

DISEÑO GEOTECNICO DE JARILLONES

JOSE EDUARDO ESTEVEZ VILLAMIZAR

PAULA ANDREA RODRÍGUEZ PARDO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2013

DISEÑO GEOTECNICO DE JARILLONES

JOSE EDUARDO ESTEVEZ VILLAMIZAR

PAULA ANDREA RODRÍGUEZ PARDO

Trabajo de grado para optar al titulo de Ingeniero Civil

Director:

CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2013

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. INUNDACIONES	10
2.1.1. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES	10
2.1.2. GESTIÓN DE CUENCAS	10
2.1.3. CANALES DE ALIVIO	13
2.1.4. DRAGADO	14
2.1.5. ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN	15
2.2. SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS	16
2.2.1. PROPIEDADES HIDRÁULICAS	17
2.2.2. ASPECTOS TÉCNICOS MODELO HYDRUS 2.0	23
2.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	24
3. JARILLONES	29
3.1. PARTES DE UN JARILLÓN	30
3.2. TIPOS DE JARILLONES	37
3.3. TIPOS DE FALLAS EN JARILLONES	46
4. METODOLOGÍA	53
4.1. PARAMETROS DE DISEÑO	53
4.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA	62
4.2.1. HYDRUS 2.0	62
4.2.2. CONDICIONES DEL MODELO	62
4.2.3. MODELACIÓN	68
4.3. MODELACIÓN EN SLIDE	75
4.3.1. DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES	76
4.3.2. NIVEL FREÁTICO	78
4.3.3. PRESIONES DE POROS	78
5. RESULTADOS	81

5.1. FLUJO EN HYDRUS	81
5.2. VELOCIDADES HYDRUS 2.0	84
5.3. MODELACIÓN EN SLIDE	94
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	101
6.1. FLUJO HYDRUS 2.0	101
6.2. VELOCIDADES HYDRUS 2.0	101
6.3. ESTABILIDAD EN SLIDE 5.0	108
7. CRITERIOS GEOTÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE JARILLONES	113
8. CONCLUSIONES	119
9. BIBLIOGRAFIA	123
10. ANEXOS	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estimación de las precipitaciones al año 2070 en Colombia. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ideam, & Embajada de Holanda, 2010)	2
Figura 2 Comportamiento del índice oceánico en el eje vertical. 1950 – 2010 eje horizontal. Niño (picos rojos), Niña (picos azules). (Corporación Autónoma Regional CAR, 2011)	3
Figura 3 Mapa de afectación en Colombia. Zonas inundables (9.2%) (Rojo) – Cuerpos de agua (1.6%) (Azul)	5
Figura 4 Zonas afectadas por inundaciones en 2001 y periodo 2010 – 2011.	6
Figura 5 Área afectada por la inundación de acuerdo con el uso del suelo.	7
Figura 6 - Muro T reforzado.....	16
Figura 7 - Fases del suelo. (Fredlund 2000)	16
Figura 8 - Curva de retención de humedad del suelo. (Vasquez 2003)	19
Figura 9 - Curva de conductividad hidráulica, succión del suelo. (Vasquez 2003)	23
Figura 10 - Método de las tajadas, Diagrama de fuerzas. (Smith and Smith 1998)	25
Figura 11 - Análisis de esfuerzos efectivos. Fuerzas actuando verticalmente. (Smith and Smith 1998).....	26
Figura 12 Esquema estático – Morgenstern Price (Morgenstern & Price, 1965)...	28
Figura 13 - Sección típica de un jarillón. (Eversdijk 1993).....	30
Figura 14 - Protección de la parte baja de un jarillón. (USACE, 2000).....	31
Figura 15 - Típico pie de un jarillón. (USACE, 2000).....	32
Figura 16 - Tipos de drenaje (USACE, 2000).....	36
Figura 17 - Jarillón de cuerpo homogéneo (Sandoval 2012).....	37
Figura 18 - Zonificación de materiales. (Sandoval 2012a)	38
Figura 19 - Jarillón de núcleo ancho. (Diaz and Diaz 2009a)	39
Figura 20 - Jarillón de núcleo delgado. (Diaz and Diaz 2009a).....	39
Figura 21 - Jarillón de núcleo inclinado. (Diaz and Diaz 2009a).....	40
Figura 22 - Secciones típicas de jarillones con filtros en función de H. (LEWIS 2002a)	41
Figura 23 - Esquema de jarillón con drenaje. (Vallarino, 1997).....	42
Figura 24 - Jarillón con recubrimiento. (Diaz and Diaz 2009a).....	43
Figura 25 - Jarillón con delantal. (Sandoval 2012a)	44
Figura 26 - Jarillón con dentellón. (Sandoval 2012a)	45
Figura 27 - Jarillón con cortina de cemento. (Sandoval 2012a)	45
Figura 28 - Jarillón con diafragma. (Sandoval 2012a).....	46
Figura 29 - Falla por sobrepaso (Wood, 1975).....	47

Figura 30 - Tubificación retrograda. (Rayano 2006).....	48
Figura 31 - Fractura hidráulica. (Rayano 2006).....	49
Figura 32 Clasificación textural del suelo. Materiales usados en las modelaciones.	54
Figura 33 Pendientes de los jarillones. 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 y 3:1.	56
Figura 34 Recubrimiento en arcilla en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.....	57
Figura 35 Recubrimiento en arcilla en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.	57
Figura 36 Filtro tipo I en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.	58
Figura 37 Filtro tipo I en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.....	58
Figura 38 Filtro tipo II en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.	59
Figura 39 Filtro tipo II en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.....	59
Figura 40 Filtro tipo III en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.....	60
Figura 41 Filtro tipo III en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.....	60
Figura 42 Ejemplo de un núcleo para pendiente 1:1.	62
Figura 43 Consideraciones geométricas HYDRUS.	63
Figura 44 Información sobre el tiempo en HYDRUS.	64
Figura 45 Condiciones de frontera en HYDRUS.	65
Figura 46 Parámetros de discretización de la malla en HYDRUS.....	68
Figura 47 Ejemplo de geometría y malla de elementos finitos en HYDRUS.	69
Figura 48 Ejemplo de la distribución de los materiales en HYDRUS.	70
Figura 49 Curva de saturación vs carga hidráulica para Arena.....	71
Figura 50 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Limo.....	71
Figura 51 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Arcilla.....	72
Figura 52 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Franco limoso.....	72
Figura 53 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Limo arcilloso.....	73
Figura 54 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Marga.	73
Figura 55 Condiciones iniciales en HYDRUS.....	74
Figura 56 Condiciones de frontera en HYDRUS.	75
Figura 57 Definición de las propiedades de los materiales en SLIDE.	77
Figura 58 Ubicación del nivel freático en las modelaciones de SLIDE.....	78
Figura 59 Ingreso de las presiones de poros en SLIDE.	79
Figura 60 Modelación SLIDE, limo arcilloso - pendiente 1:1.	79
Figura 61 Flujo en jarillón con pendiente 1:1.....	81
Figura 62 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y recubrimiento en Arcilla.....	82
Figura 63 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo I.	82
Figura 64 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo II.	83
Figura 65 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo III.	83
Figura 66 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y núcleo.	84
Figura 67 Zona de falla de un jarillón sin elementos adicionales.	91
Figura 68 Zona de falla de un jarillón con recubrimiento.....	91
Figura 69 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo I.	92

Figura 70 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo II.	92
Figura 71 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo III.	93
Figura 72 Zona de falla de un jarillón con núcleo.	93
Figura 73 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, sin elementos adicionales.	96
Figura 74 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, sin elementos adicionales.	96
Figura 75 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, recubrimiento.	97
Figura 76 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, recubrimiento.	97
Figura 77 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo I.	98
Figura 78 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo I.	98
Figura 79 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo II.	98
Figura 80 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo II.	99
Figura 81 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo III.	99
Figura 82 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo III.	99
Figura 83 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, núcleo.	100
Figura 84 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, núcleo.	100
Figura 85 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Pendientes) ...	102
Figura 86 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Recubrimientos)	102
Figura 87 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros I)	103
Figura 88 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros II)	103
Figura 89 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros III)	104
Figura 90 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Núcleo).....	105
Figura 91 Análisis de sensibilidad.	107
Figura 92 Factores de seguridad en jarillones sin elementos adicionales. Método de Bishop.	109
Figura 93 Factores de seguridad en jarillones con recubrimiento. Método de Bishop.	109
Figura 94 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo I. Método de Bishop.	110
Figura 95 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo II. Método de Bishop.	110
Figura 96 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo III. Método de Bishop.	111
Figura 97 Factores de seguridad en jarillones con núcleo. Método de Bishop. ..	111

Figura 98 – Relación de las pendientes contra factor de seguridad de tubificación.	114
Figura 99 - F.S por tubificación en los recubrimientos de acuerdo al material del cuerpo del jarillón	114
Figura 100 - Diferencia (%) de permeabilidad con base a la permeabilidad del material de recubrimiento.	115
Figura 101 - Flujo en Núcleos.	116
Figura 102 - Análisis de Sensibilidad	117
Figura 103 - Banca y Zona Inundable	118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Metodologías para el cálculo de la curva de retención de humedad del suelo. (Vasquez, 2003)	20
Tabla 2 Parámetros hidráulicos para el modelo de Van Genuchten. (Vasquez, 2003)	21
Tabla 3 Pendientes comunes de los jarillones. (Lewis, 2002)	33
Tabla 4 - Anchos de cresta.....	35
Tabla 5 Pendientes comunes de los jarillones. (Lewis, 2002)	55
Tabla 6 Parámetros geométricos de diseño, núcleos HYDRUS.....	61
Tabla 7 Parámetros del flujo para distintos suelos en HYDRUS (HYDRUS).....	64
Tabla 8 - Condiciones de frontera HYDRUS	66
Tabla 9 - Matriz de diseño	68
Tabla 10 Parámetros de resistencia del suelo. (CONVENIO INTERADMINISTRATIVO (UN - CAR 514 DE 2007), 2009).....	77
Tabla 11 - Gradiente hidráulico crítico.....	85
Tabla 12 - Velocidades límite.	85
Tabla 13 - Permeabilidad materiales.....	86
Tabla 14 - Factores de seguridad para tubificación, pendientes.	86
Tabla 15 - Factores de seguridad para tubificación, recubrimiento.	87
Tabla 16 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro I.....	88
Tabla 17 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro II.....	88
Tabla 18 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro III.....	89
Tabla 19 - Factores de seguridad para tubificación, Núcleo.	90
Tabla 20 Factores de seguridad de estabilidad geotécnica (SLIDE), método de Bishop.	94
Tabla 21 Factores de seguridad de estabilidad geotécnica (SLIDE), método de Morgenstern-Price.....	95
Tabla 22 – Factores de seguridad por tubificación para pendientes 1:1, 2:1 y 3:1.	105
Tabla 23 – Factores de seguridad por tubificación entre el jarillón y el recubrimiento.....	106
Tabla 24 - Análisis de sensibilidad	107
Tabla 25 - Clasificación del suelo para diseño de filtros.....	116

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Altura capilar h_c	17
Ecuación 2 Succión del suelo.....	18
Ecuación 3 Carga hidráulica en el suelo.	22
Ecuación 4 Velocidad aparente de flujo del agua.....	22
Ecuación 5 Ecuación de Richard's para calcular flujo en medios porosos parcialmente saturados.	24
Ecuación 6 Factor de seguridad. (Smith & Smith, 1998).....	25
Ecuación 7 Fuerza cortante. (Smith & Smith, 1998).....	26
Ecuación 8 Factor de seguridad. (Smith & Smith, 1998).....	27
Ecuación 10 Ancho de cresta.....	34
Ecuación 11 Espesor del filtro en función de la altura. (Lewis, 2002)	42
Ecuación 12 Altura del filtro tipo I. (Suarez Diaz, 2010)	58
Ecuación 13 Altura de un filtro tipo III o chimenea.	60
Ecuación 14 Gradiente hidráulico crítico del suelo.	85
Ecuación 15 Gradiente hidráulico actuante del suelo.....	86
Ecuación 16 Factor de seguridad por tubificación.....	86
Ecuación 17 - Ancho de cresta.....	113

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se realizó como un requisito para optar al título de Ingeniero Civil y tiene como objetivo general establecer criterios para el diseño geotécnico de jarillones a partir de una revisión bibliográfica, acompañada de la experiencia del país frente a inundaciones, tomando como referente el fenómeno invernal ocurrido entre el 2010 y 2011.

Objetivo que se cumple a partir de la realización de los objetivos específicos establecidos para el desarrollo del trabajo de grado, los objetivos específicos que se plantearon son los siguientes:

- Identificar modos de falla de carácter geotécnico de jarillones.
- Definir tipos de jarillón y variables de diseño para cada tipo.
- Determinar la influencia de las propiedades del suelo en el flujo de aguas a través de los diferentes tipos de jarillón.
- Determinar la influencia de las propiedades del suelo y del flujo de agua en la estabilidad de los diferentes tipos de jarillón.

JUSTIFICACION

Actualmente el país requiere de criterios para el diseño geotécnico de jarillones, estructuras que son usadas para la contención de agua y prevención de inundaciones. La forma en que se presentan las inundaciones y las características de las mismas no son iguales en todas las zonas del país. Debido a esto se requiere generar una serie de criterios para estos diseños con base en experiencias vividas en los últimos años del país.

Se hacen necesarias ese tipo de estructuras debido a los fenómenos de variabilidad climática de los últimos años asociados al impacto que ha generado el hombre en sus ecosistemas, contribuyendo a la diversificación de los mismos. Para el caso colombiano se espera que con el aumento de temperatura por fenómenos asociados a la variabilidad climática que presenta el planeta, la precipitación disminuya o aumente de acuerdo a la región del país como se muestra en Figura 1.

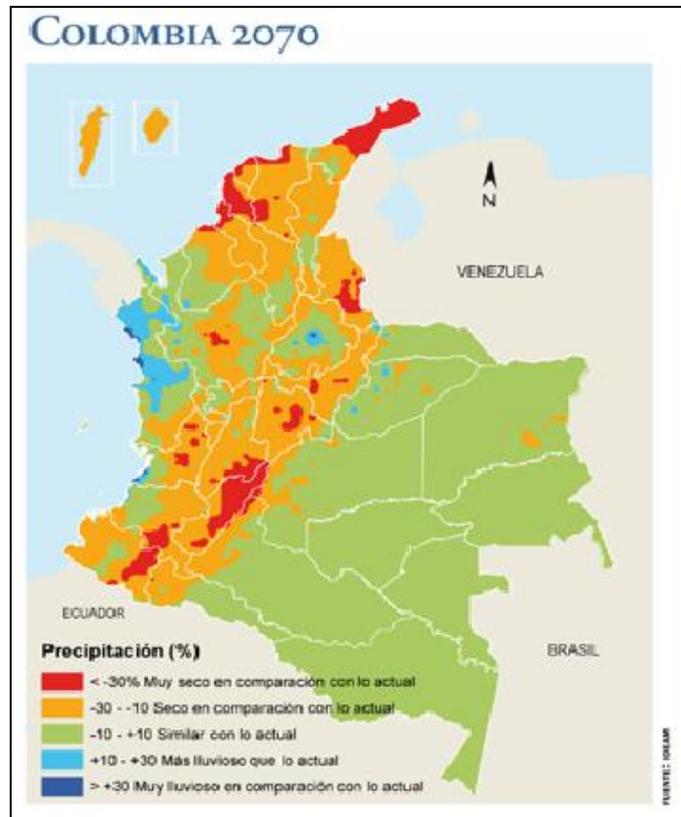


Figura 1 Estimación de las precipitaciones al año 2070 en Colombia. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ideam, & Embajada de Holanda, 2010)

La Figura 1 muestra una estimación de los porcentajes de precipitación en el año 2070 en Colombia, mostrando que habrá zonas en las que será muy seco con valores menores al 30%, y otras en donde será muy lluvioso con valores mayores a 30%. Los valores además varían entre muy seco o muy lluvioso con referencia a los datos actuales de precipitación en el país.

La Figura 1 muestra que la precipitación total va a disminuir en gran parte del territorio, aunque debido a la variabilidad climática la intensidad de la lluvia va a ser mayor en los episodios de tormenta. La precisión de estos pronósticos no es exacta, sin embargo permite tener una idea de cómo se van a presentar los procesos, por lo tanto, se podrían estimar las zonas críticas del país, permitiendo tomar medidas a corto, mediano y largo plazo respecto a las estructuras de control de inundaciones.

De igual manera en los últimos años se ha presenciado un cambio en los eventos atmosféricos (lluvias, tormentas) en el país, y un efecto negativo en la población y en la infraestructura. Sin embargo estos cambios pueden estar asociados al tiempo o al clima, estos dos conceptos son distintos ya que “como clima se

conocen las condiciones que van más allá de un par de días y predominan durante un periodo (una semana, un mes, un año o años). Así, podemos hablar de tiempo lluvioso cuando llueve en una tarde y de clima lluvioso para una zona donde son muy frecuentes las lluvias” (Corporación Autónoma Regional CAR, 2011)

En Colombia se presentan dos periodos de lluvias al año, el primero los meses de marzo, abril y mayo, y el segundo en los meses de agosto, septiembre y octubre. Sin embargo en ocasiones los periodos de lluvias se tornan diferentes en distintos años, es común observar que en un año llueve poco y que en otro llovió más de lo que se esperaba, este tipo de comportamientos se deben a ciertos fenómenos que pueden producirse al mismo tiempo en el que transcurre un cierto clima, un ejemplo son el fenómeno del Niño o la Niña que se dan en el océano pacifico y que afectan directamente el país.

“A la repetición (recurrencia) de estas anomalías año tras año es lo que se le denomina variabilidad climática” (Corporación Autónoma Regional CAR, 2011). Este tipo de fenómenos como el Niño y la Niña se dan en general en periodos de 3 a 5 años cada 3 a 6 años, sin embargo estos periodos se han venido alargando con el tiempo y se han hecho más recurrentes. Esto se puede observar en la Figura 2 donde los picos rojos representan la fase cálida o también conocido como el fenómeno Niño, por tanto los picos azules representan la fase fría o Niña.

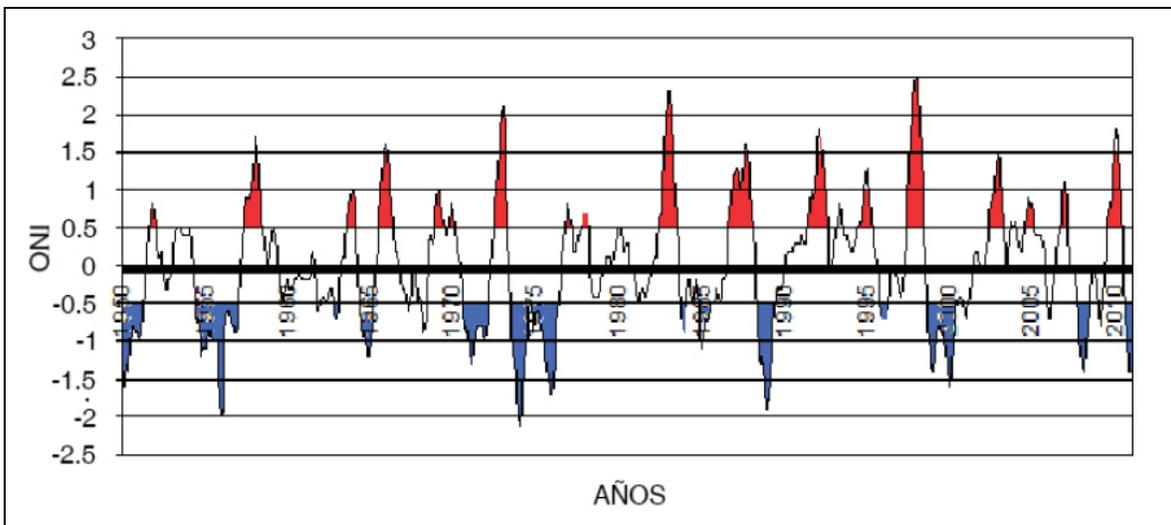


Figura 2 Comportamiento del índice oceánico en el eje vertical. 1950 – 2010 eje horizontal. Niño (picos rojos), Niña (picos azules). (Corporación Autónoma Regional CAR, 2011)

Como ya se había dicho anteriormente en Colombia se está presentando es una variabilidad climática ya que cada vez estos fenómenos duran más tiempo y son más seguidos, esto se puede ver en la Figura 2, puesto que en la mitad del siglo

XX se ve claramente que los fenómenos se daban cada mayor número de años y que sus picos no eran tan elevados como lo son los de los últimos 20 años. Este tipo de comportamiento se observa no solo en el Niño sino también en la Niña.

Es importante que se tenga en cuenta que aunque el fenómeno Niño y Niña se presentan de forma intercalada, solo uno de ellos está directamente relacionado con las inundaciones y grandes precipitaciones en el país. Este tipo de fenómenos son producidos por el calentamiento o el enfriamiento de las aguas del océano pacífico y las corrientes de vientos que llegan al país. Un año Niño se presenta en Colombia como sequías y un año Niña por el contrario trae consigo bastantes episodios de lluvia que además son más fuertes de lo que generalmente se espera, lo que provoca inundaciones.

Las inundaciones son procesos causados por un exceso de agua en la cuenca o una respuesta acelerada de la misma. Una definición común para inundación es la siguiente “En términos generales, una inundación es un flujo relativamente alto que excede la capacidad del canal” (Charlton, 2007), tal como se dice en la anterior cita en ocasiones se relaciona el término de inundación con la capacidad de agua que es capaz de llevar el canal y no con la dimensión de la precipitación.

Los procesos de inundación se han venido presentando en Colombia junto con las temporadas invernales del país, tal como se mostro anteriormente se pueden presentar temporadas en donde las estructuras que se tengan fallen, dejando personas damnificadas. Esto se presenta porque las estructuras no proporcionan el nivel de seguridad que se requiere.

Debido a esto se hace necesario definir criterios, que para este caso son de carácter hidráulico e hidrológico, en la estructura del jarillón y en los materiales del mismo. Adicionalmente se deben definir criterios geotécnicos para el diseño de jarillones como estructuras de contención de agua y manejo de inundaciones.

Las zonas de mayor riesgo en el país están protegidas con distintas estructuras que permiten el control de las inundaciones. En Colombia se presentó un fenómeno de inundaciones en 2010 – 2011, producto de la unión de la temporada invernal con el fenómeno de la Niña que tuvo niveles de precipitación altos.

Razón por la cual el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del Colombia (IDEAM), realizaron el estudio ZONAS DE AFECTACIÓN DE ACUERDO A REPORTE FINAL DE ÁREAS AFECTADAS POR INUNDACIÓN 2010-2011, que determinó las zonas afectadas por inundaciones en el país.

De acuerdo al estudio realizado el país está compuesto por 114.074.972 ha, de las cuales 1.888.312 ha son cuerpos de agua, correspondiente al 1.6%, y 10.508.251 ha son de zonas inundables periódicamente, que corresponden al 9.2%.

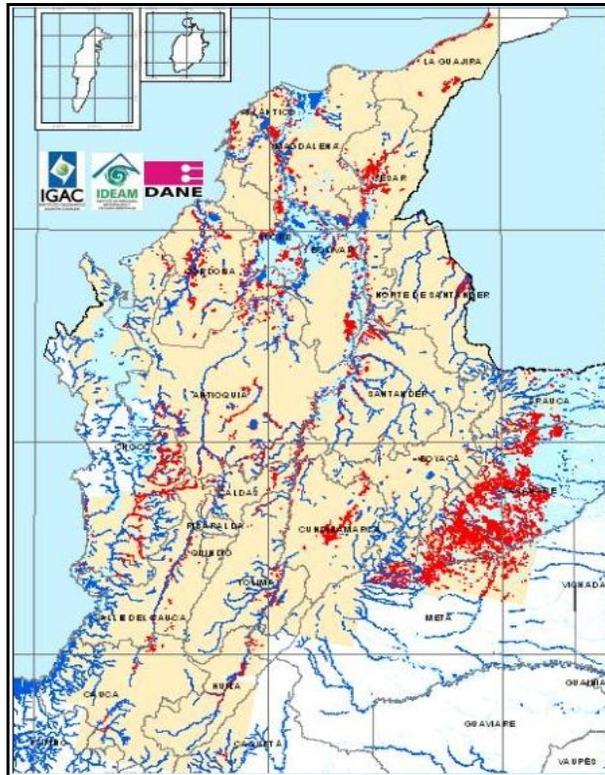


Figura 3 Mapa de afectación en Colombia. Zonas inundables (9.2%) (Rojo) – Cuerpos de agua (1.6%) (Azul)

La Figura 3 es un mapa de Colombia en el que se pueden ver las zonas afectadas por inundaciones y los cuerpos de agua en todo el territorio, las zonas que están en color azul son las que corresponden a los cuerpos de agua en el país, mientras que las rojas son las zonas de inundación.

Para determinar las zonas inundables en el país, se tuvo en cuenta 25 departamentos de Colombia, los cuales son: Antioquia, Arauca, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, Cesar, Chocó, Córdoba, Cundinamarca, Huila, La Guajira, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Sucre, Tolima, Valle del Cauca.

La zona que comprende los departamentos anteriormente mencionados corresponden a un 40.2% del territorio del país que son 45.922833 ha. Así mismo de ese 40.2% el 7.7% es de agua con un área de 3.523.400 ha. Del área que corresponde a agua se realizó una subdivisión entre cuerpos de agua (19% - 668.327 ha), zonas inundables periódicamente (34% - 1.212.965 ha) y zonas inundadas (46.6% - 1.642.108 ha).

DEPARTAMENTO				ZONA AFECTADA POR INUNDACIÓN							
NOMBRE	CODIGO DANE	Área (ha.)	MUNICIPIOS AFECTADOS	Área (ha.)	%	LÍNEA BASE (2001)				INUNDACIÓN 2010 - 2011	
						CUERPOS DE AGUA		ZONAS INUNDABLES PERIÓDICAMENTE			
						(ha.)	%	(ha.)	%	(ha.)	%
ANTIOQUIA	05	6.296.299	100	399.765	6,8	50.047	12,5	217.150	54,3	132.568	33,2
ARAUCA	81	2.383.135	4	16.507	1,5	257	1,6	732	4,4	15.519	94,0
ATLÁNTICO	08	331.159	21	75.394	24,4	20.210	26,8	11.100	14,7	44.083	58,5
BOLÍVAR	13	2.665.496	42	781.219	32,5	196.379	25,1	265.315	34,0	319.525	40,9
BOYACÁ	15	2.317.531	34	20.748	1,1	3.848	18,5	463	2,2	16.437	79,2
CALDAS	17	743.890	22	11.034	1,6	2.023	18,3	247	2,2	8.764	79,4
CAQUETÁ	18	9.010.823	3	248	0,0	0	0,0	0	0,0	248	100,0
CASANARE	85	4.434.139	17	323.561	11,5	416	0,1	107	0,0	323.037	99,8
CAUCA	19	3.125.130	16	2.338	0,1	2	0,1	68	2,9	2.267	97,0
CESAR	20	2.256.550	21	147.778	6,6	38.618	26,1	37.879	25,6	71.281	48,2
CHOCÓ	27	4.824.344	22	408.537	11,6	29.982	7,3	348.692	85,4	29.864	7,3
CÓRDOBA	23	2.499.858	28	236.235	9,5	33.651	14,2	59.893	25,4	142.691	60,4
CUNDINAMARCA	25	2.398.439	57	43.587	2,3	9.934	22,8	3.500	8,0	30.153	69,2
HUILA	41	1.813.533	18	6.410	0,5	324	5,1	0	0,0	6.086	94,9
LA GUAJIRA	44	2.061.936	9	16.257	1,4	0	0,0	0	0,0	16.257	100,0
MAGDALENA	47	2.314.438	28	391.544	16,9	159.288	40,7	97.333	24,9	134.924	34,5
META	50	8.555.025	12	106.646	4,8	6.826	6,4	2.921	2,7	96.899	90,9
NARIÑO	52	3.149.751	2	17	0,0	0	0,0	0	0,0	17	100,0
NORTE DE SANTANDER	54	2.182.705	9	28.608	1,4	1.836	6,4	369	1,3	26.403	92,3
QUINDÍO	63	193.217	4	176	0,1	0	0,0	0	0,0	176	100,0
RISARALDA	66	356.035	8	1.711	0,5	0	0,0	0	0,0	1.711	100,0
SANTANDER	68	3.054.326	23	169.573	6,1	26.122	15,4	43.487	25,6	99.964	59,0
SUCRE	70	1.071.860	15	302.710	36,8	82.368	27,2	122.401	40,4	97.940	32,4
TOLIMA	73	2.415.020	29	18.938	0,8	5.784	30,5	36	0,2	13.118	69,3
VALLE DEL CAUCA	76	2076805	31	13.859	0,7	412	3,0	1.272	9,2	12.176	87,9
TOTALES		72.531.447	575	3.523.400	7,7	668.327	19,0	1.212.965	34,4	1.642.108	46,6

Figura 4 Zonas afectadas por inundaciones en 2001 y periodo 2010 – 2011.

En la Figura 4 se muestra el nombre del departamento, el código del DANE, el área del departamento en hectáreas (ha) y los municipios afectados por inundaciones. Adicionalmente tiene información de la zona afectada por inundación. A manera de ejemplo el departamento de Antioquia tiene 399.765 ha afectadas por inundación, de las cuales el 12% corresponde a los cuerpos de agua y el 54.3% a las zonas que se inundan normalmente de manera periódica, este último porcentaje es un dato tomado de 2001. Finalmente las últimas dos columnas corresponden al porcentaje de inundación adicional que se afectó y que no se contemplaba dentro de las áreas normalmente inundables.

Departamento	% Afectado	Área Inundación (Ha)	Área Agropecuaria en Zona de Inundación (Ha)	Área en Otros Usos en Zona de Inundación (Ha)
ANTIOQUIA	6,8	132.567	87.666	44.901
ARAUCA	1,5	15.519	12.875	2.644
ATLÁNTICO	24,4	44.083	38.700	5.382
BOLÍVAR	32,5	319.526	239.274	80.252
BOYACÁ	1,1	16.437	13.794	2.643
CALDAS	1,6	8.764	7.732	1.032
CAQUETÁ	0,0	248	234	13
CASANARE	11,5	323.037	317.160	5.877
CAUCA	0,1	2.267	2.020	247
CESAR	6,6	71.281	59.051	12.231
CHOCÓ	11,6	29.864	6.316	23.548
CÓRDOBA	9,5	142.691	133.100	9.591
CUNDINAMARCA	2,3	30.154	25.341	4.812
HUILA	0,5	6.086	5.384	701
LA GUAJIRA	1,4	16.257	1.261	14.996
MAGDALENA	16,9	134.924	103.185	31.739
META	4,8	96.899	89.918	6.982
NARIÑO	0,0	17	14	3
NORTE DE SANTANDER	1,4	26.403	24.663	1.740
QUINDÍO	0,1	176	147	29
RISARALDA	0,5	1.711	608	1.103
SANTANDER	6,1	99.964	73.256	26.708
SUCRE	36,8	97.940	82.933	15.007
TOLIMA	0,8	13.118	12.293	825
VALLE DEL CAUCA	0,7	12.176	9.937	2.239
Total general		1.642.109	1.346.862	295.245

Figura 5 Área afectada por la inundación de acuerdo con el uso del suelo.

En la Figura 5 se encuentran los departamentos con el área afectada por la inundación y el porcentaje correspondiente. Así mismo en la tabla hay una clasificación del área correspondiente a zonas agropecuarias y otros tipos de uso del suelo. Con los datos mostrados anteriormente y por medio de censos se encontró que el total de personas damnificadas fue de 2.350.000. Así mismo las unidades afectadas por la inundación son las siguientes:

- Viviendas: 568.438
- Fincas: 324.058
- Locales comerciales: 8.902
- Fabricas: 1.309
- Lotes: 35.577

Este tipo de investigaciones permite que se puedan establecer zonas en donde se hace evidente la necesidad de estructuras que prevengan las inundaciones. Departamentos como Caquetá, Quindío, Risaralda, Nariño y La Guajira sufrieron una inundación considerable por el periodo invernal de 2010 – 2011.

Existen principalmente dos formas de controlar las inundaciones provocadas de los ríos, una de ellas es la gestión de cuencas que consiste en realizar cambios que afecten directamente la forma en que transcurre el agua, ya sea por medio de presas, gestionando aspectos importantes que ya estén en el terreno como la vegetación, o realizando el dragado del canal del río. La otra forma de controlar las inundaciones es construyendo estructuras que funcionan como barreras al momento de crecientes como los jarillones.

ALCANCE

Si bien para el desarrollo del presente documento se realiza una identificación de los mecanismos de falla de carácter geotécnico, la influencia del suelo en el flujo de agua a través de los diferentes tipos de jarillón se evalúa mediante el análisis de tubificación, adicionalmente se determina la influencia de las propiedades del suelo y del flujo de agua en la estabilidad de los diferentes tipos de jarillón asociados a su factor de seguridad frente al deslizamiento.

DESCRIPCION DEL DOCUMENTO

El desarrollo del documento a partir de este punto corresponde a un marco teórico enfocado en definir estrategias para el control de inundaciones para contextualizar al lector, por otra parte contiene una explicación detallada de los cálculos que realizan los programas SLIDE 5.0 e HYDRUS 2.0 que son la base conceptual para la determinación de factores de seguridad contra la tubificación y el deslizamiento.

Para la identificación de los modos de falla de carácter geotécnico se realizó una investigación de diversos documentos, si bien se desarrolla cada tipo de falla encontrado, este capítulo se centra como bien se ha mencionado en los fenómenos asociados a la tubificación y deslizamiento del jarillón.

Una vez identificados los modos de falla, se definen los tipos de jarillón y variables de diseño de una manera conceptual, para así construir posteriormente una matriz de jarillones con variables de diseño como lo son filtros, núcleos, geometría (pendientes) y recubrimientos, con la cual se determinó la influencia de las propiedades del suelo en el flujo de agua a través de la modelación en HYDRUS

2.0 y la influencia de las propiedades del suelo junto con las del flujo en la estabilidad por medio de SLIDE 5.0.

El análisis de resultados muestra en detalle los efectos de los diferentes elementos evaluados en lo que corresponde a fallas por tubificación y estabilidad, por último se construye una cartilla de diseño geotécnico con la cual se da cumplimiento al objetivo general de la tesis además de una serie de conclusiones que aglutinan la evaluación de resultados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INUNDACIONES

2.1.1. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES

Existen principalmente dos formas de controlar las inundaciones provocadas por los ríos, una de ellas es la gestión de cuencas que consiste en realizar cambios que afecten directamente la forma en que transcurre el agua, ya sea por medio de presas, gestionando aspectos importantes que ya estén en el terreno como la vegetación, o realizando el dragado del canal del río. La otra forma de controlar las inundaciones es construyendo estructuras que funcionan como barreras al momento de crecientes como los jarillones.

Aunque se dividen en dos grupos en general se tienen cuatro formas de controlar las inundaciones, que son: gestión de cuencas, canales de alivio, dragado, estructuras de contención, explicados a continuación.

2.1.2. GESTIÓN DE CUENCAS

Las cuencas presentan una problemática debido al mal uso que se les da, este problema desemboca en dos ítems, el primero, el cambio de la permeabilidad del suelo que depende de la porosidad del material, es decir que es un factor que depende del tipo de suelo que se tenga en la zona, además de la presión a la que esté sometido el mismo, es decir un cambio en la escorrentía superficial lo cual lleva a la segunda problemática que es la erosión del suelo (Lloret, 2000).

