

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## Facultad de Ingeniería

### Carrera de Ingeniería Civil

#### **Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

#### **AUTORES:**

Katherine Alexandra Nieto Correa  
CI: 0104932660

Juan Sebastián Zambrano Jaramillo  
CI:0104409743

#### **DIRECTORA:**

Ing. Karla Johanna Santacruz Reyes, PhD.  
CI: 0301731394

**Cuenca – Ecuador  
2018**



## RESUMEN

En ingeniería la presencia de agua en los suelos es un fenómeno muy común que requiere un tratamiento para evitar erosión, socavación, migración de finos y presiones indeseables. Como solución a este problema se emplean filtros para ayudar en la evacuación del agua sin dañar la estructura interna del suelo. El problema parte de la selección de filtros sin criterios técnicos adecuados, ya sea por el tipo de suelo o a la obra realizada, resultando un gasto innecesario, debido a que no cumplen con su objetivo.

En el presente trabajo, para un suelo fino, se analiza sus propiedades físicas como granulometría, plasticidad, relaciones gravimétricas, volumétricas y permeabilidad. Basándose en el criterio de Terzaghi, que plantea la condición de retención y permeabilidad, se diseña un filtro granular un filtro geotextil y una combinación de ambos. Estos se aplican al suelo base para determinar su permeabilidad y la migración de finos a diferentes gradientes hidráulicos.

La migración de finos se produce en un 12.50% para el filtro granular, 52.61% para el filtro geotextil y un 34.69% para el filtro combinado. En la evacuación del flujo, el filtro combinado presenta una permeabilidad de  $2.65 \times 10^{-5}$  cm/s, frente a  $2.62 \times 10^{-5}$  cm/s del filtro geotextil y  $1.61 \times 10^{-5}$  cm/s del filtro granular. Adicionalmente, con respecto al análisis de costos, el filtro granular resulta el más económico. Para el tipo de suelo analizado se selecciona el filtro combinado al presentar la mayor eficiencia en la permeabilidad, garantizando una reducción de la migración de finos.

### Palabras clave:

filtro combinado, filtro geosintético, filtro granular, migración de finos, permeabilidad.



## ABSTRACT

In engineering the presence of water in soils is a very common phenomenon that requires a treatment to avoid erosion, scour, fine migration and undesirable pressures. As a solution to this problem, filters are used to help in the evacuation of water without damaging the internal structure of the soil. The problem starts with the selection of filters without adequate technical criteria, either because of the type of soil or the work done, resulting in unnecessary expense, because they do not meet their objective.

For this work, for a fine soil containing silt and clays, its physical properties are analyzed as granulometry, plasticity, gravimetric, volumetric and permeability ratios. Based on the Terzaghi criterion, which are the retention and the permeability condition, a granular, geotextile and a combination of the two filters are designed. These are applied to the base soil in tests to determine their permeability and the migration of fines to different hydraulic gradients.

The fines migration occurs in 12.50% for the granular filter, 52.61% for the geotextile filter and 34.69% for the combined filter. In the evacuation of the flow, the combined filter has a permeability of  $2.65 \times 10^{-5}$  cm/s, compared to  $2.62 \times 10^{-5}$  cm/s of the geotextile filter and  $1.61 \times 10^{-5}$  cm/s of the granular filter. Additionally, related to cost analysis, the granular filter is the most economical. For the selected soil the combined filter is chosen because it exhibits the highest efficiency in permeability, guaranteeing a reduction in fines migration.

### Keywords:

combined filter, geosynthetic filter, granular filter, migration of fines, permeability.



## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	15
1.1. Justificación.....	16
1.2. Alcance .....	16
1.3. Objetivos .....	17
1.3.1. Objetivo General.....	17
1.3.2. Objetivos Específicos .....	17
2. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Propiedades del suelo .....	19
2.1.1. Clasificación de las partículas.....	19
2.1.2. Distribución granulométrica.....	20
2.1.3. Límites de Atterberg y Plasticidad.....	22
2.1.4. Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	24
2.1.5. Color .....	29
2.2. Flujo de agua en el suelo.....	29
2.2.1. Ecuación de Bernoulli y carga en un punto .....	30
2.2.2. Gradiente hidráulico .....	31
2.2.3. Ley de Darcy.....	32
2.2.4. Permeabilidad.....	33
2.2.5. Tipos de ensayos de permeabilidad y equipos.....	34
2.3. Filtros.....	40
2.3.1. Criterios Básicos dados por Karl Terzaghi.....	41
2.4. Filtros granulares .....	42
2.4.1. Criterios de diseño para un filtro granular .....	44
2.4.2. Evolución de diseño de filtros granulares .....	47
2.4.3. Diseño de filtro granular .....	56
2.5. Filtros geotextiles .....	61
2.5.1. Tipos de geotextiles.....	62
2.5.2. Funciones de un geotextil .....	63
2.5.3. Criterios de diseño para un filtro geotextil.....	64
2.5.4. Evolución de diseño de filtros geotextiles .....	69
2.5.5. Diseño de un filtro geotextil .....	78
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	82
3.1. Selección y caracterización del suelo base .....	82
3.1.1. Obtención de muestras .....	82
3.1.2. Distribución granulométrica.....	83



3.1.3.	Índice de plasticidad.....	86
3.1.4.	Clasificación del suelo.....	86
3.1.5.	Densidad aparente.....	87
3.1.6.	Gravedad específica.....	88
3.2.	Permeabilidad.....	89
3.3.	Migración de finos.....	91
3.4.	Diseño de filtros.....	92
3.4.1.	Filtro granular.....	92
3.4.2.	Filtro geotextil.....	98
3.4.3.	Filtro combinado.....	102
4.	RESULTADOS.....	104
4.1.	Selección y caracterización del suelo base.....	104
4.1.1.	Distribución granulométrica.....	105
4.1.2.	Índice de plasticidad.....	106
4.1.3.	Densidad aparente.....	107
4.1.4.	Clasificación del suelo.....	108
4.1.5.	Granulometría del suelo base.....	109
4.1.6.	Gravedad específica del suelo base.....	110
4.1.7.	Análisis químico del suelo base.....	110
4.1.8.	Permeabilidad del suelo base.....	111
4.2.	Diseño de filtros.....	113
4.2.1.	Diseño de filtro granular.....	113
4.2.2.	Diseño de filtro geotextil.....	116
4.2.3.	Filtro combinado.....	121
4.3.	Eficiencia de filtros.....	121
4.3.1.	Permeabilidad.....	121
4.3.2.	Migración de finos.....	128
4.3.3.	Relación entre permeabilidad y migración de finos.....	134
4.3.4.	Análisis económico.....	134
4.3.5.	Comparación de eficiencia.....	137
5.	CONCLUSIONES.....	140
6.	RECOMENDACIONES.....	141
7.	REFERENCIAS.....	143
8.	ANEXOS.....	146

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Relación de vacíos para diferentes tipos de suelos (Das, 2001).....	25
Tabla 2: Contenido natural de agua en estado saturado (Das, 2001). ....	27
Tabla 3: Peso específico seco (Das, 2001). ....	27
Tabla 4: Gravedad específica (Das, 2002a). ....	28
Tabla 5: Descripción cualitativa de depósitos de suelo (Das, 2002a).....	28
Tabla 6: Rangos de permeabilidad de suelos naturales (Powers & Corwin, 2007).....	34
Tabla 7: Ecuaciones empíricas y sus limitaciones para estimar la permeabilidad (Cabalar & Akbulut, 2016). ....	39
Tabla 8: Diseño de filtro granular: Análisis de suelo base. ....	57
Tabla 9: Diseño de filtro granular: Criterio de retención. ....	58
Tabla 10: Tipos de aplicación del filtro.....	58
Tabla 11: Diseño de filtro granular: Criterio de permeabilidad. ....	59
Tabla 12: Diseño de filtro granular: Límites al 100% y 5%.....	59
Tabla 13: Diseño de filtro granular: Prevención de una granulometría discontinua. ....	59
Tabla 14: Diseño de filtro granular: Prevención de segregación. ....	60
Tabla 15: Criterio de Permeabilidad (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).....	70
Tabla 16: Criterio de Retención (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).....	71
Tabla 17: Criterio de Colmatación (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).....	72
Tabla 18: Valores constante B, para arenas, arenas con grava, arenas limosas y arenas arcillosas (Holtz et al., 1998).....	73
Tabla 19: Valores constante B, para limos y arcillas (Holtz et al., 1998).....	74
Tabla 20: Diseño de filtro geotextil: Análisis del proyecto. ....	78
Tabla 21: Diseño de filtro geotextil: Análisis de Suelo Base. ....	79
Tabla 22: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Retención. ....	80
Tabla 23: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Permeabilidad. ....	80
Tabla 24: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Colmatación. ....	81
Tabla 25: Serie de tamices para ensayo granulométrico. ....	84
Tabla 26: Formaciones geológicas de las muestras y su ubicación (Coordenadas UTM – Zona 17M, WGS84).....	104
Tabla 27: Contenido de finos en muestras de suelos. ....	106
Tabla 28: Límites de Atterberg de suelos P4 y P6. ....	107
Tabla 29: Densidad aparente de suelo P4 y P6. ....	107



Tabla 30: Distribución granulométrica de suelo P4 y P6.....	108
Tabla 31: Parámetros de la curva granulométrica del suelo base.....	110
Tabla 32: Análisis químico del suelo base.....	111
Tabla 33: Diseño de filtro granular: Resultado - Análisis de suelos base.....	113
Tabla 34: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterio de Retención.....	114
Tabla 35: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterio de Permeabilidad.....	114
Tabla 36: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterios adicionales.....	114
Tabla 37: Diseño de filtro granular: Resultado - Prevención de Segregación.....	115
Tabla 38: Distribución granulométrica del filtro granular.....	116
Tabla 39: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Condición crítica o severa del proyecto.....	117
Tabla 40: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Análisis del suelo base.....	118
Tabla 41: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Retención.....	118
Tabla 42: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Permeabilidad.....	119
Tabla 43: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Colmatación.....	119
Tabla 44: Especificaciones técnicas del filtro geotextil NT 1600 Pavco.....	120
Tabla 45: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Selección del filtro.....	121
Tabla 46: Permeabilidad promedio de SB, FGR, FGT y FC, durante carga.....	125
Tabla 47 Porcentaje de migración de finos en el suelo.....	133
Tabla 48: Porcentaje de aporte a la estabilidad interna del suelo – retención.....	133
Tabla 49: Presupuesto para filtro granular.....	136
Tabla 50: Presupuesto para filtro geotextil.....	136
Tabla 51: Presupuesto para filtro combinado.....	137
Tabla 52: Valores de permeabilidad, migración de finos y costo de cada filtro.....	137
Tabla 53: Presupuesto para filtro combinado optimizado.....	139

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Carta de plasticidad adaptada de (Das, 2002a). .....	24
Ilustración 2: Relaciones gravimétricas y volumétricas adaptada de (Das, 2001). .....	25
Ilustración 3: Carga de presión, carga por elevación y carga total de un punto con flujo en el suelo, adaptada de (Das, 2001). .....	31
Ilustración 4: Ley de Darcy, adaptada de (González De Vallejo, 2002). .....	33
Ilustración 5: Ensayo de permeabilidad de carga constante, adaptada de (Usace, 1986).35	
Ilustración 6: Ensayo de permeabilidad de carga variable, adaptada de (Usace, 1986). ..35	
Ilustración 7: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico, adaptada de (Das, 2001). .....	36
Ilustración 8: Rango según Terzaghi para determinar la distribución de material de un filtro, adaptado de (Fannin, 2008). .....	42
Ilustración 9: Casos de interacción material base – filtro, adaptada de (Indraratna & Locke, 1999). .....	43
Ilustración 10: Variación de la presión de poro en función de la profundidad con y sin filtro, adaptado de (Giroud, 2010). .....	45
Ilustración 11: Tipos de granulometría: Uniforme, continua y discontinua, adaptado de (Das, 2001). .....	50
Ilustración 12: Límites de diseño de filtros según USBR, adaptado de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011). .....	55
Ilustración 13: Diseño de filtro granular: Ejemplo de límites dados por diferentes criterios, adaptada de (Auvinet Guichard et al., 2014). .....	60
Ilustración 14: Diseño de filtro granular: Ejemplo de curva granulométrica de un filtro granular, adaptada de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011). .....	61
Ilustración 15: Casos de diferentes tamaños de abertura de un geotextil, adaptada de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012). .....	65
Ilustración 16: Estructura del suelo según el coeficiente de uniformidad, adaptado de (Giroud, 2010). .....	67
Ilustración 17: Casos del comportamiento del geotextil dependiendo de la compacidad relativa del suelo, adaptado de (Giroud, 2010). .....	67
Ilustración 18: Coeficiente de uniformidad lineal, adaptada de (Giroud, 2010). .....	76
Ilustración 19: Puntos de muestreo, tomada de Google Earth. ....	105
Ilustración 20: Distribución granulométrica de las muestras de suelo. ....	106
Ilustración 21: Plasticidad de suelo P4 y P6. ....	107
Ilustración 22: Curva granulométrica del suelo base. ....	109
Ilustración 23: Permeabilidad de suelo base sometida a carga. ....	112
Ilustración 24: Permeabilidad de suelo base sometida a descarga. ....	112
Ilustración 25. Curva granulométrica de filtro granular. ....	116



Ilustración 26: Permeabilidad de suelo con filtro granular sometida a carga..... 122

Ilustración 27: Permeabilidad de suelo con filtro granular sometida a descarga..... 123

Ilustración 28: Permeabilidad de suelo con filtro geotextil sometida a carga. .... 123

Ilustración 29: Permeabilidad de suelo con filtro geotextil sometida a descarga. .... 124

Ilustración 30: Permeabilidad de suelo con filtro combinado sometida a carga. .... 124

Ilustración 31: Permeabilidad de suelo con filtro combinado sometida a descarga. .... 125

Ilustración 32: Permeabilidad SB, FGR, FGT y FC a diferentes gradientes durante la carga..... 126

Ilustración 33: Permeabilidad SB, FGR, FGT y FC a diferentes gradientes durante la descarga..... 126

Ilustración 34: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico durante el proceso de carga..... 127

Ilustración 35: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico durante el proceso de descarga..... 127

Ilustración 36: Curvas granulométricas suelo sin filtro - muestra 1..... 129

Ilustración 37: Curvas granulométricas suelo sin filtro - muestra 2..... 129

Ilustración 38: Curvas granulométricas suelo con filtro granular - muestra 1..... 130

Ilustración 39: Curvas granulométricas suelo con filtro granular - muestra 2..... 130

Ilustración 40: Curvas granulométricas suelo con filtro geotextil - muestra 1..... 131

Ilustración 41: Curvas granulométricas suelo con filtro geotextil - muestra 2..... 131

Ilustración 42: Curvas granulométricas suelo con filtro combinado - muestra 1. .... 132

Ilustración 43: Curvas granulométricas suelo con filtro combinado - muestra 2. .... 132

Ilustración 44: Dimensiones de zanja para análisis de costo..... 135

Ilustración 45: Dimensiones de filtro granular, geotextil y combinado para análisis de costos..... 135

Ilustración 46: Dimensiones filtro combinado optimizado para análisis de costos ..... 138



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Katherine Alexandra Nieto Correa en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018

Katherine Alexandra Nieto Correa

C.I: 0104932660



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Sebastián Zambrano Jaramillo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018

---

Juan Sebastián Zambrano Jaramillo

C.I: 0104409743



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Katherine Alexandra Nieto Correa, autora del trabajo de titulación "Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre 2018

Katherine Alexandra Nieto Correa

C.I: 0104932660



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Sebastián Zambrano Jaramillo, autor del trabajo de titulación "Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre 2018

---

Juan Sebastián Zambrano Jaramillo

C.I: 0104409743



## Agradecimientos

A lo largo del desarrollo de este trabajo de titulación, han sido muchas las personas que han colaborado para su culminación. En primer lugar, quiero agradecer a la Ing. Karla Santacruz, directora de esta tesis y que ha sido una gran guía. Además, quiero agradecer a Dios haberme permitido vivir esta etapa y convertirme en profesional.

Quiero agradecer también a mi familia, a mis padres que han sido mi base y apoyo para seguir adelante y mis hermanos que día a día me muestran con su ejemplo que no debo rendirme ante ninguna situación.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos, Ely y Sebas P, que me han acompañado a lo largo de este camino, y sobre todo a mi amigo y compañero de tesis, Sebas Z, que entre el frío de laboratorio y las frías madrugadas fuimos capaces de terminar este reto, ¡lo logramos amigo!.

Katy Nieto

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento inicialmente a Dios por permitirme culminar con este trabajo, una parte importante de mi vida, por otra parte, agradezco a mis padres, mi hermana y mis amigos, quienes me han dado su apoyo incondicional en todo momento durante toda mi carrera.

De la misma manera, agradezco a la Ing. Karla Johanna Santacruz Reyes, PhD; mis lectores y el personal del laboratorio por brindarme su apoyo, tiempo y confianza para el desarrollo y culminación del presente trabajo de titulación.

Sebas Zambrano



## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, a mi madre por su apoyo incondicional y que con su infinito cariño me ha acompañado durante mi trayecto estudiantil. A mi padre que me ha ayudado a salir adelante. A mis hermanos por ser mi ejemplo. A mi pequeño sobrino, que con sus locuras alegra mi camino. A mis amigos, por su paciencia, compañía y apoyo y mis profesores por todo el conocimiento transmitido durante mi formación profesional.

Katy Nieto

A mis padres Fanny y Patricio, a mi hermana Gaby, mi tía Uca y Lala por su apoyo incondicional, paciencia, cariño y por ser las personas que han estado siempre a mi lado durante toda mi carrera. A mis amigos y compañeros, el grupo de los Sebas, quienes me han dado ánimos y mucha confianza en todo momento, siendo amigos de verdad.

A todas las personas que confiaron en mí y me apoyaron para conseguir los mejores logros en esta etapa de mi vida. Por último, a mis abuelitos Hugo, Vía, Jaime y Chocha, por ser las personas más especiales que pude conocer y sé que me cuidarán siempre.

Sebas Zambrano

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la Ingeniería Civil, la presencia de agua o su flujo dentro de una masa de suelo, es un fenómeno que debe ser tomado en consideración para la implementación de cualquier infraestructura, desde el momento de su concepción hasta cumplir con su periodo de vida útil, garantizando su funcionamiento. Cuando el flujo normal del agua a través del suelo se ve interrumpido, el agua comienza a generar presiones que pueden alterar las condiciones tanto del suelo como de la estructura. En Ecuador, un 38% del territorio nacional presenta alto riesgo de sufrir deslizamientos, derrumbes, taponamientos de drenajes y lahares (FLACSO, MAE, & PNUMA, 2008), muchos de los cuales son desencadenados por la presencia de agua en los suelos. Estos riesgos demuestran que existe una gran influencia de la circulación de agua y por ende una afección directa a las estructuras.

La necesidad de desviar el agua acumulada es una acción importante que debe ser considerada en el diseño y construcción de las obras ingenieriles. El manejo del agua se lo realiza mediante la construcción de canales, drenes, pozos de alivio, captaciones, entre otras obras; sin embargo, estas son comúnmente utilizadas para estructuras de mayor magnitud como presas de tierra, taludes de vías, entre otras. Estos procedimientos generan un incremento en el costo del proyecto, debido a que requieren mayores inversiones por su dificultad constructiva como de mantenimiento (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

En el caso de proyectos como estructuras viales, muros de retención, cimentaciones profundas entre otros; es necesario implementar soluciones que garanticen el desvío del agua de manera eficiente, sin la necesidad de elevar costos ni generar procesos constructivos complicados. Una buena alternativa, es la utilización de filtros. Estos deben contribuir a la estabilidad, canalizar el agua y de esta manera evitar problemas como migración de finos y subpresiones elevadas (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973).

Dentro de la Ingeniería Geotécnica, para elaborar filtros, comúnmente se utilizan dos tipos de materiales: suelo granular y materiales geotextiles. Los filtros de suelos granulares están formados de partículas minerales de diferentes tamaños organizadas de manera aleatoria y que cumplen ciertas condiciones de diseño; los filtros que usan materiales geotextiles, consisten básicamente en el tendido de este tipo de materiales, geotextiles en fibras organizadas en un patrón casi regular, llamados geotextiles tejidos, o un patrón aleatorio, geotextiles no tejidos, (Aydilek, 2012). El empleo adecuado de estos filtros es esencial en muchas estructuras para prevenir erosión, socavación, migración de finos, presiones indeseables, entre otras complicaciones (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973).

Un mismo suelo puede combinarse con diferentes tipos de filtros, ya sea independientemente o en conjunto, pudiendo estos estar constituidos por agregados naturales, fibras de plástico, vidrio, una combinación de estos, entre otros. Su selección dependerá de la envergadura del proyecto, de las condiciones específicas a las cuales está sometida la estructura e inclusive del presupuesto asignado a la misma (Auvinet Guichard, Guillén Guillén, & López Acosta, 2014).

Una condición de diseño de los filtros es valor alto de permeabilidad, la misma que en términos simples, puede ser definida como la capacidad de un elemento para permitir el

paso de un fluido sin sufrir alteraciones en su estructura. Además, los filtros sirven para evitar la erosión, misma que genera problemas grandes de inestabilidad, socavación y daños en la infraestructura. A pesar de las condiciones de diseño que se dan a los filtros, se han presentado casos de tubificación (Foster & Fell, 2001), los cuales son causantes de aproximadamente el 50% de fallas en presas de tierra; por esta razón, se indica que la utilización de filtros en la práctica no ha sido la más apropiada, ya sea debido al tipo de suelo o al proyecto a ejecutarse, resultando un gasto innecesario, debido a que el filtro no cumple su objetivo (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

Existen algunos estudios realizados sobre la utilización de filtros, entre ellos destacan ensayos para proteger diques de limos y arcillas utilizados como secciones impermeables (Sherard, Dunnigan, & Talbot, 1984). Estos estudios demuestran la factibilidad de utilizar un filtro para garantizar el flujo de agua y la estabilidad del suelo. Por otra parte, están ensayos de cargas cíclicas sobre filtros granulares, las cuales generaban un incremento de la presión de poro, variaciones en la permeabilidad y un aumento en la erosión interna de las muestras (Israr & Indraratna, 2018).

### **1.1. Justificación**

La problemática es que en nuestro medio se hace una implementación de un filtro sin estudios previos. Por tal motivo, es necesario plantear un procedimiento de diseño general que permita seleccionar un filtro apropiado que garantice la permeabilidad, como también la capacidad de retener los finos del suelo. Existen diversos criterios, los cuales deben ser seleccionados de manera adecuada, dependiendo de las características de cada tipo de suelo, como también de las propiedades del filtro que se disponga para su utilización.

El primero en plantear un criterio para el diseño de filtros fue Terzaghi (1922), quién estableció la selección en función de la permeabilidad y la capacidad para retener los finos del suelo que se protege. En la actualidad se han desarrollado nuevos criterios, basados en análisis granulométricos tanto del material que se protege como del material que constituye el filtro; siendo necesaria una metodología que considere todos esos aspectos para garantizar una correcta selección del material filtrante y sus propiedades.

Una vez determinadas las propiedades de un filtro, es importante comparar mediante ensayos de laboratorio su eficiencia con respecto a otros filtros, para poder seleccionar el que genere mejores resultados. De esta manera, se puede priorizar el resultado de uno de los criterios sobre los demás, ya sea el caso de requerir mayor permeabilidad, como también asegurar la retención de finos para garantizar la estabilidad del suelo.

### **1.2. Alcance**

La presente investigación pretende realizar un análisis comparativo entre diferentes tipos de filtros; se compara su diseño, eficiencia en funcionamiento y costos. Como parte de la eficiencia se analiza la permeabilidad del suelo por medio de un ensayo de carga variable a diferentes gradientes hidráulicos. Por otra parte, se analiza la migración de finos mediante una comparación entre las curvas granulométricas del suelo antes y después del ensayo de permeabilidad.

El tipo de suelo a utilizar cumplirá con las características granulométricas, de plasticidad y clasificación correspondientes a un suelo fino, debido a que los suelos de grano grueso disponen una capacidad auto filtrante que ayuda a mantener su estabilidad interna (Auvinet Guichard et al., 2014). De este suelo se determinarán sus relaciones volumétricas y gravimétricas naturales, así como su permeabilidad y en general su respuesta bajo flujo de agua a diferentes gradientes hidráulicos. Esto permitirá especificar las características del suelo con el que se va a trabajar, y además establecer una línea base de comparación.

Este suelo se combinará con los diferentes filtros y se ensayará en laboratorio mediante pruebas de permeabilidad de carga variable a diversos gradientes hidráulicos, con la intención de simular las condiciones a las que está sometido el suelo en una obra en contacto continuo con un flujo de agua. De esta manera los resultados obtenidos reflejarán las ventajas y desventajas del uso de cada tipo de filtro, permitiendo comparar la eficiencia de cada filtro al permitir el flujo de agua, retener apropiadamente el material fino del suelo y su costo de construcción. Finalmente se establece una guía de los parámetros que se deben analizar al momento de elegir un tipo de filtro para un suelo fino.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

El objetivo general del trabajo es analizar la respuesta de un suelo fino de la ciudad de Cuenca, combinándolo con tres tipos de filtros (granular, geotextil y una combinación de estos). Se determinará la eficiencia de cada tipo de filtro con respecto a su capacidad para cumplir los criterios de Terzaghi, los cuales consideran que el filtro debe impedir la degradación de la estructura interna del suelo y permitir una canalización y evacuación rápida del flujo.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- 1) Seleccionar y caracterizar un suelo fino natural de la ciudad de Cuenca.
- 2) Determinar los criterios para diseño de cada filtro.
- 3) Diseñar el filtro granular, filtro geotextil y el filtro combinado.
- 4) Revisar si cada filtro modifica la permeabilidad del suelo.
- 5) Determinar la capacidad para evitar la migración de finos de cada filtro.
- 6) Realizar un análisis comparativo de eficiencia y de costos de cada filtro.

## 2. MARCO TEÓRICO

Dentro del presente capítulo se analiza los conceptos referentes a las propiedades del suelo, el flujo del agua en el suelo y los criterios de diseño de los filtros. En las propiedades del suelo se establecen las características necesarias para su clasificación y determinación de parámetros utilizados para el diseño de los filtros. Por otra parte, referente al flujo del agua en el suelo, se establecen conceptos como el cálculo del gradiente hidráulico, la Ley de Darcy y los ensayos utilizados para el cálculo de la permeabilidad. En conjunto, las propiedades del suelo y del flujo de agua, permiten la comparación de la eficiencia entre cada uno de los casos de los filtros a estudiar.

Los suelos se originan por la acción de elementos erosivos como factores físicos, químicos y biológicos que van degradando las rocas hasta convertirlas en partículas de menores dimensiones. Los principales factores físicos son los cambios de temperatura, procesos de congelamiento y deshielo, transporte y desgaste por presencia de agua y viento, entre otros. Por otra parte, está la acción de agentes químicos que generan procesos de hidratación, formación de soluciones, oxidación de minerales y cementación de ciertas sustancias. Por último están los procesos biológicos por actividad bacteriana, que producen la putrefacción de materia orgánica que se mezcla con partículas de suelo (González De Vallejo, 2002).

Todo este proceso se realiza de manera continua y con mayor afección a las rocas de la superficie, generando con el tiempo depósitos de diferentes características según el proceso de meteorización, transporte y sedimentación que ha sido expuesto. De manera general el ciclo de la formación de suelo inicia con la acción ambiental de los factores físicos, químicos y biológicos sobre las rocas. Las partículas resultantes son transportadas y erosionadas, generando depósitos con diferentes tamaños de partículas y composición química, los cuales van adquiriendo resistencia y consolidándose para continuar con el proceso hacia la formación de nuevas rocas.

Los suelos se caracterizan por estar conformados de partículas de diferente composición y tamaño, desde centímetros hasta diámetros inferiores a una micra. Todas estas partículas pueden estar o no cementadas, dejando pequeños huecos en su interior que contienen agua o aire, permitiendo el flujo a través de los suelos (González De Vallejo, 2002). Los diferentes estratos de suelo se los agrupa, según su origen, en formaciones geológicas particulares. Una formación es una serie característica de estratos que se generaron mediante los mismos procesos geológicos. (Tarbuck, 2005).

En la ciudad de Cuenca se identifican diversas formaciones geológicas que presentan en su litología contenido de limos y arcillas (Erazo, 1957), tales como, las formaciones Azogues, Mangán, Santa Rosa y Turi, dadas en orden cronológico. Éstas son algunas formaciones que se encuentran alrededor de la ciudad de Cuenca, combinándose con las terrazas aluviales y formaciones rocosas que afloran a la superficie.

Dentro de la formación Azogues, perteneciente al periodo terciario, predominan las areniscas tobáceas gruesas de color café, con depósitos de limolita y arcilla (CODIGEM, 1980). De igual manera, perteneciente al mismo periodo, se da la formación Mangán que presenta una secuencia de limolitas, lutitas, areniscas fino-granulares de un color claro, y arenisca tobácea gruesa café en la superficie (Vélez, 2012); y la formación Santa Rosa, que consiste principalmente en arcillas rojizas con lentes de arenisca de grano grueso,



color gris (CODIGEM, 1980). Por su parte, la formación Turi, perteneciente al periodo cuaternario, se encuentra compuesta de arenisca arcillosa fina, color blanco grisáceo con intercalaciones de arenisca bien estratificadas, arenisca conglomerática y brechas de piedra pómez (Erazo, 1957).

## 2.1. Propiedades del suelo

Existe una gran variedad de suelos de acuerdo con diversas características, principalmente se destacan tamaño, color, composición química, contenido de agua, entre otras propiedades que en conjunto permiten obtener patrones para clasificar los suelos en grupos con propiedades similares. Para la clasificación de un suelo se sigue como referencia la normativa ASTM D 2487 (2000), la cual considera necesario determinar la distribución de tamaños de las partículas del suelo y su plasticidad, que hace referencia a la consistencia del suelo en función de su contenido de agua.

### 2.1.1. Clasificación de las partículas

El tamaño de las partículas constituye el primer parámetro a ser considerado para la clasificación de un suelo. De acuerdo con la normativa ASTM D 2487 (2000) existen los siguientes grupos:

- **Grava**

Cuando pasa el tamiz de 3" (75 mm) y es retenido en el tamiz No. 4 (4.75 mm). Se caracterizan porque los granos son observables directamente. No retienen el agua por la inactividad de su superficie y los grandes huecos existentes entre partículas (González De Vallejo, 2002).

- **Arena**

Son partículas que pasan el tamiz No. 4 (4.75 mm) y son retenidas en el tamiz No. 200 (0.075 mm). Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad (González De Vallejo, 2002).

- **Limos**

Son partículas que pasan el tamiz No. 200 (0.075 mm) y poseen baja o nula plasticidad. Adicionalmente éstos presentan bajas fuerzas de cohesión cuando se secan al ambiente. Para su clasificación, los limos constituyen suelos de grano fino o la parte fina de los mismos, con un índice de plasticidad menor a 4 o un punto en la carta de plasticidad por debajo de la línea A. Estas partículas retienen el agua mejor que las partículas de mayor tamaño, pero si se forma una pasta de agua y limo, al recibir pequeños golpes, el agua sale con facilidad.

- **Arcillas**

Son partículas que pasan el tamiz No. 200 (0.075 mm) y poseen plasticidad en un rango de humedad establecido como también considerables fuerzas de cohesión cuando se seca al ambiente. Para su clasificación, las arcillas constituyen suelos de grano fino o la parte fina de los mismos, con un índice de plasticidad mayor o igual a 4 o un punto en la carta de plasticidad sobre la línea A o por encima de la misma. De acuerdo a ciertas



clasificaciones, se consideran como arcillas a las partículas de tamaño inferior a 0.002 mm (Das, 2001).

Las arcillas están formadas principalmente por minerales silicatados, unidos por enlaces covalentes débiles, lo cual permite el ingreso de moléculas de agua que aumentan su volumen o disminuye cuando ésta se evapora. Éstas condiciones hacen que la capacidad de retención de agua sea elevada, generando problemas de flujo a través del suelo que se traduce a elevados tiempos de consolidación o expulsión de agua bajo esfuerzos sobre el suelo (González De Vallejo, 2002).

### 2.1.2. Distribución granulométrica

El análisis granulométrico del suelo permite determinar el rango de los tamaños de las partículas que forman parte de éste, y se expresa como un porcentaje de la masa total de suelo seco. Para determinar la distribución de partículas es posible realizarlo por dos métodos que dependen del tamaño de las partículas. El primero por cribado o tamizado para partículas mayores de 0.075 mm de diámetro y el segundo por medio de un análisis hidrométrico, principalmente para partículas menores de 0.075 mm de diámetro.

- **Análisis por cribado**

Consiste en tamizar el suelo sobre un conjunto de mallas con diferentes aberturas normadas que van disminuyendo sus dimensiones con la finalidad de retener partículas de dimensiones mayores a la de cada malla. Para este procedimiento se seca el material al horno y se disgrega hasta alcanzar el tamaño de partículas individuales.

Partiendo de una masa conocida, se hace pasar el suelo por agitación, por una serie de tamices que generalmente van disminuyendo sus dimensiones en progresión geométrica de razón 2. Posteriormente, se determina la masa de suelo retenida en cada tamiz y el porcentaje de suelo que pasa por un tamiz de diámetro específico. Con estos datos, es posible construir una curva granulométrica de un suelo, que relaciona el diámetro de las partículas del material con el porcentaje de masa que pasa a través de cada medida.

- **Análisis hidrométrico**

Este procedimiento está basado en la sedimentación de granos del suelo en el agua. Su principio teórico establece que cuando un suelo se dispersa en el agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos (Das, 2001). Para simplificarlo, se considera que todas las partículas son esféricas y se expresa por medio de la ley de Stokes:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2$$

*Ecuación 1*

Donde:

*v = velocidad de sedimentación [cm/min]*  
 *$\rho_s$  = densidad de las partículas de suelo [g/cm<sup>3</sup>]*  
 *$\rho_w$  = densidad del agua [g/cm<sup>3</sup>]*  
 *$\eta$  = viscosidad del agua [g \* s/cm<sup>2</sup>]*  
*D = diámetro de las partículas del suelo [mm]*



Adicionalmente se puede reemplazar la Ecuación 1 con la Ecuación 2 y Ecuación 3:

$$v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{L}{t}$$

Ecuación 2

$$\rho_s = G_s \rho_w$$

Ecuación 3

Donde:

$$G_s = \text{gravedad específica del suelo}$$

Combinando las ecuaciones, se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_s - 1)\rho_w}} * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Ecuación 4

Donde:

$D$  = diámetro de las partículas del suelo [mm]

$\eta$  = viscosidad del agua [ $g * s/cm^2$ ]

$G_s$  = gravedad específica del suelo

$\rho_w$  = densidad del agua [ $g/cm^3$ ]

$L$  = longitud [cm]

$t$  = tiempo [min]

Este ensayo depende de la temperatura debido a los valores de la viscosidad y la densidad del agua. El ensayo se lo realiza en una solución que contiene un agente dispersor como es el hexametáfosfato de sodio para favorecer la separación de las partículas del suelo. Por medio del hidrómetro se mide en un tiempo  $t$  la densidad de sólidos alrededor del bulbo a una profundidad  $L$ , con lo cual es posible determinar la cantidad de sólidos sedimentados. De esta manera es posible calcular el porcentaje de partículas más finas del suelo y completar la distribución de la curva granulométrica del suelo.

- **Curva granulométrica**

Una curva granulométrica es una gráfica que permite relacionar el diámetro de las partículas del suelo, con su porcentaje de masa de cada tamaño de partícula. Estas curvas sirven para comparar diferentes suelos, y existen ciertos parámetros que son utilizados para caracterizar el suelo según su distribución. Los límites de estos parámetros han sido establecidos para la comparación de arenas, tal como se indica a continuación:

- **Diámetro efectivo**

Corresponde al diámetro en la curva granulométrica por el cual pasa únicamente el 10% del material (Das, 2001).

- **Coefficiente de uniformidad**

Es la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% del material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa el 10%. Si  $C_u$  es menor de 5, el suelo tiene una granulometría uniforme, si  $C_u$  varía entre 5 y 20 es poco uniforme y si

$C_u$  es mayor a 20 es un suelo bien graduado. En base a su distribución, cuanto más uniforme es la granulometría de un suelo, más uniforme es el tamaño de sus vacíos, menores densidades alcanzará y será más erosionable (González De Vallejo, 2002).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 5

Donde:

$C_u$  = coeficiente de uniformidad  
 $D_{60}$  = diámetro correspondiente al 60% de la curva granulométrica  
 $D_{10}$  = diámetro correspondiente al 10% de la curva granulométrica

#### - Coeficiente de curvatura

Indica la relación existente en la distribución de los tamaños intermedios de las partículas del suelo. Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Ecuación 6

Donde:

$C_z$  = coeficiente de curvatura  
 $D_{30}$  = diámetro correspondiente al 30% de la curva granulométrica

#### - Contenido de finos

Correspondiente al suelo que pasa por el tamiz No. 200 (0.075 mm). Este porcentaje indica la proporción de arcilla y limo que contiene el suelo y se relaciona con la posibilidad de retención de agua, teniendo mayor dificultad de expulsar el agua a mayor contenido de finos (González De Vallejo, 2002).

### 2.1.3. Límites de Atterberg y Plasticidad

Una vez determinados los tamaños de las partículas de un suelo para su clasificación, un parámetro importante resulta la plasticidad del suelo, la cual está en función del contenido de agua de estos. Para suelos con contenido de arcillas, su capacidad de retener el agua es elevada, lo cual otorga plasticidad al suelo. A principios de 1900, Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para determinar la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. Por una parte, con baja cantidad de agua, el suelo se vuelve un sólido frágil, por otra parte, con un contenido alto de agua, el suelo y el agua fluyen como un solo líquido. Por tal razón, según el contenido de agua y la naturaleza del suelo, se puede clasificar en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido (Das, 2001).

La separación entre el estado sólido y semisólido del suelo se conoce como límite de contracción, la separación entre el estado semisólido y plástico se conoce como límite plástico. Por último, el punto entre el estado plástico y estado líquido, se denomina límite

líquido. Estos son conocidos como límites de Atterberg, útiles para la clasificación del suelo de acuerdo con su plasticidad. El límite plástico y límite líquido corresponden a los valores necesarios según lo planteado por la norma ASTM D 4318 (2000).

- **Límite plástico (LP)**

Corresponde al contenido de agua en porcentaje, con el cual el suelo al ser enrollado hasta alcanzar diámetros de 3.2 mm y una longitud de 25 a 30 mm, se empieza fisurar o desmoronar (González De Vallejo, 2002).

- **Límite líquido (LL)**

Corresponde al contenido de agua en porcentaje, con el cual el suelo en el ensayo de la cuchara de Casagrande se une en una longitud de 13 mm con 25 golpes. El límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de 25 g/cm<sup>2</sup> (Das, 2001).

- **Índice de plasticidad (IP)**

Representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido al semilíquido. Casagrande definió que los suelos con un índice de plasticidad mayor a 50 son de alta plasticidad, es decir, admiten mucha agua y pueden sufrir grandes deformaciones plásticas. Por debajo de dicho límite, los suelos son considerados de baja plasticidad (González De Vallejo, 2002).

El índice plástico se calcula restando la humedad del suelo correspondiente al límite líquido menos la humedad correspondiente al límite plástico. Un suelo en el rango plástico tiene la capacidad de mantener su forma al secarlo.

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación 7*

- **Carta de plasticidad**

En base a estudios realizados, Casagrande logró establecer una relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido de los suelos, llamada Carta de Plasticidad, en la cual se clasifican los suelos según su plasticidad y la compresibilidad de los suelos.

La mayoría de los suelos formados por partículas finas, cuyo origen no sea volcánico, tienen generalmente valores de límite líquido menores de 100. Así, se diferencia en la carta de plasticidad dos grupos: los de baja a media compresibilidad con límite líquido menor de 50% y los de alta compresibilidad con límite líquido mayor de 50% (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

La carta de plasticidad se caracteriza por la presencia de una línea empírica conocida como la Línea A, dada por la Ecuación 8. Esta separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos.

$$IP = 0.73(LL - 20)$$

*Ecuación 8*

Los suelos cuyas partículas posee mayor plasticidad son aquellos situados por encima de la línea A, por el contrario, los suelos con alto contenido de materia orgánica y los de baja plasticidad se encuentran por debajo de la línea A en la Ilustración 1.

Adicionalmente, se tiene la línea U que corresponde aproximadamente al límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado en estudios realizados (Das, 2001).

$$IP = 0.9(LL - 8)$$

Ecuación 9

En la carta de plasticidad, se identifican principalmente cuatro zonas, separadas por la línea A y el límite líquido de un 50%, donde:

*ML = Limo de baja plasticidad*  
*MH = Limo de alta plasticidad*  
*CL = Arcilla de baja plasticidad*  
*CH = Arcilla de alta plasticidad*

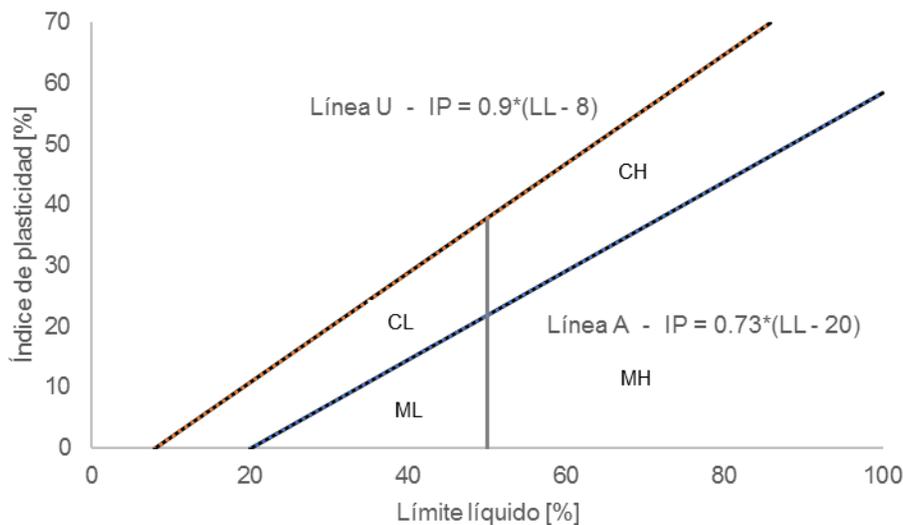


Ilustración 1: Carta de plasticidad adaptada de (Das, 2002a).

#### 2.1.4. Relaciones volumétricas y gravimétricas

El suelo está compuesto de tres elementos, entre ellos una parte sólida en su gran mayoría, y espacios vacíos, llenos de agua y de aire. De esta manera, se puede considerar que el volumen de una muestra está dado por la suma del volumen sólido, más el volumen de vacíos, los cuales pueden estar compuestos por un volumen de agua y un volumen de aire. Por otra parte, si se considera el peso de la muestra, se tiene como peso total la suma del peso de los sólidos más el peso del agua, ya que el peso del aire se lo considera despreciable. Estas relaciones se observan en la Ilustración 2. Las principales relaciones de un suelo son la relación de vacíos, porosidad y grado de saturación de los suelos.

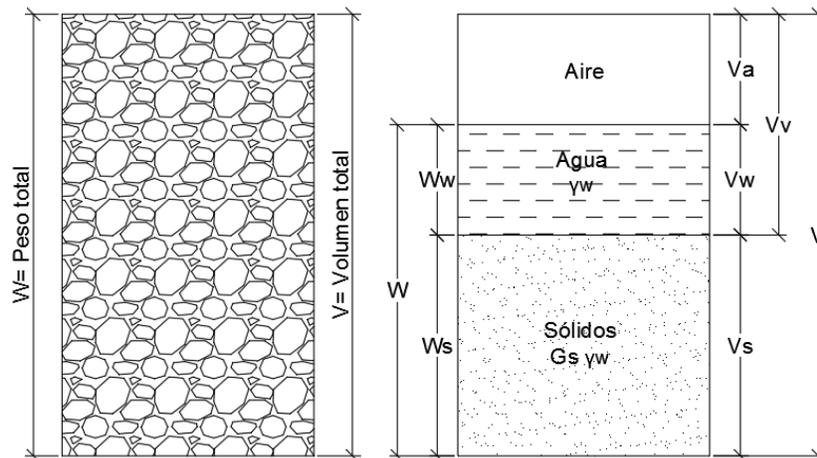


Ilustración 2: Relaciones gravimétricas y volumétricas adaptada de (Das, 2001).

#### 2.1.4.1. Relación de vacíos (e)

Representa la relación del volumen de vacíos del suelo ( $V_v$ ), con respecto al volumen de sólidos ( $V_s$ ), (Ecuación 10). El índice de vacíos varía entre 0.3 y 1.3, llegando hasta 3 o más para suelos muy sueltos o poco compactos y con materia orgánica. A mayor relación, el suelo es más blando e incrementa su deformabilidad (González De Vallejo, 2002).

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Ecuación 10

En la Tabla 1 se indican valores correspondientes a la relación de vacíos para diferentes tipos de suelos.

Tabla 1: Relación de vacíos para diferentes tipos de suelos (Das, 2001).

Tipo de suelo	Relación de vacíos
Arena suelta uniforme	0.8
Arena densa uniforme	0.45
Arena limosa suelta de grano angular	0.65
Arena limosa densa de grano angular	0.4
Arcilla firme	0.6
Arcilla suave	0.9 - 1.4
Loess	0.9
Arcilla orgánica suave	2.5 - 3.2
Tilita glacial	0.3

#### 2.1.4.2. Porosidad (n)

Corresponde a la relación entre el volumen de vacíos ( $V_v$ ) y el volumen total ( $V$ ), (Ecuación 11). Los valores de porosidad varían generalmente entre 20% y 95% (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).



$$n = \frac{V_v}{V}$$

*Ecuación 11*

Partiendo de la relación de vacíos ( $e$ ) y la porosidad ( $n$ ), se puede relacionar entre sí mediante la Ecuación 12 y la Ecuación 13:

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

*Ecuación 12*

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

*Ecuación 13*

#### 2.1.4.3. Grado de saturación ( $S$ )

Se conoce como la relación existente entre el volumen de agua ( $V_w$ ) con respecto al volumen de vacíos ( $V_v$ ), (Ecuación 14). Este varía de 0% para suelo seco a 100% para suelo totalmente saturado (Das, 2001).

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

*Ecuación 14*

#### 2.1.4.4. Contenido de humedad ( $w$ )

Se define como la relación existente entre el peso del agua ( $W_w$ ) y el peso de sólidos ( $W_s$ ) para un volumen determinado de suelo (Ecuación 15). La humedad varía según el tipo de suelo, siendo común de 5% a 8% para suelos granulares (gravas y arenas), entre 60% a 70% en suelos arcillosos y se puede alcanzar más de 300% en suelos orgánicos (González De Vallejo, 2002).

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

*Ecuación 15*

En la Tabla 2 se indica el contenido natural de agua en algunos suelos en estado saturado.

Tabla 2: Contenido natural de agua en estado saturado (Das, 2001).

Tipo de suelo	Humedad en estado saturado [%]
Arena suelta uniforme	30
Arena densa uniforme	16
Arena limosa suelta de grano angular	25
Arena limosa densa de grano angular	15
Arcilla firme	21
Arcilla suave	30 - 50
Loess	25
Arcilla orgánica suave	90 - 120
Tilita glacial	10

#### 2.1.4.5. Peso específico ( $\gamma$ )

Este valor indica el peso del suelo ( $W$ ) por unidad de volumen ( $V$ ), puede ser considerado el peso específico del suelo en estado húmedo ( $\gamma$ ), (Ecuación 16), como también en estado seco ( $\gamma_d$ ), (Ecuación 17).

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Ecuación 16

El peso específico seco de un suelo se puede relacionar con su peso específico húmedo, conociendo su contenido de humedad, mediante la Ecuación 17:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

Ecuación 17

El peso específico es generalmente expresado en unidades de kilonewton por metro cúbico ( $\text{kN/m}^3$ ), pero también se utilizan unidades de densidad en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), manteniendo relaciones similares entre masa, volumen y humedad. En la Tabla 3 se indican algunos valores del peso específico seco de algunos tipos de suelo.

Tabla 3: Peso específico seco (Das, 2001).

