

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

## EVALUACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE FINOS ALREDEDOR DE SUBDRENES

Director:

Ing. PhD. Juan Fernando Zalamea  
León

Proyecto de graduación previo a  
la obtención de grado de  
Ingeniero Civil

Tutor:

Ing. MSc. Luis Antonio Matute  
Díaz

Autor:

Bernardo Esteban Sarmiento  
Cobos

Cuenca – Ecuador  
2015



## RESUMEN

El presente estudio evalúa la migración de finos del suelo alrededor de subdrenes que han cumplido su vida útil en la vía Cuenca – Azogues ubicada en la zona andina sur del Ecuador. La investigación comprueba que existe migración de finos en la zona alrededor de los subdrenes, permitiendo la evaluación de la variación en las características hidráulicas del suelo, las distintas soluciones de subdren y su influencia en la migración de finos. Dos clases de subdrenes se presentaron en los tramos de vía seleccionados, uno con material filtrante y otro sin material filtrante, lo que permitió un análisis comparativo entre estos dos tipos de subdren con respecto a la migración de finos. Ensayos de clasificación de suelos, límites de Atterberg e hidrómetro fueron realizados en laboratorio para el análisis de las muestras de suelo natural, suelo junto al subdren y material drenante, recolectadas en los tramos seleccionados para el estudio. Un análisis del gradiente hidráulico fue realizado mediante la modelación de la red de flujo en cada tramo de vía seleccionado. La migración de finos corresponde en su totalidad a limos, presentándose una mayor migración en el subdren que no posee material filtrante. La permeabilidad en el suelo junto al subdren sufre una mínima variación por la migración de limos que se produce, sin embargo, el uso de material filtrante impide la colmatación del subdren.

**Palabras Claves:** Subdren, Migración de finos, Gradiente Hidráulico, material filtrante, Geotextil, Red de flujos.



## ABSTRACT

This research studies migration of soil fines particles around underground drainage systems that have completed their design period in Cuenca - Azogues highway on the southern andean zone of Ecuador. Fines migration is verified on the zone around underground drains, it allows to assess the variation on the soil hydraulic properties, different underground drainage solutions and its influence on fines migration. Two types of underground drain were find on the selected highway sections, one with filter material and another without filter material. These types of underground drains allowed a comparative analysis about fines migration related to filter presence. Laboratory tests of soil classification, Atterberg limits and hydrometer particle size were performed on samples of natural soil, soil next to underground drain and drainage material recollected on the selected highway sections. Flow network modeling for each of the selected highway sections allowed a theoretical analysis of the hydraulic gradient and its influence on fines migration. Fines migration on underground drains corresponds to silts, a higher fines migration is generated at underground drains without filter material. Permeability of the soil next to underground drain is varely affected by silts migration, however, the use of filter material on underground drains prevent their clogging.

**Keywords:** Subdrain, Fines migration, Hydarulic gradient, Filter material, Geotextile, Flow network.



## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	0
ABSTRACT	2
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. ANTECEDENTES	14
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. METODOLOGÍA	17
1.4.1. Análisis teórico	17
1.4.2. Recolección de muestras	18
1.4.3. Ensayos de laboratorio	19
1.4.4. Modelación numérica	19
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	20
2.1. TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DEL SUELO	20
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	21
2.2.1. Análisis mecánico	22
2.2.2. Distribución granulométrica	24
2.2.3. Límites de Atterberg	25
2.2.4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	28
2.2.5. Carta de plasticidad	34
2.3. FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE LOS SUELOS	35
2.3.1. Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo del agua a través de los suelos	35
2.3.2. Ley de Darcy	36
2.3.3. Permeabilidad de los suelos	37
2.3.4. Flujo de agua subterráneo bidimensional	38



2.3.5. Teoría de la sección transformada	41
2.4. SUBDRENAJE	42
2.4.1. Subdrenes interceptores longitudinales	43
2.5. MATERIAL FILTRANTE Y DRENANTE EN SUBDRENES	43
2.5.1. Criterios de diseño de materiales filtrantes	44
2.6. GEOTEXTILES EN SUBDRENES	46
2.6.1. Funciones de los geotextiles	46
2.6.2. Tipos de geotextiles	47
2.6.3. Criterios de diseño para geotextiles	48
2.7. MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO	51
2.7.1. Geometría y discretización	51
2.7.2. Nodos del elemento	52
2.7.3. Distribución de la variable en el elemento	52
2.7.4. Compatibilidad de elementos y de la malla	53
2.7.5. Integración numérica	53
2.7.6. Variables secundarias	53
2.7.7. Condiciones de frontera	54
2.7.8. Tipos de análisis	55
2.7.9. Visualización de los resultados	55
2.7.10. Ecuaciones aplicadas en el cálculo mediante elementos finitos	56
3. DESCRIPCIÓN DE TRABAJO DE CAMPO, LABORATORIO Y MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO	60
3.1. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE SITIOS DE INVESTIGACIÓN	60
3.1.1. Ubicación de los sitios de investigación	60
3.1.2. Descripción de los sitios de investigación	62
3.2. TRABAJOS DE CAMPO Y MUESTRAS OBTENIDAS	63
3.2.1. Proceso de recolección	64
3.2.2. Muestras obtenidas	64
3.3. TRABAJOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS	65
3.3.1. Resultados obtenidos en el Tramo 1	66
3.3.2. Resultados obtenidos en el Tramo 2	71
3.3.3. Resultados obtenidos para la muestra de geotextil obtenida en el Tramo 2	74
3.4. DESCRIPCIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO Y RESULTADOS	75
3.4.1. Modelación de la red de flujo en el tramo 1 y resultados	76
3.4.2. Modelación de la red de flujo en el tramo 2 y resultados	80
4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	83



4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL TRAMO 1	83
4.1.1.	Análisis de las curvas granulométricas en el tramo 1	83
4.1.2.	Discusión del material filtrante óptimo para subdrenaje en el Tramo 1	87
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL TRAMO 2	89
4.2.1.	Análisis de las curvas granulométricas en el tramo 2	89
4.2.2.	Discusión del material filtrante óptimo para subdrenaje y análisis del geotextil en el Tramo 1	91
4.2.3.	Relación de contenido de finos entre subdrenes	94
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
5.1.	CONCLUSIONES	95
5.2.	RECOMENDACIONES	96
	REFERENCIAS	97
	ANEXOS	98
A.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	98
A.1	Resultados de los ensayos de clasificación de suelos en las muestras del Tramo 1	98
A.2	Resultados de los ensayos de clasificación de suelos en las muestras del Tramo 2	110
A.3	Resultados del ensayo del Hidrómetro en las muestras del Tramo 1	118
A.4	Resultados del ensayo del Hidrómetro en las muestras del Tramo 2	130



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación de recolección de muestras. ....	18
Figura 2-1 Límites de Atterberg (Das, 2001). ....	25
Figura 2-2. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos tipo grava y arenosos (Das, 2001). ....	31
Figura 2-3. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos inorgánicos y arcillosos (Das, 2001). ....	32
Figura 2-4. Diagrama de flujo para nombres de suelos limosos orgánicos y arcillosos (Das, 2001). ....	33
Figura 2-5. Carta de Plasticidad (Das, 2001). ....	34
Figura 2-6. Valores del coeficiente de permeabilidad en cm/seg (Angelone, et al., 2006). ....	38
Figura 2-7. Flujo de agua a través de un bloque elemental (Das, 2001)....	39
Figura 2-8. Línea equipotencial y línea de flujo (Das, 2001). ....	40
Figura 2-9. Tasa de flujo a través del canal de flujo (Das, 2001).....	40
Figura 2-10. Visualización de la información en un nodo. ....	56
Figura 3-1. Ubicación del primer tramo seleccionado para recolección de muestras.....	61
Figura 3-2. Ubicación del segundo tramo seleccionado para recolección de muestras.....	61
Figura 3-3. Subdren longitudinal construido en el tramo 1.....	62
Figura 3-4. Estado actual del subdren presente en el tramo 1.....	62
Figura 3-5. Subdren longitudinal construido en el tramo 2.....	63
Figura 3-6. Estado actual del subdren presente en el tramo 2.....	63
Figura 3-7. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 01 del tramo 1.....	66
Figura 3-8. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 02 del tramo 1.....	67
Figura 3-9. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 03 del tramo 1.....	68
Figura 3-10. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 04 del tramo 1.....	69
Figura 3-11. Carta de plasticidad de las muestras recogidas en el tramo 1. ....	70
Figura 3-12. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 05 del tramo 2.....	71
Figura 3-13. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 06 del tramo 2.....	72
Figura 3-14. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 07 del tramo 2.....	73
Figura 3-15. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 08 del tramo 2.....	73
Figura 3-16. Carta de plasticidad de las muestras recogidas en el tramo 2. ....	74
Figura 3-17. Esquema de análisis de sensibilidad. ....	76
Figura 3-18. Sección transversal representativa del tramo 1 para modelación. ....	77



