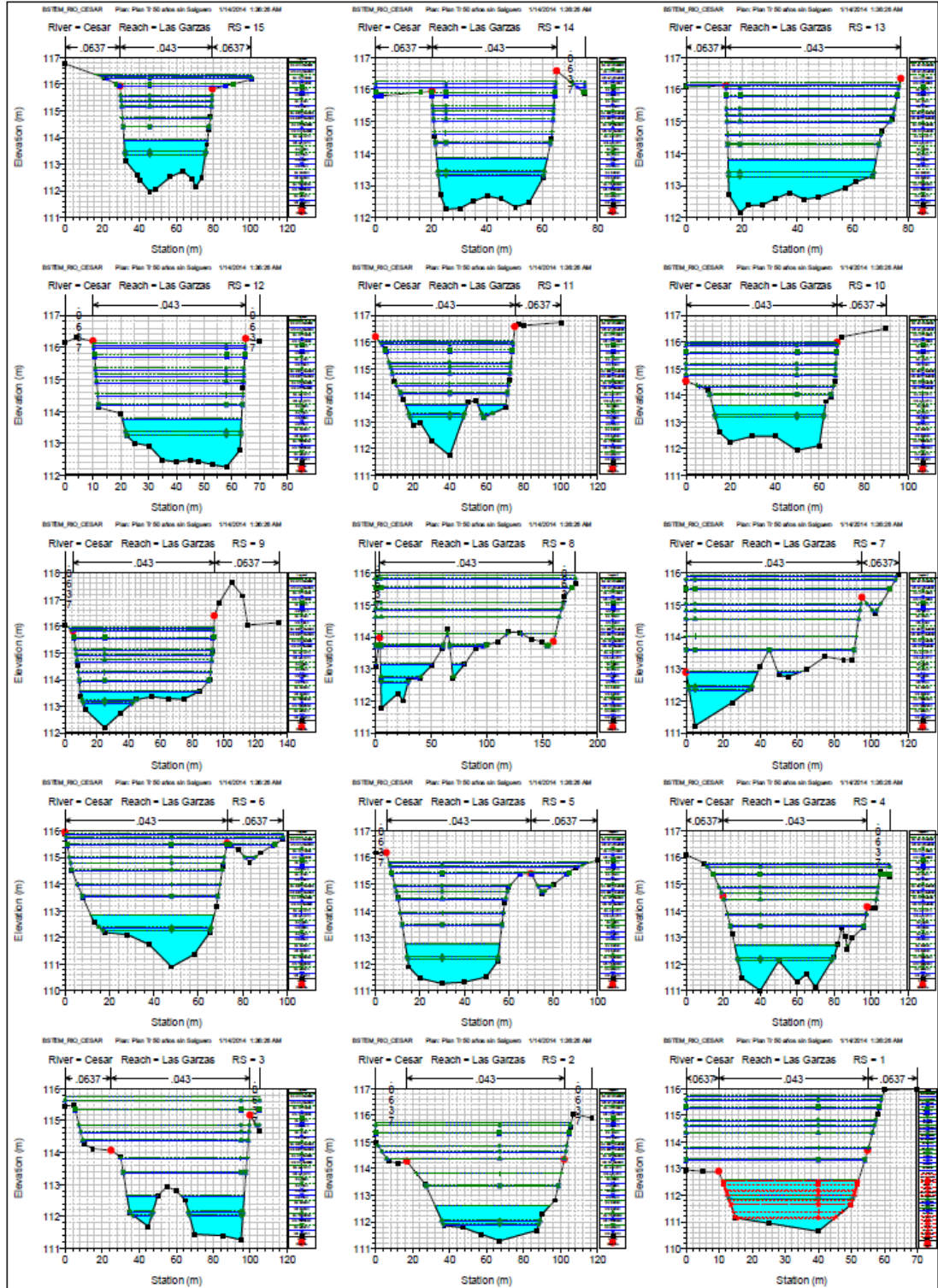
Fuente: el Autor

Resultados de la modelación (niveles de agua) para Tr 2 años



Fuente: el Autor

Resultados de la modelación (niveles de agua) para Tr 50 años



Fuente: el Autor

ANEXO B. Caracterización granulométrica de los suelos del lecho
y márgenes del río Cesar

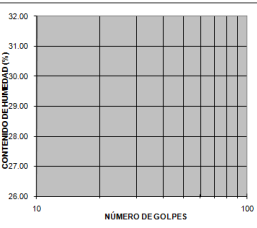
Sondeo 1. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 1** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA PARDAS**
 PROFUNDIDAD : **0.00 m - 02.00 m.** SONDEO No. **1**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	792.70	WLS200	792.70
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"			
HUMEDAD EN (%)		3/4"			
		1/2"			100.00
		3/8"	2.20	0.28	99.72
		No 4	1.40	0.18	99.82
		No 10	3.00	0.38	99.62
		No 16	0.00	0.00	99.17
		No 20	19.50	2.46	96.71
		No 40	95.00	11.98	84.72
		No 50	203.00	25.61	59.11
		No 100	63.40	8.00	51.12
		No 200	32.20	4.06	47.05
		FONDO	373.00	47.05	0.00



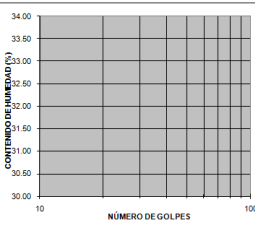
RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **0.45**
 % ARENA : **52.11**
 % FINOS : **47.05**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 2** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **02.00 m - 06.00 m.** SONDEO No. **1**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	580.50	WLS200	580.50
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"			
HUMEDAD EN (%)		3/4"			
		1/2"			100.00
		3/8"			100.00
		No 4	2.70	0.47	99.53
		No 16	0.00	0.00	99.53
		No 20	96.80	16.68	82.86
		No 40	165.00	28.42	54.44
		No 50	109.00	18.78	35.66
		No 100	61.00	10.51	25.15
		No 200	59.00	10.16	14.99
		FONDO	87.00	14.99	0.00



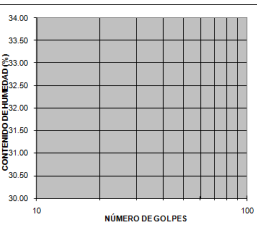
RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **ML**
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **0.00**
 % ARENA : **85.01**
 % FINOS : **14.99**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 3** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA PARDAS CON VETAS GRISAS**
 PROFUNDIDAD : **06.00 m - 08.50 m.** SONDEO No. **1**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	508.10	WLS200	508.10
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	88.00	17.32	82.68
HUMEDAD EN (%)		3/4"	46.00	9.05	73.63
		1/2"	60.00	11.81	61.82
		3/8"	23.80	4.68	57.13
		No 4	41.40	8.15	48.99
		No 10	45.00	8.86	40.13
		No 16	0.00	0.00	40.13
		No 20	43.20	8.50	31.63
		No 40	35.50	6.99	24.64
		No 50	35.30	6.95	17.69
		No 100	21.70	4.27	13.42
		No 200	15.80	3.11	10.31
		FONDO	52.40	10.31	0.00



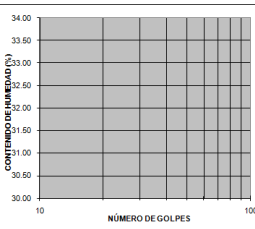
RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GMd**
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **51.01**
 % ARENA : **38.67**
 % FINOS : **10.31**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 4** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA LIMOSA GRIS OSCURA**
 PROFUNDIDAD : **08.50 m - 11.00 m.** SONDEO No. **1**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	254.90	WLS200	254.90
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"	31.00	12.16	87.84
		1/2"	39.60	15.54	72.30
		3/8"	19.40	7.61	64.69
		No 4	27.00	10.59	54.10
		No 10	14.00	5.49	48.61
		No 16	0.00	0.00	48.61
		No 20	22.40	8.79	39.83
		No 40	30.20	11.85	27.97
		No 50	24.50	9.61	18.36
		No 100	9.80	3.84	14.52
		No 200	11.00	4.32	10.20
		FONDO	26.00	10.20	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GMd**
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **45.90**
 % ARENA : **43.90**
 % FINOS : **10.20**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