Tipo de suelo	Peso específico seco [ $\text{kN/m}^3$ ]
Arena suelta uniforme	14.5
Arena densa uniforme	18
Arena limosa suelta de grano angular	16
Arena limosa densa de grano angular	19
Arcilla firme	17
Arcilla suave	11.5 - 14.5
Loess	13.5
Arcilla orgánica suave	6 - 8
Tilita glacial	21

#### 2.1.4.6. Gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ )

Corresponde a la relación existente entre el peso específico ( $\gamma$ ) o densidad del suelo ( $\rho$ ) con respecto al peso específico ( $\gamma_w$ ) o densidad del agua ( $\rho_w$ ) a una temperatura específica (Ecuación 18). Basados en análisis de laboratorio, se disponen de rangos de valores, alrededor de los cuales varía la gravedad específica de algunos suelos (Tabla 4). A excepción de una turba y suelos con alto contenido de materia orgánica, la gravedad específica de éstos también puede ser más baja que los valores dados (Das, 2002a).

$$G_s = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w}$$

Ecuación 18

Tabla 4: Gravedad específica (Das, 2002a).

Tipo de suelo	$G_s$
Arena de cuarzo	2.64 - 2.66
Limo	2.67 - 2.73
Arcilla	2.70 - 2.90
Tiza	2.60 - 2.75
Loess	2.65 - 2.73
Turba	1.30 - 1.90

#### • Compacidad relativa ( $C_r$ )

Esta propiedad es utilizada para indicar que tan compacto o que tan suelto está un suelo. Sus valores varían de un mínimo de 0 para un suelo suelto, hasta un valor de 1 para un suelo muy denso (Das, 2001). En la Tabla 5 se hace una descripción de los depósitos de suelo según su grado de compacidad.

Tabla 5: Descripción cualitativa de depósitos de suelo (Das, 2002a).

Compacidad relativa [%]	Descripción de depósitos de suelo
0 - 15	Muy suelto
15 - 50	Suelto
50 - 70	Medio
70 - 85	Denso
85 - 100	Muy denso

La compacidad de un suelo se calcula basándose en la relación de vacíos del suelo (Ecuación 19), para su determinación, existen estudios realizados para determinar la variación de la relación de vacíos para distintos tipos de suelos, dando ecuaciones de ajuste según el contenido de material fino pasante del tamiz No. 200 y el diámetro de las partículas de arcilla (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

$$C_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}}$$

Ecuación 19



Donde:

$C_r$  = *compacidad relativa [%]*  
 $e$  = *relación de vacíos in situ del suelo*  
 $e_{m\acute{a}x}$  = *relación de vacíos del suelo en la condición más suelta*  
 $e_{m\acute{i}n}$  = *relación de vacíos del suelo en la condición más densa*

### 2.1.5. Color

El color en los suelos está muy relacionado con su composición química y permite determinar ciertas condiciones de su estado en la naturaleza. Para suelos con una buena capacidad de aireación, se los relaciona con una porosidad alta, caso contrario las reacciones químicas de oxidación se ven disminuidas. Un buen indicador resulta la presencia de hierro ferroso  $Fe^{++}$  que presenta un color gris, el cual al oxidarse pasa a hierro férrico  $Fe^{+++}$  que se torna a un color rojizo. De manera similar, se encuentra algunos colores en los suelos que dan una idea de su composición química (González De Vallejo, 2002).

- **Color negro**

Principalmente se debe a la presencia de materia orgánica, la cual debilita el suelo durante su proceso de oxidación. Adicionalmente, existen pizarras, argilitas negras como las de la formación Yunguilla o filitas negras de la Formación Paute.

- **Color rojo**

Se produce cuando existe la presencia de hierro férrico no hidratado, lo cual indica un drenaje y aireación buena del suelo. Por otra parte, se genera un color amarillento cuando por presencia de hierro férrico hidratado, indicando la presencia de humedad o mal drenaje.

- **Color gris**

Corresponde a suelos con contenido de hierro no oxidado (óxido de hierro ferroso) y presenta variaciones en su tonalidad. Cuando es gris, pardo o amarillo, a una profundidad correspondiente a la del nivel freático, indica falta de drenaje y la aireación es baja o nula. La presencia de suelos con tonos grises es frecuente en sitios donde el agua se acumula y para suelos ubicados en taludes, corresponde su coloración a procesos propios de oxidación del material.

## 2.2. Flujo de agua en el suelo

El agua constituye un componente muy común en los suelos, que normalmente ocupa los espacios vacíos entre las partículas y fluye a través de ellos. El paso del agua a través del suelo depende principalmente del tamaño de sus partículas, debido a que cuando las partículas son grandes, los espacios existentes entre ellas también lo son. Por el contrario, cuando se trata de suelos finos donde las partículas son pequeñas, estas ocupan mayor espacio, reduciendo la dimensión de los poros del suelo, haciendo así más difícil el paso del agua (González De Vallejo, 2002).



Mediante ensayos de laboratorio, se puede determinar la permeabilidad del suelo, que corresponde a la facilidad que presenta un suelo para permitir el flujo de agua a través de sí mismo. Esta propiedad depende de algunas características como es la distribución granulométrica y la densidad del suelo, que, al tener partículas pequeñas y mayor densidad, la porosidad disminuye; por último, está la orientación y forma de las partículas, debido a condiciones de sedimentación, hay direcciones preferenciales para un mejor flujo en el suelo.

Existen dos tipos de flujos, el primero el flujo laminar en el cual las partículas se mueven a lo largo de trayectorias suaves en forma de láminas o capas, desplazándose una encima de la otra. La tendencia de producirse movimientos laterales y giros es reducida por la viscosidad del fluido. Este tipo de flujo puede ser inestable en situaciones de viscosidad baja, altas velocidades y grandes caudales, transformándose en flujo turbulento. El flujo turbulento se caracteriza por el hecho de que las partículas de fluido se mueven en trayectorias muy irregulares, generando intercambios de momentum entre diferentes porciones de fluido (Streeter, 2000).

El flujo de agua a través de medios porosos se considera aplicado al flujo por el suelo, para ello es importante conocer sobre la teoría de Bernoulli que nos permite calcular la energía de una partícula relativa a su posición y velocidad, como también conocer acerca de una ley que describe el flujo en el suelo, descubierta por Henri Darcy en 1856, la cual describe que la velocidad de flujo a través del suelo es proporcional al gradiente hidráulico.

### 2.2.1. Ecuación de Bernoulli y carga en un punto

Considerando el movimiento a lo largo de una línea de corriente, se puede obtener la ecuación de Bernoulli, que establece la conservación de energía mecánica entre cualquier par de puntos a lo largo de dicha línea de corriente (Streeter, 2000).

Para el caso de un líquido de densidad constante, en flujo permanente, sin fricción e incompresible, se obtiene la Ecuación 20 que indica la carga total en un punto en el flujo y representa la suma de las cargas de presión, velocidad y elevación, la cual permanece constante.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z$$

Ecuación 20

Donde:

*h = carga total*

*u = presión del agua*

*$\gamma_w$  = peso específico del agua*

*v = velocidad*

*g = aceleración de la gravedad*

*z = carga de elevación (respecto a plano de referencia)*

Al aplicar la ecuación de Bernoulli al medio poroso, el término que contiene la carga de velocidad puede ser despreciado ya que la velocidad de infiltración es pequeña, resultando la carga total en cualquier punto (Ecuación 21) igual a:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

Ecuación 21

En la Ilustración 3 se observa la relación existente entre la carga de presión, la carga por elevación y las cargas totales de un punto dentro del flujo de agua en el suelo. Si se coloca un piezómetro en un punto determinado, la altura de columna vertical de agua en el piezómetro resulta igual la carga de presión de dicho punto.

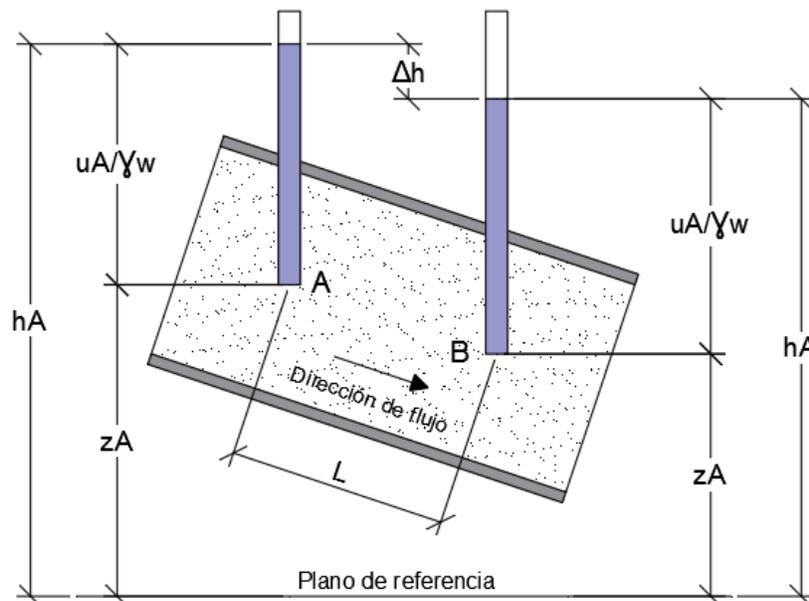


Ilustración 3: Carga de presión, carga por elevación y carga total de un punto con flujo en el suelo, adaptada de (Das, 2001).

## 2.2.2. Gradiente hidráulico

Durante el flujo, el agua presenta pérdidas de carga (energía) por la presencia de las partículas del suelo. La pérdida de carga entre dos puntos A y B puede ser representado por la Ecuación 22:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left( \frac{u_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left( \frac{u_B}{\gamma_w} + z_B \right)$$

Ecuación 22

Esta pérdida de carga se produce en una distancia L entre los dos puntos, resultando un valor adimensional conocido como gradiente hidráulico (Ecuación 23). Este se puede



definir como la pérdida de carga (altura piezométrica) por unidad de longitud (González De Vallejo, 2002).

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Ecuación 23

Donde:

*i = gradiente hidráulico*

*Δh = pérdida de carga entre dos puntos*

*L = distancia entre pntos A y B donde se produce la pérdida*

Cuando el gradiente hidráulico se incrementa gradualmente, la velocidad mantiene una relación lineal con el gradiente hidráulico mientras el flujo se mantenga en un estado laminar, por tal razón para rocas, piedras, gravas fracturadas y arenas muy gruesas donde existe flujo turbulento, dicha relación no es válida (Das, 2001).

### 2.2.3. Ley de Darcy

En el estudio de flujo en el suelo, Henri Philibert Gaspard Darcy planteó en 1856 una ecuación empírica para la velocidad de descarga del agua a través de suelos saturados. Esta condición considera la existencia de un régimen laminar, la cual supone que la velocidad de flujo es proporcional al gradiente hidráulico (Ecuación 24):

$$v = k * \frac{\Delta h}{L} = k * i$$

Ecuación 24

Donde:

*v = velocidad de flujo*

*k = coeficiente de permeabilidad*

*i = gradiente hidráulico*

La ley de Darcy puede ser explicada por medio de la Ilustración 4 en la cual se hace pasar un caudal Q constante a través de un medio poroso como es el suelo. La constante de proporcionalidad “k” corresponde al coeficiente de permeabilidad que es distinto para cada tipo de suelo según sus características granulométricas y relaciones de vacíos.

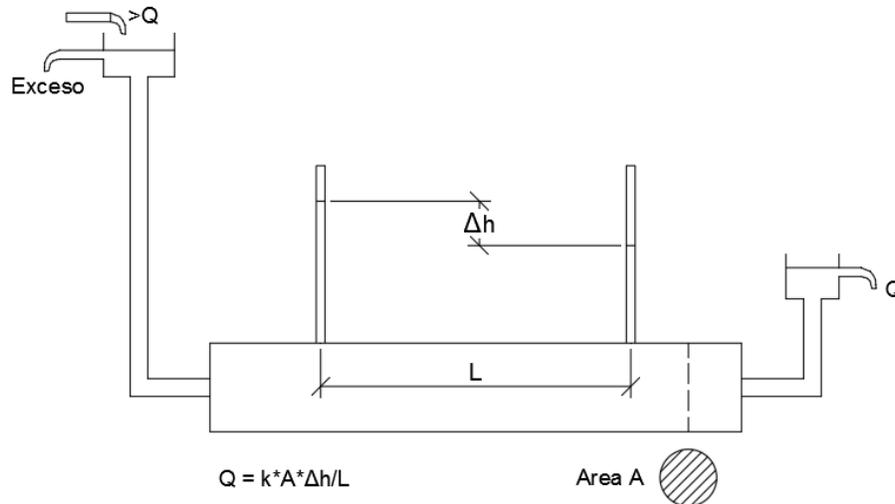


Ilustración 4: Ley de Darcy, adaptada de (González De Vallejo, 2002).

#### 2.2.4. Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad o también conocido únicamente como permeabilidad, se lo define como la tasa de descarga de agua a una temperatura de 20 °C bajo condiciones de flujo laminar a través de una sección transversal unitaria sometida a un gradiente hidráulico unitario. La permeabilidad del suelo depende del tamaño y forma de los granos del suelo, del porcentaje de vacíos, la forma y distribución de vacíos y del grado de saturación del suelo (Usace, 1986). Basándose en la ley de Darcy, las condiciones están restringidas para flujo laminar, como también saturación de las muestras a ser ensayadas.

El coeficiente de permeabilidad es medido en unidades de velocidad y es considerado como el parámetro que presenta mayores variaciones en función del tipo de suelo. La velocidad de flujo está basada en el área de la sección transversal total del suelo, sin embargo, la velocidad real a través de los poros del suelo es mayor (Das, 2001).

Relacionando el área de sólidos y el área de vacíos de una sección transversal del suelo con el caudal de flujo, se obtiene una manera de calcular de manera aproximada la velocidad de infiltración del flujo en función de la porosidad o relación de vacíos del suelo (Ecuación 25).

$$v_s = v \left( \frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n}$$

Ecuación 25

Donde:

$v_s$  = velocidad de infiltración

$v$  = velocidad de flujo

$e$  = relación de vacíos

$n$  = porosidad

Algunos valores característicos de ciertos tipos de suelos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Rangos de permeabilidad de suelos naturales (Powers &amp; Corwin, 2007).

Tipo de suelo	Rango de permeabilidades (cm/s)	Descripción
Grava dispersa (GP)	1.0 ó mayor	Muy alta
Grava uniforme (GP)	$2 \times 10^{-1}$ a 1.0	Alta
Grava bien graduada (GW)	$5 \times 10^{-2}$ a $3 \times 10^{-1}$	Moderadamente alta
Arena uniforme (SP)	$5 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-1}$	Moderadamente alta
Arena bien graduada (SW)	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-1}$	Baja a moderada
Arena limosa (SM)	$1 \times 10^{-3}$ a $5 \times 10^{-3}$	Baja
Arena arcillosa (SC)	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-3}$	Baja a muy baja
Limo (ML)	$5 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-4}$	Muy baja
Arcilla (CL)	$1 \times 10^{-8}$ a $1 \times 10^{-5}$	Muy baja a casi impermeable

### 2.2.5. Tipos de ensayos de permeabilidad y equipos

El análisis y determinación en laboratorio del coeficiente de permeabilidad de un suelo se lo puede realizar a través de dos métodos, el primero un ensayo de permeabilidad de carga constante y el segundo un ensayo de permeabilidad de carga variable. Los dos ensayos presentan características similares en su ejecución, con pequeñas diferencias que favorecen el análisis de distintos tipos de suelos según el tamaño de las partículas y porosidad del suelo principalmente. A continuación, se describe cada tipo de ensayo:

#### 2.2.5.1. Prueba de carga constante

Es el método más simple para determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Este ensayo (Ilustración 5) mide la cantidad de agua  $Q$  que fluye a través de la muestra de longitud  $L$  durante un lapso de tiempo  $t$ . La carga de agua se mantiene constante a una altura  $h$  de la salida del flujo. Para suelos de grano fino, el caudal  $Q$  es pequeño y resulta difícil medir la permeabilidad de manera adecuada. Por el contrario, la prueba de carga constante es usada principalmente para suelos granulares compuestos por arenas y gravas limpias, es decir con bajo o nulo contenido de materiales finos y una permeabilidad mayor o igual a  $1 \times 10^{-3}$  cm/s (Usace, 1986).

#### 2.2.5.2. Prueba de carga variable

La ejecución del ensayo se lo realiza de manera muy similar, pero la carga de agua de entrada sobre la muestra no se mantiene constante, sino va disminuyendo a lo largo del ensayo a medida que el flujo pasa a través de la muestra (Ilustración 6). La cantidad de agua que pasa a través del elemento es determinada de manera indirecta por medio de cálculos. Este método de prueba es usado generalmente para suelos de menor permeabilidad como arenas finas, limos y arcillas, con coeficientes de permeabilidad menores a  $1 \times 10^{-3}$  cm/s (Usace, 1986).

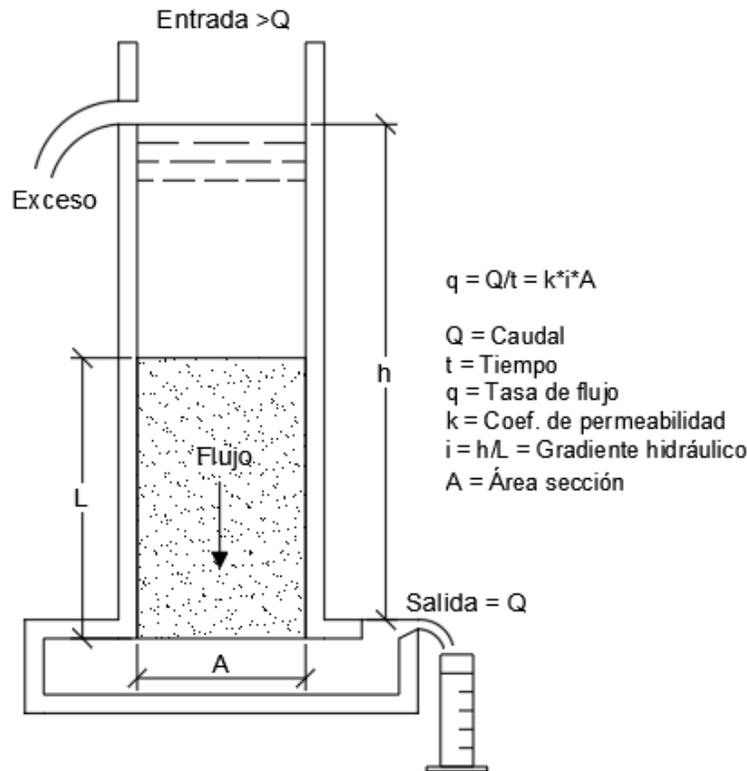


Ilustración 5: Ensayo de permeabilidad de carga constante, adaptada de (Usace, 1986).

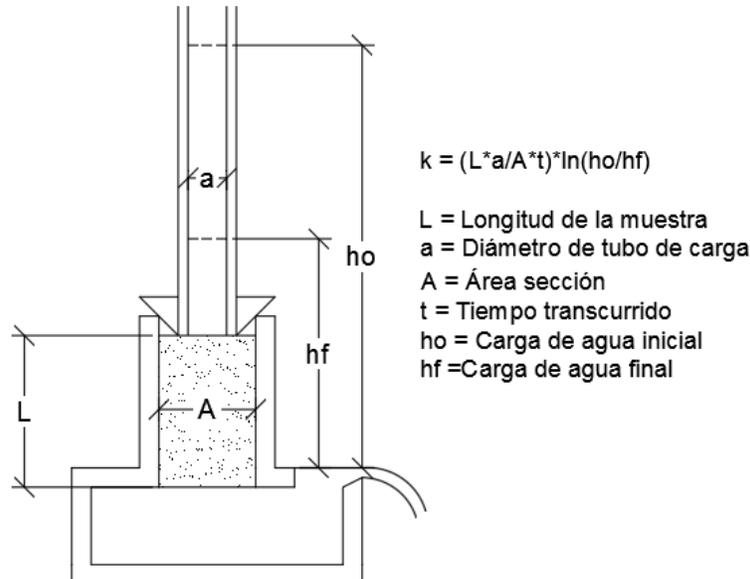


Ilustración 6: Ensayo de permeabilidad de carga variable, adaptada de (Usace, 1986).

Para el desarrollo de los dos tipos de ensayos de permeabilidad, se pueden utilizar diferentes equipos, dependiendo del tipo de suelo a ensayar, su granulometría, su estado de alteración y saturación de la muestra. Para suelos remoldeados de baja cohesión se sugiere utilizar cilindros de permeabilidad, mientras que, para muestras inalteradas en una

dirección determinada, se sugiere utilizar los tubos muestreadores como un permeámetro. La permeabilidad de suelos no cohesivos remoldeados es utilizada de manera aproximada para medir la permeabilidad horizontal de suelos inalterados no cohesivos.

Por otra parte, están los cilindros con presión y los consolidómetros, los cuales son utilizados para suelos de grano fino en estado remoldeado, inalterado o compactado. Los suelos de grano fino pueden ser ensayados manteniendo una dirección para analizar la permeabilidad horizontal o vertical del suelo. Según ciertas características propias de cada suelo, es importante considerar ciertas condiciones especiales que se deben tomar en cuenta al momento de realizar los ensayos de permeabilidad.

### 2.2.5.3. Consideraciones especiales

El agua contiene normalmente aire disuelto, por tal motivo es necesario utilizar agua des aireada para evitar la liberación de burbujas en el interior de la muestra, las cuales incrementan los vacíos y reducen el flujo del agua. El método más común para extraer el aire consiste en hervir el agua y enfriarla, pero resulta útil para pequeñas cantidades. Otro método es utilizar una bomba de vacío que permita extraer el aire en una cámara de presión. La importancia de utilizar agua des aireada radica en evitar la reducción de la permeabilidad en muestras saturadas (Usace, 1986).

La carga hidráulica debe seleccionarse de tal manera que produzca un flujo laminar dentro de la muestra. Para ello se puede graficar el caudal de descarga o la velocidad de flujo vs el gradiente hidráulico, donde el tener una línea recta indica flujo laminar, mientras que, al tener desviaciones con respecto a la línea recta, se indica la existencia de un flujo turbulento.

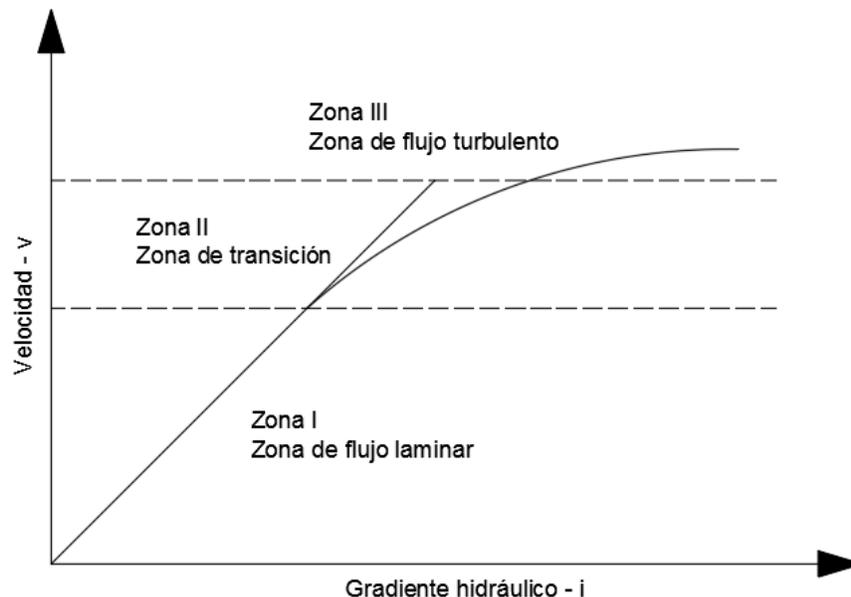


Ilustración 7: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico, adaptada de (Das, 2001).

De acuerdo con lo especificado en la normativa ASTM D5084 (2000) el gradiente hidráulico utilizado en los ensayos debe ser similar al gradiente hidráulico esperado en



campo, de acuerdo con el tipo de obra que se vaya a ejecutar. Para ello, se puede calcular aproximadamente al determinar la pérdida de carga entre los puntos de interés y la distancia de recorrido del flujo.

Generalmente, para valores menores a 1 hasta 5, se cubren las condiciones de campo. En caso de gradientes menores a 1, los ensayos requieren de mucho tiempo en suelos poco permeables, por tal razón se utilizan valores altos con la intención de disminuir el tiempo de ensayo. Por su parte, los gradientes hidráulicos altos pueden generar consolidación de las muestras ensayadas o erosión de estas, favoreciendo el transporte de material fino en el interior de la muestra y hacia fuera de ella.

La acción de gradientes hidráulicos elevados puede modificar la permeabilidad del suelo por el transporte de finos. Este proceso permite evaluar la eficiencia de los filtros, los cuales van a estar sometidos a gradientes hidráulicos variables, así se puede medir su eficiencia en cuanto a los criterios planteados de retención y permeabilidad.

El uso de filtros tiene la finalidad de resistir la erosión causada por altos gradientes hidráulicos. En casos como presas de tierra, con materiales de grano fino, que están sometidos a elevados gradientes, los filtros deben evitar la migración de finos y posibles daños en la presa (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

En el ensayo de permeabilidad en el equipo triaxial, correspondiente a una cámara de presión, la muestra está confinada en una membrana de caucho y sometida a una presión hidrostática externa. Las ventajas de este ensayo son la reducción en la filtración de agua a través de los costados de la muestra que darían falsos valores de permeabilidad, como también la capacidad para ensayar la muestra bajo condiciones de carga esperadas en campo (Usace, 1986).

Esta prueba es aplicada principalmente para suelos cohesivos en estado inalterado, remoldeado o compactado, pero presenta gran dificultad para alcanzar una saturación completa en caso de no haber estado saturada la muestra en campo (Usace, 1986). Por dicha razón es necesario seguir un procedimiento idéntico para cada una de las muestras con la intención de alcanzar el mayor grado de saturación del suelo, como también de mantener todos los ensayos bajo las mismas condiciones.

El ensayo de permeabilidad realizado en el equipo triaxial es de carga variable puesto que la pipeta de entrada no mantiene un nivel constante. Las dimensiones de las muestras dependen del equipo a utilizar, las medidas recomendadas corresponden a 71.1 mm de diámetro y 165.1 mm de longitud para muestras grandes, o 35.6 mm de diámetro y 88.9 mm de longitud para muestras pequeñas. De manera general la relación longitud/diámetro (L/D) deberá estar entre 2 y 3 (Das, 2002b).

La presión de cámara aplicada a la muestra deberá ser mayor o igual a la máxima presión aplicada en uno de sus extremos con flujo (Usace, 1986). Esto permite que exista flujo a través de la muestra al no tener una sobrepresión, como también evita que el flujo circule por los costados de ésta, dando resultados erróneos de permeabilidad.



#### 2.2.5.4. Métodos empíricos

La determinación de la permeabilidad de un suelo requiere generalmente de ensayos complejos y que necesitan de bastante tiempo para su correcta ejecución. Por dicha razón existen ecuaciones que han sido determinadas con la finalidad de obtener un valor aproximado mediante ciertos parámetros. La Ecuación 26 permite calcular la permeabilidad de un material poroso en base a la distribución del tamaño de sus poros. Una aplicación especial es para el flujo de líquidos a través de materiales no saturados (Marshall, 1958).

$$K = \epsilon^2 n^{-2} [r_1^2 + 3r_2^2 + 5r_3^2 + \dots + (2n - 1)r_n^2] / 8$$

Ecuación 26

Donde:

$K$  = permeabilidad [ $cm^2$ ]

$\epsilon$  = porosidad [ $cm^3/cm^3$  de material poroso]

$r$  = radio de los poros [ $cm$ ]

La determinación del radio de los poros, se lo realiza a partir de diversas metodologías, entre las cuales destacan la medición de la humedad característica del material del suelo (Childs & George, 1950), como también por métodos electrónicos a través de tomografías y fotografías de las partículas del suelo (Nimmo, Survey, & Park, 2013).

Adicionalmente, en la Tabla 7 se presentan algunas relaciones empíricas para determinar la permeabilidad de arenas de diferentes formas y tamaños bajo ensayos de permeabilidad de carga constante. Los resultados obtenidos demuestran que la permeabilidad resultante difiere entre arenas con valores distintos de redondez y esfericidad (Cabalar & Akbulut, 2016).

Tabla 7: Ecuaciones empíricas y sus limitaciones para estimar la permeabilidad (Cabalar &amp; Akbulut, 2016).

Autor	Ecuación	Limitaciones
Hazen	$k = 6 \times 10^{-4} * \frac{g}{v} * [1 + 10(n - 0.26)] * (d_{10})^2$	$c_u < 5$ $0.1 < d_{10} < 3.0$
Kozeny - Carman	$k = 8.3 \times 10^{-3} * \frac{g}{v} * \left[ \frac{n^3}{(1-n)^2} \right] * (d_{10})^2$	$0.5 < d_{10} < 4.0$
Terzaghi	$k = 0.0084 * \frac{g}{v} * \left[ \frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right]^2 * (d_{10})^2$	—
Chapuis	$k = 1.5 * (d_{10})^2 * \frac{e^3}{1+e} * \frac{1 + e_{max}}{(e_{max})^3}$	—
Slitcher	$k = 1 \times 10^{-2} * \frac{g}{v} * n^{3.287} * (d_{10})^2$	$0.1 < d_{10} < 5.0$
USBR	$k = 4.8 \times 10^{-3} * \frac{g}{v} * (d_{20})^{0.3} * (d_{20})^2$	$c_u < 5$
NAVFAC	$k = 10^{1.291e-0.6435} * (d_{10})^{10^{(0.5504-0.2937e)}}$	$2 < c_u < 12$ $0.1 < d_{10} < 2.0$ $0.3 < e < 0.7$ $1.4 < d_{10}/d_5$
Alyamani & Sen	$k = 1300 * [l_0 + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2$	—
Breyer	$k = 6 \times 10^{-4} * \frac{g}{v} * \log \left[ \frac{500}{c_u} \right] * (d_{10})^2$	$0.06 < d_{10} < 0.6$ $1 < c_u < 20$

Donde:

$k$  = permeabilidad

$g$  = gravedad

$v$  = viscosidad del agua

$n$  = porosidad

$e$  = relación de vacíos

$c_u$  = coeficiente de uniformidad

$d_x$  = diámetro por donde pasa  $x\%$  del material

$l_0$  = intersección de la línea  $d_{50} - d_{10}$  con el eje del tamaño de partículas

Mediante estudios paralelos para determinar la efectividad de las relaciones de la Tabla 7, se han evaluado las fórmulas empíricas para determinar la permeabilidad de un suelo, siendo seleccionadas las fórmulas de Kozeny – Carman, Hazen y Breyer como las que dan una mejor aproximación respecto a ensayos realizados sobre distintos suelos, pero manteniéndose dentro de las limitaciones establecidas (Hussain & Nabi, 2016). Adicionalmente, el estimar la permeabilidad de los suelos basándose únicamente en la

granulometría y porosidad, puede llevar a una subestimación o sobre estimación de los resultados a menos que se utilice la metodología más apropiada para cierto tipo de suelo.

Por otra parte, para el estudio de la permeabilidad de los suelos, se han desarrollado modelos matemáticos para simular la conductividad hidráulica a través de medios porosos, utilizando datos de ensayos físicos de laboratorio para su calibración. El método ha sido utilizado para determinar los efectos de valores distintos de porosidad en el suelo. Las pruebas se las realiza principalmente en suelos arenosos, es decir con menor contenido de partículas finas, ya que la inclusión de arenas finas con porosidad menor a 0.1 pueden reducir de manera significativa la conductividad hidráulica, siendo esto un factor relevante para cálculos de drenajes y diseño de filtros (Ajah, 2016). De esta investigación se demuestra que el uso de modelos matemáticos brinda resultados adecuados, sin embargo, por simplicidad, se recomienda el uso de ecuaciones empíricas para cálculos realizados en campo.

Un análisis más profundo de la ecuación de Kozeny – Carman permite confirmar que esta da un resultado confiable del coeficiente de permeabilidad vertical de los suelos ensayados, sin embargo, debe ser utilizada con precaución para suelo con permeabilidades entre  $10$  a  $10^{-9}$  cm/s , las cuales pueden variar en un rango entre 1/3 a 3 veces la permeabilidad real (Hansen, 2004).

Finalmente, se plantea una relación entre la succión y el contenido de agua para predecir el coeficiente de permeabilidad en estado no saturado de un suelo. La función ajustada permite obtener valores muy similares a los medidos en laboratorio (Fredlund, Xing, & Huang, 1994).

### 2.3. Filtros

El control del movimiento de agua en los suelos que ataca las obras de ingeniería civil es de vital importancia. Un ingeniero debe considerar el gasto de infiltración, la influencia del flujo sobre la estabilidad de la masa de suelo por la que atraviesa y las posibilidades que tiene el agua de producir arrastres de material, erosiones, tubificación, entre otras (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1974). Entre las múltiples soluciones que se han desarrollado para el tratamiento del flujo de agua, se dan la implementación de vertederos de exceso, obras de toma, pozos de alivio, implementación de drenes y la utilización de filtros (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1973), siendo este último el empleado en obras como cimentaciones, muelles, vías, muros de contención, entre otros.

La primera persona en proponer la utilización de filtros fue Karl Terzaghi, quien en el año de 1922 desarrolló reglas empíricas para la distribución del tamaño de las partículas de un filtro a ser utilizado en una pequeña presa en Europa. Posteriormente, partiendo de estas reglas Terzaghi propuso la patente por la que fue reconocido como el inventor de *“un filtro de tal característica, que permitirá la salida libre del agua subterránea, pero evitará el paso de constituyentes o partes del suelo, y por lo que el filtro será cargado de tal manera que el agua fluya por las capas ubicadas debajo el filtro y a través del mismo, sin ser conducido hacia arriba”* (Fannin, 2008).

Entonces, mediante ensayos de laboratorio Karl Terzaghi llegó a proponer dos criterios básicos para el diseño de filtros constituidos por arena, grava o piedras trituradas, mismos

que con el tiempo han ido incorporando nuevas consideraciones dadas por diferentes autores, como Sherard (1963), la Comisión Internacional de Grandes Presas ICOLD (1994), el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos USSCS (1994), el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos USACE (2004) y la Oficina de Recuperación de Estados Unidos USBR (2004), los cuales han desarrollado criterios adicionales que deben ser considerados a la hora de diseñar un filtro (Auvinet Guichard et al., 2014).

En el desarrollo de este estudio se emplean tres tipos de filtros, siendo el primero un filtro granular constituido por agregados naturales de diferentes tamaños organizados de manera aleatoria, el segundo un filtro geotextil no tejido compuesto por fibras y el tercero, constituido por una combinación del filtro granular y geotextil.

### 2.3.1. Criterios Básicos dados por Karl Terzaghi

#### 2.3.1.1. Criterio de permeabilidad

Establece que el material del filtro debe ser suficientemente grande para que su permeabilidad permita una canalización y evacuación rápida del flujo, y disipe el exceso de presión de poro generado (Auvinet Guichard et al., 2014). Esta dado por la Ecuación 27.

$$D_{15F} \geq 4d_{15S}$$

Ecuación 27

Donde:

$D_{15F}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro

$d_{15S}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del suelo base

Esta condición está basada en el concepto que la permeabilidad es proporcional al cuadrado del tamaño de grano más fino, correspondiente del 10 al 15% de la masa, y por lo tanto el filtro es en esencia 10 a 20 veces más permeable que el suelo (Fannin, 2008).

#### 2.3.1.2. Criterio de retención

Establece que el material del filtro debe ser suficientemente pequeño para retener el suelo base que se pretende proteger (Auvinet Guichard et al., 2014). Para lo cual Terzaghi plantea la condición dada en la Ecuación 28.

$$D_{15F} \leq 4d_{85S}$$

Ecuación 28

Donde:

$D_{15F}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro

$d_{85S}$  = diámetro por el que pasa el 85% del material del suelo base

Esta condición se basa en que la apreciación del tamaño de poro de un filtro bien graduado comprende como máximo, 1/5 del diámetro del grano más grande de la fracción más fina del material filtrante (Fannin, 2008).

En la Ilustración 8 se puede observar el rango definido para determinar la distribución granulométrica que deberá tener el filtro según los criterios de Terzaghi. Las curvas que

definen este rango deben trazarse geoméricamente similares a la curva del material base, además, el rango queda limitado por el diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro, donde el valor máximo queda definido por el criterio de retención, y el valor mínimo se define por el criterio de permeabilidad.

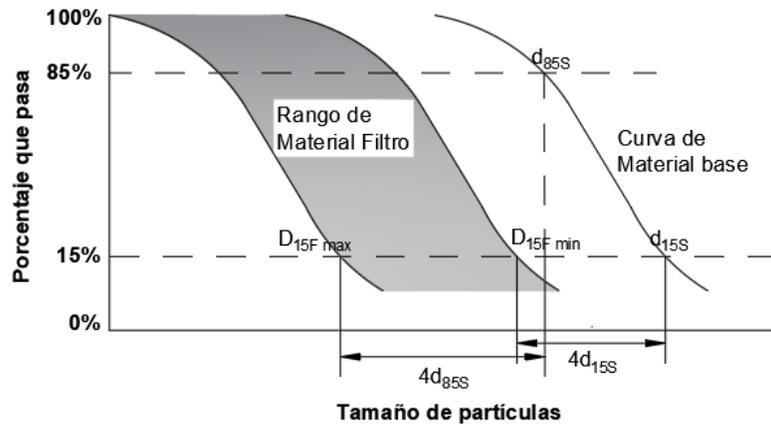


Ilustración 8: Rango según Terzaghi para determinar la distribución de material de un filtro, adaptado de (Fannin, 2008).

## 2.4. Filtros granulares

Como ya se ha establecido la utilización de los filtros granulares en la aplicación de ingeniería geotécnica provee múltiples ventajas, entre las que destacan, el permitir el paso del agua a través del suelo que se pretende proteger manteniendo la estabilidad interna del mismo, previniendo además que no se dé una excesiva migración de finos (Aydilek, 2012). De esta manera, los filtros actúan como barreras evitando la erosión interna, el fenómeno de tubificación y concentración de flujo de agua (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

Dentro del proceso de filtración pueden producirse cuatro posibles casos, mismos que se describen a continuación (Ilustración 9) (Indraratna & Locke, 1999):

- Cuando la distribución de los granos del filtro es lo suficientemente fina tal que los granos del suelo protegido no pueden penetrar en el filtro.
- Cuando los granos del material base se retienen en el filtro dentro de una pequeña distancia, donde, son capturados por los poros del filtro que son más pequeños que el material base, en este caso existe un estado estable de la combinación del filtro con el suelo base.
- Cuando en un inicio existe un lavado de las partículas más finas del material base que atraviesan por completo el filtro, mientras, las partículas más grandes son retenidas, posteriormente, las partículas retenidas sirven para retener las partículas más finas y crear con el tiempo un sistema estable o semi-estable, dependiendo del nivel de partículas finas lavadas.

- d) Cuando las partículas del filtro son demasiado grandes para retener cualquier partícula del suelo base, dándose un sistema inestable.

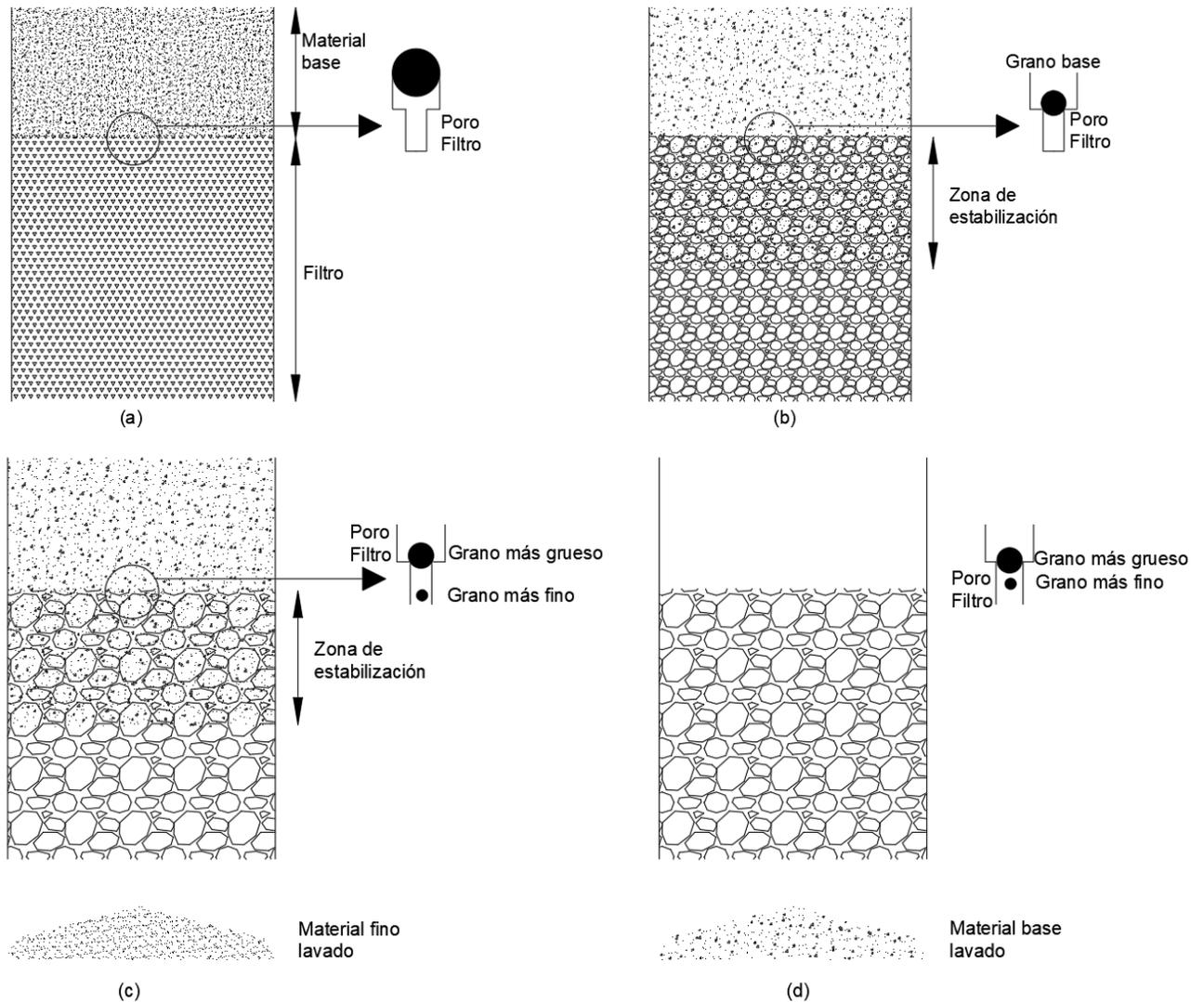


Ilustración 9: Casos de interacción material base – filtro, adaptada de (Indraratna & Locke, 1999).

Dentro del proceso de diseño de un filtro existe complejidad en los requerimientos del tamaño de partículas y el tamaño de poro del filtro. Por lo cual, para obtener un filtro adecuado es necesario conocer la interacción de suelo base con el filtro. Esta interacción involucra diversos factores que se constituyen propiedades geométricas, físicas químicas e hidráulicas.

Dentro de las propiedades geométricas se incluye la distribución granulométrica del suelo base y del filtro, que considera sobre todo el tamaño, distribución y contracción de los poros. Por otra parte, las propiedades físicas del suelo base que intervienen son la fricción

del suelo, la cohesión, el esfuerzo externo, la rugosidad superficial y la estabilidad interna, mientras que las propiedades del agua de infiltración que intervienen son la viscosidad, temperatura y contenido mineral, de igual manera las propiedades químicas incluyen los efectos iónicos de la infiltración y finalmente, las propiedades hidráulicas incluyen el gradiente hidráulico del agua de infiltración y la velocidad local que causa la migración de partículas (Indraratna & Locke, 1999).

Sin embargo, la interacción de todos estos factores puede resultar compleja por lo que varios autores han simplificado los parámetros que intervienen en el diseño de filtros, considerando como los más importantes la distribución granulométrica del suelo base y del filtro, además, en estos casos los efectos hidráulicos son a menudo ignorados ya que es conservador asumir que las fuerzas hidráulicas son suficientemente altas para movilizar las partículas (Indraratna & Locke, 1999). El diseño de filtros granulares parte del estudio de estos parámetros y el papel que desenvuelven de tal manera que cumplan con los criterios dados por Terzaghi (Sección 2.3.1).

#### 2.4.1. Criterios de diseño para un filtro granular

Considerando los criterios de diseño expuestos por Terzaghi, en las siguientes secciones, se explica las propiedades del suelo y del filtro que intervienen en cada criterio, además, se demuestra cómo interactúan estas propiedades para lograr una combinación de suelo base – filtro estable.

##### 2.4.1.1. Criterio de permeabilidad

Este criterio está enfocado en el flujo de agua en el suelo, donde intervienen la presión de poro y la tasa de flujo, mismas que pueden ser afectadas por la presencia del filtro, por lo tanto, es necesario garantizar que las alteraciones provocadas por el filtro seleccionado sean mínimas y aceptables, para lo cual se establecen dos requerimientos: el requerimiento de la presión de poro y el de la tasa de flujo.

**Requerimiento de la Presión de Poro:** Se da cuando la presencia del filtro incrementa la presión de agua de poro en el suelo como se muestra en el caso *b* de la Ilustración 10, en comparación con el caso *a*, donde se muestra el suelo sin filtro. Cuando se da este caso, debe incrementarse la conductividad hidráulica del filtro, de tal manera que se logre disminuir la presión de poro, hasta alcanzar una situación ideal en donde el exceso de presión de poro no exista o sea mínimo (Giroud, 2010), tal como se muestra en el caso *c* de la Ilustración 10. Para alcanzar la condición descrita se debe cumplir con la Ecuación 29.

$$k_F \geq i_S k_S$$

Ecuación 29

Donde,

$k_F$  = conductividad hidráulica del filtro granular  
 $k_S$  = conductividad hidráulica del suelo base  
 $i_S$  = gradiente hidráulico del suelo base

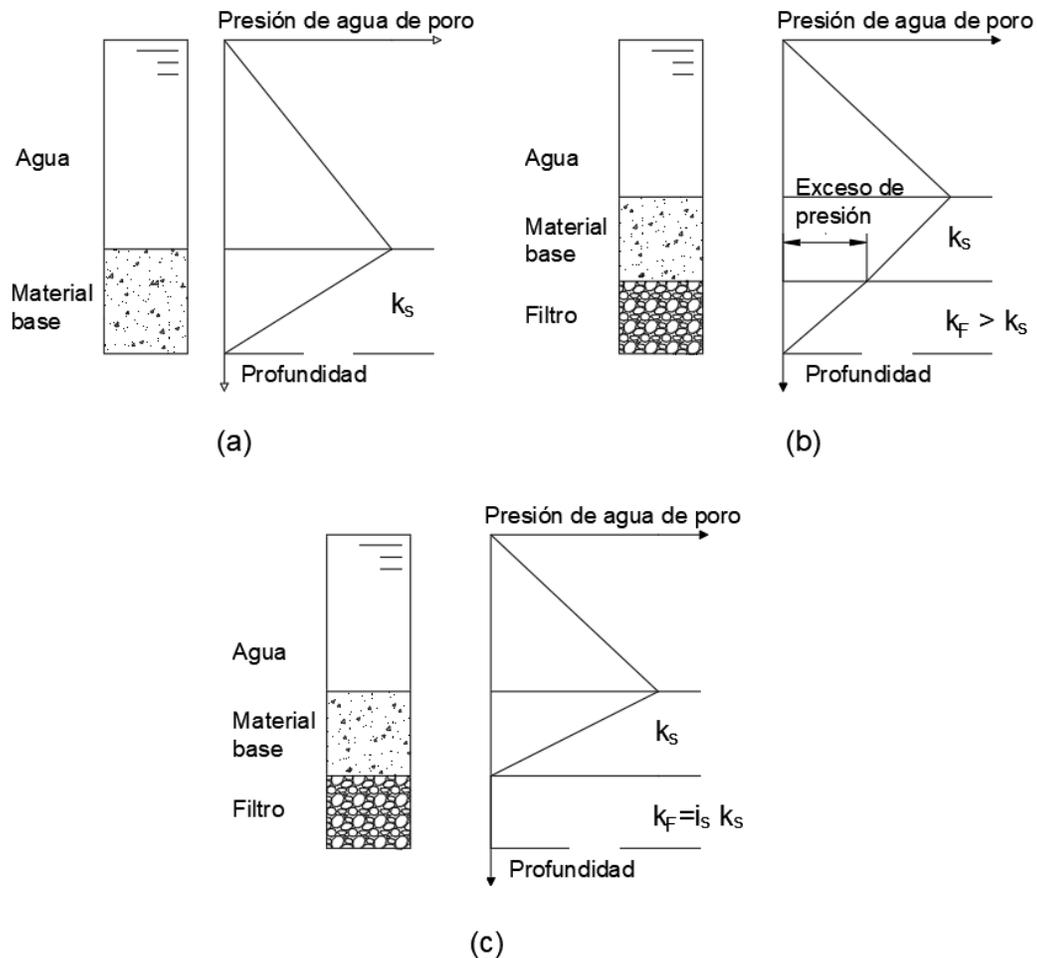


Ilustración 10: Variación de la presión de poro en función de la profundidad con y sin filtro, adaptado de (Giroud, 2010).