El cambio en la permeabilidad del suelo desde el enfoque de gestión de cuencas se produce por un cambio en las propiedades del terreno, ya sea por actividad agrícola, ganadera, comercial o por la ejecución de obras civiles; El cambio en las propiedades del suelo usualmente reduce la permeabilidad del suelo, aumentando la escorrentía superficial haciendo que los tiempos de retención de la cuenca varíen y por lo tanto los niveles de caudales aumenten. Debido a eso se habla de manejar un adecuado balance hídrico el cual permite que en periodos de lluvia haya retención por la capa vegetal y en los periodos secos se pueda usar este volumen

acumulado, dicho esto es indispensable mantener una capa vegetal de acuerdo a la zona donde se trabaje y en caso de no ser posible intentar mantener los tiempos de concentración y descarga. (Lloret, 2000)

Estos tiempos de retención y de descarga dependen a su vez de muchos factores y se pueden controlar de varias maneras también, algunas definiciones comunes para tiempo de concentración son: “En hidrología, el tiempo de concentración se define como el tiempo que pasa desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía directa. Representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa. Por lo tanto, el tiempo de concentración sería el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que con una intensidad de escorrentía constante se alcance el caudal máximo.” (Sanz, 2005)

“Es un valor importante en el estudio de crecientes; se considera como una constante de la cuenca y depende de las características fisiográficas de la vertiente, de la cobertura vegetal y del uso de la tierra”. (Silva, 1998)

De igual manera estos tiempos pueden alterarse de forma que se prevengan inundaciones y se dé un mejor manejo a la cuenca, algunos de los mecanismos que se tienen para realizar ese proceso son:

- Tomar como medida del tiempo de concentración el tiempo de ascenso promedio de una serie de hidrogramas observados en la estación de salida.
- Usar trazadores como sales, colorantes, radioisótopos o confeti para medir sobre terreno los tiempos de viaje.
- Formulas empíricas como: $Tc = 0.0663 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$ para cuencas pequeñas y de pendientes fuertes, donde tc es el tiempo de concentración, L la longitud de la cuenca en kilómetros y S la pendiente del cauce.
- También se suelen usar nomogramas para su cálculo.

Por otro lado la erosión del suelo deteriora la calidad del mismo, así como la del agua ya que se encontraran altos volúmenes de sedimentos en las corrientes de agua. Esta erosión está en función de las pendientes del

terreno y de la velocidad de flujo de la escorrentía, se encontrarán también suelos altamente erosionables en condiciones de escasa capa vegetal y altas pendientes.

¿Pero cómo estos problemas se ven reflejados hacia el diseño de estructuras de retención de agua?, cuando se habla de una variación de la escorrentía se hace a la vez de una variación en los tiempos de concentración, por lo tanto se encontrarán caudales pico mayores ante un evento similar que ocurriera años atrás, por lo tanto al tener mayores volúmenes de agua en los mismos periodos se hace necesario evaluar las estructuras existentes y tener estas consideraciones en cuenta al diseñar nuevas. Se pueden generar problemas de socavación en el río debido a los altos volúmenes de caudales líquidos.

Por lo tanto se podría decir que el primer mecanismo de control es el de gestión en la cuenca, con una adecuada planeación y uso de esta se pueden evitar procesos que lleven a inundaciones o deterioro de la misma. De esta forma los diseños de estructuras de retención pueden arrojar valores que se ven reflejados en el gasto económico que estos conllevan.

Gestionar una cuenca consiste en cambiar de manera drástica las condiciones iniciales de los ríos o cuencas en general. El proceso de definir si se debe o no gestionar una cuenca radica básicamente en el estudio previo que se haga en las comunidades que están en riesgo como en las que no lo están, pero influyen en el desarrollo de un posible evento de inundación. De la misma forma debido a las características propias de la cuenca como vegetación, pendiente, tipo de suelo, y a las dadas por las comunidades que la habitan, cada proceso de gestionar una cuenca es distinto y se debe trabajar de manera independiente.

Los aspectos básicos a tener en cuenta para la gestión de una cuenca están enfocados al estudio previo y al manejo que se va a dar luego de realizar los cambios. Dicho así estos aspectos son recolección de información, costos, auto apoyo por parte de la comunidad, capacitación y educación, y motivación. (Lloret, 2000)

Cada una de las etapas nombradas anteriormente cumple una función y por tanto llevar a cabo cada una de ellas es necesario para el buen desarrollo del plan. En general el gestionar una cuenca está dirigido a realizar proyectos de carácter hidráulico en donde no solo se obtengan beneficios que ayuden a controlar las inundaciones sino también a generar ganancias económicas para la comunidad.

2.1.3. CANALES DE ALIVIO

Otra de las alternativas que existen y que son útiles para la prevención de inundaciones son los canales de alivio que se construyen o se adecuan en los ríos o quebradas ya existentes, este tipo de soluciones permite que se tenga un mayor control sobre la cantidad de agua que transita, su velocidad y la influencia de estos factores en la respuesta del fluido sobre la infraestructura cercana o el mismo canal o río.

Este tipo de soluciones son importantes porque pueden reducir los daños tanto en vidas humanas como en infraestructura puesto que el monitoreo puede generar alarmas con anticipación.

Estos canales de alivio permiten que se pueda controlar el exceso de volumen de agua en el canal o río, las estructuras deben poder eliminar todo el exceso y ser capaz de distribuirlo de nuevo en quebradas, ríos o canales de drenaje adyacentes sin que se presenten riesgos para las comunidades que estén cerca.

Los canales de alivio pueden ser de dos tipos diferentes. “Uno consiste en un vertedero de labio fijo, enrasado con el nivel teórico de la lamina, paralelo o poco divergente del eje del canal” (Montañes, 2011), este tipo de canal de alivio funciona sin que se necesiten operarios o equipos electrónicos.

El funcionamiento de este tipo de aliviaderos depende de la cota a la que se coloque el vertedero, está a su vez debe ser calculada teniendo en cuenta los registros de precipitación y los caudales pico de la zona. De esa forma cuando el nivel del río este por encima de la cota a la cual fue puesto el vertedero, el agua ira a una cámara donde se busca disipar el exceso de energía y luego se conducirá por el canal de alivio correspondiente hasta que se haya pasado la zona de posible inundación. Finalmente al final del canal de alivio el agua volverá al río de manera controlada.

El otro tipo de aliviaderos son los de sifón de los que se conoce lo siguiente: “Constan de un tubo doblemente acodado que está colocado en el lateral del canal, a una altura tal que cuando el nivel de agua supera un valor prefijado, el sifón se ceba y vierte agua a plena sección, aprovechando el desnivel desde la entrada y la salida más baja” (Montañes, 2011). Este tipo de aliviaderos permite que se prevengan inundaciones aunque su

instalación y su mantenimiento son más costosos que los aliviaderos de labio fijo, además de esto, este tipo de aliviaderos requiere que se disponga de personal para que revise el adecuado funcionamiento del mismo con una periodicidad de tiempo.

Para elegir el lugar en donde se va a colocar el aliviadero se deben hacer estudios de la zona en donde se puedan definir ríos o canales más cercanos al problema para evacuar el exceso de agua que causa el problema cuando la precipitación es máxima, para esto puede que no se disponga de un cauce cercano y que sea necesario la construcción de un canal.

Para el diseño de un nuevo canal que ayude a evacuar el agua puede tomarse como caudal pico el mayor de los dos, entre el canal de alivio y el exceso de agua en el principal. “Podría pensarse en la conveniencia de dimensionar los aliviaderos con el caudal suma de ambos, pero en nuestra opinión sería un costo excesivo, ya que la probabilidad de coincidencia de ambas situaciones es pequeña” (Montañes, 2011), como se había dicho anteriormente con tomar el mayor de los dos es suficiente si se tiene en cuenta un factor de seguridad.

2.1.4. DRAGADO

“Se denomina dragado a la excavación, carga y transporte de materiales sólidos que constituyen o se depositan en los fondos marinos, fluviales o en áreas cubiertas por las aguas. Al ser una actividad subacuática es necesario el uso de maquinaria especial que recibe el nombre de draga o tren.” (Chaprapia, 2004)

Las obras de dragado pueden clasificarse en tres grupos:

- **Según su finalidad:**

Dragados de primer establecimiento son aquellos que se realizan inicialmente para la construcción o adecuación de un cuerpo de agua, por ejemplo, la construcción de un puerto o la adecuación de un río o canal para su navegación.

Dragados de mejora que son usados para aumentar los niveles iniciales de un dragado de establecimiento.

Dragados de conservación o mantenimiento, se hacen sobre un dragado inicial el cual ha sufrido depósitos de sedimentos debido al flujo natural del cuerpo de agua.

- **Según su metodología:**

Dragado de acción mecánica, se hace por contacto directo entre el medio excavador y el medio a excavar. Dragado por succión, se clasifica en succión hidráulica o neumática las cuales consisten en extraer el material por medio de bombas o compresores de aire, cuando se presentan materiales con altas densidades se suele usar una cortadora en la draga que realiza un primer proceso para facilitar la succión.

- **Según su ubicación:**

- Dragado en mar abierto.
- Dragado en dársenas (puertos en aguas navegables).
- Dragado en ríos y canales.
- Dragado en barras.

2.1.5. ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN

- **Paredes de concreto**

Las paredes de hormigón tal como su nombre lo indica son paredes hechas en concreto que actúan bajo su propio peso. Una definición que se usa bastante es “Un muro de gravedad se compone de hormigón en masa, generalmente sin refuerzo” (USACE, 1989), donde se aclara que no lleva ningún tipo de refuerzo y todo el trabajo realizado por la estructura se basa en la gravedad. Aunque este tipo de paredes funcionan muy bien para situaciones donde no se tienen caudales muy grandes para situaciones con más riesgo se necesita de otro tipo de estructura.

- **Muros T reforzados**

Los muros en T son estructuras en concreto en forma de “T” de manera invertida, van reforzados en la parte inferior y superior. Están diseñados

para resistir fuerzas y momentos que se puedan producir, son las estructuras más económicas para solucionar problemas de inundación y por tal razón se usan bastante, sin embargo no son muy resistentes en condiciones donde el caudal es muy elevado. Un ejemplo de un muro en T reforzado en la Figura 6

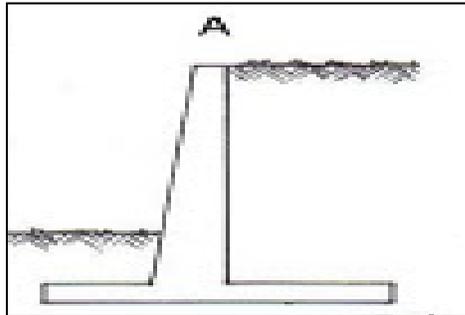


Figura 6 - Muro T reforzado

2.2. SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Los suelos saturados y suelos secos, constituyen un sistema de dos fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran las tres fases en el suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire, gráficamente se observa en la Figura 7 (Meza, 2012).

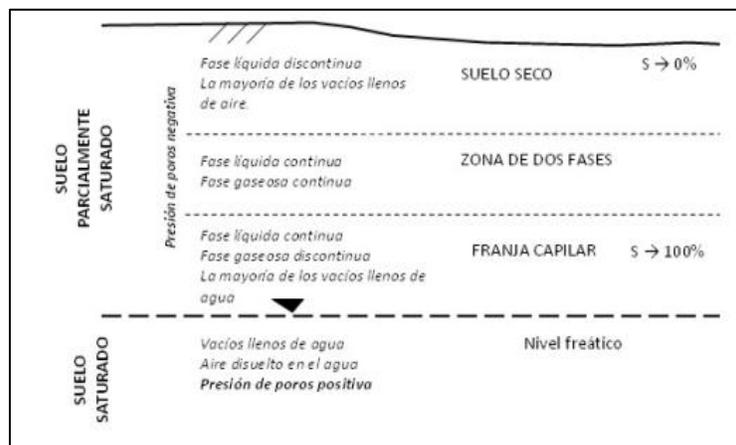


Figura 7 - Fases del suelo. (Fredlund 2000)

La separación entre los suelos secos y los suelos saturados está directamente relacionada con el nivel freático, aquella fracción que se encuentra por debajo de dicho nivel es considerada como un suelo saturado $S \rightarrow 100\%$ presentado

presiones de poros (U_w) mayores a 0, por otra parte aquella porción que se ubica encima del nivel freático puede estar seca $S \rightarrow 0\%$ o parcialmente saturada $20\% < S < 80\%$ demostrando presiones de poros negativas debido a la diferencia entre la presión de poros y la presión del aire en los poros (U_a).

Los suelos parcialmente saturados son un elemento fundamentales para la modelación de jarillón ya que el cuerpo del jarillón o material de préstamo se encuentra en humedades inferiores a la humedad de saturación, esta condición se presenta durante la constitución del jarillón y normalmente durante toda su vida. Por lo tanto se hace relevante asignar este capítulo al presente documento, ya que es una de las líneas base para el desarrollo de este.

2.2.1. PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Capilaridad:

La capilaridad es un fenómeno físico, característico de los líquidos que se estudia con un “tubo capilar” introducido en un recipiente que contiene el líquido. La capilaridad es el fenómeno que permite que el líquido ascienda dentro del tubo, en contra de la gravedad hasta una altura capilar (h_c) que depende de la tensión superficial (T_s), la fuerza de adhesión (ángulo de contacto α) y el diámetro del tubo capilar (d). La tensión superficial es una fuerza que se genera por el desbalance de las fuerzas intermoleculares del líquido en la interfaz líquido-aire. (Meza, 2012)

$$h_c = \frac{4 * T_s * \text{Cos}\alpha}{\rho * d * g}$$

Ecuación 1 Altura capilar h_c .

Succión:

(Ridley. A. M., 1997) Define la saturación como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación, dicha energía tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial (Ψ_m) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica π , por lo tanto la succión total es:

$$\Psi = \Psi_m + \pi$$

Ecuación 2 Succión del suelo.

Curva de retención de humedad del suelo:

Para suelos parcialmente saturados la presión de poros es función de la humedad del suelo, dicho contenido de humedad es una relación volumétrica entre el volumen total del suelo y el volumen de agua que se encuentra en el mismo. La relación entre la presión de poros y la humedad del suelo se denomina curva de retención de humedad del suelo o curva característica del suelo – agua y se representa de manera gráfica. Lu y Likos (2004) identifica los siguientes elementos en la curva:

- a. La curva de retención presenta histéresis entre los procesos de humedecimiento y secado.
- b. El contenido saturado de agua (θ_s) corresponde al estado en el cual todos los vacíos en la matriz de suelo están llenos de agua. Usualmente, se mide sobre la curva de secado.
- c. El valor de entrada de aire, también denominado “presión de entrada de aire” o “presión de burbujeo”, corresponde al valor de succión (sobre la curva de secado) a partir del cual el aire comienza a ingresar en los poros más grandes del suelo y se inicia el proceso de desecación.
- d. El contenido residual de agua (θ_r) corresponde a la situación en la cual el agua reside en los poros como meniscos aislados, requiriéndose grandes incrementos de succión para remover agua adicional del suelo.

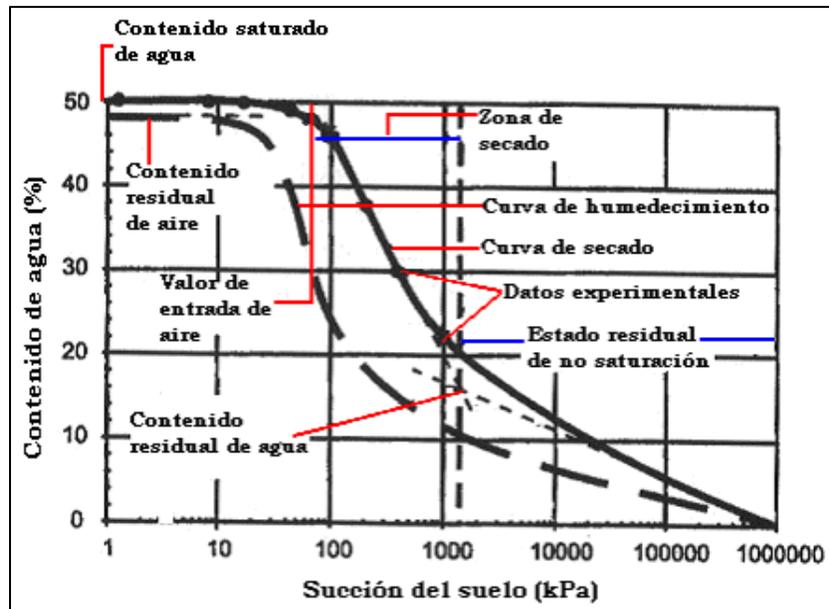


Figura 8 - Curva de retención de humedad del suelo. (Vasquez 2003)

Zhou y Yu (2005) resumen el efecto de cuatro elementos que afectan la curva de retención de humedad de los suelos, de la siguiente forma.

- Efecto de la relación de vacíos inicial: a menor relación de vacíos inicial se tiene un valor de entrada de aire mayor y un grado de saturación residual mayor.
- Efecto del contenido inicial de agua: la curva de retención es más pendiente a mayor humedad inicial. El valor de entrada de aire se incrementa con el contenido de aire inicial.
- Efecto del estado de esfuerzos: los suelos sujetos a altas presiones presentan grados de saturación mayores para succiones por encima del valor de entrada de aire. A medida que se incrementa la succión, la humedad se reduce con tasas diferentes. A mayor carga aplicada, la tasa de reducción de la humedad es menor. El punto en el cual la humedad comienza a reducirse de forma significativa indica el valor de entrada de aire.
- Efecto de los valores elevados de succión: la curva de retención es similar a altas succiones sin importar las condiciones iniciales de humedad o el historial de esfuerzos.

Si bien la curva de retención de humedad del suelo es una característica propia de los mismos, existen diferentes metodologías con base en cálculos experimentales y variables asociadas a la distribución del tamaño de poros. (Lu & Likos, 2004) presentan algunos de estos modelos que se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 1 Metodologías para el cálculo de la curva de retención de humedad del suelo. (Vasquez, 2003)

Nombre del modelo	Modelo	Distribución del tamaño de los poros (ψ)
Gardner (1956).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{B}{\mu} - D$	Tamaño de poros constante.
Función lineal de la humedad (Fredlund & Xing, 1994).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = B - D\mu$	A/μ^2
Brooks & Corey (1964).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = B - D\mu^n$	$A/\mu^{(m+1)}$
Brutsaert (1966).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{1}{1 + (\mu/a)^n}$	$\frac{[n(\mu/a)^{(n-1)}/a]}{[1 + (\mu/a)^n]^2}$
Distribución normal.	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \psi}{\sqrt{2s}} \right)$	Distribución normal.

Nombre del modelo	Modelo	Distribución del tamaño de los poros (ψ)
Van Genuchten (1980).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{1}{[1 + (a\mu)^n]^m}$	$\frac{mna(a\mu)^{(n-1)}}{[1 + (a\mu)^n]^{(m+1)}}$
McKee & Bumb (1987) (Boltzman)	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = e^{(-\mu/B)}$	Distribución exponencial.
Fredlund & Xing (1994).	$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + (\mu/a)^n \right] \right\}^m}$	$\frac{mn(\mu/a)^{(n-1)}}{a \left[e + (\mu/a)^n \right] \left\{ \ln \left[e + (\mu/a)^n \right] \right\}^{(m+1)}}$

En el cuadro anterior θ_s y θ_r son los contenidos volumétricos de agua saturado y residual, μ es la succión para el contenido volumétrico de agua θ , S_e es el grado efectivo de saturación, “erfc” es una función de error y e es el número de Euler. Los símbolos no definidos corresponden a variables que se determinan con el ajuste matemático de los datos.

El modelo de curva seleccionada para el desarrollo de las simulaciones hidráulicas en la presente investigación corresponde al propuesto por Van Genuchten (1980). En la Tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos para esta función con base a cinco clases texturales de suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)

Tabla 2 Parámetros hidráulicos para el modelo de Van Genuchten. (Vasquez, 2003)

Clase textural	θ_r (L^3L^{-3})	θ_s (L^3L^{-3})	α (1/cm.)	n (-)	k_{sat} (cm./día)
Arena	0.045	0.430	0.145	2.68	712.8
Limo	0.034	0.460	0.016	1.37	6.00
Arcilla arenosa	0.100	0.380	0.027	1.23	2.88
Arcilla limosa	0.070	0.360	0.005	1.09	0.48
Arcilla	0.068	0.380	0.008	1.09	4.80

Conductividad hidráulica

El análisis del flujo de la fase fluida del suelo parcialmente saturado requiere una ley que relacione la tasa de flujo con el potencial de flujo. El potencial de flujo de agua define su energía (capacidad para hacer un trabajo) con referencia a un datum. La energía total se expresa por unidad de peso y se denomina carga hidráulica de acuerdo con la ecuación de Bernoulli para flujo permanente – steady state – de fluidos incompresibles y no viscosos (Harr, 1991)

$$h_T = z + \frac{\mu_w}{\rho_w g} + \frac{v_w^2}{2g}$$

Ecuación 3 Carga hidráulica en el suelo.

Donde:

- h_w : carga hidráulica o carga total.
- z : carga gravitacional: elevación considerando el eje z en la dirección de la gravedad.
- μ_w : presión del agua de los poros.
- ρ_w : densidad del agua.
- g : aceleración de la gravedad.
- $\mu_w/\rho_w g$: carga de presión.
- v_w : velocidad de filtración en la dirección z .
- $v_w^2 / 2g$: carga de velocidad

En suelos saturados, la ley de Darcy postula que el flujo de agua a través de una masa de suelo es proporcional al gradiente de carga hidráulica, es decir, a la pérdida unitaria de energía debida a la resistencia viscosa dentro de los poros del suelo:

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial z}$$

Ecuación 4 Velocidad aparente de flujo del agua.

Donde:

- v_w : velocidad aparente de flujo del agua.
 k_w : conductividad hidráulica: coeficiente de permeabilidad con respecto a la fase agua.
 $\partial h_w / \partial z$: i_{wz} : gradiente de la carga hidráulica en la dirección z.

El signo negativo indica que el agua fluye en la dirección de la carga hidráulica decreciente. La ley de Darcy no describe las condiciones dentro de cada poro individual, pues sólo representa el equivalente estadístico macroscópico de las ecuaciones de movimiento de Navier – Stokes para el flujo viscoso de agua, y su validez depende de un número de Reynolds pequeño – flujo laminar.

La conductividad hidráulica, k_w , es relativamente constante para suelos saturados (k_{sat}) pero varía de forma importante con la succión en suelos parcialmente saturados como se ilustra en la Figura 9

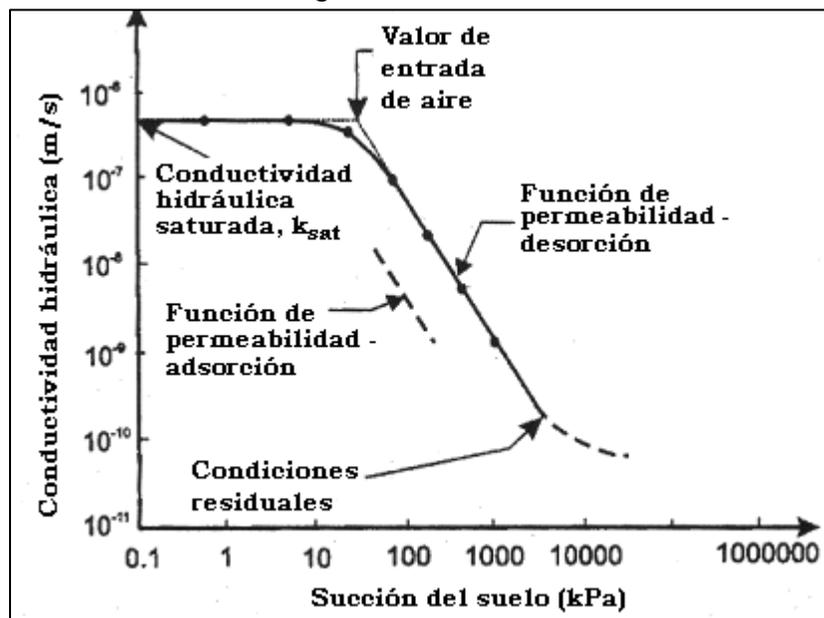


Figura 9 - Curva de conductividad hidráulica, succión del suelo. (Vasquez 2003)

2.2.2. ASPECTOS TÉCNICOS MODELO HYDRUS 2.0

(División de recursos hídricos 2002) Partiendo de que los análisis son realizados en dos dimensiones, es la ecuación de Richard's la utilizada por HYDRUS para calcular el flujo en el medio poroso parcialmente saturado:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla(K(\Psi) * \nabla \Psi) + \frac{\partial k}{\partial z} - s$$

Ecuación 5 Ecuación de Richard's para calcular flujo en medios porosos parcialmente saturados.

θ = Contenido Volumétrico de Agua

Ψ = Succión (m)

K = Conductividad Hidráulica (m/d)

S = Volumen de agua removido por la capa vegetal por unidad de tiempo (1/d)

t = tiempo (d)

Para resolver la ecuación de Richard's es necesario conocer la curva de humedad característica del suelo. HYDRUS 2-D describe las propiedades hidráulicas no saturadas del suelo mediante los modelos de van Genuchten (1980).

2.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Existen varias metodologías para el análisis de estabilidad de taludes, para el efecto del presente trabajo de grado, la estabilidad de los jarillones se realizara en el software SLIDE 5.0 el cual trabaja con equilibrio límite. Además de usar las metodologías de Bishop simplificado y GLE/Morgenstern- Price y condiciones de deformación plana.

Para los materiales que tienen la componente de la fuerza friccional del suelo y la componente de cohesión, los mecanismos de falla son rotacionales en el talud. Ese caso en particular es el que es trabajado en esta sección debido a los materiales que se usaron en las modelaciones de estabilidad, los cuales tienen las características anteriormente mencionadas.

Método de las tajadas:

El método de las tajadas consiste en asumir una superficie de falla rotacional en el talud, y luego dividir esta misma en tajadas verticales en un número conveniente. El número de tajadas en las que se puede dividir depende de la cantidad de materiales que se encuentren en el terreno, generalmente se busca que no haya tajadas en donde en la parte inferior se tenga más de un material para efectos de cálculo.

El método realiza un análisis de fuerzas para cada una de las tajadas del método, tal como se muestra en la siguiente imagen, para la solución se asume que las fuerzas L_1 y L_2 que son generadas por la fricción entre tajada y tajada son iguales y por tanto se anulan. La fuerza normal (N) es perpendicular a la superficie de falla, W es la componente del peso de la tajada y T es la componente tangencial del suelo que incluye la fuerza friccional y la producida por la cohesión del material. (Smith & Smith, 1998)

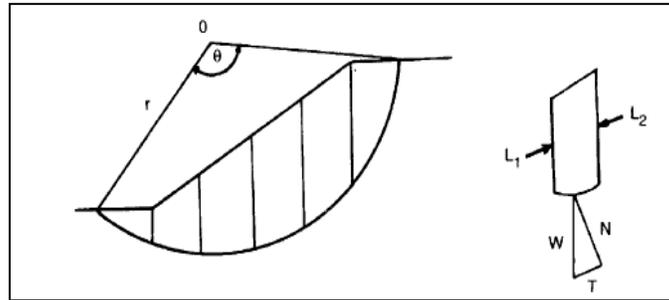


Figura 10 - Método de las tajadas, Diagrama de fuerzas. (Smith and Smith 1998)

El método sugiere una sumatoria de momentos en O de las fuerzas ya mencionadas para cada tajada, haciendo una sumatoria de todas las tajadas que se tengan, los momentos estabilizantes y desestabilizantes son:

Momento desestabilizante: $r\sum T$

Momento estabilizante: $r(c'r\theta + \sum N \tan(\phi'))$

La definición del factor de seguridad (FS) es la relación entre los momentos resistentes y los momentos actuantes, por lo cual el factor de seguridad del talud está dado por:

Ecuación 6 Factor de seguridad. (Smith & Smith, 1998)

$$FS = \frac{(c'r\theta + \sum N \tan(\phi'))}{\sum T}$$

En donde $r\theta = L$, y en donde L es la longitud de la superficie de falla a lo largo del talud.

Bishop simplificado:

El método de bishop simplificado es un análisis en esfuerzos efectivos, con las fuerzas actuando verticalmente. En la Figura 11 se encuentran las fuerzas que son tenidas en cuenta en el análisis. (Smith & Smith, 1998)

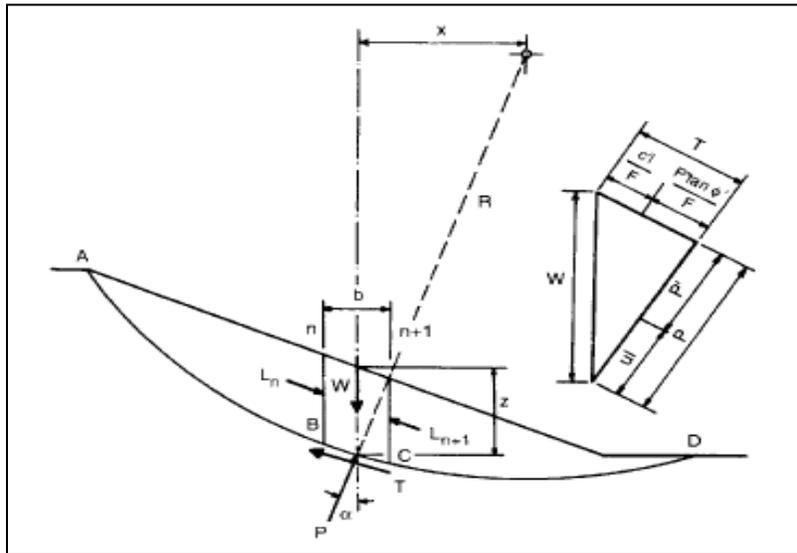


Figura 11 - Análisis de esfuerzos efectivos. Fuerzas actuando verticalmente. (Smith and Smith 1998)

Las fuerzas L_n y L_{n+1} se consideran lo suficientemente pequeñas como para despreciarlas, W es el peso de la tajada que se esté analizando, P es la fuerza normal que actúa en la base de la tajada, T es la fuerza cortante que actúa en la base del deslizamiento. El ángulo α es el que se forma entre la fuerza normal P y el eje vertical. (Smith & Smith, 1998)

En términos de esfuerzos efectivos la fuerza cortante para ϕ' movilizado (es decir en la falla) está dada por:

Ecuación 7 Fuerza cortante. (Smith & Smith, 1998)

$$\tau = \frac{c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'}{F}$$

Haciendo la sumatoria de momentos, en donde los momentos resistentes son iguales a los momentos actuantes (condición de falla) se obtiene la siguiente expresión: (Smith & Smith, 1998)

$$\sum W_x = \sum TR = \sum \tau l R$$

$$F = \frac{R}{\sum W_x} * \sum (c'l + (P - ul) \tan \varphi')$$

Debido a que se ignoran los efectos de L_n y L_{n+1} , la única fuerza vertical que actúa es W y se puede definir la fuerza normal P como $P = W \cos \alpha$

$$F = \frac{R}{\sum W_x} * \sum (c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \varphi')$$

$$x = R \sin \alpha$$

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} * \sum (c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \varphi')$$

Expresando u en términos de presión de poros, r_u :

$$u = r_u \gamma_z = r_u \frac{W}{b}$$

Ecuación 8 Factor de seguridad. (Smith & Smith, 1998)

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} * \sum (c'l + (W \cos \alpha - r_u \sec \alpha) \tan \varphi')$$

GLE Morgenstern-Price:

El método de Morgenstern-Price es un método de equilibrio límite, en el cual se deben satisfacer las fuerzas y los momentos que actúan en los bloques individuales. Las fuerzas que se encuentran en cada uno de los bloques se encuentran en la Figura 12.

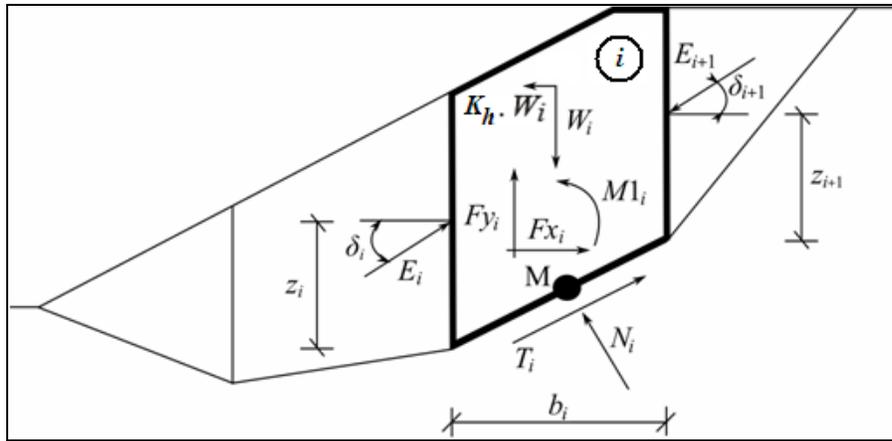


Figura 12 Esquema estático – Morgenstern Price (Morgenstern & Price, 1965)

Los supuestos que se trabajan en el método de Morgenstern- Price son:

- Los planos que dividen los bloques siempre son verticales.
- La línea de acción del peso W_i pasa por el centro del segmento trabajado en la superficie de falla en el punto M.
- La fuerza normal a la superficie de falla actual en el centro del bloque trabajado en el punto M.
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento δ

$$Z_{i+1} = \frac{b_i}{2} * \frac{[E_{i+1}(\sin \delta_{i+1} - \cos \delta_{i+1} \tan \alpha_i) + E_i(\sin \delta_i - \cos \delta_i \tan \alpha_i)] + E_i z_i \cos \delta_i - M1_i + K_h W_i (y_M - y_{gi})}{E_{i-1} \cos \delta_{i-1}}$$

La anterior fórmula permite calcular todos los brazos Z_i que corresponden a las fuerzas que actúan entre los bloques para valores dados de δ_i . El factor de seguridad se determina a través de un proceso de iteración, dado a continuación ((Morgenstern & Price, 1965):

- Los valores iniciales de los ángulos δ_i se determinan según la función Half-sine ($\delta_i = \lambda * f(x_i)$).

- El factor de seguridad FS para los valores dados de δ_i se deduce de la ecuación, asumiendo el valor de $E_{n+1} = 0$ en el extremo de la superficie de deslizamiento.
- El valor de δ_i está dado por la ecuación, utilizando los valores de E_i determinados en el paso previo con el requisito de tener el momento en el último bloque igual a cero.
- El paso 2 y 3 se repiten hasta que el valor de δ_i no cambia.

3. JARILLONES

“El término dique como se usa aquí, se define como un muro de retención, cuyo propósito principal es proporcionar protección contra las inundaciones y por lo tanto a niveles estacionales altos, por tanto está sujeta a una carga de agua durante períodos de sólo unos pocos días o semanas al año.