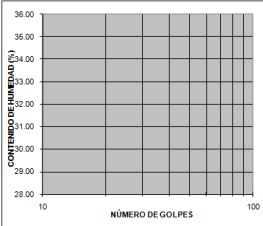
Sondeo 2. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 1** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMIA GRAVOSA PARDA**
 PROFUNDIDAD : **00.00 m - 02.00 m.** SONDEO No. **2**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}		W ₂₀₀
No DE GOLPES		TAMIZ	% RET.	% PASA	
RECIPIENTE No.		3"			669.20
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			669.20
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	36.10	5.39	94.61
HUMEDAD EN (%)		3/4"	28.90	4.32	90.29
		1/2"	6.80	1.02	89.27
		3/8"	10.90	1.63	87.64
		No 4	18.50	2.76	84.88
		No 10	24.40	3.65	81.23
		No 16	0.00	0.00	81.23
		No 20	96.20	14.38	66.86
		No 40	93.00	13.90	52.96
		No 50	73.90	10.91	42.05
		No 100	59.20	8.85	33.20
		No 200	67.00	10.01	23.19
		FONDO	155.20	23.19	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**

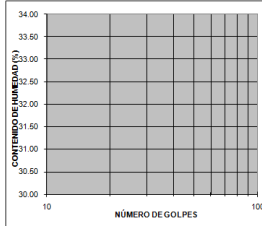
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **15.12**
 % ARENA : **61.69**
 % FINOS : **23.19**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 2** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **02.00 m - 04.50 m.** SONDEO No. **2**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}		W ₂₀₀
No DE GOLPES		TAMIZ	% RET.	% PASA	
RECIPIENTE No.		3"			520.90
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			520.90
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	140.00	26.88	73.12
HUMEDAD EN (%)		3/4"	68.00	13.05	60.07
		1/2"	52.70	10.12	49.95
		3/8"	18.90	3.63	46.32
		No 4	20.30	3.90	42.43
		No 10	27.50	5.28	37.15
		No 16	0.00	0.00	37.15
		No 20	48.50	9.31	27.84
		No 40	40.80	7.83	20.00
		Ps	36.80	5.14	14.86
		No 100	18.30	3.51	11.35
		No 200	18.20	3.49	7.85
		FONDO	40.90	7.85	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

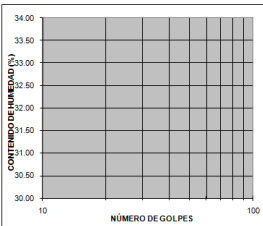
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **57.57**
 % ARENA : **34.57**
 % FINOS : **7.85**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 3** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMIA GRAVOSA PARDA**
 PROFUNDIDAD : **04.50 m - 07.00 m.** SONDEO No. **2**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}		W ₂₀₀
No DE GOLPES		TAMIZ	% RET.	% PASA	
RECIPIENTE No.		3"			288.50
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			288.50
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"	20.30	7.04	92.96
		1/2"	18.20	6.31	86.66
		3/8"	26.40	9.15	77.50
		No 4	34.20	11.85	65.65
		No 10	7.80	2.70	62.95
		No 16	0.00	0.00	62.95
		No 20	14.50	5.03	57.92
		No 40	26.80	9.29	48.63
		No 50	30.20	10.47	38.16
		No 100	26.40	9.15	29.01
		No 200	17.00	5.89	23.12
		FONDO	66.70	23.12	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**

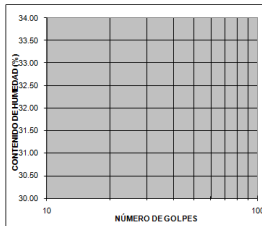
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **34.35**
 % ARENA : **42.53**
 % FINOS : **23.12**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 4** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA PARDA CON VETAS GRISAS**
 PROFUNDIDAD : **07.00 m - 11.00 m.** SONDEO No. **2**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}		W ₂₀₀
No DE GOLPES		TAMIZ	% RET.	% PASA	
RECIPIENTE No.		3"			801.90
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			801.90
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	194.00	24.19	75.81
HUMEDAD EN (%)		3/4"	92.00	11.47	64.33
		1/2"	96.50	12.03	52.30
		3/8"	36.70	4.88	47.72
		No 4	59.80	7.46	40.27
		No 10	73.00	9.10	31.16
		No 16	0.00	0.00	31.16
		No 20	74.80	9.23	21.94
		No 40	55.10	6.87	15.06
		Ps	50	41.10	5.13
		No 100	22.60	2.82	7.12
		No 200	21.00	2.62	4.50
		FONDO	36.10	4.50	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW**

OBSERVACIONES
 % GRAVA : **59.73**
 % ARENA : **35.77**
 % FINOS : **4.50**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

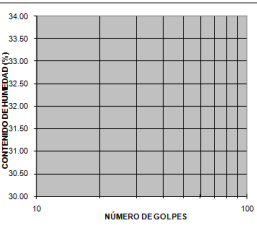
Sondeo 3. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CÉSAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 1** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA MARILLA - GRANO GRUESO**
 PROFUNDIDAD : **00.00 m - 05.50 m.** SONDEO No: **3**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			
HUMEDAD EN (%)		3/4"	0.00	0.00	100.00
		1/2"	5.50	1.11	98.89
		3/8"	5.20	1.05	97.85
		No 4	11.90	2.40	95.45
		No 10	28.60	5.76	89.69
		No 16	0.00	0.00	89.69
		No 20	64.90	13.07	76.63
		No 40	79.00	15.90	60.72
		No 50	119.00	23.96	36.76
		No 100	62.10	12.50	24.26
		No 200	47.90	9.64	14.62
		FONDO	72.60	14.62	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**

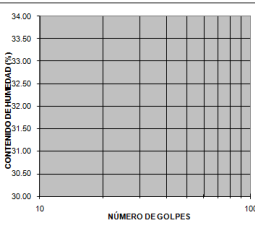
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **4.55**
 % ARENA : **80.83**
 % FINOS : **14.62**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CÉSAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 2** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENO LIMOSA AMARILLA CON VETAS GRISES**
 PROFUNDIDAD : **05.50 m - 08.00 m.** SONDEO No: **3**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			100.00
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"	108.00	38.43	61.57
HUMEDAD EN (%)		3/4"	18.00	6.41	55.16
		1/2"	7.90	2.81	52.35
		3/8"	3.40	1.21	51.14
		No 4	9.20	3.27	47.86
		No 10	15.20	5.41	42.46
		No 16	0.00	0.00	42.46
		No 20	22.90	8.15	34.31
		No 40	20.70	7.27	26.94
		No 50	21.50	7.58	19.26
		No 100	14.90	5.30	14.06
		No 200	13.70	4.88	9.18
		FONDO	25.80	9.18	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

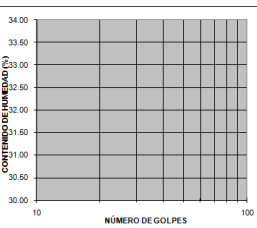
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **52.14**
 % ARENA : **38.68**
 % FINOS : **9.18**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CÉSAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 3** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA PANDA CON VETAS GRISES OSCURAS**
 PROFUNDIDAD : **08.00 m - 11.50 m.** SONDEO No: **3**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	41.80	11.91	88.09
HUMEDAD EN (%)		3/4"	39.80	11.34	76.75
		1/2"	30.60	8.72	68.03
		3/8"	40.20	11.46	56.57
		No 4	41.40	11.80	44.77
		No 10	10.40	2.96	41.81
		No 16	0.00	0.00	41.81
		No 20	23.60	6.73	35.08
		No 40	32.40	9.23	25.85
		No 50	28.60	8.15	17.70
		No 100	19.50	5.56	12.14
		No 200	16.20	4.62	7.52
		FONDO	26.40	7.52	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