**Requerimiento de la Tasa de Flujo:** Se da cuando la presencia del filtro disminuye la tasa de flujo en comparación a un caso sin filtro. En base a cálculos realizados con la ecuación de Darcy, se demuestra que la reducción de la tasa de flujo es menor al 10% para filtros granulares de 250 a 2500 mm de espesor cuando se cumplen con la Ecuación 30 (Giroud, 2010).

$$k_F \geq 25 k_S$$

Ecuación 30

Entonces, al realizar una comparación entre estos dos requerimientos se llega a la Ecuación 31, donde el máximo dependerá del gradiente hidráulico, el cual generalmente es menor que 25, por lo que el criterio se puede expresar en función de 25 veces la permeabilidad del suelo.

$$k_F \geq \max(i_S k_S, 25 k_S)$$

Ecuación 31



Basados en el concepto de que la permeabilidad es proporcional al cuadrado del tamaño de partícula más pequeño de un material granular (Fannin, 2008), se llega a las expresiones dadas en la Ecuación 32 y Ecuación 33.

$$k_F \approx \alpha D_{15F}^2$$

Ecuación 32

$$k_S \approx \alpha d_{15S}^2$$

Ecuación 33

Donde,

$D_{15F}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro

$d_{15S}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del suelo base

$k_F$  = permeabilidad del filtro

$k_S$  = permeabilidad del suelo base

$\alpha$  = constante de proporcionalidad

Siempre que las curvas granulométricas del material base y del filtro sean similares al menos en la parte baja de la curva, ya que el rango entre el 5% y 40% del material que pasa gobierna sobre la permeabilidad, se puede asumir que la constante  $\alpha$  es la misma para el material base y para el filtro granular (Giroud, 2010), entonces, partiendo de la Ecuación 31, Ecuación 32 y Ecuación 33, se demuestra que se cumple el criterio de permeabilidad, siempre que se mantenga la Ecuación 34.

$$D_{15F} \geq A d_{15S}$$

Ecuación 34

Donde,

$D_{15F}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro

$d_{15S}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del suelo base

$A$  = constante que depende del gradiente hidráulico

Los valores de la constante A están basados en experimentos, los cuales se indican para cada autor.

#### 2.4.1.2. Criterio de retención

Al igual que el criterio de permeabilidad, en el criterio de retención intervienen las propiedades de la compacidad relativa y el coeficiente de uniformidad, mismas que representan la estabilidad interna del material base, es decir, la retención de las partículas grandes del suelo, que a su vez retienen a las partículas más pequeñas, se da si el suelo es internamente estable. Sin embargo, para el desarrollo del criterio de retención dado por Terzaghi esta propiedad no es considerada, y aun así el éxito de éste en el diseño de filtros granulares se debe, en primer lugar, al espesor del filtro que se coloca, ya que algunas partículas que no son retenidas, pueden acumularse en el filtro, decreciendo de este modo el tamaño de poro hasta que el filtro funciona, en otras palabras, el filtro granular puede adaptarse al suelo base (Giroud, 2010).

En segundo lugar, el éxito del criterio de Terzaghi se debe a que su uso ha sido limitado a suelos estables, por ejemplo, suelos con tamaño máximo de partícula de 4.75 mm (Giroud, 2010).

De esta manera se ha adaptado el criterio de retención para filtros granulares a la expresión dada por la Ecuación 35.

$$D_{15F} \geq FS d_{85S}$$

Ecuación 35

Donde,

$D_{15F}$  = diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro

$d_{85S}$  = diámetro por el que pasa el 85% del material del suelo base

$FS$  = factor que depende del tipo de suelo

Los valores del factor  $FS$  están basados en experimentos, los cuales se indican para cada autor.

## 2.4.2. Evolución de diseño de filtros granulares

En los criterios dados, los límites hasta ahora planteados corresponden a resultados obtenidos en laboratorio para suelos base como arenas, gravas o suelos con una buena estabilidad interna (Fannin, 2008; Giroud, 2010), resultando en rangos muy conservadores para otros tipos de suelos. Por dichas razones, es que diferentes autores han realizado nuevos ensayos de laboratorio para otros tipos de suelos tal que se pueda definir rangos más específicos de los criterios para cada suelo, dando además recomendaciones adicionales para un mejor diseño.

### 2.4.2.1. Sherard (1963)

Estableció que el valor de la constante  $A$  para el criterio permeabilidad y el valor para el factor de seguridad  $FS$ , del criterio de retención, sea igual a 5 (Auvinet Guichard et al., 2014), ya que se ha demostrado que el valor de 4 planteado por Terzaghi resulta muy conservador (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

Aunque en este caso los límites permitan un rango más amplio, sigue siendo un método de diseño muy conservador para suelos como arcillas y suelos gruesos con finos arcillosos, los cuales presentan una mayor cohesión (Auvinet Guichard et al., 2014).

### 2.4.2.2. ICOLD (1994)

Siendo La Comisión Internacional de Grandes Presas, en el año de 1994 la ICOLD presentó en su boletín No. 95, metodologías para el análisis del suelo a proteger, junto con recomendaciones que permitan satisfacer de forma adecuada los criterios de retención y permeabilidad dados por Terzaghi.

Las recomendaciones que presenta se basan en la evaluación de la capacidad de descarga del filtro, mismo que debe ser capaz de llevar el flujo de infiltración aguas abajo o a una zona adyacente más permeable sin generar exceso de presión.

De los métodos existentes para analizar el flujo, el más común es utilizar la ley de Darcy (Ecuación 36), donde la ICOLD sugiere utilizar cualquier combinación práctica entre  $k_F$  y

$A$  tal que garantice la capacidad de descarga requerida y con la aplicación de un factor de seguridad. Por lo general, las capas relativamente delgadas de materiales altamente permeables resultan más económicas que las capas más gruesas de materiales menos permeables (Auvinet Guichard et al., 2014).

$$Q/i = k_F \cdot A$$

Ecuación 36

Donde,

$Q$  = tasa de flujo en el filtro

$i$  = gradiente hidráulico admisible en el filtro

$k_F$  = conductividad hidráulica del filtro

$A$  = área transversal a la dirección de flujo en el filtro

El diseño de un sistema de drenaje debe considerar el peor escenario como por ejemplo la segregación, para la cual el filtro debe presentar una distribución granulométrica lo suficientemente uniforme, y a su vez, durante el proceso de construcción, mantener una continua inspección y asegurar mediante pruebas en campo que el rendimiento del filtro no se vea comprometido (ICOLD, 1994).

En cuanto a la calidad de los filtros, el material debe consistir en partículas de gran dureza y durabilidad, las cuales no se degraden como el resultado de una acción química, física o biológica, evitando que se dé un aumento en su cohesión o un cambio a su distribución granulométrica, ya sea, durante su fabricación, emplazamiento y compactación, o debido a la aplicación de fuerzas de tensión y cortante (ICOLD, 1994).

Además, la ICOLD presenta recomendaciones que pueden ser aplicables a la hora de construir el filtro en campo, entre estas están el ancho que debe tener, requerimientos para la compactación, control de la segregación, control de la contaminación y control de la calidad.

#### 2.4.2.3. USSCS (1994)

Mediante estudios realizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos de Lincoln, Nebraska, desde 1980 a 1985, el Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (USSCS), presentó en 1994 criterios para la distribución granulométrica de filtros de arena y grava necesarios para prevenir la erosión interna o tubificación del suelo en terraplenes o cimentaciones de estructuras hidráulicas (United States Soil Conservation Service, 1994).

Según los resultados obtenidos en laboratorio, el criterio planteado para el diseño de filtros permite principalmente el sello de grietas, en concordancia con los criterios conocidos de retención y permeabilidad. El filtro debe interceptar el flujo de agua a través de las grietas o aberturas que existan en el suelo base, a su vez, el agua acarrea partículas erosionadas de suelo, mismas que son retenidas en la cara del filtro sellando así la grieta en la interfaz, esta acción previene la erosión y evita que las grietas se extiendan. Si el filtro es diseñado para el sellado de grietas, la permeabilidad requerida en la zona del filtro debe estar basado en un flujo estacionario a través de los poros del suelo base.



Por otra parte, el suelo sin filtros es susceptible de sufrir el fenómeno de tubificación cuando los gradientes del flujo de infiltración son suficientemente altos como para producir velocidades de descarga erosivas en el suelo, por lo que, la metodología planteada permite el paso del agua al tiempo que evita el movimiento de las partículas del suelo base.

La metodología planteada por la USSCS consiste en 12 pasos que permiten determinar los límites granulométricos para el filtro, el objetivo de cada paso se resume a continuación:

- 1) Definir la distribución granulométrica del suelo base en función de varios ensayos, y determinar el parámetro  $d_{155}$  tomando el mayor de todos.
- 2) Definir si el suelo base contiene grava (material más grande que el tamiz No. 4).
- 3) Ajustar la curva de distribución granulométrica del material base en caso de que exista material retenido en el tamiz No. 4.
- 4) Definir a que categoría corresponde el suelo base, en función del porcentaje que pasa el tamiz No. 200, siendo las categorías:
  - a. *Categoría 1:*  $A > 85$  (Arcillas y limos finos)
  - b. *Categoría 2:*  $40 \leq A \leq 85$  (Arenas, limos, arcillas y arenas arcillosas y limosas)
  - c. *Categoría 3:*  $15 \leq A < 40$  (Arenas y gravas, arcillosas y limosas)
  - d. *Categoría 4:*  $A < 15$  (Arenas y gravas)

A= porcentaje que pasa el tamiz No. 200

- 5) Definir el diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro máximo, en función de la categoría del suelo base, este punto cumple con el *criterio de retención*, que a su vez controla la estabilidad del suelo base (Auvinet Guichard et al., 2014), los límites definidos para cada categoría son:
  - a. *Categoría 1:*  $\leq 9 d_{855}$ , pero no menor que 0.2 mm.
  - b. *Categoría 2:*  $\leq 0.7$  mm
  - c. *Categoría 3:*  $\leq \left(\frac{40-A}{40-15}\right) [4d_{855} - 0.7] + 0.7$ , si  $4d_{855} < 0.7$  usar 0.7 mm.
  - d. *Categoría 4:*  $\leq 4d_{855}$
- 6) Definir el diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro mínimo, en función de la categoría del suelo base, este punto cumple con el *criterio de permeabilidad*, y está dado para todas las categorías por  $4d_{155}$ , pero no menor que 0.1 mm.
- 7) Se debe mantener una separación relativamente estrecha entre los límites de diseño, con el propósito de evitar filtros con una granulometría discontinua, como se muestra en la Ilustración 11, en la cual se producen saltos en la curva granulométrica. Se puede identificar si el material presenta una graduación discontinua por simple observación a la curva granulométrica, sin embargo, para propósitos más específicos es necesario un control más preciso, en el cual un diseño más aceptable requiere que la relación entre el diámetro máximo y el diámetro mínimo sea menor o igual que 5 para cualquier porcentaje pasante de 60% o menos (Ecuación 37).

$$\frac{D_{Fmax}}{D_{Fmin}} \leq 5, \quad \text{cuando: \%pasante} \leq 60\%$$

Ecuación 37

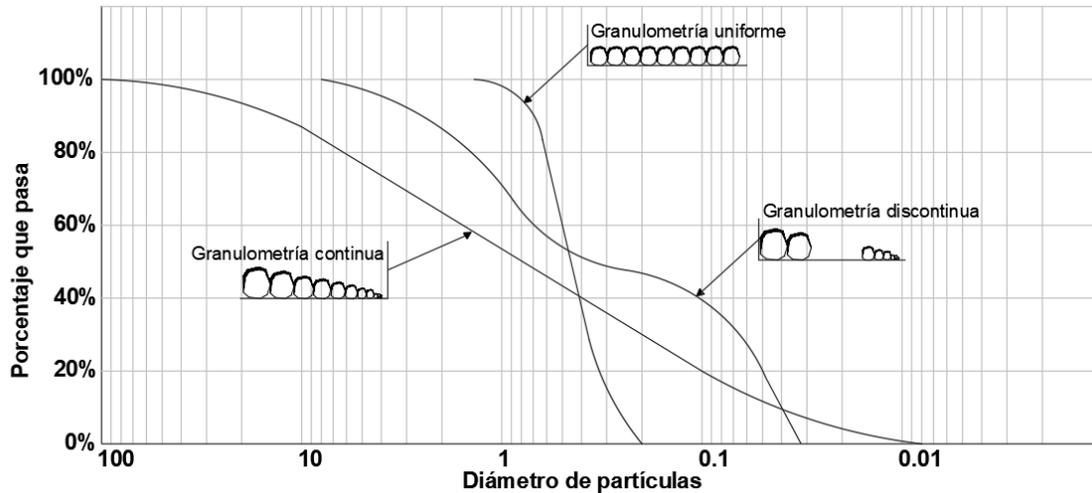


Ilustración 11: Tipos de granulometría: Uniforme, continua y discontinua, adaptado de (Das, 2001).

- 8) Al igual que el paso 7, otro punto importante para prevenir una curva granulométrica discontinua es evitando que el rango de los tamaños de partículas sea extremadamente amplio, por lo que se debe ajustar los límites de tal manera que la parte gruesa y fina tenga un coeficiente de uniformidad de 6 o menos.

$$C_u = \frac{D_{60F}}{D_{10F}} \leq 6$$

Ecuación 38

- 9) Limita el diámetro máximo por el que debe pasar el 100% y el diámetro mínimo por el que debe pasar el 5% del material del filtro a 75 mm y a 0.075 mm, respectivamente.
- 10) Para minimizar la segregación durante la construcción plantea una relación entre el diámetro máximo del 90% y el diámetro mínimo del 10% pasante del filtro. En este punto se aclara que, los filtros compuestos de arena, donde el diámetro correspondiente al 90% del material pasante del filtro es menor que 20 mm, entonces no es necesario ningún ajuste especial para el rango de diferencia entre los límites de diseño.
- 11) Graficar los valores máximos y mínimos de los diámetros con líneas rectas y extrapolar los valores restantes tratando de mantener la misma forma de la curva granulométrica del suelo base (Auvinet Guichard et al., 2014).
- 12) En caso de existir tubería perforada adyacente al filtro, se debe definir el diámetro por el que pasa el 85% del filtro si se trata de un dren no crítico sin cambio de gradiente hidráulico, y el diámetro por el que pasa el 15% del filtro si se trata de un dren crítico con cambio de gradiente hidráulico.

La USSCS da como consideraciones adicionales que en algunos casos no es necesario cumplir con las condiciones mostradas en los pasos 7 y 8, lo que daría un rango entre los límites de diseño un poco más amplio, ya que, en algunos casos un filtro con una gradación entre estos límites puede ser preferible, por ejemplo, si se tienen filtros con una distribución granulométrica estándar. Además, es posible que la curva granulométrica de un filtro que se encuentre dentro de los límites tenga un coeficiente de uniformidad mayor que 6, y aun así sea perfectamente aceptable, manteniendo un comportamiento continuo (Ilustración 11).

Así pues, los pasos de diseño de este procedimiento previenen la utilización de filtros con una granulometría discontinua, lo cual es la principal preocupación asociada a filtros que tienen un alto coeficiente de uniformidad, por lo tanto, no es necesario examinar de cerca el coeficiente de uniformidad de un filtro en particular, siempre que éste se ajuste dentro del rango de los límites de diseño.

#### 2.4.2.4. USACE (2004)

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos plantea el diseño de un filtro basado en el criterio presentado por la USSCS, fundamentándose en tres condiciones principales, siendo éstas, la retención de material, permitir el movimiento libre de agua y la capacidad de descarga (Auvinet Guichard et al., 2014).

El objetivo del diseño planteado se enfoca en el control del movimiento de agua en *terraplenes*, para la cual los filtros deben durante el periodo de vida del proyecto y con un mínimo mantenimiento, retener el material protegido, permitir el libre movimiento de agua y tener suficiente capacidad de descarga, para lo cual debe diseñarse los filtros cumpliendo con el criterio de retención, criterio de permeabilidad y capacidad de descarga, respectivamente (USACE, 2004).

La USACE considera que un filtro debe diseñarse enfocado en proteger el suelo base, manteniendo una permeabilidad mayor que éste, pero no necesariamente debe mantener el flujo o una capacidad de descarga, ya que para casos como terraplenes el flujo es perpendicular a la unión entre el filtro y el suelo base, sin embargo, el criterio garantiza el diseño de un filtro que permita el flujo libre de agua.

Tomando como punto de partida la categorización del suelo base definida por la USSCS, la USACE analiza la estabilidad. Comúnmente la interacción entre el suelo base y un filtro es estable cuando una pequeña cantidad del suelo protegido se mueve dentro del filtro (Indraratna & Locke, 1999), como se muestra en el caso b de la Ilustración 9. Sin embargo, este proceso de diseño recomienda evitar este movimiento y mantener un control en el proceso inicial de la infiltración en terraplenes. De esta manera, para prevenir el movimiento del suelo protegido dentro del filtro y evitar reducir la capacidad del filtro de permitir el movimiento de agua, se aplica el criterio de retención, y se define el diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro máximo, dado para cada categoría por:

- a. *Categoría 1*:  $\leq 9 d_{85S}$ , pero no menor que 0.2 mm.
- b. *Categoría 2*:  $\leq 0.7$  mm
- c. *Categoría 3*:  $\leq \left(\frac{40-A}{40-15}\right) [4d_{85S} - 0.7] + 0.7$ , si  $4d_{85S} < 0.7$  usar 0.7 mm.

- d. *Categoría 4:*  $\leq 4 a 5 d_{85S}$ , el criterio debería aplicar  $4d_{85S}$  en el caso de filtros colocados bajo enrocados sujetos a la acción de olas, o drenes que pueden estar sujetos a un movimiento violento y/o vibración.

El siguiente punto analiza el criterio de permeabilidad, el cual determina el diámetro por el que pasa el 15% del material del filtro mínimo, siendo este de 3 a 5 veces el diámetro por el que pasa el 15% de material del suelo ( $d_{15S}$ ), y se aplica a todas las categorías. Generalmente, se aplica una relación de permeabilidad de al menos 5, sin embargo, en el caso que el material base presente una distribución granulométrica uniforme, una relación de 3 puede ser utilizada.

A continuación, el diseño limita el diámetro máximo por el que debe pasar el 100% y el diámetro mínimo por el que debe pasar el 5% del material del filtro a 75 mm y a 0.075 mm, respectivamente. Además, aclara que la porción de material del filtro que pasa el tamiz No. 40 debe tener un índice de plasticidad de cero.

El diseño del filtro debe mantenerse entre los límites resultantes de la aplicación de los criterios de retención y permeabilidad obtenidos al conectar los valores máximos y mínimos mediante líneas rectas. Además, con el fin de minimizar la segregación o efectos similares, el filtro deberá tener una distribución granulométrica continua, sin la presencia de saltos en la curvatura que indiquen la ausencia de ciertos tamaños de partículas, para lo cual se deberá configurar los límites reduciendo su rango de separación. En el caso de un filtro de arena con diámetro para el 90% del material pasante menor que 20 mm, por lo general, no necesitan limitaciones en el rango para prevenir la segregación, por el contrario, en el caso de filtros de grava, la relación entre el diámetro del 90% y el 10% deberá decrecer rápidamente con el incremento del diámetro del 10%.

Puesto que, la utilización de un filtro puede comúnmente complementarse con la presencia de tubos perforados, el diseño del filtro debe considerar el efecto de éste, para prevenir la infiltración de material del filtro en las perforaciones de la tubería, y da como condición que la relación entre el diámetro mínimo por el que pasa el 50% del material del filtro y el diámetro de la perforación sea de al menos 1 (Ecuación 39).

$$\frac{\text{Diámetro mínimo por el que pasa el 50\% del material del filtro}}{\text{Diámetro de perforación de la tubería}} = \frac{D_{50F}}{d_p} \geq 1$$

*Ecuación 39*

Este proceso de diseño es aplicable para todo tipo de suelos sean cohesivos o no, sin embargo, la USACE recomienda que se realicen ensayos de laboratorio en el caso de limos muy finos, suelos dispersivos y suelos cohesivos muy finos con altos límites plásticos.

#### **2.4.2.5. USBR (2011)**

Al igual que los departamentos mencionados, la Oficina de Reclamos de Estados Unidos (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011) desarrolló en su versión más actual el método de diseño estándar de filtros para el correcto desempeño de presas, mismo que presenta similitudes con los criterios mostrados por USSCS y USACE, sin embargo, se distinguen ciertas diferencias, sobre todo en el trazo final del rango para el filtro (Auvinet Guichard et al., 2014).



Aunque el diseño presentado fue inicialmente desarrollado para uso en presas, esta metodología puede ser aplicada también para elementos de drenaje bajo losas de vertederos, protección de diques, diseño de camas de enrocado, así como muchas otras aplicaciones (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

En el caso de presas, el fenómeno de tubificación es el principal responsable de fallas, debido que remueve y acarrea las partículas del suelo por el paso de flujo de agua, la tubificación puede ocurrir por tres diferentes procesos, como son la erosión hacia atrás, concentración de flujo de agua y la erosión interna (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

La erosión hacia atrás inicia a la salida del flujo del agua y va aumentando hacia donde comienza el flujo (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005; U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011), por otro lado, la concentración de flujo de agua se da cuando existe una grieta o capa de suelo más permeable que genera un escape de agua provocando erosión en las paredes, por último, la erosión interna se genera cuando la granulometría es muy dispersa o bien las características de los finos es tal que se pueden remover fácilmente con el paso de un flujo de agua (Flores Berrones & Gaytán Colin, 2005).

La USBR basó su diseño de filtros en la protección contra los mecanismos que producen tubificación por erosión hacia atrás o erosión interna, buscando un diseño de filtro apropiado con una granulometría que presente vacíos lo suficientemente pequeños para prevenir la migración de finos de suelo base, y a su vez, ser suficientemente permeable para ofrecer resistencia al flujo de agua. Además, la aplicación de este diseño puede ser para todo tipo de suelo base, sin embargo, recomienda que se realicen ensayos de la interacción suelo-filtro, en el caso de suelos sin cohesión de grano muy fino, suelos altamente plásticos, suelos propensos a la desecación y suelos dispersivos.

El criterio de diseño se basa al igual que todos, en los criterios dados por Terzaghi, además, recopila la información dada por la USACE, la USSCS, Sherard y se complementa con ensayos en laboratorio. Este diseño comienza por definir el suelo base en función de las mismas categorías presentadas por la USSCS. Esta categorización se da debido a que los suelos tienen diferentes comportamientos frente a la erosión por acción de flujo de agua, por ejemplo, una arcilla, será más resistente a la erosión que un limo, debido a los enlaces químicos entre las partículas de arcilla, por esta razón se clasifican basados en el contenido de finos (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

Para el caso de suelos en los cuales existe más del 15% de partículas finas, es necesario analizar si las partículas de arcilla son de carácter dispersivo, es decir, cuando los minerales de arcilla tienden a separarse fácilmente y rápidamente cuando son inmersos en agua, sin la necesidad de una asistencia química o mecánica, ASTM D 4221 (1999), esta separación resulta en partículas individuales más pequeñas que las medidas en un ensayo granulométrico, debido a este cambio los límites para el criterio de retención varían.

Una vez clasificado el suelo dentro de las categorías conocidas, se debe determinar si el suelo es o no un suelo dispersivo, es decir que tiene facilidad para diseminarse en agua con facilidad sin necesidad de procesos mecánicos. Para ello se recomienda el análisis en



laboratorio ya sea por el método de doble hidrómetro, ASTM D 4221 (1999), o por el ensayo de Crumb, ASTM D 6572 (2000). Los límites del criterio de retención donde se define el diámetro máximo por el que pasa el 15% del material del filtro para cada categoría están dados por:

- a. *Categoría 1:*  $\leq 9 d_{85S}$ , pero no menor que 0.2 mm.  
Si es suelo dispersivo:  $\leq 6.5 d_{85S}$ , pero no menor que 0.2 mm
- b. *Categoría 2:*  $\leq 0.7$  mm  
Si es suelo dispersivo:  $< 0.5$  mm
- c. *Categoría 3:*  $\leq \left(\frac{40-A}{40-15}\right)[4d_{85S} - 0.7] + 0.7$ , si  $4d_{85S} < 0.7$  usar 0.7 mm.  
Si es suelo dispersivo:  $= 0.5$  mm
- d. *Categoría 4:*  $\leq 4 d_{85S}$

En cuanto al criterio de permeabilidad, el diseño define el diámetro mínimo por el que pasa el 15% del material del filtro para todas las categorías y está dado por  $5d_{15S}$ , pero no menor que 0.1 mm.

A continuación, el diseño limita la cantidad de fino y de material de gran tamaño, para lo cual, define que el diámetro mínimo para el 5% del material pasante sea de 0.075 mm (tamiz No. 200), y que el diámetro máximo para el 100% del material pasante sea de 51 mm (tamiz 2"). Además, para minimizar la segregación durante la construcción utiliza la relación planteada entre el diámetro máximo del 90% y el diámetro mínimo del 10% pasante del filtro dada por la USSCS.

En el caso que el rango entre los límites sea demasiado amplio, existen restricciones adicionales, que limita la diferencia entre el límite más bajo y el límite más alto de manera que no sea mayor que 35%, gráficamente se debe incluir una barra de esta altura, la cual puede moverse alrededor entre los puntos ya obtenidos de los criterios, como se muestra en la Ilustración 12, la finalidad de esta restricción es evitar el diseño de un filtro con una distribución discontinua.

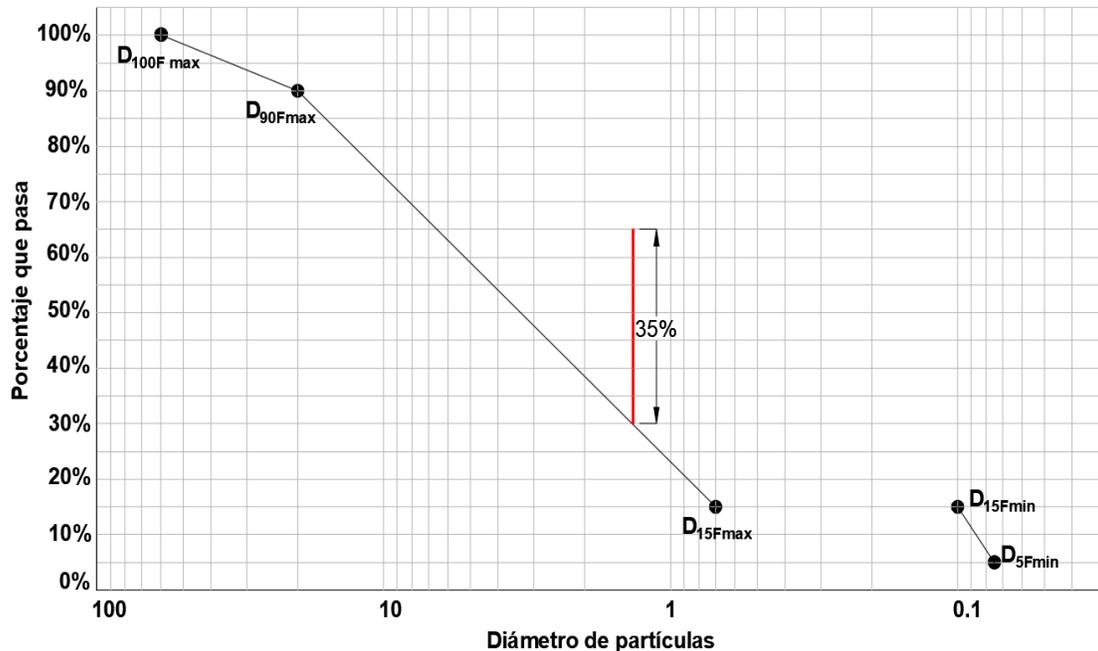


Ilustración 12: Límites de diseño de filtros según USBR, adaptado de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

Según la USBR la curva de distribución granulométrica de un filtro no tiene que ser paralela o similar a la curva granulométrica del suelo base, generalmente, un filtro debería ser uniformemente graduado, para permitir una adecuada permeabilidad y prevenir la segregación durante el proceso de construcción, sin embargo, una arena bien graduada (granulometría continua), puede ser un excelente filtro para material base fino, siempre que se evite la segregación en el emplazamiento. De esta manera, se obtiene gráficamente el límite máximo y mínimo para el filtro mediante la unión de líneas rectas que conectan los puntos máximos y mínimos respectivamente, esto se observa en la Ilustración 12.

Finalmente, la selección de la granulometría para el filtro dentro del rango de los límites puede hacerse en tres pasos:

1. Se define los tamaños más pequeños, si el criterio de retención es el más crítico, entonces la curva debe ser más cercana a  $D_{15Fmin}$ , por otra parte, si el criterio de permeabilidad es más importante, la curva debe ser más cercana a  $D_{15Fmax}$ .
2. Localizar la línea que permita mantener una separación del 35% como se muestra en la Ilustración 12, la cual permite evitar una granulometría discontinua y está basada en definir la uniformidad que se desee para la curva granulométrica del filtro. Si se busca una granulometría uniforme, se debe mover la línea a la derecha cercana al punto  $D_{15Fmin}$ , caso contrario, si se busca una granulometría continua, se debe mover la línea a la izquierda.
3. Para la selección de los tamaños más grandes, la gradación deberá tener la misma pendiente o ligeramente más plana que la existente en el rango de 30 a 60% del



material pasante. Igualmente, la curva debe mantener una relación similar hacia la izquierda entre los puntos  $D_{100Fmax}$  y  $D_{90Fmax}$ .

### 2.4.3. Diseño de filtro granular

La metodología de diseño para un filtro granular se detalla teniendo en cuenta las principales consideraciones que realiza cada autor mencionado en la evolución de diseño de filtros granulares. El procedimiento para el diseño se describe en una serie de 13 pasos, que se detallan a continuación:

1. Se debe definir la curva granulométrica del suelo base, puesto que siempre existirá una variabilidad en los ensayos de laboratorio para determinar la granulometría del suelo, es necesario utilizar un número suficiente de muestras para definir un rango del tamaño de las partículas de suelo base (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011; United States Soil Conservation Service, 1994).

Es posible utilizar la curva granulométrica promedio del material base para el diseño siempre que la variabilidad obtenida sea baja, y se hayan eliminado todos los errores de muestreo y clasificación (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

De la curva granulométrica se debe determinar  $d_{155}$  y  $d_{855}$  siendo los diámetros por los que pasa el 15% y 85%, respectivamente.

En el caso en que predomine el criterio de retención se puede tomar el valor de  $d_{155}$  más pequeño de las curvas obtenidas en laboratorio, de igual manera, en caso de que predomine la permeabilidad se puede tomar el mayor valor de  $d_{155}$ .

2. En el caso que de existir material retenido en el tamiz No. 4, se debe realizar un ajuste a la curva granulométrica del suelo base, para esto se obtiene un factor dado por la Ecuación 40, posteriormente se determina los porcentajes pasantes de cada tamiz menor que el tamiz No.4, mediante la Ecuación 41 (Auvinet Guichard et al., 2014).

$$Factor = \frac{100}{\% \text{ pasa tamiz No. 4}}$$

Ecuación 40

$$\% \text{reajustado tamiz No. } i = Factor \times \% \text{tamiz No. } i$$

Ecuación 41

3. Determinar el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 de la curva granulométrica del suelo base, en caso de haberse realizado el ajuste, determinar el porcentaje de la curva reajustada.
4. Clasificar el suelo base en función del porcentaje pasante el tamiz No. 200 dentro de las categorías dadas por la USSCS.



Los pasos 1 a 4, se resumen en la Tabla 8, mismos que corresponden al análisis del suelo base.

Tabla 8: Diseño de filtro granular: Análisis de suelo base.

<b>DISEÑO DE FILTRO GRANULAR</b>	
<b>Análisis de Suelo Base</b>	
Curva granulométrica de suelo base	
$d_{85S}$ = diámetro que pasa el 85%	
$d_{15S}$ = diámetro que pasa el 15%	
Si existe material retenido en el tamiz No. 4	
$Factor = \frac{100}{\% \text{ pasa tamiz No. 4}}$	
$\% \text{reajustado tamiz No. } i = Factor \times \% \text{tamiz No. } i$	
Determinar % que pasa el tamiz No. 200 (A)	
Clasificar el suelo:	
<i>Categoría 1:</i>	$A > 85$ Arcillas y limos finos
<i>Categoría 2:</i>	$40 \leq A \leq 85$ Arenas, limos, arcillas y arenas arcillosas y limosas
<i>Categoría 3:</i>	$15 \leq A < 40$ Arenas y gravas, arcillosas y limosas
<i>Categoría 4:</i>	$A < 15$ Arenas y gravas

- Identificar si el suelo es de carácter dispersivo, para lo cual se recomienda el análisis en laboratorio ya sea por el método de doble hidrómetro, o por el ensayo de Crumb, (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).
- Se debe aplicar el criterio de retención, para determinar el diámetro máximo por el que pasa el 15% del material del filtro  $D_{15Fmax}$ , en función de la categoría del suelo y considerando si el suelo es o no dispersivo, los diferentes límites y sus aplicaciones se muestran en la Tabla 9.



Tabla 9: Diseño de filtro granular: Criterio de retención.

¿El suelo base es de carácter dispersivo?			
<b>Criterio de retención</b>			
		<i>Suelo No Dispersivo</i>	<i>Suelo Dispersivo</i>
Categoría 1:	Límites	$\leq 9 d_{85S}$ pero no menor que 0.2 mm	$\leq 6.5 d_{85S}$ pero no menor que 0.2 mm
Categoría 2:	Límites	$\leq 0.7$ mm	$< 0.5$ mm
Categoría 3:	Límites	$\left(\frac{40-A}{40-15}\right) [4d_{85S} - 0.7] + 0.7$ si $4d_{85S} < 0.7$ usar 0.7 mm	= 0.5 mm
Aplicación		Terraplenes y cimentaciones de obras hidráulicas (USSCS), Presas de tierra, enrocados y obras hidráulicas pequeñas (USBR)	
<i>Suelo No Dispersivo</i>			
Categoría 4:	Límites	$\leq 4d_{85S}$	$\leq 5d_{85S}$
	Aplicación	Obras hidráulicas pequeñas (USBR)	Enrocados (USACE)(USSCS) Terraplenes (USSCS) Presas de tierra (USBR)

7. Se debe determinar el tipo de aplicación a la que será sometido el filtro, en función de la Tabla 10.

Tabla 10: Tipos de aplicación del filtro.

<b>Tipos de Aplicación</b>
Terraplenes
Presas de tierra
Enrocados
Obras hidráulicas pequeñas
- Muros de contención
- Sistemas de drenaje
- Canales
- Obras similares

8. Se debe aplicar el criterio de permeabilidad, para determinar el diámetro mínimo por el que pasa el 15% del material del filtro  $D_{15Fmin}$ , los diferentes límites según la aplicación se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Diseño de filtro granular: Criterio de permeabilidad.

Criterio de permeabilidad			
Todas las categorías	$\geq 3d_{15s}$	$\geq 4d_{15s}$	$\geq 5d_{15s}$
Aplicación	Terraplenes: Si el material base presenta una granulometría	Terraplenes y cimentaciones de obras hidráulicas (USSCS)	Presas de tierra, enrocados y obras hidráulicas pequeñas (USBR)
En ningún caso debe ser menor que 0.1 mm			

9. Limitar el diámetro máximo por el que debe pasar el 100% y el diámetro mínimo por el que debe pasar el 5% del material del filtro, la Tabla 12, muestra los límites propuestos por los diferentes autores.

Tabla 12: Diseño de filtro granular: Límites al 100% y 5%.

Límites			
	$D_{100Fmax}$	75 mm (tamiz 3") 51 mm (tamiz 2")	(USACE)(USSCS) (USBR)
	$D_{5Fmin}$	0.075 mm (tamiz No. 200)	(USACE)(USSCS) (USBR)

10. Para prevenir una granulometría discontinua, puede realizarse por simple observación a la curva granulométrica del material filtrante, sin embargo, para propósitos más específicos es necesario un control más preciso, el cual limita la relación entre los diámetros obtenidos de cada criterio y reajusta los límites de tal manera que la parte gruesa y fina tengan un comportamiento más uniforme, en la Tabla 13 se resume los límites que se deben cumplir y cuando sería necesaria su aplicación.

Tabla 13: Diseño de filtro granular: Prevención de una granulometría discontinua.

Prevención de una granulometría discontinua				
Aplicación	Límites			
Obras hidráulicas (USSCS)	Mediante simple observación, se recomienda cuando la granulometría del suelo base es continua			
Enrocados, terrapenes y obras de mayor control (USSCS)	$\frac{D_{xFmax}}{D_{xFmin}} \leq 5$ cuando: $x\% \leq 60\%$	Reajuste si se requiere:		
		Permeabilidad	Retención	Ambos
	$Cu = \frac{D_{60F}}{D_{10F}} \leq 6$	Nuevo: $D_{15Fmin} = \frac{D_{15Fmax}}{5}$	Nuevo: $D_{15Fmax} = 5xD_{15Fmin}$	Nuevos $D_{15F}$ manteniendo la relación de 5
Presas de tierra y obras hidráulicas pequeñas (USBR)	$D_{10Fmax} = \frac{D_{15Fmax}}{1.2}$	$D_{60Fmax} = 6xD_{10Fmax}$	$D_{60Fmin} = \frac{D_{60Fmax}}{5}$	
Límite definido por la línea gráfica de 35%				

11. Para prevenir la segregación durante la construcción, todos los autores recomiendan la relación propuesta por la USSCS, entre el diámetro máximo  $D_{90Fmax}$  y el mínimo

$D_{10Fmin}$ . Donde el diámetro  $D_{10Fmin}$  corresponde al resultado de dividir el  $D_{10Fmin}$  para 1.2. En la Tabla 14 se muestran los rangos definidos para  $D_{90Fmax}$ .

Tabla 14: Diseño de filtro granular: Prevención de segregación.

Prevención de segregación		
	$D_{10Fmin}(mm)$	$D_{90Fmax}(mm)$
$D_{10Fmin} = \frac{D_{15Fmin}}{1.2}$	< 0.5	20
	0.5 - 1	25
	1 - 2	30
	2 - 5	40
	5 - 10	50
	> 10	60

12. El rango dentro del cual se puede definir la granulometría del filtro, se obtiene de manera gráfica, donde se grafica el límite máximo y límite mínimo uniendo los diámetros obtenidos, y de haberse dado el caso, los diámetros reajustados para sus respectivos porcentajes, autores como Terzaghi (1922), ICOLD (1994) y USSCS (1994) recomiendan que los límites sean similares a la curva base, sin embargo, USACE (2004) y USBR (2011), recomiendan unir los puntos mediante líneas rectas, e incluso la USBR define una línea de apoyo, que permite una variación máxima de 35% entre los límites. En la Ilustración 13 se muestra un ejemplo de los rangos obtenidos en función de los criterios dados por estos diferentes autores, para un suelo con una granulometría de categoría 2.

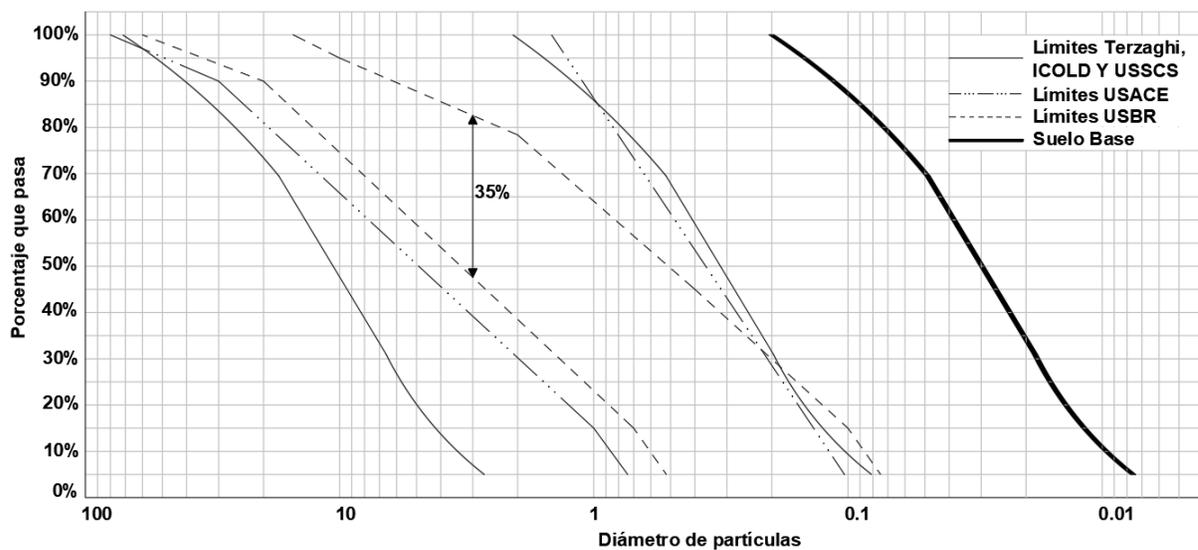


Ilustración 13: Diseño de filtro granular: Ejemplo de límites dados por diferentes criterios, adaptada de (Auvinet Guichard et al., 2014).

13. Se debe definir la granulometría del filtro dentro de los límites obtenidos ya sean con un comportamiento similar al suelo base, o mediante líneas rectas (se recomienda

definir estos límites según el tipo de aplicación que se dé al filtro). Además, en caso de ser necesario garantizar una mayor permeabilidad la curva del filtro debe ser más cercana a punto  $D_{15Fmax}$ , por otra parte, si lo que se busca es prevenir la erosión del suelo base, es decir, garantizar la retención, la curva del filtro debe ser más cercana a punto  $D_{15Fmin}$ , un ejemplo de estas diferentes condiciones se observa en la Ilustración 14.

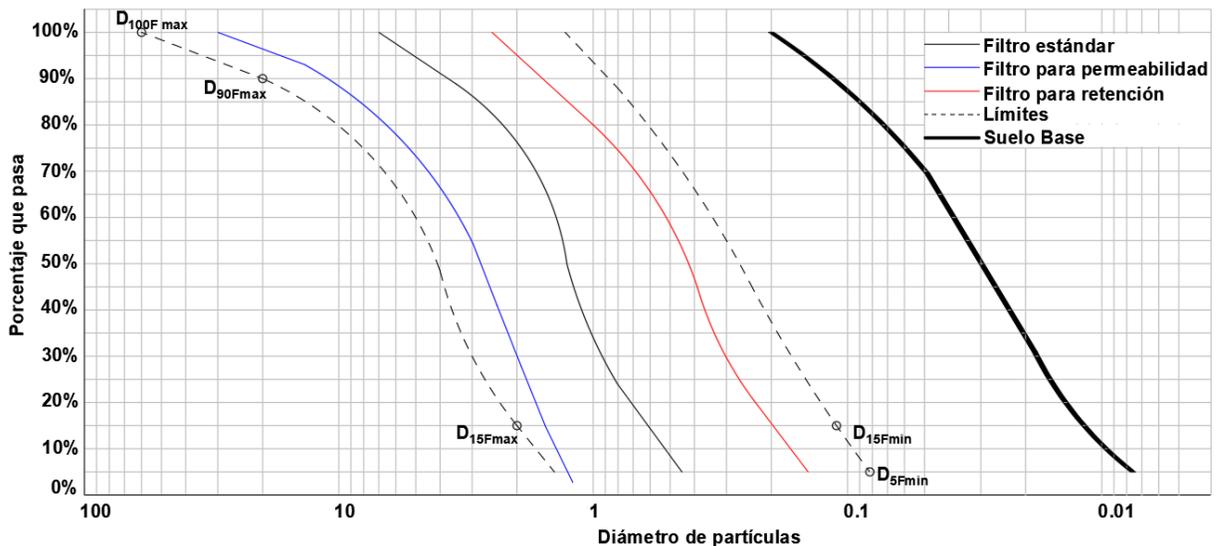


Ilustración 14: Diseño de filtro granular: Ejemplo de curva granulométrica de un filtro granular, adaptada de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

## 2.5. Filtros geotextiles

Los filtros geotextiles mantienen los criterios desarrollados para un filtro granular, con el mismo propósito de permitir el paso de agua manteniendo la estabilidad interna del suelo que se pretende proteger (Aydilek, 2012). La utilización de geotextiles comenzó con la compañía Carthage Mills, que previamente fabricaba filtros granulares, en el año de 1958, aplicada a la estructura de un muelle, de igual manera su uso se extendió a lo largo del mundo, y se utilizó por primera vez en un presa de tierra en 1970 en Francia (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

La utilización de filtros geotextiles ha demostrado ser efectiva, debido a su desempeño, economía, consistencia y su fácil colocación en obra. En la mayoría de aplicaciones el uso de un filtro geotextil sobre un filtro granular puede ser justificado, debido las siguientes ventajas (Christopher & Fischer, 1991):

- Uso de menor material granular o de baja calidad
- Usar drenes más pequeños
- Evitar el uso de tuberías para drenaje
- Facilidad de construcción
- Reduce el riesgo de contaminación del filtro
- Reduce excavaciones

- Menos desperdicio de material

### 2.5.1. Tipos de geotextiles

En la actualidad existen diversas fabricas dedicadas al desarrollo de filtros geotextiles, enfocados en la aplicación que tendrá el filtro. Aunque algunas fábricas utilizan fibras naturales, la mayoría de geotextiles son obtenidos a partir de fibras derivadas de polímeros sintéticos, alrededor del 95% de todos los geotextiles son hechos de polipropileno, seguidas por polietileno, poliéster, poliamidas, nylon y acrílicas (Tonus, 1984; U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012). Los filtros geotextiles pueden ser clasificados en:

- Geotextil tejido:** Consiste en el entrelazado de dos conjuntos de filamentos, hilos o cintas (Tonus, 1984). El tejido se configura en un patrón rectangular simple, los geotextiles tejidos se fabrican utilizando diferentes tipos de fibras: monofilamento (fibra única), multifilamento (muchas fibras paralelas), cinta de hendidura (fibras con forma de cinta) y fibriladas (cintas de hendidura que contienen muchos cortes paralelos más cortos). Como una variación adicional, los diferentes tipos de fibras se pueden retorcer entre sí para formar hilos multifilamento.

Los geotextiles tejidos tienden a tener un costo mayor que otros tipos de geotextiles. Tienen la resistencia y el módulo más altos de cualquier tipo de geotextil, y la resistencia puede variar según la dirección, dependiendo de las fibras utilizadas y del tejido. Tienen menor alargamiento antes de la rotura y se usan principalmente cuando se necesita la alta resistencia a la tracción del tejido. Las aplicaciones comunes incluyen refuerzo en terraplenes de tierra para fortalecer pendientes pronunciadas, bajo terraplenes de caminos para mejorar la capacidad de carga y evitar la intrusión del suelo en los agregados de drenaje libre y como cerca de limo para retener y filtrar temporalmente agua fangosa (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

- Geotextil No Tejido:** Son filamentos continuos que se unen por calor. No tienen un patrón definido y pueden fabricarse de tres maneras: por punzonado, unión por hilado o unión por resina. El punzonado con agujas utiliza agujas de púas para perforar y enredar una masa de fibras sintéticas para formar una tela. Por otro lado, la unión por hilado es un proceso que extrae fibras y luego las deposita sobre una cinta transportadora para formar una red o estera de fibras, que se enredan con orientación aleatoria. El geotextil se puede unir mecánicamente mediante perforación por aguja (menos común) o por unión térmica. La unión de resina se utiliza con menos frecuencia en la fabricación de geotextiles no tejidos. El enlace de resina introduce el problema de la compatibilidad química y la durabilidad de la resina, lo que puede limitar aún más la vida útil del geotextil.

Los geotextiles no tejidos son preferidos para la mayoría de las aplicaciones de filtración del suelo y han reemplazado a los geotextiles tejidos en la mayoría de las aplicaciones donde se requiere filtración (retención de suelo). Los geotextiles gruesos no tejidos se utilizan principalmente para la protección, por ejemplo, entre una geomembrana y grava angular, ya que pueden proporcionar cierta resistencia a la perforación. También tienen la capacidad de transmitir el flujo en el plano de la tela y,



a veces, se utilizan para aplicaciones de drenaje (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

- c. Geotextil de Punto:** Se forman entrelazando una serie de bucles de uno o más hilos para formar un tejido. El monofilamento, el multifilamento y los hilos fibrilados se usan en los geotextiles de punto. Estos se deforman y distorsionan fácilmente, cambiando su tamaño de abertura; por lo tanto, su transporte, almacenamiento, manejo e instalación requieren mucho cuidado para evitar la distorsión del geotextil, lo que podría provocar la erosión del suelo a través de la tela.