Los diques que están sujetos a una carga de agua durante períodos prolongados (más de los requisitos normales de protección contra inundaciones) o permanentemente deben estar diseñados con otros criterios.” (USACE, 2000)

A pesar de que los diques son similares a las pequeñas represas de tierra, difieren en los siguientes aspectos:

(a) un dique puede saturarse por sólo un corto período de tiempo más allá el límite de saturación capilar,

(b) la alineación del dique está dictada principalmente por las exigencias de protección de inundación, que a menudo se traduce en la construcción de cimentaciones pobres,

(c) Los materiales de construcción se obtienen generalmente de pozos de poca profundidad o de canales excavados adyacentes al dique, que producen material de relleno que puede ser muy heterogéneo y lejos de ser ideal. La selección de la sección de un dique a menudo se basa en las propiedades del material”. (USACE, 2000)

“Hay numerosos factores que deben considerarse en el diseño de diques. Estos factores pueden variar de un proyecto a otro, y no se puede especificar paso a paso el procedimiento que cubra los detalles de un proyecto en particular. Sin embargo, es posible presentar las medidas generales y lógicas basadas en proyectos exitosos que se pueden seguir para el diseño de diques y se puede

utilizar como una base para el desarrollo de procedimientos más específicos para cualquier proyecto en particular”. (USACE, 2000)

A continuación se desarrolla en detalle los elementos relacionados a un jarillón, como lo son sus partes, mecanismos de falla

3.1. PARTES DE UN JARILLÓN

Las partes de las cuales se compone un jarillón dependen de los requerimientos de diseño, ya que dependiendo del sitio y de la funcionalidad de la estructura se decide que partes son importantes de colocar.

Para diseñar los jarillones se debe tener en cuenta la influencia del flujo en la estructura y el análisis geotécnico de estabilidad del talud. Las partes de los jarillones que se pueden diseñar son en general todas las que lo componen que se pueden observar en la Figura 13

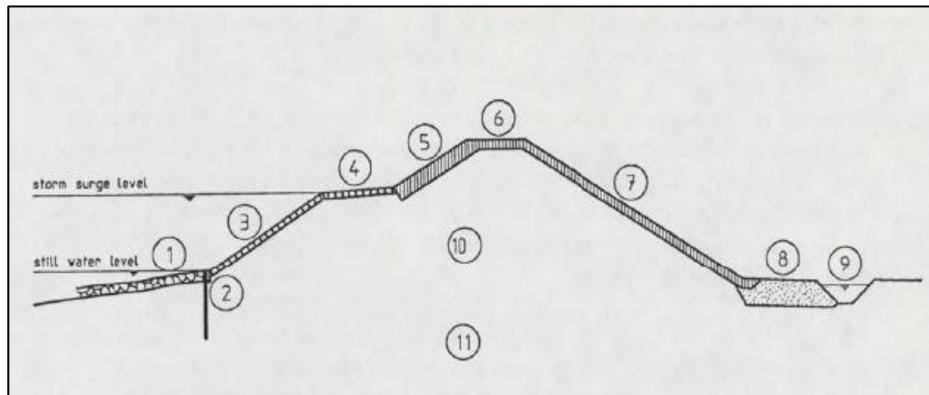


Figura 13 - Sección típica de un jarillón. (Eversdijk 1993)

Donde:

1. Protección (Riprap) de la parte baja del jarillón de las corrientes de agua. En general pueden ser geotextiles o grava.

La protección de la parte baja del río hace parte del revestimiento que se le da al Jarillón, normalmente consiste en una capa de geotextil recubierta por material granular, tiene como fin evitar la erosión del río. (Ciria, 2002), en la Figura 14 se observa dicho hito.

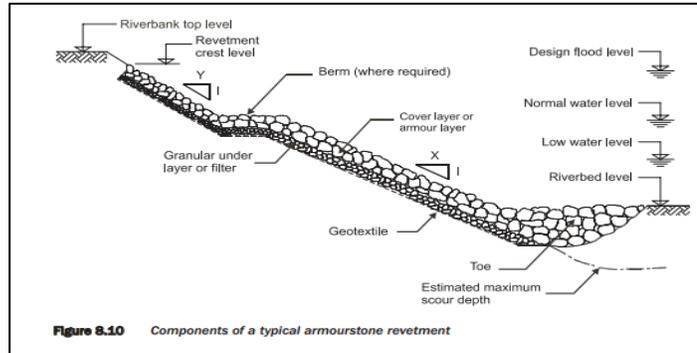


Figura 14 - Protección de la parte baja de un jarillón. (USACE, 2000)

2. Pie de la estructura. Generalmente se usan troncos de madera con un recubrimiento contra la humedad o pantallas de concreto, sin embargo se ha demostrado que con solo madera cumple su función de evitar la erosión en el pie del jarillón.

Ciria (2002) Es la parte más importante de la estructura del Jarillón y su revestimiento varía de acuerdo con la erosión que pueda presentarse:

- No significativa: No necesita revestimiento.
- Significativa: Cama protectora contra la erosión, se ubica entre el lecho del río y el Jarillón,
- Significativa: Revestimiento extendido, se usa con el fin de evitar erosión a largo plazo

Graficamente se observa en la Figura 15

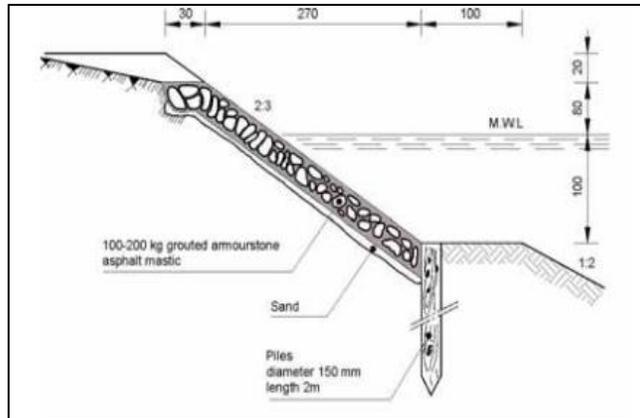


Figura 15 - Típico pie de un jarillón. (USACE, 2000)

3. Revestimiento de la banca del río. Se puede hacer en muchos materiales como concretos o vegetación, el objetivo de este es evitar la erosión en la banca del río o cuerpo de agua debido al flujo del cauce en esta zona.
4. Berma. No todos los jarillones tienen, sin embargo aquellos que si generalmente están cubiertas de bloques de concreto.

Se ubica entre la pendiente mayor y la pendiente menor del revestimiento. Generalmente se usa un material diferente en esta zona de transición que tiene como función servir de plataforma para el mantenimiento del Jarillón además de que aportan estabilidad durante su proceso de construcción y durante su funcionamiento (Ciria, 2002). Puede haber dos tipos de berma:

- **Ancha:** Usada como plataforma para mantenimiento.
- **Angosta:** Usada para marcar la transición entre el lecho natural del río y el revestimiento.

El ancho de berma mínimo para la zona entre el jarillón y el río es de 12.2 m, adicionalmente existe una berma que parte del jarillón hacia zonas urbanas de una ancho de 30.5 m aunque se debe buscar que sea lo mayor posible. (USACE, 2000), en Colombia según la normatividad de la CAR el ancho de berma mínimo es de 15 m. Cabe resaltar que bajo condiciones de topográfica y geomorfológica del terreno dicho ancho de berma no puede ser respetado.

5. Pendiente superior externa. Suele cubrirse con vegetación

En algunos casos se reglamenta la pendiente que deben tener los jarillones sin embargo estos datos no están basados en datos científicos sino que son el resultado de la experiencia, las características del material del terreno junto con el material del jarillón y de la disponibilidad económica del proyecto. Aun así las pendientes que se recomiendan se observan en la Tabla 3

Tabla 3 Pendientes comunes de los jarillones. (Lewis, 2002)

Tipos de casos		Homogéneo o modificado				Modificado homogéneo			
Propósito		Detención o almacenamiento				Almacenamiento			
Sujeto a desembalse rápido		NO				SI			
Clasificación del Suelo		GW	GC	CL	CH	GW	GC	CL	CH
		GP	GM	ML	MH	GP	GM	ML	MH
		SW	SC			SW	SC		
		SP	SM			SP	SM		
Altura de jarillón (m) y Pendiente									
0-3	U/S	P	2.5:1	2.5:1	3.5:1	P	3:1	3.5:1	4:1
	D/S		2:1	2:1	2.5:1		2:1	2.5:1	2.5:1
3-7	U/S	P	2.5:1	3:1	3:1	P	3.5:1	4:1	4:1
	D/S		2.5:1	2.5:1	3:1		2.5:1	3:1	3:1
7-10	U/S	P	3:1	3:1	3.5:1	P	3.5:1	4:1	4:1
	D/S		3:1	3:1	3:1		3:1	3.5:1	3.5:1

En la tabla anterior U/S corresponde a la pendiente de subida y D/S a la pendiente de bajada; P corresponde a suelos permeables.

A demás Ciria (2002) propone que las pendientes deben estar en función de:

- Sismicidad del lugar, mayores pendientes para zonas con baja actividad.
- Tiempo de retención del agua, para tiempos cortos se pueden usar pendientes menores.
- De acuerdo con el riesgo de deslizamiento, es decir incorporar el concepto de estabilidad.

- Material del Jarillón.

6. Cresta. Generalmente cubierto con vegetación excepto en aquellos casos donde haya una vía en la parte superior del jarillón.

Los jarillones deben estar seguros para dos casos distintos, el primero es que el agua no los sobrepase, y el segundo es que el flujo a través de ellos no los afecte. Debido a eso se reglamenta que la cresta debe estar 1 m por encima del nivel del agua. (Lewis, 2002). Aunque en algunos casos se diseña para soportar ciertos niveles que lo sobrepasen, bajo esta premisa se debe considerar una estructura de control adicional.

Por otra parte la propuesta de (Ciria, 2002) es de un borde libre entre 0.3 m y 0.5 m teniendo en cuenta que este valor puede subir de acuerdo al registro histórico del río. Además da una serie de variables para analizar cómo:

- Diseño del flujo o de la corriente del río.
- Asentamiento.
- Variabilidad climática
- Oleaje producido por el viento.

Pero se propone una ecuación bastante sencilla para este cálculo siguiendo el lineamiento de Lewis (2002) en la Ecuación 9

$$\text{Ancho de cresta (m)} = H - 1$$

Ecuación 9 Ancho de cresta.

Esta ecuación relaciona el ancho de la cresta con la altura del Jarillón, sin embargo independientemente de la altura del jarillón el ancho de cresta recomendable es de 2 m ya que con eso se garantiza que la maquinaria que lo esté construyendo pueda moverse libremente en la cresta en caso de ser necesario. Aunque los jarillones son usados como estructuras de contención de agua, en ocasiones por motivos de espacio o facilidad la cresta es usada como vía, en ese único caso la dimensión de la cresta debe ser de mínimo 4 m.

Basándose en la Ecuación 9 se han hecho algunas de las alturas más comunes y sus correspondientes anchos de cresta, se observa en la Tabla 4.

Tabla 4 - Anchos de cresta.

Altura de jarillón (m)	Ancho de Cresta (m)
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	8

7. Vertiente interna. No necesita de una protección fuerte ya que no se espera contacto permanente del agua en ese lado, las pendientes de bajada correspondiente a la pendiente de la vertiente interna se pueden observar en la Tabla 3
8. Drenaje. Es importante para manejar la infiltración del agua en el jarillón, usualmente encontramos tres tipos de drenajes, el objetivo de estos es controlar las líneas de flujo para disminuir las presiones de poros a lo largo del cuerpo del jarillón; en función de su geometría cambia su eficiencia como se observa en la Figura 16

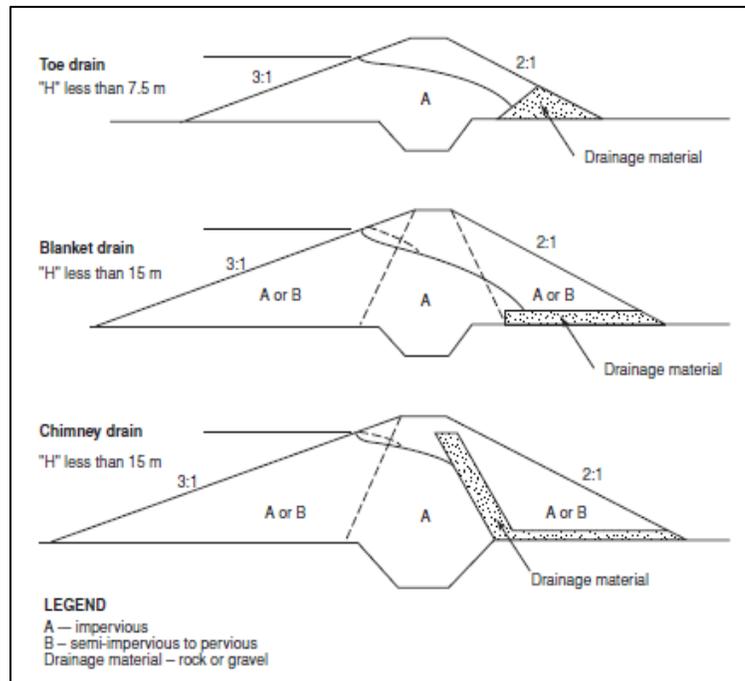


Figura 16 - Tipos de drenaje (USACE, 2000)

9. Filtración de la zanja, corresponde a una herramienta para recolectar el flujo superficial en la zona aferente, además del caudal que se produce en la zona del drenaje, tiene como objetivo la conducción para evitar problemas de estabilidad asociados a estos flujos.

10. Cuerpo del jarillón

Años atrás el cuerpo del jarillón o material de préstamo, estaba en función de la disponibilidad del mismo en zonas aledañas traducido esto en cantidad y distancia. Hoy en día, el material de préstamo recibe mucha más atención, debe ser cuidadosamente planificado y diseñado, debido a consideraciones tales como los aspectos medioambientales, el aumento de valor de la tierra, y un mayor reconocimiento de los efectos de las zonas de préstamo con respecto a las líneas de flujo que pueden elevar las presiones de poros, disminuyendo la estabilidad general de los jarillones. (USACE, 2000)

USACE (2002), propone dos consideraciones básicas para la obtención del material de préstamo:

- Casi cualquier tipo de suelo es adecuado para la construcción de diques, excepto suelos muy húmedos, de grano fino o suelos altamente orgánicos.
- Cuando se planifican los jarillones compactados, es necesario obtener material de préstamo con contenido de agua lo suficientemente baja para permitir la colocación y la compactación adecuada.

11. Subsuelo.

3.2. TIPOS DE JARILLONES

Las estructuras de retención de agua como los jarillones pueden ser clasificadas de varias maneras dependiendo de los parámetros que se tengan en cuenta, como:

- La composición del cuerpo del jarillón.
- La estructura impermeabilizante que se coloque en la cimentación.
- La forma de construcción.

CUERPO DEL JARILLÓN:

- **Homogéneo:** El jarillón está realizado de un solo material independiente del tipo de suelo que se utilice como se observa en la

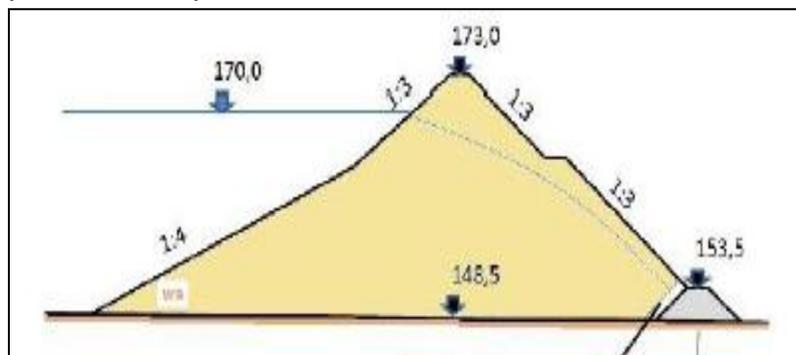


Figura 17 - Jarillón de cuerpo homogéneo (Sandoval 2012).

Díaz y Díaz (2009) proponen la siguiente definición, esta presa se compone únicamente de un solo material. El material que forma la presa debe ser suficientemente impermeable como para proporcionar una estanqueidad adecuada y los taludes, por exigencias de estabilidad, deben ser relativamente tendidos. Teniendo en cuenta que los taludes deben soportar los esfuerzos producidos por desembalsé rápido y los desprendimientos.

- **Heterogéneo:** Son la combinación de dos o más materiales ubicados con propósitos específicos, hace referencia a estructuras zonificadas con las cuales se pueda controlar el flujo de agua.

Características:

- Este tipo de presas tienen componentes muy permeables, por lo que es necesario añadirles un elemento impermeabilizante.
- Este tipo de estructura resiste siempre por gravedad, pues la débil cohesión de sus materiales no les permite transmitir los empujes del agua al terreno.
- Como elemento impermeabilizante se usa normalmente arcilla (en cuyo caso siempre se ubica en el corazón del relleno) o bien una pantalla de hormigón, la cual se puede construir también en el centro de la presa.

La presa heterogénea es considerada como un dique heterogéneo si la anchura horizontal de la zona impermeable, en cualquier punto, es igual o mayor que la altura de terraplén sobre ese punto de la presa, y no menor de 3 metros, un ejemplo de los jarillones heterogéneos se observa en la Figura 18, en la cual el color café representa la zona más impermeable, las demás zonas corresponde a zonas mas permeables.

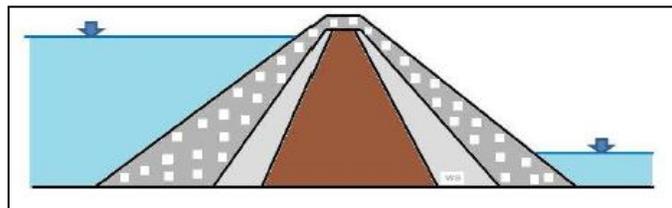


Figura 18 - Zonificación de materiales. (Sandoval 2012a)

JARILLONES CON NÚCLEOS

Los jarillones con núcleos son los que tienen en su interior una barrera impermeable, esta barrera no es igual para todas las estructuras y varía de acuerdo a la altura o al medio en donde se necesite colocar el jarillón. Pueden dividirse en:

- **De Núcleo Ancho**

Los jarillones de núcleo ancho son aquellos en el cual la barrera impermeable es al menos $\frac{1}{2}$ del ancho total del jarillón, se observa gráficamente en la Figura 19

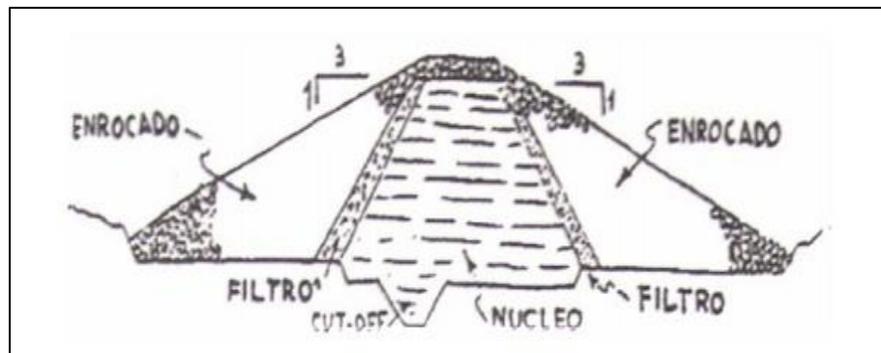
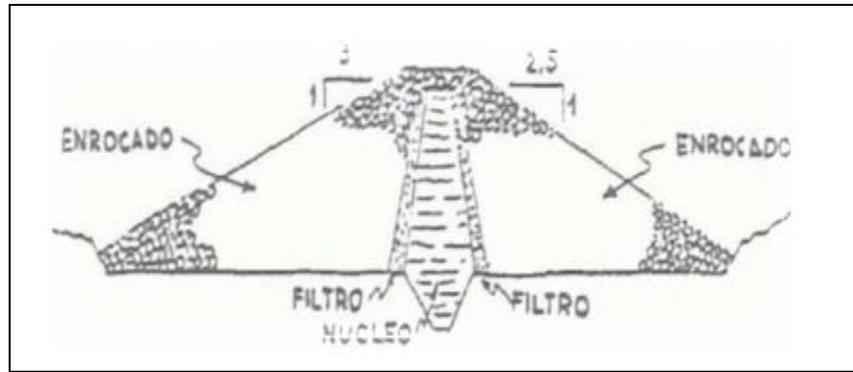


Figura 19 - Jarillón de núcleo ancho. (Diaz and Diaz 2009a)

- **De núcleo delgado**

Si se mejoran las condiciones de compactación de los jarillones se puede reducir la barrera impermeable y dejarlo como uno de núcleo delgado. Un punto de especial importancia es el espesor mínimo del núcleo que debe ser proporcionado por la altura. Generalmente se adopta el espesor de $0.3 H$ a $0.5 H$, donde H es la altura total de la estructura, y solamente en casos especiales donde se usen materiales de muy buenas características pueden ser reducidos a $0.2 H$. La Figura 20 muestra esquemáticamente este tipo de jarillón.

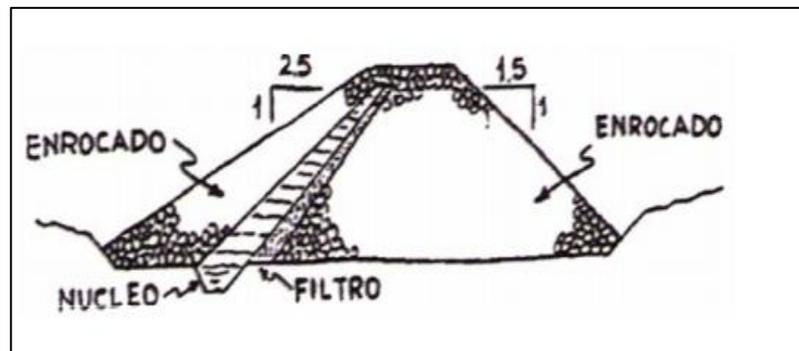
Figura 20 - Jarillón de núcleo delgado. (Diaz and Diaz 2009a)



- **De núcleo delgado inclinado**

Una modificación que se empezó a emplear en Estados Unidos es la del núcleo inclinado, debido a que permite una mejor descarga hidrostática sobre cimentación reduciendo la función de soporte del espolón (filtro) de aguas abajo que puede tener un volumen mínimo. La Figura 20 muestra esquemáticamente este tipo de jarillón.

Figura 21 - Jarillón de núcleo inclinado. (Diaz and Diaz 2009a)



JARILLONES CON FILTROS

Una de las estrategias que se pueden implementar para el control del flujo en los jarillones son los filtros, los cuales pueden ser de distintas formas y funcionalidades.

Los materiales en cada uno de los sitios donde se va a colocar el Jarillón pueden variar, incluso en una distancia muy corta. Las características que

más cambian con la gradación del material y la permeabilidad. En caso de que la diferencia en la permeabilidad sea lo suficientemente grande para dejar fluir el agua no es necesario que se pongan filtros, sin embargo sino se cumple esa característica se debe pensar en colocar filtros utilizando materiales con cierta gradación o usando también materiales artificiales.

Existen unos diagramas de donde deben estar ubicados los filtros en los jarillones en función de la altura H , que es la distancia entre la base del jarillón y 1 m debajo de la cresta. Es los diagramas se puede observar cual es el comportamiento que se espera tenga el flujo dentro del jarillón.

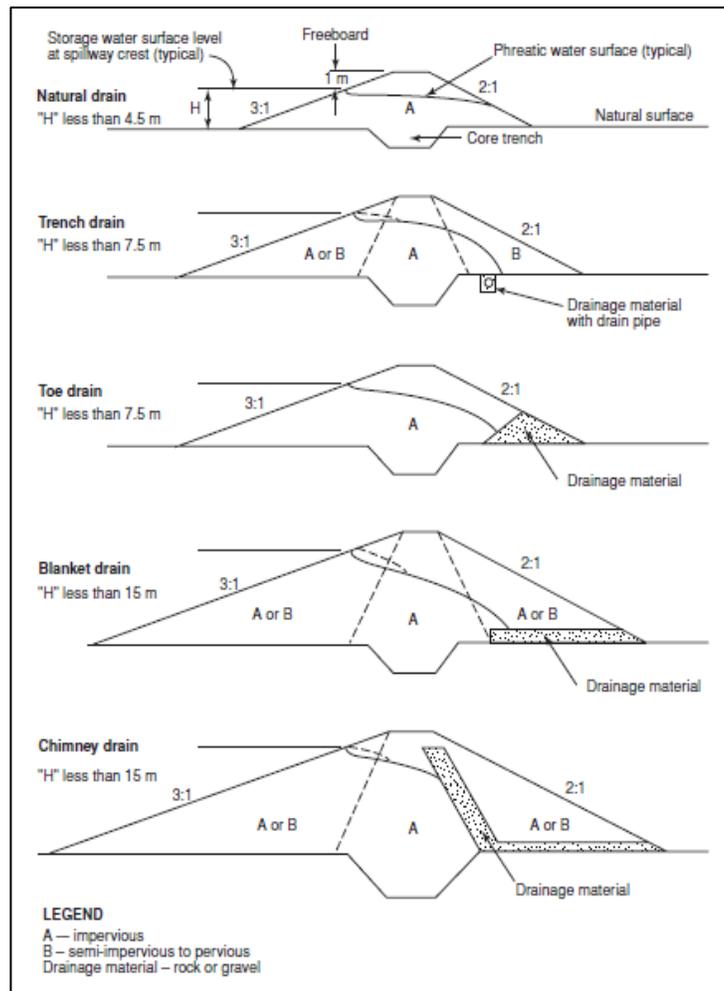


Figura 22 - Secciones típicas de jarillones con filtros en función de H . (LEWIS 2002a)

Los filtros de los jarillones que se encuentran en la Figura 22 son todos hechos en rocas o gravas. Para poder usar estos diseños no solo es necesaria la altura H sino que también se debe tener en cuenta el tipo de

suelo, tal como se observa en los diagramas existen los suelos tipo A y tipo B en donde su mayor diferencia con respecto al otro es la permeabilidad.

De igual manera esta clasificación de suelos en tipo A y tipo B contiene también una nueva clasificación en donde se especifica como tal los tipos de suelos. El suelo tipo A contiene la clasificación de suelos que se puede llamar como: GC, SC, CL y CH. El suelo tipo B contiene los suelos GW, GP, SW y SP.

Aunque no todos los filtros de los jarillones son iguales, existen algunas características que de usarse pueden diseñarse por medio de ecuaciones sencillas que permiten conocer las dimensiones necesarias.

Cuando se tiene una sección típica como la que se muestra en la Figura 23 es posible saber el espesor del filtro con la siguiente formula.

$$t_d = \left(\frac{qL}{k_d}\right)^{1/2} = 1.5H\left(\frac{k_c}{k_d}\right)^{1/2}$$

Ecuación 10 Espesor del filtro en función de la altura. (Lewis, 2002)

En donde k_c y k_d son las permeabilidades del núcleo y del dren respectivamente.

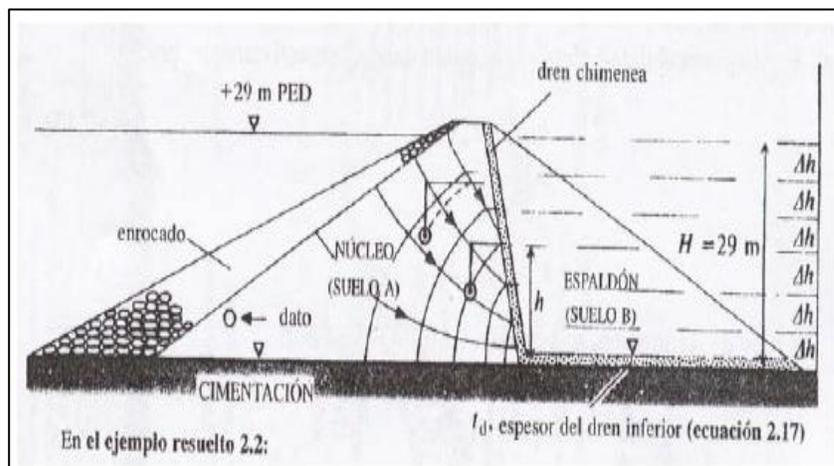


Figura 23 - Esquema de jarillón con drenaje. (Vallarino, 1997)

La implementación de los filtros en los jarillones es importante porque al ser construidos en tierra sufren de filtraciones a través del cuerpo y en la

fundación del mismo. El objetivo de los drenajes es básicamente prevenir subpresiones excesivas, inestabilidad en el talud aguas abajo, sifonamiento y erosión interna. (Suarez Diaz, 2006)

JARILLONES CON RECUBRIMIENTO

Los materiales que se emplean en los recubrimientos, que generalmente son en el talud del jarillón donde hay contacto con el agua pueden ser: hormigón armado, concreto asfáltico, planchas metálicas, láminas plásticas, madera, material de menos permeable etc. La elección depende evidentemente del tamaño de la obra, de la disponibilidad del material, del costo y de la durabilidad, en función de las condiciones ambientales.

Las ventajas de estas presas es que usualmente son estructurales y económicas, como las presas con núcleos inclinados; se llegan al mínimo volumen de enrocado y a la eliminación total de las presiones intersticiales en el cuerpo de la presa.

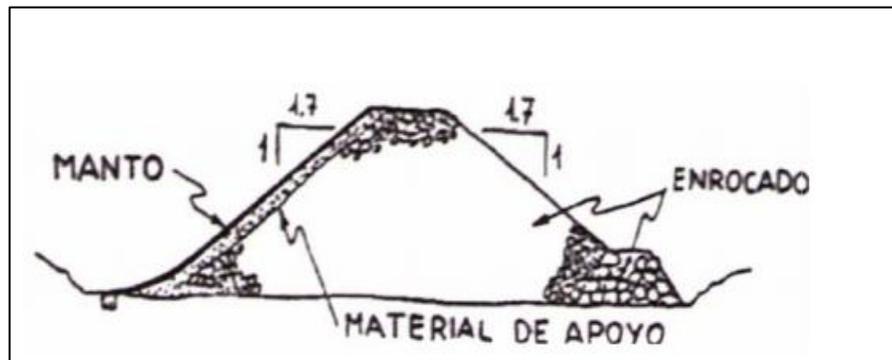


Figura 24 - Jarillón con recubrimiento. (Diaz and Diaz 2009a)

Existen numerosos revestimientos para los jarillones ya que por medio de estos se espera que se proteja la erosión y en algunos casos con ello se pretende realizar el filtro necesario para que no se presenten problemas por el agua.

Algunos de los revestimientos más comunes son:

- a. Grava, depositada en la parte superior del jarillón sin proceso de compactación.
- b. Concreto, se usan bloques o columnas.
- c. Cemento.
- d. Estructuras especiales como: sacos de arena, gravas o cemento.
- e. Vegetación colocada sobre una capa de arcilla.

Pendientes para el revestimiento

Ciria (2002) La pendiente del revestimiento no debe superar un valor de 1:1.5 aunque de acuerdo al proyecto y al tipo de Jarillón la pendiente puede variar, algunas variables son.

- La pendiente del recubrimiento debe ser la mayor posible, para disminuir la cantidad de escolleras requeridas.
- A mayor pendiente si es unos bloques o piedras se deben usar elementos más grandes.

JARILLONES CON ESTRUCTURA IMPERMEABLE EN LA CIMENTACIÓN

Dependiendo del tipo de suelo que se tenga como soporte, se pueden necesitar estructuras impermeabilizantes que controlen el flujo que se produce debajo del jarillón, esto debido a que no siempre la falla de las estructuras de retención de agua se da por el flujo a través del cuerpo de la misma.

- Delantal:

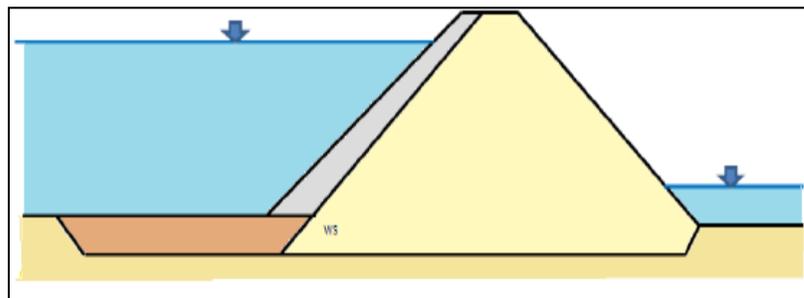


Figura 25 - Jarillón con delantal. (Sandoval 2012a)

- Dentellón:

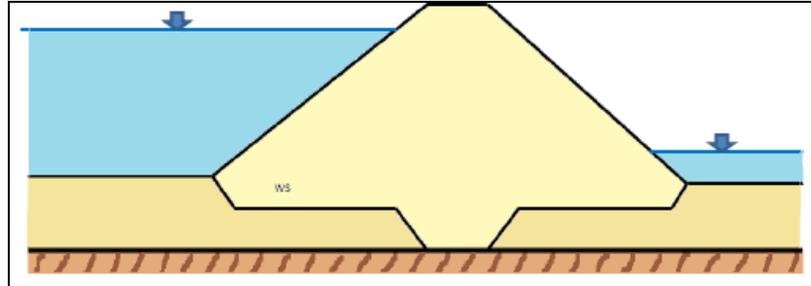


Figura 26 - Jarillón con dentellón. (Sandoval 2012a)

- Cortinas de lechada de cemento:

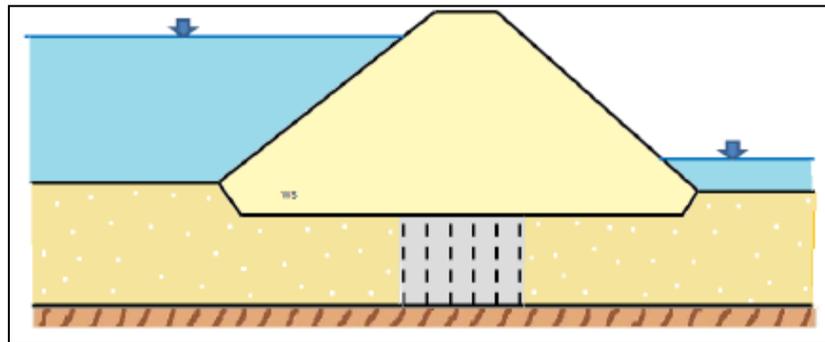


Figura 27 - Jarillón con cortina de cemento. (Sandoval 2012a)

- Diafragma o muro:

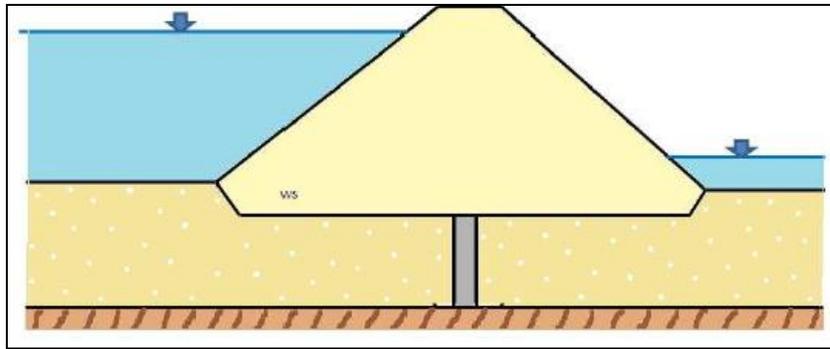


Figura 28 - Jarillón con diafragma. (Sandoval 2012a)

Para las modelizaciones propuestas en esta investigación, no se tienen en cuenta Diafragmas, dentellón o cortinas de lechada de cemento debido a que no se cuenta con un estrato impermeable en el subsuelo.

3.3. TIPOS DE FALLAS EN JARILLONES

Los jarillones que son estructuras de retención de agua para el control de inundaciones, en muchas ocasiones fallan debido a las condiciones extremas dadas por la topografía y el clima. La forma en la que puede fallar el jarillón debido a las condiciones mencionadas y a otras como la velocidad del flujo, la forma del río y el material, debe tenerse en cuenta a la hora del diseño.

El estudio de casos históricos permite identificar cuáles son los posibles mecanismos de falla que pueden afectar a una presa de residuos mineros. (Oldecop, 2007)

Sin embargo para el caso de los jarillones las fallas más comunes son:

- Socavación de la base.
- Sobrepasso.
- Tubificación.
- Deslizamiento.
- Desembalse rápido.
- Oleaje.
- Licuación.
- Capacidad portante.
- Asentamientos.