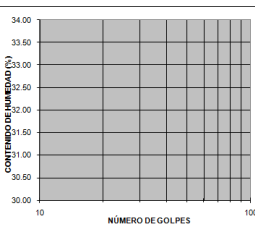
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **55.23**
 % ARENA : **37.25**
 % FINOS : **7.52**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CÉSAR. PK 3+850**
 MUESTRA : **No 4** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA GRIS OSCURO**
 PROFUNDIDAD : **11.50 m - 13.00 m.** SONDEO No: **3**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	18.90	9.11	90.89
HUMEDAD EN (%)		3/4"	20.60	9.93	80.96
		1/2"	16.50	7.95	73.01
		3/8"	20.40	9.83	63.18
		No 4	28.60	13.78	49.40
		No 10	9.00	4.34	45.06
		No 16	0.00	0.00	45.06
		No 20	14.50	6.99	38.07
		No 40	17.20	8.29	29.78
		No 50	20.40	9.83	19.85
		No 100	9.90	4.77	15.18
		No 200	8.90	4.29	10.89
		FONDO	22.60	10.89	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

OBSERVACIONES
 % GRAVA : **50.60**
 % ARENA : **38.51**
 % FINOS : **10.89**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

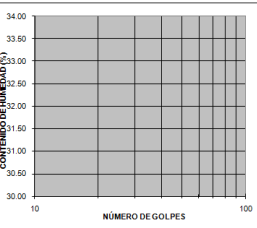
Sondeo 4. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 1 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA MARILLA - GRANO GRUESO**
 PROFUNDIDAD : **00.00 m - 06.00 m.** SONDEO No. **4**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	256.80	WLST200	256.80
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret.	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"			
		1/2"	2.80	1.09	98.91
		3/8"	3.90	1.52	97.39
		No 4	6.20	2.41	94.98
		No 10	12.60	4.91	90.07
		No 16	0.00	0.00	90.07
		No 20	32.40	12.62	77.45
		No 40	45.60	17.76	59.70
		No 50	74.60	29.05	30.65
		No 100	28.40	11.06	19.59
		No 200	16.50	6.43	13.16
		FONDO	33.80	13.16	0.00



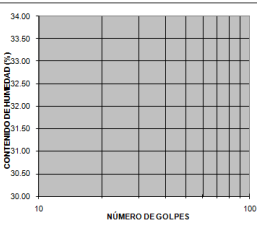
RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**
 OBSERVACIONES
 % GRAVA : **5.02**
 % ARENA : **81.81**
 % FINOS : **13.16**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 2 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENO LIMOSA GRIS CON VETAS AMARILLAS**
 PROFUNDIDAD : **06.00 m - 08.00 m.** SONDEO No. **4**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	374.40	WLST200	374.40
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret.	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"	52.40	14.00	86.00
		1/2"	35.40	9.46	76.55
		3/8"	23.90	6.38	70.17
		No 4	61.40	16.40	53.77
		No 10	14.20	3.79	49.97
		No 16	0.00	0.00	49.97
		No 20	30.60	8.17	41.89
		No 40	41.40	11.06	30.74
		No 50	35.30	9.43	21.31
		No 100	27.80	7.43	13.89
		No 200	20.70	5.53	8.36
		FONDO	31.30	8.36	0.00



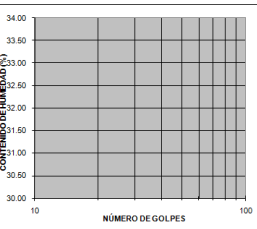
RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**
 OBSERVACIONES
 % GRAVA : **46.23**
 % ARENA : **45.41**
 % FINOS : **8.36**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 3 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA PARDAS CON VETAS GRISES OSCURAS**
 PROFUNDIDAD : **08.00 m - 11.00 m.** SONDEO No. **4**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	263.60	WLST200	263.60
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret.	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	31.40	11.91	88.09
HUMEDAD EN (%)		3/4"	19.60	7.44	80.65
		1/2"	17.20	6.53	74.13
		3/8"	22.20	8.42	65.71
		No 4	36.70	13.92	51.78
		No 10	10.20	3.87	47.91
		No 16	0.00	0.00	47.91
		No 20	11.40	4.32	43.59
		No 40	26.50	10.05	33.54
		No 50	32.20	12.22	21.32
		No 100	14.40	5.46	15.86
		No 200	16.00	6.07	9.79
		FONDO	25.80	9.79	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**
 OBSERVACIONES
 % GRAVA : **48.22**
 % ARENA : **42.00**
 % FINOS : **9.79**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

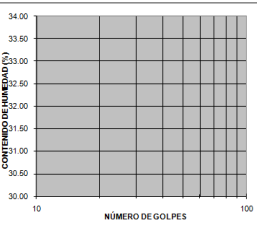
Sondeo 5. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 1 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENOSA AMARILLA**
 PROFUNDIDAD : **00.00 m - 01.00 m.** SONDEO No **5**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			100.00
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			100.00
Pr + Ps (P2)		2"			100.00
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	120.00	19.18	80.82
HUMEDAD EN (%)		3/4"	102.00	16.30	64.52
		1/2"	59.60	9.53	54.99
		3/8"	29.80	4.76	50.23
		No 4	47.60	7.61	42.62
		No 10	47.10	7.53	35.10
		No 16	0.00	0.00	35.10
		No 20	69.40	11.09	24.01
		No 40	54.40	8.69	15.31
		No 50	33.00	5.27	10.04
		No 100	17.20	2.75	7.29
		No 200	12.60	2.01	5.27
		FONDO	33.00	5.27	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

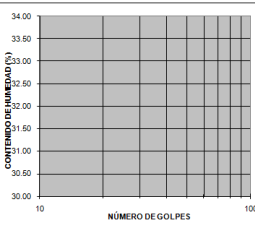
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **57.38**
 % ARENA : **37.35**
 % FINOS : **5.27**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 2 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **01.00 m - 04.50 m.** SONDEO No **5**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			100.00
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			100.00
Pr + Ps (P2)		2"			100.00
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"			100.00
		1/2"			100.00
		3/8"	1.70	0.32	99.68
		No 4	3.40	0.64	99.03
		No 10	4.20	0.80	98.24
		No 16	0.00	0.00	98.24
		No 20	20.30	3.85	94.39
		No 40	55.10	10.44	85.96
		No 50	63.70	12.07	71.89
		No 100	43.10	8.16	63.72
		No 200	81.00	15.34	48.38
		FONDO	255.40	48.38	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**

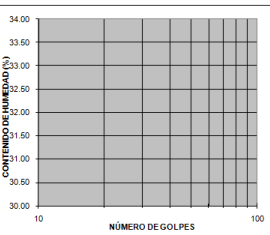
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **0.97**
 % ARENA : **50.65**
 % FINOS : **48.38**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 3 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **04.50 m - 07.00 m.** SONDEO No **5**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			100.00
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			100.00
Pr + Ps (P2)		2"			100.00
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			100.00
HUMEDAD EN (%)		3/4"			100.00
		1/2"			100.00
		3/8"	1.40	0.26	99.74
		No 4	3.70	0.68	99.06
		No 10	7.80	1.44	97.62
		No 16	0.00	0.00	97.62
		No 20	45.00	8.29	89.33
		No 40	93.00	17.14	72.19
		No 50	131.00	24.14	48.05
		No 100	71.00	13.09	34.96
		No 200	67.00	12.35	22.61
		FONDO	122.70	22.61	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **SMd**

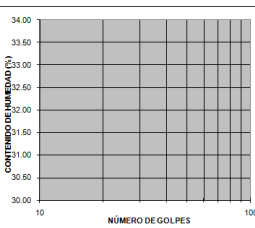
OBSERVACIONES
 % GRAVA : **0.94**
 % ARENA : **76.45**
 % FINOS : **22.61**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO : **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR. PK 3+850**
 MUESTRA : No 4 FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENO LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **07.00 m - 12.00 m.** SONDEO No **5**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	W _{ret}	% RET.	% PASA
No DE GOLPES		TAMIZ			
RECIPIENTE No.		3"			100.00
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			100.00
Pr + Ps (P2)		2"			100.00
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	19.10	10.37	89.63
HUMEDAD EN (%)		3/4"	0.00	0.00	89.63
		1/2"	38.90	21.13	68.50
		3/8"	15.20	8.26	60.24
		No 4	17.00	9.23	51.00
		No 10	11.40	6.19	44.81
		No 16	0.00	0.00	44.81
		No 20	17.10	9.29	35.52
		No 40	19.70	10.70	24.82
		No 50	12.50	6.79	18.03
		No 100	6.90	3.75	14.29
		No 200	5.40	2.93	11.35
		FONDO	20.90	11.35	0.00