### 2.5.2. Funciones de un geotextil

Entre las principales funciones de un geotextil, están (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012):

- Separación
- Refuerzo
- Protección
- Filtración

**Separación:** Un geotextil puede ser utilizado como un separador cuando es colocado entre dos suelos que pueden tener tendencia a mezclarse cuando se aplican cargas. Aunque la separación es inherente en la mayoría de las aplicaciones de un geotextil, ésta se considera como la función principal cuando la necesidad de transmitir el flujo de agua a través del geotextil es de menor importancia.

**Refuerzo:** Los geotextiles pueden reforzar los suelos al quedar intercalados en capas, al apoyar el suelo en una cara expuesta o al encapsular completamente el suelo. Los suelos típicamente pueden resistir a compresión, pero no a tensión. De esta manera se puede lograr el refuerzo del suelo mediante la introducción de elementos estructurales para impartir resistencia a la tracción y cortante. Esta función se puede realizar mediante geotextiles tejidos y no tejidos.

Los geotextiles son a menudo una consideración para el uso en el refuerzo de suelos de limo y arcilla de baja resistencia. El geotextil puede estar intercalado entre capas de suelo compactado, donde el refuerzo se obtiene, aprovechando la resistencia a la tracción del geotextil y la fricción de la interfaz entre el geotextil y el suelo. Si bien los geotextiles tejidos tienen una resistencia a la tracción superior, típicamente generan una fricción de interfaz inferior a la que logran los geotextiles no tejidos.

Los geotextiles son usados más comúnmente como refuerzo para suelos de grano fino. Además, los geotextiles pueden desarrollar una alta resistencia a pequeñas deformaciones. Una aplicación de un geotextil como refuerzo, se da en proyectos para lograr pendientes más pronunciadas de lo que sería posible en los mismos suelos sin refuerzo.

**Protección:** El uso típico de un geotextil en protección es la colocación de un geotextil entre una geomembrana<sup>1</sup> y una capa de grava u otro suelo rocoso que podría perforar la geomembrana y comprometer su propiedad de contención de fluidos. Para lograr la protección deseada, puede ser necesario considerar el estallido, rasgadura y / o perforación del geotextil. Además de realizar cálculos, a veces es necesario realizar pruebas de laboratorio y demostraciones de campo para verificar la protección de una capa crítica.

**Filtración:** La función de filtración de un geotextil consiste en permitir el flujo de líquido, mientras retiene partículas de suelo aguas arriba sobre el geotextil. El diseño de un geotextil para filtración requiere considerar la naturaleza del flujo de infiltración, evaluar el suelo a ser filtrado y considerar el comportamiento del geotextil en este ambiente.

El estudio de la naturaleza del flujo de infiltración requiere un entendimiento de los químicos del agua, variación de flujo y gradientes. La química del agua debe considerarse cuando el agua sea muy alcalina (pH superior a 10), ya que es probable que degrade los geotextiles hechos de resinas de poliéster. De igual manera, el agua ácida (pH inferior a 3) puede degradar algunos geotextiles de poliéster y poliamida. En casos de pH extremo, se debe considerar un material geotextil como polipropileno o polietileno. En cuanto al flujo, este debe mantenerse relativamente constante, y en caso de existir gradientes altos, se debe realizar acciones tal que las propiedades del geotextil no se vean afectadas (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

Todas las funciones mencionadas son a menudo complementarias, sin embargo, siendo el enfoque de este estudio el comportamiento de un geotextil como filtro, en los siguientes puntos se analizará a más detalle, los diversos métodos para la evaluación de un geotextil para filtración, entre los cuales están, el criterio de retención, el criterio de permeabilidad y el criterio de colmatación. Además, para casos críticos de aplicación o condiciones severas de suelo base, es necesario respaldar la evaluación del filtro con ensayos de laboratorio (Christopher & Fischer, 1991).

### 2.5.3. Criterios de diseño para un filtro geotextil

El diseño de un geotextil para filtración es en esencia el mismo que el diseño para un filtro granular, un geotextil puede ser similar a un suelo ya que está compuesto por vacíos (poros) y partículas (filamentos para geotextil tejido y fibras para geotextil no tejido). La estimación del tamaño de poro en un material granular es compleja, por lo tanto, éste se determina a partir del tamaño de partícula mediante su granulometría, mientras que en un geotextil, el tamaño de poro puede ser medido ya sea de manera directa o indirecta (Aydilek, 2012; Holtz, Christopher, & Berg, 1998).

El tamaño de poro de un geotextil, debe ser suficientemente pequeño para prevenir una pérdida significativa de suelo base (criterio de permeabilidad), y lo suficientemente grande para permitir el paso del flujo sin colmatarse (criterio de retención y colmatación), en caso de no definirse un tamaño de poro que garantice un balance entre estas condiciones, puede producirse erosión interna cuando el poro es demasiado grande, o una colmatación

---

<sup>1</sup> Material sintético formado en láminas delgas e impermeables que están destinadas a bloquear la transmisión de fluidos (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

excesiva cuando el poro es demasiado pequeño, como se muestra en la Ilustración 15 (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

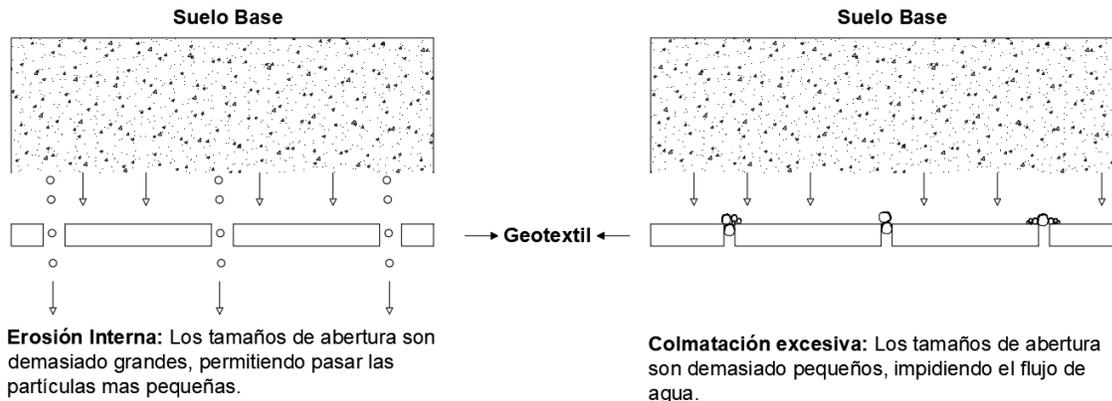


Ilustración 15: Casos de diferentes tamaños de apertura de un geotextil, adaptada de (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

### 2.5.3.1. Criterio de Permeabilidad

Al igual que en un filtro granular, el criterio de permeabilidad para un filtro geotextil se basa en el flujo de agua en el suelo donde intervienen la presión de poro y la tasa de flujo, mismas que pueden ser afectadas por la presencia del filtro, para lo cual, es necesario garantizar que las alteraciones provocadas por el filtro seleccionado sean mínimas y aceptables.

**Requerimiento de la Presión de Poro:** Debido a la presencia del filtro no debe existir o debe ser mínimo el exceso de presión de poro, para lo cual debe cumplirse con la Ecuación 42 (Giroud, 2010).

$$k_F \geq i_S k_S$$

Ecuación 42

Donde:

$$\begin{aligned} k_F &= \text{Conductividad hidráulica del filtro geotextil} \\ k_S &= \text{Conductividad hidráulica del suelo base} \\ i_S &= \text{Gradiente hidráulico del suelo base} \end{aligned}$$

**Requerimiento de la Tasa de Flujo:** La mayoría de geotextiles tejidos y no tejidos tienen una alta permeabilidad, siendo de al menos de  $10^{-4}$  m/s, la cual es equivalente a la permeabilidad de una arena gruesa, por lo tanto, el uso de un geotextil garantiza una permeabilidad al menos 10 a 100 veces mayor que el suelo en el que se instala, es decir, el suelo base (Tonus, 1984; U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

La presencia del filtro disminuye la tasa de flujo en comparación a un caso sin filtro, es posible para dos geotextiles tener la misma permeabilidad y aun así tener diferentes tasas de flujo para una presión dada, por la ley de Darcy, la tasa de flujo laminar depende de la permeabilidad, el gradiente hidráulico y la sección transversal. Como el gradiente es proporcional a la longitud de la trayectoria del flujo, un geotextil grueso permitirá un menor



flujo que uno más delgado con una misma permeabilidad (Giroud, 2010; U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

Para contrarrestar este problema debido al espesor, se utiliza la permitividad, la cual describe el flujo perpendicular a través del geotextil, y está dada por la permeabilidad dividida por el espesor del geotextil (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

Para el caso de un filtro geotextil de 1 a 10 mm de espesor, la reducción de la tasa de flujo es menor al 10% cuando se cumplen con la Ecuación 43 (Giroud, 2010).

$$k_F \geq k_S$$

Ecuación 43

Los requerimientos pueden ser agrupados y comparados de manera que el requerimiento de la tasa de flujo puede ser de mayor o menor importancia que el requerimiento de la presión de poro, dependiendo del gradiente hidráulico del suelo base, como se muestra en la Ecuación 44 (Giroud, 2010).

$$k_F \geq \max(i_S k_S, k_S)$$

Ecuación 44

### 2.5.3.2. Criterio de Retención

Las propiedades que intervienen en el criterio de retención son la compacidad relativa y el coeficiente de uniformidad, que definen la estabilidad interna del suelo base. En el caso de un filtro granular, no se consideran estas propiedades ya que el espesor del filtro permite que éste se adapte definiendo únicamente el tamaño de poro. Sin embargo, en el caso de un geotextil, tener en cuenta el tamaño de poro del filtro no es suficiente, por lo que se debe analizar también la estabilidad interna del suelo base (Giroud, 2010).

En suelos internamente estables, existen partículas de cierto tamaño que forman una estructura continua. Esta estructura atrapa las partículas más pequeñas que las partículas de las que está compuesta, por lo tanto, si los poros de un filtro son capaces de retener la estructura, todas las partículas más pequeñas, también serán retenidas. Entonces, para el criterio de retención, debe definirse el tamaño de partícula que forma la estructura, y el tamaño máximo de abertura (poro) que debe tener el filtro geotextil para retener la estructura formada (Giroud, 2010).

**Tamaño de partículas que forman la estructura de retención:** La capacidad de retención de la estructura que se forma depende de la estabilidad interna del suelo, que a su vez depende el coeficiente de uniformidad. En suelos con un coeficiente de uniformidad de aproximadamente 3, las partículas están estrechamente unidas, de manera que presentan una estabilidad interna máxima (Giroud, 2010).

Como se muestra en la Ilustración 16, caso a), cuando un suelo tiene un coeficiente de uniformidad igual o menor que 3, las partículas más gruesas forman una estructura continua que retiene el resto de las partículas. Por otra parte, cuando tienen un coeficiente de uniformidad mayor que 3, caso b), las partículas más gruesas, generalmente, no se

encuentran en contacto, por lo tanto, no forman una estructura continua capaz de retener el resto de las partículas.

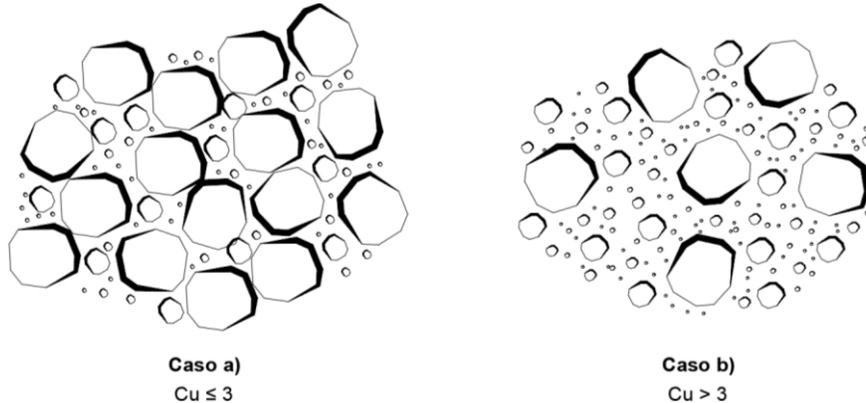


Ilustración 16: Estructura del suelo según el coeficiente de uniformidad, adaptado de (Giroud, 2010).

Cuando el coeficiente de uniformidad es mayor que 3, las partículas gruesas se encuentran flotando en la matriz formada por las partículas más finas, razón por la cual, no contribuyen a la estabilidad interna. En este caso, algunos autores como Giroud (2010), definen los límites para el criterio de retención, considerando únicamente la fracción fina del suelo que presente un coeficiente de uniformidad de 3.

**Tamaño máximo de abertura que debe tener un filtro:** El tamaño máximo depende de la compacidad relativa del suelo. Si el suelo está en un estado suelto y el tamaño de abertura es mayor que el tamaño de partícula, todas las partículas pasaran a través del filtro como se muestra en la Ilustración 17, caso a). Por otra parte, si el suelo se encuentra en un estado denso y si el tamaño de abertura es igual al tamaño de partícula, las partículas no pasan a través del filtro, ya que, en este caso, se forma un puente estable, una vez que han pasado las primeras partículas, como se muestra en la Ilustración 17, caso b).

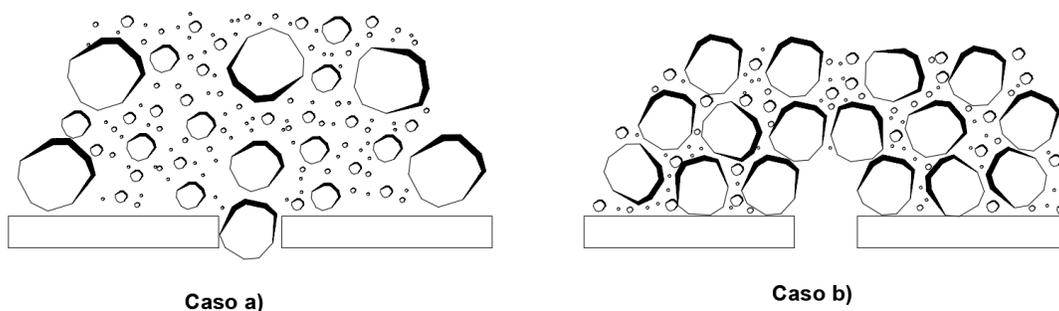


Ilustración 17: Casos del comportamiento del geotextil dependiendo de la compacidad relativa del suelo, adaptado de (Giroud, 2010).

### 2.5.3.3. Criterio de Colmatación

La colmatación es el resultado de la penetración de las partículas finas, dentro del geotextil, bloqueando los poros o generando acumulaciones arriba del geotextil, reduciendo así su permeabilidad, aunque este criterio este directamente relacionado con los criterios de retención y permeabilidad, no necesariamente el cumplimiento de los



mismos garantiza que el diseño del filtro geotextil este completo, ya que el sistema aún puede fallar por colmatación (Christopher & Fischer, 1991).

Los criterios anteriores, solo limita el tamaño máximo de abertura para retener el suelo, sin restricción en las aberturas de poro más pequeñas o el porcentaje del volumen de aberturas (porosidad) que debería presentar. Existen filtros que aunque tienen una alta permeabilidad, tienen un número muy limitado de aberturas por unidad de área, por lo tanto, es necesario que el diseño de filtro geotextil asegure un número de aberturas suficiente para así evitar la colmatación (Christopher & Fischer, 1991; Giroud, 2010).

**Alteración del flujo:** El flujo de un líquido tal como, suelos, material granular o en fibras, se da a través de canales que se forman en los mismos, conocidos como canales de flujo. En un suelo el número de canales de flujo por unidad de área es mayor que el número de canales de flujo en un filtro, por lo tanto, en la unión suelo filtro existe una reducción en el número de canales y consecuentemente una alteración al flujo.

La alteración provocada en el flujo genera el movimiento de las partículas finas del suelo en el filtro, generando una acumulación en la superficie o dentro del filtro, por tanto, el número de canales de flujo en el filtro por unidad de área debe ser tan grande como sea posible, para de esta manera, minimizar la alteración del flujo por el suelo retenido (cumpliendo con el criterio de retención). Además, si las partículas finas, colmatan algunos de los canales de flujo, menor será su impacto, mientras mayor sea el número de canales de flujo por área (Giroud, 2010).

**Determinación del número de aberturas:** El número de canales de flujo es igual o proporcional al número de aberturas en un filtro geotextil, por lo tanto, para evitar la colmatación, un geotextil debe tener tantas aberturas por unidad de área como sea posible, la explicación del origen de los límites tanto para geotextiles tejidos como no tejidos ha sido dada por Giroud (2010), y se resume a continuación.

La determinación se da al comparar el número de aberturas de un filtro geotextil y de un filtro granular, ya que, un filtro granular evita la colmatación de manera eficiente. Entonces, se comienza por definir el número de aberturas de un filtro granular, el cual se puede expresar como una función del tamaño de abertura como se muestra en la Ecuación 45.

$$N_o \approx \frac{C}{O_F^2}$$

Ecuación 45

Donde:

$$\begin{aligned} N_o &= \text{número de aberturas de un filtro granular} \\ O_F &= \text{tamaño de abertura} \\ C &= \text{constante} \end{aligned}$$

Para un filtro geotextil el número de aberturas está dado por la Ecuación 46, que se muestra a continuación:

$$N_o \approx \frac{A_R}{O_F^2}$$

Ecuación 46



Donde,

$$\begin{aligned} N_o &= \text{número de aberturas de un filtro geotextil tejido} \\ O_F &= \text{tamaño de abertura} \\ A_R &= \text{área relativa de abertura (área de aberturas/área total)} \end{aligned}$$

Por lo tanto, para un filtro geotextil, con el mismo tamaño de abertura de un filtro granular, al comparar la Ecuación 45 y la Ecuación 46, se puede definir el área relativa de aberturas mínima necesaria, como se muestra en la Ecuación 47, sin embargo, este criterio es solo aplicable para un filtro geotextil tejido.

$$A_R \min \geq C$$

Ecuación 47

Donde:

$$\begin{aligned} A_R \min &= \text{área relativa de abertura mínima} \\ C &= \text{constante} \end{aligned}$$

Para el caso de un filtro geotextil no tejido, la determinación del número de aberturas por unidad de área es más compleja, y solo se han logrado definir límites (Ecuación 48).

$$\frac{(1 - \sqrt{1-n})^2}{O_F^2} \leq N_o \leq \frac{4(1 + 0.4n - \sqrt{1-n})^2}{\sqrt{3} O_F^2}$$

Ecuación 48

Donde:

$$\begin{aligned} N_o &= \text{número de aberturas de un filtro geotextil no tejido} \\ O_F &= \text{tamaño de abertura} \\ n &= \text{porosidad} \end{aligned}$$

Entonces comparando la Ecuación 45 y la Ecuación 48, algunos autores han decidido limitar el valor de la porosidad ( $n$ ), dando un criterio conservador (Ecuación 49), que asegura que el número de aberturas en un geotextil no tejido, es al menos igual al número de aberturas de un filtro granular que tenga el mismo tamaño de abertura.

$$n \min \geq C$$

Ecuación 49

Donde:

$$\begin{aligned} n \min &= \text{porosidad mínima para un geotextil no tejido} \\ C &= \text{constante} \end{aligned}$$

#### 2.5.4. Evolución de diseño de filtros geotextiles

Desde el inicio de la utilización de geotextiles, una gran variedad de límites han sido propuestos para el diseño como filtros, basados siempre en los conceptos dados de permeabilidad, retención y colmatación, además, en la mayoría de los casos los límites varían según sean o no condiciones severas o críticas de aplicación (Giroud, 2010; Holtz et al., 1998).



Una condición crítica de aplicación corresponde a la naturaleza crítica del proyecto. Se considera una situación crítica cuando, existe un alto riesgo de pérdida de vidas, y/o daño estructural debido a una falla en la filtración, donde los costos de reparación son mucho mayores a los costos de instalación, por otra parte, una situación menos crítica se da cuando existe evidencia de colmatación antes de una potencial falla, donde, el costo de reparación es igual o menor que el costo de instalación (Holtz et al., 1998).

De la misma manera, una condición severa del proyecto corresponde a un suelo base mal graduado, con gradientes hidráulicos altos y condiciones de flujo cíclico, dinámico o pulsante. Por otra parte, una condición menos severa, se da cuando el suelo base es uniforme o bien graduado, existen gradientes hidráulicos bajos y se da un flujo estacionario (Holtz et al., 1998).

**2.5.4.1. Criterios desde 1972 a 1990**

En la Tabla 15 se muestra algunos de los criterios desarrollados entre los años 1972 a 1990, dados por diferentes autores para el criterio de permeabilidad, además, establece las condiciones de aplicación de cada límite (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).

Tabla 15: Criterio de Permeabilidad (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).

Criterio de Permeabilidad (1972 -1990)			
Autor	Límite	Comentario	
Calhoun (1972)	$k_F \geq k_S$	Condiciones de flujo estacionario, aplicaciones no críticas y condiciones de suelo no severas	
Schober & Teindl (1979)			
Wates (1980)			
Haliburton et al (1982)			
Carroll (1983)			
Carroll (1983)	$k_F \geq 10 k_S$	Aplicaciones críticas y condiciones de suelo severas	
French Committe of Geotextiles and Geomembranes (1986)	Limita la permitividad: $\psi \geq 10^{3-5} k_S$	Caso crítico	$10^5 k_S$
		Caso menos crítico	$10^4 k_S$
		Caso arena limpia	$10^3 k_S$
Koerner (1990)	$\psi_{geotextil} \geq \psi_{requerido}/FS$	Factor de seguridad según las condiciones de suelo desde 6 a 25	

$k_F$ : permeabilidad del filtro     $k_S$ : permeabilidad de suelo base     $\psi$ : permitividad del filtro

De la misma manera, la Tabla 16 muestra la variación que ha presentado los límites para el criterio de retención hasta el año de 1990 (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).



Tabla 16: Criterio de Retención (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).

Criterio de Retención (1972 -1990)		
Autor	Límite	Comentario
Calhoun (1972)	$O_{95}/d_{85S} \leq 1$ $O_{95} \leq 0.2 \text{ mm}$	Tejido; %pasa No. 200 = 50% Tejido; suelos cohesivos
Zistcher (1975)	$O_{50}/d_{50S} \leq 1.7 - 2.7$ $O_{50}/d_{50S} \leq 25 - 37$	Tejido; $Cu < 2$ ; $d_{50S} = 0.1 - 2 \text{ mm}$ No Tejido; suelos cohesivos
Ognik (1975)	$O_{95}/d_{90S} \leq 1$ $O_{95}/d_{90S} \leq 1.8$	Tejido No Tejido
Sweetland (1977)	$O_{15}/d_{95S} \leq 1$ $O_{15}/d_{15S} \leq 1$	No Tejido; $Cu = 1.5$ No Tejido; $Cu = 4$
Schober and Teindl (1979)	$O_{90}/d_{50S} \leq 2.5 - 4.5$ $O_{90}/d_{50S} \leq 4.5 - 7.5$	Tejido y no tejido No tejido grueso
Millar et al (1980)	$O_{50}/d_{85S} \leq 1$	Tejido y no tejido
Rankilor (1981)	$O_{50}/d_{85S} \leq 1$ $O_{15}/d_{15S} \leq 1$	No tejido; suelos con $0.02 < d_{85S} < 0.25$ No tejido; suelos con $d_{85S} < 0.25$
Carroll (1983)	$O_{95}/d_{85S} \leq 2 - 3$	Tejido y no tejido
Faure et al. (1986)	$O_{95}/d_{85S} \leq 1 - 2$	Depende naturaleza critica del proyecto
French Committe of Geotextiles and Geomembranes (1986)	$O_{95}/d_{85S} \leq 0.38 - 1.25$	Depende del tipo de suelo, compactacion y condiciones de aplicación
Fischer et al. (1990)	$O_{50}/d_{85S} \leq 0.8$ $O_{50}/d_{15S} \leq 1.8 - 7$ $O_{50}/d_{50S} \leq 0.8 - 2$	Basado en el tamaño de poro del geotextil; depende del $Cu$ del suelo

Cu: Coeficiente de uniformidad de suelo base      $O_x$  : tamaño de abertura del geotextil por el que pasa x%  
 $d_{xS}$  : diametro por el que pasa X% del material base

Finalmente, para el mismo periodo, se muestra en la Tabla 17, los límites estimados por algunos de los autores dados en la Tabla 15 y la Tabla 16, mismos que definen los límites, dependiendo si se trata de una condición crítica o severa de aplicación (Aydilek, 2012; Christopher & Fischer, 1991).

Tabla 17: Criterio de Colmatación (1972 - 1990) (Aydilek, 2012; Christopher &amp; Fischer, 1991).

Criterio de Colmatación (1972 -1990)		
Autor	Límite	Comentario
Calhoun (1972)	Ensayos de laboratorio $A_R \geq 4\% - 6\%$	Condiciones severas o críticas de aplicación No severas o menos críticas de aplicación
Millar et al. (1980)	$O_{50}/d_{15S} \leq 1$	No severas o menos críticas de aplicación
Haliburton et al (1982) Carroll (1983)	Ensayos de laboratorio	Condiciones severas de aplicación
French Committe of Geotextiles and Geomembranes (1986)	$O_{95} \geq 4d_{15S}$	Tamaño mínimo de poro para suelos con contenido de finos
Fischer et al. (1990)	$O_{15}/d_{15S} \leq 0.8$ a $1.2$ $O_{50}/d_{50S} \leq 0.2 - 1$	Tamaño mínimo de poro para suelos con contenido de finos
Koerner (1990)	$A_R \geq 4\% - 6\%$ $n \geq 30\% - 40\%$ Ensayos de laboratorio	Tejido: No severas o menos críticas No tejido: No severas o menos críticas Condiciones severas o críticas de aplicación
$A_R$ : Area relativa de aberturas pasa x%	$n$ : porosidad $d_{xS}$ : diametro por el que pasa X% del material base	$O_x$ : tamaño de abertura del geotextil por el que

#### 2.5.4.2. FHWA (1998)

The Federal Highway Administration de Estados Unidos (FHWA), en el año de 1998, publicó una guía de diseño y construcción de geotextiles, en la cual da los conceptos básicos a ser considerados para el diseño de un geotextil como filtro.

El diseño parte de tres conceptos, los cuales establecen que (Holtz et al., 1998):

- Los geotextiles deben retener el suelo (criterio de retención), mientras
- permiten el paso del agua (criterio de permeabilidad), durante
- el periodo de vida de la estructura (criterio de colmatación).

Además, para un desempeño efectivo, el geotextil debe también resistir el proceso de instalación (criterio de conservación)

El diseño que presenta la FHWA fue el resultado de un detallado estudio llevado a cabo en Estados Unidos y Europa por Christopher and Holtz en el año de 1985. El nivel del diseño requerido depende de la naturaleza crítica del proyecto y de la severidad de las condiciones hidráulicas y del suelo base. Especialmente para proyectos críticos, la selección del filtro geotextil debe ser la apropiada, considerando el riesgo y las consecuencias que provocaría la falla del filtro geotextil, para dichos proyectos, el diseño del filtro debería ser conservador.

Entonces, con la finalidad de cumplir los conceptos básicos de diseño y teniendo en consideración las condiciones críticas y de severidad, la FHWA, propone los siguientes límites para cada criterio de diseño de un filtro geotextil.

##### a. Criterio de Permeabilidad

Para una aplicación poco crítica y con bajas condiciones de severidad (Ecuación 50):



$$k_F \geq k_S$$

Ecuación 50

Mientras que para una aplicación crítica y con condiciones severas (Ecuación 51):

$$k_F \geq 10 k_S$$

Ecuación 51

Dentro de este criterio se propone, además, requerimientos para la permitividad, dados por la Ecuación 52:

$$\begin{aligned} \psi &\geq 0.5 \text{ seg}^{-1} \text{ para } < 15\% \text{ pasante del tamiz No. 200} \\ \psi &\geq 0.2 \text{ seg}^{-1} \text{ para } 15\% \text{ al } 50\% \text{ pasante del tamiz No. 200} \\ \psi &\geq 0.1 \text{ seg}^{-1} \text{ para } > 50\% \text{ pasante del tamiz No. 200} \end{aligned}$$

Ecuación 52

Donde:

$$\begin{aligned} k_F &= \text{conductividad hidráulica del filtro geotextil} \\ k_S &= \text{conductividad hidráulica del suelo base} \\ \psi &= \text{permitividad del geotextil} \end{aligned}$$

**b. Criterio de Retención**

Para flujo estacionario, se da el límite mostrado en la Ecuación 53:

$$AOS \text{ o } O_{95} \leq B d_{85S}$$

Ecuación 53

Donde:

$$\begin{aligned} d_{85S} &= \text{diámetro por el que pasa el 85\% del material del suelo base} \\ AOS \text{ o } O_{95} &= \text{tamaño de abertura aparente} \\ B &= \text{constante} \end{aligned}$$

Dentro de este límite, el valor de *B*, varía de 0.5 a 2, y depende de la densidad del suelo base, su coeficiente de uniformidad y el tipo de geotextil. A continuación, se dan los valores de *B*, en función del tipo de suelo:

- Para arenas, arenas con grava, arenas limosas y arenas arcillosas, donde el porcentaje pasante el tamiz No. 200, es menor que el 50%, los valores están dados por la Tabla 18.

Tabla 18: Valores constante *B*, para arenas, arenas con grava, arenas limosas y arenas arcillosas (Holtz et al., 1998).

Condición Suelo	Valor B
$Cu \leq 2$	1
$2 \leq Cu \leq 4$	0.5 Cu
$4 < Cu < 8$	8/Cu
$Cu \geq 8$	1



- Para limos y arcillas, donde el porcentaje pasante el tamiz No. 200, es mayor que el 50%, depende del tipo de geotextil, y sus valores están dados por la Tabla 19.

Tabla 19: Valores constante *B*, para limos y arcillas (Holtz et al., 1998).

Condición	Valor B
Tejido	1
No tejido	1.8
Ambos	$0.3/d_{85S}$

*Flujo dinámico* se da en el caso de producirse gradientes hidráulicos altos, donde las partículas de suelo pueden mover el geotextil, entonces el uso de un valor  $B = 1$ , no es conservador, por lo cual, la estructura de retención no se desarrollará y el geotextil requerirá retener partículas incluso más finas, cuando el criterio de retención es primordial, el valor de  $B$  deberá ser reducido a 0.5, dando lugar a la Ecuación 54.

$$AOS \text{ o } O_{95} \leq 0.5 d_{85S}$$

Ecuación 54

Los límites mostrados asumen que el suelo base es internamente estable, para el caso en que el suelo presente condiciones de inestabilidad interna de sus partículas, se deberían realizar pruebas de laboratorio para seleccionar un geotextil adecuado (Holtz et al., 1998).

**c. Criterio de Colmatación**

En caso de una aplicación poco crítica o con bajas condiciones de severidad, el límite está dado por la Ecuación 55

$$AOS \text{ o } O_{95} \geq 3 d_{15S}$$

Ecuación 55

Donde,

$$d_{15S} = \text{diámetro por el que pasa el 85\% del material del suelo base}$$

$$AOS \text{ o } O_{95} = \text{tamaño de abertura aparente}$$

La Ecuación 55 se aplica para suelos con  $Cu > 3$ , mientras que para suelos con  $Cu \leq 3$ , la selección del geotextil se basa en el criterio de retención.

En situaciones donde existe una alta probabilidad de darse colmatación, los límites presentados en la Ecuación 56 y en la Ecuación 57 pueden ser aplicados (Holtz et al., 1998).

- Geotextil No Tejido:

$$n \geq 50\%$$

Ecuación 56

- Geotextil tejido

$$A_R \geq 4 \%$$

Ecuación 57

Donde,

$$A_R \text{ min} = \text{área relativa de abertura mínima}$$

$n = \text{porosidad}$

Comúnmente, los geotextiles no tejidos tienen una porosidad mayor a 70%, al igual que los geotextiles tejidos compuestos de monofilamentos, por lo que cumplen fácilmente con estos límites, sin embargo, algunos geotextiles tejidos, como los geotextiles fibrilados, por lo que su uso no es recomendable.

Por otra parte, en el caso de una aplicación crítica o con condiciones severas, se recomienda seleccionar el geotextil en función de los criterios de permeabilidad y de retención, y realizar pruebas de filtración usando muestras de suelo en sitio y bajo la condición hidráulica necesaria. La FHWA recomienda como el método más aproximado, el ensayo de la tasa de gradiente, ASTM D 5101 (2010), "Medición del potencial de colmatación del sistema Suelo-Geotextil, por la tasa de gradiente".

#### 2.5.4.3. Giroud (2010)

Los límites presentados por Giroud se basan en el análisis de los requerimientos de las propiedades del suelo base como la presión de poro, la tasa de flujo, la estabilidad interna del suelo, entre otras, de tal manera, que define las condiciones para la selección de un geotextil que se desenvuelva apropiadamente como filtro. Los límites que establece para cada criterio se presentan a continuación (Giroud, 2010):

##### a. Criterio de Permeabilidad

Como se explica en la sección 2.5.3, la permeabilidad del geotextil depende del requerimiento de la tasa de flujo y del requerimiento de la presión de poro, dando como resultado el límite mostrado en la Ecuación 58.

$$k_F \geq \max(i_s k_s, k_s)$$

Ecuación 58

Donde:

$$\begin{aligned} k_F &= \text{conductividad hidráulica del filtro geotextil} \\ k_s &= \text{conductividad hidráulica del suelo base} \\ i_s &= \text{gradiente hidráulico} \end{aligned}$$

##### b. Criterio de Retención

Se presenta en función de la estabilidad interna del suelo, donde considera el coeficiente de uniformidad lineal y la compacidad relativa del suelo base.

El coeficiente de uniformidad lineal se determina a partir de la línea de tendencia de la parte central de la curva granulométrica del suelo base, como se muestra en la Ilustración 18, y se obtiene mediante la Ecuación 59. La definición de este parámetro, la realiza el autor de tal manera de simplificar el análisis matemático, y llegar a ecuaciones más simples, mismas que se expresan en función del coeficiente de uniformidad lineal, en lugar del coeficiente de uniformidad.

$$Cu' = \frac{d_{60s'}}{d_{10s'}} \text{ lo que es igual a } \sqrt{\frac{d_{100s'}}{d_{05s'}}$$

Ecuación 59

Donde:

$d_{100s}'$  = diámetro correspondiente al 100% de la línea de tendencia  
 $d_{60s}'$  = diámetro correspondiente al 60% de la línea de tendencia  
 $d_{10s}'$  = diámetro correspondiente al 10% de la línea de tendencia  
 $d_{0s}'$  = diámetro correspondiente al 0% de la línea de tendencia

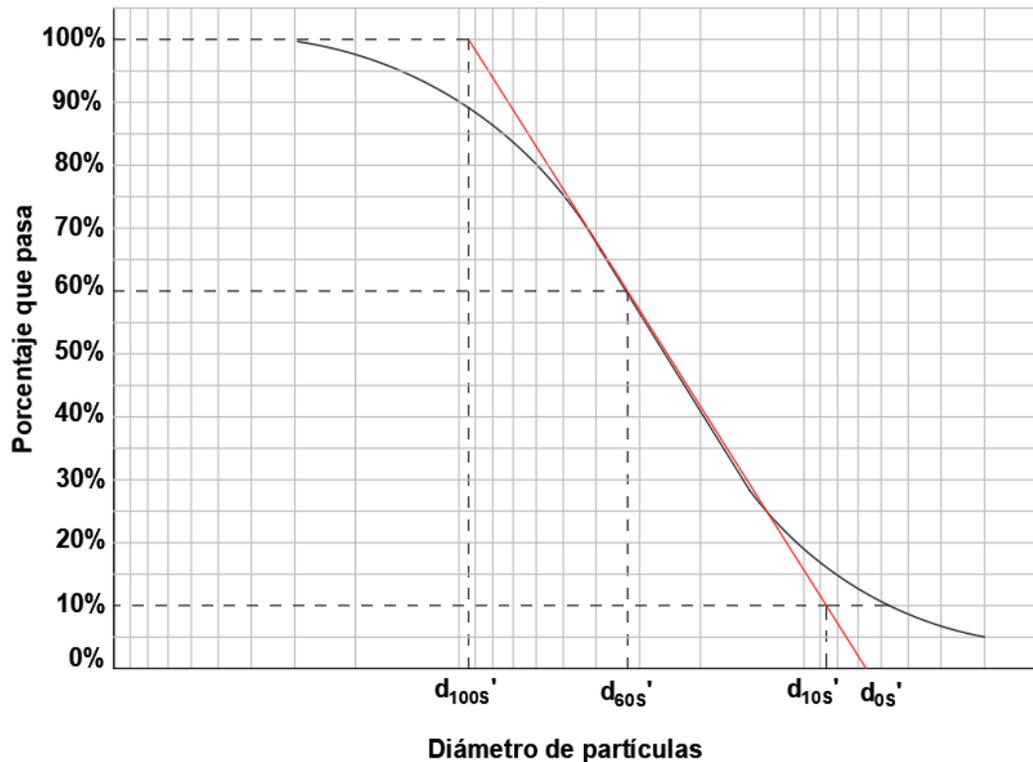


Ilustración 18: Coeficiente de uniformidad lineal, adaptada de (Giroud, 2010).

Los límites están dados en caso de que  $Cu' \leq 3$ , para un suelo suelto, semi – denso y denso, (Giroud, 2010) donde:

- Suelo suelto ( $I_D \leq 35\%$ )

$$AOS \leq (Cu')^{0.3} d_{85s}'$$

Ecuación 60

- Suelo semi – denso ( $I_D < 65\%$ )

$$AOS \leq 1.5 (Cu')^{0.3} d_{85s}'$$

Ecuación 61

- Suelo denso ( $I_D \geq 65\%$ )

$$AOS \leq 2 (Cu')^{0.3} d_{85s}'$$

Ecuación 62



De igual manera, en caso de  $Cu' > 3$ , los límites están dados para un suelo suelto, semi – denso y denso, donde:

- Suelo suelto ( $I_D \leq 35\%$ )

$$AOS \leq \frac{9 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$$

Ecuación 63

- Suelo semi – denso ( $I_D < 65\%$ )

$$AOS \leq \frac{13.5 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$$

Ecuación 64

- Suelo denso ( $I_D \geq 65\%$ )

$$AOS \leq \frac{18 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$$

Ecuación 65

Donde:

$d'_{85S}$  = diámetro por el que pasa el 85% del material del suelo base lineal

AOS = tamaño de abertura aparente

$Cu'$  = coeficiente de uniformidad lineal

$I_D$  = índice de compacidad relativa

### c. Criterio de Colmatación

Giroud parte de la ecuación para la determinación del número de aberturas de un filtro granular (Ecuación 45), donde el valor de la constante  $C$  es de 0.1, definido para un filtro granular estándar, de esta manera define el área relativa mínima para un filtro geotextil tejido, como se muestra en la Ecuación 66.

$$A_R \geq 10 \%$$

Ecuación 66

Por otra parte, para el caso de un filtro geotextil no tejido establece que, el criterio debe ser conservador, y define que la porosidad del filtro debería ser mayor o igual al 55%, como se muestra en la Ecuación 67.

$$n \geq 55\%$$

Ecuación 67

Donde:

$A_R$  = área relativa de abertura

$n$  = porosidad

### 2.5.5. Diseño de un filtro geotextil

A continuación, se detalla la metodología de diseño para un filtro geotextil, teniendo en cuenta las principales consideraciones que realiza cada autor, mencionado en la sección anterior. Esta metodología se la describe en una serie de 8 pasos.

1. Definir la condición crítica y severa del proyecto, misma que depende de la importancia del proyecto y de las condiciones a las que está sometido el suelo base. Los parámetros para definir estas condiciones consisten en: el nivel de riesgo existente, costos, gradiente hidráulico y condiciones de flujo. En la Tabla 20, se muestran valores típicos del gradiente hidráulico para ciertos proyectos (Giroud, 2010; Luettich, Giroud, & Bachus, 1991), además se dan las consideraciones para definir el proyecto (Holtz et al., 1998).

Tabla 20: Diseño de filtro geotextil: Análisis del proyecto.

<b>DISEÑO DE FILTRO GEOTEXTIL</b>		
<b>Análisis del proyecto</b>		
<b>Proyecto</b>	<b>Gradiente hidráulico típico</b>	
Desagüe estándar	≤ 1	
Drenaje de pared vertical	1.5	
Drenaje del borde del pavimento	≤ 1	
Sistema de extracción / detección de lixiviados de vertederos	1.5	
Sistema de eliminación de la colección de lixiviados del vertedero	1.5	
Sistema de eliminación de recolección de agua de superficie de cierre de vertedero	1.5	
Diques	2	
Núcleos de arcilla de presas	3 - 10	
Protección del canal interior	1	
Protección costera	10	
Embalse líquido con revestimientos de arcilla	> 10	
<b>Parámetro</b>	<b>Crítico</b>	<b>Poco Crítico</b>
Riesgo de pérdida de vida y/o daño estructural debido a la falla	Alto	Ninguno
Costo de reparación versus costo de instalación	Mucho mayor	Igual o menor
Evidencia de colmatación antes de una potencial falla	Ninguno	Si
<b>Parámetro</b>	<b>Severo</b>	<b>Poco Severo</b>
Suelo base	Mal graduado	Uniforme o bien graduado
Gradiente hidráulico	Alto	Bajo
Condiciones de flujo	Dinámica, cíclica o pulsante	Estacionario

2. Caracterizar el suelo base, y definir los parámetros de conductividad hidráulica (permeabilidad) y la curva de distribución granulométrica, de la cual se obtienen el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), y los diámetros  $d_{155}$  y  $d_{855}$  por los que pasa el 15% y



85% del material, respectivamente (Luettich et al., 1991), este paso se resume en la Tabla 21.

Tabla 21: Diseño de filtro geotextil: Análisis de Suelo Base.

<b>Análisis de Suelo Base</b>		
<i>Curva granulométrica de suelo base</i>		<i>Coefficiente de Uniformidad</i>
$d_{85S}$	= diámetro que pasa el 85%	$Cu = \frac{d_{60S}}{d_{10S}}$
$d_{60S}$	= diámetro que pasa el 60%	
$d_{15S}$	= diámetro que pasa el 15%	
$d_{10S}$	= diámetro que pasa el 10%	
	Crítico	Poco Crítico
<i>Permeabilidad</i> $k_s$	Medida en laboratorio, manteniendo las condiciones de campo. Método ASTM D 5084 o equivalente.	Medida en laboratorio, o estimado mediante ecuaciones empíricas en función de $d_{10S}$

3. Aplicar el criterio de retención para determinar el tamaño máximo de abertura que debe tener el geotextil, basados en los límites mostrados en la Tabla 22, mismos que se basan en los criterios más actuales dados por la FHWA (1998) y Giroud (2010). La selección de un geotextil que cumpla con este valor se puede realizar mediante el ensayo ASTM D 4751 (1999), o se puede obtener de la ficha técnica que provee la industria fabricante del geotextil.

Tabla 22: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Retención.

Criterio de Retención				
FHWA (1998)	$AOS \text{ o } O_{95} \leq B d_{85S}$			
	Arenas, arenas con grava, arenas limosas y arenas arcillosas		Limos y arcillas	
	% que pasa tamiz No. 200 < 50 %		% que pasa tamiz No. 200 $\geq$ 50 %	
Flujo Estacionario	Condición Suelo	B	Condición Geotextil	B
	$Cu \leq 2$	1	Tejido	1
	$2 \leq Cu \leq 4$	0.5 Cu	No tejido	1.8
	$4 < Cu < 8$	8/Cu	Ambos	$0.3/d_{85S}$
	$Cu \geq 8$	1		
Flujo Dinámico	$AOS \text{ o } O_{95} \leq 0.5 d_{85S}$			
GIROUD (2010)	$Cu' \leq 3$		$Cu' > 3$	
Suelo Suelto	$I_D \leq 35\%$	$AOS \leq (Cu')^{0.3} d_{85S}'$	$AOS \leq \frac{9 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$	
Suelo Semi-denso	$35\% < I_D < 65\%$	$AOS \leq 1.5(Cu')^{0.3} d_{85S}'$	$AOS \leq \frac{13.5 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$	
Suelo Denso	$I_D \geq 65\%$	$AOS \leq 2(Cu')^{0.3} d_{85S}'$	$AOS \leq \frac{18 d_{85S}'}{(Cu')^{1.7}}$	

$AOS \text{ o } O_{95}$ : Tamaño de abertura aparente     $Cu'$ : Coeficiente de uniformidad lineal  
 $d_{85S}'$ : Diámetro por el que pasa el 85% del material del suelo base lineal  
 $I_D$ : Índice de compacidad relativa

4. Definir la permeabilidad mínima que puede tener el geotextil, en función del gradiente hidráulico y de la permeabilidad del suelo base, es decir, aplicando el criterio de permeabilidad, como se muestra en la Tabla 23, basada en los criterios más actuales dados por la FHWA (1998) y Giroud (2010). La permeabilidad del geotextil puede ser determinada mediante el ensayo ASTM D 4491 (1999), o se puede obtener de la ficha técnica que provee la industria fabricante del geotextil.

Tabla 23: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Permeabilidad.

Criterio de Permeabilidad		
FHWA (1998)	Crítico	Poco Crítico
Permeabilidad $k_F$	$k_F \geq 10 k_S$	$k_F \geq k_S$
Permitividad $\psi$	$\psi \geq 0.5 \text{ seg}^{-1}$ para < 15% pasante del tamiz No. 200 $\psi \geq 0.2 \text{ seg}^{-1}$ para 15% al 50% pasante del tamiz No. 200 $\psi \geq 0.1 \text{ seg}^{-1}$ para > 50% pasante del tamiz No. 200	
GIROUD (2010)	$k_F \geq \max(i_S k_S, k_S)$	

$i_S$ : Gradiente hidráulico

5. Aplicar el criterio de colmatación para garantizar la efectividad del filtro, dentro de este paso se definen los límites dados por la FHWA (1998) y Giroud (2010), tal como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Colmatación.

Criterio de Colmatación		
FHWA (1998)	$AOS \text{ o } O_{95} \geq 3 d_{15S}$	
	Geotextil No Tejido	Geotextil Tejido
	$n \geq 50\%$	$A_R \geq 4 \%$
GIROUD (2010)	$n \geq 55\%$	$A_R \geq 10 \%$

$A_R$ : Área relativa de abertura       $n$  = porosidad

6. Durante la construcción se recomienda especificar las propiedades mínimas de resistencia, mismas que dependen de la severidad de la instalación, ya que, el material de drenaje que se coloca junto al filtro y la técnica de construcción puede afectar al geotextil.
7. Algunas de las aplicaciones que se dan a los geotextiles provocan una prolongada exposición a la luz solar. En estos casos, se recomienda el uso de aditivos como el dióxido de titanio o el negro de humo (residuos de la combustión incompleta de productos de petróleo) para proporcionar al geotextil una mayor resistencia a la degradación debido a la luz ultravioleta. De igual manera, si la aplicación del geotextil dará lugar a una exposición significativa a productos químicos (como en aplicaciones de vertederos de contención de desechos), la compatibilidad química del geotextil con los productos químicos debe evaluarse utilizando métodos como la prueba 9090A de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU (Environmental Protection Agency, 1992; Luettich et al., 1991).
8. Seleccionar el filtro geotextil de tal manera que cumpla con las propiedades de retención, permeabilidad y colmatación. En caso de ser necesario, aplicar las pruebas de laboratorio correspondientes a la interacción suelo – filtro como es la normativa ASTM D 5084 (2000) para la medición de la permeabilidad, sobre todo en casos en que la aplicación del filtro sea crítica/severa.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso que se utiliza para analizar un filtro parte de la selección de un suelo fino con contenido de limos y arcillas como suelo base. El suelo seleccionado debe cumplir ciertas características que garanticen una permeabilidad dentro de un rango entre  $1 \times 10^{-4}$  hasta  $1 \times 10^{-8}$  cm/s para poder aplicar los procedimientos de la normativa ASTM D 5084 (2000). Una vez caracterizado el suelo base, se procede a realizar el diseño de cada tipo de filtro para ser probados en laboratorio mediante ensayos de permeabilidad y posterior medición de la migración de finos de la muestra.

Los ensayos de permeabilidad corresponden a pruebas de carga variable realizadas en una cámara de presión como es el caso del equipo triaxial. Por otra parte, la migración de finos se evalúa mediante cambios en la curva granulométrica del suelo antes del ensayo de permeabilidad y después del mismo, comparando la parte superior e inferior del testigo ensayado. A continuación, se describe el proceso correspondiente a cada uno de los ensayos realizados.