FALLA POR SOCAVACIÓN

La socavación es una de las formas de erosión provocadas por el agua, y aunque es un proceso natural este proceso puede afectar fuertemente el jarillón si no se toman las medidas preventivas necesarias.

- Socavación general

Se presenta en una sección del río definida y es independiente de la presencia de puentes o cualquier otro obstáculo significativo en la trayectoria del río. (USACE, 1989) Es un proceso natural y la capacidad de socavación es directamente proporcional a la velocidad del fluido, este ciclo puede verse afectado por el hombre cuando draga el río.

- Socavación localizada

La socavación localizada es el arrastre de partículas de suelo que ejerce el agua sobre estructuras específicas que hay en la trayectoria del río tal como puentes o jarillones.

La falla por socavación en los jarillones es aquella en la que el flujo de agua, gracias a la velocidad con la que transita y al material que se encuentre en la base del jarillón, arrastra el material y provoca que en la base queden vacíos que finalmente hacen que el material que está arriba se deslice, este tipo de fallas se van prolongando en el tiempo hasta que finalmente destruyen todo el jarillón.

FALLA POR SOBREPASO

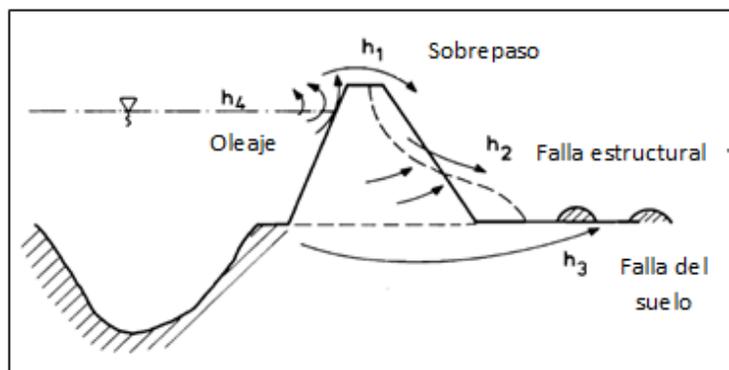


Figura 29 - Falla por sobrepaso (Wood, 1975)

La falla por sobrepaso del jarillón consiste en que el nivel del agua supera la altura total de la estructura provocando inundaciones. En Figura 29 la falla por sobrepaso se da cuando la altura h_4 supera la altura h_1 que es la total del jarillón.

Las fallas por sobrepaso del agua no se pueden prever aunque con base en estudios y en registros históricos se puede establecer un periodo de retorno que permita elegir una altura con un buen factor de seguridad.

El solo hecho de que el agua pase por encima del jarillón ya implica la falla, sin embargo el flujo que pasa por encima puede producir procesos de arrastre del material superficial de la estructura. Finalmente una falla por sobrepaso que se mantenga en el tiempo puede destruir todo el jarillón.

FALLA POR TUBIFICACIÓN:

Rayano (2006) Define los siguientes tipos de tubificación:

- **Levantamiento:** La filtración del agua en el suelo produce una fuerza ascendente que hace que el suelo falle si no tiene suficiente peso para contrarrestar esta fuerza. Se presenta en arenas finas.
- **Retrógresiva:** se puede producir en prácticamente todos los suelos, desde aguas abajo hacia aguas arriba, siguiendo preferentemente el camino de concentración de las líneas de filtración. El conducto se forma por las zonas geológicamente más débiles, por planos de estratificaciones permeables, o en cualquier otra zona de concentración del flujo, donde la energía llega sin sufrir grandes pérdidas debidas a la fricción.

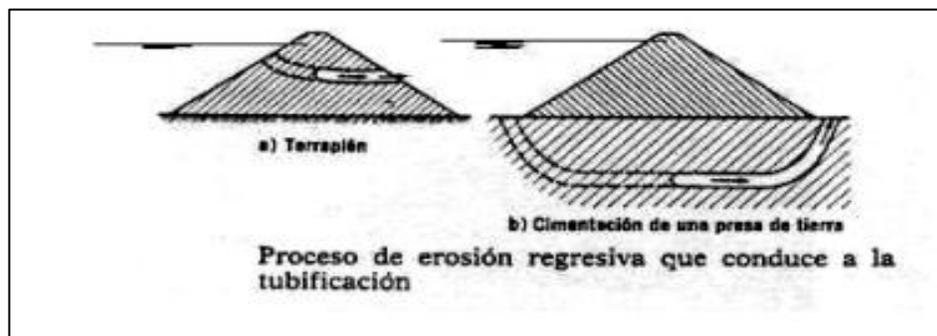


Figura 30 - Tubificación retrograda. (Rayano 2006)

- **Fractura Hidráulica:** Consiste en la brusca irrupción del agua a través de las grietas de los terraplenes bajo los efectos de la carga hidráulica, ejerciendo subpresiones y presiones en todas las direcciones, principalmente durante el primer llenado o al producirse alguna variación brusca de su nivel

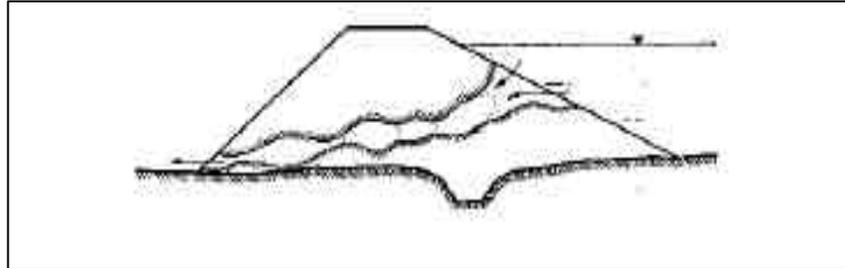


Figura 31 - Fractura hidráulica. (Rayano 2006)

FALLA POR DESLIZAMIENTO DEL TALUD

La falla de un talud está directamente relacionada con la geometría del mismo, es decir su pendiente y altura además de factores inherentes al suelo como lo son la cohesión y el ángulo de fricción interno, en las presas se presentan deslizamientos por las siguientes condiciones:

- Elevación del nivel freático y su aproximación al talud.
- Desarrollo de presiones de poros durante el proceso de llenado.
- Licuación de las zonas saturadas del depósito debido a una acción sísmica.

En jarillones la variación del nivel freático se puede presentar por los siguientes motivos:

- Elevación del nivel de agua producto del desborde del río, proceso de carga del jarillón.
- Infiltración de aguas lluvias a lo largo del cuerpo del jarillón.
- Descarga del Jarillón (desembállese rápido)

FALLA POR DESEMBALSE RÁPIDO

Pinyol (2001) “Un descenso en el nivel de agua tiene dos efectos: una reducción en la presión hidrostática exterior y una variación de la presión intersticial en el interior del talud.” Además el autor define que las problemáticas se enfocan en:

- La variación de la presión de poros producto de una descarga tensional.
- Una reducción de la disipación de las presiones en el tiempo, debido al flujo.

FALLA POR OLEAJE

Vallejo (2011) “Cuando las olas actúan al pie de taludes costeros se desarrollan dos tipos de fuerzas. Un tipo de fuerzas es la fuerza de compresión que actúa perpendicular a la cara del talud, y la otra es una fuerza tangencial (de corte) que actúa cuando el agua regresa al océano. La fuerza de compresión causa una desintegración del material rocoso y la fuerza de corte (tangencial) remueve el material del talud”. Este concepto se puede asociar al oleaje que se puede llegar a producir en un jarillón producto de un sismo o de la acción de fuertes vientos.

FALLA POR LICUACIÓN

La licuefacción es la disrupción *in situ* del soporte mutuo entre granos, generalmente por una sacudida sísmica, en la que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia de cizalla de los materiales afectados. En suelos sin cohesión, la transformación de un estado sólido a líquido es el resultado del aumento de la presión de los poros que disminuye el esfuerzo efectivo y con esto la resistencia. (Perucca & Navarro, 2006)

Estos procesos se presentan generalmente en limos o arenas no cementados saturados que se encuentran a poca profundidad. No solamente los suelos sueltos pueden sufrir licuación, también en terrenos compactados se puede presentar, tal como los jarillones que durante su fase de construcción han sido compactados (Universidad Industrial de Santander, 2006).

La pérdida de la cohesión del suelo durante movimientos sísmicos puede producir desplazamientos en los jarillones en dirección de la pendiente provocando la falla de la estructura.

Existen varios criterios para determinar la susceptibilidad de un suelo a la licuación. (Kramer, 1996)

- **Criterio geológico:**

Los depósitos de suelo que son susceptibles a licuación son los materiales uniformes granulares sueltos tales como depósitos fluviales, coluviales y eólicos saturados.

La licuación ocurre en suelos saturados, por lo tanto la profundidad del nivel del agua influye en la susceptibilidad a la licuación. Es más común en los suelos donde el nivel freático se encuentra subsuperficial. Los rellenos o depósitos hechos por el hombre en estado suelto son muy susceptibles a este proceso.

- **Criterio composicional:**

La susceptibilidad a la licuación también es influenciada por la gradación. Los suelos bien gradados son generalmente, menos susceptibles que los suelos pobremente gradados.

- **Criterio de estado:**

La licuación depende del estado inicial en el que se encuentre el material en cuanto a esfuerzos, densidades y relación de vacíos. Así mismo puede presentarse en una masa de suelo, en donde el resultado de la licuación puede verse como cambios de volúmenes o asentamientos.

También puede presentarse a través de una superficie o línea de falla, en donde la licuación puede producir deslizamientos o fallas al cortante del suelo.

La licuación se produce debido a que la alta frecuencia a la que suceden los ciclos de carga y descarga sísmicos, impide que el agua encerrada en los poros de un suelo drene y que se produzcan cambios de volumen, razón por la cual se general incrementos de presiones en el agua.

El incremento de la presión de poros genera la disminución de la tensión efectiva, la cual finalmente se reduce a cero cuando la relación de presión de poros es igual a 100%. La licuación hace que la resistencia al corte del suelo sea cero por lo que logra que el comportamiento del mismo sea parecido al de un fluido, perdiendo su capacidad portante, que finalmente termine incidiendo en la falla de la estructura del jarillón ya sea por deslizamiento o por asentamientos excesivos.

FALLA POR ASENTAMIENTO

Los asentamientos en la estructura presentan problemas de tipo funcional, debido a que el jarillón ya no está cumpliendo la tarea para la cual fue diseñado. Cuando los asentamientos en los jarillones son excesivos se pueden presentar fallas por sobrepaso del agua permitiendo inundaciones y en algunas ocasiones se dan procesos de tubificación.

Estos asentamientos pueden calcularse en función de si el suelo es normalmente consolidado o si es un suelo sobre consolidado, existen dos tipos de asentamientos:

Asentamientos primarios

Los asentamientos primarios se dan cuando por medio de las cargas puestas sobre el terreno el agua contenida en el suelo es expulsada.

Asentamientos secundarios

Los asentamientos secundarios se dan por una reacomodación de la estructura granular del suelo.

4. METODOLOGÍA

4.1. PARAMETROS DE DISEÑO

Para las modelaciones de HYDRUS se tuvo en cuenta algunas de las características de diseño que fueron mencionadas en el marco teórico, tal como los recubrimientos, los núcleos, las pendientes y los filtros, dentro de las cuales se especificaban dimensiones que usualmente se usan en ese tipo de estructuras.

No todas las que allí se mencionaron fueron incluidas para las modelaciones, como la protección de la parte baja del jarillón de las corrientes de agua, o la implementación de drenajes al final de la estructura, ya que son elementos que permiten soluciones a problemas como la socavación y que no hacen parte del alcance de esta tesis. De ahí que se hayan escogido las que tenían una influencia en los problemas de tubificación o estabilidad, que son el tema del presente trabajo de grado.

Se realizaron modelaciones para cuatro materiales distintos y se variaron las pendientes de los jarillones. Así mismo se modelaron estructuras que contuvieran núcleos, filtros y recubrimientos en materiales más o menos permeables según la situación, de manera que se encontrara el efecto de estos en el flujo y en las presiones de poros producidas en el jarillón.

Materiales:

La selección de los materiales hace parte de la clasificación textural del suelo en los rangos de 40-100% Limo, 0-60% Arcilla y 0-70% de arenas para los materiales del cuerpo del jarillón, por lo tanto tenemos los suelos limo, limo arcilloso, franco limoso y marga, materiales que fueron escogidos de forma que las cantidades de limo y arena fueran suficientes para representar 4 permeabilidades distintas y poder evidenciar la influencia del flujo, por otra parte, los suelos usados para recubrimientos y núcleos hacen parte del grupo de las arcillas y los filtros de las arenas.

Los materiales se eligieron de la clasificación textural del suelo, debido a que HYDRUS solo trabaja con este tipo de clasificación. Debido a esa limitación encontrada en el programa, se realizó un proceso en el cual se quería asemejar lo más posible el tipo de material dado en la clasificación textural, con los

encontrados en la clasificación USCS. Esto con el fin de asignar los parámetros de resistencia a los 4 tipos de suelo que se usaron en las modelaciones.

Los valores de los parámetros de resistencia fueron tomados de la exploración realizada para el estudio realizado por el convenio de la Universidad Nacional de Colombia y la CAR, en el que se realizaron los estudios geotécnicos para la adecuación hidráulica del río Bogotá en el año 2009. La exploración del suelo se realizó entre los sectores de Alicachín y el Humedal de La Conejera, de tal exploración se obtuvo los parámetros de resistencia.

En la Figura 32 se muestra la clasificación textural del suelo, que es una subdivisión de los finos de los materiales. Tiene en cuenta la cantidad de arcilla, arena y limo que hay en el suelo en porcentajes de 0 a 100%, y partiendo de allí se dan 12 tipos de suelos distintos, de los cuales se escogieron finalmente 4.

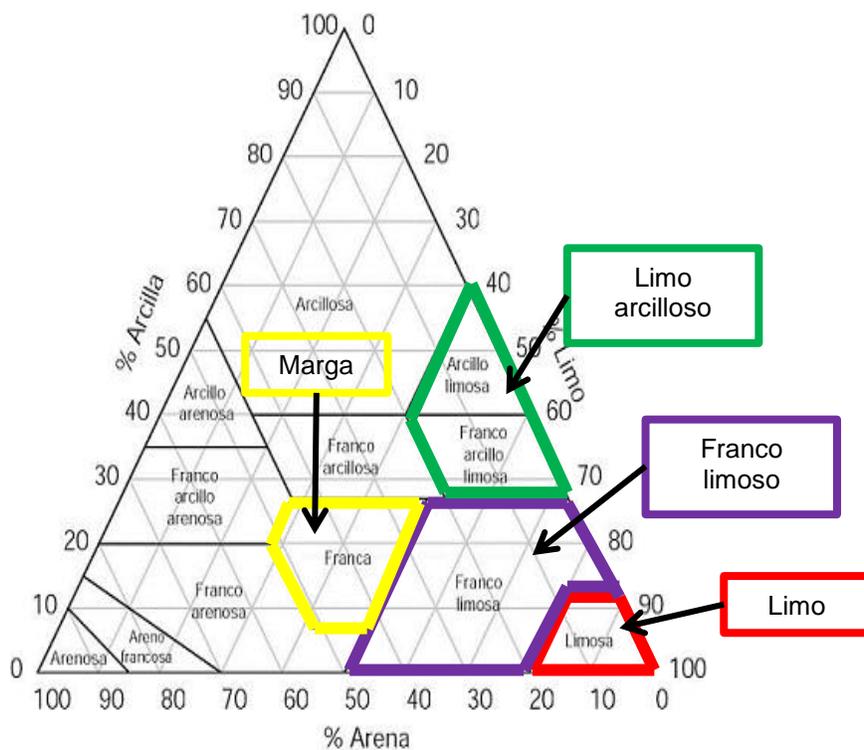


Figura 32 Clasificación textural del suelo. Materiales usados en las modelaciones.

Pendientes:

Para el diseño de jarillones se han propuesto tablas en donde se encuentran las pendientes más comunes en este tipo de estructuras, para las modelaciones que se realizaron en HYDRUS y en SLIDE se tomaron algunas de las que se encuentran en la siguiente tabla, puesto que se consideró implementar aquellas que pudieran generar resultados determinantes en el comportamiento del flujo y en la estabilidad del suelo.

Tabla 5 Pendientes comunes de los jarillones. (Lewis, 2002)

Tipos de casos		Homogéneo o modificado				Modificado homogéneo			
Propósito		Detención o almacenamiento				Almacenamiento			
Sujeto a desembalse rápido		NO				SI			
Clasificación del Suelo		GW	GC	CL	CH	GW	GC	CL	CH
		GP	GM	ML	MH	GP	GM	ML	MH
		SW	SC			SW	SC		
		SP	SM			SP	SM		
Altura de jarillón (m) y Pendiente									
0-3	U/S	P	2.5:1	2.5:1	3.5:1	P	3:1	3.5:1	4:1
	D/S		2:1	2:1	2.5:1		2:1	2.5:1	2.5:1
3-7	U/S	P	2.5:1	3:1	3:1	P	3.5:1	4:1	4:1
	D/S		2.5:1	2.5:1	3:1		2.5:1	3:1	3:1
7-10	U/S	P	3:1	3:1	3.5:1	P	3.5:1	4:1	4:1
	D/S		3:1	3:1	3:1		3:1	3.5:1	3.5:1

En la Tabla 5 se observan las pendientes comunes que se utilizan en función de la altura del jarillón, de si el cuerpo del jarillón es homogéneo y modificado ó modificado homogéneo, del propósito que se le desee dar a la estructura y de si esta estará sometida a desembalse rápido. Para efectos de la tesis el propósito de la estructura es de detención o contención de agua, así mismo la altura del jarillón no es mayor a 3 metros. Por lo tanto las pendientes que se utilizaron fueron las correspondientes a las casillas ya indicadas. Las pendientes que se observan en la tabla no son simétricas, por lo que el lado que va a estar en contacto con el agua no tiene la misma inclinación que el lado que si va a tener contacto con el agua.

Aunque la literatura recomienda que se dejen pendientes más tendidas en la cara seca de la estructura, para las modelaciones se realizaron las dos pendientes del jarillón simétricas por la dificultad de modelaciones que se iban a realizar, ya que

el cambio de una pendiente a otra significa el aumento de aproximadamente 60 modelaciones.

Las pendientes que se escogieron para las modelaciones hechas en la tesis, fueron tomando en cuenta las recomendaciones de la Tabla 5 aunque no todas las que allí estaban dispuestas se usaron. Los jarillones se realizaron de forma simétrica y las pendientes que se tomaron fueron 1:2, 2:1, 3:1, 1:3 y 1:1, como se puede observar en la Figura 33. Las pendientes 1:2, 1:3 y 1:1 fueron tomadas en cuenta para poder observar aquellos casos críticos en donde los taludes no estaban tan tendidos.

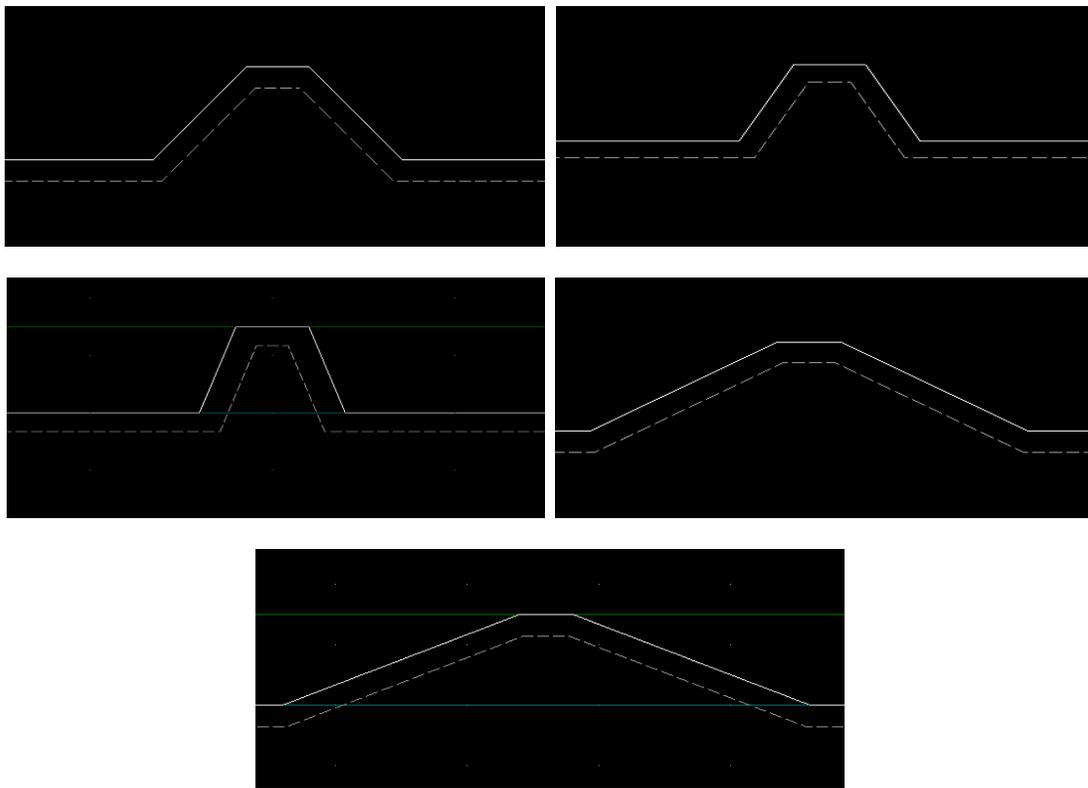


Figura 33 Pendientes de los jarillones. 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 y 3:1.

En la Figura 33 están las imágenes de los jarillones con las 5 pendientes distintas usadas, correspondientes a 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 y 3:1. Esas fueron las geometrías escogidas para las modelaciones de HYDRUS en la evaluación del flujo, como en las de SLIDE para la evaluación de estabilidad.

Recubrimiento o Impermeabilización:

Una de las estrategias que se pensó para mitigar los efectos del flujo sobre la presión de poros en el jarillón y una forma de controlar las velocidades dentro del mismo, fue la implementación de un recubrimiento en arcilla sobre el talud interior que es el que tiene contacto con el agua y la corona.

Este recubrimiento fue colocado en arcilla por ser un material más impermeable que los que se usaron en el cuerpo del jarillón, no se colocaron barreras 100% impermeables como membranas o concreto debido a que se quería observar la influencia del flujo en la estructura.

Además no es práctico ya que generalmente los jarillones están hechos con material dragado de los ríos y elaborados ahí mismo, por lo que no es fácil construir ese tipo de barreras en las condiciones ya mencionadas. El ancho del recubrimiento para todos los jarillones fue de 1 m medido en forma perpendicular desde el talud o la corona. Los recubrimientos en SLIDE y en HYDRUS se pueden observar en la Figura 34 y la Figura 35 respectivamente.

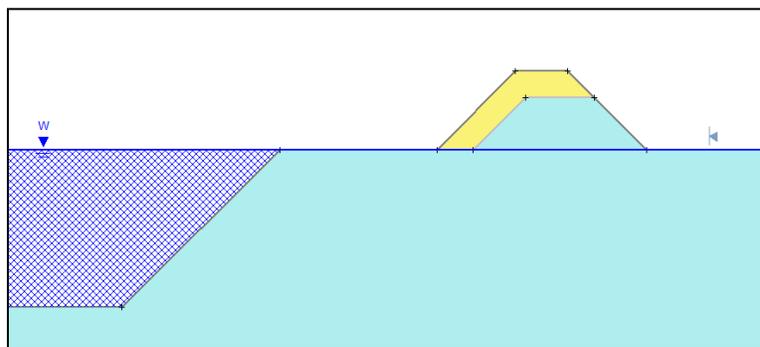


Figura 34 Recubrimiento en arcilla en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.

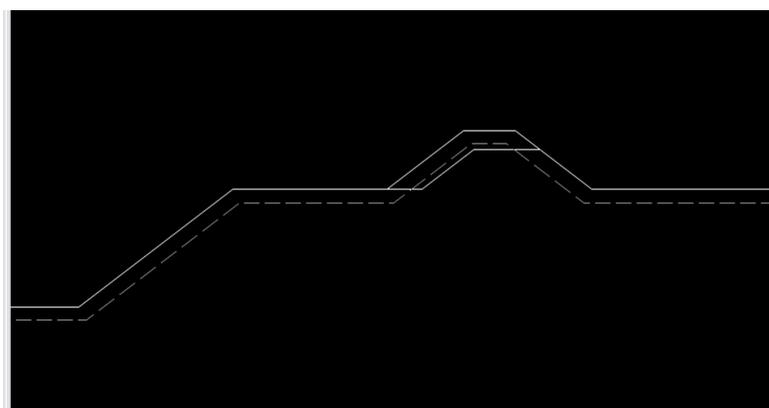


Figura 35 Recubrimiento en arcilla en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.

Filtros tipo I:

Los filtros tipo I son elementos en arena que se colocan al final de la estructura del jarillón y buscan controlar el flujo en el jarillón. Este tipo de filtros tiene forma triangular y la altura es un parámetro de diseño, basado en la altura total del jarillón, tal como se observa en la Ecuación 11, en donde H es la altura total de la estructura.

Ecuación 11 Altura del filtro tipo I. (Suarez Diaz, 2010)

$$\text{Altura del filtro (m)} = \frac{1}{3}H$$

La disposición final de los filtros tipo I para un jarillón en HYDRUS y en SLIDE se puede observar en la Figura 36 y en la Figura 37.

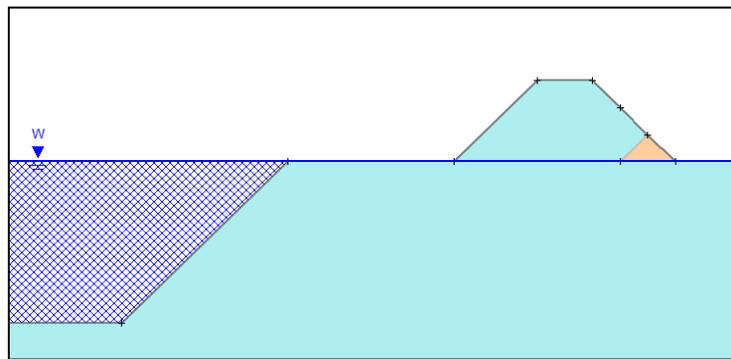


Figura 36 Filtro tipo I en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.

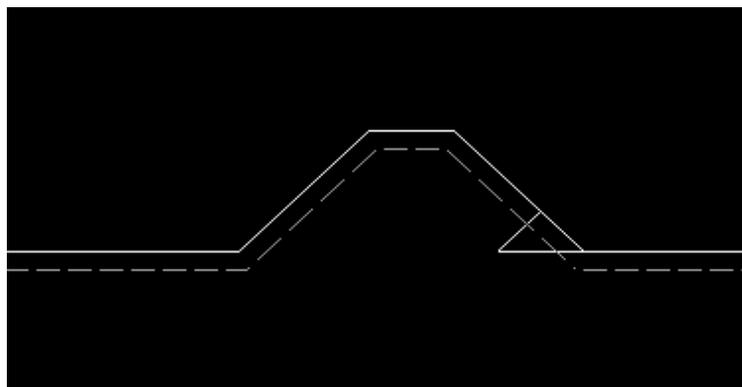


Figura 37 Filtro tipo I en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.

Filtros tipo II:

Los filtros tipo II son aquellos que son rectangulares y que se ubican en la parte inferior del jarillón en el talud que no tiene contacto con el agua. Las dimensiones de esos filtros están en función de la altura de la estructura, el ancho de los filtros debe ser de aproximadamente $1/6$ de la altura y el largo depende del talud de salida del jarillón. (Suarez Diaz, 2006)

El dimensionamiento de los filtros tipo II para un jarillón de pendiente 1:1 en Limo se puede ver en la Figura 38 y Figura 39.

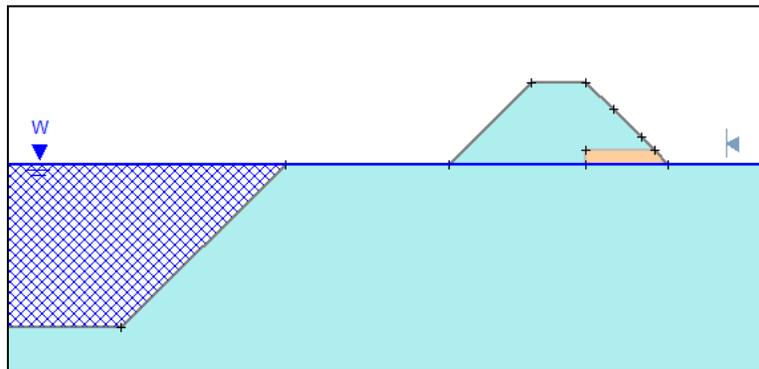


Figura 38 Filtro tipo II en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.

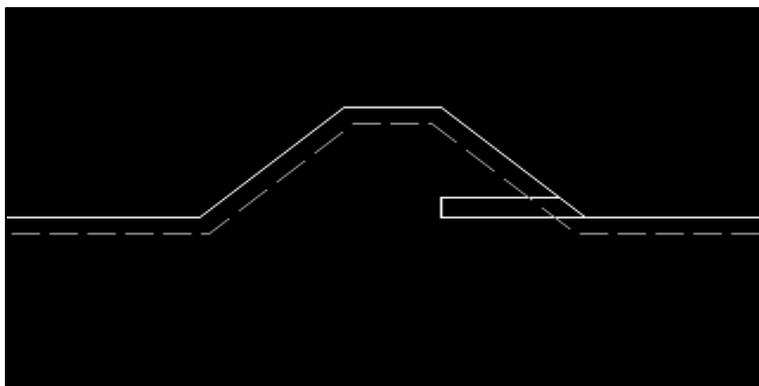


Figura 39 Filtro tipo II en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.

Filtros tipo III:

Los filtros tipo III también son conocidos como filtros chimenea debido a la geometría que manejan, estos a diferencia de los dos anteriores pretenden controlar el flujo mucho antes de la salida del jarillón. La altura de los filtros se define de acuerdo a la altura de la estructura (H), tal como se puede observar en la Ecuación 12. Estos filtros también se colocan en la parte inferior del talud que no tiene contacto con el agua. (Suarez Diaz, 2006)

Ecuación 12 Altura de un filtro tipo III o chimenea.

$$Altura\ filtro\ (m) = \frac{2}{3}H$$

Los filtros tipo III para jarillones con pendientes de 1:1 construidos en Limo se pueden observar en la Figura 40 y Figura 41.

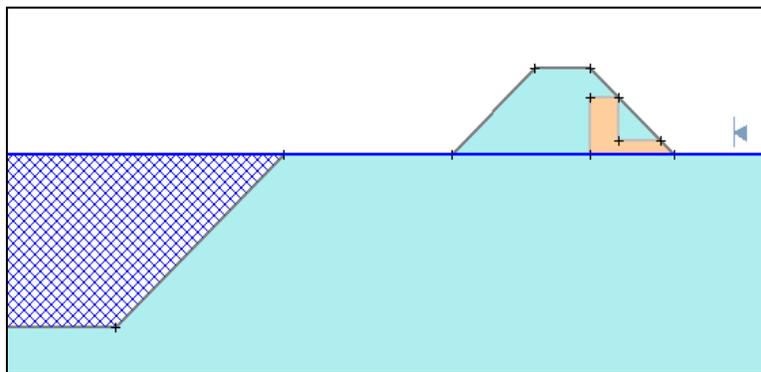


Figura 40 Filtro tipo III en jarillón con pendiente 1:1 en SLIDE.

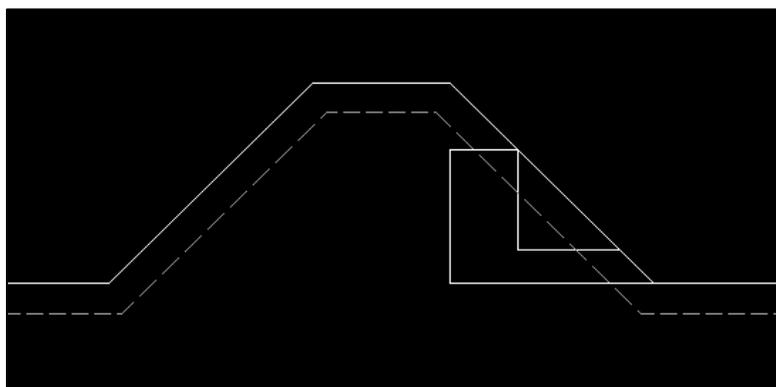


Figura 41 Filtro tipo III en jarillón con pendiente 1:1 en HYDRUS.

Núcleos:

Los núcleos fueron otra de las soluciones que se plantearon para el control del flujo en el jarillón, estos pueden contener uno o más materiales dentro de la estructura. Sin embargo para efectos de la presente tesis se usaron de un solo material, el cual era arcilla.

La presa heterogénea es considerada como un dique heterogéneo si la anchura horizontal de la zona impermeable, en cualquier punto, es igual o mayor que la altura de terraplén sobre ese punto de la presa, y no menor de 3 metros. El ancho que se debe usar en los núcleos es de acuerdo a la altura del jarillón, por medio de las relaciones de $0.3H$ y $0.5H$, aunque cuando se tiene la certeza de usar materiales muy buenos se pueden usar anchos de hasta $0.2H$.

Debido a eso se establecieron las dimensiones para los núcleos mostradas en la Tabla 6, en donde está la distancia para la base mayor y la base menor para cada pendiente que se usó en las modelaciones. Así mismo en la Figura 42 se observa a manera de ejemplo, el núcleo para el jarillón con pendiente 1:1.

Tabla 6 Parámetros geométricos de diseño, núcleos HYDRUS

Pendiente	Base mayor (m)	Base Menor (m)
1:3	3	1.2
1:2	3	1.2
1:1	3	1.2
2:1	3	1.2
3:1	3	1.2

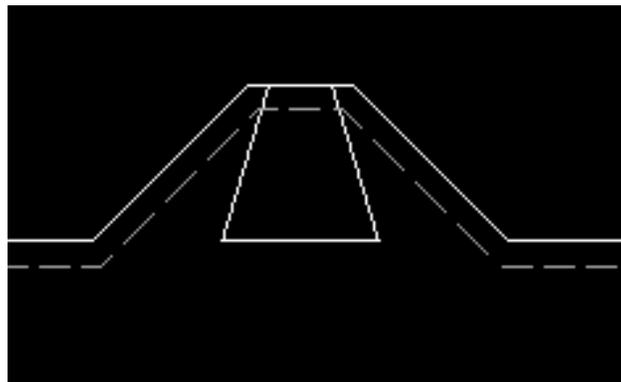


Figura 42 Ejemplo de un núcleo para pendiente 1:1.

4.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA

4.2.1. HYDRUS 2.0

La modelación hidráulica se hace a partir del software HYDRUS 2.0, programa desarrollado en ambiente Windows, y que es capaz de modelar flujo a través de medios porosos parcialmente saturados. Es un modelo de elementos finitos que simula el flujo de agua, calor y diversas sustancias a través de medios porosos parcialmente saturados. El programa resuelve numéricamente las ecuaciones de Richard's para el flujo de agua en el medio saturado - no saturado y las ecuaciones de advección - dispersión de Fick para el transporte de calor y compuestos.

Las ecuaciones de flujo son resueltas mediante el método Galerkin de elementos finitos aplicado a una malla de elementos triangulares con una integración en el tiempo realizada mediante un método implícito de diferencias finitas.