RESULTADOS
 LÍMITE LÍQUIDO **NO LIQUIDO** %
 LÍMITE PLÁSTICO **NO PLÁSTICO** %
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD **NO PLÁSTICO** %
 CLASIFICACIÓN U.S.C. **GW-GM**

OBSERVACIONES
 % GRAVA : **49.00**
 % ARENA : **39.65**
 % FINOS : **11.35**
 O.B.C.
 LABORATORISTA

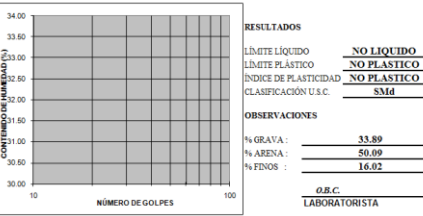
Sondeo 6. TGI

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO: **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR, PK 3+850**
 MUESTRA : **No 1** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMO GRAVOSA AMARILLA**
 PROFUNDIDAD : **00.00 m - 01.00 m.** SONDEO No: **6**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	200.90	WLST200	200.90
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	19.40	6.91	93.09
HUMEDAD EN (%)		3/4"	20.80	7.40	85.69
		1/2"	13.30	4.70	80.99
		3/8"	11.40	4.06	76.93
		No 4	30.40	10.82	66.11
		No 10	36.10	12.85	53.26
		No 16	0.00	0.00	53.26
		No 20	19.40	6.91	46.35
		No 40	21.80	7.76	38.59
		No 50	36.80	13.10	25.49
		No 100	15.20	5.41	20.08
		No 200	11.40	4.06	16.02
		FONDO	45.00	16.02	0.00

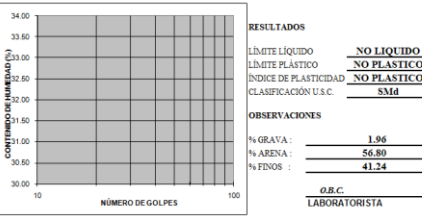


CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO: **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR, PK 3+850**
 MUESTRA : **No 2** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **01.00 m - 04.00 m.** SONDEO No: **6**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	599.70	WLST200	599.70
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			
HUMEDAD EN (%)		3/4"			
		1/2"	3.20	0.63	99.37
		3/8"	6.80	1.33	98.04
		No 4	10.40	2.04	96.00
		No 16	0.00	0.00	96.00
		No 20	26.80	5.26	90.74
		No 40	61.40	12.05	78.69
		No 50	70.60	13.85	64.84
		No 100	47.70	9.36	55.48
		No 200	72.60	14.24	41.24
		FONDO	210.20	41.24	0.00

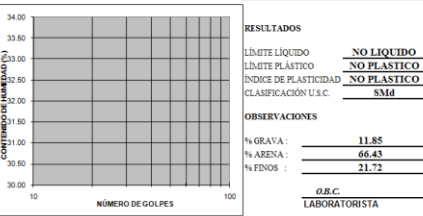


CLASIFICACIÓN DE SUELOS

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO: **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR, PK 3+850**
 MUESTRA : **No 3** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **ARENA LIMO GRAVOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **04.00 m - 06.50 m.** SONDEO No: **6**

LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	432.80	WLST200	432.80
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"			
HUMEDAD EN (%)		3/4"	6.80	1.87	98.43
		1/2"	12.40	2.87	95.56
		3/8"	17.50	4.04	91.82
		No 4	14.60	3.37	88.15
		No 10	8.60	1.99	86.16
		No 16	0.00	0.00	86.16
		No 20	32.80	7.58	78.58
		No 40	74.20	17.14	61.44
		No 50	91.20	21.07	40.37
		No 100	42.50	9.82	30.85
		No 200	38.20	8.83	21.72
		FONDO	94.00	21.72	0.00

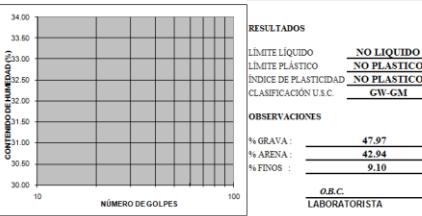


CLASIFICACIÓN DE SUELOS


LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

CLIENTE : **CENTRAL DE PROYECTOS E ING.**
 PROYECTO: **ESTUDIO DE SUELOS: CRUCE RIO CESAR, PK 3+850**
 MUESTRA : **No 4** FECHA: **ENERO 29 DE 2011**
 DESCRIPCIÓN : **GRAVA ARENA LIMOSA GRIS**
 PROFUNDIDAD : **08.00 m - 12.00 m.** SONDEO No: **6**


LÍMITES DE CONSISTENCIA		GRADACIÓN			
LÍMITE LÍQUIDO		WTMS:	344.00	WLST200	344.00
No DE GOLPES		TAMIZ	W ret	% RET.	% PASA
RECIPIENTE No.		3"			
Pr + Ph (P1)		2 1/2"			
Pr + Ps (P2)		2"			
Pr (P3)		1 1/2"			100.00
Ps		1"	33.60	9.77	90.23
HUMEDAD EN (%)		3/4"	21.50	6.25	83.98
		1/2"	29.60	8.60	75.58
		3/8"	31.40	9.13	66.25
		No 4	48.90	14.22	52.03
		No 10	22.80	6.63	45.41
		No 16	0.00	0.00	45.41
		No 20	24.20	7.03	38.37
		No 40	39.40	11.45	26.92
		No 50	30.40	8.84	18.08
		No 100	19.50	5.67	12.41
		No 200	11.40	3.31	9.10
		FONDO	31.50	9.10	0.00




Datos de entrada para caracterización de suelos, Muestra 1. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)	
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N
Sondeo	1
Muestra N°	1
Profundidad	1.3 m
Fecha	Dic. 03/2013
Norma	NTC 1917
MEMORIA ENSAYO DE CORTE DIRECTO	
DIMENSIONES	
Muestra N°	1 2 3 4
Diámetro (cm)	5.07 4.98 4.95 4.95
Altura (cm)	2.000 2.11 2.13 2.10
Área transversal de la muestra (cm ²)	20.19 19.48 19.24 19.24
HUMEDAD DE LA MUESTRA	
Muestra N°	1 2 3 4
Recipiente N°	1 12 3 4
Peso del recipiente (grs.)	33.60 31.30 30.80 39.10
Peso recipiente+suelo húmedo (grs.)	108.50 107.10 107.00 113.00
Peso recipiente+suelo seco (grs.)	95.50 93.60 93.20 99.30
Peso del suelo seco (grs.)	64.90 62.30 62.40 60.20
Peso del agua (grs.)	13.00 13.50 13.80 13.70
Contenido de humedad (w%)	21.00 21.67 22.12 22.76
DENSIDAD HUMEDA	
Muestra N°	1 2 3 4
Peso de la muestra (gr)	75.1 75.50 75.6 74.5
Volumen de la muestra (cm ³)	40.38 41.10 40.99 40.41
Peso Unitario Húmedo (gr/cm ³)	1.860 1.837 1.844 1.843
Peso Unitario Húmedo prom. (gr/cm³)	1.846
Descripción del ensayo:	
En el laboratorio suelos de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña se realizó el ensayo de corte directo a las muestras de suelo de referencia.	
* Se ensayaron cuatro muestras del mismo suelo a diferentes presiones de consolidación.	
* Cada muestra de suelo se sometió a un corte a lo largo de un plano horizontal.	
* Se obtuvieron los datos de carga y deformación horizontal para cada punto.	
* Finalmente se tabularon los valores de esfuerzo normal y cortante.	
ENSAYO	REVISO
Lab. OLIVER PICON VACCA	Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA
Firma	Firma