#### 3.1. Selección y caracterización del suelo base

La selección del suelo base inicia con un muestreo de distintos tipos de suelos en varios puntos alrededor de la ciudad de Cuenca, de acuerdo con las formaciones geológicas que contengan material fino. A partir de las muestras, se procede a caracterizar cada material por medio de parámetros como su distribución granulométrica, límites de plasticidad, densidad, entre otros, con la intención de seleccionar aquel que cumpla con las características de un suelo fino según la clasificación SUCS.

Una vez caracterizadas las muestras obtenidas, la selección se la realiza considerando que cuanto mayor es el contenido de arcillas en el suelo, mayor es la plasticidad, así como la compresibilidad y la cohesión, mientras que la permeabilidad disminuye (Puy Santín, 2005). De esa manera, para garantizar la permeabilidad del suelo base se selecciona el suelo que cumpla con un 50% o más pasante el tamiz No. 200, y que presente el menor índice de plasticidad entre todas las muestras.

##### 3.1.1. Obtención de muestras

Inicialmente, se parte mediante la identificación de sitios alrededor de la ciudad de Cuenca, en los cuales existan afloramientos de las formaciones con suelos finos y se puede identificar un talud que no contenga cobertura vegetal. Posteriormente se realiza una inspección visual del terreno y se busca un sitio en el cual exista uniformidad con respecto al tipo de material, evitando zonas donde se presenten cambios de estratos o capas muy finas del material.

La obtención de las muestras de suelo se la realiza de dos maneras, según los ensayos que se vayan a ejecutar. Inicialmente se procede a realizar los ensayos para la clasificación y caracterización de las muestras obtenidas, por lo tanto, las muestras pueden ser alteradas, en estado disgregado o en forma de pequeños bloques, que

permita conocer la distribución granulométrica, los límites de Atterberg, la densidad del suelo, entre otros ensayos que no requieran de una muestra inalterada.

Por otra parte, la toma de muestras para la ejecución de ensayos de permeabilidad, se la debe realizar de tal manera que el suelo resulte en un estado muy similar a su estado natural, evitando ser alterado, manteniendo las mismas condiciones de campo al momento de ensayarlo en laboratorio. Para ello, se utiliza un tubo de pared delgada, similar a un tubo Shelby, el cual es utilizado generalmente para la obtención de muestras de arcilla inalterada (Das, 2002a).

El tubo fue elaborado específicamente para la obtención de muestras del suelo base, siendo éste de un diámetro interno de 40.6 mm y un diámetro externo de 42.5 mm, con lo cual se obtiene un grado de alteración de la muestra de suelo de 9.57% en base a la Ecuación 68. Cuando el porcentaje de área alterado es menor al 10%, la muestra puede ser considerada como inalterada (Das, 2002a).

$$A_R(\%) = \frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2} * 100$$

Ecuación 68

Donde:

*A<sub>R</sub>* = porcentaje de área alterada con respecto al área de suelo  
*D<sub>o</sub>* = diámetro externo del tubo muestreador  
*D<sub>i</sub>* = diámetro interno del tubo muestreador

La muestra es tomada de manera vertical en la parte media del talud, hincando el tubo muestreador mediante percusión hasta profundizar 15 cm aproximadamente. Es importante mencionar que previamente se excava para retirar la capa superficial del suelo, manteniéndose a una profundidad variable entre 20 a 50 cm. Dicha capa se remueve ya que está generalmente erosionada y que posee un contenido de partículas finas distintas a las capas inferiores. Además, las muestras son tomadas de un talud que no contenga cobertura vegetal.

Al extraer las muestras del suelo, se las almacena en una funda plástica para conservar su humedad. Para su extracción del tubo muestreador se utiliza una gata hidráulica que la empuja fuera del tubo desde su parte superior. Además, es importante conservar la dirección de la muestra en el suelo, puesto que de esa manera se analizará la permeabilidad vertical en dirección de la gravedad.

El almacenamiento y transporte de las muestras debe garantizar que no se afecte su estructura debido a golpes o cargas externas, como también se debe evitar su exposición a la luz solar para evitar la evaporación del agua. La intención es mantener a todas las muestras bajo las mismas condiciones para su ensayo.

### 3.1.2. Distribución granulométrica

El análisis de la distribución granulométrica se la realiza de forma complementaria entre el cribado y el análisis hidrométrico, con la intención de obtener una curva granulométrica completa para la caracterización del suelo. Basado en la norma ASTM C 136 (2001), el análisis por cribado consiste en la determinación de la distribución del tamaño de las



partículas del suelo por medio de un proceso de tamizado. Los tamices que se utilizan para dicho ensayo corresponden a la serie fina, siendo los descritos en la Tabla 25:

Tabla 25: Serie de tamices para ensayo granulométrico.

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>
No. 4	4.750
No. 8	2.360
No. 10	2.000
No. 16	1.180
No. 30	0.600
No. 40	0.425
No. 50	0.300
No. 100	0.150
No. 200	0.075

El ensayo consiste en tomar una muestra con masa entre 300 a 500 g, luego mediante lavado, usando el tamiz No. 200 se remueve todo material que pasa por el mismo (Anexo 32). Se seca la muestra de suelo al horno, a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se procede a separarla por la serie de tamices indicada por medio de agitación durante 5 minutos. El material es retenido por los tamices para determinar la distribución del tamaño de partículas. Es necesario realizar correcciones de humedad para determinar la cantidad de material inicial en caso de no realizar un secado previo.

Por otra parte, está el ensayo por medio del hidrómetro, el cual está basado en la norma ASTM D 422 (2002). Consiste en un método cuantitativo para la determinación de la distribución de tamaños de las partículas del suelo. Para partículas con dimensiones mayores a 0.075 mm (retenidas en el tamiz No. 200) se utiliza el procedimiento de análisis granulométrico, mientras que para partículas de menor tamaño se determina por un proceso de sedimentación, utilizando un hidrómetro para obtener la información necesaria.

Para el ensayo se requiere una masa de 50 a 65 g de suelos finos, previamente secados al ambiente como se indica en la norma ASTM D 421 (2002). Este material se toma de lo que pasa el tamiz No. 10. Como defloculante se utiliza una solución de Hexametáfosfato de Sodio al 4%. Para preparar la muestra se añade 125 ml de solución junto con el suelo en un recipiente y se deja remojar durante 8 a 12 horas.

En una probeta se coloca 1000 ml de agua destilada y se toma la medida del hidrómetro, luego se deja 875 ml de agua destilada y se añade 125 ml de solución de Hexametáfosfato de Sodio, se mezcla completamente y se coloca el hidrómetro para tomar otra medida con la cual se calcula el valor correspondiente a la corrección dada por el defloculante. La lectura del hidrómetro se realiza en la parte superior del menisco, luego para los cálculos de los diámetros y el porcentaje de material, se realiza la corrección por menisco en base a la diferencia entre el nivel del menisco menos el nivel de la superficie del líquido en la probeta, es decir, se calcula la altura del menisco desde la superficie del líquido.



A continuación, se coloca la muestra de suelo en un recipiente de mezcla y se utiliza agua destilada para facilitar la disposición de todo el material. Se añade dos terceras partes de agua destilada y se mezcla por 2 minutos. Luego se coloca la mezcla en otra probeta graduada, asegurándose de que todos los sólidos son lavados del recipiente y llenando la probeta con agua destilada hasta alcanzar un nivel de 1000 ml. Se coloca una tapa y se mezcla bien el contenido con movimientos giratorios hacia arriba y hacia abajo.

Mantener la probeta en un lugar de temperatura constante, lo más cercana a 20°C. Empezar a tomar el tiempo inmediatamente, introducir el hidrómetro y tomar lecturas en tiempos acumulados de  $t = 0.25$  min, 0.5 min, 1 min, 1.5 min y 2 min. Una vez culminados los 2 primeros minutos, retirar el hidrómetro y colocarlo en la probeta con la solución. Las lecturas adicionales deben ser tomadas a los tiempos  $t = 4$  min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h y 48 h. Para cada lectura se recomienda introducir el hidrómetro 30 segundos antes y luego retirarlo hacia la otra probeta. Luego de cada medida, se debe tomar la temperatura de la solución con la mezcla.

Después, se realiza la corrección de humedad de la muestra inicial y se calcula la cantidad de material fino basado en la totalidad de la muestra inicial. Una vez terminado el proceso de toma de medidas, se procede a lavar el material en suspensión sobre un tamiz No. 200, secarlo y tamizarlo para determinar la distribución de los tamaños de suelo de las partículas de mayor tamaño.

El cálculo de los porcentajes de suelo en suspensión, se lo realiza mediante la Ecuación 69:

$$P = \left[ \frac{100000}{W} * \frac{G}{G - G_1} \right] * (R - G_1)$$

Ecuación 69

Donde:

$P$  = porcentaje de suelo en suspensión  
 $R$  = lectura del hidrómetro corregido  
 $W$  = masa total de suelo seco dispersado para la prueba  
 $G$  = gravedad específica del suelo  
 $G_1$  = gravedad específica del líquido de la suspensión

El diámetro de las partículas en suspensión se calcula mediante la Ecuación 70 que aplica la ley de Stokes.

$$D = \sqrt{\left[ \frac{30 * \eta}{1980 * (G - G_1)} \right] * \frac{L}{T}}$$

Ecuación 70

Donde:

$D$  = diámetro de la partícula [mm]  
 $\eta$  = viscosidad del agua a la temperatura indicada [poises]  
 $L$  = distancia desde la superficie al centro de gravedad del hidrómetro [cm]  
 $T$  = tiempo acumulado desde el inicio de la sedimentación [min]  
 $G$  = gravedad específica del suelo



$$G_1 = \text{gravedad específica del líquido de la suspensión}$$

### 3.1.3. Índice de plasticidad

El cálculo del índice de plasticidad está basado en la aplicación de la norma ASTM D 4318 (2000), la cual considera únicamente los ensayos para determinar dos de los límites de Atterberg, límite líquido y límite plástico, con ello se calcula el índice de plasticidad.

**Límite líquido (LL):** Corresponde al contenido de agua en porcentaje de un suelo definido entre un estado semilíquido y plástico. Para el ensayo se requiere tomar una muestra de suelo de todo el material que pasa el tamiz No. 40. Se añade agua hasta formar una pasta, ésta se coloca en la cuchara de Casagrande con una espátula para alcanzar una capa de una profundidad máxima de 8 mm. Con un ranurador, se genera un corte a lo largo de la línea central de la muestra y se procede a golpear la muestra en el dispositivo a una velocidad de 2 revoluciones por segundo. La altura de caída de la muestra debe ser de 10 mm y se cuenta el número de golpes necesarios hasta que la muestra se junte una distancia de 12.7 mm (Das, 2002b).

El ensayo depende de la humedad del suelo, teniendo una relación inversamente proporcional entre la humedad y el número de golpes requeridos para que la muestra se junte la distancia indicada. El proceso se repite para obtener al menos 2 puntos más. Se recomienda obtener 2 muestras de humedad entre 25 y 35 golpes, 1 cercana a 25 golpes y 2 entre 25 y 15 golpes. Se grafica en las abscisas el número de golpes y en las ordenadas en escala logarítmica el contenido de agua de las muestras. Finalmente, se determina el límite líquido realizando un ajuste para hallar la humedad del suelo correspondiente a 25 golpes (Das, 2002b).

**Límite plástico (LP):** Representa el contenido de agua en porcentaje de un suelo definido entre un estado plástico y semisólido. De manera similar, se requiere material que pasa el tamiz No. 40. Se añade agua y se forma una pasta con menor humedad que para el límite líquido, con la cual se debe rodar sobre un cristal usando la palma de la mano, a un ritmo de 80 movimientos por minuto. Se debe rodar la muestra hasta alcanzar un diámetro similar a 3.2 mm, momento en el cual deben aparecer grietas en la muestra, con lo que indica que la muestra está con una humedad adecuada. En caso de presentarse grietas en diámetros mayores, se requiere incrementar la humedad del suelo. Por otro lado, si no se presentan las grietas en la muestra, se debe amasarla para eliminar el exceso de humedad de ésta. Finalmente, se repite el ensayo y se toma el suelo rodado para obtener la humedad de cada prueba.

**Índice de plasticidad (IP):** Indica un rango del contenido de agua en el cual un suelo tiene un comportamiento plástico. Este valor es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

### 3.1.4. Clasificación del suelo

El proceso de clasificación del suelo está basado en la normativa ASTM D 2487 (2000) y depende del análisis granulométrico, límite líquido e índice de plasticidad. Este procedimiento es útil para clasificar suelos gruesos que pasan desde el tamiz de 75 mm hasta suelos muy finos compuestos de arcillas.



El procedimiento para la clasificación del suelo se divide en 2 grupos, el primero útil para la clasificación de suelo de grano fino donde el 50% o más de su masa pasa el tamiz No. 200. El segundo grupo, para suelos donde más del 50% de la masa es retenida en el tamiz No. 200.

Al momento de seleccionar el suelo base, se descarta cualquier suelo que no esté dentro del grupo de suelos de grano fino, es decir, de acuerdo con los objetivos planteados, se descarta los suelos que resulten con un contenido de finos menor al 50%.

**Suelo de grano fino:** Se analiza la carta de plasticidad (Ilustración 1) para determinar la posición del punto de índice de plasticidad versus límite líquido, con respecto a la línea A (Ecuación 8). Existen algunas opciones entre las que se tienen:

- Arcilla inorgánica si el punto cae sobre o por encima de la línea A, el índice de plasticidad es mayor a 4 y la presencia de materia orgánica no influencia el límite líquido.
  - o Se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL) si el límite líquido es menor a 50.
  - o Se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH) si el límite líquido es mayor o igual a 50.
  - o Se clasifica como una arcilla limosa (CL-ML) si el punto en la carta de plasticidad está sobre o por encima de la línea A y el índice de plasticidad entre un rango de 4 a 7.
- Limo inorgánico si el punto cae debajo de la línea A o el índice de plasticidad es menor a 4 y la presencia de materia orgánica no influencia el límite líquido.
  - o Se clasifica como un limo (ML) si el límite líquido es menor que 50.
  - o Se clasifica como un limo elástico (MH) si el límite líquido es mayor o igual a 50.
- Limo o arcilla orgánica si la materia orgánica está presente en cantidades suficientes para influir en el límite líquido cuando el límite líquido del suelo secado a 110 +5°C es menor al 75% del límite líquido del suelo original. Para este caso se recomienda revisar la norma ASTM D 2487 (2000), para determinar los subgrupos existentes.

Si menos del 30% pero más del 15% del suelo es retenido en el tamiz No. 200, se deberá añadir al nombre de grupo la terminación “con arena” o “con grava” según el predominante. En caso de coincidir los porcentajes se da preferencia a la arena. Por otro lado, si 30% o más del suelo es retenido en el tamiz No. 200, se deberá añadir al nombre de grupo las palabras “arenoso” o “tipo grava” según el predominante. En caso de coincidir los porcentajes se da preferencia a la arena. Finalmente se presenta el nombre del grupo, su símbolo y los resultados de pruebas de laboratorio.

### 3.1.5. Densidad aparente

Indica la masa total (sólidos más agua) por unidad de volumen en una determinada condición de humedad. El procedimiento para determinar la densidad aparente ( $\rho$ ) de suelos cohesivos se basa en el principio de Arquímedes, donde, mediante el uso de una

delgada película de cera líquida o parafina sólida, se obtiene el volumen de la muestra por el volumen de agua que desplaza, evitando la absorción de agua (Medina Dávila, 2008).

Esta propiedad es evaluada basándose en la norma ASTM D 4531 (2002), siguiendo el método B con parafina. Consiste en tomar el peso húmedo de una muestra representativa de suelo cortada de una forma lo más suavizada posible, después, se sumerge momentáneamente la muestra en parafina en estado líquido, misma que debe mantenerse a una temperatura entre 60 y 70°C, y repetir la inmersión hasta que se forme una capa continua. Posteriormente, se determina el peso de suelo cubierto con parafina, se sumerge la muestra en una probeta graduada con agua y se determina el volumen desplazado. Después del ensayo se determina la humedad de la muestra, evitando tomar partes con parafina.

El cálculo de la densidad húmeda se lo realiza mediante la Ecuación 71.

$$\rho_w = \frac{M}{V_{pc} - V_p}$$

Ecuación 71

Donde:

$$V_p = \frac{M_{pc} - M}{\rho_p}$$

Ecuación 72

$\rho_w$  = densidad húmeda [g/cm<sup>3</sup>]  
 $M$  = peso inicial de la muestra [g]  
 $V_{pc}$  = volumen de agua desplazada debido a la muestra con parafina [cm<sup>3</sup>]  
 $V_p$  = volumen de parafina [cm<sup>3</sup>]  
 $M_{pc}$  = peso de la muestra con parafina [g]  
 $M$  = peso inicial de la muestra [g]  
 $\rho_p$  = densidad de la parafina 0.8 [g/cm<sup>3</sup>]

Además, mediante la relación gravimétrica del contenido de humedad (similar a la Ecuación 17) se puede determinar la densidad seca del suelo con la Ecuación 73:

$$\rho_s = \frac{\rho_w}{1 + w}$$

Ecuación 73

Donde:

$\rho_s$  = densidad seca [g/cm<sup>3</sup>]  
 $w$  = contenido de humedad del suelo

### 3.1.6. Gravedad específica

Es conocida también como densidad de sólidos (Gs), se refiere a la relación entre el peso específico de la materia de las partículas del suelo y el peso específico del agua destilada a 20°C. Está basada en la norma ASTM D 854 (2002). La densidad de sólidos es usada para determinar las relaciones gravimétricas del suelo, tales como la relación de vacíos y

el grado de saturación. Además, este parámetro se puede correlacionar con la composición mineralógica de las partículas del suelo (Mayoral Villa et al., 2007).

El procedimiento de ensayo consiste en tomar aproximadamente 50 g de suelo que pasa el tamiz No. 4. Primero, se debe determinar el peso de matraz con agua a temperatura (T) hasta la marca de calibración, posteriormente se debe determinar el peso de matraz más suelo y agua a temperatura (T) hasta la marca de calibración (Anexo 33), asegurando que se haya eliminado todo el contenido de aire, ya sea mediante calor (baño maría), vacío, o ambos. Se determina el peso seco del material ensayado y se realiza la corrección por temperatura mediante los valores de coeficiente  $k$  dados en la tabla 2 de la norma ASTM D 854 (2002).

La gravedad específica está dada por la Ecuación 74:

$$G_{s,20^{\circ}\text{C}} = \left( \frac{M_s}{M_{mw,T} + M_s - M_{mws,T}} \right) k$$

Ecuación 74

Donde:

$M_s$  = peso de suelo seco al horno [g]

$M_{mw,T}$  = peso de matraz más agua a la temperatura T [g]

$M_{mws,T}$  = peso de matraz más agua y suelo a la temperatura T [g]

$k$  = coeficiente de temperatura

### 3.2. Permeabilidad

El método de ensayo para la medición de la conductividad hidráulica en materiales porosos está basado en la normativa ASTM D 5084 (2000). Esta normativa aplica para la medición de la permeabilidad con una pared flexible en una cámara de presión (Anexo 21) a temperaturas entre 15 y 30 °C. El método a ser utilizado consiste en un ensayo de carga variable con elevación de la cota de salida. Este procedimiento puede ser utilizado para muestras inalteradas, remoldeadas, compactadas, entre otras, para suelos que tengan una permeabilidad hidráulica dentro de un rango entre  $1 \times 10^{-4}$  hasta  $1 \times 10^{-8}$  cm/s.

Según la normativa ASTM D 5084 (2000), las muestras deben tener un diámetro mínimo de 25 mm y una altura mínima de 25 mm, pero se recomienda mantener la relación altura – diámetro entre 2 y 3 (Das, 2002b) y mantener una variabilidad de las medidas de las muestras dentro de un rango +- 5%. Para todos los ensayos se colocará 2 capas de geotextil en la parte superior e inferior de la muestra, para evitar el paso de partículas de suelo hacia el equipo triaxial (Anexo 27).

El ensayo se realiza de cuatro maneras distintas, la primera para analizar el comportamiento del suelo sin ningún filtro se coloca al extremo de la muestra, una capa con esferas de polipropileno (Anexo 28) entre 4.75 y 2.36 mm de diámetro, es decir partículas que pasan el tamiz No. 4 y son retenidas en el tamiz No. 8; esta zona sirve para eliminar el contacto directo del suelo con la base del equipo triaxial, permitiendo el flujo del agua sin reducir la permeabilidad del suelo, como también la migración de finos sin retenerlos para simular la ausencia de un filtro en el suelo natural (Anexo 23).



El segundo procedimiento consiste en la utilización de un filtro granular según el diseño planteado en la sección 3.4.1. Para este caso, el filtro está en contacto directo con la base de la muestra para retener las partículas del suelo y permitir el flujo (Anexo 24).

Como tercer procedimiento está la utilización de un filtro geotextil que cumpla con los requerimientos de diseño y está también en contacto con la base de la muestra (Anexo 26).

El cuarto procedimiento corresponde a la utilización de un filtro combinado, en el cual se implementa de abajo hacia arriba, una capa de filtro granular, una capa de filtro geotextil y el suelo mantiene contacto directo con el geotextil (Anexo 25). Al final de estos procedimientos se puede analizar el comportamiento de cada tipo de filtro con respecto al gradiente hidráulico que puede mantener, su influencia en la permeabilidad del suelo y su capacidad para controlar la migración de las partículas del suelo.

Antes de ensayar las muestras es necesario un proceso previo, en el cual se elimina el aire de las mangueras del equipo con agua desaireada que luego ingresará a la muestra. Después se sitúa la membrana en la parte inferior para armar la muestra y se coloca el filtro correspondiente según el caso (Anexo 22, Anexo 25). Se asegura la membrana en la parte inferior y superior con un anillo de caucho con la intención de eliminar filtraciones. Posteriormente, se sella la cámara de presión y se llena de agua para iniciar el proceso de saturación de la muestra.

La saturación de la muestra se realiza mediante un flujo a través de la muestra, ya sea de arriba hacia abajo o en sentido contrario, con presión de cámara igual o superior a la máxima presión aplicada a los extremos de la muestra. El gradiente hidráulico aplicado para la saturación de la muestra se irá incrementando progresivamente, pero manteniéndolo inferior al gradiente que será utilizado para medir la permeabilidad. Los gradientes a aplicar corresponden a los generados por las cargas de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mca; mientras que los gradientes de saturación corresponden a cargas inferiores a 5 mca.

Para comprobar el estado de saturación de la muestra, se controla que el volumen que ingresa a la muestra sea igual al volumen que sale de la misma. Este volumen debe fluir a través de la muestra en un tiempo similar para un mismo gradiente. Posteriormente, se procede a la toma de datos para determinar la permeabilidad de la muestra, para ello se hace uso de las pipetas graduadas que dispone el equipo triaxial. Una pipeta permite medir el volumen de líquido que ingresa en un tiempo definido, y otra pipeta graduada para medir la salida de flujo, con lo cual se controla que no exista diferencias mayores a 1 ml entre el volumen que ingresa y el volumen que sale.

A cada muestra se le aplica diferentes cargas hidráulicas correspondientes a 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mca. Estas cargas se aplican progresivamente y se toma el tiempo con respecto a la pipeta de entrada de flujo, iniciando en un volumen de 0 ml y con tiempos acumulados al llegar a los 5, 10, 15 y 20 ml de agua que ingresa a la muestra. De forma paralela, se toma la medida del nivel de agua en la pipeta de salida, la cual inicia en la marca de 25 ml y va disminuyendo hasta llegar aproximadamente a los 5 ml. El ensayo se realiza en una sola dirección, de arriba hacia abajo, manteniendo la misma orientación del flujo en campo.



En cada una de las cargas hidráulicas aplicadas se deberá permitir el flujo antes de la toma de datos, con la intención de igualar las presiones internas del suelo debido al cambio de presión externa. Este proceso se lo realiza hasta que fluyan al menos 10 ml de agua con la intención de realizar todos los ensayos bajo las mismas condiciones. Luego se procede a tomar 2 medidas para cada carga hidráulica con la intención de verificar los valores, hasta alcanzar la carga hidráulica máxima de 30 mca, correspondiente a la capacidad del equipo.

Posteriormente se repite el proceso de medición mientras se descarga la muestra cada 5 mca. Este procedimiento de aumento y disminución de cargas permite determinar el comportamiento del suelo y la eficiencia de cada filtro con respecto a la permeabilidad.

El cálculo de la permeabilidad se lo realiza en base a la Ecuación 75 dada en la normativa ASTM D 5084 (2000), en la cual se considera las dimensiones tal como se explica en la Ilustración 6.

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$$

*Ecuación 75*

Donde:

*a = área de la sección transversal de la pipeta de entrada*

*L = longitud de la muestra*

*A = área de la sección transversal de la muestra*

*t = tiempo transcurrido*

*h<sub>0</sub> = carga de agua sobre la muestra en el tiempo inicial*

*h<sub>f</sub> = carga de agua sobre la muestra en el tiempo final*

Cada carga de agua corresponde a la carga hidráulica que se aplique más la altura de agua de la pipeta de entrada menos la altura de agua de la pipeta de salida para cada tiempo t. Es necesario aclarar que la altura de agua en cada pipeta se obtiene mediante una transformación del volumen de agua dado en mililitros a una altura en metros de columna de agua en base al área de la pipeta.

### 3.3. Migración de finos

La migración de partículas finas en el suelo se analiza mediante la comparación de la curva granulométrica del material antes y después del ensayo de permeabilidad. Para determinar la curva granulométrica base de una muestra, es decir, antes del ensayo, se seca la porción cortada del testigo a 110 °C (Anexo 29) y se toma aproximadamente 50 g de material para ensayarla por el método del hidrómetro. Una vez culminado el ensayo de permeabilidad la muestra se divide en 2 partes iguales, diferenciándolas como parte superior e inferior, siendo la parte inferior la que está en contacto directo con el material filtrante.

A continuación, se toman las dos porciones (superior e inferior) y se ensayan también por el método del hidrómetro para obtener su distribución granulométrica (Anexo 30, Anexo 31). Al final se complementa con un proceso de lavado sobre el tamiz No. 200 y posterior



tamizado para completar cada curva granulométrica. Este procedimiento se lo realiza para el suelo base, como también para el con filtro granular, filtro geotextil o con un filtro combinado.

La comparación se realiza analizando los cambios existentes entre la curva base de cada muestra, con las curvas de la parte superior e inferior de las muestras respectivas, de esa manera se identifica una variación en ciertas partes de la curva, que indican la migración de algunos diámetros de partículas del suelo. Con respecto a la eficiencia de los filtros, se compara el porcentaje de migración de finos fuera de la muestra entre los diferentes tipos de filtros que se utilizan, con respecto a la migración de finos del suelo base.

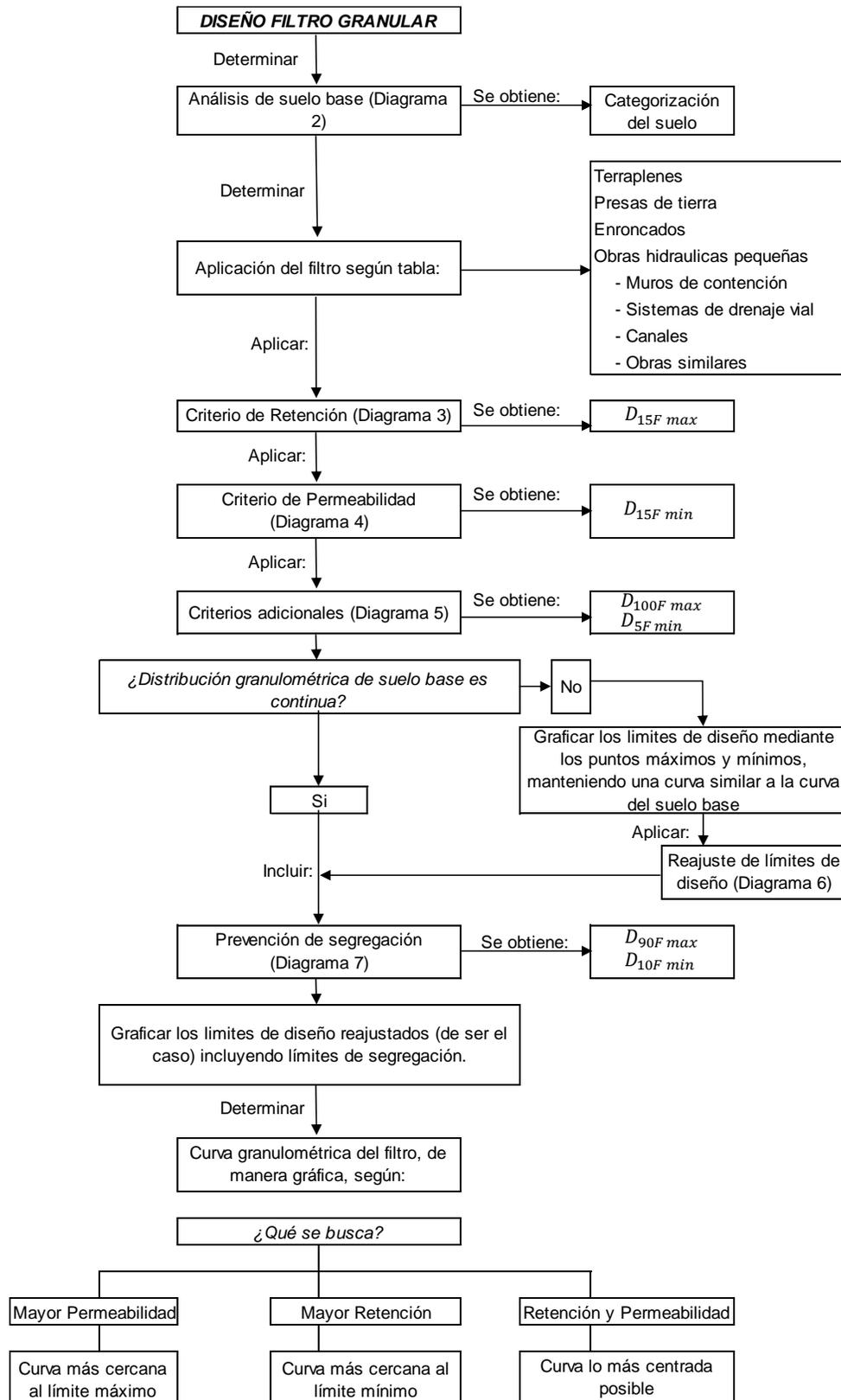
### **3.4. Diseño de filtros**

Siendo el objetivo del presente estudio el análisis en laboratorio de la eficiencia de la interacción de un filtro granular, filtro geotextil y una combinación de ambos, con un suelo base previamente catalogado como suelo con contenido de limos y arcillas. Se detalla a continuación la metodología de diseño de cada filtro, donde se analizan las condiciones del suelo base, la condición de flujo y el tipo de proyecto de aplicación de cada filtro.

#### **3.4.1. Filtro granular**

En el Diagrama 1 se muestra el procedimiento que debe seguirse para el diseño de un filtro granular, basado en los criterios presentados por la ICOLD (1963), USSCS (1994), USACE (2004) y USBR (2011), donde se recopila los límites que plantea cada autor. Además, cada criterio conlleva a un análisis más detallado, por lo que, en las secciones 3.4.1.1. a la 3.4.1.6, se detallan los subprocesos que se deben seguir con la finalidad de abarcar todas las condiciones posibles tanto del filtro como del suelo base y determinar la curva granulométrica del filtro.

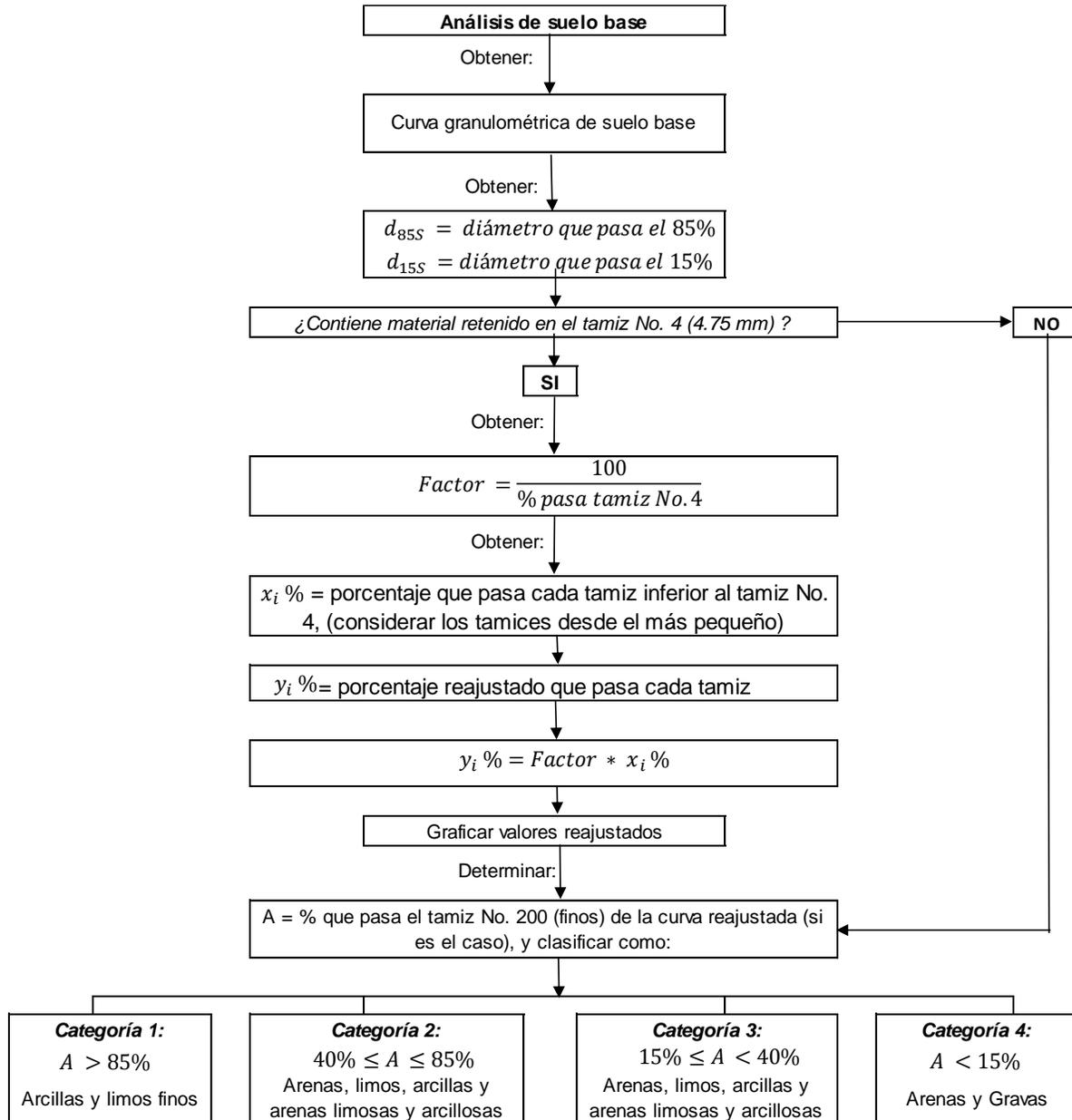
Diagrama 1: Diseño de filtro granular.



### 3.4.1.1. Análisis del suelo base

En el Diagrama 2, se detalla el subproceso que se debe seguir para categorizar el suelo base.

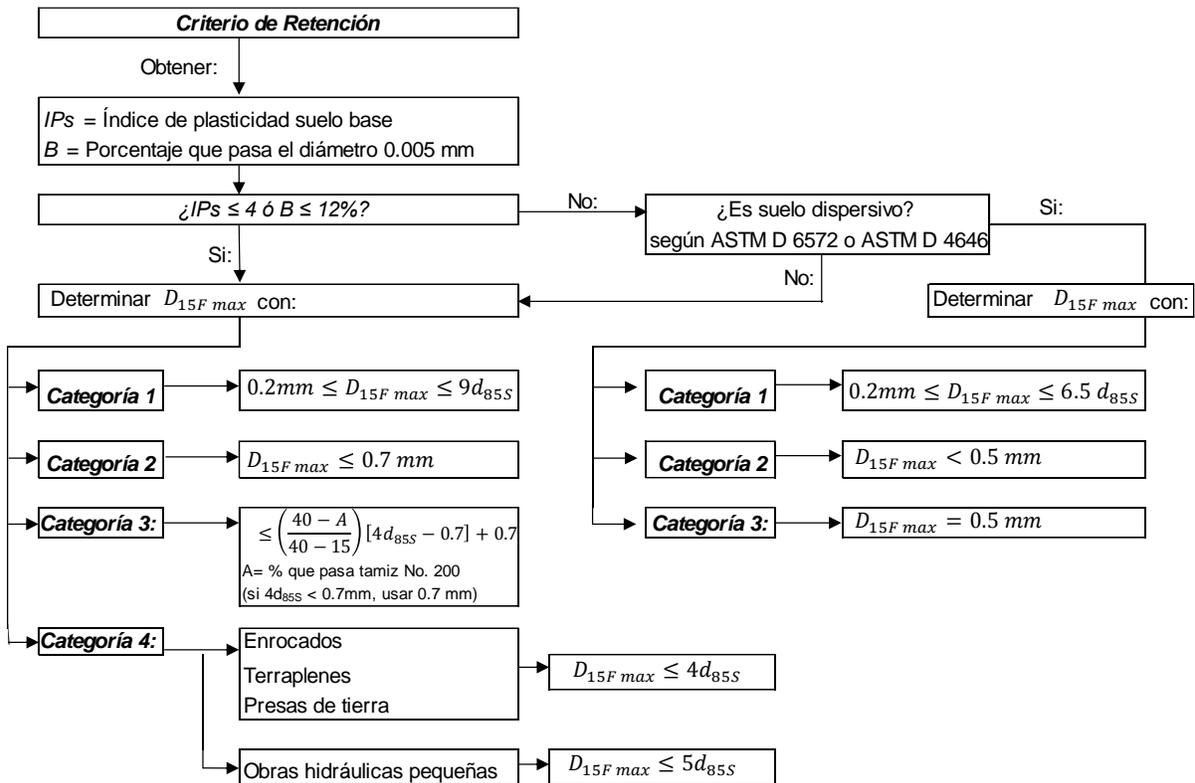
Diagrama 2: Diseño de filtro granular: Análisis de suelo base.



### 3.4.1.2. Criterio de Retención

En el Diagrama 3, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar el diámetro máximo por el que debe pasar el 15% del material del filtro.

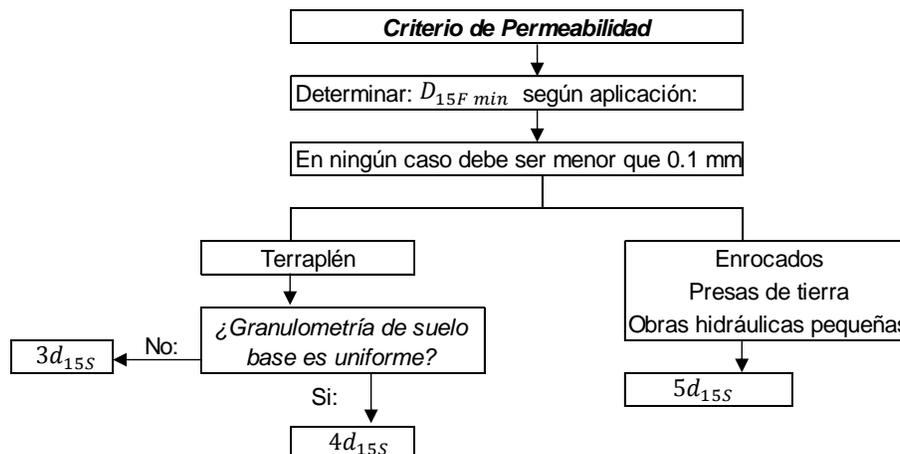
Diagrama 3: Diseño de filtro granular: Criterio de Retención.



### 3.4.1.3. Criterio de Permeabilidad

En el Diagrama 4, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar el diámetro mínimo por el que debe pasar el 15% del material del filtro.

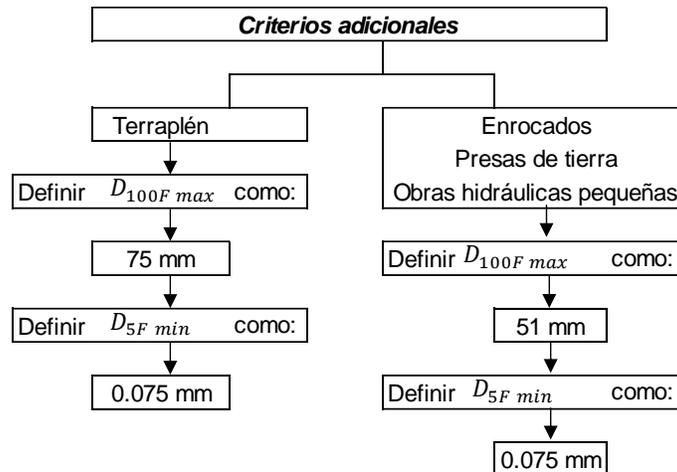
Diagrama 4: Diseño de filtro granular: Criterio de Permeabilidad.



#### 3.4.1.4. Criterios adicionales

En el Diagrama 5, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar los diámetros máximo y mínimo por los que debe pasar el 100% y el 5% del material del filtro respectivamente, en función de la aplicación.

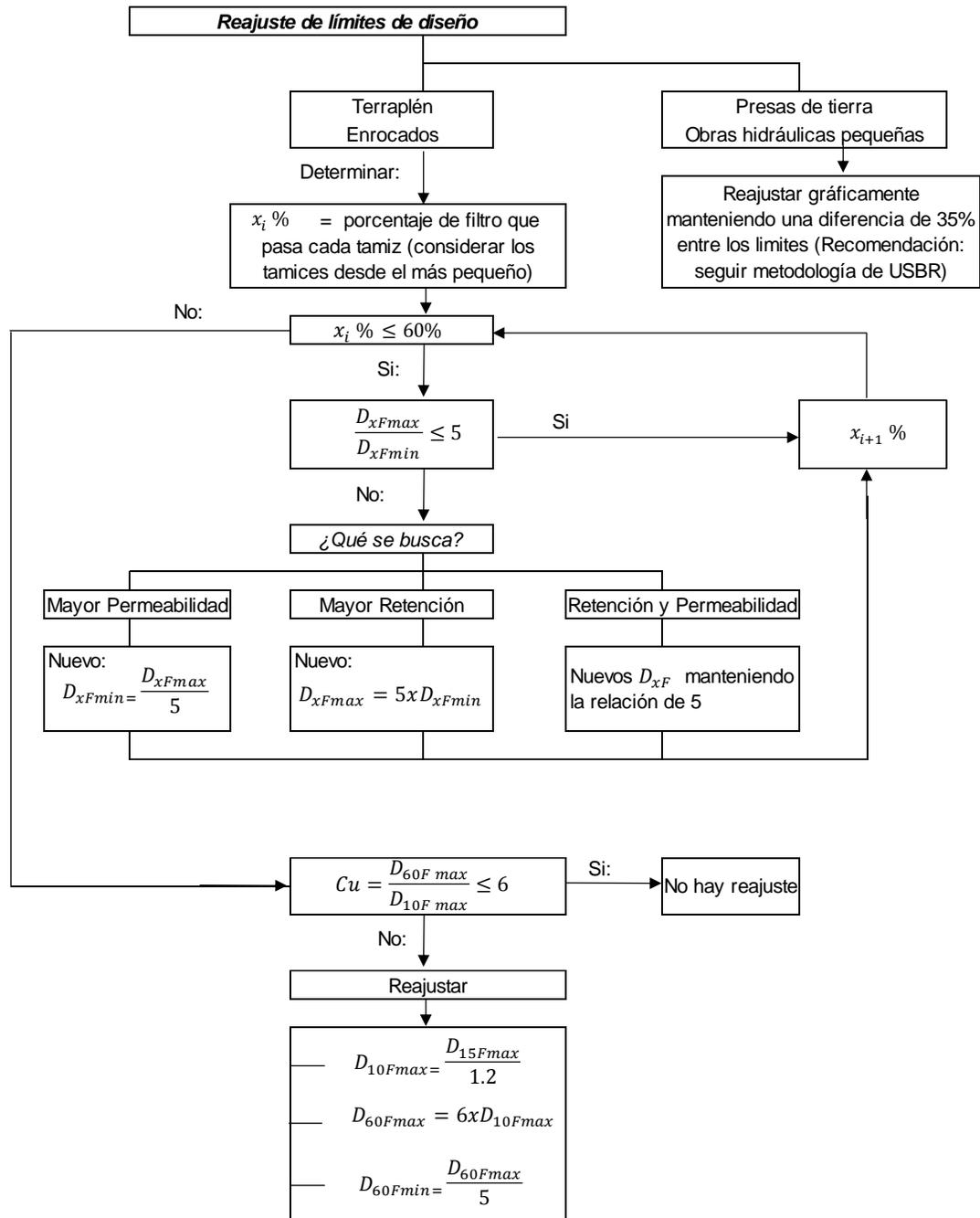
Diagrama 5: Diseño de filtro granular: Criterios adicionales.



#### 3.4.1.5. Reajuste de límites de diseño

En el caso de que la granulometría del suelo base sea discontinua o mal graduada, es necesario hacer un reajuste a los límites de diseño, en el Diagrama 6, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar una nueva configuración de los límites de tal manera que la curva granulométrica del filtro no sea discontinua.

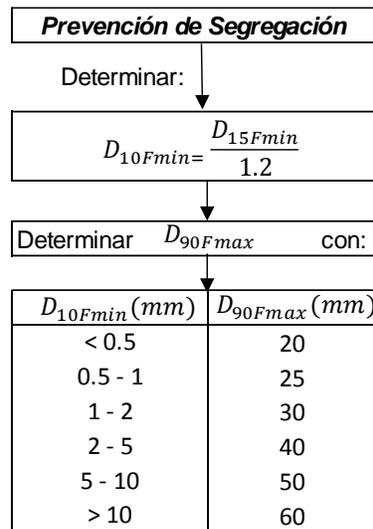
Diagrama 6: Diseño de filtro granular: Reajuste de límites de diseño.



### 3.4.1.6. Prevención de Segregación

En el Diagrama 7, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar los diámetros máximo y mínimo por los que debe pasar el 90% y el 10% del material del filtro respectivamente, obtenidos para prevenir la segregación.

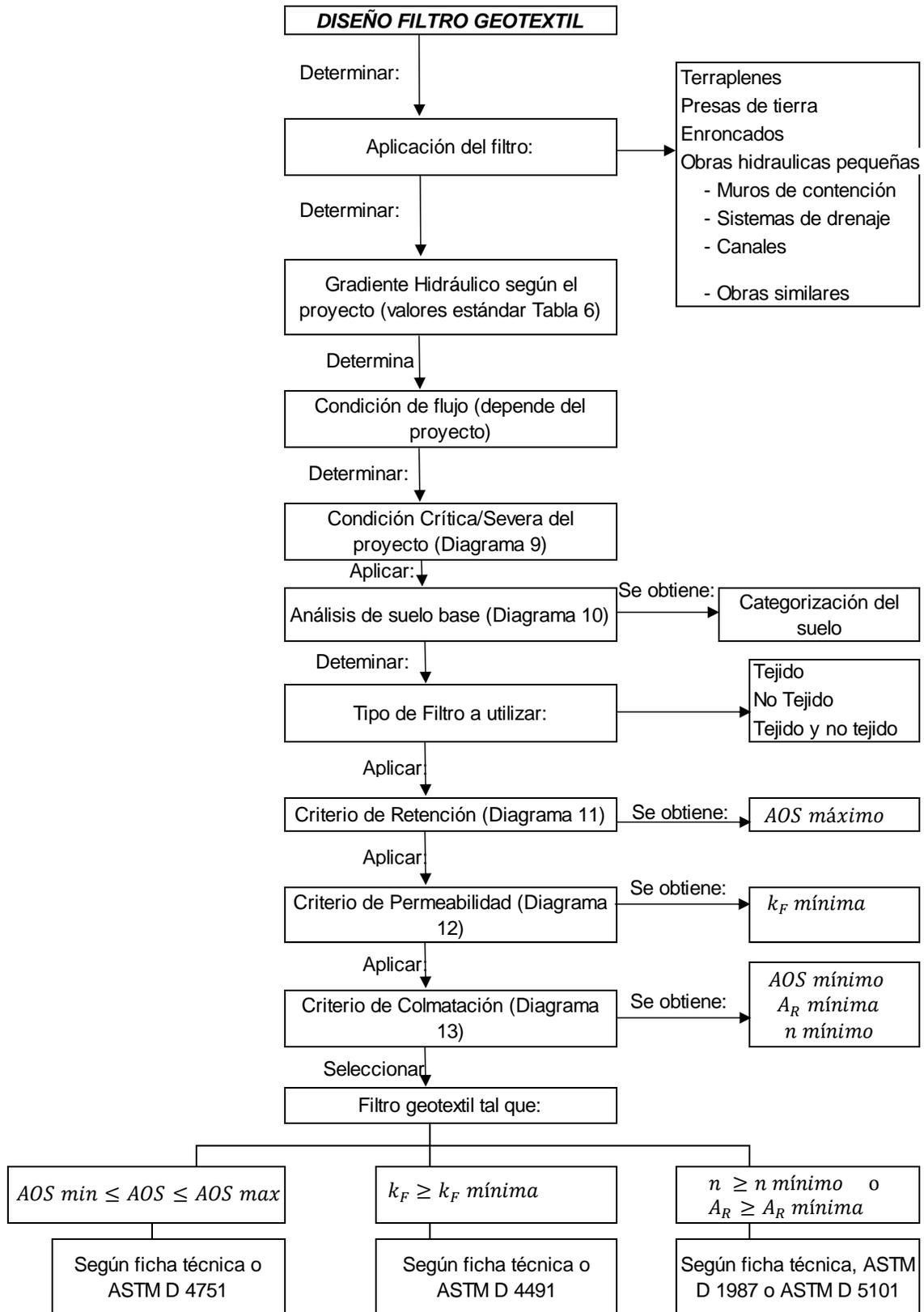
Diagrama 7: Diseño de filtro granular: Prevención de Segregación.