4.2.2. CONDICIONES DEL MODELO

La modelación se realiza en dos dimensiones en las coordenadas Z y X, los límites del modelo están directamente relacionados con las dimensiones de los jarillones que varían en función de las geometrías a estudiar, que se explicaran en los capítulos subsiguientes. Por lo tanto se definen los espacios geométricos como

se muestra a continuación en la Figura 43, allí se puede definir si el modelo que se va a trabajar es en 2D o 3D y las unidades en las que se desea trabajar.

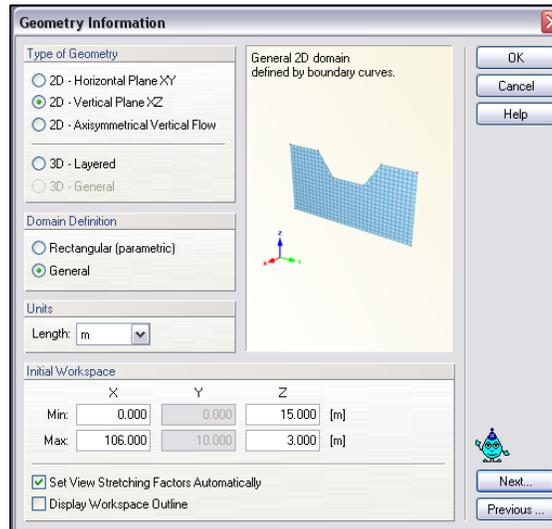


Figura 43 Consideraciones geométricas HYDRUS.

Partiendo de que la modelación de flujo se realiza en el tiempo y que las condiciones de flujo se evalúan para un periodo de 60 días, se realiza una discretización cada 12 horas para el análisis de flujo, por lo tanto se deben considerar condiciones de frontera variables en función del tiempo.

Las condiciones de flujo se evaluaron durante 60 días, ya que fue necesaria la estabilización del modelo con el fin de establecer una condición inicial del modelo en HYDRUS. Esto será explicado más adelante, mostrando los cambios necesarios para alcanzar esa condición inicial.

En la Figura 44 se muestra la información sobre el tiempo que se necesita establecer en HYDRUS. Puede escogerse las unidades de tiempo, que para la tesis se realizó en días. Así mismo el tiempo inicial, final, paso del tiempo y las condiciones variables que se van a implementar en el modelo.

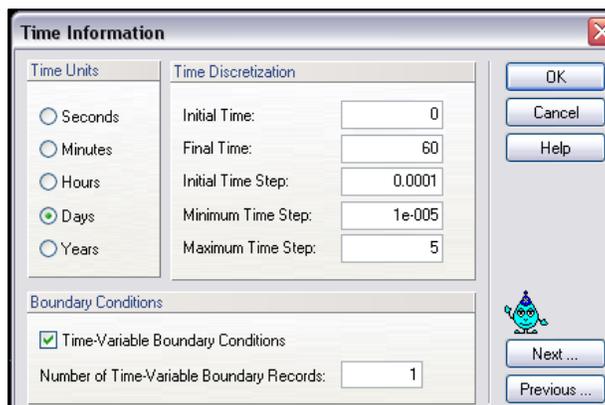


Figura 44 Información sobre el tiempo en HYDRUS.

Las condiciones iniciales para la modelación están en función de la cabeza de presión (m), adicionalmente los parámetros hidráulicos del suelo se calculan a partir de las consideraciones de van Genuchten en lo que corresponde a la curva de retención de humedad del suelo.

Los parámetros de flujo del suelo, están relacionados a los tipos de suelo definidos por HYDRUS 2.0 a partir de la clasificación textural definida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Los suelos a evaluar son:

- Limo, Limo Arcilloso, Marga, Franco limoso (Cuerpo del jarillón)
- Arcilla (Recubrimientos y núcleos)
- Arena (Filtros)

Sus parámetros son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7 Parámetros del flujo para distintos suelos en HYDRUS (HYDRUS).

Material	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I
Franco limoso	0.067	0.45	2	1.41	0.108	0.5
Limo Arcilloso	0.089	0.43	1	1.23	0.0168	0.5
Limo	0.034	0.46	1.6	1.37	0.06	0.5
Marga	0.078	0.43	3.6	1.56	0.2496	0.5
Arcilla	0.068	0.38	0.8	1.09	0.048	0.5
Arena	0.045	0.43	14.5	2.68	7.128	0.5

Dónde:

Qr = Humedad residual

Qs = Humedad de Saturación

I = Conectividad de Poros

Alpha = Parámetro de Ajuste de la Curva Característica del Suelo

n = Parámetro de Ajuste de la Curva Característica del Suelo

Ks = Conductividad Hidráulica Saturada.

Las condiciones de frontera del modelo el HYDRUS que son variables en el tiempo están en función de 3 regiones, la zona saturada (Var-H-1), la zona parcialmente saturada (Var-H-2) y la condición de flujo a lo largo de los jarillones

junto con la sección del río (Var-H-3). VAR-H-1, VAR-H-2 Y VAR-H-3 son los nombres de las variables ya explicadas anteriormente.

En la Tabla 8 se encuentran los valores en metros de cada una de las 3 variables usadas en el modelo a través de tiempo, durante los 60 días que se realizó la modelación. La VAR-H-1 que corresponde a la condición de frontera para la zona saturada varía de forma lineal de 5 m a 10 m. La VAR-H-2 es la encargada de simular el ascenso del río en los extremos del modelo, esta condición de frontera se implementó con el fin de controlar el nivel freático y lograr que subiera de forma igual a través de todo el modelo. Y la VAR-H-3 es la que simula el aumento del nivel del río dentro del cauce, esta variable parte de la condición de que el río tiene 1 m de profundidad y luego sube hasta la cresta del jarillón.

Las condiciones de frontera descritas anteriormente se calculan con base a: la profundidad del modelo desde la superficie del terreno (10m), un nivel freático ubicado a 5m desde la superficie gracias a un nivel de río de 1 m. La evolución a lo largo del tiempo está dada según el crecimiento del río Bogotá en la temporada invernal de 2010-2011. (CAR, 2012) suministra un compilado de información acerca de los niveles del río Bogotá, el periodo de crecimiento de los niveles se ajusta a la velocidad crítica de 10cm/día.

La ubicación de las tres condiciones de frontera que son variables en el tiempo, y que se implementaron en todas las modelaciones de HYDRUS se puede observar en la Figura 45. Allí mismo están todas las condiciones de frontera que se implementaron en el modelo, las variables en el tiempo y las que son fijas, como la condición impermeable y la de flujo libre.

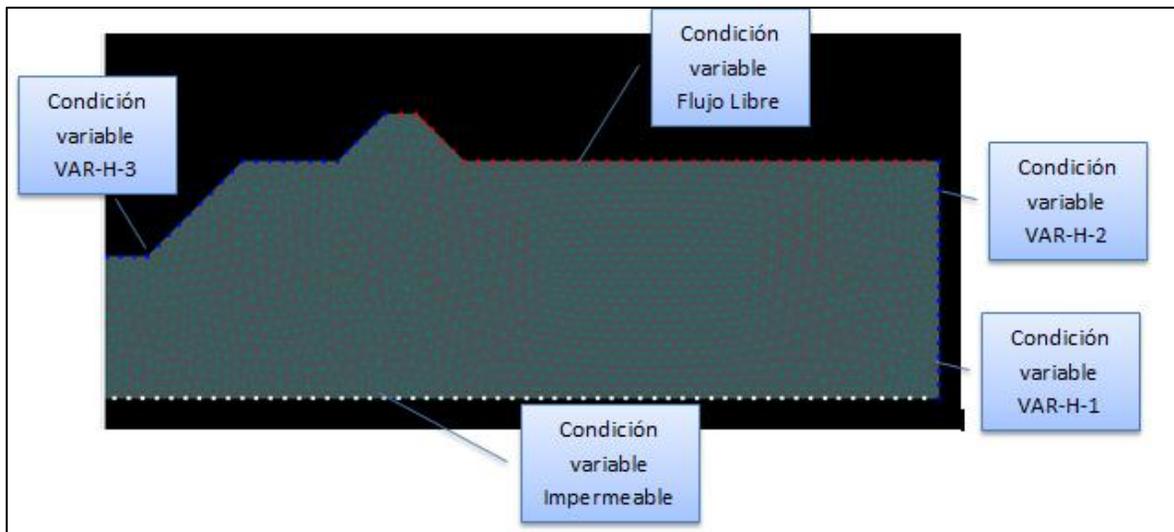


Figura 45 Condiciones de frontera en HYDRUS.

Tabla 8 - Condiciones de frontera HYDRUS

Tiempo (días)	Var-H-1 (m)	Var-H-2 (m)	Var-H-3 (m)
1	5	F(saturación)	1
2	5	F(saturación)	1
3	5	F(saturación)	1
4	5	F(saturación)	1
5	5	F(saturación)	1
6	5.1	0.1	1.3
7	5.2	0.2	1.6
8	5.3	0.3	1.9
9	5.4	0.4	2.2
10	5.5	0.5	2.5
11	5.6	0.6	2.8
12	5.7	0.7	3.1
13	5.8	0.8	3.4
14	5.9	0.9	3.7
15	6	1	4
16	6.1	1.1	4.3
17	6.2	1.2	4.6
18	6.3	1.3	4.9
19	6.4	1.4	5.2
20	6.5	1.5	5.5
21	6.6	1.6	5.8
22	6.7	1.7	6.1
23	6.8	1.8	6.4
24	6.9	1.9	6.7
25	7	2	7
26	7.1	2.1	7.3
27	7.2	2.2	7.6
28	7.3	2.3	7.9
29	7.4	2.4	8.2
30	7.5	2.5	8.5
31	7.6	2.6	8.8
32	7.7	2.7	9
33	7.8	2.8	9
34	7.9	2.9	9

Tiempo (días)	Var-H-1 (m)	Var-H-2 (m)	Var-H-3 (m)
35	8	3	9
36	8.1	3.1	9
37	8.2	3.2	9
38	8.3	3.3	9
39	8.4	3.4	9
40	8.5	3.5	9
41	8.6	3.6	9
42	8.7	3.7	9
43	8.8	3.8	9
44	8.9	3.9	9
45	9	4	9
46	9.1	4.1	9
47	9.2	4.2	9
48	9.3	4.3	9
49	9.4	4.4	9
50	9.5	4.5	9
51	9.6	4.6	9
52	9.7	4.7	9
53	9.8	4.8	9
54	9.9	4.9	9
55	10	5	9
56	10	5	9
57	10	5	9
58	10	5	9
59	10	5	9
60	10	5	9

HYDRUS 2.0 ofrece la capacidad de calcular aportes al modelo por precipitación o pérdidas por evapotranspiración, es de anotar que estas condiciones están fuera del alcance de esta tesis.

Una vez definidos los parámetros aferentes a la geometría y las condiciones de simulación del modelo, se especifica la distribución de la malla para el cálculo por medio de elementos finitos, para todas las simulaciones se escoge una discretización de 0.5 m, debido a la capacidad del programa de cálculo, directamente relacionada con la habilidad de procesamiento del equipo computacional utilizado. Esto se puede observar en la Figura 46, en donde como ya se había mencionado se debe colocar la distancia a la que se requiere la malla.

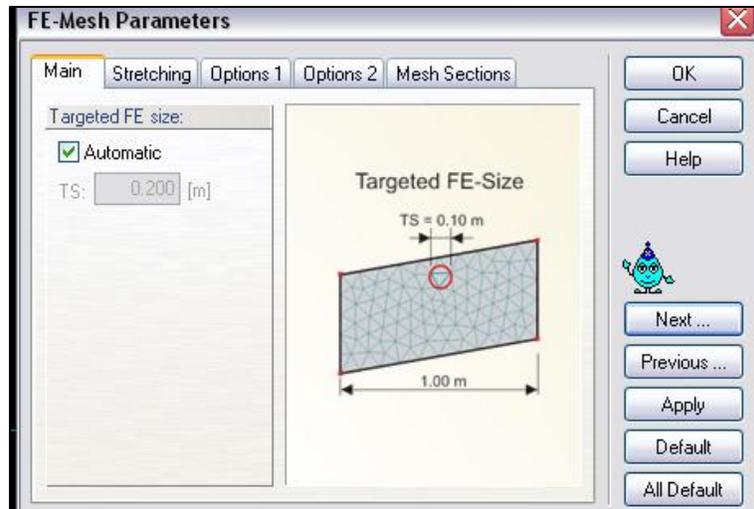


Figura 46 Parámetros de discretización de la malla en HYDRUS.

4.2.3. MODELACIÓN

Las condiciones para realizar la modelación de flujo parten de los siguientes elementos de la estructura física del jarillón:

- Pendiente del jarillón
- Material del jarillón.
- Recubrimiento.
- Presencia de núcleo.
- Presencia de filtros (Filtro Tipo I, II, III).

La Tabla 9 representa la matriz de jarillones evaluados en la tesis.

Tabla 9 - Matriz de diseño

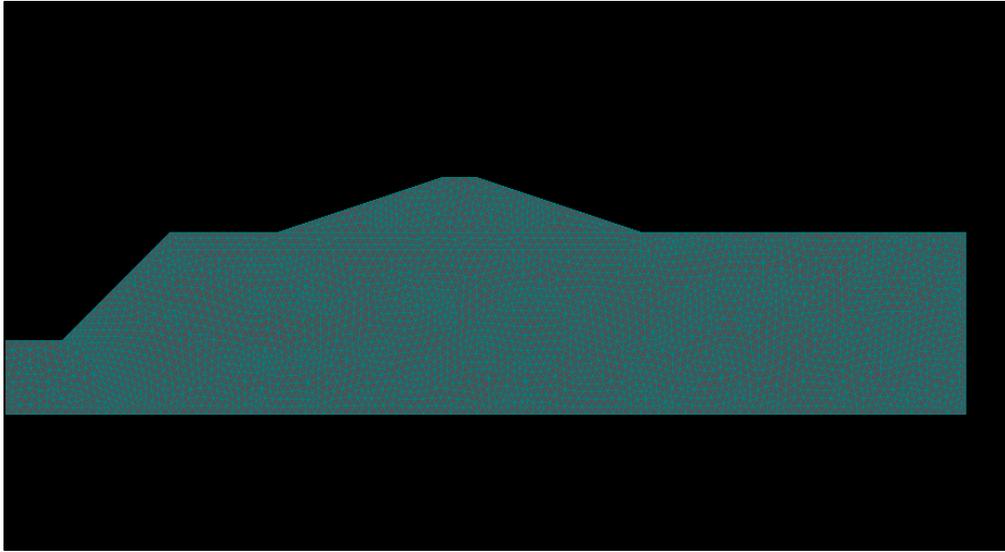
Material	Tipo	Pendiente				
		1:3	1:2	1:1	2:1	3:1
Franco limoso	Pendiente	X	X	X	X	X
	Recubrimiento	X	X	X	X	X
	Filtro I	X	X	X	X	X
	Filtro II	X	X	X	X	X
	Filtro III	X	X	X	X	X
	Núcleos	X	X	X	X	X
Limo	Pendiente	X	X	X	X	X

Material	Tipo	Pendiente				
		1:3	1:2	1:1	2:1	3:1
	Recubrimiento	X	X	X	X	X
	Filtro I	X	X	X	X	X
	Filtro II	X	X	X	X	X
	Filtro III	X	X	X	X	X
	Núcleos	X	X	X	X	X
Limo Arcilloso	Pendiente	X	X	X	X	X
	Recubrimiento	X	X	X	X	X
	Filtro I	X	X	X	X	X
	Filtro II	X	X	X	X	X
	Filtro III	X	X	X	X	X
	Núcleos	X	X	X	X	X
Marga	Pendiente	X	X	X	X	X
	Recubrimiento	X	X	X	X	X
	Filtro I	X	X	X	X	X
	Filtro II	X	X	X	X	X
	Filtro III	X	X	X	X	X
	Núcleos	X	X	X	X	X

A partir de la Tabla 9 se infiere la modelación de 120 jarillones producto de las combinaciones posibles en la matriz anterior.

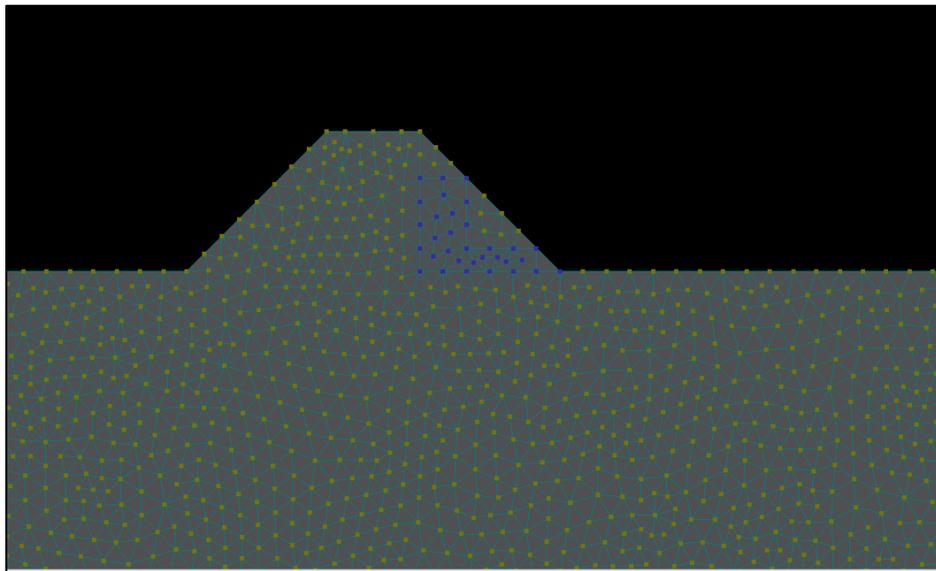
Una vez definida la geometría del jarillón en el modelo se genera una superficie al interior de este, como se ilustra en la Figura 47 con esta superficie se genera la malla de elementos finitos por la cual el programa realiza los cálculos de flujo.

Figura 47 Ejemplo de geometría y malla de elementos finitos en HYDRUS.



Generada la malla de elementos finitos se asignan a los nodos el material que corresponda de acuerdo a la modelación, es decir materiales del cuerpo del jarillón y elementos adicionales que se llegaron a presentar, en la Figura 48 se ejemplifica dicho procedimiento para un jarillón de pendiente 1:1, Franco limoso y con Filtro tipo III en arena.

Figura 48 Ejemplo de la distribución de los materiales en HYDRUS.



La modelación además exige unas condiciones. La cabeza de presión se considera hidrostática por debajo del nivel freático y se asume una succión en el

suelo parcialmente saturado en función del contenido volumétrico de humedad; esta succión se representa a través de carga hidráulica en metros, para ejecutar este procedimiento se construyeron las curvas de Van Genuchten (1980), partiendo de la relación de fase:

$$S = \frac{\theta}{n}$$

Dónde:

S = saturación.

n = porosidad.

θ = contenido volumétrico de agua.

Para cada material se asigna una saturación para conocer su succión, las gráficas construidas para cada material corresponden a las figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54 que se encuentran a continuación.

Figura 49 Curva de saturación vs carga hidráulica para Arena.

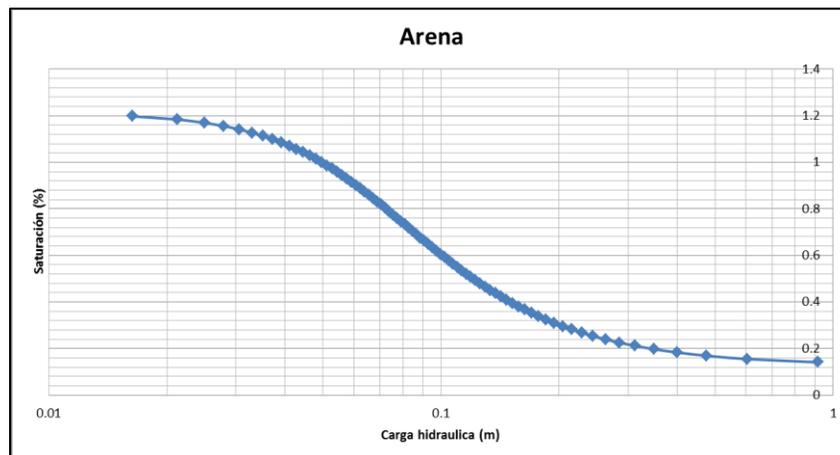


Figura 50 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Limo.

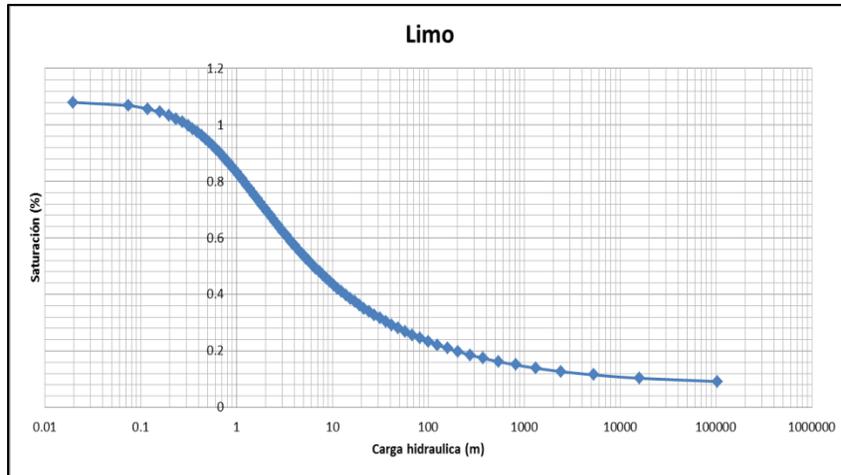


Figura 51 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Arcilla.

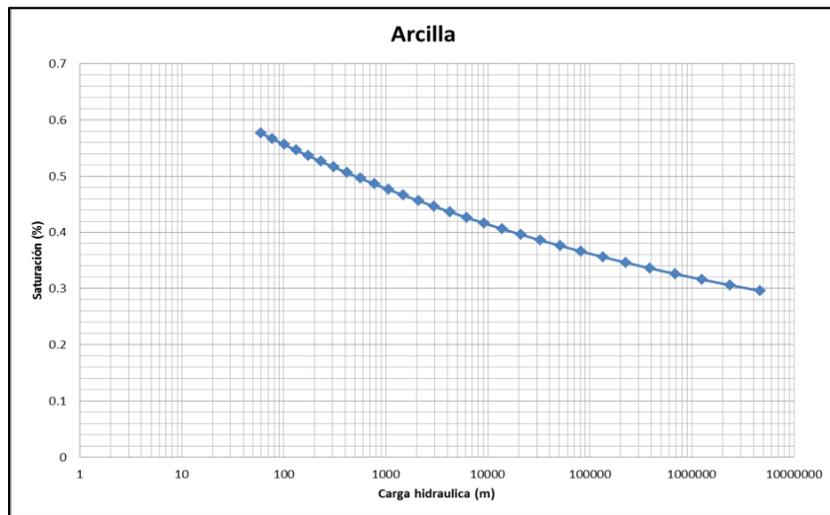


Figura 52 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Franco limoso.

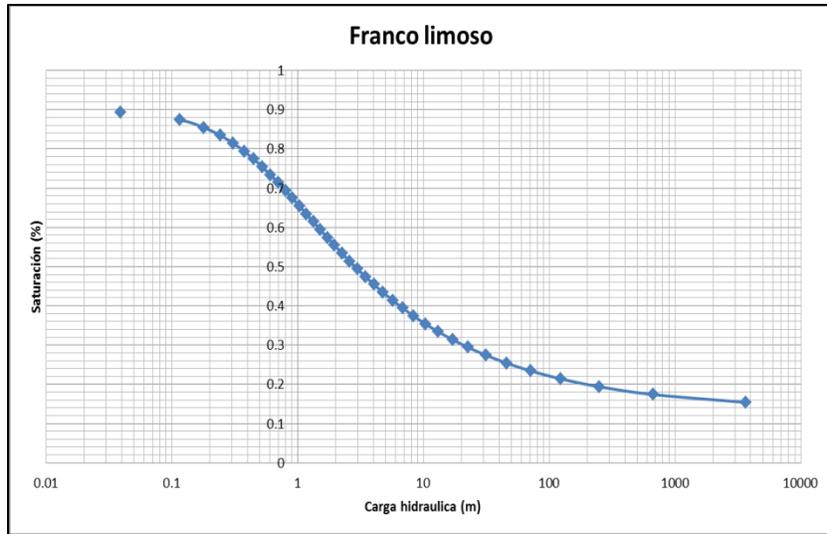


Figura 53 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Limo arcilloso.

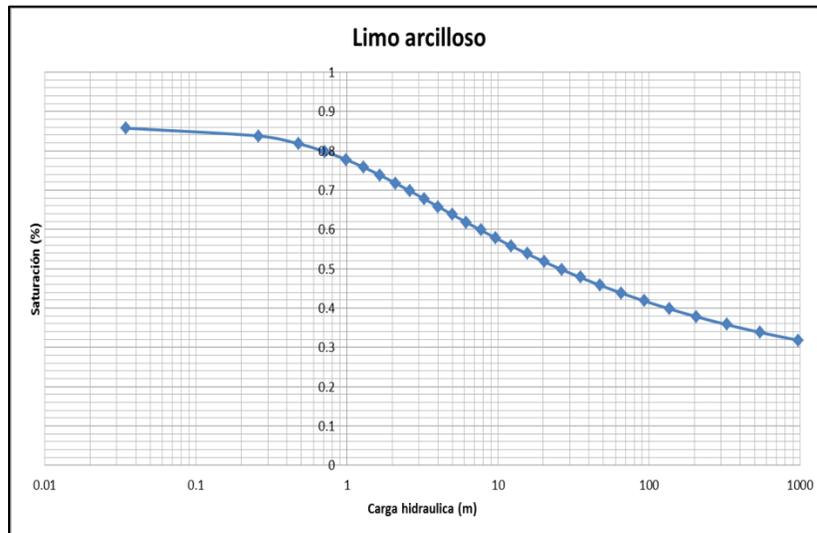
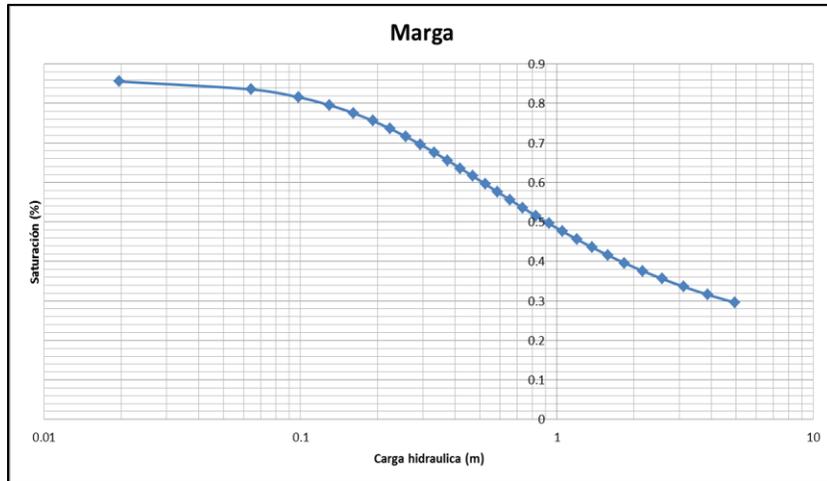
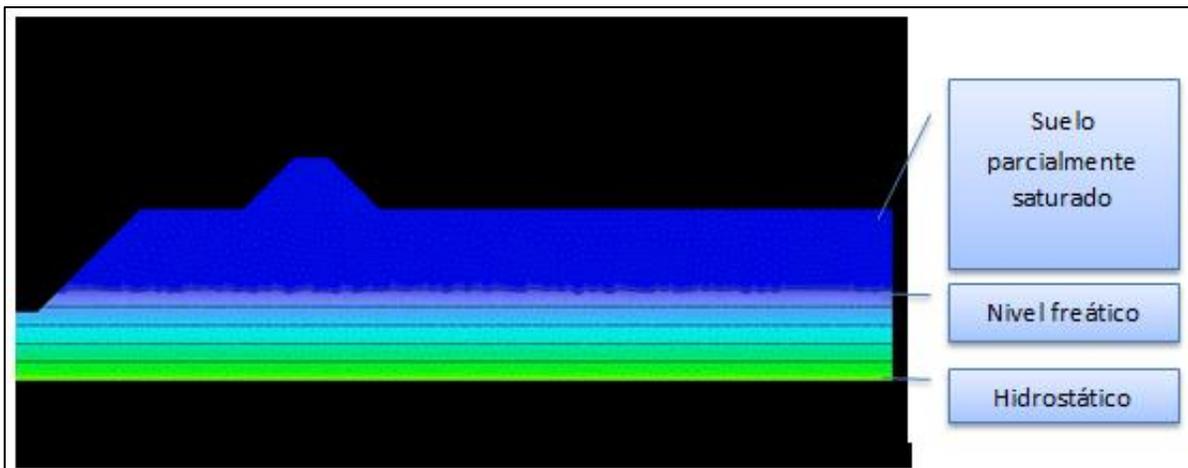


Figura 54 Curva de saturación vs Carga hidráulica para Marga.



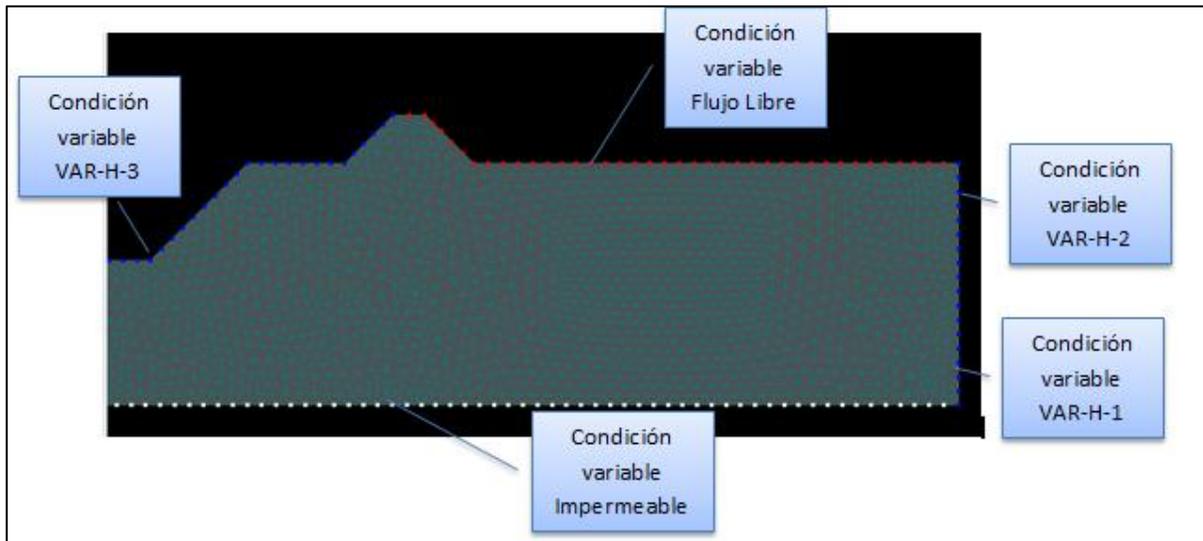
Una vez definidas las condiciones iniciales del modelo, ver Figura 55, se asignan las condiciones de frontera que en el capítulo anterior fueron descritas además de dos condiciones de frontera adicionales, como lo son una frontera impermeable en la base del modelo y un frontera de flujo libre para las superficies que no están en contacto con el agua, gráficamente se puede observar las asignaciones en la Figura 56.

Figura 55 Condiciones iniciales en HYDRUS.



Salve la aclaración, que la saturación varía de acuerdo al material o materiales presentes sobre el nivel freático, por lo tanto la imagen anterior refleja esquemáticamente la asignación de estas condiciones iniciales. Dicho procedimiento se efectúa de manera similar para los diferentes tipos de jarillones.

Figura 56 Condiciones de frontera en HYDRUS.



Una vez cargado al modelo, la asignación de material, las condiciones de frontera y las condiciones iniciales se procede a correr los modelos. Los resultados son presentados en el capítulo de resultados.

Mientras se definía la condición inicial para las modelaciones de HYDRUS se noto que las condiciones de frontera en los extremos del modelo controlaban el comportamiento del nivel freático a medida que el río subía de nivel. Debido a eso y después de haber probado distintas condiciones de frontera, una de las soluciones que se encontró, fue agrandar de forma horizontal el tamaño del modelo.

Así mismo, cabe hacer la aclaración de que el modelo se realizo simétrico, es decir que cada modelación es compuesta por el cauce del río, dos banquetas y dos jarillones. Sin embargo para efectos de los resultados se colocaron solo los del margen derecho sin desconocer que se obtuvieron los mismos en los dos lados.

4.3. MODELACIÓN EN SLIDE

La modelación geotécnica se hace a partir del software SLIDE 5.014. SLIDE es un programa de estabilidad de taludes en 2D que permite evaluar en mecanismos de falla circulares y no circulares, en suelos y rocas. Permite la modelación de niveles freáticos, cargas externas y cargas sísmicas, con distintos métodos que ya están establecidos en el programa.

SLIDE analiza la estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite de tajadas, y permite establecer la superficie de falla crítica en todo el modelo o en un talud específico. Los métodos que se usaron para las modelaciones de los jarillones son Bishop y GLE/Morgenster-Price los cuales vienen ya implementados en el software.

Generalidades

Para el análisis de estabilidad en SLIDE se requiere establecer unas consideraciones generales del modelo, en donde se define el sistema de unidades en el que se quiera trabajar, la dirección de la falla, el máximo número de materiales a trabajar. Así mismo se debe decir al programa que métodos de análisis se quieren, los cuales como ya se había dicho anteriormente los que se trabajaron fueron Bishop y GLE/Morgenstern-Price.

Luego de establecer los aspectos generales del diseño se deben realizar las fronteras del modelo, las cuales se ingresan al programa por medio de coordenadas. SLIDE permite también la definición de los límites entre los que el programa va a buscar las condiciones de falla mas criticas del talud, estos límites se establecieron para el modelo entre la parte inferior del rio izquierda y el borde derecho del jarillón.

4.3.1. DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Una vez se han dibujados las fronteras del modelo se deben establecer los materiales que se tienen, ya sea que haya uno o más, se deben definir las fronteras internas para la separación de los materiales. Para el modelo se definió que tanto el suelo de cimentación como el jarillón serian del mismo material, con la excepción de aquellos jarillones en donde se tenían recubrimientos, filtros o núcleos donde se tenían al menos dos materiales.

Para el cálculo de estabilidad, el programa requiere que se den como datos de entrada los valores correspondientes a los parámetros de resistencia del suelo. Los parámetros que se requieren son el ángulo de fricción interna del material (φ'), la cohesión (c') y el peso unitario del suelo (γ_t). Así mismo pide que se establezca el modelo de falla del suelo que se va a trabajar, el escogido para la tesis fue el de Mohr-Coulomb.

En la Figura 57 se muestra el cuadro de SLIDE en el cual se ingresan las propiedades de los materiales, en ese caso era un Limo Arcilloso. Allí se consigna el valor del peso unitario en kN/m³, la cohesión en kN/m² y el ángulo de fricción interna en grados.