Datos de entrada para caracterización de suelos, Muestra 2. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)			
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar	Sondeo	1		
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO	Muestra N°	2		
	pertenece a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)	Profundidad	2.7 m		
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante	Fecha	Dic. 09/2013		
	la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.	Norma	NTC 1917		
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez				
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N	Observación	Materiales Areno Limosos (SM)		
MEMORIA ENSAYO DE CORTE DIRECTO					
DIMENSIONES					
Muestra N°		1	2	3	4
Diámetro (cm)		4.98	4.97	4.9	4.92
Altura (cm)		2.000	2.01	2.09	2.12
Área transversal de la muestra (cm ²)		19.48	19.40	18.86	19.01
HUMEDAD DE LA MUESTRA					
Muestra N°		1	2	3	4
Recipiente N°		5	12	14	8
Peso del recipiente (grs.)		47.30	74.50	53.80	34.80
Peso recipiente+suelo húmedo (grs.)		113.50	140.00	117.50	102.00
Peso recipiente+suelo seco (grs.)		104.70	132.00	109.00	93.50
Peso del suelo seco (grs.)		57.40	57.50	55.20	58.70
Peso del agua (grs.)		8.80	8.00	8.50	8.50
Contenido de humedad (w%)		15.33	13.91	15.40	14.48
DENSIDAD HUMEDA					
Muestra N°		1	2	3	4
Peso de la muestra (gr)		68.2	66.90	68.5	70.2
Volumen de la muestra (cm ³)		38.96	38.99	39.41	40.30
Peso Unitario Húmedo (gr/cm ³)		1.751	1.716	1.738	1.742
Peso Unitario Húmedo prom. (gr/cm ³)		1.737			
Descripción del ensayo:					
En el laboratorio suelos de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña se realizó el ensayo de corte directo a las muestras de suelo de referencia.					
* Se ensayaron cuatro muestras del mismo suelo a diferentes presiones de consolidación.					
* Cada muestra de suelo se sometió a un corte a lo largo de un plano horizontal.					
* Se obtuvieron los datos de carga y deformación horizontal para cada punto.					
* Finalmente se tabularon los valores de esfuerzo normal y cortante.					
ENSAYO			REVISO		
Lab. OLIVER PICON VACCA			Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA		
Firma			Firma		

Determinación de Peso Unitario Saturado, Muestra 1. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS																																																																							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO																																																																							
GRAVEDAD ESPECÍFICA																																																																							
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar																																																																						
Descripción	Material areno-limoso NO PLÁSTICO pertenece a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)																																																																						
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.																																																																						
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez																																																																						
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N																																																																						
Observación	Muestra compuesta por materiales limo arenosos (ML)																																																																						
<p style="text-align: center;">GRAVEDAD ESPECÍFICA FRACCIÓN FINA I.N.V. E-128-07</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>PRUEBA N°</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Peso del Pignómetro [W] (gr)</td> <td>148.98</td> <td>148.85</td> <td>152.18</td> </tr> <tr> <td>Peso suelo seco horno [Wo] (gr)</td> <td>58.05</td> <td>58.57</td> <td>59.01</td> </tr> <tr> <td>Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)</td> <td>687.84</td> <td>705.94</td> <td>694.18</td> </tr> <tr> <td>Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)</td> <td>652.26</td> <td>669.92</td> <td>657.79</td> </tr> <tr> <td>Volumen Pignómetro [V] (cm³)</td> <td>500.0</td> <td>500.0</td> <td>500.0</td> </tr> <tr> <td>Temperatura agua en el ensayo (T°C)</td> <td>22°C</td> <td>22°C</td> <td>22°C</td> </tr> <tr> <td>Factor de corrección de temperatura [K]</td> <td>0.9996</td> <td>0.9996</td> <td>0.9996</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica [Ss]</td> <td>2.582</td> <td>2.596</td> <td>2.608</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica promedio (Ss prom.)</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">2.595</td> </tr> </tbody> </table> <p>Aplicación: $Ss = [Wo \cdot K] / [W2 + Wo - W1]$</p>		PRUEBA N°	1	2	3	Peso del Pignómetro [W] (gr)	148.98	148.85	152.18	Peso suelo seco horno [Wo] (gr)	58.05	58.57	59.01	Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)	687.84	705.94	694.18	Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)	652.26	669.92	657.79	Volumen Pignómetro [V] (cm ³)	500.0	500.0	500.0	Temperatura agua en el ensayo (T°C)	22°C	22°C	22°C	Factor de corrección de temperatura [K]	0.9996	0.9996	0.9996	Gravedad Específica [Ss]	2.582	2.596	2.608	Gravedad Específica promedio (Ss prom.)	2.595																																
PRUEBA N°	1	2	3																																																																				
Peso del Pignómetro [W] (gr)	148.98	148.85	152.18																																																																				
Peso suelo seco horno [Wo] (gr)	58.05	58.57	59.01																																																																				
Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)	687.84	705.94	694.18																																																																				
Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)	652.26	669.92	657.79																																																																				
Volumen Pignómetro [V] (cm ³)	500.0	500.0	500.0																																																																				
Temperatura agua en el ensayo (T°C)	22°C	22°C	22°C																																																																				
Factor de corrección de temperatura [K]	0.9996	0.9996	0.9996																																																																				
Gravedad Específica [Ss]	2.582	2.596	2.608																																																																				
Gravedad Específica promedio (Ss prom.)	2.595																																																																						
<p style="text-align: center;">GRAVEDAD ESPECÍFICA FRACCIÓN GRUESA I.N.V. E-223-07</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>PRUEBA N°</th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso seco de la muestra (gr) [A]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica Fracción Gruesa</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gravedad especif. prom. Fracción gruesa</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Aplicación: $Ss = [A] / [A - C]$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Ss Muestra Total=</th> <th>Temp. En °C</th> <th>ens. Rel. Agu</th> <th>F.C (K)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10" style="text-align: center;">2.595</td> <td>18</td> <td>0.9986244</td> <td>1.0004</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>0.9984347</td> <td>1.0002</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>0.9982343</td> <td>1.0000</td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>0.9980233</td> <td>0.9998</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>0.9978018</td> <td>0.9996</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>0.9975702</td> <td>0.9993</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>0.9973286</td> <td>0.9991</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0.9970770</td> <td>0.9989</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>0.9968156</td> <td>0.9986</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>0.9965451</td> <td>0.9983</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>0.9962652</td> <td>0.998</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Factores de corrección por temperatura</p>		PRUEBA N°				Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]				Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]				Peso seco de la muestra (gr) [A]				% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)				% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)				Gravedad específica Fracción Gruesa				Gravedad especif. prom. Fracción gruesa				Ss Muestra Total=	Temp. En °C	ens. Rel. Agu	F.C (K)	2.595	18	0.9986244	1.0004	19	0.9984347	1.0002	20	0.9982343	1.0000	21	0.9980233	0.9998	22	0.9978018	0.9996	23	0.9975702	0.9993	24	0.9973286	0.9991	25	0.9970770	0.9989	26	0.9968156	0.9986	27	0.9965451	0.9983	28	0.9962652	0.998
PRUEBA N°																																																																							
Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]																																																																							
Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]																																																																							
Peso seco de la muestra (gr) [A]																																																																							
% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)																																																																							
% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)																																																																							
Gravedad específica Fracción Gruesa																																																																							
Gravedad especif. prom. Fracción gruesa																																																																							
Ss Muestra Total=	Temp. En °C	ens. Rel. Agu	F.C (K)																																																																				
2.595	18	0.9986244	1.0004																																																																				
	19	0.9984347	1.0002																																																																				
	20	0.9982343	1.0000																																																																				
	21	0.9980233	0.9998																																																																				
	22	0.9978018	0.9996																																																																				
	23	0.9975702	0.9993																																																																				
	24	0.9973286	0.9991																																																																				
	25	0.9970770	0.9989																																																																				
	26	0.9968156	0.9986																																																																				
	27	0.9965451	0.9983																																																																				
28	0.9962652	0.998																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>Humedad (%)=</td> <td>21.67</td> </tr> <tr> <td>γ_m (gr/cm³) =</td> <td>1.846</td> </tr> <tr> <td>Ss=</td> <td>2.6</td> </tr> <tr> <td>γ_{sat} (gr/cm³) =</td> <td>2.023</td> </tr> <tr> <td>γ_{sat} (KN/m³) =</td> <td>19.84</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2.023397424</td> </tr> </tbody> </table>		Humedad (%)=	21.67	γ_m (gr/cm ³) =	1.846	Ss=	2.6	γ_{sat} (gr/cm ³) =	2.023	γ_{sat} (KN/m ³) =	19.84		2.023397424																																																										
Humedad (%)=	21.67																																																																						
γ_m (gr/cm ³) =	1.846																																																																						
Ss=	2.6																																																																						
γ_{sat} (gr/cm ³) =	2.023																																																																						
γ_{sat} (KN/m ³) =	19.84																																																																						
	2.023397424																																																																						