Figura 3-19. Regiones establecidas en la sección del tramo 1 para modelación.....	77
Figura 3-20. Red de flujo para el tramo 1. ....	78
Figura 3-21. Gradiente hidráulico para una carga H de 15.8 m en el tramo 1.....	78
Figura 3-22. Gradiente hidráulico para una carga H de 14.8 m en el tramo 1.....	79
Figura 3-23. Gradiente hidráulico para una carga H de 13.8 m en el tramo 1.....	79
Figura 3-24. Sección transversal representativa del tramo 2 para modelación. ....	80
Figura 3-25. Sección transversal representativa del tramo 2 para modelación. ....	80
Figura 3-26. Red de flujo para el tramo 2. ....	81
Figura 3-27. Gradiente hidráulico para una carga H de 8.33 m en el tramo 2.....	81
Figura 3-28. Gradiente hidráulico para una carga H de 7.63 m en el tramo 2.....	82
Figura 3-29. Gradiente hidráulico para una carga H de 6.93 m en el tramo 2.....	82
Figura 4-1. Partículas contenidas en las muestras del punto 01 según su tamaño. ....	84
Figura 4-2. Partículas contenidas en las muestras del punto 02 según su tamaño. ....	85
Figura 4-3. Partículas contenidas en las muestras del punto 04 según su tamaño. ....	86
Figura 4-4. Criterios de filtro para el punto 01 del tramo 1.....	87
Figura 4-5. Criterios de filtro para el punto 02 del tramo 1.....	88
Figura 4-6. Criterios de filtro para el punto 04 del tramo 1.....	88
Figura 4-7. Partículas contenidas en las muestras del punto 05 según su tamaño. ....	89
Figura 4-8. Partículas contenidas en las muestras del punto 06 según su tamaño. ....	90
Figura 4-9. Criterios de filtro para el punto 05 del tramo 2.....	92
Figura 4-10. Criterios de filtro para el punto 06 del tramo 2.....	93
Figura A-1. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 01 del Tramo 1. ....	98
Figura A-2. Resultados del suelo natural en el punto 01 del Tramo 1. ....	99
Figura A-3. Resultados del material drenante en el punto 01 del Tramo 1.....	100
Figura A-4. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 02 del Tramo 1. ....	101
Figura A-5. Resultados del suelo natural en el punto 02 del Tramo 1. ....	102
Figura A-6. Resultados del material drenante en el punto 02 del Tramo 1.....	103
Figura A-7. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 03 del Tramo 1. ....	104
Figura A-8. Resultados del suelo natural en el punto 03 del Tramo 1. ....	105
Figura A-9. Resultados del material drenante en el punto 03 del Tramo 1.....	106
Figura A-10. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 04 del Tramo 1. ....	107
Figura A-11. Resultados del suelo natural en el punto 04 del Tramo 1. ....	108
Figura A-12. Resultados del material drenante en el punto 03 del Tramo 1.....	109
Figura A-13. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 05 del Tramo 2. ....	110
Figura A-14. Resultados del suelo natural en el punto 05 del Tramo 2. ....	111
Figura A-15. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 06 del Tramo 2. ....	112
Figura A-16. Resultados del suelo natural en el punto 06 del Tramo 2. ....	113
Figura A-17. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 07 del Tramo 2. ....	114
Figura A-18. Resultados del suelo natural en el punto 07 del Tramo 2. ....	115
Figura A-19. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 08 del Tramo 2. ....	116
Figura A-20. Resultados del suelo natural en el punto 08 del Tramo 2. ....	117
Figura A-21. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 01 del tramo 1.....	118
Figura A-22. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 01 del tramo 1.....	119
Figura A-23. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 01 del tramo 1.....	120



Figura A-24. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 02 del tramo 1 .....	121
Figura A-25. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 02 del tramo 1.....	122
Figura A-26. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 02 del tramo 1.....	123
Figura A-27. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 03 del tramo 1.....	124
Figura A-28. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 03 del tramo 1.....	125
Figura A-29. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 03 del tramo 1.....	126
Figura A-30. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 04 del tramo 1.....	127
Figura A-31. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 04 del tramo 1.....	128
Figura A-32. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 04 del tramo 1.....	129
Figura A-33. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 05 del tramo 2.....	130
Figura A-34. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 05 del tramo 2.....	131
Figura A-35. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 06 del tramo 2.....	132
Figura A-36. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 06 del tramo 2.....	133
Figura A-37. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 07 del tramo 2.....	134
Figura A-38. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 07 del tramo 2.....	135
Figura A-39. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 08 del tramo 2.....	136
Figura A-40. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 08 del tramo 2.....	137



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Límites de tamaño de suelos separados (Das, 2001) .....	21
Tabla 2-2. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava (Das, 2001) .....	29
Tabla 2-3. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos arenosos (Das, 2001) .....	29
Tabla 2-4. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos (Das, 2001) .....	30
Tabla 2-5. Criterio de filtro (Messerklinger, 2013).....	45
Tabla 2-6. Granulometría de filtro tipo I según ASTM D 1241 – 68 (Monroy Melgar, 2010). ....	45
Tabla 2-7. Granulometría de filtro tipo II según ASTM D 1241 – 68 (Monroy Melgar, 2010). ...	46
Tabla 3-1. Puntos de recolección del tramo 1.....	64
Tabla 3-2. Puntos de recolección del tramo 2.....	65
Tabla 3-3. Propiedades del geotextil no tejido 2000 (PAVCO, 2009).....	75
Tabla 3-4. Resultados de los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de $H/HT$ en el tramo 1.....	79
Tabla 3-5. Resultados de los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de $H/HT$ en el tramo 2.....	82
Tabla 4-1. Criterios de filtro en los diferentes puntos del Tramo 1 .....	87
Tabla 4-2. Criterios de filtro en los diferentes puntos del Tramo 2 .....	92
Tabla 4-3. Criterio de retención (Tamaño de Abertura Aparente) para geotextiles.....	93
Tabla 4-4. Análisis de contenido de limos entre los suelos de cada punto válido en los tramos 1 y 2 .....	94



## LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	Velocidad
$V$	Volumen
$\gamma_x$	Peso específico del material x
$\eta$	Viscosidad del fluido
$D$	Diámetro
$C_u$	Coeficiente de uniformidad
$C_c$	Coeficiente de contracción
$D_x$	Diámetro de partícula para el x% de pasantes en la curva granulométrica
$LL$	Límite líquido
$LP$	Límite plástico
$SL$	Límite de contracción
$PI$	Índice de plasticidad
$LI$	Índice de liquidez
$w$	Contenido de agua en el suelo
$k$	Coeficiente de permeabilidad
$h$	Carga total o energía total
$s$	Camino del flujo aparente
$i$	Gradiente hidráulico
$q$	Caudal de la red de flujo
$S$	Grado de saturación del suelo
$e$	Relación de vacíos del suelo
$N_f$	Número de canales de flujo
$N_e$	Número de caídas equipotenciales
$D_x^{F/S}$	Diámetro de partícula para el x% de pasantes en la curva granulométrica del suelo (S) o el filtro (F)
$TAA$	Tamaño de abertura aparente
$B$	Coeficiente que depende del tipo de suelo a filtrar en contacto con el geotextil y de las condiciones de flujo
$t$	Tiempo
$m_w$	Pendiente de la curva de almacenamiento
$\tau$	Espesor del elemento
$\lambda$	Término de almacenamiento para filtración transitoria
$\alpha$	Ángulo de dirección
$[k]$	Matriz de geometría y propiedades del material
$\{H\}$	Vector de cabezas hidráulicas
$\langle N \rangle$	Vector de la función de interpolación
$\{Q\}$	Vector de cantidades de flujo
$[B]$	Matriz de gradiente
$[C]$	Matriz de permeabilidad
$[M]$	Matriz de masa