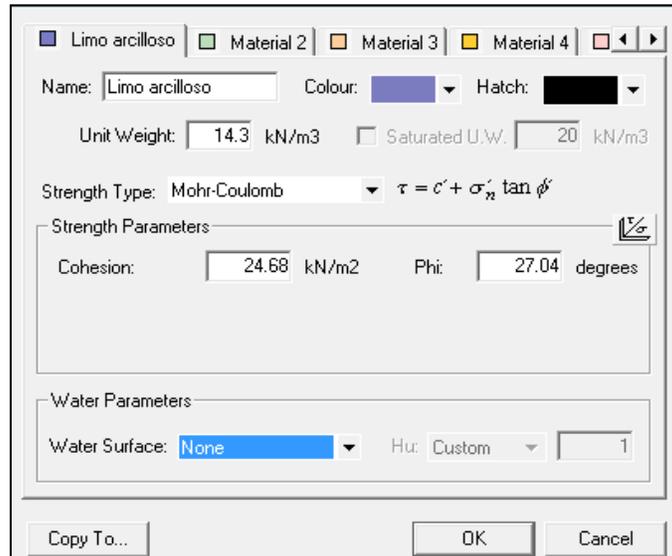


Figura 57 Definición de las propiedades de los materiales en SLIDE.

La definición de los parámetros de resistencia se basó en los 4 suelos que se implementaron para las modelaciones de HYDRUS, que son los materiales para los cuerpos de los jarillones. Adicionalmente también se sacaron los parámetros de resistencia para arena y arcilla que fueron los usados para núcleos, filtros y recubrimientos.

Los valores de los parámetros de resistencia fueron tomados de la exploración realizada para el estudio realizado por el convenio de la Universidad Nacional de Colombia y la CAR, en el que se realizaron los estudios geotécnicos para la adecuación hidráulica del río Bogotá en el año 2009.

La exploración del suelo se realizó entre los sectores de Alicachín y el Humedal de La Conejera, de tal exploración se obtuvo los parámetros de resistencia, mostrados a continuación:

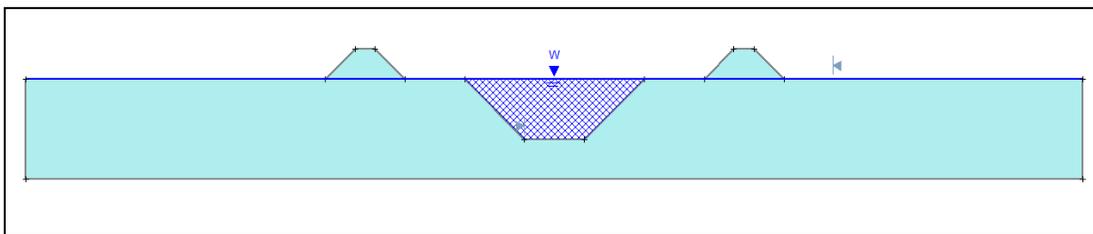
Tabla 10 Parámetros de resistencia del suelo. (CONVENIO INTERADMINISTRATIVO (UN - CAR 514 DE 2007), 2009)

PARAMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO					
	γ_t (KN/m ³)	γ_t (T/m ³)	C' (Kpa)	ϕ (Grados)	
Marga	21.09	2.15	42.31	30.25	Cuerpos de los jarillones
Limo arcilloso	14.30	1.46	24.68	27.04	
Franco limoso	14.30	1.46	24.68	27.04	
Limo	14.30	1.46	24.68	27.04	
Arcilla	18.16	1.85	55.79	28.64	Recubrimientos y núcleos
Arena	20.28	2.07	19.61	31.41	Filtros

4.3.2. NIVEL FREÁTICO

Establecer el nivel freático para las modelaciones se hace con base en las condiciones iniciales que se desean para el modelo. La condición inicial del modelo en HYDRUS considero el ascenso del rio de manera gradual hasta la cresta del jarillón, sin embargo para las modelaciones de SLIDE la condición inicial se puede ver en la Figura 58, donde el nivel freático se dejó al nivel de la base de la estructura, debido a que en los jarillones las presiones de poros se trabajaron en metros (m), resultados obtenidos de las modelaciones de flujo. De igual manera colocando el nivel freático al nivel del rio, se aseguraba que el suelo de cimentación estaba 100% saturado.

Figura 58 Ubicación del nivel freático en las modelaciones de SLIDE.



4.3.3. PRESIONES DE POROS

El régimen de flujo en SLIDE se puede trabajar en forma de grillas o por superficies de agua. Las condiciones de flujo en las mallas se pueden trabajar en

cabezas totales, cabeza de presión y presiones de poros, para las modelaciones se trabajaron en cabeza de presión y para el nivel freático en superficies de agua tal como se explicó en el anterior ítem.

Los datos de presiones de poros en metros fueron obtenidos con las modelaciones en HYDRUS, y se llevaron a SLIDE especificando las coordenadas en X (m) y Y (m), así como el valor de la presión en metros (m). Los datos se introdujeron por medio de la tabla mostrada en la Figura 59 donde se piden los datos ya dichos anteriormente.

Figura 59 Ingreso de las presiones de poros en SLIDE.

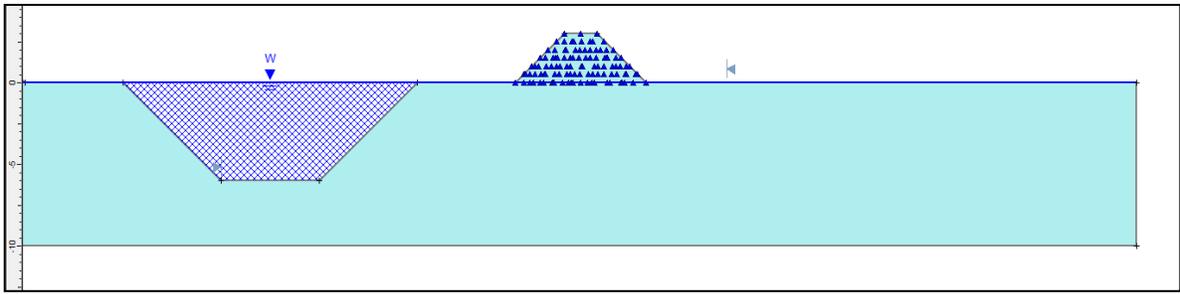
Point	X (m)	Y (m)	Pressure Head (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

NOTE: Pore pressure data can be contoured using Supplemental Contours option in Interpret

Import... Export... OK Cancel

Como resultado final el modelo contenía las cabezas de presión en metros arrojadas por HYDRUS en los jarillones, nivel freático y las fronteras establecidas con el número de materiales que se iban a trabajar. El paso siguiente era correr el modelo y analizar los resultados los cuales hacen parte del siguiente capítulo. Dicho así la modelación en SLIDE, a manera de ejemplo, para un jarillón en un suelo Limo arcilloso sin ningún elemento adicional y con pendiente 1:1 sería la que se muestra en la Figura 60.

Figura 60 Modelación SLIDE, limo arcilloso - pendiente 1:1.



5. RESULTADOS

El capítulo de resultados está dividido en tres secciones correspondientes a flujo, velocidad de flujo y estabilidad de los jarillones. Para los dos primeros apartados se usó el programa de simulación en medios porosos HYDRUS 2.0 y para la modelación de estabilidad se usó SLIDE 5.0, tal como se explicó en el capítulo anterior. A continuación se presenta el resultado en detalle para cada capítulo.

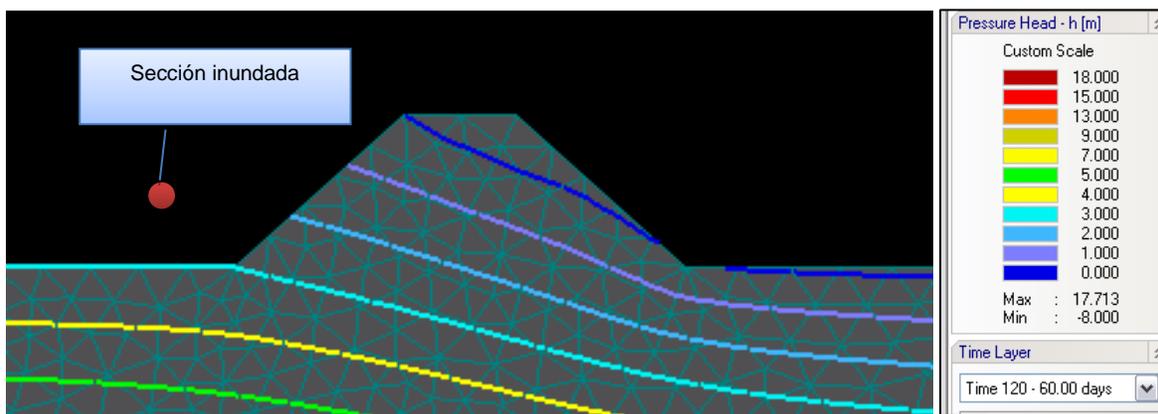
5.1. FLUJO EN HYDRUS

Como se describió en la metodología, una vez cargados los modelos con las condiciones necesarias para su ejecución se obtienen las líneas de flujo para todos los modelos, el objetivo primordial de esta etapa, es encontrar las presiones que sirven de recurso para la alimentación del programa SLIDE.

Si bien los resultados de flujo se ven reflejados en las modelaciones de SLIDE, se presenta la condición para un grupo de jarillones, con el fin de observar las variaciones del flujo en los diferentes escenarios propuestos a lo largo del documento como lo son:

Pendiente:

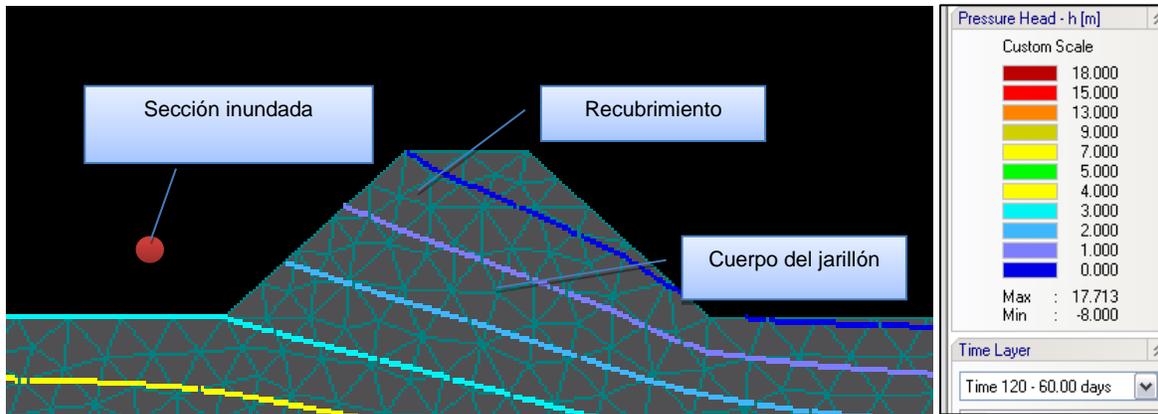
Figura 61 Flujo en jarillón con pendiente 1:1



En la Figura 61 la línea en azul oscuro (0 m) representa el nivel freático, trascurrido a los 60 días en los cuales el nivel del río alcanza su máximo nivel a la corona del jarillón.

Recubrimiento:

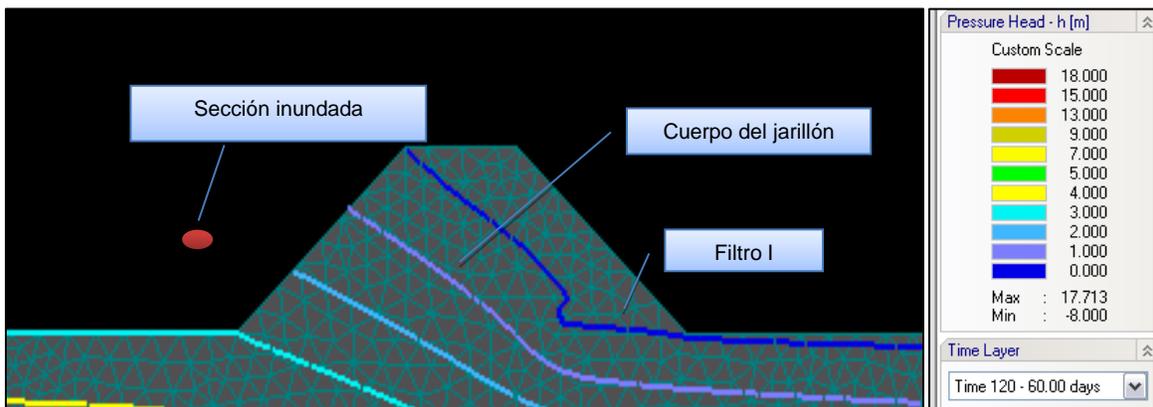
Figura 62 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y recubrimiento en Arcilla.



Como se puede observar en la Figura 62, en términos de flujo el cambio no se puede observar fácilmente, sin embargo la variación en la pendiente de la línea de energía es producida por las distintas permeabilidades debidas al cambio de material (Recubrimiento - Cuerpo de jarillón). El cambio en la pendiente es mayor si la diferencia en las permeabilidades también lo es.

Filtro tipo I:

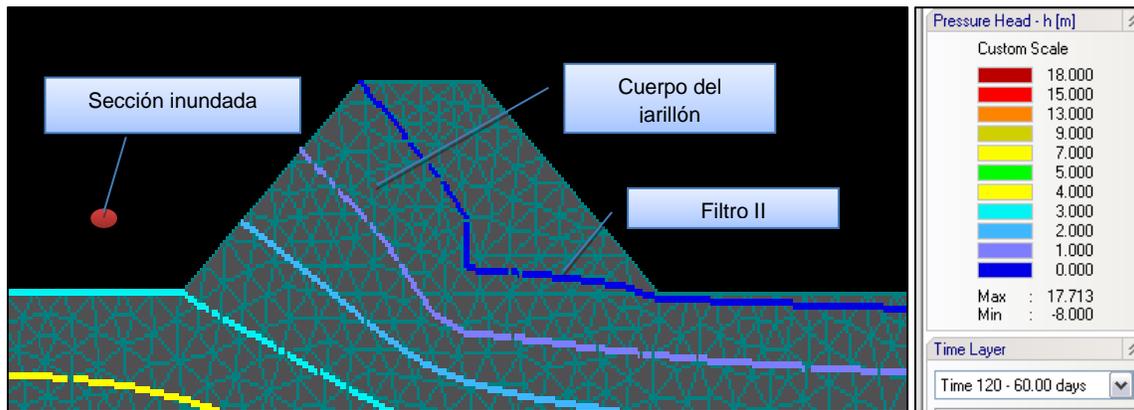
Figura 63 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo I.



Los filtros como elementos concentradores de las líneas de flujo son importantes en la medida que reduzcan la cabeza de presión a lo largo del jarillón, como se observa en la Figura 63 el flujo se concentra en el filtro, dicho fenómeno produce consecuencias adicionales como aumento de las velocidades en las zonas aferentes al filtro, esto se explica en mayor detalle en los capítulos siguientes.

Filtro tipo II:

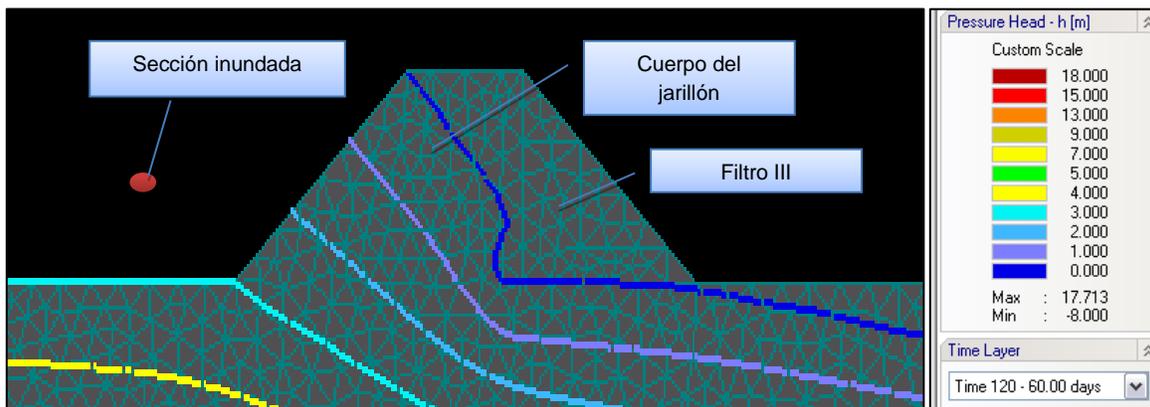
Figura 64 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo II.



Para esta clase de filtros las líneas de flujo se concentran al inicio del mismo, así mismo en la Figura 64 se observa que el área del jarillón con presiones de poros disminuye.

Filtro tipo III:

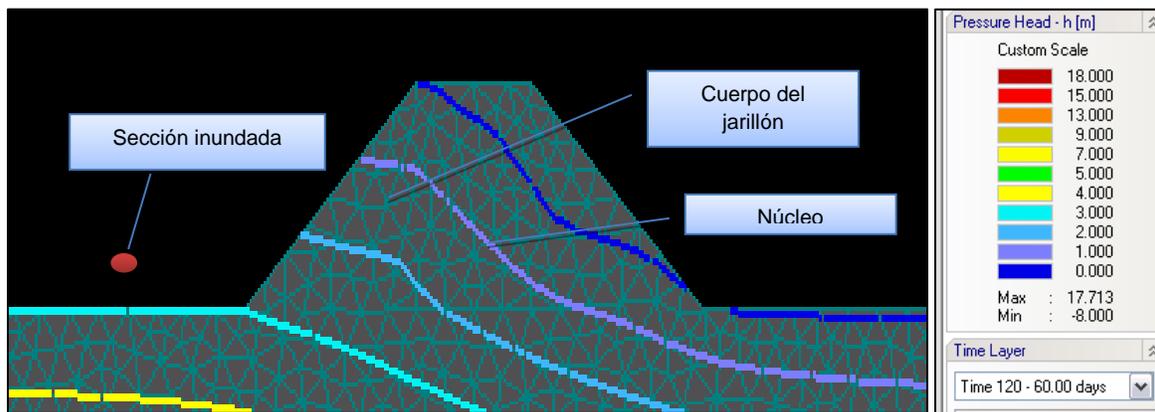
Figura 65 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y filtro tipo III.



La condición de flujo en los filtros chimenea genera menos presiones a lo largo del jarillón, pero como en el caso de todos los filtros concentra velocidades alrededor de este, tal como se puede observar en la Figura 65. En el capítulo de velocidades se observa dicho fenómeno.

Núcleos:

Figura 66 Flujo en jarillón con pendiente 1:1 y núcleo.



Los núcleos son esencialmente elementos para disminuir las velocidades de flujo a lo largo del jarillón, además de retardar el flujo en el proceso de embalse no logra mayores efectos una vez se estabiliza el modelo en el día 60 en lo que corresponde a flujo, tal como se observó en la Figura 66.

Los resultados de las 120 modelaciones realizadas en HYDRUS se encuentran en el anexo de flujo de la presente tesis.

5.2. VELOCIDADES HYDRUS 2.0

En este capítulo más allá de las velocidades a lo largo del cuerpo del jarillón, se observa el efecto de estas en las fallas de estas estructuras por tubificación. Para obtener estos resultados se parte de las características del material como la densidad y la permeabilidad, con las cuales se calculan los gradientes hidráulicos.

Para este cálculo se evalúa el gradiente hidráulico crítico (I_c) de cada jarillón. Se llama gradiente hidráulico crítico al que resulta del perfecto equilibrio entre estas

fuerzas considerando el peso sumergido del suelo, tal como se observa en la Ecuación 13. (Rayano, 2006)

Ecuación 13 Gradiente hidráulico crítico del suelo.

$$I_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_{sat}}$$

Dónde:

γ_{sat} = Peso unitario del suelo saturado (kN/m³).

γ_w = Peso unitario del agua (kN/m³).

Por lo tanto los gradientes hidráulicos críticos para los materiales que se usaron en las modelaciones incluyendo los filtros, núcleos y recubrimientos son los que se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11 - Gradiente hidráulico crítico.

Material	Ic
Franco Limoso	0.458
Limo	0.457
Limo Arcilloso	0.631
Marga	1.150
Arena	1.067
Arcilla	0.851

Una vez calculado el gradiente hidráulico crítico se calcula la velocidad crítica del jarillón para cada material partiendo de un factor de seguridad de 1.2, esta velocidad es el punto de referencia en el cual se generarían procesos de tubificación en caso de superarse.

Tabla 12 - Velocidades limite.

Material	V limite (m/día)
Franco Limoso	0.0412
Limo	0.0229
Limo Arcilloso	0.0088
Marga	0.2392
Arena	6.3396
Arcilla	0.0340

Bajo esta premisa se procede a evaluar el gradiente hidráulico actuante (I_e), tal como se observa en la Ecuación 14 sobre los diferentes jarillones con base a las permeabilidades de los materiales (k) y las velocidades presentes en el modelo (V).

Tabla 13 - Permeabilidad materiales.

Material	k (m/día)
Franco Limoso	0.108
Limo	0.06
Limo Arcilloso	0.0168
Marga	0.2496
Arena	7.128
Arcilla	0.048

Ecuación 14 Gradiente hidráulico actuante del suelo.

$$I_e = \frac{V}{k}$$

Dónde:

V = Velocidad producida en el jarillón.

k = permeabilidad del suelo.

Una vez calculado el I_e , se calcula el factor de seguridad como se muestra en la Ecuación 15 para cada jarillón, en la Tabla 14 se presentan los factores de seguridad para los jarillones estudiados en los que no se adicionaron elementos de diseño. Así mismo los factores de seguridad de los jarillones con recubrimiento, filtro I, filtro II, filtro III y núcleos, se encuentran en las Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19, correspondientes.

Ecuación 15 Factor de seguridad por tubificación.

$$F_s = \frac{I_c}{I_e}$$

Tabla 14 - Factores de seguridad para tubificación, pendientes.

Pendiente	V(m/día)	I_e	F.S
Limo			
1:3	0.032	0.533	0.858

Pendiente	V(m/día)	I _e	F.S
1:2	0.032	0.533	0.858
1:1	0.030	0.500	0.915
2:1	0.023	0.383	1.193
3:1	0.022	0.367	1.248
Franco limoso			
1:3	0.110	1.019	0.449
1:2	0.052	0.481	0.951
1:1	0.046	0.426	1.075
2:1	0.042	0.389	1.177
3:1	0.042	0.389	1.177
Limo arcilloso			
1:3	0.009	0.536	0.854
1:2	0.008	0.476	0.961
1:1	0.007	0.429	1.067
2:1	0.007	0.417	1.098
3:1	0.006	0.357	1.281
Marga			
1:3	0.170	0.681	1.689
1:2	0.258	1.034	1.113
1:1	0.100	0.401	2.871
2:1	0.095	0.381	3.022
3:1	0.096	0.385	2.990

Tabla 15 - Factores de seguridad para tubificación, recubrimiento.

Recubrimiento	V(m/día)	I _e	F.S
Limo			
1:3	0.050	0.833	0.549
1:2	0.035	0.583	0.784
1:1	0.029	0.483	0.946
2:1	0.025	0.417	1.098
3:1	0.023	0.383	1.193
Franco limoso			
1:3	0.050	0.463	0.989
1:2	0.100	1.667	0.275
1:1	0.055	0.917	0.499
2:1	0.046	0.767	0.597
3:1	0.029	0.269	1.705
Limo Arcilloso			
1:3	0.019	1.131	0.404

Recubrimiento	V(m/día)	le	F.S
1:2	0.015	0.893	0.512
1:1	0.013	0.774	0.591
2:1	0.007	0.440	1.038
3:1	0.007	0.417	1.098
Marga			
1:3	0.280	1.122	1.025
1:2	0.240	0.962	1.196
1:1	0.084	0.337	3.418
2:1	0.062	0.248	4.630
3:1	0.006	0.024	47.845

Tabla 16 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro I.

Filtro I	V(m/día)	le	F.S
Limo			
1:3	0.095	1.583	0.289
1:2	0.090	1.500	0.305
1:1	0.047	0.783	0.584
2:1	0.034	0.567	0.807
3:1	0.026	0.433	1.056
Franco limoso			
1:3	0.120	1.111	0.412
1:2	0.098	0.907	0.504
1:1	0.063	0.583	0.785
2:1	0.058	0.537	0.852
3:1	0.050	0.463	0.989
Limo Arcilloso			
1:3	0.014	0.833	0.549
1:2	0.012	0.714	0.640
1:1	0.009	0.536	0.854
2:1	0.008	0.476	0.961
3:1	0.007	0.417	1.098
Marga			
1:3	0.260	1.042	1.104
1:2	0.210	0.841	1.367
1:1	0.174	0.697	1.650
2:1	0.222	0.889	1.293
3:1	0.160	0.641	1.794

Tabla 17 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro II.

Filtro II	V(m/día)	le	F.S
Limo			
1:3	0.105	1.745	0.262
1:2	0.064	1.067	0.429
1:1	0.056	0.933	0.490
2:1	0.054	0.900	0.508
3:1	0.040	0.667	0.686
Franco limoso			
1:3	0.170	1.574	0.291
1:2	0.100	0.926	0.494
1:1	0.080	0.741	0.618
2:1	0.072	0.667	0.687
3:1	0.060	0.556	0.824
Limo Arcilloso			
1:3	0.027	1.607	0.285
1:2	0.026	1.548	0.296
1:1	0.014	0.833	0.549
2:1	0.011	0.655	0.699
3:1	0.010	0.595	0.768
Marga			
1:3	0.230	0.921	1.248
1:2	0.220	0.881	1.305
1:1	0.210	0.841	1.367
2:1	0.200	0.801	1.435
3:1	0.160	0.641	1.794

Tabla 18 - Factores de seguridad para tubificación, Filtro III.

Filtro III	V(m/día)	le	F.S
Limo			
1:3			
1:2			
1:1	0.077	1.283	0.356
2:1	0.054	0.900	0.508
3:1	0.032	0.530	0.863
Franco limoso			
1:3			
1:2			
1:1	0.120	1.111	0.412
2:1	0.100	0.926	0.494
3:1	0.060	0.556	0.824

Limo Arcilloso			
1:3			
1:2			
1:1	0.017	1.012	0.452
2:1	0.012	0.714	0.640
3:1	0.011	0.655	0.699
Marga			
1:3			
1:2			
1:1	0.290	1.162	0.990
2:1	0.214	0.857	1.341
3:1	0.200	0.801	1.435

Tabla 19 - Factores de seguridad para tubificación, Núcleo.

Núcleo	V(m/día)	le	F.S
Limo			
1:3	0.070	1.167	0.392
1:2	0.031	0.517	0.885
1:1	0.025	0.417	1.098
2:1	0.022	0.367	1.248
3:1	0.040	0.667	0.686
Franco limoso			
1:3	0.080	0.741	0.618
1:2	0.070	0.648	0.706
1:1	0.051	0.472	0.969
2:1	0.023	0.213	2.149
3:1	0.022	0.204	2.247
Limo Arcilloso			
1:3	0.022	1.310	0.349
1:2	0.013	0.774	0.591
1:1	0.012	0.714	0.640
2:1	0.022	1.310	0.349
3:1	0.008	0.476	0.961
Marga			
1:3	0.176	0.705	1.631
1:2	0.128	0.513	2.243
1:1	0.121	0.485	2.372
2:1	0.150	0.601	1.914
3:1	0.040	0.160	7.177

Los factores de seguridad obtenidos varían considerablemente entre modelos, en el capítulo de análisis de resultados se analizan las posibles causas a esos cambios. Adicionalmente se presenta gráficamente las zonas que se ven sometidas a estos procesos, identificando si el fenómeno es producido de manera puntual o en un área, tal como se observa en la Figura 67. Si bien la diferencia de materiales genera cambios en las velocidades, las zonas de falla se caracterizan con base a los elementos internos del jarillón. Las velocidades críticas son referentes para esta caracterización.

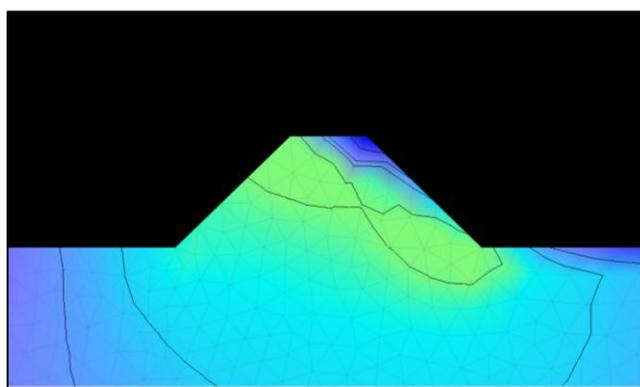


Figura 67 Zona de falla de un jarillón sin elementos adicionales.

El sentido del flujo en el jarillón de la Figura 67 es de izquierda a derecha. Las zonas que están en amarillo son aquellas en las que se superan las velocidades críticas ya calculadas anteriormente dependiendo del material. Puede decirse que las zonas amarillas son aquellas en las que está fallando por tubificación la estructura.

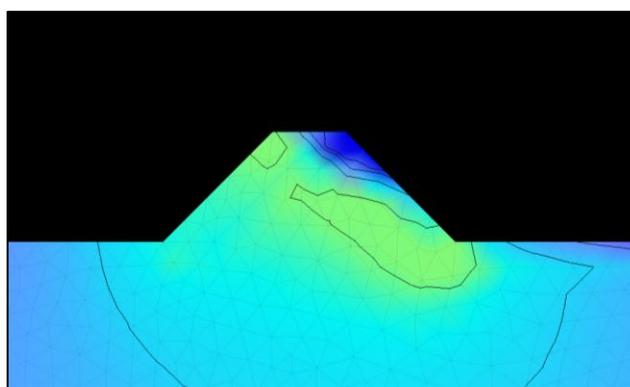


Figura 68 Zona de falla de un jarillón con recubrimiento.

En la Figura 68 el sentido del flujo es de izquierda a derecha, en amarillo se observa las zonas que superan las velocidades críticas en el jarillón, la zona del recubrimiento que está hecha en arcilla no supera las velocidades críticas, aunque se observa en amarillo, debido a que el rango de colores corresponde a un limo.

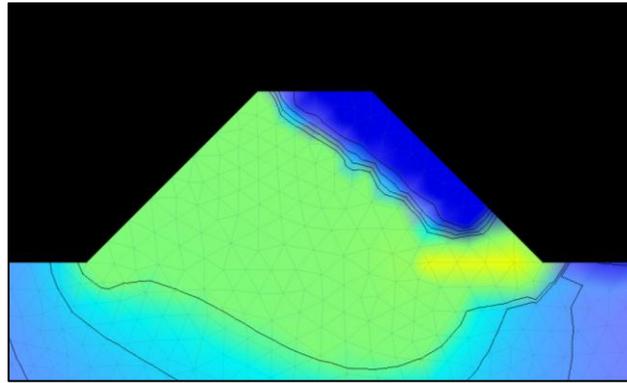


Figura 69 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo I.

En la Figura 69 el sentido del flujo es de izquierda a derecha, en amarillo se observan las zonas que superan las velocidades críticas en el jarillón, la zona con el amarillo marcado corresponde a un filtro tipo I y se observa claramente que las mayores velocidades se concentran en ese punto.

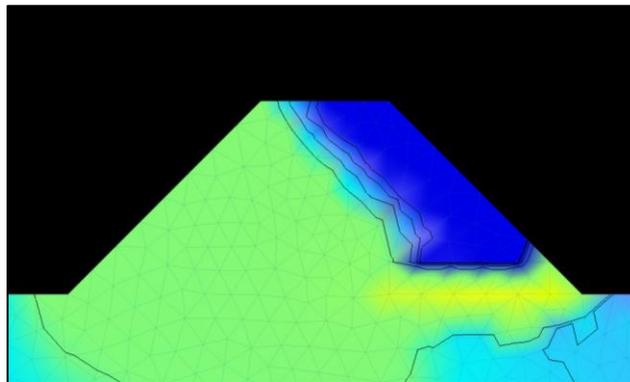


Figura 70 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo II.

En la Figura 70 el sentido del flujo es de izquierda a derecha, en amarillo se observan las zonas que superan las velocidades críticas en el jarillón, la zona con un amarillo marcado corresponde a la ubicación del filtro tipo II, y es claro en su comportamiento que genera debido a la permeabilidad del material, la cual es mayor, mayores velocidades.

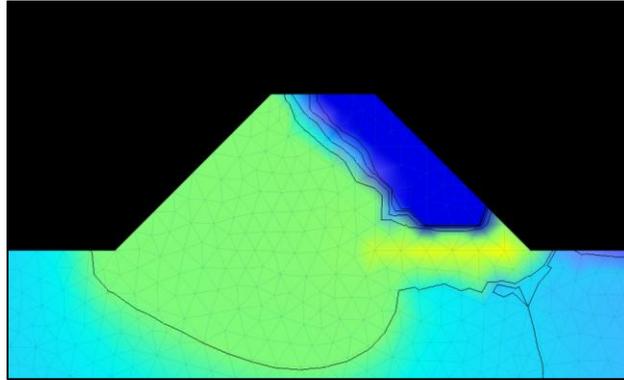


Figura 71 Zona de falla de un jarillón con filtro tipo III.

En la Figura 71 el sentido del flujo es de izquierda a derecha, en amarillo se observan las zonas que superan las velocidades críticas en el jarillón, la zona con un amarillo marcado corresponde al filtro III o filtro chimeneas y como se puede observar concentra las mayores velocidades en la salida del jarillón debido a la permeabilidad del material en que está hecho.

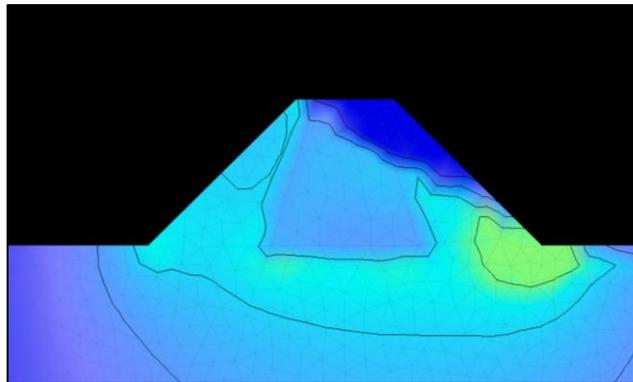


Figura 72 Zona de falla de un jarillón con núcleo.

En la Figura 72 el sentido del flujo es de izquierda a derecha, en amarillo se observa las zonas que superan las velocidades críticas en el jarillón.

Es de anotar que estos resultados varían también en función de la pendiente de los jarillones, ya que el factor de seguridad tiende a aumentar a medida que se disminuya la pendiente. El análisis correspondiente a este proceso se explica en mayor detalle en el capítulo de análisis de resultados.

5.3. MODELACIÓN EN SLIDE

Con la modelación realizada en SLIDE se encontraron los factores de seguridad para cada uno de los jarillones, bajo la condición de presión de poros arrojada por HYDRUS.

Los resultados obtenidos fueron para dos metodologías de cálculo de estabilidad distintas, las cuales fueron la Bishop y la de GLE/Morgenstern-Price ya mencionadas anteriormente. En general los resultados arrojados por SLIDE no mostraron problemas en la parte de estabilidad para las modelaciones, los factores de seguridad fueron altos, lo que indica que ninguno estuvo bajo condición de falla, aun en el momento más crítico, en el cual toda la presión de poros ya se había desarrollado debido al flujo.

Los factores de seguridad que arrojaron las modelaciones en SLIDE muestran que los parámetros de resistencia del suelo tienen una gran influencia en estos, ya que para el suelo de Marga, el cual tenía parámetros de resistencia mucho mayores que los de otros materiales, estos se incrementaron considerablemente, como se puede observar en la Tabla 20 que corresponde a los factores de seguridad encontrados por Bishop, y en la Tabla 21 que corresponde a los encontrados con Morgenstern-Price.