### 3.4.2. Filtro geotextil

En el Diagrama 8 se muestra el procedimiento que debe seguirse para determinar los límites para la selección de un filtro geotextil, basado en los criterios dados por la FHWA (1998) y Giroud (2010), de los cuales se recopila los límites de diseño, según la aplicación del filtro. Además, al igual que para un filtro granular, cada criterio conlleva a un análisis más detallado, tal como se muestra en las secciones desde la 3.4.2.1 a la 3.4.2.5.

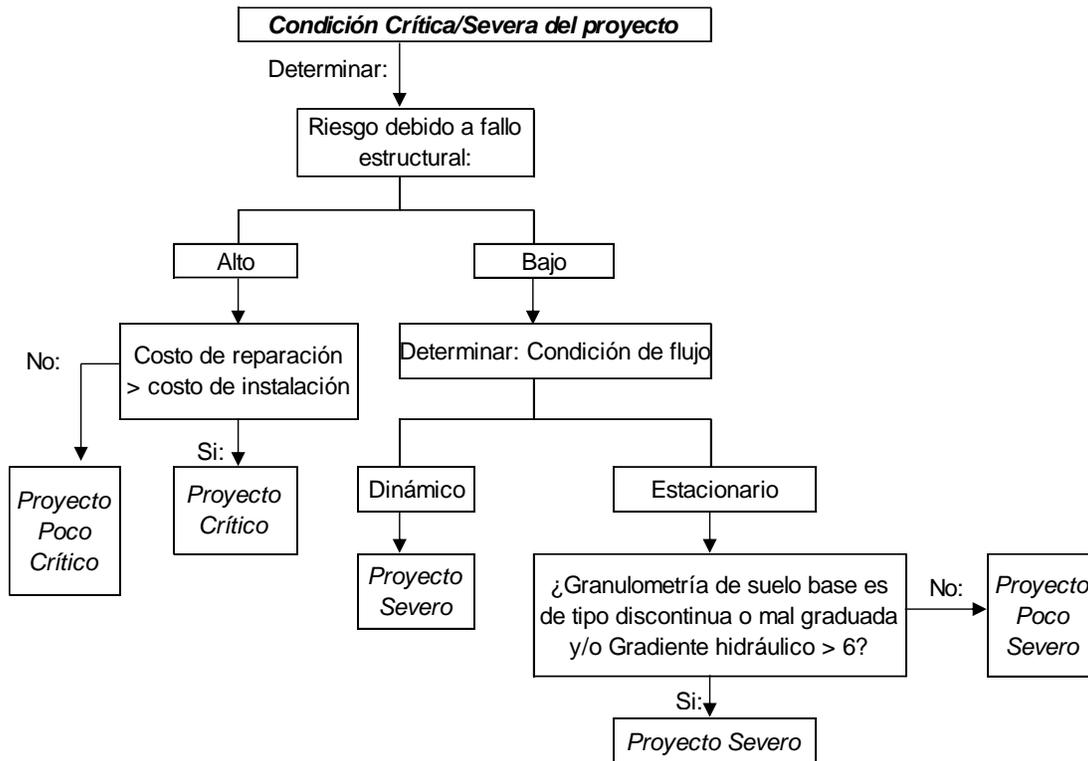
Diagrama 8: Diseño de filtro geotextil.



### 3.4.2.1. Condición Crítica o Severa del proyecto

En el Diagrama 9, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar si el proyecto representa una condición crítica o severa, mediante un análisis al suelo base y a las características principales del proyecto.

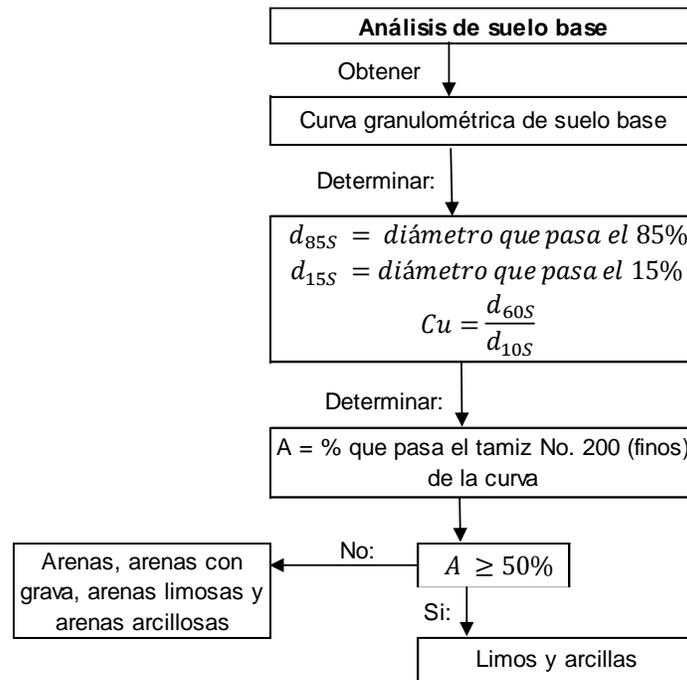
Diagrama 9: Diseño de filtro geotextil: Condición crítica o severa del proyecto.



### 3.4.2.2. Análisis del suelo base

En el Diagrama 10, se detalla el subproceso que se debe seguir para categorizar el suelo base.

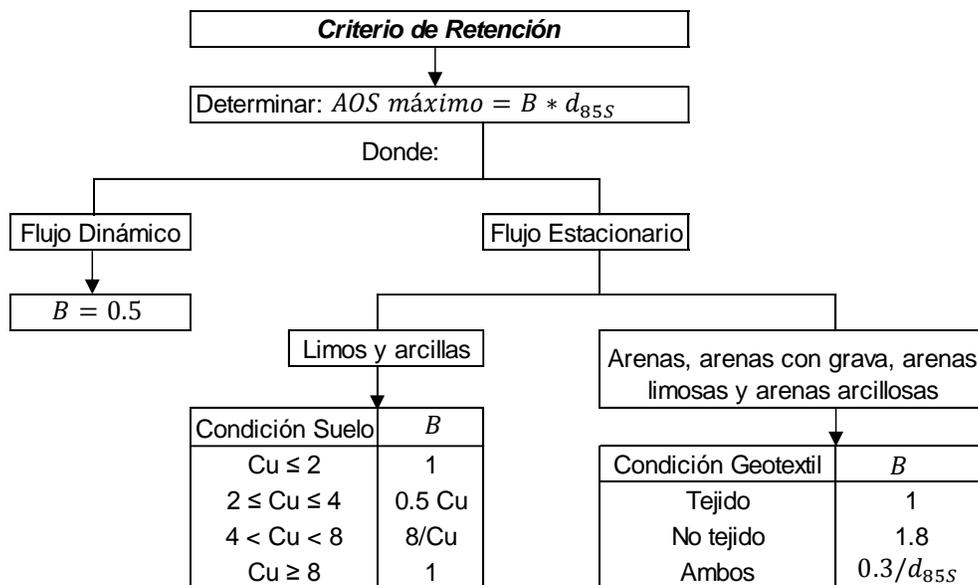
Diagrama 10: Diseño de filtro geotextil: Análisis del suelo base.



### 3.4.2.3. Criterio de Retención

En el Diagrama 11, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar el tamaño de abertura aparente máximo que debe tener el filtro geotextil.

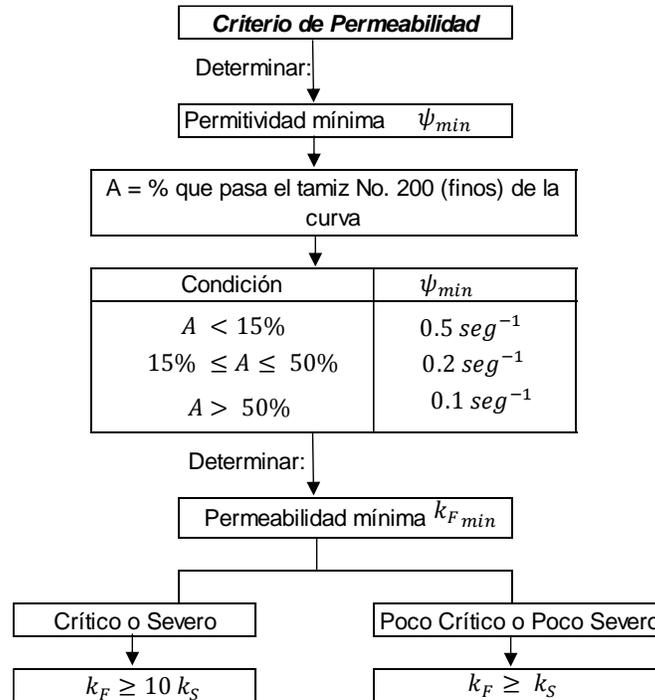
Diagrama 11: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Retención.



### 3.4.2.4. Criterio de Permeabilidad

En el Diagrama 12, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar la permitividad mínima y la permeabilidad mínima que debe tener el filtro geotextil.

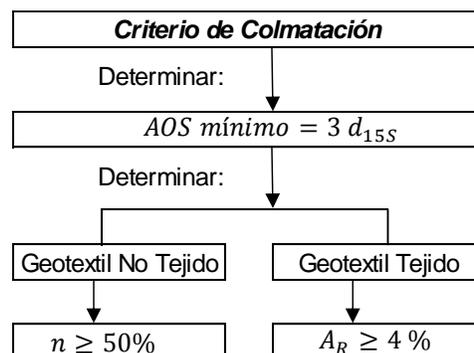
Diagrama 12: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Permeabilidad.



### 3.4.2.5. Criterio de Colmatación

En el Diagrama 13, se detalla el subproceso que se debe seguir para determinar ya sea la porosidad mínima o el área relativa de abertura que debe tener el filtro geotextil.

Diagrama 13: Diseño de filtro geotextil: Criterio de Colmatación.



### 3.4.3. Filtro combinado

La utilización de un filtro combinado se da principalmente cuando se pretende utilizar el geotextil con la funcionalidad de separador, donde el geotextil se coloca entre dos suelos



que tendrían tendencia a mezclarse cuando se ven sometidos a cargas altas. Esto ocurre típicamente cuando el filtro colocado no es el adecuado para el suelo, lo que da como resultado la migración de las partículas finas del suelo a la parte más gruesa (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

Sin embargo, en el caso de la utilización de un geotextil como filtro, es recomendable su combinación con un filtro granular, debido a que la integridad del geotextil puede ser comprometida ya sea por rotura, punción o separación de la costura durante la instalación, o por obstrucción después de la instalación (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012).

Para el presente estudio el diseño del filtro combinado consiste en la unión del filtro granular y el filtro geotextil diseñados según las metodologías presentadas en los puntos anteriores. El objetivo de la combinación de ambos filtros consiste en determinar si la eficiencia del filtro mejora, al aprovechar el filtro geotextil para evitar una colmatación en el filtro granular, garantizando una permeabilidad mayor, sin una migración de finos excesiva.

La configuración de este filtro considera el suelo base, que está en contacto con el filtro geotextil, seguido del filtro granular. Además, se coloca otra capa de filtro geotextil, para evitar el ingreso de las partículas del filtro hacia los conductos del equipo triaxial.

## 4. RESULTADOS

Los procedimientos desarrollados parten con la selección, clasificación y caracterización de un suelo base a partir de diversas muestras que se tomaron en los alrededores de la ciudad de Cuenca. Las muestras se tomaron de las formaciones Azogues, Turi, Mangán y Santa Rosa por contener suelos finos. Una vez caracterizado el suelo base, se procedió a evaluar su comportamiento frente al flujo de agua y los cambios que se generan en su estructura interna a causa de la migración de finos.

Se presenta el diseño de tres tipos de filtros que han sido ensayados con el suelo base con la finalidad de analizar su eficiencia con respecto a parámetros fundamentales como es la permeabilidad y su capacidad para retener las partículas del suelo, evitando así su erosión y pérdida de estabilidad. De manera adicional, se comparó el comportamiento del suelo con cada tipo de filtro. Finalmente se presenta un análisis de costos para la implementación de estos filtros en obras hidráulicas pequeñas.

### 4.1. Selección y caracterización del suelo base

El análisis de un suelo inicia con la toma de muestras, las cuales se recolectaron de cuatro formaciones geológicas alrededor de la ciudad de Cuenca, como son Azogues, Turi, Mangán y Santa Rosa. Estas formaciones fueron seleccionadas por su contenido de suelos con limos y arcillas. Los sitios para la extracción de muestras fueron seleccionados tras una primera inspección, buscando zonas donde el suelo esté expuesto a la intemperie en taludes sin la presencia de materia orgánica en la superficie.

Se tomaron muestras de seis sitios, las cuales fueron extraídas a una profundidad entre 20 a 50 cm tras retirar la capa superficial de cada talud. Las muestras fueron almacenadas en fundas selladas para mantener su estado natural de humedad. En la Ilustración 19 se puede observar la ubicación de cada sitio de obtención de las muestras, las cuales corresponden a las formaciones dadas en la Tabla 26. Los taludes de los puntos de extracción se indican desde el Anexo 12 al Anexo 17.

Tabla 26: Formaciones geológicas de las muestras y su ubicación (Coordenadas UTM – Zona 17M, WGS84).

Punto	Este	Norte	Elevación	Formación
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]
P1	720423	9673159	2687	Mangán
P2	721726	9672023	2879	Azogues
P3	721638	9673648	2827	Mangán
P4	719339	9676269	2602	Turi
P5	716736	9680958	2656	Santa Rosa
P6	721638	9672961	2875	Mangán

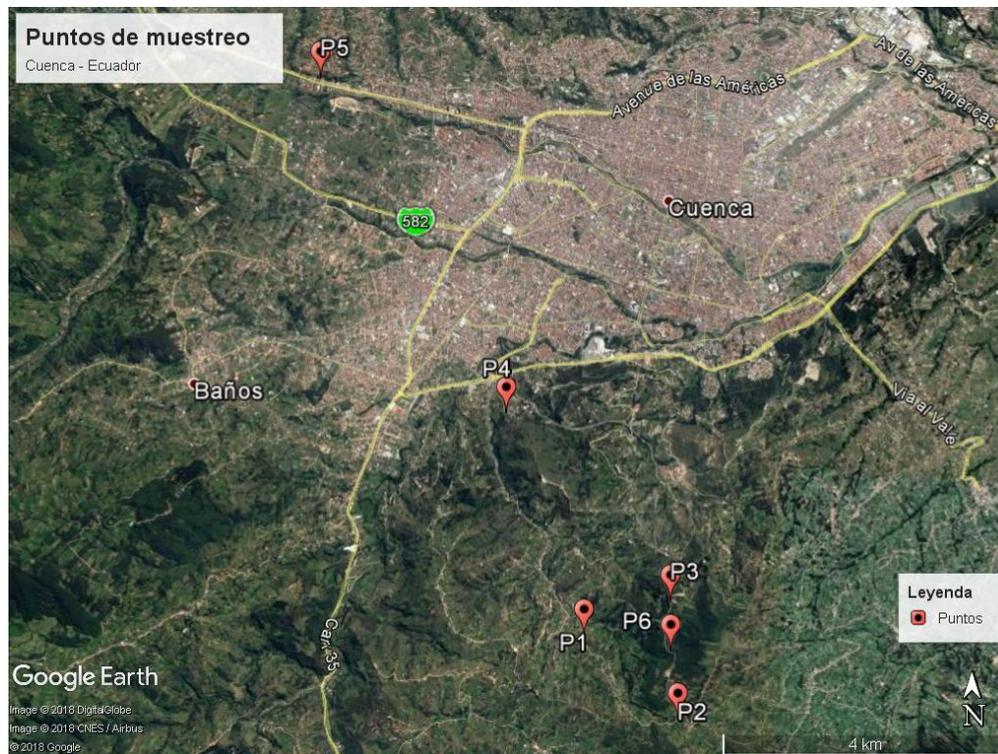


Ilustración 19: Puntos de muestreo, tomada de Google Earth.

#### 4.1.1. Distribución granulométrica

Una vez obtenidas las muestras, se procedió a realizar un ensayo granulométrico preliminar para conocer la distribución de las partículas de cada uno de los suelos, con la finalidad de preseleccionar el suelo base. En la Ilustración 20 se muestra la distribución granulométrica de cada uno de los suelos ensayados, teniendo únicamente la muestra P4 y P6 un contenido de finos mayor al 50% (Tabla 27).

Los resultados de la Tabla 27 están sujetos a cierta variación en el porcentaje del contenido de finos, debido a que una vez seleccionado el suelo base, se obtiene una curva promedio de la distribución granulométrica de todas las muestras usadas para los ensayos.

Adicionalmente, se puede observar que la distribución de partículas para los suelos P4 y P6 se mantiene uniforme, sin presentar discontinuidades en las partículas de algunos diámetros, lo que indica la presencia de partículas de distintos tamaños que dan estabilidad al suelo. Los suelos con un contenido de finos inferior al 50% son descartados ya que no cumplen el objetivo planteado para la clasificación del suelo.

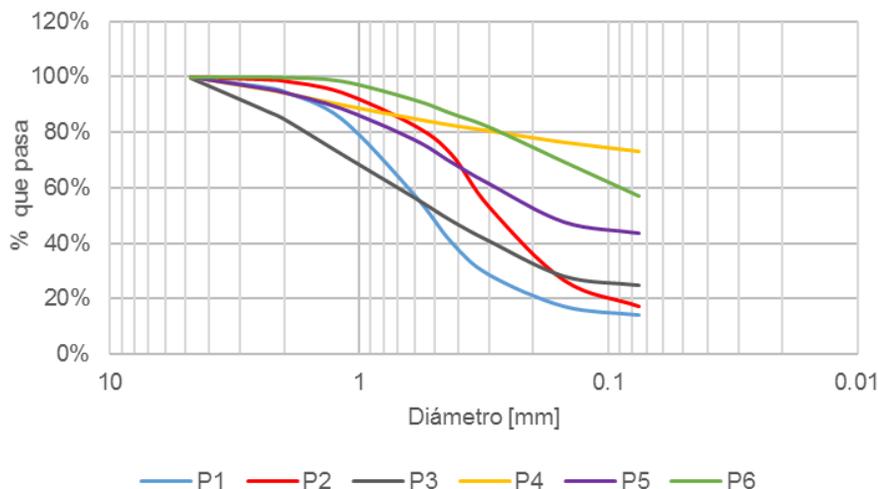


Ilustración 20: Distribución granulométrica de las muestras de suelo.

Tabla 27: Contenido de finos en muestras de suelos.

Suelo	% Finos
P1	14%
P2	17%
P3	25%
P4	73%
P5	44%
P6	57%

Las muestras con un contenido de finos inferior al 50% pertenecen a otro grupo dentro de la clasificación de los suelos, los cuales generalmente carecen de plasticidad y forman parte del grupo de las arenas, por lo cual no se considera para este estudio.

#### 4.1.2. Índice de plasticidad

Analizando los suelos preseleccionados P4 y P6, se realizó los ensayos respectivos para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad como se muestra en la Tabla 28. Estos valores permiten completar el proceso de clasificación del suelo, como también conocer cuál de los dos suelos permite obtener una mayor permeabilidad al presentar un índice de plasticidad menor, ya que da un indicio de un contenido mayor de limos que de arcillas, favoreciendo de manera directa a la permeabilidad del suelo.

En la Ilustración 21 se muestra la ubicación de los suelos en la carta de plasticidad, estando ambos en la zona de los limos, por debajo de la línea A. Adicionalmente, se puede destacar que a pesar de estar el suelo P6 en la zona de limos de alta plasticidad, su índice de plasticidad se mantiene inferior que el del suelo P4. La principal diferencia radica en su límite líquido, puesto que el suelo P6 tiene una mayor capacidad de retener agua en su estructura, mientras que, para el suelo P4 su límite líquido es 18% menor y por lo tanto su capacidad de retención de agua disminuye.

Tabla 28: Límites de Atterberg de suelos P4 y P6.

Suelo	Límite plástico	Límite líquido	Índice de plasticidad
P4	36.18	47.29	11.11
P6	54.00	57.74	3.74

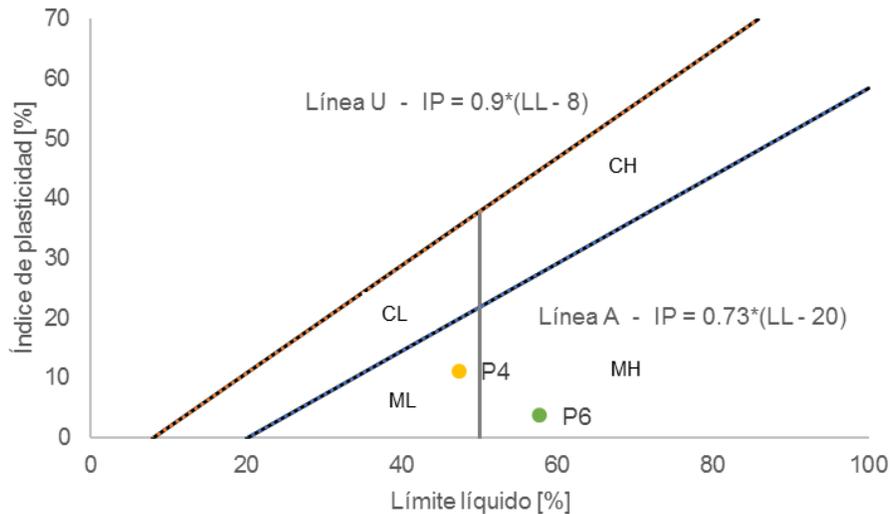


Ilustración 21: Plasticidad de suelo P4 y P6.

#### 4.1.3. Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente para la selección del suelo permite comparar las muestras y conocer cual contiene una mayor cantidad de vacíos en su estructura. De manera similar, el contenido promedio de humedad indica la presencia de agua en los poros del suelo en su interior, tal como se indica en la Tabla 29.

Tabla 29: Densidad aparente de suelo P4 y P6.

Suelo	Densidad Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Seca [g/cm <sup>3</sup> ]	Humedad [%]
P4	1.50	1.34	11.98
P6	1.43	0.97	47.30

Para el suelo P6, la densidad seca de 0.97 g/cm<sup>3</sup> es baja con respecto a la densidad del suelo P4, lo que demuestra una mayor cantidad de vacíos en la muestra P6

Basado en estos resultados se puede indicar también que el contenido de agua del suelo P4 es menor y se refleja en su límite plástico y límite líquido. Todos estos parámetros mantienen una relación con la permeabilidad del suelo, la cual se pretende que sea la mayor posible con la intención de garantizar un flujo que permita medir la permeabilidad en un tiempo razonable, comparar cambios por la presencia de los filtros y analizar la eficiencia de éstos en cuanto a la migración de finos.

#### 4.1.4. Clasificación del suelo

Una vez determinada la distribución granulométrica del suelo (Tabla 30), se realizó una preselección de los suelos que contienen un porcentaje de finos mayor al 50% para clasificarlo como un suelo de grano fino como es el caso del suelo P4 y P6. Luego se procedió a determinar la plasticidad correspondiente de cada tipo de suelo seleccionado en base a la carta de plasticidad, tal como se indicó en la Ilustración 21. Con estos parámetros y siguiendo el procedimiento establecido para la clasificación del suelo según la metodología SUCS, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 30: Distribución granulométrica de suelo P4 y P6.

Tamiz	Abertura (mm)	P4	P6
#4	4.75	100%	100%
#8	2.36	95%	100%
#10	2	94%	100%
#16	1.18	90%	99%
#30	0.6	85%	92%
#40	0.425	83%	87%
#50	0.3	81%	82%
#100	0.15	76%	69%
#200	0.075	73%	57%

El suelo P4 corresponde a un limo arenoso (ML) debido a los siguientes parámetros:

- El contenido de finos es 73%, mayor al 50%.
- Es un suelo ML (Limo de baja plasticidad) ya que su límite líquido es de 47.29, menor a 50 y se ubica por debajo de la línea A.
- El porcentaje de finos excede por más del 30% el tamiz No. 200.
- El porcentaje contenido de arena es mayor al porcentaje de grava (Tabla 30).
- El porcentaje de grava es menor al 15% (Tabla 30).

El suelo P6 corresponde a un limo elástico arenoso (MH) debido a los siguientes parámetros:

- El contenido de finos es 57%, mayor al 50%.
- Es un suelo MH (Limo de alta plasticidad) ya que su límite líquido es de 57.74, mayor a 50 y se ubica por debajo de la línea A.
- El porcentaje de finos excede por más del 30% el tamiz No. 200.
- El porcentaje contenido de arena es mayor al porcentaje de grava (Tabla 30).
- El porcentaje de grava es menor al 15% (Tabla 30).

El suelo P4 y P6 cumplen con las condiciones impuestas para la selección de un suelo base como un suelo fino con contenido de limos y arcillas. Sin embargo, se selecciona el suelo P6 como suelo base por las siguientes razones:

- El suelo P6 presenta un límite plástico y límite líquido mayor, lo cual indica mayor capacidad para retener agua, incrementando la permeabilidad a través de éste.
- El suelo con menor índice de plasticidad favorece a una mayor permeabilidad ya que se mantiene una relación inversamente proporcional.
- Basándose en la densidad del suelo, se puede demostrar que el suelo P6 presenta una mayor cantidad de poros en su interior que están ocupados por aire y agua,

estos disminuyen su densidad seca, aumentan su contenido de humedad y favorecen la permeabilidad a través del suelo.

Finalmente, se establece el suelo P6 como suelo base, el cual se utiliza para determinar la eficiencia de los distintos tipos de filtros, siendo este un punto de comparación para todos los análisis realizados en cuanto a la migración de finos, como también para el diseño de los filtros.

#### 4.1.5. Granulometría del suelo base

Una caracterización completa de la curva granulométrica del suelo base se presenta en la Ilustración 22, la cual representa el promedio de las curvas granulométricas de todas las muestras utilizadas para los ensayos. El suelo tiene una curva de distribución continua, además se indican los valores representativos de la curva, utilizados para el cálculo de los parámetros de diseño, indicados en la Tabla 31.

La granulometría del suelo presenta un rango de variación entre el límite superior e inferior, los cuales se obtienen de los valores máximos y mínimos del porcentaje que pasa de todas las curvas granulométricas base. Para el diseño de filtros o cálculos necesarios se tomó como referencia la curva promedio del suelo base.

En la Ilustración 22 se muestra una línea punteada de color naranja para indicar el diámetro teórico de 0.075 mm desde el cual se considera la presencia de limos, hasta un diámetro teórico de 0.002 mm, que se indica con una línea punteada de color verde, a partir de la cual se considera la presencia de arcillas.

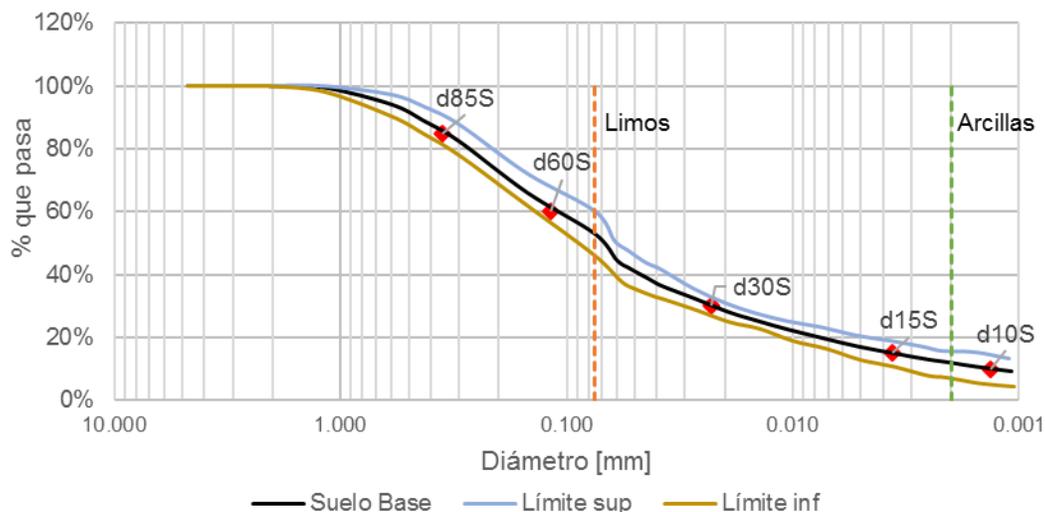


Ilustración 22: Curva granulométrica del suelo base.



Tabla 31: Parámetros de la curva granulométrica del suelo base.

Parámetro	Valor	Unidad
d85S	0.354	mm
d60S	0.118	mm
d30S	0.023	mm
d15S	0.003	mm
d10S	0.001	mm
Cu	95.63	-
Cz	3.60	-
Finos	52.81	%
Limos	40.53	%
Arcillas	12.27	%

En base al coeficiente de uniformidad Cu, se lo caracteriza como un suelo bien graduado, ya que su valor es mayor a 20 y por lo tanto la distribución de sus partículas le confiere estabilidad interna, disminuyendo su capacidad para ser erosionado. Su valor es elevado debido al amplio rango existente de los tamaños de partículas del suelo. Por otra parte, con respecto al coeficiente de curvatura Cz para ser un suelo bien graduado debe estar entre 1 y 3. Su valor de 3.6 indica la existencia de algunos vacíos con respecto a los diámetros intermedios de la curva granulométrica. Tal como se mencionó en la sección 2.1.2, estos parámetros se utilizan para caracterizar suelos granulares, sin embargo, se plantean para analizar la distribución de tamaños del material del suelo base.

Con respecto al contenido de finos, el 40.53% del material son limos y tan solo el 12.27% de la masa total son arcillas, las cuales son las que dan la plasticidad del suelo.

#### 4.1.6. Gravedad específica del suelo base

La gravedad específica del suelo base permite tener una idea de que tan pesadas son las partículas constituyentes del suelo. En base a los análisis realizados se obtuvo un valor promedio de 2.54, lo cual indica que se trata de un suelo relativamente liviano con respecto a lo establecido en la Tabla 4. Este valor está influenciado por la composición química del suelo, como también por la presencia de materia orgánica según los análisis realizados que se indican en la Tabla 32.

#### 4.1.7. Análisis químico del suelo base

El suelo base se analizó para determinar de manera aproximada su composición química en cuanto a la presencia de ciertos minerales y la cantidad de materia orgánica presente en el mismo. Este análisis se lo realizó en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, teniendo los resultados mostrados en la Tabla 32.

Tabla 32: Análisis químico del suelo base.

Parámetro Químico	Valor	Unidad	Observación
pH	5.2		
Aluminio Intercambiable	0.068	%	
Sodio	7.75	%	
Potasio	0.04	%	
Hierro	0.02	%	
Manganeso	Trazas	%	
Cobre	0.001	%	
Zinc	Trazas	%	
Ortofosfatos	0.002	%	Como Fósforo
Cloruros	11.94	%	
Magnesio	0.0143	%	
% de sólidos	75.9	%	Residuo seco
% de agua	24.09	%	Agua Total
% sólidos fijos	65.03	%	
% de sólidos volátiles	34.96	%	Materia orgánica
% de residuos a 850°C	62.73	%	
% de sólidos fijos perdidos a 850°C	2.3	%	

La presencia de sodio y de cloruros indica la existencia de flujo subterráneo, por otro lado, se determinó la presencia de hierro en un 0.02% y cobre en un 0.001%, los cuales serían los elementos encargados de dar la coloración rojiza propia del suelo base. En cuanto a la presencia de materia orgánica, se tiene un contenido de 34.96% de masa, razón por la cual se explica la disminución de la gravedad específica como se indica en la sección anterior.

#### 4.1.8. Permeabilidad del suelo base

Los ensayos de permeabilidad del suelo base se realizaron con las muestras en forma de cilindro, las cuales fueron obtenidas tal como se indica en las fotografías del Anexo 18, Anexo 19 y Anexo 20. Estas muestras tienen un diámetro de 4.06 cm y una altura promedio de 8.16 cm. Para cada resultado de permeabilidad, se calcula como el promedio de dos muestras de suelo que son sometidas a los diferentes gradientes hidráulicos, cuando son aplicados de manera ascendente, proceso que se denominará a continuación como carga y cuando son aplicados de manera descendente, proceso que se denomina a continuación como descarga.

En la Ilustración 23 se muestra el comportamiento del suelo base (SB) (Anexo 23) durante el proceso de carga. A partir del gradiente de 244, se observa que la permeabilidad tiene variaciones mayores que en los gradientes anteriores. Este fenómeno indica que existe movimiento de partículas que modifican la permeabilidad del suelo base.

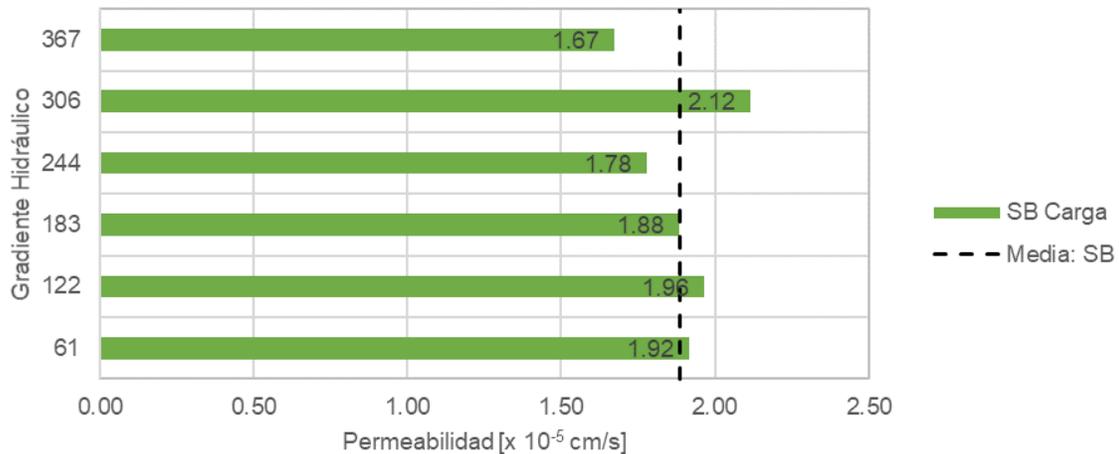


Ilustración 23: Permeabilidad de suelo base sometida a carga.

Por otra parte, en la Ilustración 24 se muestra el comportamiento del suelo base durante el proceso de descarga, donde se observa un aumento de la permeabilidad en cada disminución del gradiente hidráulico, lo que demuestra que se han generado canales debido al movimiento de partículas alterando la estabilidad interna del suelo.

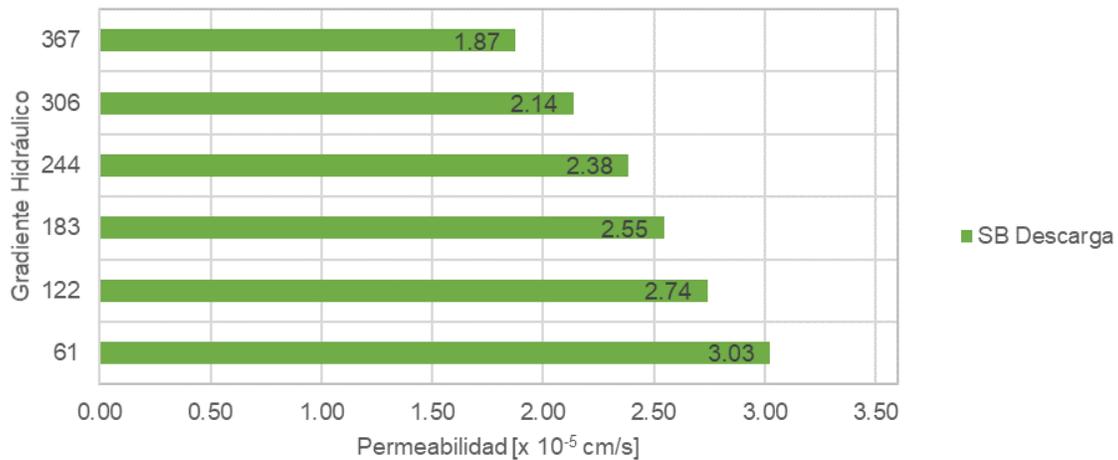


Ilustración 24: Permeabilidad de suelo base sometida a descarga.

Finalmente, se toma la permeabilidad del suelo base como el promedio de los valores obtenidos para todos los gradientes hasta 244, debido a que desde el gradiente 306 ya existe alteración en la estructura interna del suelo, durante la etapa de carga, dando como resultado un valor de  $1.89 \times 10^{-5}$  cm/s, que es utilizado para el diseño y comparación de las permeabilidades del suelo con cada filtro.

## 4.2. Diseño de filtros

El diseño de cada filtro parte de la obtención de las propiedades del suelo base y de la obra a la cual se aplicará. A continuación, se muestra el diseño de cada filtro para el suelo base seleccionado.

### 4.2.1. Diseño de filtro granular

El diseño del filtro se realizó siguiendo la metodología presentada en el Diagrama 1, donde se analizaron las condiciones del suelo base, condiciones de aplicación según el proyecto y se determinaron los límites de diseño en función de los criterios de permeabilidad y de retención.

#### 4.2.1.1. Análisis del suelo base

En la Tabla 33 se muestran los datos obtenidos a partir de la curva granulométrica del suelo base (Ilustración 22), además, como no existió material retenido en el tamiz No. 4, no se realizó ningún ajuste a la misma.

Tabla 33: Diseño de filtro granular: Resultado - Análisis de suelos base.

Análisis Suelo Base		
Datos de entrada:		
Curva granulométrica de suelo base		
Datos de salida:		
$d_{85s}$ =	0.383	[mm]
$d_{15s}$ =	0.004	[mm]
% retenido tamiz No. 4 =	0	[%]
% pasa tamiz No. 200 =	52.81	[%]
Suelo base =	Categoría 2	[-]

El suelo base corresponde a la *Categoría 2* de *arenas, limos, arcillas y arenas limosas y arcillosas*, debido a que:

$$A = 52.81\% \text{ donde, } 40\% \leq A \leq 85\%$$

#### 4.2.1.2. Aplicación del filtro

En el caso de estructuras de mayor magnitud como presas de tierra, enrocados y otros, se considera el uso de filtros como parte del sistema de drenaje, junto con canales de desvío, pozos de alivio, drenes u otros. Se establece el análisis del presente estudio para obras como muros de contención, estructuras viales, canales, tanques de almacenamiento, entre otras, mismos que pueden ser definidos como obras hidráulicas pequeñas, donde la aplicación del filtro representa completamente o en su mayoría el sistema de drenaje.

#### 4.2.1.3. Criterio de retención

Siendo el índice de plasticidad del suelo base igual a 3.74 (Tabla 28), inferior a 4, no fue necesario realizar un análisis para determinar el comportamiento dispersivo del suelo base. Por lo tanto, se determinó el diámetro máximo por el que debe pasar el 15% del material del filtro, como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterio de Retención.

Criterio de Retención		
<i>Datos de entrada:</i>		
Índice de plasticidad	3.74	[-]
Suelo Base	Categoría 2	[-]
<i>Datos de salida:</i>		
$D_{15F\ max}$ =	0.70	[mm]

#### 4.2.1.4. Criterio de permeabilidad

Se determinó el diámetro mínimo por el que debe pasar el 15% del material del filtro, en función de la aplicación del filtro, como se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterio de Permeabilidad.

Criterio de Permeabilidad		
<i>Datos de entrada:</i>		
Aplicación	Obras hidráulicas pequeñas	
<i>Datos de salida:</i>		
$D_{15F\ min}$ =	0.10	[mm]

#### 4.2.1.5. Criterios adicionales

Se determinaron los diámetros máximo y mínimo por los que debe pasar el 100% y el 5% del material del filtro respectivamente, en función de la aplicación del filtro, como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36: Diseño de filtro granular: Resultado - Criterios adicionales.

Criterios adicionales		
<i>Datos de entrada:</i>		
Aplicación	Obras hidráulicas pequeñas	
<i>Datos de salida:</i>		
$D_{100F\ max}$ =	51.000	[mm]
$D_{5F\ min}$ =	0.075	[mm]

#### 4.2.1.6. Reajuste de límites de diseño

Como se observa en la Ilustración 22, la curva granulométrica del suelo base es continua o bien graduada, por lo tanto, no fue necesario aplicar ningún tipo de reajuste.

#### 4.2.1.7. Prevención de segregación

En la Tabla 37 se muestran los diámetros máximo y mínimo por los que debe pasar el 90% y el 10% del material del filtro respectivamente, obtenidos para prevenir la segregación.

Tabla 37: Diseño de filtro granular: Resultado - Prevención de Segregación.

Prevención de Segregación		
<i>Datos de entrada:</i>		
$D_{15F \min} =$	0.100	[mm]
<i>Datos de salida:</i>		
$D_{10F \min} =$	0.083	[mm]
$D_{90F \max} =$	20.00	[mm]

#### 4.2.1.8. Límites de diseño

En la Ilustración 25 se muestran los puntos obtenidos, mismos que definen los límites máximo y mínimo que puede tener la curva granulométrica del filtro. Puesto que no ha sido necesario realizar ningún tipo de ajuste, los límites mantienen un trazado similar a la curva granulométrica del suelo base.

#### 4.2.1.9. Curva granulométrica del filtro

Considerando que el objetivo del presente estudio es determinar la eficiencia de un filtro que cumpla con los principales criterios de retención y permeabilidad, se plantea la curva granulométrica del filtro lo más centrada posible entre los límites de diseño, como se muestra en la Ilustración 25. Además, en la Tabla 38 se muestra los valores de la granulometría del filtro diseñado correspondiente al porcentaje de material que pasa cada tamiz. Tanto las curvas de los límites como del filtro se construyen gráficamente, manteniendo una forma similar a la curva del suelo base, dando valores de los porcentajes para los tamices conocidos.

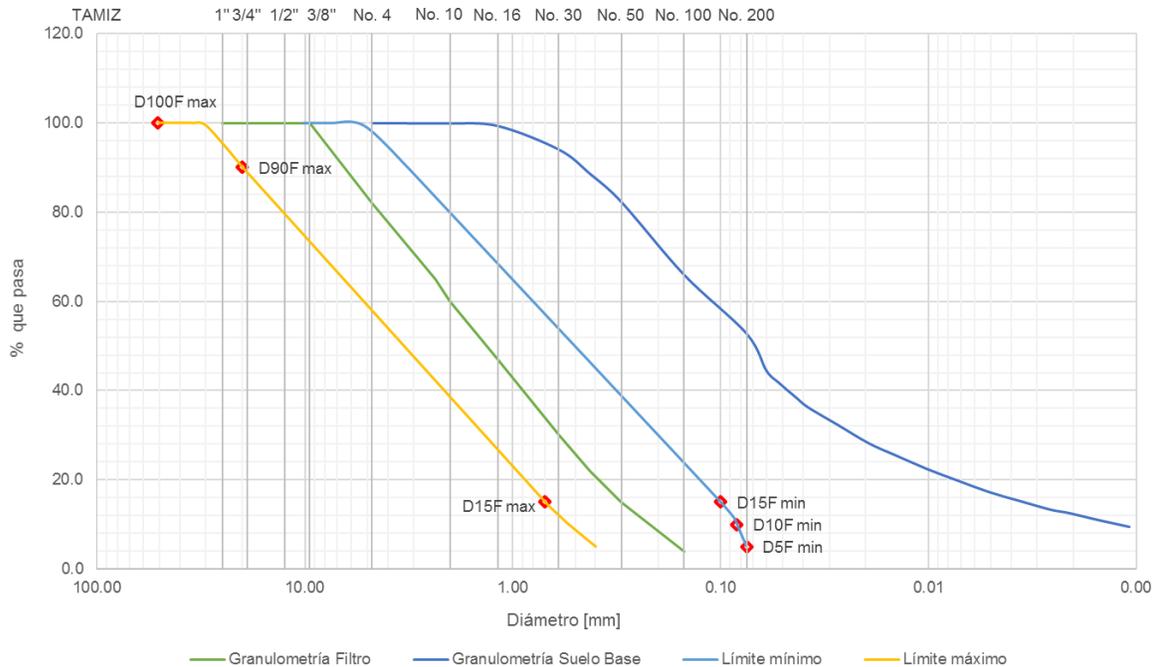


Ilustración 25. Curva granulométrica de filtro granular.

Tabla 38: Distribución granulométrica del filtro granular.

Tamiz N°	Abertura [mm]	Porcentaje [%]
1	25.00	100.00
3/4	19.00	100.00
1/2	12.50	100.00
3/8	9.50	100.00
4	4.75	82.00
8	2.36	65.00
10	2.00	60.00
16	1.18	47.00
30	0.60	30.00
40	0.43	22.00
50	0.30	15.00
100	0.15	4.00
200	0.075	0.00

#### 4.2.2. Diseño de filtro geotextil

La selección del filtro geotextil se realizó siguiendo la metodología presentada en el Diagrama 8, donde se analizaron las condiciones del suelo base, condiciones de flujo, y condiciones de aplicación según el proyecto, para posteriormente determinar los límites



en los que se mantienen las propiedades del geotextil como el tamaño de abertura aparente ( $AOS$ ), la permeabilidad ( $k_F$ ), la permitividad ( $\psi$ ), la porosidad ( $n$ ) y en algunos casos el área relativa de abertura ( $A_R$ ).

#### 4.2.2.1. Aplicación del filtro

Considerando que uno de los objetivos es comparar los resultados de la interacción del suelo base con el filtro granular y el suelo base con el filtro geotextil, la condición de aplicación del filtro se mantiene igual que para un filtro granular, considerando su uso para obras hidráulicas pequeñas como muros de contención, estructuras viales, canales, tanques de almacenamiento, entre otras.

#### 4.2.2.2. Gradiente hidráulico del proyecto

Según la Tabla 20, los valores estándar del gradiente hidráulico varían entre 1 y 10 para proyectos desde drenajes viales hasta embalses, entonces, considerando que la aplicación que se dará al filtro corresponde a obras hidráulicas pequeñas, se determinó un rango para el gradiente entre 1 y 6 con la intención de garantizar la vida útil del filtro.

#### 4.2.2.3. Condición de flujo

Una condición de flujo dinámica representa una variación de la velocidad de flujo con el tiempo, como por ejemplo en obras costeras debido al choque de las olas, por otra parte, para obras hidráulicas pequeñas la variación de velocidad del flujo no es representativa, dando por lo tanto una condición de flujo estacionaria.

#### 4.2.2.4. Condición Crítica o Severa del proyecto

Basados en que la aplicación se dará a obras hidráulicas pequeñas, se establece la condición crítica o severa del proyecto, tal como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Condición crítica o severa del proyecto.

<b>Condición Crítica/Severa del proyecto</b>	
<i>Datos de entrada:</i>	
Riesgo debido a fallo estructural	= Bajo
Condición de flujo	= Estacionario
Granulometría suelo base	= Continua
<i>Datos de salida:</i>	
Condición	= Proyecto Poco Severo

#### 4.2.2.5. Análisis del suelo base

En la Tabla 40 se muestra los datos obtenidos a partir de la curva granulométrica del suelo base.

Tabla 40: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Análisis del suelo base.

<b>Análisis Suelo Base</b>		
<i>Datos de entrada:</i>		
Curva granulométrica de suelo base		
<i>Datos de salida:</i>		
$d_{85S}$ =	0.383	[mm]
$d_{15S}$ =	0.004	[mm]
$C_u$ =	95.63	[%]
% pasa tamiz No. 200 =	52.81	[%]
Suelo base =	Limos y arcillas	[-]

#### 4.2.2.6. Criterio de retención

Se determinó el tamaño de abertura máximo, en función de la condición de flujo y del suelo base, tal como se muestra en la Tabla 41.