Determinación de Peso Unitario Saturado, Muestra 2. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS																																																																							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO																																																																							
GRAVEDAD ESPECÍFICA																																																																							
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar																																																																						
Descripción	Material areno-limoso NO PLÁSTICO pertenece a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)																																																																						
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.																																																																						
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez																																																																						
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N																																																																						
Observación	Muestra compuesta por materiales areno limosos (SM)																																																																						
<p align="center">GRAVEDAD ESPECÍFICA FRACCIÓN FINA I.N.V. E-128-07</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>PRUEBA N°</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Peso del Pignómetro [W] (gr)</td> <td>152.81</td> <td>151.45</td> <td>150.03</td> </tr> <tr> <td>Peso suelo seco horno [Wo] (gr)</td> <td>62.44</td> <td>59.55</td> <td>59.20</td> </tr> <tr> <td>Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)</td> <td>695.85</td> <td>697.28</td> <td>701.11</td> </tr> <tr> <td>Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)</td> <td>657.19</td> <td>660.48</td> <td>664.42</td> </tr> <tr> <td>Volumen Pignómetro [V] (cm³)</td> <td>500.0</td> <td>500.0</td> <td>500.0</td> </tr> <tr> <td>Temperatura agua en el ensayo (T°C)</td> <td>22°C</td> <td>22°C</td> <td>22°C</td> </tr> <tr> <td>Factor de corrección de temperatura [K]</td> <td>0.9996</td> <td>0.9996</td> <td>0.9996</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica [Ss]</td> <td>2.625</td> <td>2.617</td> <td>2.629</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica promedio (Ss prom.)</td> <td colspan="3">2.623</td> </tr> </tbody> </table> <p>Aplicación: $Ss = [Wo \cdot K] / [W2 + Wo - W1]$</p>		PRUEBA N°	1	2	3	Peso del Pignómetro [W] (gr)	152.81	151.45	150.03	Peso suelo seco horno [Wo] (gr)	62.44	59.55	59.20	Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)	695.85	697.28	701.11	Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)	657.19	660.48	664.42	Volumen Pignómetro [V] (cm ³)	500.0	500.0	500.0	Temperatura agua en el ensayo (T°C)	22°C	22°C	22°C	Factor de corrección de temperatura [K]	0.9996	0.9996	0.9996	Gravedad Específica [Ss]	2.625	2.617	2.629	Gravedad Específica promedio (Ss prom.)	2.623																																
PRUEBA N°	1	2	3																																																																				
Peso del Pignómetro [W] (gr)	152.81	151.45	150.03																																																																				
Peso suelo seco horno [Wo] (gr)	62.44	59.55	59.20																																																																				
Peso Pignómetro+agua+suelo [W1] (gr)	695.85	697.28	701.11																																																																				
Peso Pignómetro+agua [W2] (gr)	657.19	660.48	664.42																																																																				
Volumen Pignómetro [V] (cm ³)	500.0	500.0	500.0																																																																				
Temperatura agua en el ensayo (T°C)	22°C	22°C	22°C																																																																				
Factor de corrección de temperatura [K]	0.9996	0.9996	0.9996																																																																				
Gravedad Específica [Ss]	2.625	2.617	2.629																																																																				
Gravedad Específica promedio (Ss prom.)	2.623																																																																						
<p align="center">GRAVEDAD ESPECÍFICA FRACCIÓN GRUESA I.N.V. E-223-07</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>PRUEBA N°</th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso seco de la muestra (gr) [A]</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica Fracción Gruesa</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gravedad especif. prom. Fracción gruesa</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Aplicación: $Ss = [A] / [A - C]$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ss Muestra Total=</th> <th>Temp. En °C</th> <th>ens. Rel. Agu</th> <th>F.C (K)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">2.623</td> <td>18</td> <td>0.9986244</td> <td>1.0004</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>0.9984347</td> <td>1.0002</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>0.9982343</td> <td>1.0000</td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>0.9980233</td> <td>0.9998</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>0.9978018</td> <td>0.9996</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>0.9975702</td> <td>0.9993</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>0.9973286</td> <td>0.9991</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0.9970770</td> <td>0.9989</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>0.9968156</td> <td>0.9986</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>0.9965451</td> <td>0.9983</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>0.9962652</td> <td>0.998</td> </tr> </tbody> </table> <p align="center">Factores de corrección por temperatura</p>		PRUEBA N°				Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]				Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]				Peso seco de la muestra (gr) [A]				% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)				% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)				Gravedad específica Fracción Gruesa				Gravedad especif. prom. Fracción gruesa				Ss Muestra Total=	Temp. En °C	ens. Rel. Agu	F.C (K)	2.623	18	0.9986244	1.0004	19	0.9984347	1.0002	20	0.9982343	1.0000	21	0.9980233	0.9998	22	0.9978018	0.9996	23	0.9975702	0.9993	24	0.9973286	0.9991	25	0.9970770	0.9989	26	0.9968156	0.9986	27	0.9965451	0.9983	28	0.9962652	0.998
PRUEBA N°																																																																							
Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada Superficialmente Seca en el aire (gr) [B]																																																																							
Peso Muestra Ret. Tamiz N°8 Saturada y Sumergida en agua (gr) [C]																																																																							
Peso seco de la muestra (gr) [A]																																																																							
% Muestra Total Retenida Tamiz N°8 (gr)																																																																							
% Muestra Total que pasa Tamiz N°8 (gr)																																																																							
Gravedad específica Fracción Gruesa																																																																							
Gravedad especif. prom. Fracción gruesa																																																																							
Ss Muestra Total=	Temp. En °C	ens. Rel. Agu	F.C (K)																																																																				
2.623	18	0.9986244	1.0004																																																																				
	19	0.9984347	1.0002																																																																				
	20	0.9982343	1.0000																																																																				
	21	0.9980233	0.9998																																																																				
	22	0.9978018	0.9996																																																																				
	23	0.9975702	0.9993																																																																				
	24	0.9973286	0.9991																																																																				
	25	0.9970770	0.9989																																																																				
	26	0.9968156	0.9986																																																																				
	27	0.9965451	0.9983																																																																				
28	0.9962652	0.998																																																																					
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Humedad (%)=</td> <td>15.4</td> </tr> <tr> <td>γ_m (gr/cm³) =</td> <td>1.737</td> </tr> <tr> <td>Ss=</td> <td>2.62</td> </tr> <tr> <td>γ_{sat} (gr/cm³) =</td> <td>2.154</td> </tr> <tr> <td>γ_{sat} (kN/m³) =</td> <td>21.12</td> </tr> </tbody> </table>	Humedad (%)=	15.4	γ_m (gr/cm ³) =	1.737	Ss=	2.62	γ_{sat} (gr/cm ³) =	2.154	γ_{sat} (kN/m ³) =	21.12																																																													
Humedad (%)=	15.4																																																																						
γ_m (gr/cm ³) =	1.737																																																																						
Ss=	2.62																																																																						
γ_{sat} (gr/cm ³) =	2.154																																																																						
γ_{sat} (kN/m ³) =	21.12																																																																						

Clasificación y granulometría, Muestra 1. Río Cesar. UFPS

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA						
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS						
ANALISIS GRANULOMETRICO						
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar				Sondeo	1
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO				Muestra Nº	1
	perteneciente a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)				Profundidad	1.3 m
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.				Fecha	Diciembre 03 de 2013
	Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez			Norma:	INV-E123-07 / NTC 1522
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N		Observación	Muestra compuesta por materiales limo arenosos		

Pesos total de la Muestra (grs.) = 636.4				RANGOS DE DISEÑO	
TAMIZ (pulg)	ABERTURA (mm)	Peso (grs.) Retenido	TAMICES		
			% Retenido	% Pasa	SUPERIOR % Pasa
					INFERIOR % Pasa
3"	76.2	0	0.0	100.0	
2 1/2	63.0	0.0	0.0	100.0	
2	50.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2	37.5	0.0	0.0	100.0	
1	25	0.0	0.0	100.0	
3/4	19.5	0.0	0.0	100.0	
1/2	12.5	0.0	0.0	100.0	
3/8	9.5	0.0	0.0	100.0	
4	4.75	0.0	0.0	100.0	
10	2.00	0.0	0.0	100.0	
20	0.85	2.0	0.3	99.7	
30	0.60	2.3	0.4	99.3	
40	0.425	7.4	1.2	98.2	
60	0.250	27.4	4.3	93.9	
80	0.180	78.8	12.4	81.5	
100	0.150	44.4	7.0	74.5	
200	0.075	111.2	17.5	57.0	
Pasa 200		362.9	57.0		

TAMICES ESTANDAR U.S.A.