Tabla 20 Factores de seguridad de estabilidad geotécnica (SLIDE), método de Bishop.

		Bishop				
		1:1	1:2	1:3	3:1	2:1
Filtro I	Franco limoso	3.8	3.6	3.8	4.5	3.9
	Limo	3.8	3.5	3.8	4.5	3.9
	Limo arcilloso	3.7	3.9	4.2	4.5	3.9
	Marga	4.7	3.5	3.7	5.9	5.3
Filtro II	Franco limoso	3.8	3.0	3.1	4.8	4.0
	Limo	3.7	2.8	3.1	4.8	4.0
	Limo arcilloso	3.7	3.0	3.2	4.8	4.0
	Marga	4.7	3.6	3.7	5.8	5.4
Filtro III	Franco limoso	4.0			4.9	4.1
	Limo	3.7			4.9	4.2
	Limo arcilloso	3.7			5.0	4.2
	Marga	4.8			5.8	5.5
Núcleos	Franco limoso	4.4	3.7	3.8	4.9	4.1

		Bishop				
		1:1	1:2	1:3	3:1	2:1
	Limo	4.5	4.0	4.2	4.8	4.1
	Limo arcilloso	4.5	3.9	4.1	5.0	4.1
	Marga	5.1	3.9	4.1	6.2	5.4
Pendiente	Franco limoso	3.6	3.2	3.1	5.1	4.5
	Limo	3.8	3.7	3.1	5.1	4.3
	Limo arcilloso	3.7	3.2	3.1	5.1	4.2
	Marga	4.8	4.0	3.7	5.9	5.1
Recubrimiento	Franco limoso	3.6	3.0	3.1	5.1	4.0
	Limo	3.8	2.9	3.0	5.0	4.2
	Limo arcilloso	3.8	2.8	3.0	4.7	4.0
	Marga	4.8	4.5	4.5	6.1	5.8

Tabla 21 Factores de seguridad de estabilidad geotécnica (SLIDE), método de Morgenstern-Price.

		GLE				
		1:1	1:2	1:3	3:1	2:1
Filtro I	Franco limoso	4.0	3.9	3.4	4.5	3.9
	Limo	3.9	3.8	3.5	4.5	3.9
	Limo arcilloso	3.9	4.2	3.9	4.5	3.9
	Marga	4.8	3.8	4.0	5.9	5.3
Filtro II	Franco limoso	3.9	3.3	3.4	4.8	4.0
	Limo	4.0	3.1	3.3	4.8	4.0
	Limo arcilloso	3.9	3.3	3.4	4.8	4.0
	Marga	4.7	3.9	4.0	5.8	5.4
Filtro III	Franco limoso	4.3			4.9	4.2
	Limo	4.0			4.9	4.2
	Limo arcilloso	4.1			5.0	4.2
	Marga	4.9			5.8	5.5
Núcleos	Franco limoso	4.6	4.0	4.3	5.1	4.1
	Limo	4.6	4.3	4.2	5.0	4.2
	Limo arcilloso	4.6	4.2	4.1	5.1	4.3
	Marga	5.7	4.2	4.3	6.5	5.6
Pendiente	Franco limoso	3.8	3.7	3.4	5.1	4.7
	Limo	3.9	3.7	3.3	5.1	4.5
	Limo arcilloso	3.9	3.6	3.3	5.1	4.4
	Marga	4.8	4.3	4.0	5.9	5.3
Recubrimiento	Franco limoso	4.1	3.4	3.1	5.1	4.3

		GLE				
		1:1	1:2	1:3	3:1	2:1
	Limo	4.0	3.3	3.1	4.9	4.7
	Limo arcilloso	4.0	3.4	3.1	4.7	4.5
	Marga	4.9	4.7	4.8	6.1	5.8

En la Tabla 20 y la Tabla 21 los espacios en blanco corresponden a los jarillones con filtros tipo III o chimenea, los cuales debido a su geometría no eran aptos para las pendientes 1:2 y 1:3, como ya se había explicado anteriormente.

A continuación, están las imágenes de los factores de seguridad para cada tipo de jarillón construido en un suelo Franco Limoso usado en la presente tesis, estos resultados tienen en cuenta los dos métodos usados por SLIDE para el cálculo de estabilidad geotécnica.

Los factores de seguridad para jarillones sin elementos adicionales por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la Figura 73 y Figura 74.

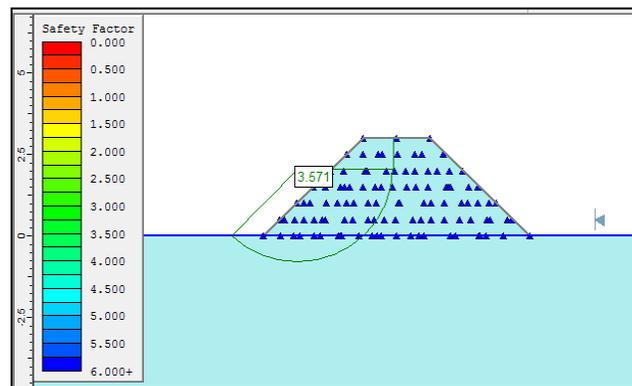


Figura 73 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, sin elementos adicionales.

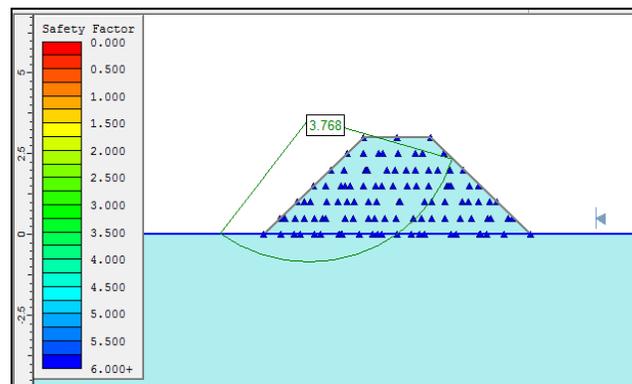


Figura 74 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, sin elementos adicionales.

Los factores de seguridad para jarillones con recubrimiento en arcilla por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la Figura 75 y Figura 76.

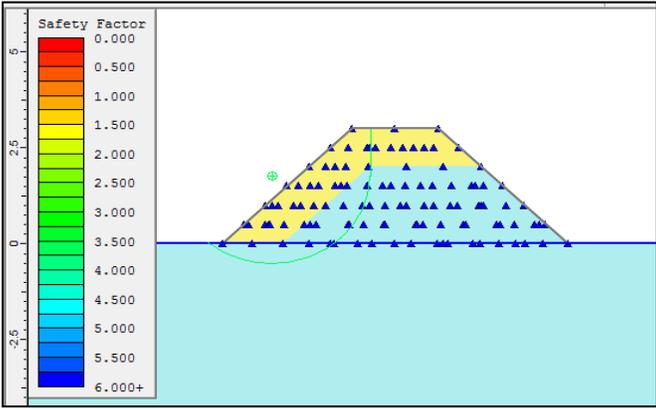


Figura 75 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, recubrimiento.

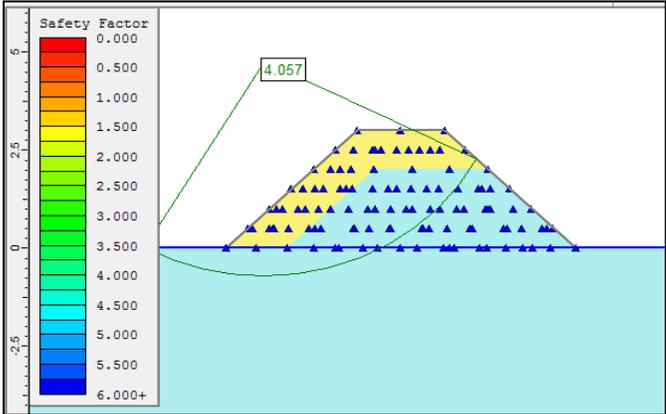


Figura 76 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, recubrimiento.

Los factores de seguridad para jarillones con filtros tipo I por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la Figura 77 y Figura 78.

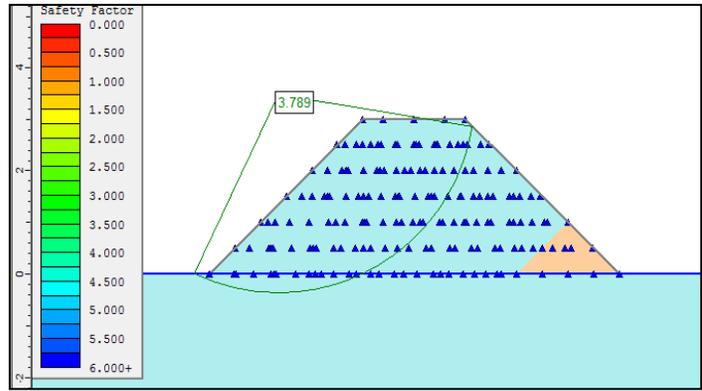


Figura 77 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo I.

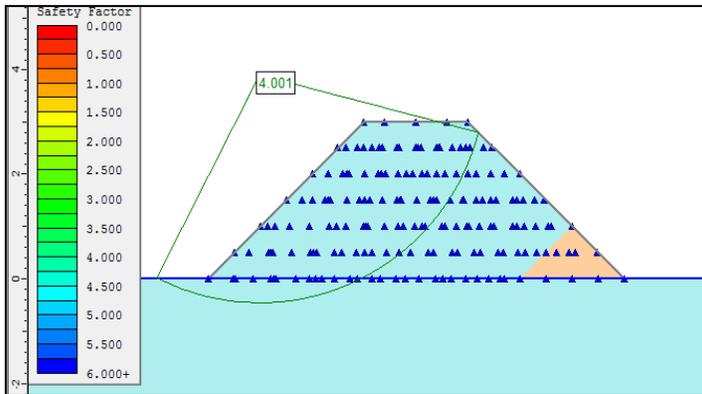
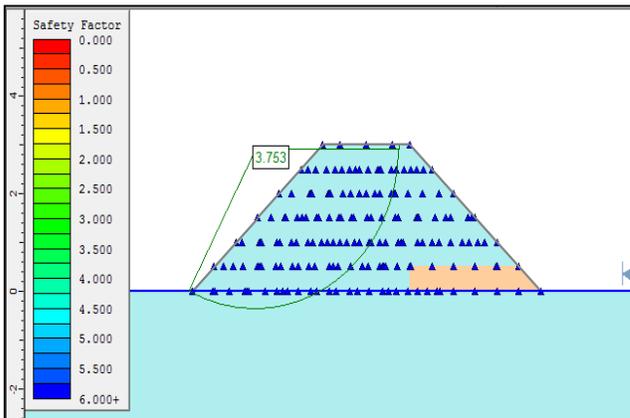


Figura 78 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo I.

Los factores de seguridad para jarillones con filtros tipo II por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la



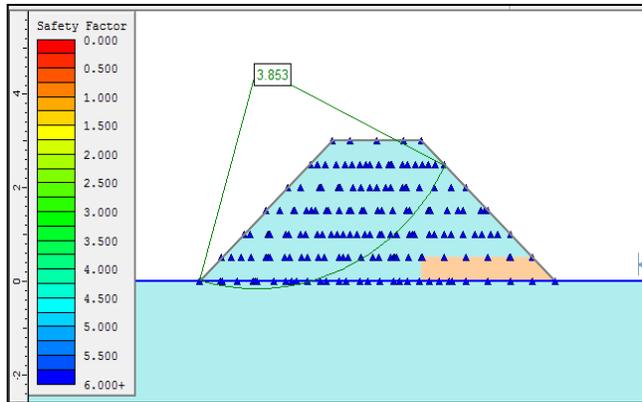


Figura 79 y

Figura 80.

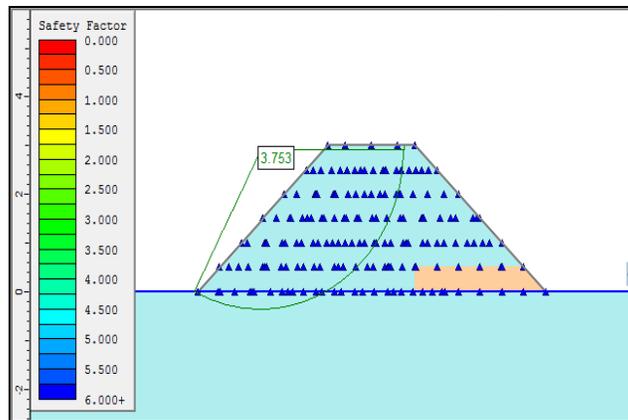


Figura 79 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo II.

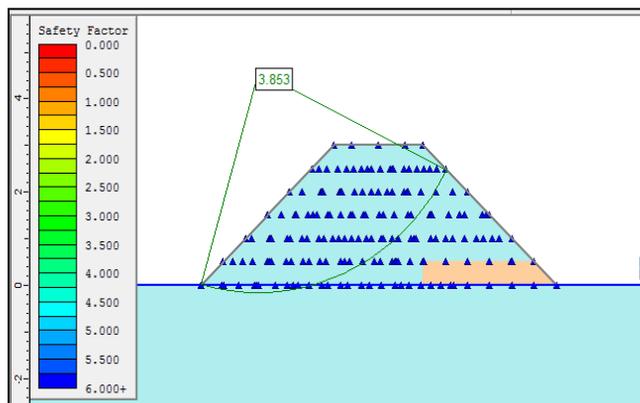


Figura 80 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo II.

Los factores de seguridad para jarillones con filtros tipo III por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la Figura 81 y Figura 82.

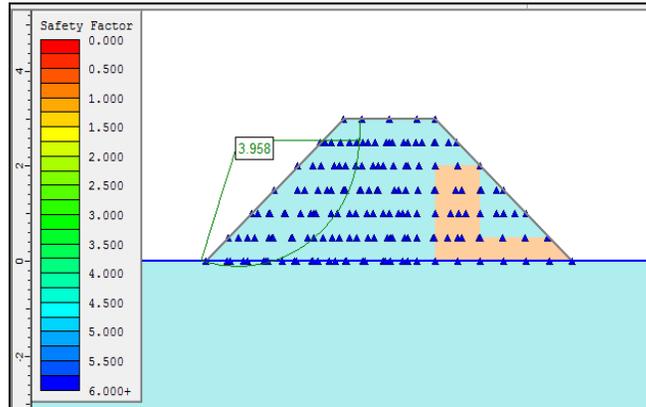


Figura 81 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, filtro tipo III.

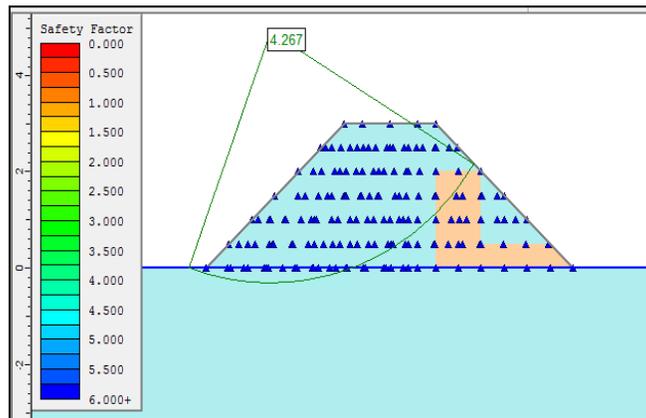


Figura 82 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, filtro tipo III.

Los factores de seguridad para jarillones con núcleos por los dos métodos de análisis escogidos se pueden observar en la Figura 83 y Figura 84.

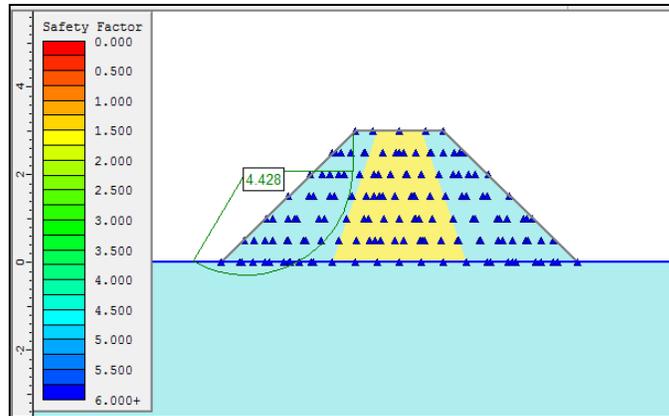


Figura 83 Factor de seguridad método de Bishop, pendiente 1:1, núcleo.

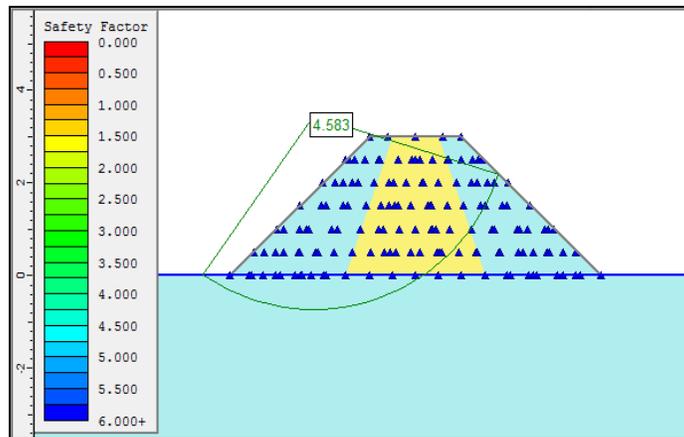


Figura 84 Factor de seguridad método de Morgenstern-Price, pendiente 1:1, núcleo.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. FLUJO HYDRUS 2.0

Si bien existe un capítulo dedicado a la modelación de flujo en HYDRUS, se presenta la particularidad de que estos resultados son la materia prima para la modelación de estabilidad en el programa SLIDE, las consideraciones pertinentes para esta etapa corresponden a la distribución de flujo a lo largo del jarillón, ya que se ven reflejadas en los niveles del flujo en el mismo.

Los elementos adicionales, como lo son las arcillas son un agente que disminuye la velocidad del flujo, esta condición es relevante al momento de analizar los factores de seguridad contra tubificación en el capítulo dedicado a velocidades.

Los filtros son elementos que controlan el flujo ya que lo concentran, no presentan grandes cambios a nivel de estabilidad como se podrá observar en capítulos siguientes, la condición de estabilidad no es un motivo alarmante a la hora de construir el jarillón, ya que los principales problemas se identificaron en lo que corresponde a velocidades.

6.2. VELOCIDADES HYDRUS 2.0

La evaluación de resultados se centra en el análisis de los factores de seguridad contra la tubificación, los resultados se evalúan siguiendo la siguiente metodología:

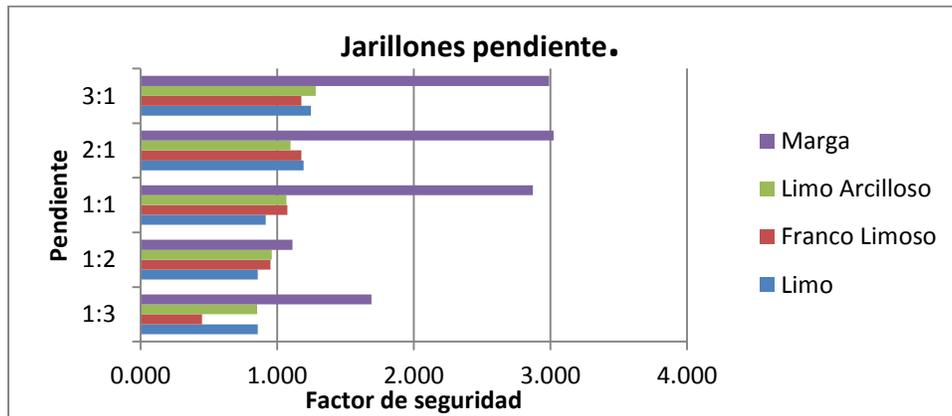
Se realiza un análisis individual que agrupa los jarillones de acuerdo con los elementos estudiados (geometría, recubrimientos, filtros o núcleos), al material del cuerpo del jarillón y a las pendientes que evalúa este trabajo. Esta consideración arroja 6 grupos, cada uno de 20 jarillones.

En el siguiente punto se realiza un análisis general que considera las mejores alternativas según los factores de seguridad encontrados, esto reduce el grupo inicial a 72 jarillones.

Para culminar se consideran alternativas de mejoramiento asociadas al proceso de construcción del jarillón, enfocadas en el grado de compactación de los materiales.

Como se mencionaba previamente el análisis individual se realiza para 6 grupos, el primero de estos agrupa consideraciones únicamente geométricas, es decir pendientes y materiales, los resultados se reflejan gráficamente en la Figura 85.

Figura 85 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Pendientes)

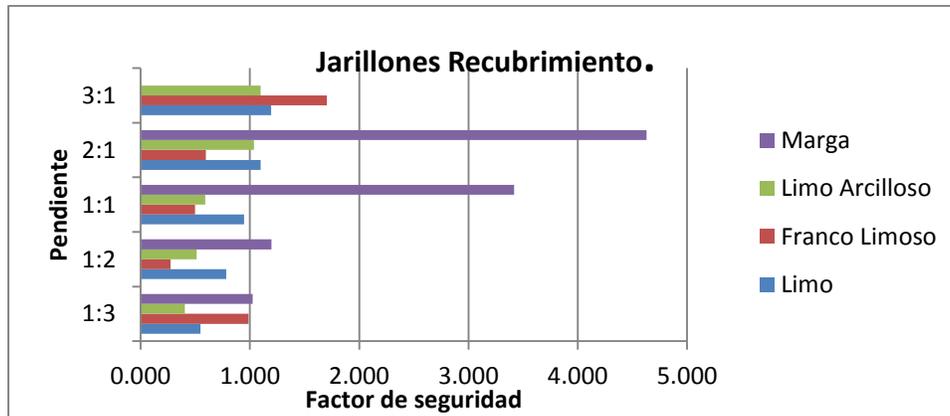


Evidentemente encontramos que existe una brecha importante entre suelos clasificados como Marga y los suelos Limo arcillosos, Franco limosos y Limo. Los factores de seguridad de estos suelos superan el límite previsto de 1.2, lo cual refleja una resistencia ante procesos asociados a la tubificación, uno de los motivos más probables de este resultado es la densidad con la que se trabajó, que es un 32% mayor que los franco limosos y limosos, y un 24% mayor que los suelos limo arcillosos; Esta consideración aplica para cada uno de los grupos evaluados.

Respecto a la pendiente, se observa que la disminución de esta asegura el aumento de los factores de seguridad por el gasto energético del fluido ya que se hace mayor entre más distancia tenga que recorrer, este gasto se refleja en la disminución de las velocidades en un 42% en promedio, partiendo de la pendiente 1:3 hacia las 3:1.

El siguiente grupo corresponde a los jarillones con recubrimiento, los factores de seguridad se observan en la Figura 86.

Figura 86 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Recubrimientos)



Nuevamente se observa que la pendiente es un elemento importante y limitante para el factor de seguridad, para este caso en particular la Marga de pendiente 3:1 presenta un factor de seguridad cercano a 4.2, este dato se excluye de la gráfica debido a la magnitud lo cual indica un posible error, que tras una minuciosa revisión no se pudo identificar en el modelo.

Es importante resaltar que si bien la marga presenta mejores factores de seguridad para los casos de pendiente 1:3 y 1:2 no logra superar el margen definido de 1.2. El tercer, cuarto y quinto grupo considera los factores de seguridad en jarillones con filtro, las gráficas de resultados correspondientes son la Figura 87, Figura 88 y Figura 89.

Figura 87 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros I)

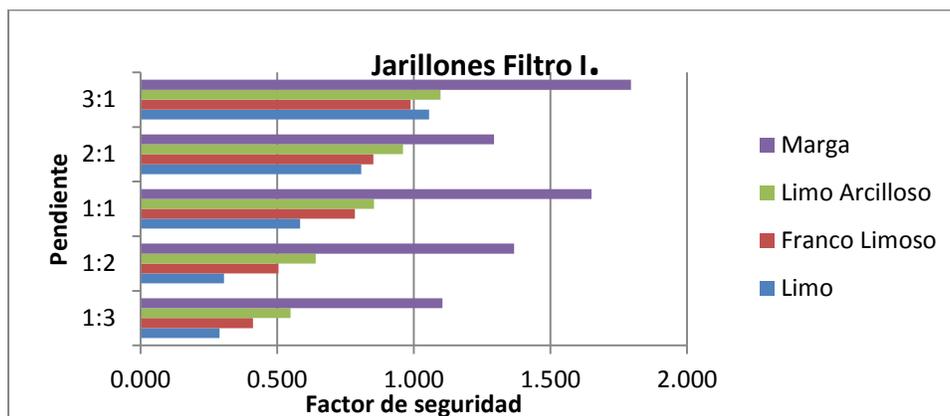


Figura 88 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros II)

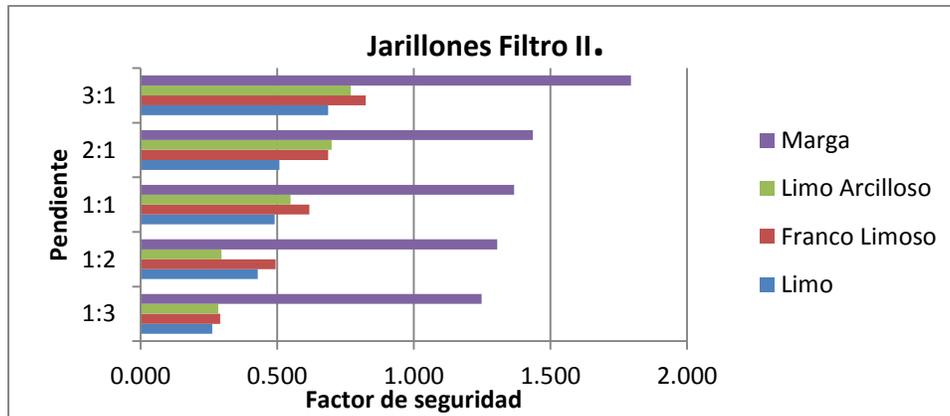
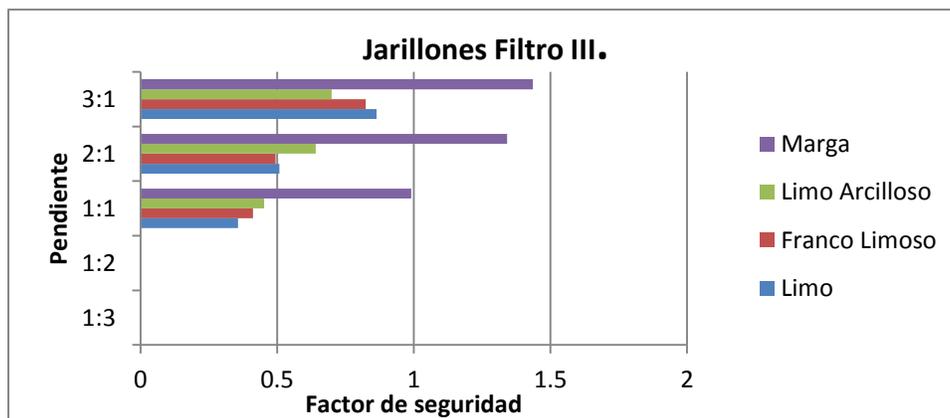


Figura 89 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Filtros III)

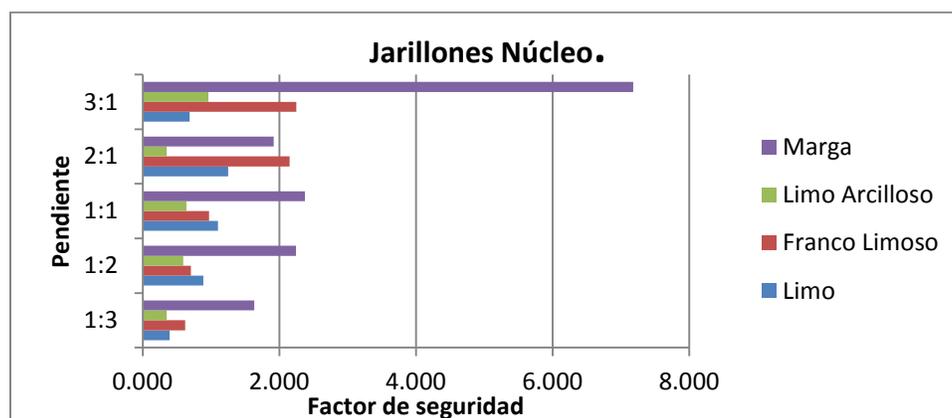


En estos casos e independientemente del tipo de filtro se observa que los factores de seguridad disminuyen, producto de la presencia de filtros que controlan las líneas de flujo, además de acelerarlas lo cual no es importante en la región del filtro, pero si en las regiones aledañas a estos. Esto conlleva a un lavado de finos.

En el capítulo de recomendaciones se consideran posibles alternativas para los diseños de estos filtros, con el fin de mitigar el proceso anteriormente descrito. Una gran conclusión es que la presencia de arenas a lo largo del cuerpo del jarillón representa una alternativa de control de flujo, pero sin un correcto diseño puede dañar la integridad del elemento, los factores de seguridad difieren entre filtros en un orden del 18 - 20% lo cual se vuelve marginal debido al proceso mencionado.

Nuevamente, la pendiente es un elemento importante para controlar la velocidad según la tendencia que se presenta. El último grupo corresponde a los jarillones que contemplan núcleos en su estructura, los resultados se observan en la Figura 90.

Figura 90 Factores de seguridad por tubificación vs Pendientes (Núcleo)



Por último este grupo presenta factores de seguridad mayores a 1.2 para algunos de los jarillones evaluados, en donde no se hace relevante la Marga debido a que los resultados no fueron los esperados. Las arcillas de los núcleos se muestran como una de las mejores alternativas para controlar el proceso de tubificación.

Siguiendo la metodología descrita al inicio de este capítulo se realiza una separación de los grupos previamente descritos, excluyendo las pendientes 1:3 y 1:2 que presentan grandes velocidades reflejados en factores de seguridad bajos. El análisis de este grupo restante corresponde a las pendiente 1:1, 2:1 y 3:1. Resultados que se encuentran consignados en la Tabla 22.

Tabla 22 – Factores de seguridad por tubificación para pendientes 1:1, 2:1 y 3:1.

Material	Tipo	1:1	2:1	3:1
Franco limoso	Pendiente	1.07	1.17	1.17
	Recubrimiento	0.49	0.59	0.78
	Filtro I	0.78	0.85	0.98
	Filtro II	0.61	0.68	0.82
	Filtro III	0.41	0.49	0.82
	Núcleos	0.96	2.14	2.24
Limo	Pendiente	0.91	1.19	1.25
	Recubrimiento	0.95	1.1	1.19
	Filtro I	0.58	0.81	1.06
	Filtro II	0.49	0.59	0.69
	Filtro III	0.36	0.51	0.86
	Núcleos	1.1	1.25	0.69
Limo Arcilloso	Pendiente	1.07	1.1	1.28
	Recubrimiento	0.59	1.04	1.1

Material	Tipo	1:1	2:1	3:1
	Filtro I	0.85	0.96	1.1
	Filtro II	0.55	0.7	0.77
	Filtro III	0.45	0.64	0.7
	Núcleos	0.64	0.35	0.96
Marga	Pendiente	2.87	3.02	2.91
	Recubrimiento	3.41	4.63	47.84
	Filtro I	1.64	1.29	1.79
	Filtro II	1.36	1.43	1.79
	Filtro III	0.98	1.34	1.43
	Núcleos	2.37	1.91	7.17

En rojo están los factores de seguridad que superan el umbral del 1.2 como se mencionaba previamente, la marga salvo el filtro III en la pendiente 1:1. Se observa que la pendiente 3:1 refleja los mayores factores de seguridad.

La presencia de filtros sin un correcto diseño genera lavado de finos como se mencionaba en el apartado de filtros, los recubrimientos son efectivos a medida que las transiciones entre materiales son progresivas. Se observó que entre mayor sea la diferencia de permeabilidades menor es el factor de seguridad, la Tabla 23 muestra este hito, lo cual refleja que los factores de seguridad son mayores para limos en lo que se refiere a recubrimientos, todas las diferencias de permeabilidades están en función de la arcilla que es el material del cual está hecho el recubrimiento.

Tabla 23 – Factores de seguridad por tubificación entre el jarillón y el recubrimiento.

Material	K (m/día)	Material	K (m/día)	Diferencia (%)	Factor de seguridad
Arcilla	0.0480	Franco Limoso	0.1080	125.00%	0.78
		Limo	0.0600	25.00%	1.19
		Limo Arcilloso	0.0168	65.00%	1.1

Por último los núcleos, se muestran como una de las mejores alternativas ya que para algunos casos puntuales reflejan una solución a los problemas asociados con la tubificación. Es importante realizar sellos impermeables en la base del jarillón para evitar que el flujo pase a través del material.

El tercer y último paso de la metodología planteada, refleja un análisis de sensibilidad del grado de compactación que afecta las permeabilidades de los

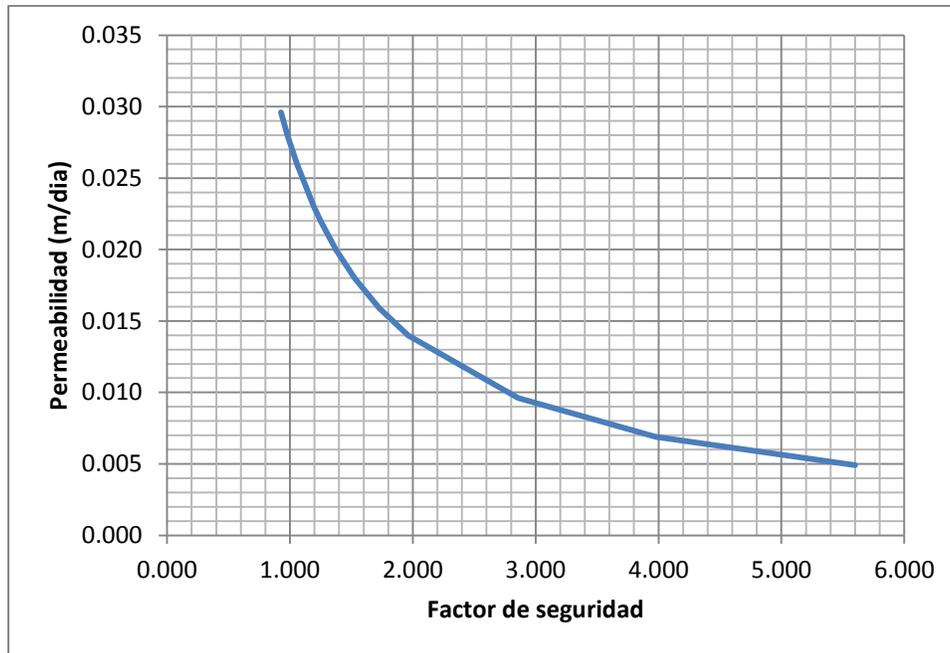
materiales, para esto se parte de la permeabilidad de un limo de 0.06 m/día que se reduce gradualmente lo cual genera una disminución de las velocidades en el cuerpo del jarillón, reflejado en un aumento del factor de seguridad, tal como se puede observar en la Tabla 24 y de manera gráfica en la Figura 91.

Es importante que se tenga en cuenta que la compactación también aumenta el peso unitario del material y que los resultados aquí obtenidos y el análisis de sensibilidad mostrado solo refleja efectos sobre los factores de seguridad para la tubificación.