Tabla 41: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Retención.

<b>Criterio de Retención</b>		
<i>Datos de entrada:</i>		
$d_{85S}$ =	0.383	0.000
Suelo Base	Limos y arcillas	[-]
$C_u$ =	95.63	[%]
<i>Datos de salida:</i>		
<i>AOS máximo</i> =	0.383	[mm]

#### 4.2.2.7. Tipo de filtro geotextil

Aunque los geotextiles tejidos fueron los primeros en ser desarrollados, en la actualidad, la utilización de geotextiles no tejidos es más común cuando se busca controlar la filtración en una obra civil (Aydilek, 2012), por lo tanto, para el presente estudio se utiliza un filtro geotextil de tipo no tejido.

#### 4.2.2.8. Criterio de Permeabilidad

Se determinó la permitividad y la permeabilidad mínima que debe tener el filtro geotextil, en función de la condición del proyecto y del suelo base, tal como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Permeabilidad.

<b>Criterio de Permeabilidad</b>		
<i>Datos de entrada:</i>		
$k_S =$	$1.89 \times 10^{-5}$	[cm/s]
% pasa tamiz No. 200 =	52.81	[%]
Condición de proyecto = Poco Severo		
<i>Datos de salida:</i>		
$\psi_{min} =$	0.10	[s <sup>-1</sup> ]
$k_{Fmin} =$	$1.89 \times 10^{-5}$	[cm/s]

#### 4.2.2.9. Criterio de Colmatación

Se determinó el tamaño de abertura y la porosidad mínimos en función del tipo de geotextil y del suelo base, tal como se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Criterio de Colmatación.

<b>Criterio de Colmatación</b>		
<i>Datos de entrada:</i>		
$d_{15s} =$	0.004	[mm]
Tipo de Geotextil	No tejido	[-]
<i>Datos de salida:</i>		
$AOS\ mínimo =$	0.011	[mm]
$n\ mínimo =$	50	[%]

#### 4.2.2.10. Selección del filtro geotextil

Aunque en la metodología se indican las normas necesarias para la determinación de las propiedades del filtro geotextil, las mismas también pueden ser obtenidas mediante la ficha técnica que brindan las industrias fabricantes. Para el presente estudio se tomaron las especificaciones técnicas dadas por el fabricante debido a que no existe la disponibilidad de equipos necesarios para realizar algunos de los ensayos, además siendo el caso de aplicación poco crítico, la realización de los ensayos no es completamente necesaria.

Las especificaciones técnicas del filtro geotextil seleccionado se muestran en la Tabla 44, mismos que corresponden al geotextil NT 1600 Pavco.



Tabla 44: Especificaciones técnicas del filtro geotextil NT 1600 Pavco.

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS - GEOTEXILES NO TEJIDO</b>			
<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>NT 1600</b>
Método Grab			
Resistencia a la Tensión	ASTM D 4632	N (b) %	400 (90) >50
Elongación			
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 4833	N (lb)	200 (45)
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 6241	Kn	1.2
Método CBR			
Resistencia al rasgado	ASTM D 4533	N (lb)	164 (37)
Trapezoidal			
Méto Mullen Burst	ASTM D 3786	kPa (psi)	1139 (165)
Resistencia al Estallido			
<b>Propiedades Hidráulicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>NT 1600</b>
Tamaño de Abertura Aparente	ASTM D 4751	mm (No. Tamiz)	0.212(70)
Permeabilidad	ASTM D 4491	cm/s	26 X 10 <sup>-2</sup>
Permitividad	ASTM D 4491	s <sup>-1</sup>	2.0
Tasa de flujo	ASTM D 4491	L/min/m <sup>2</sup>	5530
Retención de Asfalto	ASTM D 6140	L/m <sup>2</sup>	N/A
Porosidad	-	%	> 80
<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>NT 1600</b>
Espesor			1.3
Resistencia UV @ 500 horas	ASTM D 5355	%	>70
Punto de fusión	ASTM D 276	°C	N/A
Rollo Ancho	Medido	m	3.5 - 3.8 - 4.0
Rollo Largo	Medido	m	160
Rollo Área	Calculado	m <sup>2</sup>	560 - 608 - 640
<b>Función del Geotextil</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>NT 1600</b>
Filtración			X
Drenaje			X
Protección			X
Separación			
Estabilización			
Repavimentación			

N/A: No Aplica

Además, en la Tabla 45 se hace un resumen de los límites determinados durante el diseño, donde se demuestra que el filtro seleccionado es apto para el suelo base y el proyecto considerados.

Tabla 45: Diseño de filtro geotextil: Resultado - Selección del filtro.

<b>Selección Filtro Geotextil</b>		
Tamaño de abertura aparente, $AOS$ :		
$0.011 \leq 0.212 \leq 0.383$ [mm]		✓
Permeabilidad, $k_F$ :		
$2.6 \times 10^{-1} \geq 1.89 \times 10^{-5}$ [cm/s]		✓
Permitividad, $\psi$ :		
$0.2 \geq 0.1$ [s <sup>-1</sup> ]		✓
Porosidad, $n$ :		
$80 \geq 50$ [%]		✓

### 4.2.3. Filtro combinado

El diseño del filtro combinado consiste en la unión del filtro granular y el filtro geotextil, a los cuales no se realizó ningún tipo de modificación, por lo que no se desarrolla una metodología directa y, únicamente se establece que la configuración para el análisis de eficiencia es suelo base – filtro geotextil – filtro granular – filtro geotextil.

La combinación de ambos filtros se realiza para determinar si la eficiencia del filtro mejora, al aprovechar el filtro geotextil para evitar una colmatación en el filtro granular, garantizando una permeabilidad mayor, sin una migración de finos excesiva. Adicionalmente, esta combinación permite alargar la vida útil del filtro, ya que, en caso de perforación del geotextil, el filtro granular estará cumpliendo su función de material filtrante a diferencia de un relleno granular sin una distribución granulométrica específica.

### 4.3. Eficiencia de filtros

La eficiencia de los filtros se evaluó mediante la aplicación de cuatro casos, el primero el suelo base sin ningún filtro, el segundo con el filtro granular, el tercero con el filtro geotextil y el cuarto con el filtro combinado. La permeabilidad del suelo base se compara con cada filtro y la migración de los finos en el interior del suelo se compara con la curva del suelo sin ensayar, diferenciando entre la parte superior e inferior de cada muestra. Adicionalmente, se complementa con un análisis económico para determinar los costos de construcción de cada filtro, aplicados a una obra hidráulica pequeña.

#### 4.3.1. Permeabilidad

Mediante ensayos de laboratorio sobre el suelo base sin ningún tipo de filtro, con filtro granular, con filtro geotextil y con una combinación de ambos, se determinó la variación que tiene la permeabilidad cuando se somete a diferentes gradientes hidráulicos de 61, 122, 183, 244, 306 y 367, resultantes de la aplicación de cargas de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mca. Estas cargas se aplicaron de manera ascendente (Carga) y descendente (Descarga) a dos muestras por cada caso y siempre manteniendo flujo de arriba hacia abajo.

#### 4.3.1.1. Suelo con filtro granular

En la Ilustración 26 se muestra el comportamiento del suelo base con filtro granular (Anexo 24) cuando se ve sometido al proceso de carga, denominado FGR Carga. En este caso se observa que la permeabilidad decrece de manera gradual desde que se aplica el gradiente de 183, el cual corresponde a una carga de 15 mca. Este comportamiento indica que con la aplicación de 15 mca en adelante existe un movimiento de partículas que actúa colmatando progresivamente la cara del filtro que se encuentra en contacto con el suelo base, disminuyendo así la permeabilidad. Sin embargo, cabe resaltar que el aumento que se da para el gradiente de 367, correspondiente a la carga de 30 mca, puede ser debido a un reacomodo de partículas, es decir, las partículas retenidas en la cara del filtro pasan a ocupar los vacíos del mismo dando lugar a la zona de estabilización, como se muestra en la Ilustración 9 de la sección 2.4.

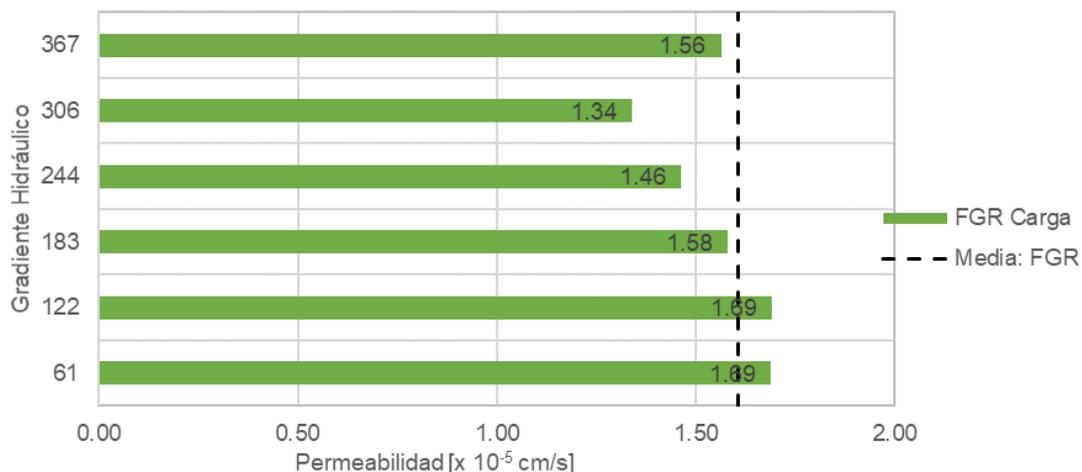


Ilustración 26: Permeabilidad de suelo con filtro granular sometida a carga.

De la misma manera, en la Ilustración 27 se muestra el comportamiento cuando se aplica el proceso de descarga (denominado FGR Descarga), donde se observa un aumento de la permeabilidad en cada disminución de carga, sobre todo cuando el gradiente se reduce a 61, debido a la formación de canales por el movimiento de partículas que alteran la estabilidad interna del suelo.

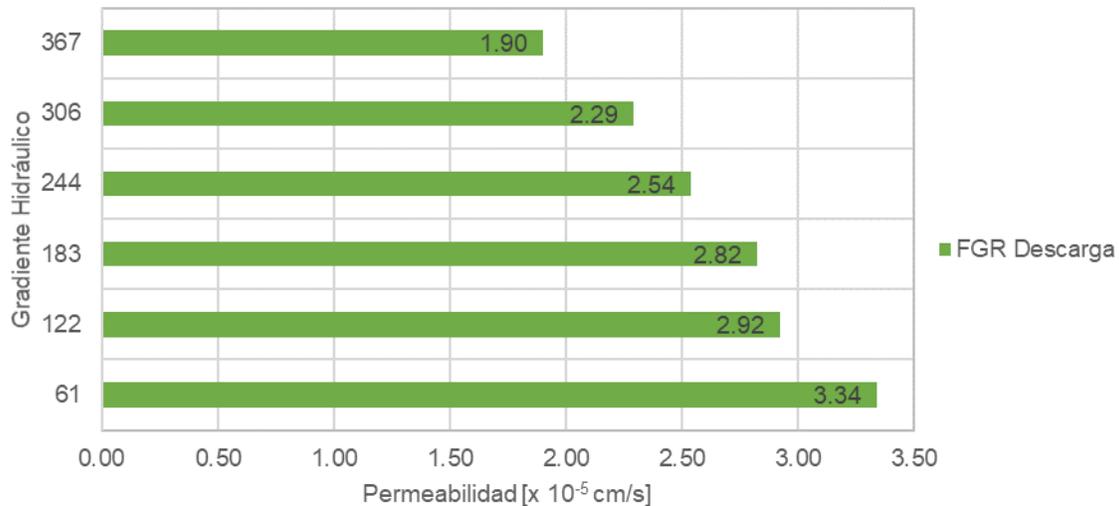


Ilustración 27: Permeabilidad de suelo con filtro granular sometida a descarga.

#### 4.3.1.2. Suelo con filtro geotextil

En la Ilustración 28 se muestra el comportamiento del suelo base en combinación con el filtro geotextil (Anexo 26) durante de la etapa de carga denominado FGT Carga. En este caso se observa que para los gradientes menores a 306 la permeabilidad se mantiene cercana a la media, mientras que en este gradiente existe una disminución, misma que se atribuye a un reacomodo de partículas.

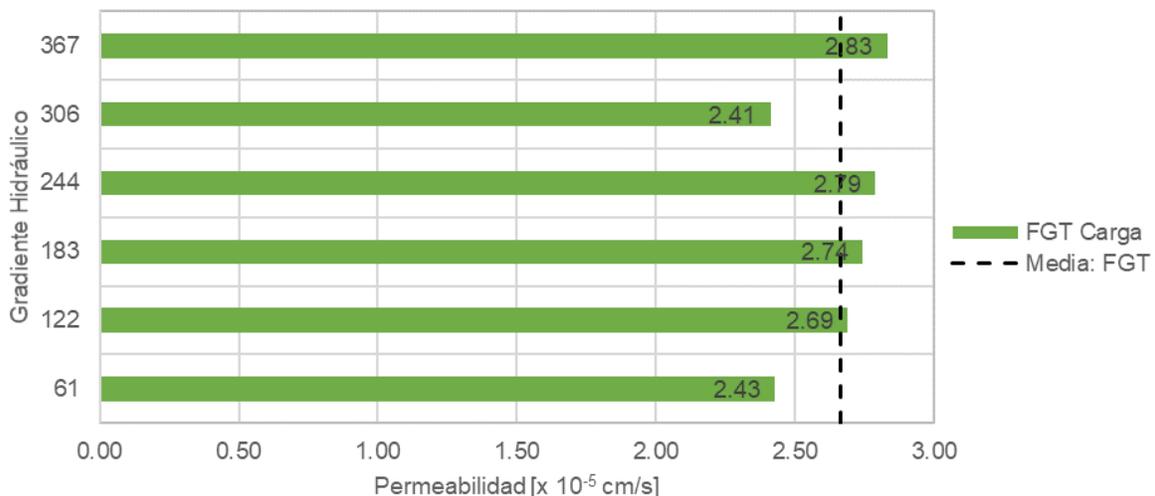


Ilustración 28: Permeabilidad de suelo con filtro geotextil sometida a carga.

Por otra parte, en la Ilustración 29 se muestra el comportamiento cuando se aplica la carga de manera descendente (denominado FGT Descarga), donde al igual que el filtro granular, se observa un aumento de la permeabilidad en cada disminución de gradiente, sobre todo para el gradiente de 61 correspondiente a la carga de 5 mca, lo que demuestra que se han generado canales debido al movimiento de partículas que alteran la estabilidad interna del suelo.

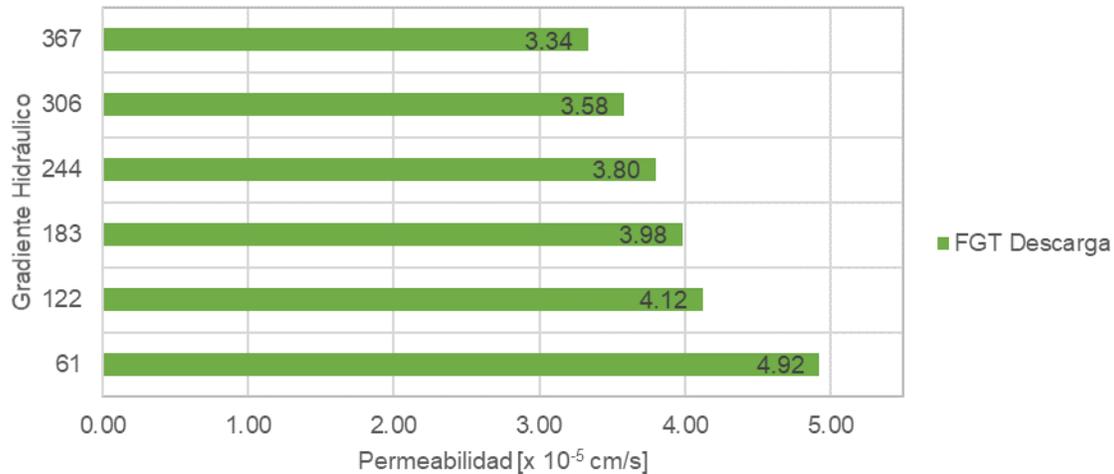


Ilustración 29: Permeabilidad de suelo con filtro geotextil sometida a descarga.

#### 4.3.1.3. Suelo con filtro combinado

En la Ilustración 30 se muestra el comportamiento del suelo base con la combinación del filtro granular (Anexo 25) y geotextil durante el proceso de carga, denominado FC Carga. En este caso se observa que la permeabilidad aumenta gradualmente hasta alcanzar el gradiente de 306, correspondiente a una carga de 25 mca. Sin embargo, la variación de la permeabilidad para el gradiente de 367, se da un aumento representativo con respecto a los gradientes anteriores, por lo que existe movimiento de partículas en este punto.

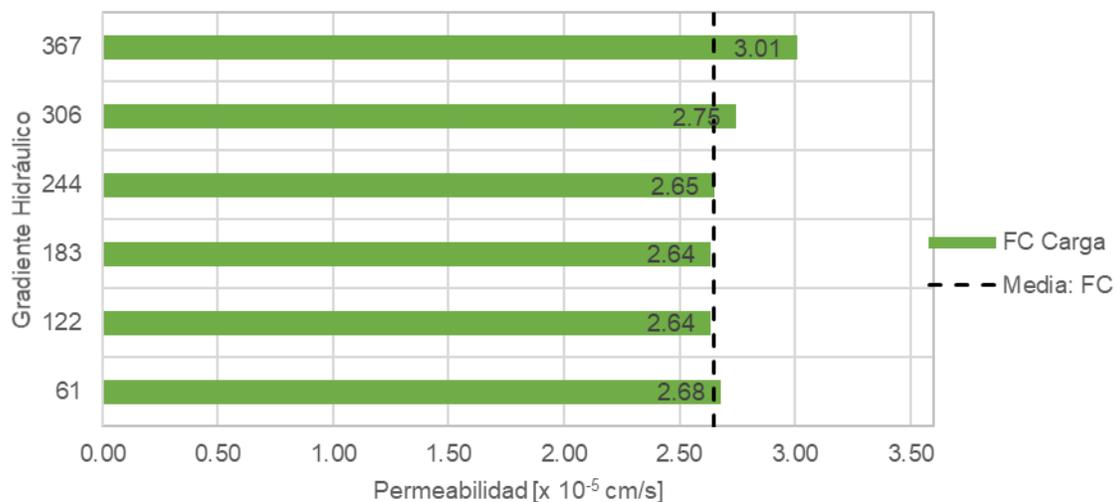


Ilustración 30: Permeabilidad de suelo con filtro combinado sometida a carga.

Por otra parte, en la Ilustración 31 se muestra el comportamiento durante el proceso de descarga (denominado FC Descarga), donde se observa un aumento de la permeabilidad a medida que disminuye el gradiente hidráulico, lo que demuestra la alteración de la estabilidad interna del suelo por el movimiento de partículas.

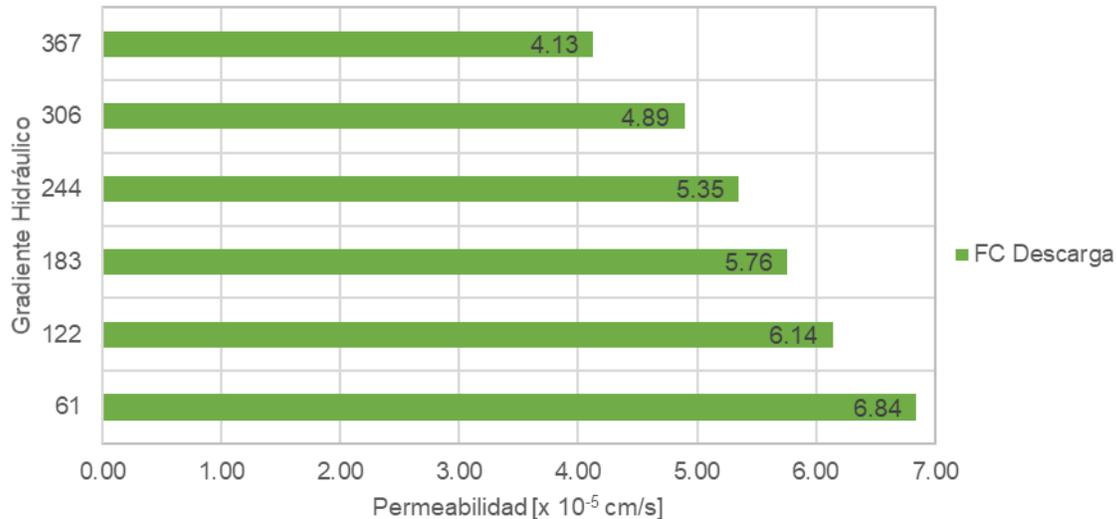


Ilustración 31: Permeabilidad de suelo con filtro combinado sometida a descarga.

#### 4.3.1.4. Comparación de Permeabilidad

En la Tabla 46 se muestran los valores de permeabilidad promedio para el suelo base sin filtro (SB), con filtro granular (FGR), filtro geotextil (FGT) y filtro combinado (FC), para la etapa de carga. Estos valores promedio se obtienen de las permeabilidades desde el gradiente 61 hasta el 244, ya que en todos los casos analizados el 306 ha demostrado ser el gradiente crítico alterando la estructura del suelo base.

Tabla 46: Permeabilidad promedio de SB, FGR, FGT y FC, durante carga.

Permeabilidad [ $\times 10^{-5}$ cm/s]	
SB	1.89
FGR	1.61
FGT	2.62
FC	2.65

Además, en la Ilustración 32 se muestra la permeabilidad promedio para los diferentes gradientes hidráulicos de cada tipo de filtro, durante la etapa de carga. Se considera que el mejor comportamiento de permeabilidad se da en el caso de suelo base con el filtro combinado, donde la permeabilidad es superior a la permeabilidad de los otros casos. Por otra parte, la permeabilidad para el suelo base con filtro granular se muestra como la más baja, aunque se mantiene próxima a la permeabilidad del suelo base.

Analizando los valores para cada caso, se puede observar que para el suelo base sin filtro se tiene una desviación estándar de las permeabilidades a diferentes gradientes hidráulicos de  $0.08 \times 10^{-5}$  cm/s. Para el caso del filtro granular  $0.11 \times 10^{-5}$  cm/s, filtro geotextil de  $0.16 \times 10^{-5}$  cm/s y con respecto a un  $0.02 \times 10^{-5}$  cm/s del filtro combinado, en base a esto se puede inferir que el filtro combinado genera mayor estabilidad en la permeabilidad para diferentes gradientes hidráulicos.

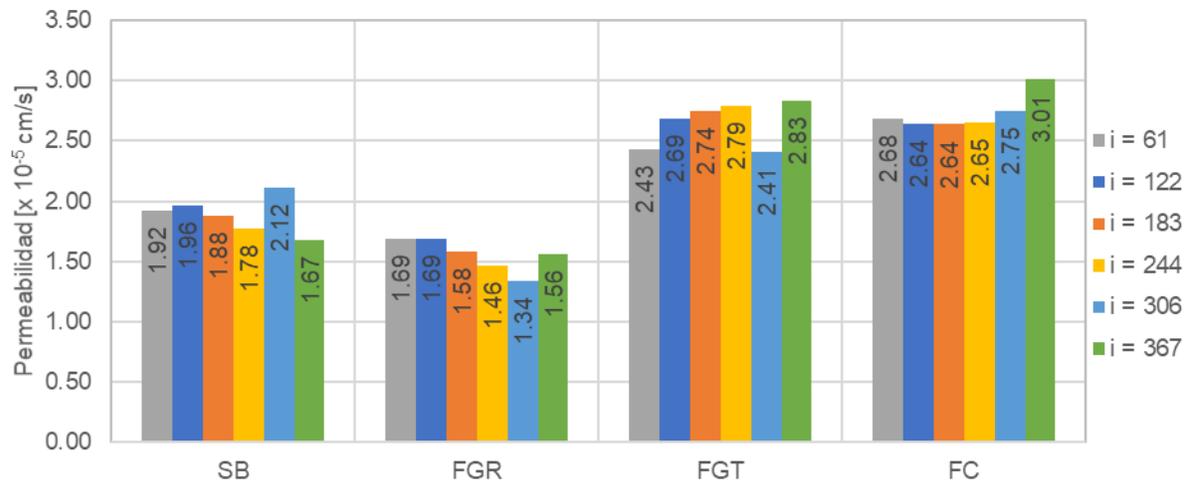


Ilustración 32: Permeabilidad SB, FGR, FGT y FC a diferentes gradientes durante la carga.

Además, en la Ilustración 33 se muestra la permeabilidad promedio para los diferentes gradientes hidráulicos de cada tipo de filtro, durante la etapa de descarga. Se observa que el comportamiento de suelo base con el filtro combinado es el que mantiene las permeabilidades más altas. Adicionalmente, se observa que los valores de permeabilidad van aumentando a medida que disminuye el gradiente hidráulico. Esto se explica por una reducción en el confinamiento de las muestras durante el proceso de descarga, lo cual favorece al movimiento interno de las partículas del suelo.

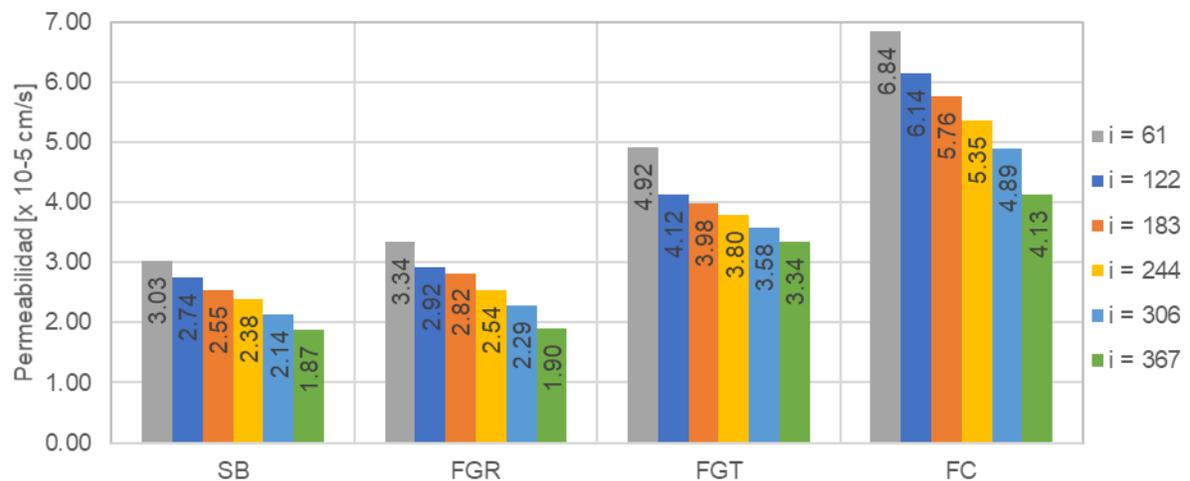


Ilustración 33: Permeabilidad SB, FGR, FGT y FC a diferentes gradientes durante la descarga.

En la Ilustración 34 que muestra la velocidad de flujo con respecto al gradiente hidráulico para el proceso de carga. Se puede observar que la velocidad mantiene una tendencia lineal, por lo tanto, indica la existencia de flujo laminar a través de la muestra. Además, en el gradiente 306 se observa que sus valores son los más distantes de la línea de tendencia, lo que refleja que este se vuelve el gradiente crítico del suelo base que modifica la estructura interna del suelo, convirtiéndose en un punto de cambio para la permeabilidad.

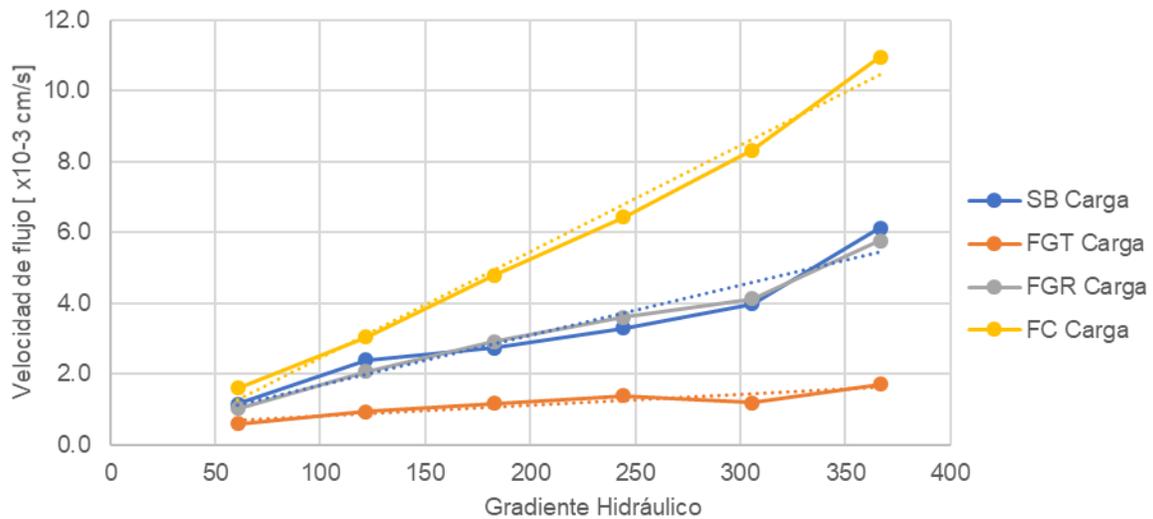


Ilustración 34: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico durante el proceso de carga

Por otra parte, en la Ilustración 35 se muestra la velocidad de flujo con respecto al gradiente hidráulico para el proceso de descarga. Para el caso del suelo base sin filtro junto con el caso del suelo con filtro granular, mantienen una tendencia lineal para los cuatro gradientes más bajos, lo que indica la existencia de flujo turbulento al iniciar el proceso de descarga, el cual a partir del gradiente 244, regresa a ser un flujo laminar. Para el filtro geotextil el cambio de flujo turbulento a flujo laminar se da en el gradiente 306, mientras que para el filtro combinado el cambio del flujo se da en el gradiente 183. La presencia de flujo turbulento al inicio de la descarga genera el movimiento de partículas, lo que permite la formación de canales lo cual explica el aumento de la permeabilidad del suelo.

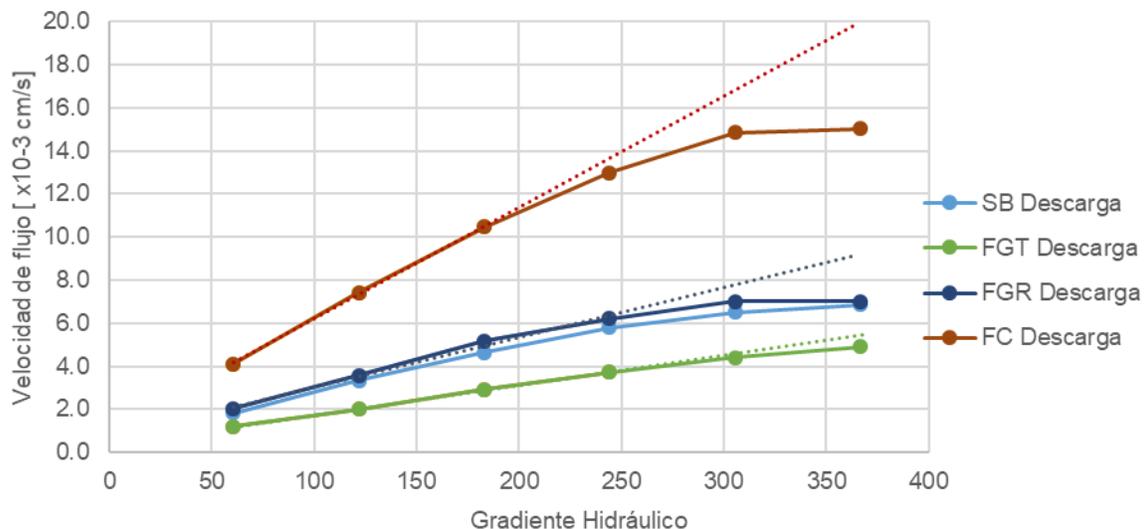


Ilustración 35: Variación de la velocidad respecto al gradiente hidráulico durante el proceso de descarga



### 4.3.2. Migración de finos

La migración de finos se evaluó comparando los cambios en la distribución granulométrica del suelo base en estado natural, con respecto a las curvas granulométricas de la parte superior e inferior del suelo base después del ensayo de permeabilidad. Para cada caso se analizó dos muestras las cuales mantienen un comportamiento similar.

A continuación, se presentan las curvas granulométricas de los suelos ensayados, para ello se utiliza la abreviación SB para el suelo base, FGR para el filtro granular, FGT para el filtro geotextil y FC para el filtro combinado. En cada gráfica se identifica de color negro a la curva base del suelo sin ensayar, de color rojo la curva de la parte superior de la muestra ensayada, de color azul la curva de la parte inferior de la muestra ensayada, de color verde el porcentaje de migración de finos de la parte superior con respecto a la curva base y de color marrón el porcentaje de migración de finos de la parte inferior con respecto a la curva base.

De manera adicional, se muestra una línea punteada de color naranja para el diámetro teórico desde donde se considera el tamaño de partículas de los limos (0.075 mm) hasta una línea punteada de color verde donde se indica el diámetro teórico desde donde se considera el tamaño de partículas de las arcillas (0.002 mm).

Cuando existe migración de finos, la curva resultante del ensayo de permeabilidad tiende a disminuir su valor del material que pasa con respecto a la curva base de cada suelo. En la zona inferior se aprecia el material que migra dentro de la muestra con respecto a su diámetro, teniendo casos donde prevalece la migración de limos sobre la migración de arcillas.

La migración del material se analiza únicamente para el rango de material fino, es decir para diámetros menores o iguales a 0.075 mm, sin considerar cambios en la parte de las arenas, debido a que como objetivo se planteó únicamente el estudio de la migración de finos. Es importante recalcar que la medición de la migración de finos se la calcula como el porcentaje que migra con respecto a la migración de finos del suelo base sin filtro.

En algunas curvas se presentan ciertos picos o cambios bruscos, las cuales se deben a la propia variabilidad de los datos por las diferencias entre cada una de las muestras.

#### 4.3.2.1. Suelo base sin filtro

- **Muestra 1:** El comportamiento del suelo base ante el flujo de agua indica la migración de finos, especialmente de las partículas de limos, tanto en la parte superior como inferior de la muestra. Los limos migran con mayor facilidad debido a los enlaces químicos entre las partículas de arcilla del suelo. Para este caso el suelo pierde sus finos principalmente en un rango entre diámetros de 0.075 a 0.010 mm.

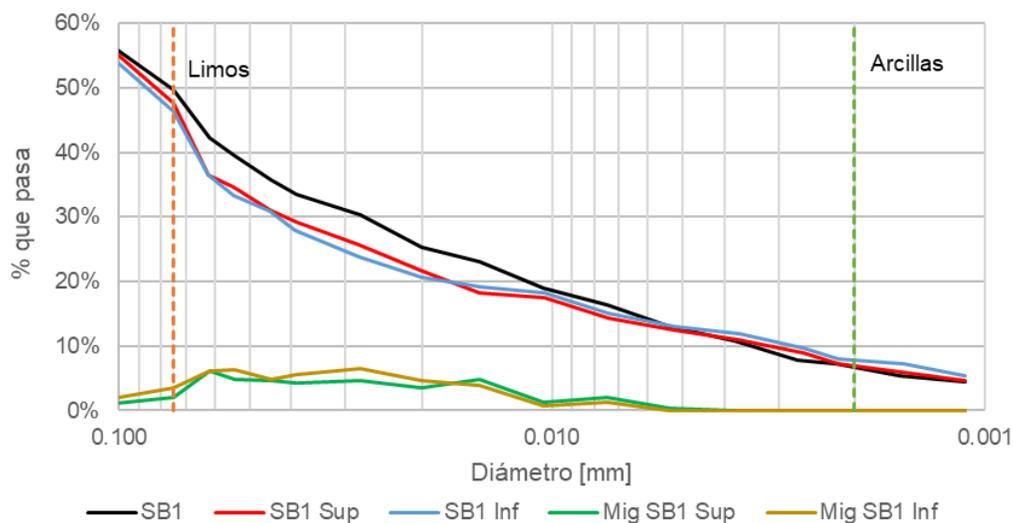


Ilustración 36: Curvas granulométricas suelo sin filtro - muestra 1.

- **Muestra 2:** Al igual que la muestra 1, este suelo se comporta de manera equivalente en cuanto al rango de migración de sus finos. La parte superior e inferior presenta una respuesta muy similar que demuestra la migración de material en todo el suelo.

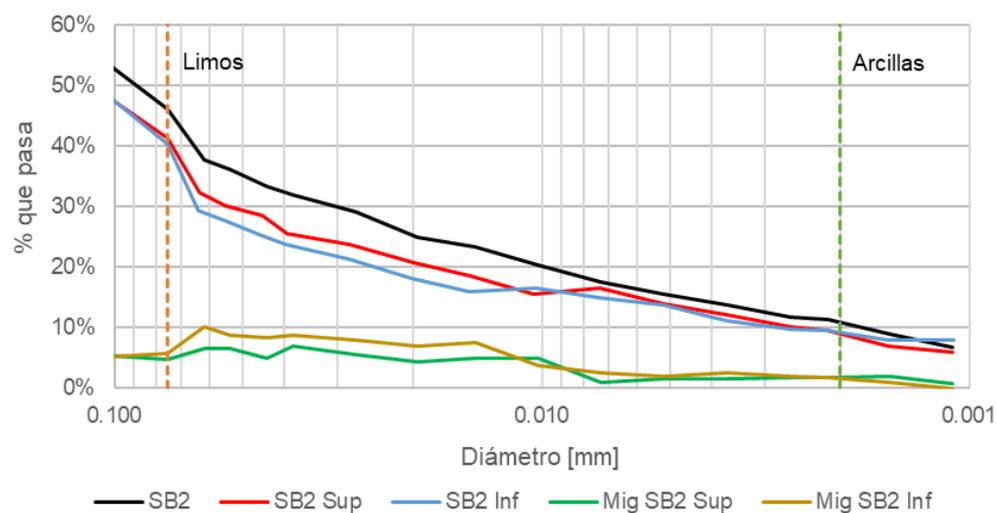


Ilustración 37: Curvas granulométricas suelo sin filtro - muestra 2.

#### 4.3.2.2. Suelo con filtro granular

- **Muestra 1:** En el caso del filtro granular se puede observar que la curva granulométrica del suelo ensayado se mantiene muy similar a la curva base, es decir no existe una migración significativa de material fino.

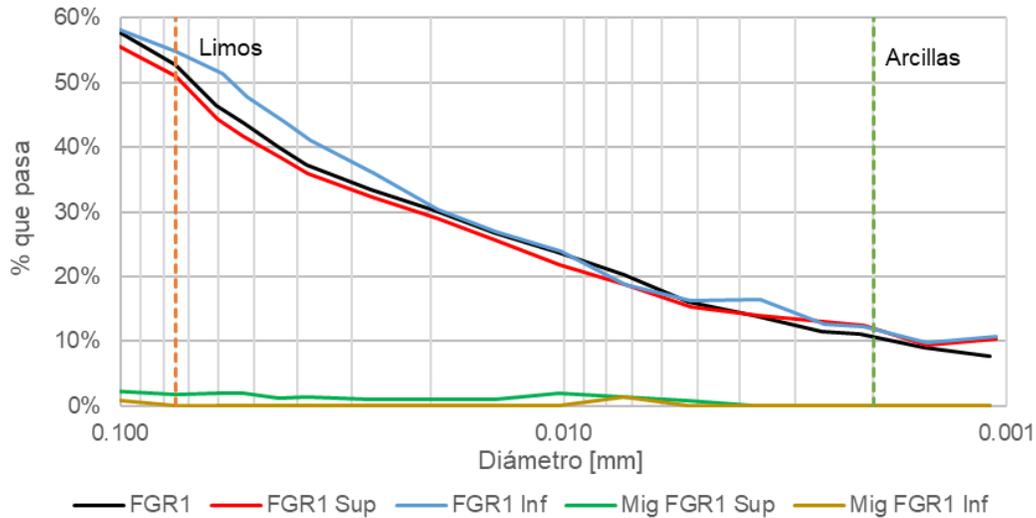


Ilustración 38: Curvas granulométricas suelo con filtro granular - muestra 1.

- **Muestra 2:** Las curvas también mantienen la misma forma de la curva base, teniendo una baja migración de material fino. A diferencia de la muestra 1, se observa una pequeña migración de limos, pero se mantiene muy cercano su valor al de la curva base.

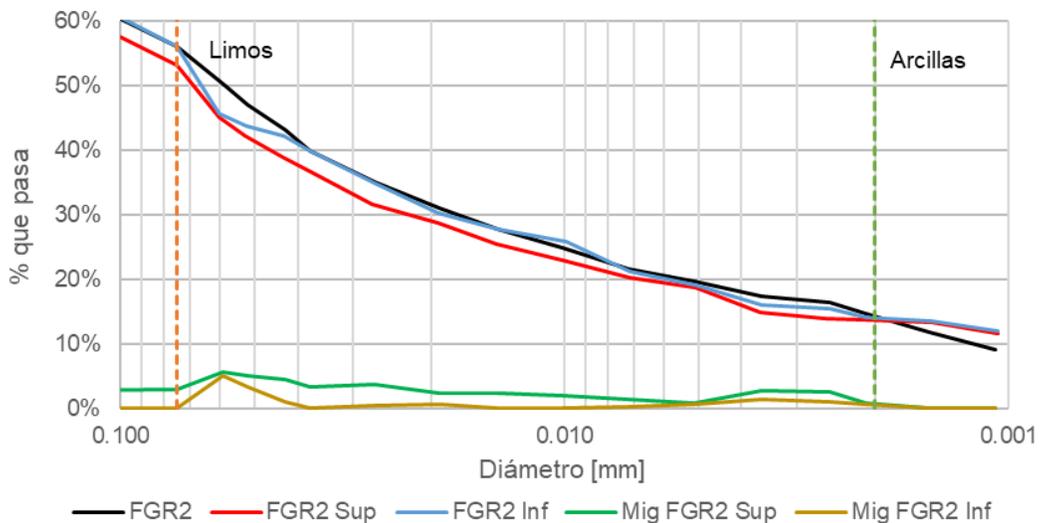


Ilustración 39: Curvas granulométricas suelo con filtro granular - muestra 2.

#### 4.3.2.3. Suelo con filtro geotextil

- **Muestra 1:** En el caso del filtro geotextil, se observa que la cantidad de material fino que migra se mantiene constante o muy similar para cada uno de los diámetros de las partículas. Se aprecia una migración de arcillas al igual que de limos. La migración se mantiene mayor para la parte superior en comparación a la zona inferior que está en contacto con el filtro.

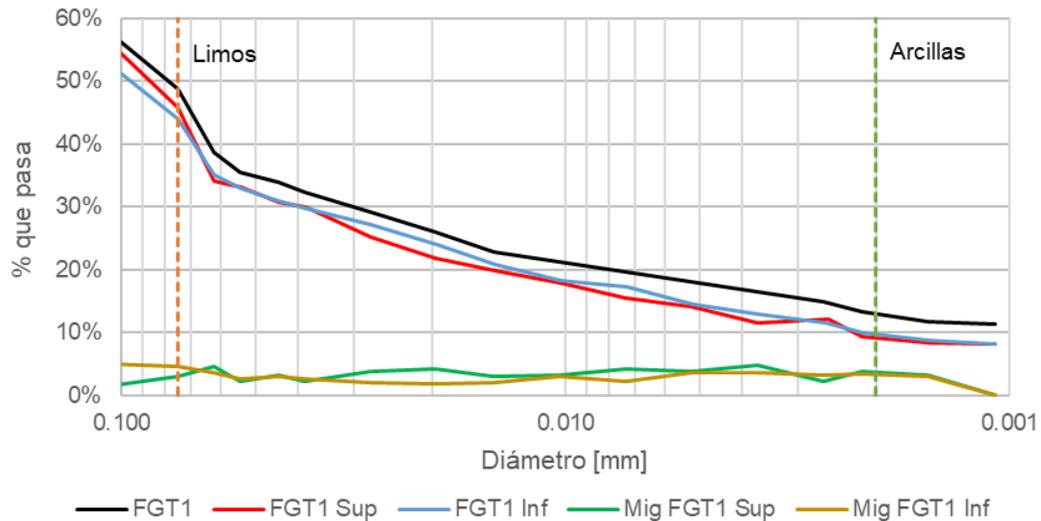


Ilustración 40: Curvas granulométricas suelo con filtro geotextil - muestra 1.

- **Muestra 2:** Su comportamiento ante la migración de finos se mantiene similar a la muestra 1, presentando salida de material en todos los diámetros de manera constante. Adicionalmente el cambio en la curva granulométrica se mantiene para la parte superior e inferior del suelo con la misma tendencia.

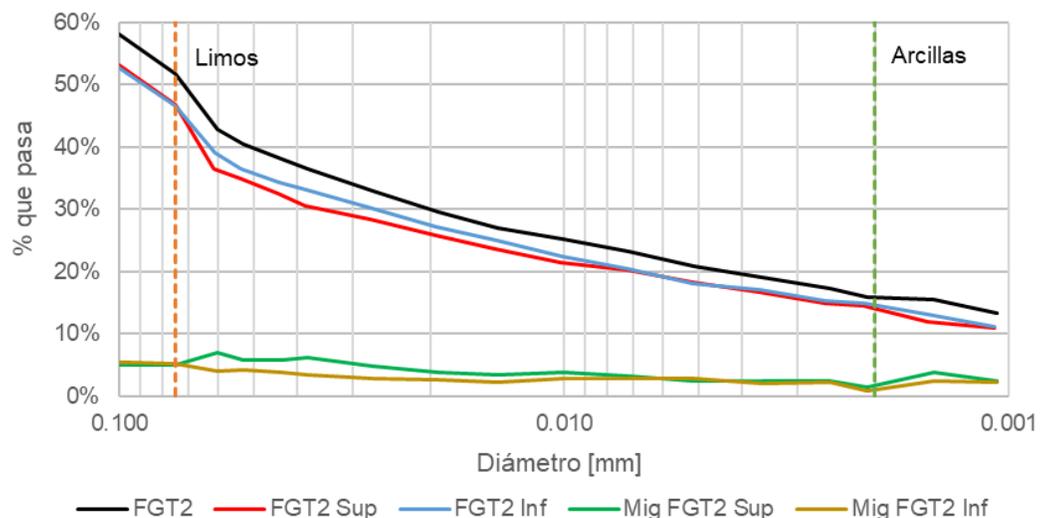


Ilustración 41: Curvas granulométricas suelo con filtro geotextil - muestra 2.

#### 4.3.2.4. Suelo con filtro combinado

- **Muestra 1:** El movimiento de partículas finas para el caso del filtro combinado se produce en mayor cantidad para diámetros de partículas en el rango de 0.075 a 0.004 mm. Para el resto de los diámetros, la migración es baja y se mantiene constante.

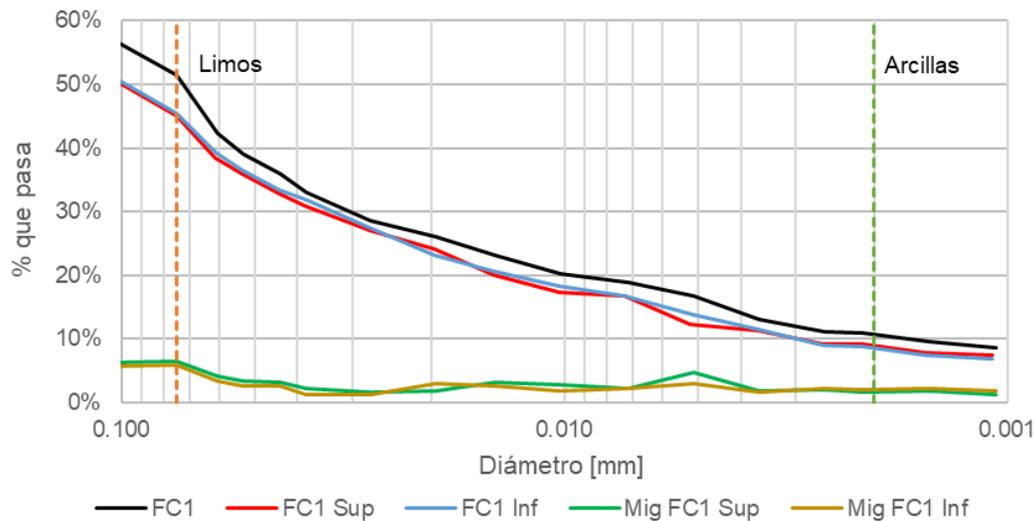


Ilustración 42: Curvas granulométricas suelo con filtro combinado - muestra 1.