	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₂₅ (mm)	D ₂₀ (mm)	D ₁₀ (mm)
	0.22	0.058	-	-	-
% Grava =	0.00		% Arena = 42.98%		% Finos = 57.02
Clasificación AASHTO			Clasificación U.S.C.S ML		

ELABORACION Lab: Oliver Picón Vacca	Revisó Ing. Romel Gallardo Amaya
Firma	Firma

Clasificación y granulometría, Muestra 2. Río Cesar. UFPS

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	
ANALISIS GRANULOMETRICO	
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N
Observación	Muestra compuesta por materiales areno limosos.
Sondeo	1
Muestra N°	2
Profundidad	2.7 m
Fecha	Diciembre 06 de 2013
Norma:	INV-E123-07 / NTC 1522


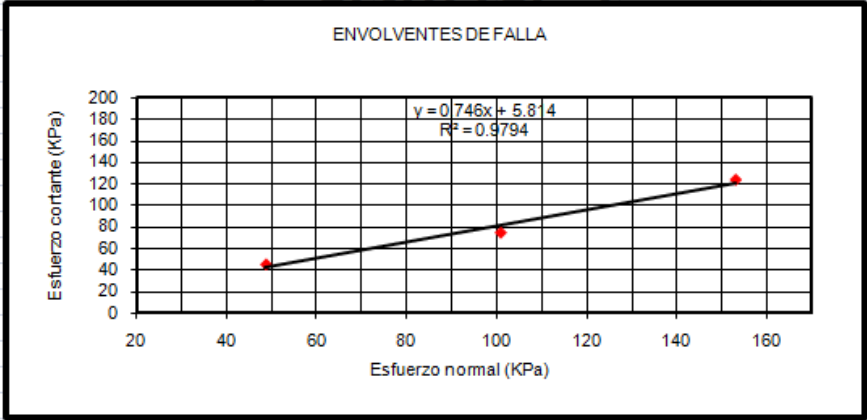
Pesos total de la Muestra (grs.) = 890.4			RANGOS DE DISEÑO		
TAMIZ (pulg)	ABERTURA (mm)	Peso (grs.) Retenido	TAMICES % Retenido	TAMICES % Pasa	RANGOS DE DISEÑO % Pasa
					SUPERIOR INFERIOR
3"	76.2	0	0.0	100.0	
2 1/2	63.0	0.0	0.0	100.0	
2	50.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2	37.5	0.0	0.0	100.0	
1	25	0.0	0.0	100.0	
3/4	19.5	0.0	0.0	100.0	
1/2	12.5	0.0	0.0	100.0	
3/8	9.5	0.0	0.0	100.0	
4	4.75	0.0	0.0	100.0	
10	2.00	2.8	0.3	99.7	
20	0.85	19.6	2.2	97.5	
30	0.60	27.2	3.1	94.4	
40	0.425	72.6	8.2	86.3	
60	0.250	159.4	17.9	68.4	
80	0.180	210.0	23.6	44.8	
100	0.150	88.8	10.0	34.8	
200	0.075	161.2	18.1	16.7	
Pasa 200		148.8	16.7		

TAMICES ESTANDAR U.S.A.


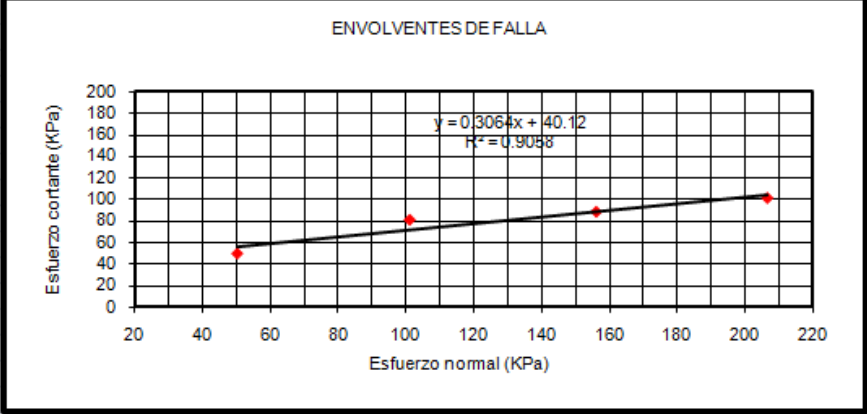
	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₂₅ (mm)	D ₁₅ (mm)
	0.49	0.190	0.13	0.11
% Grava =	0.00		% Arena = 83.29%	% Finos = 16.71
Clasificación AASHTO	Clasificación U.S.C.S		SM	

ELABORACION Lab. Óliver Picón Vacca	Revisó Ing. Romel Gallardo Amaya
Firma	Firma

Resultados del ensayo de Corte directo, Muestra 1. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS													
ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)													
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar												
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO perteneciente a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)												
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.												
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez												
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N												
Apique	1												
Muestra N°	1												
Especimen	1 - 3												
Profundidad	1.3 m												
Fecha	Dic. 03/2013												
Norma	NTC 1917												
Estado de la muestra	Alterada <input type="checkbox"/> Humeda <input checked="" type="checkbox"/> Inalterada <input checked="" type="checkbox"/> Saturada <input type="checkbox"/>												
PARAMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Prueba Numero</th> <th>esfuerzo Normal kPa</th> <th>Esfuerzo cortante kPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>48.59</td> <td>45.32</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>100.73</td> <td>74.44</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>152.93</td> <td>123.15</td> </tr> </tbody> </table>		Prueba Numero	esfuerzo Normal kPa	Esfuerzo cortante kPa	1	48.59	45.32	2	100.73	74.44	3	152.93	123.15
Prueba Numero	esfuerzo Normal kPa	Esfuerzo cortante kPa											
1	48.59	45.32											
2	100.73	74.44											
3	152.93	123.15											
													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetros mecánicos del suelo</th> <th>Máximos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ángulo de fricción interna</td> <td>36.72°</td> </tr> <tr> <td>Cohesión</td> <td>5.814 kPa = 0.0592 kg/cm²</td> </tr> </tbody> </table>		Parámetros mecánicos del suelo	Máximos	Ángulo de fricción interna	36.72°	Cohesión	5.814 kPa = 0.0592 kg/cm²						
Parámetros mecánicos del suelo	Máximos												
Ángulo de fricción interna	36.72°												
Cohesión	5.814 kPa = 0.0592 kg/cm²												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ENSAYO</th> <th>REVISO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lab. OLIVER PICÓN VACCA</td> <td>Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA</td> </tr> <tr> <td>Firma</td> <td>Firma</td> </tr> </tbody> </table>		ENSAYO	REVISO	Lab. OLIVER PICÓN VACCA	Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA	Firma	Firma						
ENSAYO	REVISO												
Lab. OLIVER PICÓN VACCA	Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA												
Firma	Firma												