Yo, Bernardo Esteban Sarmiento Cobos, autor de la tesis "Evaluación de la migración de finos alrededor de subdrenes", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará aficción alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 12 de Noviembre del 2015

Bernardo Esteban Sarmiento Cobos

C.I: 0104902325



Yo, Bernardo Esteban Sarmiento Cobos, autor de la tesis "Evaluación de la migración de finos alrededor de subdrenes", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de Noviembre del 2015

Bernardo Esteban Sarmiento Cobos

C.I: 0104902325



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme guiado siempre por el camino adecuado y por darme la fortaleza para seguir siempre adelante. De manera especial agradezco al Ing. PhD. Fernando Zalamea por su gran apoyo en esta investigación y al Ing. MSc. Luis Matute Díaz por su confianza, paciencia y gran apoyo en el proceso de esta investigación. Al laboratorio de suelos y materiales Geolab y su equipo de trabajo por su colaboración y gran aporte. A mi familia que ha sido siempre un apoyo incondicional durante mi vida. A mis hermanos Fernando, Tomás, mis madres Bertha, Rosa y mi abuelita Bertha, a quienes agradezco y dedico todo mi trabajo y mi esfuerzo realizado hasta ahora para lograr esta meta tan importante en mi vida.

Bernardo Esteban Sarmiento Cobos.

Cuenca, 12 de Noviembre del 2015.



---

## CAPÍTULO 1

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo de agua y su influencia en el comportamiento general del suelo es una necesidad indispensable dentro de la mecánica de suelos y en sus aplicaciones dentro de la Ingeniería Civil. La presencia de agua en la cimentación o taludes de una obra civil altera las condiciones del suelo sobre la cual se sustenta o alrededor del cual se ubica la obra, este fenómeno puede perjudicar una obra por lo cual es necesario establecer diferentes técnicas de drenaje para recoger, canalizar y eliminar el agua. Un adecuado control del agua superficial y subterránea garantiza la vida útil, el funcionamiento y los costos de conservación de una obra. Es por esto que el drenaje se encuentra entre los temas fundamentales para la planificación y ejecución de una determinada obra.

Los problemas de drenaje superficial y subterráneo son de mayor importancia en la construcción de carreteras y aeropistas. Desde siempre se ha considerado con mayor importancia al control de aguas superficiales que las subterráneas, lo que ha tenido malas consecuencias (Rico & Juárez, 1972). En la actualidad se establece una solución muy común para el manejo del agua subterránea en carreteras, la cual consiste en la implantación de subdrenes para abatir el nivel freático o para evitar la saturación de los materiales que componen la estructura vial y la subrasante sobre la cual se apoya la estructura vial.

La necesidad de implantación de subdrenes en un proyecto vial está sujeto al comportamiento de múltiples variables aleatorias, por lo tanto, este requerimiento de subdrenaje en el proyecto vial generalmente se estima y obtiene a partir de observaciones directas y muestreo del terreno. En el análisis e incorporación de subdrenes en la práctica profesional dentro del medio se emiten criterios con respecto a la migración de finos dentro del material drenante y alrededor del subdren. De esta manera, el presente estudio evalúa la migración de finos alrededor de subdrenes en vías previamente seleccionadas de la zona andina sur del Ecuador.

#### 1.1. ANTECEDENTES

El drenaje superficial o subterráneo es un factor clave en la construcción de carreteras. El agua que proviene de la lluvia y fluye superficialmente provoca erosión en cortes y terraplenes, y acumulación de material en las partes bajas



de pendientes. El agua que no se elimina mediante las estructuras de drenaje superficial se almacena en los bajos topográficos donde se infiltra a través del suelo, produciendo en él saturación que modifica su resistencia al esfuerzo cortante y propicia asentamientos, además se generan fuerzas de filtración que amenazan la estabilidad de taludes y generan el peligro de tubificación. El agua infiltrada tiende a brotar en los cortes practicados para alojar las carreteras o en las coronas de las mismas, amenazando la estabilidad de las carreteras y el buen comportamiento de los pavimentos que cubren las coronas (Rico & Juárez, 1972).

La implantación de subdrenes se encuentra dentro de las principales técnicas modernas para controlar el agua subterránea y reducir sus efectos perjudiciales en carreteras. El subdrenaje tiene por objeto disminuir las presiones de poro o impedir que estas aumenten por medio del cambio de dirección de las fuerzas de filtración producido por la reorientación del flujo del agua en el suelo a través de los subdrenes (Suarez, 1998).

De manera general, los subdrenes son zanjas excavadas que permiten la captación y transporte de agua subterránea y filtración de las partículas de suelo que pueden perjudicar la funcionalidad y eficiencia de los mismos. Los subdrenes se presentan de diversas formas, siendo así (Suarez, 1998):

- Con material drenante y de filtro con tubo colector
- Con material drenante y de filtro sin tubo colector (filtro francés)
- Con geotextil como filtro, material drenante y tubo colector
- Con geotextil, material drenante y sin tubo colector
- Tubo colector con capa gruesa de geotextil a su alrededor
- Subdren sintético con geomalla, geotextil y tubo colector

El tipo de subdren que se utiliza depende de la disponibilidad de los materiales en la región, costos de obra y la necesidad de captación y caudal del subdren.

El subdren longitudinal es la solución más utilizada para el control de agua subterránea en las carreteras. Este subdren sigue la orilla de la carretera y generalmente se construye de tal manera que se conecte directamente con la capa de base y subbase que conforman la estructura del pavimento. Para fines de planeación de un subdrenaje, las pruebas de laboratorio por realizar suelen circunscribirse a pruebas de clasificación y raramente de permeabilidad. Las pruebas de campo para detectar el flujo interno son frecuentemente muy útiles,



pero muchas veces es preciso proceder sin contar con sus valiosos datos, por razones de costo y tiempo (Rico & Juárez, 1972).

El diseño de un sistema adecuado de subdrenaje se basa en ciertas condiciones para los materiales que conforman los subdrenes y que garantizan un buen comportamiento del subdren. Los subdrenes longitudinales de zanja están provistos de un tubo perforado en el fondo de la zanja del subdren, el cual está dispuesto con orificios estratégicamente ubicados de tal manera que evitan la fuga del material fino del material drenante y el escape de agua ya captada por el tubo perforado. El material drenante, que a su vez cumple la función de filtro, se diseña en base a condiciones granulométricas entre el suelo y el material drenante que facilitan el flujo de agua hacia el tubo perforado, evitan la migración de partículas finas hacia los poros del material filtrante y evitan la obstrucción de las perforaciones de la tubería y la fuga de los finos del material filtrante a su través. El geotextil (en caso de colocarse en el subdrenaje) cumple a su vez las funciones de un material filtrante y drenante para el subdren. El diseño del geotextil se basa en ciertas condiciones que garantizan las funciones de separación, refuerzo, drenaje y filtro en el subdren (Rico & Juárez, 1972).

Debido a que el diseño de un adecuado sistema de subdrenaje en carreteras está apoyado en su mayoría por la práctica y experiencia, se forman diversos criterios sobre los subdrenes, este es el caso de la migración de finos alrededor de los subdrenes que interfiere en la funcionalidad de los mismos.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el análisis e incorporación de subdrenes en la práctica profesional dentro del medio se emiten criterios con respecto a la migración de finos dentro del material drenante y alrededor del subdren. Algunos de estos criterios aseveran que con el tiempo existe una zona alrededor del subdren con mayor contenido de finos en la cual el flujo del agua se dificulta por un descenso en la permeabilidad del suelo alrededor del subdren. Debido a este problema se argumenta incluso que la vida útil de los subdrenes es muy baja y existe desacuerdo sobre su efectividad y vida útil para diseños en los cuales el drenaje subterráneo es un factor importante.

En el presente estudio se comprueba si existe migración de finos alrededor de los subdrenes, para determinados tramos de vías en la zona andina sur del Ecuador. Se analizan muestras de suelo alrededor del subdren y el material drenante que conforma el subdren, de igual manera se analiza el geotextil utilizado y su posible influencia en la migración de finos de acuerdo a sus



especificaciones. Para el estudio es necesario evaluar las condiciones de granulometría de las muestras de suelo recolectadas, de esta manera se pueden establecer criterios sobre distintas soluciones de subdren y recomendaciones prácticas para el diseño de subdrenaje.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. *Objetivo general*

- Comprobar la migración de finos en los filtros alrededor de subdrenes colocados en proyectos viales.