- **Muestra 2:** Para este caso, se produce la migración de limos en mayor cantidad que de arcillas. La migración se da en partículas entre 0.075 y 0.01 mm en su gran mayoría.

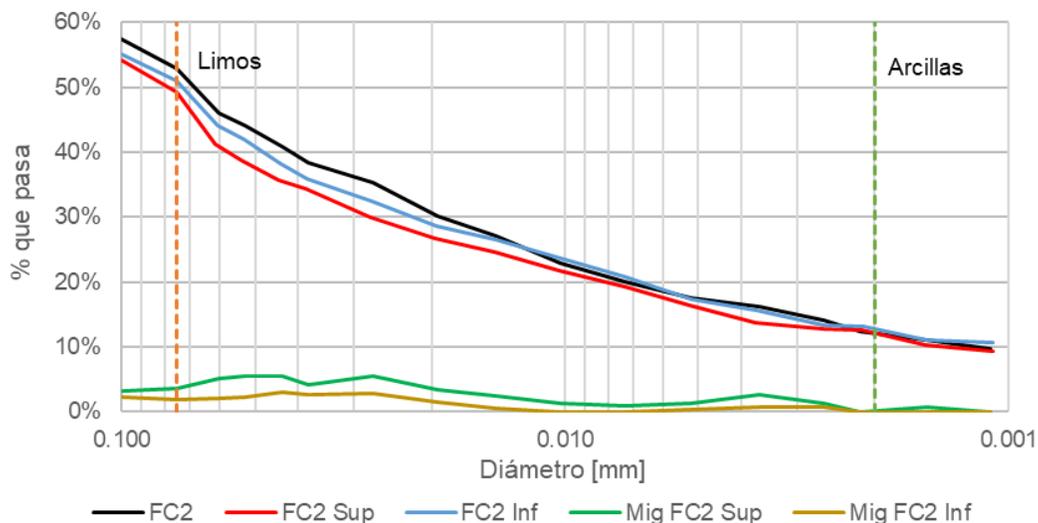


Ilustración 43: Curvas granulométricas suelo con filtro combinado - muestra 2.

Como se observan en las ilustraciones presentadas para la migración de finos, el movimiento de partículas se genera en su mayoría para diámetros correspondientes al tamaño de limos, es decir de partículas con diámetro entre 0.075 a 0.002 mm. Únicamente para el caso del filtro geotextil, se puede apreciar en las 2 muestras, que existe un movimiento constante de material con tamaño de arcilla correspondiente a partículas de diámetro inferior a 0.002 mm.

El movimiento de finos se puede comparar también a través de la Tabla 47, en donde se indica el porcentaje de material que migra con respecto a la migración de finos del suelo base. Se compara la parte superior de las muestras, las cuales tienen mayor movimiento de material. Por otra parte, la zona inferior de las muestras al estar en contacto con los filtros, reducen su movimiento, generando una menor migración de material. La parte superior e inferior mantienen un comportamiento similar, pero con valores distintos por la presencia de los filtros.

Como se observa, el filtro granular resulta el que genera menor migración de finos a diferencia del geotextil, donde la migración alcanza casi su totalidad en la parte superior y se reduce a la mitad en la parte del suelo en contacto con el filtro.

Tabla 47 Porcentaje de migración de finos en el suelo.

<b>% Migración de finos respecto a suelo sin ensayar</b>			
<b>Caso</b>	<b>FGR</b>	<b>FGT</b>	<b>FC</b>
<b>% Parte superior - sin contacto con el filtro</b>	54.56%	92.46%	79.56%
<b>% Parte inferior - en contacto con el filtro</b>	12.50%	52.61%	34.69%

En el caso del filtro combinado, se puede observar que este presenta un porcentaje de migración intermedio entre el filtro granular y geotextil, lo cual indica que trabaja conjuntamente para mejorar la eficiencia en la reducción de la migración de finos del suelo base.

De manera adicional, se puede analizar la eficiencia de los filtros desde otra perspectiva, para ello se analizó el porcentaje de aporte de cada tipo de filtro para garantizar la estabilidad interna del suelo, es decir, equivale a la cantidad de material fino que se mantiene dentro del suelo por la presencia del filtro, comparando de igual manera con el comportamiento del suelo base sin filtro. Este porcentaje se calculó para la parte superior e inferior de cada muestra, siendo mayor en el caso de la parte inferior que está en contacto directo con el filtro. Los valores se indican en la Tabla 48.

Para el caso del filtro granular, su presencia ayuda a mantener la estabilidad interna del suelo en un alto porcentaje. En el caso de filtro geotextil, la migración de finos genera un menor porcentaje en el aporte del filtro para mantener la estabilidad interna del suelo.

Tabla 48: Porcentaje de aporte a la estabilidad interna del suelo – retención.

<b>% Aporte a estabilidad interna del suelo - retención</b>			
<b>Caso</b>	<b>FGR</b>	<b>FGT</b>	<b>FC</b>
<b>% Parte superior - sin contacto con el filtro</b>	45.44%	7.54%	20.44%
<b>% Parte inferior - en contacto con el filtro</b>	87.50%	47.39%	65.31%



### 4.3.3. Relación entre permeabilidad y migración de finos

A continuación, se detalla para cada tipo de filtro empleado la relación que muestran los resultados de permeabilidad con la migración de finos.

Inicialmente, para el caso del suelo base sin filtro se tiene una permeabilidad de  $1.89 \times 10^{-5}$  cm/s, y una migración principalmente de limos constituidos entre los diámetros 0.075 mm hasta 0.01 mm.

En el caso del filtro granular la permeabilidad promedio es de  $1.61 \times 10^{-5}$  cm/s siendo más baja que la permeabilidad del suelo sin filtro. La migración de finos es baja pero en la parte inferior de la muestra se acumula material proveniente de la parte superior, por lo que se observa la curva granulométrica de la parte inferior igual o sobre la curva del suelo base (Ilustración 38, Ilustración 39). La migración de la parte superior es del 54.56% respecto al 12.50% de la parte inferior, lo que indica que existe una acumulación de material en la zona de contacto con el filtro, generando una colmatación que disminuye la permeabilidad.

En el caso del filtro geotextil la permeabilidad promedio es de  $2.62 \times 10^{-5}$  cm/s, la migración de finos para este filtro se mantiene constante para todos los diámetros de partículas, permitiendo el movimiento de arcillas a diferencia del filtro granular. Además, considerando que migran un 92.46% de finos de la parte superior de la muestra y un 52.61% de finos de la parte inferior de la muestra, no se produce una colmatación de filtro debido a su alta porosidad y permeabilidad, manteniendo la permeabilidad superior a la del suelo base sin filtro.

Finalmente, para el caso del filtro combinado la permeabilidad promedio es de  $2.65 \times 10^{-5}$  cm/s. La migración de finos se produce de manera constante para la parte de los limos, pero en menor cantidad que en caso de disponer únicamente del filtro geotextil. En este caso la presencia del filtro granular reduce la migración de finos mientras el filtro geotextil permite mantener una alta permeabilidad.

### 4.3.4. Análisis económico

El análisis económico se realizó para comparar el costo de construcción de cada uno de los filtros, aplicados para una obra hidráulica pequeña como es el caso de un tanque enterrado. Se consideró dimensiones similares que permitan evaluar el costo de los componentes principales utilizados para cada tipo de filtro. Se estableció un filtro de 10 m de longitud, 0.4 m de ancho de zanja y una profundidad de excavación de 1 m (Ilustración 44). Para todos los casos se consideró una altura del filtro de 0.8 m desde la base de la zanja, quedando una capa de 0.2 m por encima del filtro compuesta de material del sitio.

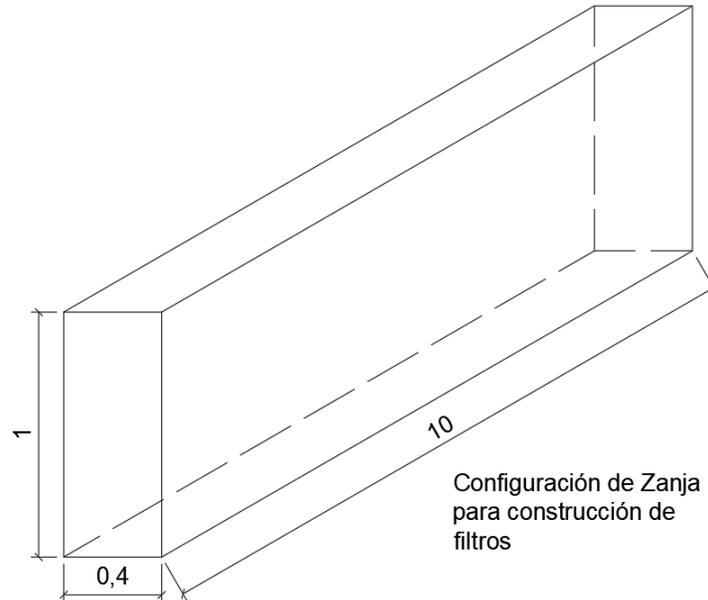


Ilustración 44: Dimensiones de zanja para análisis de costo

La construcción de los filtros considera la excavación de la zanja, en donde en el caso del filtro granular, éste se coloca directamente hasta completar 0.8 m de altura. Para el filtro geotextil, se coloca una capa en los bordes de la zanja y se lo rellena con material granular grueso, que no dispone de ninguna distribución granulométrica con capacidad de retención, es decir únicamente permite el flujo del agua. Finalmente, para el caso del filtro combinado, se coloca una capa de filtro geotextil en los bordes de la zanja y se lo rellena con material granular con la misma distribución granulométrica del filtro granular, es decir con material que cumple las condiciones de permeabilidad y retención tal como se establece en el diseño de un filtro granular (Ilustración 45).

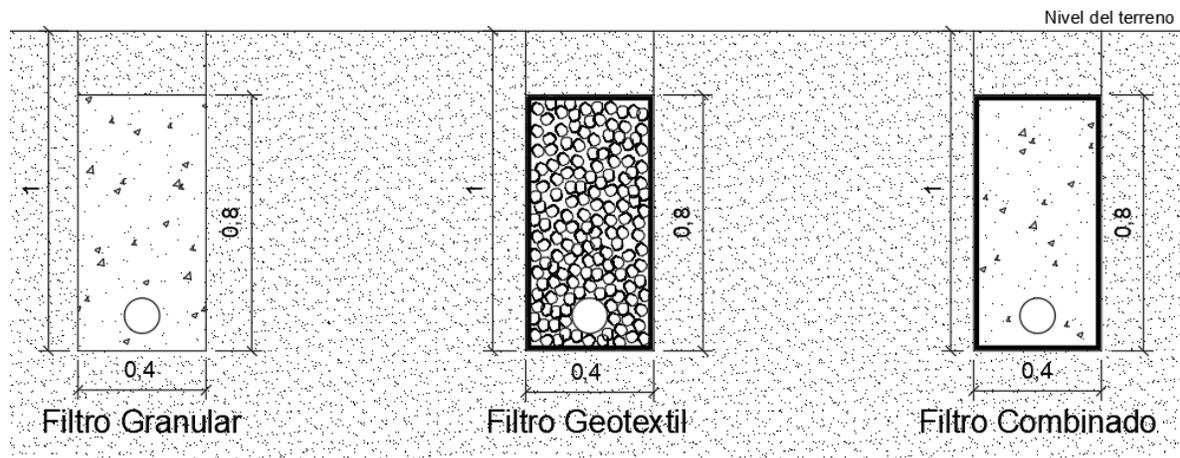


Ilustración 45: Dimensiones de filtro granular, geotextil y combinado para análisis de costos

A continuación, se indican los presupuestos para la construcción de cada tipo de filtro. Los rubros del análisis de precios unitarios se adjuntan en Anexos.



Tabla 49: Presupuesto para filtro granular.

## Análisis económico para la construcción de filtros de drenaje

CASO 1: Presupuesto para filtro granular						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1		RUBROS PARA CONSTRUCCIÓN DE DRENES				
1.001		REPLANTEO Y NIVELACIÓN				34.18
1.001.001	501001	Replanteo y nivelación	ml	10	3.42	34.18
1.002		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MECÁNICOS				20.38
1.002.001	504004	Excavación retroexcavadora, zanja 0-2 m, material sin clasificar, cuchara 40 cm	m3	3	3.53	10.58
1.002.002	506013	Cargado de material con cargadora, incluye pago en escombrera (medido en banco)	m3	3.2	2.73	8.72
1.002.003	506015	Transporte de materiales medido en banco	m3-km	3.2	0.34	1.08
1.003		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MANUALES				19.71
1.003.001	504011	Excavación manual, zanja 0-2 m, material sin clasificar	m3	1	15.03	15.03
1.003.003	506018	Cargado de material manualmente (medido en banco)	m3	0.8	5.86	4.69
1.004		FILTROS Y DRENAJE				146.63
1.004.001	505007	Material filtrante para drenes, suministro y colocación	m3	3.2	28.76	92.04
1.004.002	533001	Geotextil NT 1600, suministro e instalación	m2	0	2.20	0.00
1.004.003	505013	Relleno compactado con material granular grueso	m3	0	26.52	0.00
1.004.004	505017	Relleno compactado con material de sitio	m3	0.8	7.49	5.99
1.004.005	515012	Tubería PVC perforada para dren, d= 110 mm	ml	10	4.86	48.60
					SUBTOTAL	220.91
					IVA	12%
					TOTAL	247.42

Son: DOSCIENTOS CUARENTA Y SIETE CON 42/100 DÓLARES

Tabla 50: Presupuesto para filtro geotextil.

## Análisis económico para la construcción de filtros de drenaje

CASO 2: Presupuesto para filtro geotextil						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1		RUBROS PARA CONSTRUCCIÓN DE DRENES				
1.001		REPLANTEO Y NIVELACIÓN				34.18
1.001.001	501001	Replanteo y nivelación	ml	10	3.42	34.18
1.002		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MECÁNICOS				20.38
1.002.001	504004	Excavación retroexcavadora, zanja 0-2 m, material sin clasificar, cuchara 40 cm	m3	3	3.53	10.58
1.002.002	506013	Cargado de material con cargadora, incluye pago en escombrera (medido en banco)	m3	3.2	2.73	8.72
1.002.003	506015	Transporte de materiales medido en banco	m3-km	3.2	0.34	1.08
1.003		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MANUALES				19.71
1.003.001	504011	Excavación manual, zanja 0-2 m, material sin clasificar	m3	1	15.03	15.03
1.003.003	506018	Cargado de material manualmente (medido en banco)	m3	0.8	5.86	4.69
1.004		FILTROS Y DRENAJE				192.34
1.004.001	505007	Material filtrante para drenes, suministro y colocación	m3	0	28.76	0.00
1.004.002	533001	Geotextil NT 1600, suministro e instalación	m2	24	2.20	52.87
1.004.003	505013	Relleno compactado con material granular grueso	m3	3.2	26.52	84.88
1.004.004	505017	Relleno compactado con material de sitio	m3	0.8	7.49	5.99
1.004.005	515012	Tubería PVC perforada para dren, d= 110 mm	ml	10	4.86	48.60
					SUBTOTAL	266.62
					IVA	12%
					TOTAL	298.62

Son: DOSCIENTOS NOVENTA Y OCHO CON 62/100 DÓLARES

Tabla 51: Presupuesto para filtro combinado.

**Análisis económico para la construcción de filtros de drenaje**

CASO 3: Presupuesto para filtro combinado						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1		RUBROS PARA CONSTRUCCIÓN DE DRENES				
1.001		REPLANTEO Y NIVELACIÓN				34.18
1.001.001	501001	Replanteo y nivelación	ml	10	3.42	34.18
1.002		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MECÁNICOS				20.38
1.002.001	504004	Excavación retroexcavadora, zanja 0-2 m, material sin clasificar, cuchara 40 cm	m3	3	3.53	10.58
1.002.002	506013	Cargado de material con cargadora, incluye pago en escombrera (medido en banco)	m3	3.2	2.73	8.72
1.002.003	506015	Transporte de materiales medido en banco	m3-km	3.2	0.34	1.08
1.003		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MANUALES				19.71
1.003.001	504011	Excavación manual, zanja 0-2 m, material sin clasificar	m3	1	15.03	15.03
1.003.003	506018	Cargado de material manualmente (medido en banco)	m3	0.8	5.86	4.69
1.004		FILTROS Y DRENAJE				199.50
1.004.001	505007	Material filtrante para drenes, suministro y colocación	m3	3.2	28.76	92.04
1.004.002	533001	Geotextil NT 1600, suministro e instalación	m2	24	2.20	52.87
1.004.003	505013	Relleno compactado con material granular grueso	m3	0	26.52	0.00
1.004.004	505017	Relleno compactado con material de sitio	m3	0.8	7.49	5.99
1.004.005	515012	Tubería PVC perforada para dren, d= 110 mm	ml	10	4.86	48.60
					SUBTOTAL	273.78
					IVA	12% 32.85
					TOTAL	306.63

Son: TRESCIENTOS SEIS CON 63/100 DÓLARES

El filtro granular resulta el más económico con un costo de \$ 247.42, mientras que el filtro geotextil tiene un costo de \$ 298.62, representando un 17% más que el filtro granular. Por otra parte, el filtro combinado tiene un costo de \$ 306.63, siendo 24% más que el filtro granular.

#### 4.3.5. Comparación de eficiencia

Mediante el análisis de cada uno de los parámetros de los filtros se resume los valores y se indica el puesto que ocupa cada filtro según su desempeño en cuanto a permeabilidad, migración de finos y costo (Tabla 52), siendo los mejores los que presenten mayor permeabilidad, menor migración de finos y un menor costo.

Tabla 52: Valores de permeabilidad, migración de finos y costo de cada filtro.

Tipo de filtro	Permeabilidad	Migración de finos	Costo
	[x 10 <sup>-5</sup> cm/s]	[%]	[\$]
<b>Granular</b>	1.61 (3°)	12.5 (1°)	247.42 (1°)
<b>Geotextil</b>	2.62 (2°)	52.61 (3°)	298.62 (2°)
<b>Combinado</b>	2.65 (1°)	34.69 (2°)	306.63 (3°)

De acuerdo con los resultados, se puede indicar que la selección del filtro a utilizar dependerá de las características del entorno en el que se aplique el filtro, ya que se puede dar prioridad a un parámetro en específico, ya sea permeabilidad para zonas con alta

humedad; migración de partículas para suelos alto contenido de finos, y el costo según el período de vida útil que requiera la estructura.

Para el caso de garantizar permeabilidad se recomienda la utilización del filtro combinado, ya que éste mantiene la estabilidad interna del suelo, pero con un costo mayor. Por otra parte, en el caso de que se busque garantizar la retención de partículas, se recomienda el uso del filtro granular a bajo costo, pero con menor permeabilidad.

En cuanto al filtro geotextil, se recomienda analizar más a detalle sus propiedades, ya que, con las pruebas realizadas, se ha demostrado que su uso como filtro no garantiza de manera eficiente los criterios de permeabilidad y retención para el suelo base utilizado.

Adicionalmente, se recomienda realizar ensayos con la intención de optimizar la combinación de ambos filtros debido que al disponer de dos materiales filtrantes se podría reducir su espesor para disminuir costos (Ilustración 46). En la Tabla 53 se muestra el análisis de costos para la construcción de un filtro combinado de menor espesor, resultando con un costo de \$ 282.96, que representa una disminución de un 7.7% en el costo de construcción.

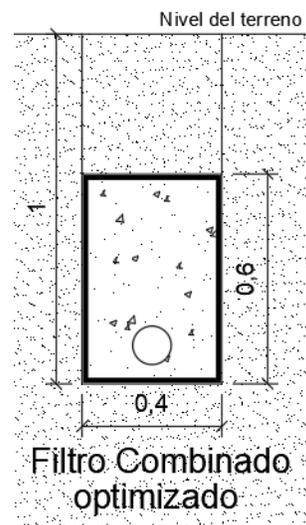


Ilustración 46: Dimensiones filtro combinado optimizado para análisis de costos



Tabla 53: Presupuesto para filtro combinado optimizado

## Análisis económico para la construcción de filtros de drenaje

CASO 4: Presupuesto para filtro combinado						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1		RUBROS PARA CONSTRUCCIÓN DE DRENES				
1.001		REPLANTEO Y NIVELACIÓN				34.18
1.001.001	501001	Replanteo y nivelación	ml	10	3.42	34.18
1.002		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MECÁNICOS				20.38
1.002.001	504004	Excavación retroexcavadora, zanja 0-2 m, material sin clasificar, cuchara 40 cm	m3	3	3.53	10.58
1.002.002	506013	Cargado de material con cargadora, incluye pago en escombrera (medido en banco)	m3	3.2	2.73	8.72
1.002.003	506015	Transporte de materiales medido en banco	m3-km	3.2	0.34	1.08
1.003		MOVIMIENTO DE TIERRAS METODOS MANUALES				24.40
1.003.001	504011	Excavación manual, zanja 0-2 m, material sin clasificar	m3	1	15.03	15.03
1.003.003	506018	Cargado de material manualmente (medido en banco)	m3	1.6	5.86	9.38
1.004		FILTROS Y DRENAJE				173.67
1.004.001	505007	Material filtrante para drenes, suministro y colocación	m3	2.4	28.76	69.03
1.004.002	533001	Geotextil NT 1600, suministro e instalación	m2	20	2.20	44.06
1.004.003	505013	Relleno compactado con material granular grueso	m3	0	26.52	0.00
1.004.004	505017	Relleno compactado con material de sitio	m3	1.6	7.49	11.99
1.004.005	515012	Tubería PVC perforada para dren, d= 110 mm	ml	10	4.86	48.60
					SUBTOTAL	252.64
					IVA	12%
					TOTAL	282.96

Son: DOSCIENTOS OCHENTA Y DOS CON 96/100 DÓLARES

Esta optimización se considera para el filtro combinado debido a que se puede utilizar el filtro geotextil para garantizar una buena permeabilidad y el filtro granular para garantizar la disminución en la migración de partículas. Por último, la presencia del filtro granular asegura el óptimo funcionamiento del sistema en caso de rotura del filtro geotextil.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza la respuesta de un suelo fino combinado con un filtro granular, geotextil y una combinación de estos, para determinar la eficiencia en cuanto a la capacidad para permitir el flujo y evacuación del agua como también impedir la migración finos.

Basados en análisis a las formaciones existentes en la ciudad de Cuenca, se establecieron 6 puntos para la toma de muestras y se realizó su caracterización dando lugar a 4 suelos tipo arena y 2 suelos finos, de los cuales se obtuvo un limo arenoso (ML) con un índice de plasticidad de 11.11% y una densidad aparente seca de  $1.34 \text{ g/cm}^3$  y un limo elástico arenoso (MH) con un índice de plasticidad de 3.74% y una densidad aparente seca de  $0.97 \text{ g/cm}^3$ .

Se seleccionó como suelo base el limo elástico arenoso (MH) perteneciente a la formación Mangán, en el sector de la vía Turi – El Verde. Este suelo tiene un contenido de arenas 47.19%, un contenido de finos de 52.81%, de los cuales 40.53% corresponde a limos y 12.27% a arcillas.

Se estableció una metodología para el diseño del filtro granular la cual recopila los criterios fundamentales dados por Terzaghi e incorpora las nuevas consideraciones que proponen autores como Sherard, ICOLD, USBR, USSCS y USACE en función de la aplicación y la categoría del suelo base.

Se estableció una metodología para el diseño del filtro geotextil la cual mantiene los criterios fundamentales dados por Terzaghi e incorpora nuevos criterios y consideraciones establecidos por autores como Giroud, FHWA, Christopher & Fischer, entre otros, en función de las condiciones a las que está sometido el proyecto y las condiciones de flujo que se dan en el suelo base.

En el diseño del filtro granular para el suelo base seleccionado, compuesto por limos y arcillas, es necesario emplear partículas con tamaños en un rango de 9.5 a 0.075 mm, las cuales deben tener una distribución garantice la estabilidad interna tanto del suelo como del filtro.

Para el uso de un filtro geotextil de tipo no tejido, empleado sobre el suelo base seleccionado y para obras hidráulicas pequeñas, es necesario que las propiedades de éste se mantengan con un tamaño de abertura aparente en un rango entre 0.383 mm y 0.011 mm. Su permeabilidad debe mantenerse superior a la permeabilidad del suelo y con una porosidad mayor a 50%. El filtro geotextil PAVCO NT 1600 cumple con estos límites, presentando una abertura aparente de 0.212 mm, permeabilidad de  $2.6 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$  y una porosidad de 80%.

En base a los ensayos se determinó una permeabilidad de  $1.89 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  para el suelo base sin filtro,  $1.61 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  para el suelo con filtro granular,  $2.62 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  para el suelo con filtro geotextil y  $2.65 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  para el suelo con filtro combinado.

La aplicación de gradientes hidráulicos elevados permitió determinar que una carga de 25 mca se genera un gradiente de 306, en el cual se produce la pérdida de estabilidad de suelo base para todos los casos de aplicación de los distintos filtros. Estableciéndose de



esta manera el gradiente 306 como el gradiente crítico del suelo base. Además, se demostró que a partir de este gradiente se genera flujo turbulento dentro de la muestra provocando migración de finos y variación de la permeabilidad.

El suelo base sin filtro presenta una migración principalmente de limos entre los diámetros 0.075 mm hasta 0.01 mm.

La presencia del filtro granular reduce la migración de finos del suelo base en un 45.44% de la parte superior y en un 87.50% de la parte inferior.

La presencia del filtro geotextil reduce la migración de finos del suelo base en un 7.54% de la parte superior y en un 47.39% de la parte inferior.

La presencia del filtro combinado reduce la migración de finos del suelo base en un 20.44% de la parte superior y en un 65.31% de la parte inferior.

La utilización de un geotextil como filtro ya sea por sí solo o combinado, permite la migración tanto de limos como de arcillas, mientras que con el filtro granular únicamente migran limos.

Analizando la eficiencia de los filtros se pueden destacar dos aspectos, el primero con el filtro combinado en el cual se garantiza la permeabilidad y una reducción de la migración de finos en un 65.31% respecto al suelo base sin filtro, pero siendo el de mayor costo. Por otra parte, si se desea garantizar la reducción en la migración de finos de un 87.50%, se puede optar por un filtro granular, pero la permeabilidad se ve disminuida en un 15% con respecto al suelo base.

Finalmente, para el tipo de suelo analizado, se concluye que el filtro óptimo para su aplicación corresponde al filtro combinado, el cual garantiza la retención de finos permitiendo el paso de agua a través de la estructura.

## 6. RECOMENDACIONES

El proceso de obtención de muestras debe realizarse en un periodo en el cual la humedad del suelo permita la extracción de muestras tal que estas no sean demasiado húmedas y se generen deformaciones, o que sean demasiado secas y se disgreguen. Adicionalmente, se recomienda planificar los ensayos para definir el número de muestras necesarias con la intención de obtenerlas bajo las mismas condiciones.

En laboratorio se puede realizar el proceso de saturación de la muestra de distintas maneras, una de ellas es aplicando un vacío a la parte superior y aplicar flujo de agua a presión atmosférica en la parte inferior. Ese vacío generará un gradiente hidráulico, el cual deberá ser inferior al que será aplicado para realizar las medidas de la permeabilidad. Otro procedimiento consiste en permitir flujo a través de la muestra, ya sea de arriba hacia abajo o en sentido contrario, con presión de cámara igual o superior a la máxima presión aplicada. El gradiente hidráulico aplicado para la saturación de la muestra se irá incrementando progresivamente, pero manteniéndolo inferior al gradiente que será utilizado para medir la permeabilidad.



Se plantea como línea de investigación futura el análisis de la eficiencia de filtros en base a una variación del espesor del filtro combinado, con el objetivo de reducir los costos de construcción al emplear dos materiales filtrantes, garantizando que el sistema cumpla con los criterios de retención y permeabilidad.

Por otra parte, se propone el análisis del comportamiento del filtro geotextil combinando con un material permeable que no cumpla con un diseño de filtro granular pero que ayude a mejorar la eficiencia de retención del filtro.

Adicionalmente se recomienda un análisis comparativo en el proceso de diseño planteado por diferentes autores de manera que se determine las semejanzas y diferencias consideradas en los límites planteados por cada uno.

Finalmente, se sugiere validar los resultados obtenidos en laboratorio mediante experimentación en campo.



## 7. REFERENCIAS

- ASTM C 136. (2001). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM Standards International, 04.
- ASTM D 2487. (2000). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standards International, 04.
- ASTM D 421. (2002). Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. ASTM Standards International, 4(10), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D0421-85R07.2>
- ASTM D 422. (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM Standard Test Method, 04(Reapproved 2002), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E01.2>
- ASTM D 4221. (1999). Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer. ASTM Standard Test Method, 14, 99–101.
- ASTM D 4318. (2000). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM Standards International, 04(March 2010), 1–14. <https://doi.org/10.1520/D4318-10>.
- ASTM D 4491. (1999). Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. ASTM Standards International, 1–6.
- ASTM D 4531. (2002). Standard Test Methods for Bulk Density of Peat and Peat Products. ASTM Standards International, 04(Reapproved), 4–6. <https://doi.org/10.1520/D4531-86R08.2>
- ASTM D 4751. (1999). Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile. ASTM Standards International, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D4751-04.2>
- ASTM D 5084. (2000). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM Standard Test Method, (C), 1–23. <https://doi.org/10.1520/D5084-10.1.3.2>
- ASTM D 5101. (2010). Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio. ASTM Standards International, 01(Reapproved 2006), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D5101-01R06.2>
- ASTM D 6572. (2000). Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test. ASTM Standard Test Method, 11, 3–6.
- ASTM D 854. (2002). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM Standards International, 04.
- Ajah, O. O. (2016). Mathematical Modeling of Hydraulic Conductivity in Homogeneous Porous Media: Influence of Porosity and Implications in Subsurface Transport of Contaminants, (January), 89–102.
- Auvinet Guichard, G., Guillén Guillén, J. B., & López Acosta, N. P. (2014). Classical and current methods in the design of filters for dams of graded materials, (November).
- Aydilek, A. H. (2012). Filters and drains. *Handbook of Geosynthetic Engineering*, 67–87. <https://doi.org/10.1680/hge.41752.067>
- Cabalar, A. F., & Akbulut, N. (2016). Effects of the particle shape and size of sands on the hydraulic conductivity. *Acta Geotechnica Slovenica*, 13(2), 83–93.
- Childs, E. C., & George, N. C. (1950). The permeability of porous materials, 392–405.
- Christopher, B. R., & Fischer, G. R. (1991). *Geotextile filtration principles, practices and problems* (Vol. c).
- CODIGEM. (1980). Mapa Geológico Cuenca-Azogues Hoja 53-73. *Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero y Metalúrgico*.
- Cubrinovski, M., & Ishihara, K. (2002). Maximum and Minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and Foundations*, 42.

- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson Editores, 608.
- Das, B. M. (2002a). *Principles of Foundation Engineering*. McGraw-Hill handbooks. <https://doi.org/0-495-91356-1>
- Das, B. M. (2002b). *Soil Mechanics Laboratory Manual*, 215.
- Environmental Protection Agency. (1992). *Compatibility Test for Wastes and Membrane Liners*, (July), 1–16.
- Erazo, M. (1957). *Apuntes sobre la Geología y Estructura del Valle de Cuenca*. *Anales de La Universidad de Cuenca*.
- Fannin, J. (2008). Karl Terzaghi: From Theory to Practice in Geotechnical Filter Design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3), 267–276. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:3\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(267))
- FLACSO, MAE, & PNUMA. (2008). *GEO Ecuador 2008 Informe sobre el estado del medio ambiente*, 192. Retrieved from [http://www.pnuma.org/deat1/pdf/Ecuador pdf/06. Capitulo 4. Estado del suelo.pdf](http://www.pnuma.org/deat1/pdf/Ecuador%20pdf/06%20Capitulo%204.%20Estado%20del%20suelo.pdf)
- Flores Berrones, R., & Gaytán Colin, I. (2005). Avances recientes en el diseño de filtros para presas de tierra y enrocamiento., (4), 121–132. Retrieved from <http://hdl.handle.net/123456789/1333>
- Foster, M., & Fell, R. (2001). Assessing Embankment Dam Filters That Do Not Satisfy Design Criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(May), 1–15.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533–546. <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- Giroud, J. P. (2010). Development of criteria for geotextile and granular filters. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*.
- González De Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Hansen, D. (2004). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 990–993. <https://doi.org/10.1139/t04-028>
- Holtz, R., Christopher, B., & Berg, R. . (1998). *Geosynthetic Design and Construction Guideline*. Federal Highway Administration.
- Hussain, F., & Nabi, G. (2016). Empirical Formulae Evaluation for Hydraulic Conductivity Determination Based on Grain Size Analysis, 3(3), 26–32.
- ICOLD. (1994). *Embankment dams granular filters and drains - Review and recommendations Bulletin 95*. Paris: Comisión Internacional de Grandes Presas.,.
- Indraratna, B., & Locke, M. R. (1999). Design methods for granular filters - Critical Review, 137–147.
- Israr, J., & Indraratna, B. (2018). Mechanical Response and Pore Pressure Generation in Granular Filters subjected to Uniaxial Cyclic Loading. *Canadian Geotechnical Journal*, cgj-2017-0393. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0393>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1973). *Mecánica de suelos, Tomo II: Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos*.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1974). *Mecánica de suelos, Tomo III: Flujo de Agua en Suelos*. (Editorial Limusa, Ed.).
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. *Mecánica de Suelos*.
- Luetlich, S. M., Giroud, J. P., & Bachus, R. C. (1991). Geotextil Filter Design Guide. *Elsevier Applied Science*, 11(December), 19–34.
- Marshall, T. J. (1958). A relation between permeability and size distribution of pores, 9(1).
- Mayoral Villa, J. M., Romo Organista, M. P., Cardona Giraldo, L. C., Alberto Hernández,



- Y., Vázquez Monroy, R. E., Gómez Frausto, J. A., & Cuenca Alfaro, B. R. (2007). Pruebas de laboratorio para determinar propiedades de los suelos, 190.
- Medina Dávila, P. (2008). Guía de laboratorio de geotecnia.
- Nimmo, J. R., Survey, U. S. G., & Park, M. (2013). *Porosity and Pore Size Distribution. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Published by Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05265-9>
- Powers, J. P., & Corwin, A. B. (2007). *Construction Dewatering and Groundwater Control - New Methods and Applications* (3rd ed.). New Jersey.
- Puy Santín, A. J. (2005). Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad. *Universidad de Politénica de Cataluña Barcelona Tech*.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., & Talbot, J. R. (1984). Filters for Silts and Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), 701. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:6\(701\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:6(701))
- Streeter, V. L. (2000). *Mecánica de Fluidos*. Santafé de Bogotá: Mc Graw Hill.
- Tarback, E. J. (2005). *Ciencias de la Tierra*.
- Tonus, S. (1984). Geotextiles. Madrid: Revista de Obras Públicas.
- U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation. (2011). Protective Filters, 4(13).
- U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation. (2012). Embankment Dams. Geotextiles. *Design Standards No. 13: Embankment Dams*, 4(13).
- United States Soil Conservation Service. (1994). Gradation Design of Sand and Gravel. *NEH: Part 633 - Soil Engineering*, (October 1994), 47.
- Usace. (1986). Laboratory soils testing. *USACE Engineer Manual*, (November 1970), 407.
- USACE. (2004). Engineering and Design: General design and construction considerations for earth and rock-fill dams, (July), 130. Retrieved from <http://www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2300/entire.pdf>
- Vélez, P. (2012). *Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector de Challuabamba, Cuenca. Recomendaciones para la construcción de cimentaciones*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5022/1/Tesis.pdf>

**8. ANEXOS***Anexo 1: Análisis de precios unitarios - Rubro 1.***ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 1 de 11

RUBRO: Replanteo y nivelación

UNIDAD: ml

DETALLE:

CODIGO: 501001

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Equipo de nivelación	1	2.5	2.5	0.05	0.13
Herramientas varias	1	0.4	0.4	0.05	0.02
<b>SUBTOTAL M</b>					0.15
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	1	3.41	3.41	0.05	0.17
Topógrafo 2: título y experiencia mayor a 5 años (Estr. Oc. C1)	1	3.82	3.82	0.05	0.19
Cadenero	1	3.45	3.45	0.05	0.17
<b>SUBTOTAL N</b>					0.53
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Estacas de mader 4 x 5 cm	u	0.5	0.85	0.43	
Tiras de eucalipto 2 x 2 x 300 cm	u	0.1	0.49	0.05	
Clavos	kg	0.05	1.91	0.10	
Varios	Global	1	1.6	1.60	
<b>SUBTOTAL O</b>					2.17
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					2.85
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.57
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					3.42
VALOR OFERTADO					3.42

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 2: Análisis de precios unitarios - Rubro 2.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 2 de 11

**RUBRO:** Excavación retroexcavadora, zanja 0-2 m, material sin clasificar, cuchara 40 cm**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 504004

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Retroexcavadora	1	25	25	0.08	2.00
<b>SUBTOTAL M</b>					2.00
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	2	3.41	6.82	0.08	0.55
Operador de retroexcavadora	1	3.82	3.82	0.08	0.31
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.024	0.09
<b>SUBTOTAL N</b>					0.94
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.00
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					2.94
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.59
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					3.53
VALOR OFERTADO					3.53

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 3: Análisis de precios unitarios - Rubro 3.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 3 de 11

**RUBRO:** Cargado de material con cargadora, incluye pago en escombrera (medido en banco)**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 506013

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Cargadora	1	30	30	0.039	1.17
<b>SUBTOTAL M</b>					1.17
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	1	3.41	3.41	0.039	0.13
Operador de cargadora frontal (Payloader sobre ruedas u orugas)	1	3.82	3.82	0.039	0.15
<b>SUBTOTAL N</b>					0.28
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Pago por concepto de disposición de materiales en escombrera	m3	1.3	0.63	0.82	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.82
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					2.27
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.45
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					2.73
VALOR OFERTADO					2.73

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 4: Análisis de precios unitarios - Rubro 4.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 4 de 11

**RUBRO:** Transporte de materiales medido en banco**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 506015

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Volqueta 8 m3	1	25	25	0.0094	0.24
<b>SUBTOTAL M</b>					0.24
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Chofer volquetas (Estr. Oc. C1)	1	5	5	0.0094	0.05
<b>SUBTOTAL N</b>					0.05
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.00
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0.28
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.06
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					0.34
VALOR OFERTADO					0.34

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 5: Análisis de precios unitarios - Rubro 5.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 5 de 11

**RUBRO:** Excavación manual, zanja 0-2 m, material sin clasificar**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 504011

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Herramientas varias	2	0.4	0.8	1.5	1.20
<b>SUBTOTAL M</b>					1.20
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	2	3.41	6.82	1.5	10.23
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.3	1.09
<b>SUBTOTAL N</b>					11.32
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.00
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					12.52
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					2.50
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					15.03
VALOR OFERTADO					15.03

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 6: Análisis de precios unitarios - Rubro 6.

## ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Hoja: 6 de 11

RUBRO: Cargado de material manualmente (medido en banco)

UNIDAD: m3

DETALLE:

CODIGO: 506018

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Herramientas varias	5	0.4	2	0.234	0.47
<b>SUBTOTAL M</b>					0.47
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	5	3.41	17.05	0.234	3.99
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.117	0.43
<b>SUBTOTAL N</b>					4.42
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.00
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					4.88
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.98
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					5.86
VALOR OFERTADO					5.86

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.



## Anexo 7: Análisis de precios unitarios - Rubro 7.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 7 de 11

**RUBRO:** Material filtrante para drenes, suministro y colocación**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 505007

<b>EQUIPOS</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Herramientas varias	2	0.4	0.8	0.67	0.54
<b>SUBTOTAL M</b>					0.54
<b>MANO DE OBRA</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Jornal/HR</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Peón	2	3.41	6.82	0.67	4.57
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.134	0.49
<b>SUBTOTAL N</b>					5.06
<b>MATERIALES</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit.</b>	<b>Costo</b>	
Arena puesta en obra	m3	1.05	17.5	18.38	
<b>SUBTOTAL O</b>					18.38
<b>TRANSPORTE</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo</b>	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					23.97
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					4.79
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					28.76
VALOR OFERTADO					28.76

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.



## Anexo 8: Análisis de precios unitarios - Rubro 8.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 8 de 11

**RUBRO:** Geotextil NT 1600, suministro e instalación**UNIDAD:** m2**DETALLE:****CODIGO:** 533001

<b>EQUIPOS</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Herramientas varias	1	0.4	0.4	0.001	0.00
<b>SUBTOTAL M</b>					0.00
<b>MANO DE OBRA</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Jornal/HR</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Peón	2	3.41	6.82	0.01	0.07
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.002	0.01
<b>SUBTOTAL N</b>					0.08
<b>MATERIALES</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit.</b>	<b>Costo</b>	
Varios	Global	0.05	1.6	0.08	
Arena puesta en obra	m2	1.2	1.4	1.68	
<b>SUBTOTAL O</b>					1.76
<b>TRANSPORTE</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo</b>	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					1.84
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.37
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					2.20
VALOR OFERTADO					2.20

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 9: Análisis de precios unitarios - Rubro 9.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 9 de 11

**RUBRO:** Relleno compactado con material granular grueso**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 505013

<b>EQUIPOS</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Herramientas varias	1	0.4	0.4	0.5	0.20
Plancha vibratoria	1	4.5	4.5	0.5	2.25
<b>SUBTOTAL M</b>					2.45
<b>MANO DE OBRA</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Jornal/HR</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Peón	2	3.41	6.82	0.5	3.41
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.1	0.36
<b>SUBTOTAL N</b>					3.77
<b>MATERIALES</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit.</b>	<b>Costo</b>	
Agua	lt	4	0.01	0.04	
Material granular puesto en obra	m3	1.32	12	15.84	
<b>SUBTOTAL O</b>					15.88
<b>TRANSPORTE</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo</b>	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					22.10
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					4.42
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					26.52
VALOR OFERTADO					26.52

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**



## Anexo 10: Análisis de precios unitarios - Rubro 10.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 10 de 11

**RUBRO:** Relleno compactado con material de sitio**UNIDAD:** m3**DETALLE:****CODIGO:** 505017

<b>EQUIPOS</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Herramientas varias	1	0.4	0.4	0.5	0.20
Plancha vibratoria	1	4.5	4.5	0.5	2.25
<b>SUBTOTAL M</b>					2.45
<b>MANO DE OBRA</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Jornal/HR</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo</b>
Peón	2	3.41	6.82	0.5	3.41
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.1	0.36
<b>SUBTOTAL N</b>					3.77
<b>MATERIALES</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unit.</b>	<b>Costo</b>	
Agua	lt	2	0.01	0.02	
<b>SUBTOTAL O</b>					0.02
<b>TRANSPORTE</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Costo</b>	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					6.24
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					1.25
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					7.49
VALOR OFERTADO					7.49

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**

## Anexo 11: Análisis de precios unitarios - Rubro 11.

**ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

Hoja: 11 de 11

**RUBRO:** Tubería PVC perforada para dren, d= 110 mm

**UNIDAD:** ml

**DETALLE:**
**CODIGO:** 515012

<b>EQUIPOS</b>					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Herramientas varias	1	0.4	0.4	0.025	0.01
<b>SUBTOTAL M</b>					0.01
<b>MANO DE OBRA</b>					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	1	3.41	3.41	0.025	0.09
Plomero	1	3.45	3.45	0.025	0.09
Técnico obras civiles	1	3.64	3.64	0.005	0.02
<b>SUBTOTAL N</b>					0.19
<b>MATERIALES</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Tubería PVC d=110mm para dren	m	1	3.34	3.34	
Arena puesta en obra	m3	0.03	17	0.51	
<b>SUBTOTAL O</b>					3.85
<b>TRANSPORTE</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
				0.00	
<b>SUBTOTAL P</b>					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					4.05
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 20.00 %					0.81
OTROS INDIRECTOS: 0.00 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					4.86
VALOR OFERTADO					4.86

**ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.**

## Anexo 12: Suelo P1.



Anexo 13: Suelo P2.



Anexo 14: Suelo P3.



Anexo 15: Suelo P4.



Anexo 16: Suelo P5.



Anexo 17: Suelo P6.



Anexo 18: Extracción de muestras de suelo base – 1.



Anexo 19: Extracción de muestras suelo base – 2.



Anexo 20: Extracción de muestras suelo base – 3.



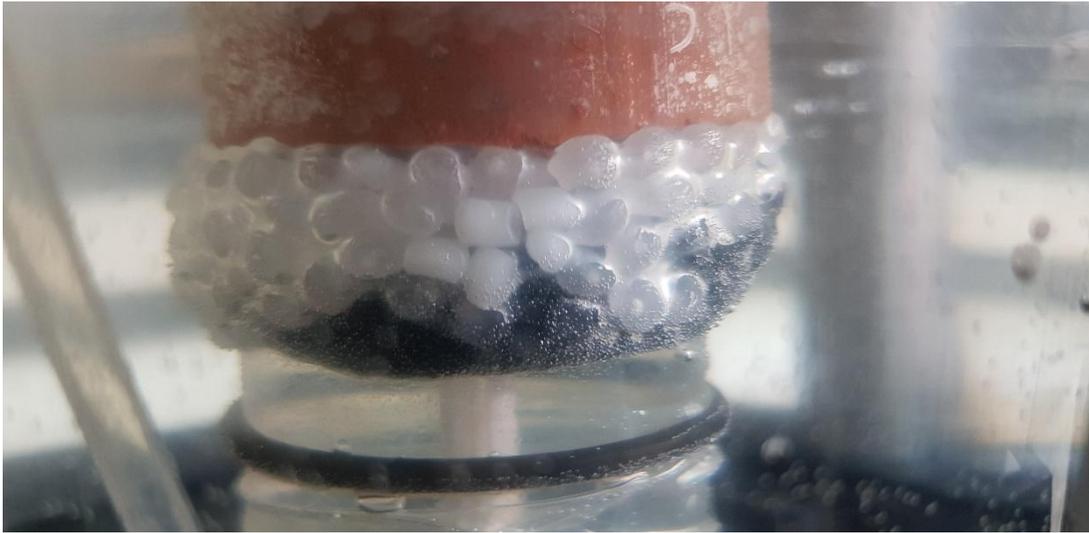
Anexo 21: Equipo triaxial con cámara de presión para ensayo de permeabilidad.



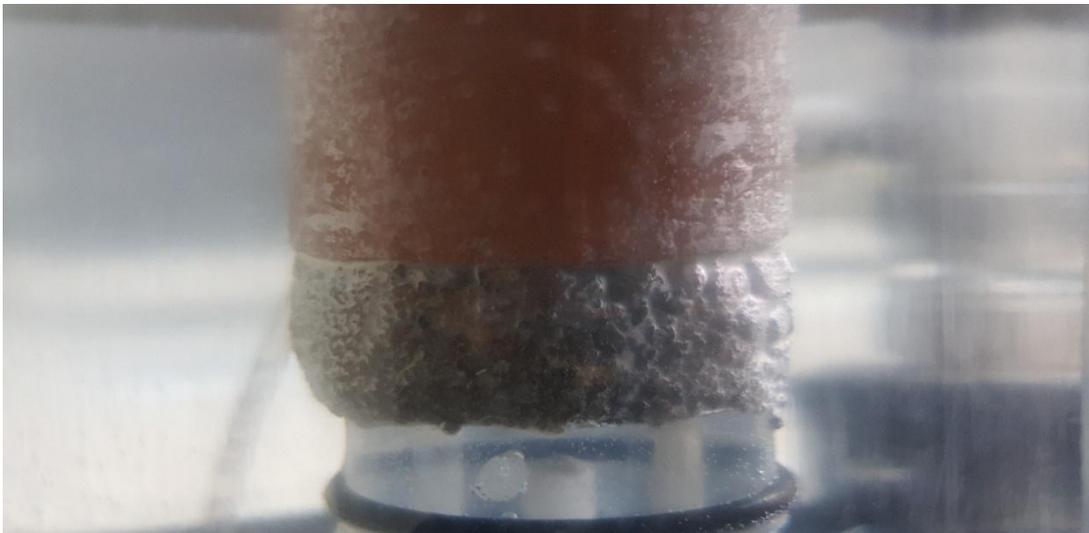
Anexo 22: Armado de muestra sin filtro.



*Anexo 23: Muestra con polipropileno para ensayar suelo base.*



*Anexo 24: Muestra con filtro granular.*



Anexo 25: Armado de muestra con filtro combinado.



Anexo 26: Muestra con filtro geotextil.



*Anexo 27: Geotextil en la base de la muestra.*



*Anexo 28: Polipropileno para suelo base*



*Anexo 29: Muestras de suelo para hidrómetro.*



Anexo 30: Ensayos de hidrómetro.



Anexo 31: Hidrómetro ASTM 151H.



Anexo 32: Lavado de material para tamizado.



Anexo 33: Ensayo de gravedad específica.