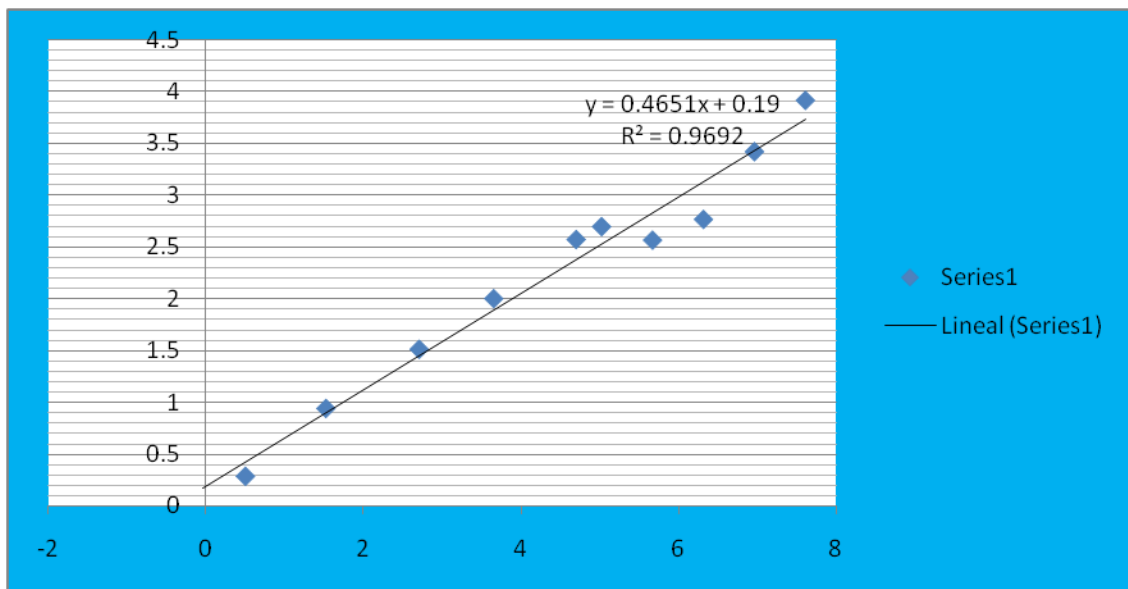
Resultados del ensayo de Corte directo, Muestra 1. Río Cesar. UFPS

 UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		ENSAYO DE CORTE DIRECTO (CD)																
Localización	Talud margen derecha del río Cesar, sector Las Garzas, municipio de Valledupar - Cesar	Apique	1															
Descripción	Material areno-limoso NO PLASTICO	Muestra N°	2															
	pertenece a la unidad geológica Llanura Aluvial del Río Cesar (Qlla)	Especimen	1 - 4															
Proyecto	Evaluación de cambios morfológicos en cauces de corrientes de aguas superficiales, mediante la aplicación del modelo de erosión del pie y estabilidad de los bancos.	Profundidad	2.7 m															
		Fecha	Dic. 09/2013															
Solicitante	Ing. Jorge Armenta Jiménez	Norma	NTC 1917															
Coordenadas	1°095.231 E y 1°643.586 N																	
Estado de la muestra Alterada <input type="checkbox"/> Humeda <input checked="" type="checkbox"/> Inalterada <input checked="" type="checkbox"/> Saturada <input type="checkbox"/>																		
PARAMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Prueba Numero</th> <th>esfuerzo Normal kPa</th> <th>Esfuerzo cortante kPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>50.36</td> <td>49.34</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>101.13</td> <td>80.41</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>156.07</td> <td>87.76</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>206.40</td> <td>100.46</td> </tr> </tbody> </table>				Prueba Numero	esfuerzo Normal kPa	Esfuerzo cortante kPa	1	50.36	49.34	2	101.13	80.41	3	156.07	87.76	4	206.40	100.46
Prueba Numero	esfuerzo Normal kPa	Esfuerzo cortante kPa																
1	50.36	49.34																
2	101.13	80.41																
3	156.07	87.76																
4	206.40	100.46																
ENVOLVENTES DE FALLA																		
																		
Parámetros mecánicos del suelo		Máximos																
Ángulo de fricción interna		17.04																
Cohesión		40.12 kPa = 0.409 kg/cm ²																
ENSAYO Lab. OLIVER PICÓN VACCA		REVISÓ Ing. ROMEL GALLARDO AMAYA																
Firma		Firma																

ANEXO C. Perfil estratigráfico del suelo y Estimación de parámetros de resistencia
mediante correlaciones

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA EFECTIVOS PARA UN SUELO, CON EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR										
MARGENES DEL RÍO CESAR										
SONDEO 5 EFECTUADO POR TRANSPORTADORA DE GAS INTERNACIONAL										
MÉTODOLÓGIA: ÁLVARO J. GONZALEZ G.										
APLICADA POR: JORGE ALBERTO ARMENTA JIMÉNEZ										
PROFUNDIDAD MTS	PERFIL DEL SUELO	No. GOLPES			RECUPERACIÓN		DESCRIPCION DE LOS SUELOS Y OBSERVACIONES			
		6"	12"	18"	% w					
0.0	0.5									ARENA LIMO GRAVOSA AMARILLA, CONSISTENCIA BAJA - HUMEDAD BAJA
0.5	1		9	6	5					
1.0	1.5		5	5	4					
1.5	2		4	5	4					
2.0	2.5		4	6	4					
2.5	3		5	6	4					
3.0	3.5		2	2	3					ARENA LIMOSA GRIS - GRANO GRUESO - CONSISTENCIA BAJA - HUMEDAD ALTA
3.5	4		3	2	3					
4.0	4.5		2	4	4					
4.5	5		4	5	5					
5.0	5.5		6	6	6					
5.5	6		3	6	10					ARENA LIMO GRAVOSA GRIS - CONSISTENCIA MEDIA - HUMEDAD MEDIA
6.0	6.5		13	16	18					
6.5	7		15	19	17					
7.0	7.5		10	9	11					
7.5	8		12	8	22					ARENA GRAVOSA GRIS - CONSISTENCIA ALTA - HUMEDAD ALTA
8.0	8.5		19	18	22					
8.5	9		24	25	27					
9.0	9.5		21	23	20					
9.5	10		11	24	21					
10.0	10.5		25	25	27					
10.5	11		22	29	30					GRAVA ARENOSA GRIS CON VETAS PARDAS - CONSISTENCIA ALTA - HUMEDAD MEDIA
11.0	11.5		27	24	28					
11.5	12		24	23	21					
12.0	12.5									
12.5	13									
13.0	13.5									
13.5	14									
14.0	14.5									
14.5	15									

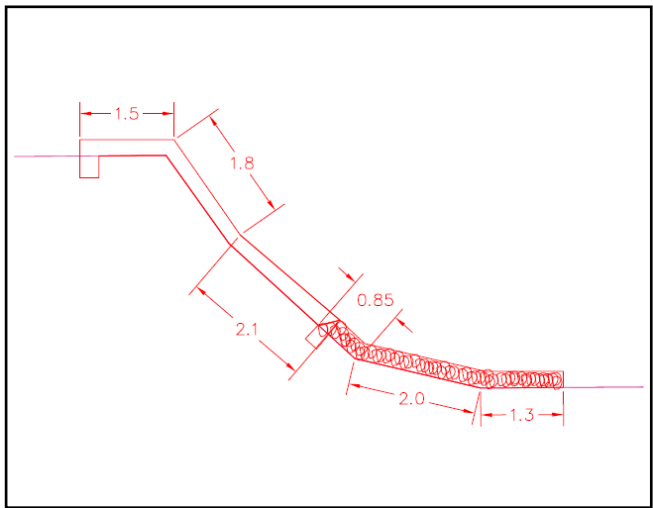
Resultado grafico y obtención de parámetros de resistencia por correlación



ARCTAN(0.4651) =	24.9431384	PHI	
	0.19	C	1.9 kpa

ANEXO D. Esquema de las obras recomendadas en la sección estudiada.

Obras para la margen izquierda: superior en geotextil (flexocreto) e inferior en riprap (geocolchón). Dimensiones en metros. El espesor de las obras es de 30 cm



Obras para la margen derecha: superior en geotextil (flexocreto) e inferior en riprap (geocolchón). Dimensiones en metros. El espesor de las obras es de 30 cm