#### 1.3.2. *Objetivos específicos*

- I. Evaluar la variación de características hidráulicas del suelo alrededor de los subdrenes.
- II. Evaluar distintas soluciones de subdren y su influencia en la migración de finos.

### 1.4. METODOLOGÍA

#### 1.4.1. *Análisis teórico*

Para el desarrollo del estudio planteado, se analizan temas importantes como la granulometría y clasificación de los suelos, plasticidad, flujo de agua a través de los suelos, diseño de filtros y geotextiles. El suelo, dependiendo de su contenido de agua y partículas finas, adopta una consistencia característica que permite clasificar a los suelos en forma puramente descriptiva (Rico & Juárez, 1969). El agua subterránea se mueve a través de los poros del suelo, provocando una interacción entre al agua en movimiento y la estructura del suelos (Matute, 2008). El flujo del agua se analiza por medio de la ecuación de Darcy. Para el diseño de los filtros se consideran el coeficiente de permeabilidad del filtro, criterios revisados con respecto a la relación de diámetros de las partículas de la base y el filtro y análisis granulométrico entre la base y el filtro (Sherard, et al., 1984). En cuanto a los geotextiles, se consideran las funciones de filtración, drenaje, separación y reforzamiento alrededor de los subdrenes con respecto al agua infiltrada y el material en suspensión (Rawal, et al., 2010).

#### 1.4.2. Recolección de muestras

La recolección de muestras se realiza en distintos tramos de vías en los que se presenten subdrenes construidos en los últimos ocho años para evaluar su desempeño. En cada tramo se determinan puntos de recolección separados cada uno una distancia entre 10 y 20 metros. En cada punto de recolección se recolectan tres muestras, que corresponden al suelo junto al subdren, al suelo en estado natural y al material drenante del subdren, como se muestra en la figura 1-1.

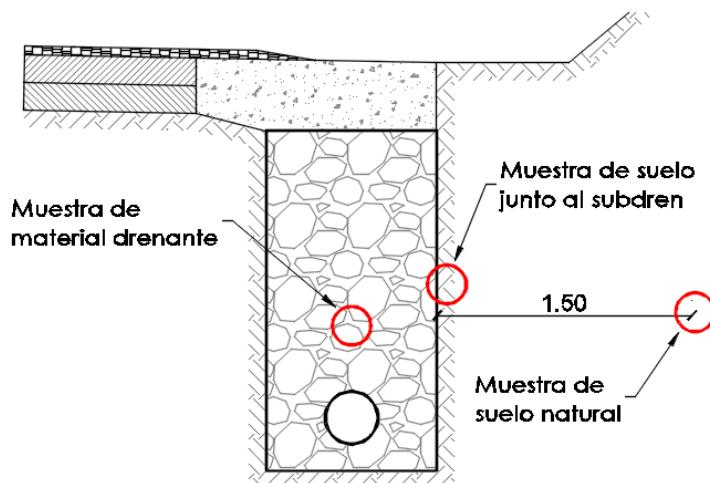


Figura 1-1. Ubicación de recolección de muestras.

Las muestras de suelo se recolectan a una profundidad de uno a dos metros, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre ubicado el subdren. La muestra junto al subdren se recolecta lo más próximo posible al geotextil (en caso de poseerlo) o al material drenante del subdren. La muestra correspondiente al suelo natural se recolecta a una distancia de aproximadamente 1.5 metros desde el subdren hacia el talud puesto que como se demostrará más adelante mediante un análisis teórico de flujo se determinó que una muestra a esta distancia del subdren no experimenta gradientes hidráulicos tales que se produzca migración de finos. La muestra correspondiente al material drenante se debe recolectar en el interior del subdren evitando ser alterada por el material del suelo a su alrededor al momento de la excavación para la recolección.

La muestra recolectada del material drenante permitirá analizar la cantidad de finos que se presenta en el mismo. La muestra de suelo junto al subdren



permitirá analizar la cantidad de finos presentes, en comparación con la muestra de suelo natural.

En cada tramo de vía se recolecta una muestra del geotextil utilizado con el cual se estudia la influencia sobre la funcionalidad del subdren de acuerdo a sus especificaciones técnicas y la granulometría del material drenante y del suelo a su alrededor.

#### *1.4.3. Ensayos de laboratorio*

Los principales ensayos de laboratorio para el análisis de las muestras recolectadas son:

- a) *ASTM D – 2487: Práctica estándar para la clasificación de suelos para propósitos ingenieriles (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos):*

Esta práctica estándar permite la clasificación de los suelos de cualquier localización geográfica en categorías representando los resultados de ensayos de laboratorio prescritos para determinar las características según el tamaño de partículas y los límites de Atterberg.

- b) *ASTM D – 422: Método estándar para el análisis de suelo según el tamaño de partículas:*

Este método permite la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de partículas en los suelos. La distribución de los tamaños de partículas superiores a 0.075 mm es determinado por tamizado, mientras que la distribución de las partículas inferiores a 0.075 mm es determinado por un proceso de sedimentación, utilizando un hidrómetro para asegurar los datos necesarios.

#### *1.4.4. Modelación numérica*

A través del software para modelización geotécnica de filtración de agua SEEP/W, corrida por la herramienta integrada GeoStudio 2007, se analiza la red de flujo que se produce en los dos tramos de vías investigados. Bajo las condiciones topográficas de cada tramo y condiciones de frontera establecidas se evalúa el gradiente hidráulico y la sensibilidad que tiene el modelo para que se produzcan gradientes hidráulicos críticos que permiten el arrastre de



partículas en el suelo. De esta manera se establece un modelo consistente que ajuste las principales observaciones de la investigación.

---

## CAPÍTULO 2

---

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DEL SUELO

Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas. Para describir los suelos por el tamaño de sus partículas, varias organizaciones desarrollaron límites de tamaño de suelo separado. La tabla 2.1 muestra los límites de tamaño de suelo separado desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, y la Oficina de Restauración de Estados Unidos. En la actualidad, el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) (Das, 2001).



Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Tabla 2-1. Límites de tamaño de suelos separados (Das, 2001).

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Para la clasificación de los suelos, se utilizan las propiedades índice de los suelos. Una propiedad índice de los suelos es adecuada para su clasificación si cumple con las siguientes características (Matute, 2008):

- Es una propiedad que se puede expresar de una manera sencilla
- Se puede medir rápidamente
- Se puede medir de una manera sencilla
- Su medición es reproducible
- Es una propiedad significativa. Es decir, la medición de la propiedad se puede correlacionar con una propiedad ingenieril significativa de los suelos.

Por lo tanto, para la clasificación de los suelos se han escogido dos parámetros:

a) *Análisis mecánico:*

Comprenden todos los métodos para la separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños. Los principales métodos son: el cribado por mallas y el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro (densímetro) (Rico & Juárez, 1969).



b) *Límites de Atterberg:*

Corresponde a la determinación de las humedades a las cuales un suelo pasa de un estado a otro, siendo los distintos estados: sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido.

#### 2.2.1. Análisis mecánico

Los principales métodos para el análisis mecánico del suelo utilizados en el presente estudio son:

a) *Cribado por mallas:*

Este método se utiliza para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a 0.075 mm (malla No. 200). La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes, hasta la malla No. 200; los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así puede obtenerse un punto de la curva acumulativa correspondiendo a cada abertura (Rico & Juárez, 1969).

b) *Método del Hidrómetro*

El método del hidrómetro se utiliza para analizar las partículas de menor tamaño en un suelo, aquellas que pasan el tamiz No. 200. La ley fundamental en la que está basado el método del hidrómetro es la ley de Stokes, la cual proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas de suelo en un líquido y su tamaño. La ley de Stokes es aplicable a una esfera que caiga en un fluido homogéneo de extensión infinita. Debido a que las partículas de suelo se apartan muchísimo de la forma esférica, aplicando la ley de Stokes se obtiene un diámetro equivalente para la partícula del suelo, que es el diámetro de una esfera del mismo peso específico relativo que el suelo y por lo tanto se sedimenta con la misma velocidad que la partícula real. En partículas equidimensionales, este diámetro es aproximadamente igual al medio del diámetro real, pero en



partículas laminares el diámetro real puede ser hasta el cuádruple del equivalente (Rico & Juárez, 1969).