Tabla 24 - Análisis de sensibilidad

K (m/día)	V(m/día)	I_e	FS
0.055	0.030	0.493	0.927
0.05	0.028	0.467	0.980
0.045	0.026	0.433	1.056
0.04	0.023	0.383	1.193
0.035	0.022	0.367	1.248
0.03	0.020	0.333	1.372
0.025	0.018	0.300	1.525
0.02	0.016	0.265	1.726
0.015	0.014	0.233	1.960
0.01	0.010	0.160	2.859
0.007	0.007	0.115	3.978
0.005	0.005	0.082	5.601

Figura 91 Análisis de sensibilidad.



Se observa en la Figura 91 que la disminución es exponencial, ya que a medida que disminuye la permeabilidad el factor de seguridad aumenta en mayor medida. Es importante aclarar que la permeabilidad se asocia directamente a la densidad del material y que cada material tiene unos límites de compactación por lo tanto unos límites de permeabilidad.

Debido al análisis hecho se puede concluir que la solución para aumentar los factores de seguridad por tubificación, está en aumentar la densidad del material. El cambio en la densidad del suelo se puede lograr por medio de la compactación del material, por lo cual la principal medida a tomar para prevenir la falla del jarillón por procesos de flujo es compactar la estructura.

6.3. ESTABILIDAD EN SLIDE 5.0

De acuerdo a los resultados presentados en el capítulo anterior, de las modelaciones realizadas en SLIDE se pueden concluir algunos de los comportamientos esperados y otros que no arrojaron resultados concluyentes.

Una de los comportamientos que se esperaban y no ocurrió, fue que la estabilidad de los jarillones en general fue muy buena. Esto quiere decir que las variaciones de los factores de seguridad en función de las pendientes y de las estructuras que

se implementaron como filtros, recubrimientos y núcleos no fueron relevantes, y no se evidencio si alguna de ellas favorecía a la estabilidad.

De acuerdo al USACE (2000) el factor de seguridad mínimo que permite la norma para un jarillón es de 1.3, por tanto los factores de seguridad arrojados por las modelaciones de SLIDE cumplen con los requerimientos de la normatividad Colombiana. Debido a eso es evidente que el problema de la construcción de jarillones, que resistan a eventos como las inundaciones no debe estar en función de la estabilidad geotécnica.

Este comportamiento se puede observar en la Figura 92, Figura 93, Figura 94, Figura 95, Figura 96 y Figura 97 en las cuales es evidente que los factores de seguridad son mucho mayores que los exigidos por la norma.

Figura 92 Factores de seguridad en jarillones sin elementos adicionales. Método de Bishop.

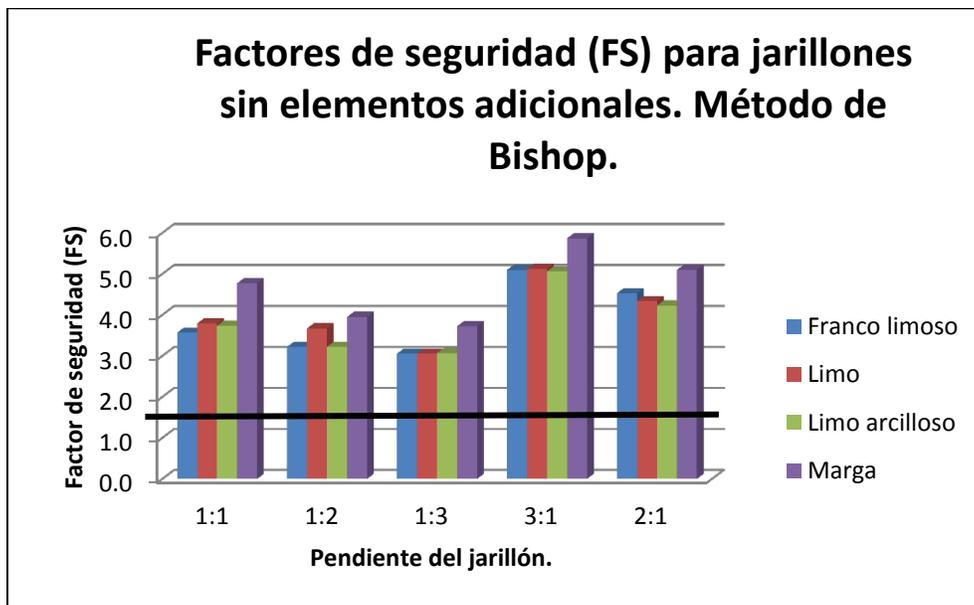


Figura 93 Factores de seguridad en jarillones con recubrimiento. Método de Bishop.

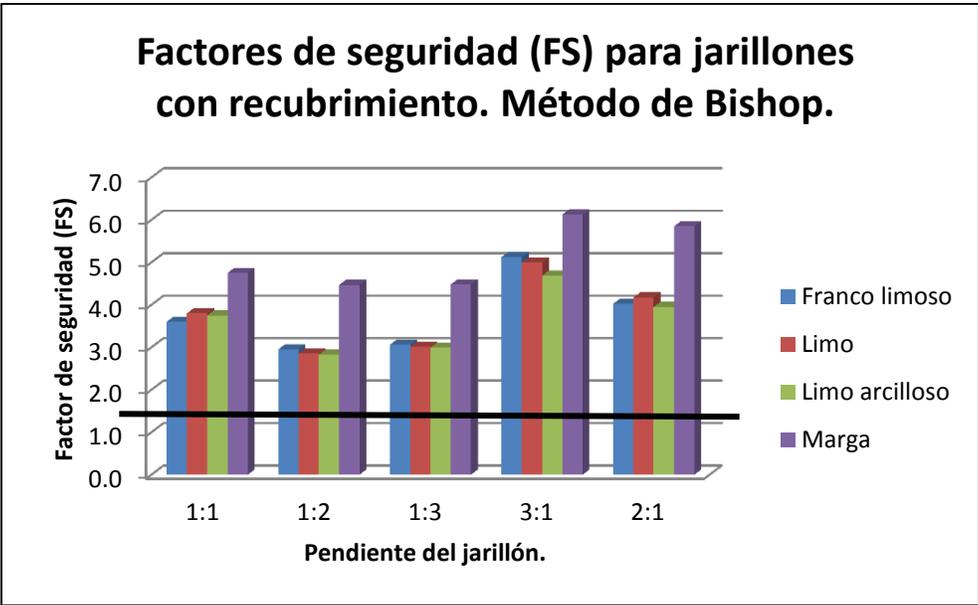


Figura 94 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo I. Método de Bishop.

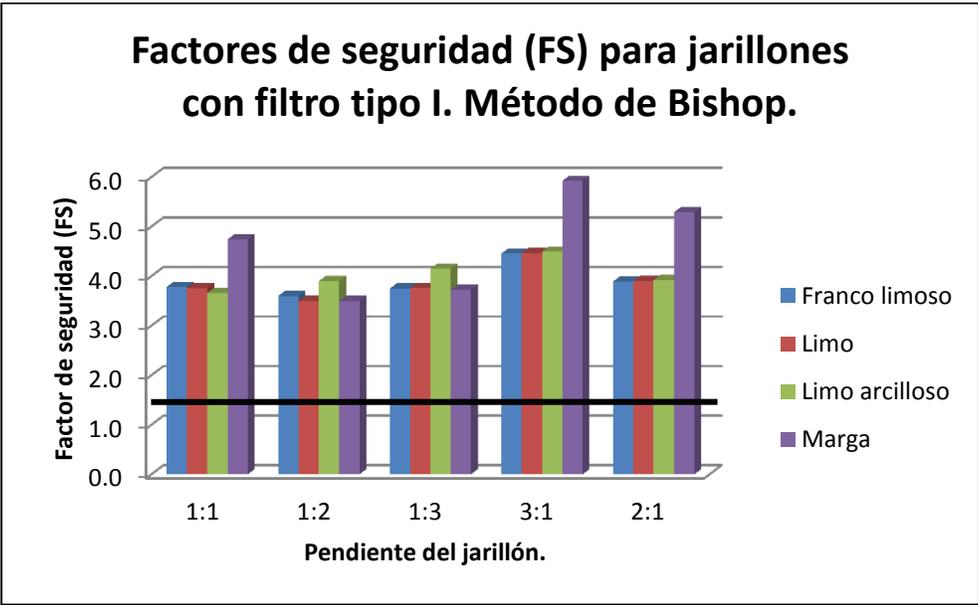


Figura 95 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo II. Método de Bishop.

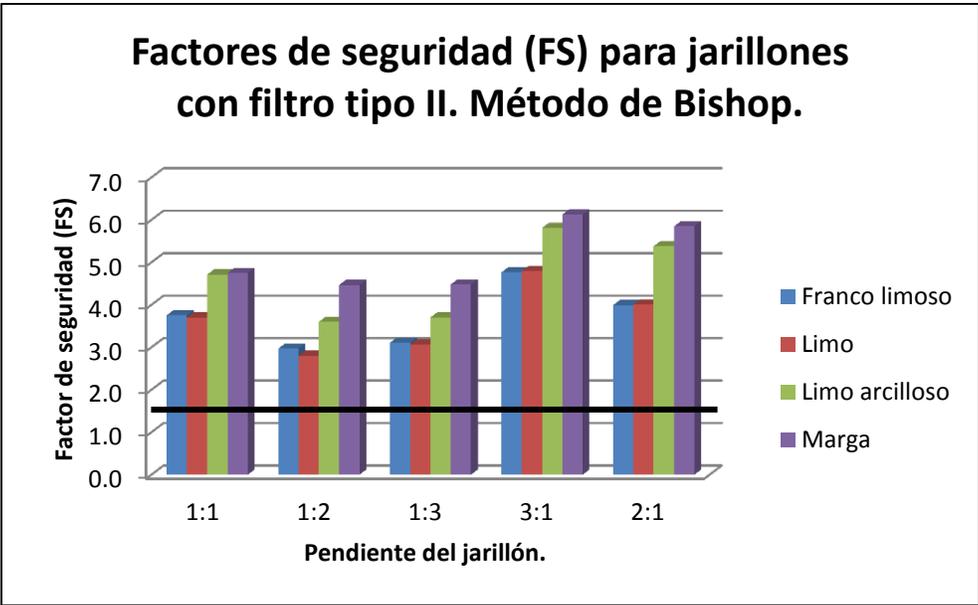


Figura 96 Factores de seguridad en jarillones con filtro tipo III. Método de Bishop.

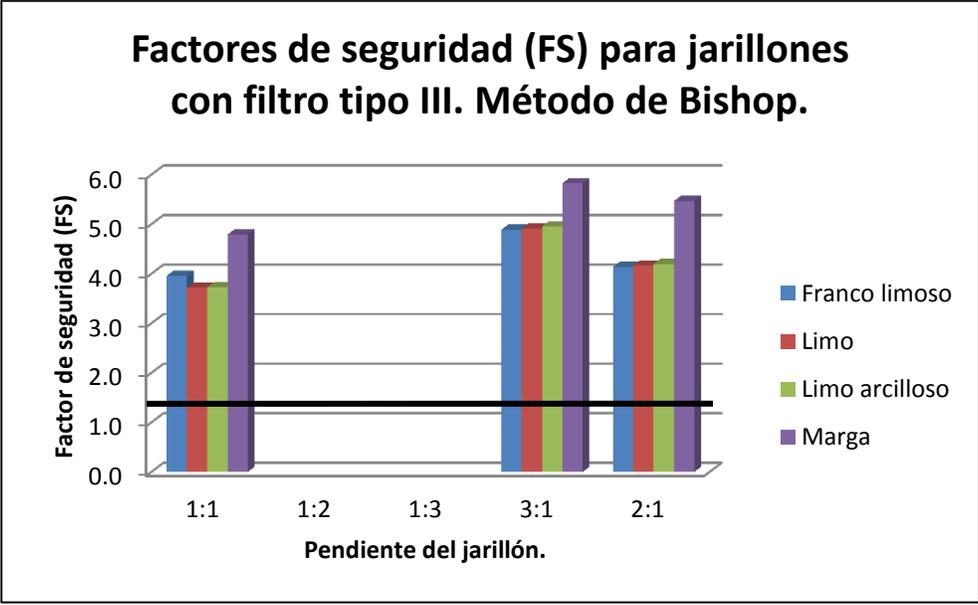
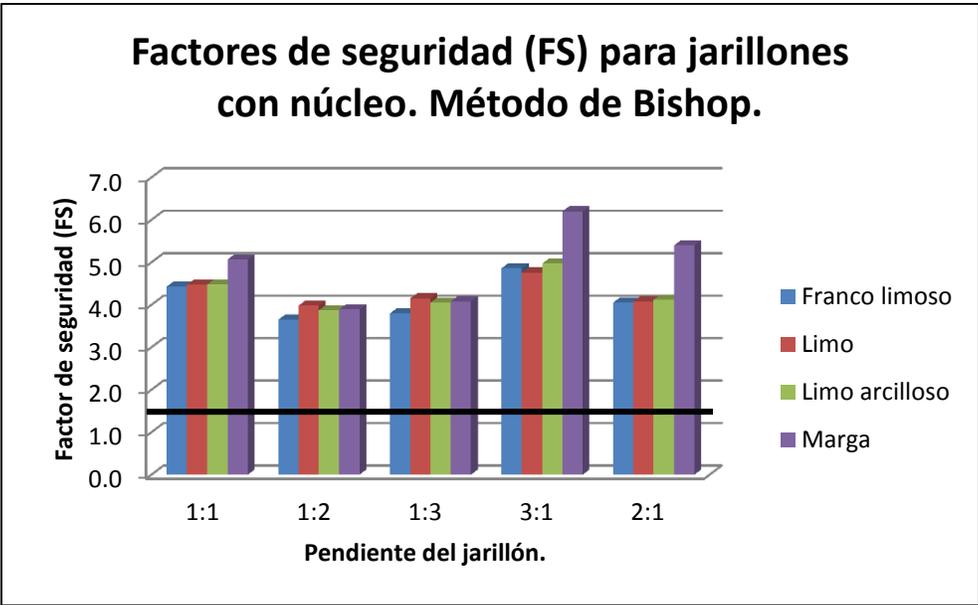


Figura 97 Factores de seguridad en jarillones con núcleo. Método de Bishop.



Como ya se había dicho anteriormente, una de las características más influyentes en los factores de seguridad son los parámetros de resistencia del material. Parámetros que fueron resultado de exploraciones y en los cuales se evidencia que para Marga eran mayores, en especial en términos de cohesión (c') y peso unitario (γ_t). El cambio evidente de la cohesión es tal vez la razón principal por la cual los factores de seguridad, independientemente de la pendiente y del tipo de jarillón utilizado, dan incluso una unidad más que los de las estructuras construidas en los otros materiales.

7. CRITERIOS GEOTÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE JARILLONES

El presente capítulo de esta investigación tiene como objetivo dar cumplimiento al objetivo general planteado al inicio de este documento, aglutina el resultado y análisis de las modelaciones realizadas tanto en SLIDE 5.0 como en HYDRUS 2.0.

Se hace un resumen general de los criterios de diseño establecidos para las modelaciones, correspondientes al ancho de cresta, las pendientes seleccionadas, los recubrimientos, el diseño de filtros y por último el de núcleos, adicionando consideraciones producto del resultado de las modelaciones.

Ancho de cresta.

Si bien el ancho de cresta no fue un criterio variable en la modelación, corresponde un elemento vital del jarillón, según lo observado, debe tener un ancho mínimo de 2m que permita el tránsito de operarios para la construcción de la estructura. Adicionalmente se trabaja con la Ecuación 16.

Ecuación 16 - Ancho de cresta.

$$\text{Ancho de cresta (m)} = H - 1$$

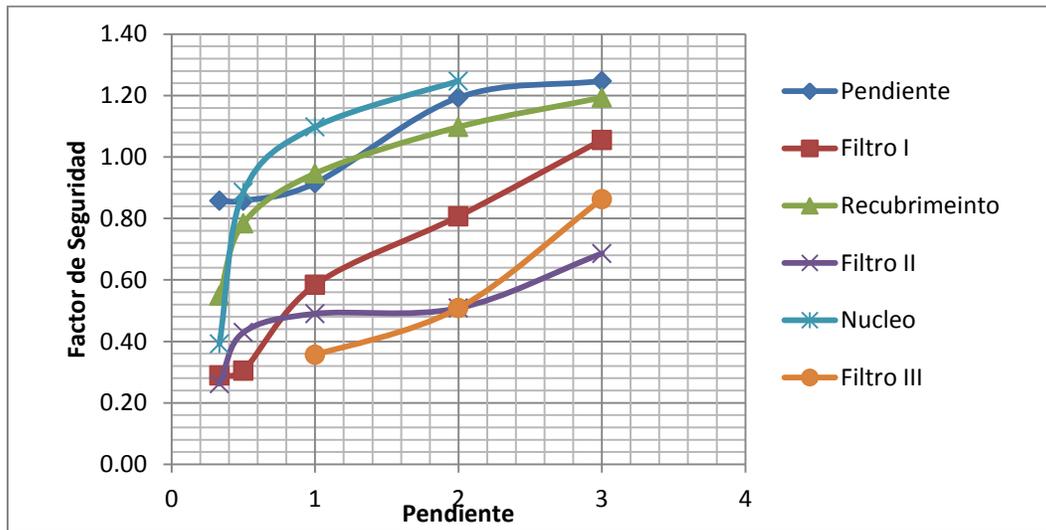
Donde H corresponde a la altura del jarillón.

Es importante resaltar que si bien este ancho no se varía ya que la altura del jarillón permanece constante para todas las modelaciones, debido al alcance de la investigación la bibliografía analizada demuestra que un ancho de cresta mayor afectaría las líneas de flujo a lo largo del cuerpo del jarillón y por lo tanto existirían variaciones en las velocidades.

Pendientes seleccionadas

La selección de pendientes no obedece a un criterio de estabilidad únicamente, se demostró que a medida que se reduce la pendiente el factor de seguridad contra la tubificación aumenta como lo muestra la Figura 98.

Figura 98 – Relación de las pendientes contra factor de seguridad de tubificación.



Nota: Para la anterior figura, cabe aclarar que la pendiente esta en decimales.

Esta relación corresponde a un análisis que solo incluye el criterio de pendiente, que tiene un comportamiento general para todos los materiales evaluados por esta investigación.

Por lo tanto, para mejorar las velocidades dentro de la estructura se recomienda que se construyan los jarillones con menores pendientes, ya que incluso sin colocar elementos adicionales se ve una reducción en las velocidades para estructuras con estas características.

Recubrimientos.

Los recubrimientos funcionan como elementos que mitigan la velocidad de entrada en el jarillón, la elección del recubrimiento como material arcilloso obedece a la baja permeabilidad de dicho material. La relación de permeabilidades entre el material del cuerpo del jarillón y el recubrimiento debe ser la más baja posible. La Figura 99 y la Figura 100 evidencian dicho comportamiento.

Figura 99 - F.S por tubificación en los recubrimientos de acuerdo al material del cuerpo del jarillón

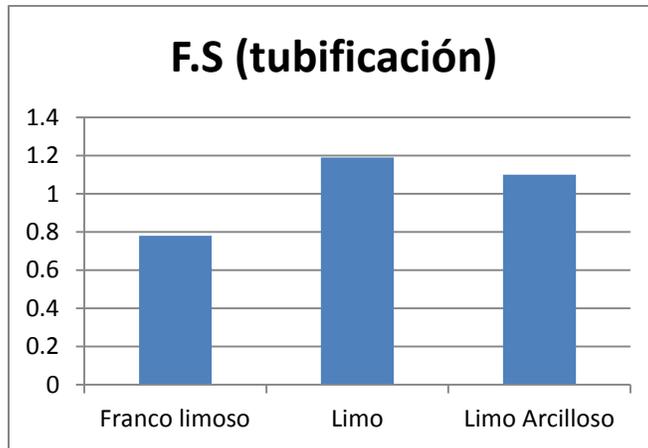
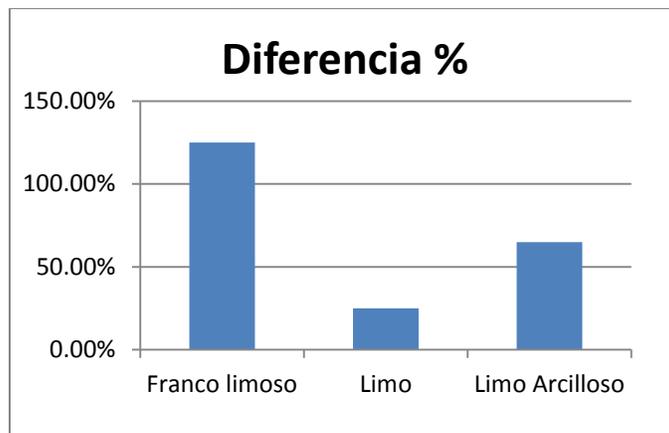


Figura 100 - Diferencia (%) de permeabilidad con base a la permeabilidad del material de recubrimiento.



Como se observa, una diferencia muy alta entre la permeabilidad del cuerpo del jarillón y la del recubrimiento del mismo disminuye los factores de seguridad; este análisis corresponde a las pendientes 3:1 por lo tanto una pendiente baja, junto a una poca diferencia de permeabilidades presenta factores de seguridad mayores contra la tubificación.

Filtros.

Las modelaciones arrojan que el diseño de filtros debe seguir criterios adicionales al de la geometría, como lo son la gradación de estos ya que según las

modelaciones, hay lavado de finos debido a las grandes velocidades en las zonas aferentes a los filtros, lo cual genera factores de seguridad muy bajos.

USACE (2000), el diseño de filtros debe obedecer a criterios de estabilidad que limiten el lavado de finos. Es decir al presentarse cambios de permeabilidades tan drásticos conforme a las granulometrías de los materiales, se hace necesario diseñar los filtros con base a granulometrías más allá que a geometrías, para esto se siguen los siguientes lineamientos:

De acuerdo al USACE (2000) se clasifica el material del filtro de acuerdo al % de finos del mismo que supere el tamiz 200, como lo muestra la Tabla 25.

Tabla 25 - Clasificación del suelo para diseño de filtros.

Tipo de suelo	% de finos que superan el tamiz 200
1	>85
2	40-85
3	15-39
4	<15

Una vez clasificado el material del filtro se determina el D_{15} para este además del D_{15} para el cuerpo del jarillón, El D_{15} del filtro debe ser 3 o 5 veces mayor que el D_{15} del material del cuerpo, pero no menor a 0.1 mm.

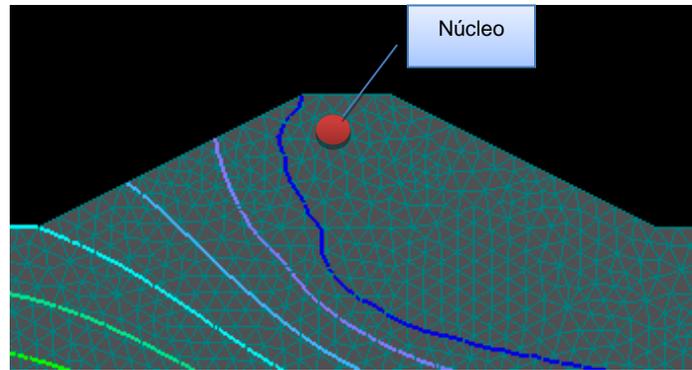
Por último se considera que el máximo tamaño de partícula en el filtro es de 75 mm y que el % de finos que pasa el tamiz 200 debe ser del 5%.

Por lo tanto para minimizar la segregación y efectos relacionados, los filtros deben tener curvas de distribución de tamaño de grano relativamente uniforme.

Núcleos.

Los núcleos son elementos eficientes para la reducción de las velocidades y controlar problemas de tubificación, pero debe considerarse un sello en la base que controle el flujo, ya que como se observa en la Figura 101 el flujo puede evitar el núcleo.

Figura 101 - Flujo en Núcleos.

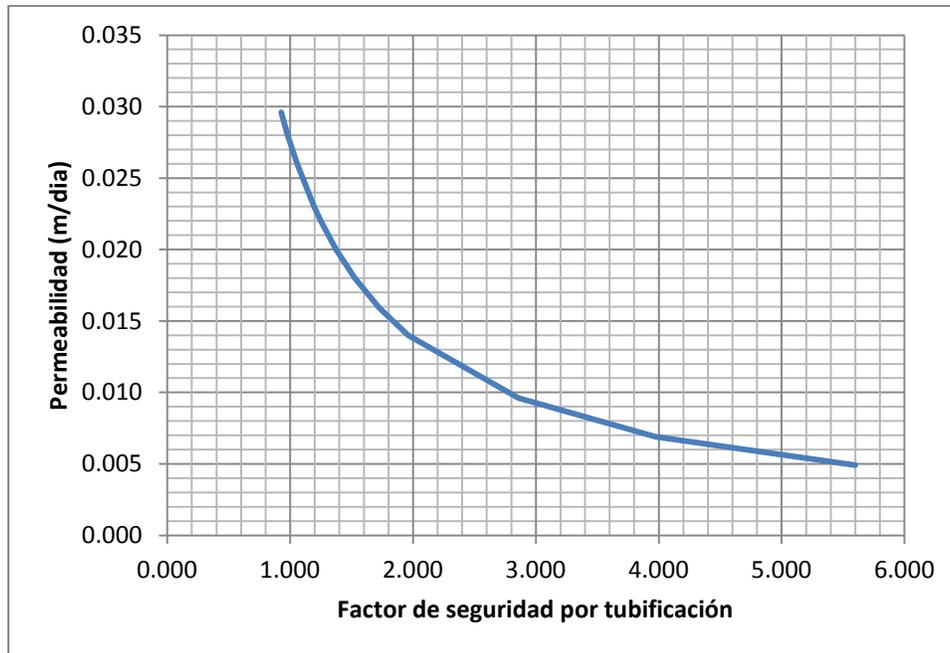


Si bien este fenómeno es importante, no se produce en todos los casos, por lo tanto se deben tener relaciones de permeabilidades que permitan el flujo a lo largo del cuerpo del jarillón sin la necesidad de un sello hidráulico en la base del mismo.

Otras consideraciones

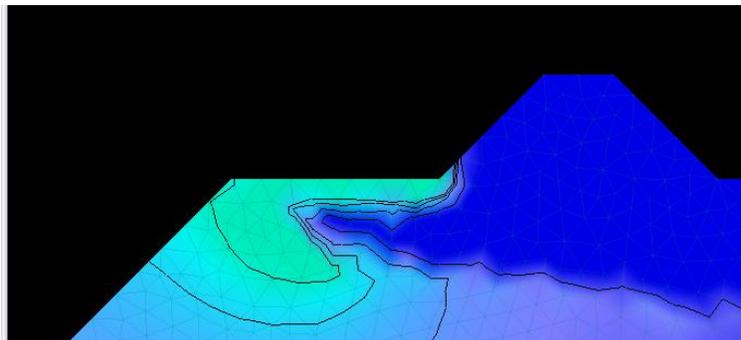
La compactación del material para la construcción del jarillón mejora de forma contundente el factor de seguridad, como se muestra en la Figura 102, esto sumado a elementos como recubrimientos y núcleos, se consideran las formas más eficientes de aumentar el factor de seguridad.

Figura 102 - Análisis de Sensibilidad



Se deben considerar elementos de protección en la banca y zona inundable que no hacen parte del jarillón, ya que existen velocidades punta en el proceso de embalse del jarillón, que pueden terminar en problemas de socavación, dicho fenómeno se observa en la Figura 103.

Figura 103 - Banca y Zona Inundable



Se recomienda buscar alternativas asociadas a la vegetación, que puedan mejorar las condiciones de la banca y proteger la estructura del jarillón.

Aunque no está al alcance de esta tesis, se recomienda que se tengan en cuenta los problemas que se puedan presentar en los jarillones por procesos de desembalse rápido del agua. Ya que puede generar efecto en las velocidades y en la estabilidad geotécnica.

8. CONCLUSIONES

- Se identificaron los modos de falla de carácter geotécnico de jarillones como asentamientos, capacidad portante y deslizamiento. Así como las fallas que pueden ser producidas por problemas de flujo dentro de la estructura.
- Se definieron los tipos de jarillones y las variables de diseño para cada tipo. Los tipos de jarillones que se encontraron fueron las estructuras con recubrimientos, filtros y núcleos. De igual manera las variables de diseño como la altura de la estructura, altura del filtro, ancho del filtro, espesor del recubrimiento, etc., se definieron a partir de las relaciones establecidas de acuerdo a la revisión bibliográfica.
- Se determinó la influencia de las propiedades del suelo en el flujo de agua a través de los diferentes tipos de jarillón. La propiedad que controla el flujo a través de la estructura es la permeabilidad del suelo, así mismo el cambio de estas entre el cuerpo del jarillón y los materiales de los cuales están hechos los filtros, los núcleos y los recubrimientos, controlan las líneas de flujo y las velocidades.
- La influencia de las propiedades del suelo en la estabilidad de jarillones es bastante fuerte, ya que los cambios en los parámetros de resistencia generan grandes cambios en los factores de seguridad de estabilidad en la estructura. Sin embargo la diferencia de las presiones de poros producto del análisis de flujo no genera un cambio significativo en la estabilidad de los jarillones.
- La revisión bibliográfica realizada en el documento incluye elementos adicionales de diseño para jarillones, solo algunos de ellos fueron contemplados para la realización de la tesis debido a las limitaciones que se plantearon inicialmente y que definieron el alcance final, los elementos que se consideraron fueron los núcleos, los filtros y los recubrimientos.
- Las fallas presentadas en los jarillones estudiados, corresponden a procesos que produjeron tubificación en la estructura. Ya que como se evidenció, la estabilidad geotécnica de los jarillones no depende de la implementación de elementos como núcleos, filtros y recubrimientos.

- Los elementos colocados en jarillones como los núcleos y recubrimientos, es decir aquellos que están hechos en arcilla, la cual es un material menos permeable que los materiales de los cuales están hechos los cuerpos de los jarillones, son los que permiten controlar las velocidades y por tanto evitan que se presenten problemas de tubificación.
- La implementación de los recubrimientos debe estar acompañada de un análisis de las transiciones entre materiales, ya que pueden presentarse precisamente allí, picos de velocidades los cuales pueden comenzar procesos de tubificación que finalmente pueden incurrir en la falla de la estructura.
- Como resultado se pudo observar que los núcleos son la mejor solución para evitar problemas de tubificación en el jarillón. Sin embargo se evidencio que debido a su baja permeabilidad, el flujo toma el camino que requiera menos esfuerzo por lo que termina evitando el núcleo. Debido a eso, implementar núcleos es la mejor opción si además se coloca un sello en la parte inferior del jarillón, de forma que se garantice un avance del flujo a través del mismo y se reduzcan las velocidades.
- Los filtros estudiados en el presente documento presentan lavado de finos debido a que su diseño está basado en la geometría. Para el diseño de los filtros, es necesario hacerlo en función de la gradación del material, para que no se presenten problemas de erosión que terminen incurriendo en una falla propia del elemento, y que finalmente afecte la estructura en general.
- Una de las alternativas con las cuales se pueden mejorar las velocidades que producen problemas de tubificación, es la compactación del material para reducir su permeabilidad. Además, es conveniente que la compactación vaya acompañada con elementos como los mostrados en el documento, que permitan solucionar problemas puntuales.
- Debido al proceso de embalse que se genera en el jarillón cuando sube el nivel del agua, se deben considerar elementos de protección en la banca y margen inundable del río. Esto debido a que en esas zonas que no hacen parte de la estructura como tal del jarillón, también se presentaron problemas que pueden terminar en fallas.
- La estabilidad geotécnica de los jarillones, en cuanto a inestabilidad de los taludes no se hizo relevante, debido que los factores de seguridad dieron

mayores a los establecidos por la USACE (2000). Concluyendo que los elementos colocados en la estructura como los núcleos, filtros y recubrimientos no son determinantes ni tienen mayor aporte a la estabilidad de los taludes.

- Los resultados de SLIDE están condicionados por los de HYDRUS. Sin embargo estos a su vez están determinados por los parámetros de resistencia del suelo, teniendo en cuenta el peso unitario (γ_t) se puede observar que entre mayor sea la compactación del material, lo son también los factores de seguridad en SLIDE y en HYDRUS, como lo muestra el análisis de sensibilidad.

9. BIBLIOGRAFIA

- Atsumi, M. (2009). River management in Japan, with focus in river levee.
- CAR. (2012). Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del río Bogotá.
- Chaprapia. (2004). *Obras marítimas*.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*.
- Ciria. (2002). *Design of river and canal structures*.
- CONVENIO INTERADMINISTRATIVO (UN - CAR 514 DE 2007). (2009, February). Estudios geotécnicos para la adecuación hidráulica del río Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional CAR. (2011). El cambio climático en la región.
- Division de recursos hidricos. (2002). Modelo de simulacion flujo no saturado HYDRUS 2D. Universidad de Chile.
- Harr, M. (1991). Groundwater and seepage. Dover Publications.
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering.
- Lewis, B. (2002). *Farm Dams - Planning, Construction and Maintenance*.
- Lloret, P. (2000). *Gestión de cuencas hidrográficas*.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. J. Wiley. Retrieved from <http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=OKLWRKAKL2ROWF>
- Meza, V. (2012). SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n31/n31a02.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Ideam, & Emjabada de Holanda. (2010). El ABC del cambio climático en Colombia.

- Montañes, J. L. (2011). *Canales hidráulicos: proyecto, construcción, gestión y modernización*.
- Morgenstern, N. ., & Price, V. E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. *Géotechnique*.
- Oldecop, L. (2007). *Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros*.
- Perucca, L., & Navarro, C. (2006). *Fenomenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina*.
- Rayano, M. (2006). Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra. Universidad Nacional del Nordeste de Argentina.
- Ridley, A. M. (1997). *The measurement of soil moisture suction*. University of London.
- Sanz. (2005). Cálculo del tiempo de concentración en hidrología con GRASS. SIGTE.
- Silva. (1998). *Hidrología básica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Smith, G. N., & Smith, I. G. N. (1998). *Elements of Soil Mechanics*. Wiley.
- Suarez Diaz, J. (2006). *Diseño de presas de tierra*. Universidad Industrial de Santander. (2006). *Amenanzas sísmicas*.
- USACE. (1989). Retaining and flood walls.
- USACE. (2000). Design and construction of levees.
- Vallarino, E. (1997). *Obras hidráulicas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones.
- Vasquez, L. (2003). *Modelación numérica de la respuesta hidrológica de taludes* (Tesis Maestria). Universidad Nacional de Colombia.

10. ANEXOS

- **Anexo 1:** Modelaciones de flujo en HYDRUS 2.0

Contiene seis (6) carpetas con los archivos de las modelaciones que se reparten de la siguiente forma:

Carpeta 1: Pendientes.

Carpeta 2: Recubrimientos.

Carpeta 3: Filtros tipo I.

Carpeta 4: Filtros tipo II.

Carpeta 5: Filtros tipo III.

Carpeta 6: Núcleos.

Adicionalmente cada carpeta agrupa 20 modelaciones que corresponden a cuatro materiales y cinco tipos de pendiente.

- **Anexo 2:** Modelación de estabilidad en SLIDE 5.0

Contiene cinco (5) carpetas con los archivos de las modelaciones que se reparten de la siguiente forma:

Carpeta 1: Pendiente 1:1.

Carpeta 2: Pendiente 1:2.

Carpeta 3: Pendiente 1:3.

Carpeta 4: Pendiente 2:1.

Carpeta 5: Pendiente 3:1.

Adicionalmente cada carpeta contiene seis carpetas más correspondientes a filtros I, filtros II, filtros III, núcleos, recubrimiento y pendientes, dentro de las cuales están las modelaciones de los 4 materiales.

El total de anexos corresponde a 120 modelaciones en HYDRUS y 120 modelaciones en SLIDE, que se adjuntan en un CD.