La ley de Stokes está dada por la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{2\gamma_d - \gamma_f}{9\eta} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (2-1)$$

Donde:

$\nu$  : Velocidad de sedimentación de la esfera

$\gamma_d$  : Peso específico de la esfera

$\gamma_f$  : Peso específico del fluido, varía con la temperatura

$\eta$  : Viscosidad del fluido, varía con la temperatura

$D$  : Diámetro de la esfera

De esta manera, se obtiene el diámetro de la esfera  $D$  en milímetros mediante la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{1800 \eta \nu}{\gamma_s - \gamma_f}} \quad (2-2)$$

El método del hidrómetro se encuentra afectado por las siguientes hipótesis:

- La ley de Stokes es aplicable a una suspensión de suelo. Esta ley es válida solamente a partículas menores a 0.2 mm pero mayores a 0.2 micras. En tamaños mayores, las turbulencias provocadas por el movimiento de las partículas alteran apreciablemente la ley de sedimentación. Partículas de tamaños menores tienden a no sedimentarse y por lo tanto el principio es inaplicable.
- Al principio de la prueba, la suspensión es uniforme y de concentración suficientemente baja para que todas las partículas no interfieran entre si durante la sedimentación. Todas las partículas de un mismo diámetro  $D$  en la distribución se sedimentan a la misma velocidad calculada con la formula (2 – 1). Al pasar un tiempo  $t$ , todas las partículas del mismo diámetro habrán recorrido la distancia  $H = \nu t$ . Arriba de esta altura no



habrán partículas del diámetro correspondiente a esa velocidad y abajo las partículas de ese tamaño estarán en la concentración original. De esta manera, el peso específico relativo de la suspensión a la profundidad  $H$  y en el tiempo  $t$ , es una medida de la cantidad de partículas de igual y menor tamaño que  $D$  contenidas en la muestra de suelo.

- El área de la sección recta del bulbo del hidrómetro es despreciable en comparación a la de la probeta donde la sedimentación tiene lugar, de manera que dicho bulbo no interfiere en sedimentación de las partículas en el instante de efectuarse una lectura.

En la prueba del hidrómetro se determina la distribución de la curva granulométrica midiendo los pesos específicos relativos de la suspensión de suelo a distintas profundidades y a distintos tiempos debido a que el bulbo alcanza niveles más bajos en cada lectura, ya que la concentración de la suspensión a una cierta profundidad disminuye con el tiempo (Rico & Juárez, 1969).

#### 2.2.2. Distribución granulométrica

A partir de los ensayos de cribado por mallas y el método del hidrómetro se puede obtener la curva completa de un material. La curva granulométrica que se obtiene a partir de la distribución granulométrica permite determinar si un suelo está bien o mal graduado. Un suelo mal graduado es un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño, mientras que un suelo bien graduado es un tipo de suelo en el que los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango. Los suelos bien graduados tienen características hidráulicas y de compresibilidad diferentes a aquellos suelos mal graduados.

Para una medida objetiva del factor de gradación, se ha definido el coeficiente de uniformidad (ecuación 2-3) y el coeficiente de gradación o curvatura (ecuación 2-4) de un suelo, los cuales están definidos por las siguientes formulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2 - 3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2 - 4)$$



Donde:

$D_{60}$  : Diámetro de partícula para el 60% de pasantes en la curva granulométrica

$D_{10}$  : Diámetro de partícula para el 10% de pasantes en la curva granulométrica

$D_{30}$  : Diámetro de partícula para el 30% de pasantes en la curva granulométrica

Un suelo bien graduado tiene un coeficiente de uniformidad mayor de aproximadamente 4 para gravas y 6 para arenas, y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 (para gravas y arenas).

### 2.2.3. Límites de Atterberg

A principios de 1900, el científico sueco, Albert Muritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenido de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por lo tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica en los estados sólido, semisólido, plástico y líquido, como se puede apreciar en la figura 2-1 (Das, 2001).

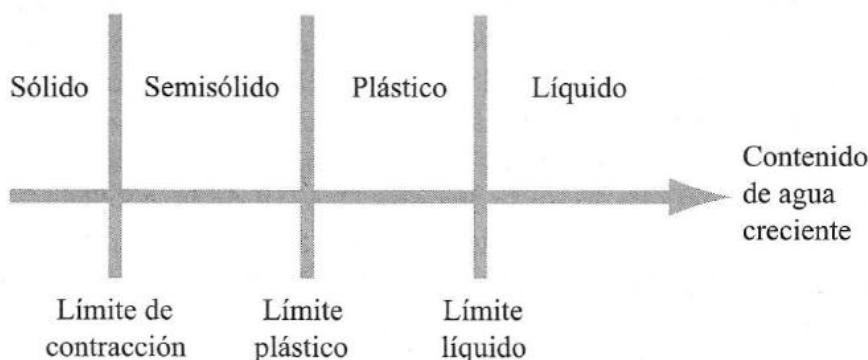


Figura 2-1 Límites de Atterberg (Das, 2001).

Atterberg formuló estos conceptos y otros más para estudiar las propiedades de retención del agua en los suelos de cultivo. En ingeniería, los límites son indicadores sencillos de la mineralogía de los suelos y pueden dar indicios de su comportamiento mecánico, esto es especialmente válido para suelos finos (Matute, 2008).



- *Límite Líquido (LL)*

El límite líquido es el porcentaje de humedad cuando el suelo pasa de comportarse como un material semilíquido a un material plástico. Un material semilíquido no presenta resistencia al esfuerzo cortante o la resistencia que presenta es demasiado pequeña para ser medida. Al disminuir la humedad, aumenta la resistencia del suelo al corte. Un material plástico además de presentar resistencia al corte puede ser deformado sin presentar fracturas visibles y conserva su forma el momento en que se lo somete a secado (Matute, 2008).

El límite líquido se determina en base a la prueba de laboratorio ASTM D-4318. Esta prueba se realiza en un dispositivo constituido por una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base una altura de 10 mm, contándose cada golpe. La finalidad de la prueba es determinar el contenido de agua en porcentaje para cerrar la pasta de muestra separada una distancia de 12.7 mm en el fondo de la cuchara mediante 25 golpes.

Casagrande (1932) concluyó que cada golpe en un dispositivo estándar corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente  $1\text{ g/cm}^2$ . Por lo tanto el límite líquido da el contenido de agua para el cual la resistencia del suelo es de  $25\text{ g/cm}^2$  (Das, 2001).

- *Límite plástico (LP)*

El límite plástico es el porcentaje de humedad a la cual el suelo deja de comportarse como un material plástico y se vuelve un material semisólido, no se puede deformar sin producir fracturas visibles.

El límite plástico se determina en base a la prueba de laboratorio ASTM D-4318. Esta prueba consiste en moldear cilindros de 3 mm hasta que presenten fracturas o trizaduras, el contenido de humedad de los cilindros corresponde al límite plástico.

- *Límite de Contracción (SL)*

El límite de contracción es el porcentaje de humedad a la cual el cambio de volumen del material se detiene pese a que la humedad disminuya, es decir,



el suelo se comporta como un sólido con humedades menores al límite de contracción.

El límite de contracción se determina en base a la prueba de laboratorio ASTM D-4943. Esta prueba consiste en determinar el cambio de volumen que se produce en una pastilla de muestra de suelo cuando la muestra se seca a partir de una humedad inicial. El cambio de volumen permite determinar el cambio en el contenido del agua desde el límite de contracción hasta la humedad inicial de la muestra.

- *Índice de Plasticidad (PI)*

El índice de plasticidad se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, así:

$$PI = LL - PL \quad (2 - 5)$$

- *Índice de Liquidez (LI)*

El índice de liquidez se define como la consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural (Das, 2001). El índice de liquidez se determina mediante la siguiente ecuación:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (2 - 6)$$

Donde:

*w*: Contenido de agua del suelo *in situ*

Cuando el índice de liquidez es mayor a la unidad, el suelo se transforma en una forma viscosa que fluye como un líquido al ser remoldeado (suelos sensitivos). Cuando el índice de liquidez es menor a la unidad, el suelo está fuertemente consolidado y tiene un contenido de agua menor que el límite plástico.



#### *2.2.4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*

Este método propuesto por Arthur Casagrande fue adoptado y refinado por la ASTM como el método normalizado de clasificación y que se utiliza en la prueba ASTM D-2487.

Este sistema clasifica los suelos en dos categorías:

- a) Suelos de grano grueso que son de tipo grava y arenas con menos del 50% pasando por el tamiz No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo G (grava) o S (arena).
- b) Suelos de grano fino con 50% o más pasando por el tamiz No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo M (limo orgánico), C (arcilla inorgánica) u O (limos y arcillas orgánicos). El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

En la clasificación de los suelos también se utiliza los siguientes símbolos:

- W : Bien graduado
- P : Mal graduado
- L : Baja plasticidad (límite líquido menor que 50)
- H : Alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

El sistema unificado de clasificación se presenta en las tablas 2-2, 2-3 y 2-4.



Símbolo de grupo	Criterios
GW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para GW
GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12) o el índice de plasticidad menor que 4
GC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC

Tabla 2-2. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava (Das, 2001).

Símbolo de grupo	Criterios
SW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual a 6; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
SP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para SW
SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12); o índice de plasticidad menor que 4
SC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican arriba de la línea A (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
SW-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM
SW-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC
SP-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM
SP-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC

Tabla 2-3. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos arenosos (Das, 2001).



Símbolo de grupo	Criteria
CL	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; se grafica sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la figura 2.12)
ML	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI < 4$ ; o se grafica debajo de la línea A (véase la zona ML en la figura 2.12)
OL	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL < 50$ (véase zona OL en la figura 2.12)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica sobre o arriba de la línea A (véase la zona CH en la figura 2.12)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica debajo de la línea A (véase la zona MH en la figura 2.12)
OH	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la figura 2.12)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la figura 2.12
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Tabla 2-4. Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos (Das, 2001).

Para determinar los nombres de grupo correspondientes de cada suelo, la ASTM sigue los algoritmos presentados en las figuras 2-2, 2-3 y 2-4.

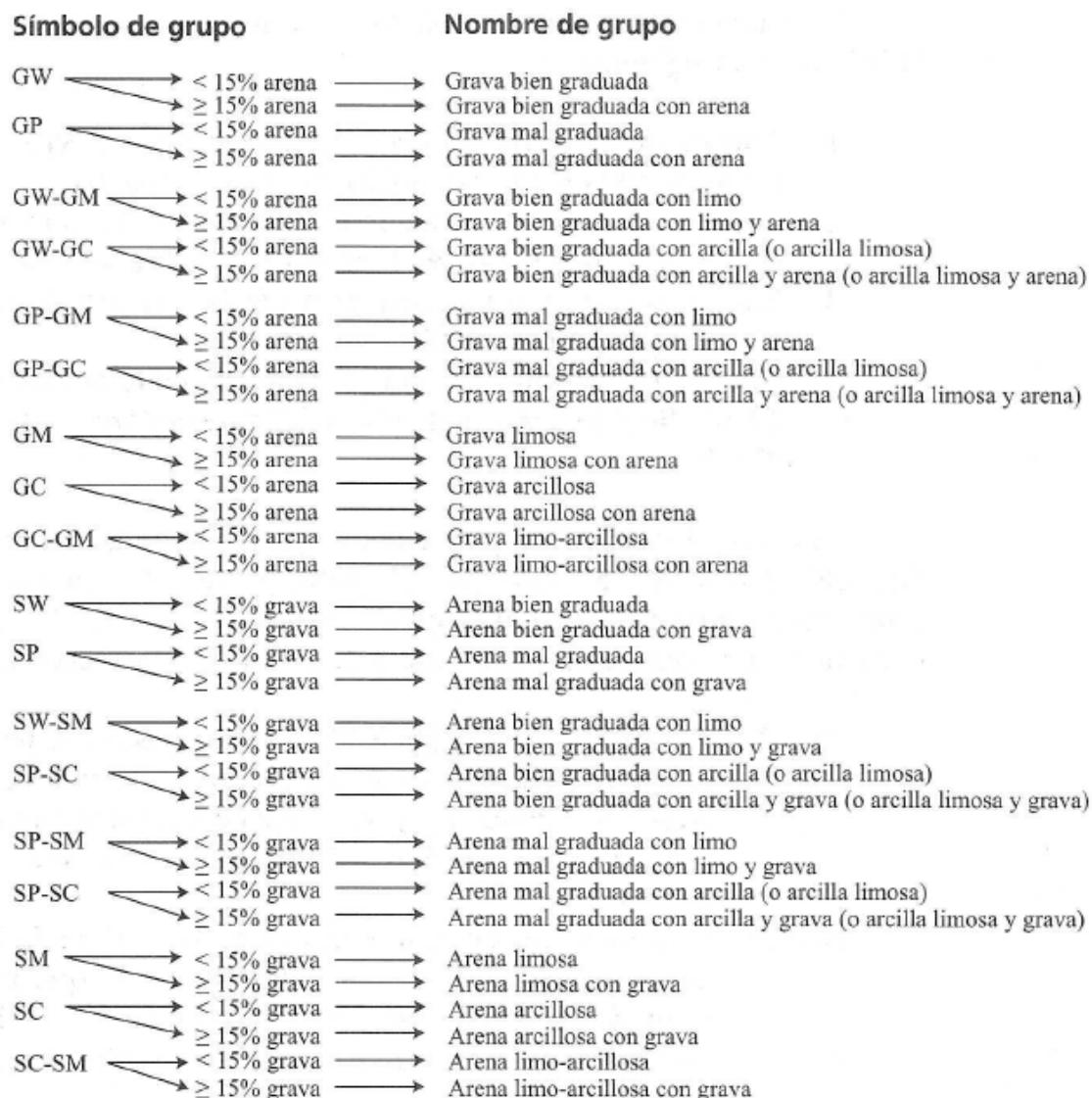


Figura 2-2. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos tipo grava y arenosos (Das, 2001).

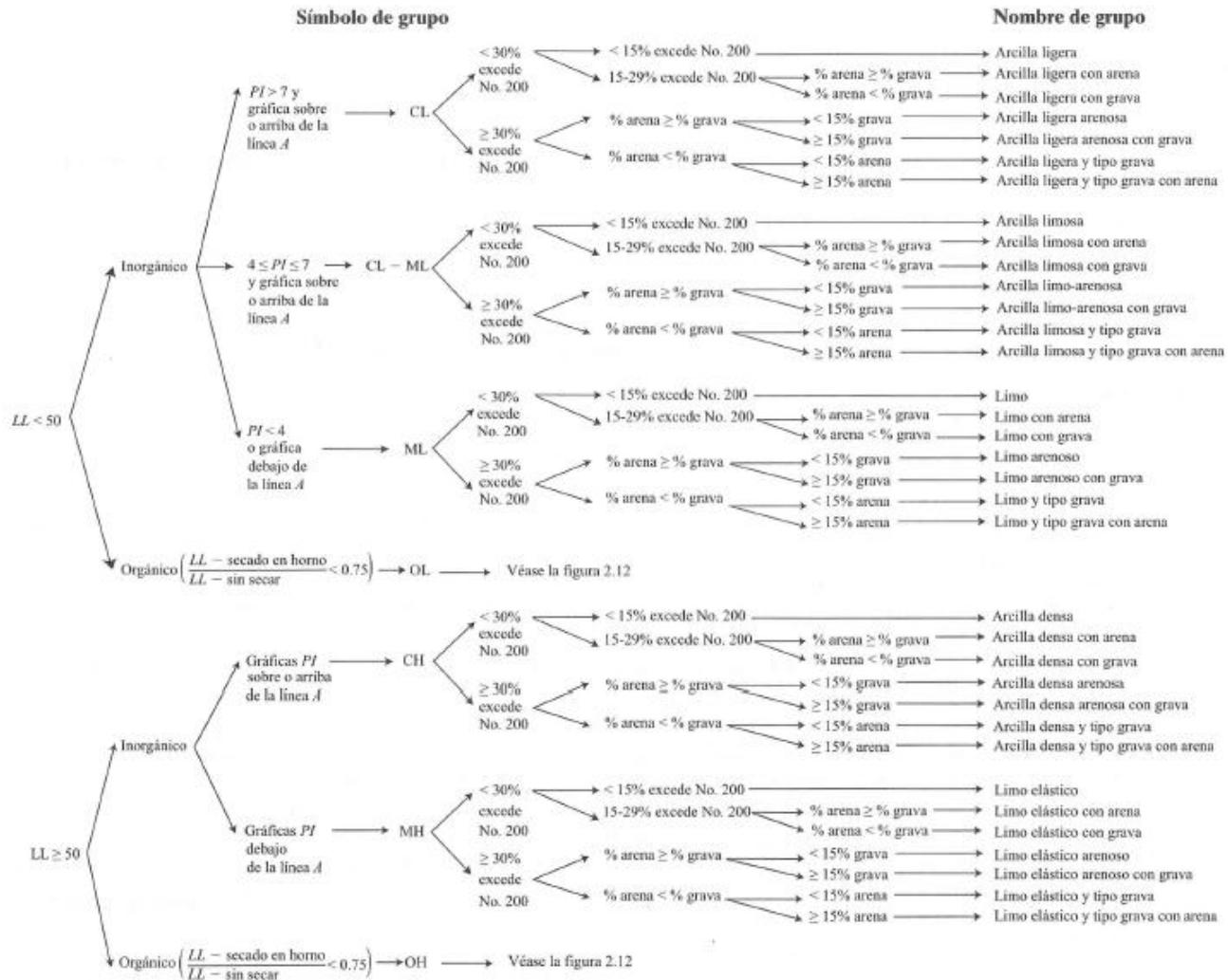


Figura 2-3. Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos inorgánicos y arcillosos (Das, 2001).

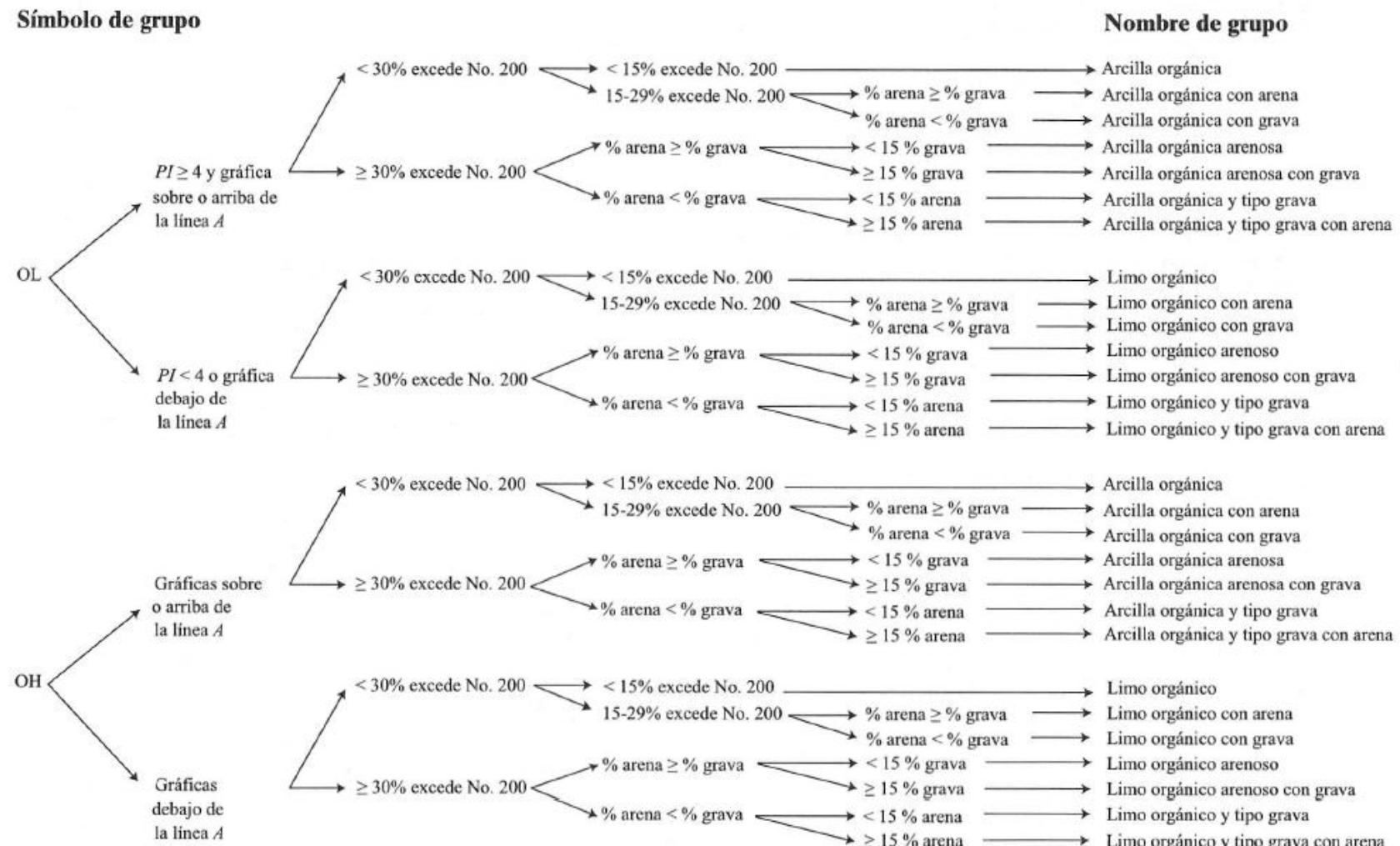


Figura 2-4. Diagrama de flujo para nombres de suelos limosos orgánicos y arcillosos (Das, 2001).



### 2.2.5. Carta de plasticidad

Arthur Casagrande (1932) creó la carta de plasticidad para la clasificación de un suelo como limo o arcilla mediante el estudio de la relación del índice de plasticidad con respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. La carta de plasticidad presenta las siguientes características importantes:

- La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos y está determinada por la ecuación:

$$PI = 0.73 (LL - 20) \quad (2 - 7)$$

- Los limos orgánicos y limos inorgánicos de compresibilidad media se encuentran debajo de la línea A, con un límite líquido entre 30% y 50%.
- Los limos inorgánicos de alta compresibilidad se encuentran por debajo de la línea A con un límite líquido mayor a 50.
- La línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora, y está determinado por la siguiente ecuación:

$$PI = 0.9 (LL - 8) \quad (2 - 8)$$

En la figura 2-5 se puede apreciar la carta de plasticidad establecida para determinar el símbolo de grupo según el sistema unificado de clasificación de los suelos.

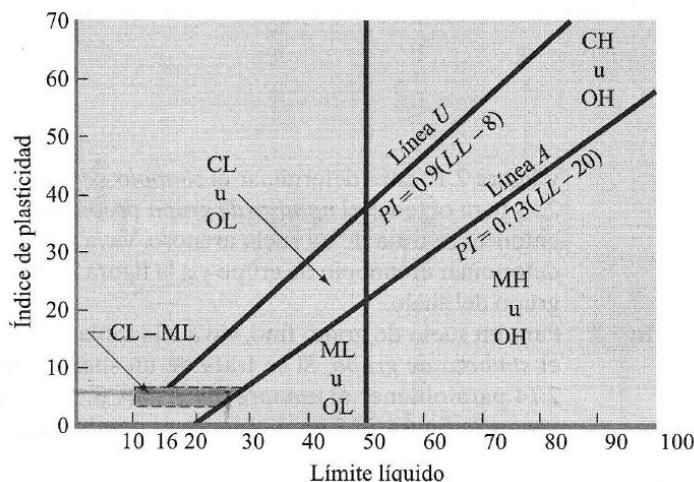


Figura 2-5. Carta de Plasticidad (Das, 2001).



## 2.3. FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE LOS SUELOS

### 2.3.1. Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo del agua a través de los suelos

Matute (2008) establece que para plantear teóricamente el problema del flujo del agua a través del suelo se requiere una base matemática. Esta base matemática está conformada por las siguientes ecuaciones:

- *Ecuación de la Continuidad*

Esta ecuación es la expresión matemática de la ley de conservación de la masa. El flujo neto de masa por unidad de tiempo dentro o fuera de un elemento de volumen es igual al cambio por unidad de tiempo de la masa de fluido en el elemento.

- *Ecuación del estado del fluido*

Esta ecuación es la expresión física acerca de la relación entre la densidad de la masa, la viscosidad, la presión y la temperatura del fluido en el elemento. En el presente estudio se considera el flujo del agua a través del suelo saturado, por lo que la ecuación del estado se ve reducida a que la densidad del fluido es constante.

- *Ecuación del movimiento*

Esta ecuación es la expresión matemática de la ley de Newton del movimiento: la suma de fuerzas en cualquier dirección es igual al producto de la masa por la aceleración en esa dirección. Se puede considerar la aceleración igual a cero y se satisface la condición de que la suma de fuerzas es igual a cero.

El movimiento del agua a través del suelo se produce por medio de tuberías irregulares que forman los poros del suelo. En la irregularidad de las tuberías se consideran de factores como la tortuosidad, la diferencia en rugosidad y fuerzas ejercidas por las partículas del suelo. Estas consideraciones hacen que la representación del flujo del agua por medio de una solución teórica y matemática como la ecuación del movimiento sea compleja. Es por esto que las soluciones establecidas para el flujo del agua a través del suelo son una combinación de algunos modelos



empíricos con ecuaciones fundamentales. Para el presente estudio se analiza el flujo del agua partiendo de la ecuación de Darcy.

### 2.3.2. Ley de Darcy

En 1856, Henri Gaspard Darcy formuló una simple ecuación empírica para la tasa de flujo del agua a través del suelo granular y saturado, basado en sus propias observaciones. La ecuación se expresa por:

$$v_s = k_s \frac{dh}{ds} = k_s i_s \quad (2 - 9)$$

Donde:

$v_s$  : Velocidad de flujo en la dirección  $s$

$k_s$  : Coeficiente de permeabilidad del suelo en la dirección  $s$

$h$  : Carga total o energía total

$s$  : Camino del flujo aparente o macroscópico

$i_s$ : Gradiente hidráulico en la dirección  $s$

El gradiente hidráulico se define como la pérdida de carga hidráulica por unidad de longitud. En el análisis de las fuerzas hidráulicas producidas por el flujo de agua a través del suelo, se define el gradiente hidráulico crítico, el cual corresponde al gradiente hidráulico que produce que el esfuerzo efectivo en la masa del suelo sea 0 y por lo tanto la capacidad a resistir esfuerzos cortantes en el suelo se ve disminuida a valores cercanos al cero dándose como consecuencia el fenómeno de tubificación, donde toma un valor igual a 1. Debido a que el gradiente hidráulico puede calcularse fácilmente de la red de flujo en un suelo, proporciona un enfoque para conocer el inicio de la tubificación o la migración de sólidos cuando el gradiente hidráulico toma el valor del gradiente hidráulico crítico.

La aplicabilidad de la ecuación para suelos granulares es muy buena, sin embargo, para suelos arcillosos existen objeciones y se presentan ecuaciones alternativas (Matute, 2008).



### 2.3.3. Permeabilidad de los suelos

La permeabilidad es una medida de la facilidad con la cual el agua fluye a través del suelo, y depende de varios factores como la viscosidad del fluido, distribución del tamaño de los poros, distribución granulométrica, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y grado de saturación del suelo (Das, 2001).

El contenido de finos es el factor que más influye en la permeabilidad de un suelo. La dinámica que presenta la acumulación de finos muestra las siguientes cuatro etapas: en la primera se produce una depósito superficial en donde no se observa una reducción considerable de la permeabilidad; en la segunda etapa se produce una formación de puentes con las partículas, observándose una notable reducción de la permeabilidad; en la tercera etapa se produce una acumulación interna de partículas, dando lugar a la formación de una costra interna; y en la cuarta etapa ocurre la formación de una costra externa (Rochon & Aquitaine, 1995).

Las partículas finas de arcilla son las que más influencia tienen en la disminución de la permeabilidad. Un estudio realizado sobre dos especímenes de material granular conformados por grava natural (cantos rodados) y roca triturada con partículas finas de piedra y arcilla cada uno demuestra la disminución de permeabilidad y flujo de agua. Material con partículas finas de arcilla son generalmente menos permeables que otros con partículas finas de roca, probablemente debido al hinchamiento de las arcillas por la absorción de agua. El contenido de partículas de roca por debajo del 5% por masa establece una permeabilidad satisfactoria, mientras que un porcentaje bajo de partículas de arcilla tiene un impacto adverso en la permeabilidad (Babić, et al., 2000).

A continuación se presentan valores del coeficiente de permeabilidad relacionado con las condiciones de drenaje y tipo de suelo, en la figura 2-6:



Drenaje	Bueno			Pobre	Prácticamente Impermeable
Tipos de Suelo	Grava Limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava	Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada	Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición	Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición

Figura 2-6. Valores del coeficiente de permeabilidad en cm/seg (Angelone, et al., 2006).

### 2.3.4. Flujo de agua subterráneo bidimensional

Das (2001) estableció que en la mayoría de problemas, el flujo del agua no se produce en una sola dirección y no es uniforme sobre toda el área perpendicular al flujo. Por lo tanto, el flujo del agua en el presente estudio se calculará mediante las gráficas de las redes de flujo. El concepto de las redes de flujo está basado en la ecuación de la continuidad de Laplace.

Para el análisis del flujo del agua se considera un bloque elemental de suelo por el cual fluye el agua con dimensiones  $dx, dy$  y  $dz$ , este elemento está representado en la figura 2-7.

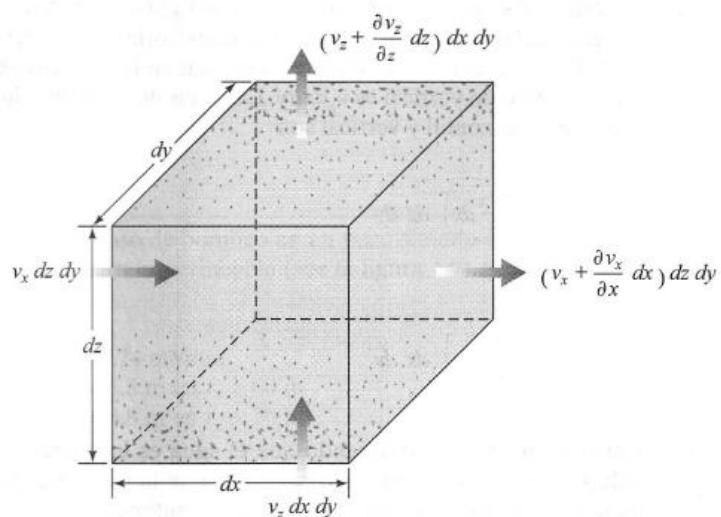




Figura 2-7. Flujo de agua a través de un bloque elemental (Das, 2001).

Con las permeabilidades en la dirección de cada uno de los ejes y por medio de la ecuación de Darcy, la variación del gasto está expresada por:

$$\Delta q = \Delta q_x + \Delta q_y + \Delta q_z = \left( k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (2 - 10)$$

Por otro lado, la variación del gasto puede expresarse también en términos del grado de saturación y la relación de vacíos del suelo por medio de la variación del volumen de agua en el elemento con respecto al tiempo, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\Delta q = \frac{dV_w}{dt} = \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{1 + e} \left( e \frac{dS}{dt} + S \frac{de}{dt} \right) \quad (2 - 11)$$

Donde:

$S$  : Grado de saturación del suelo

$e$  : Relación de vacíos del suelo

Al igualar las ecuaciones (2 - 10) y (2 - 11) de la variación del gasto, se considera que la saturación y la relación de vacíos no varían con el tiempo, es decir, se consideran constantes. Por otro lado, se considera el flujo bidimensional en un material isótropo, por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación conocida como la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2 - 12)$$

La solución de la ecuación de Laplace está dada por dos funciones:  $\psi(x, z)$  y  $\phi(x, z)$ . La función  $\psi(x, z)$  define las líneas de flujo, donde distintas líneas de flujo corresponden a distintas constantes. La función  $\phi(x, z)$  define las líneas equipotenciales, donde cada línea equipotencial corresponde a una carga total constante. La familia de curvas  $\phi(x, z)$  es ortogonal a la familia de curvas de la función  $\psi(x, z)$ , como se puede ver en la figura (2-8), determinándose así la solución de la ecuación de Laplace.

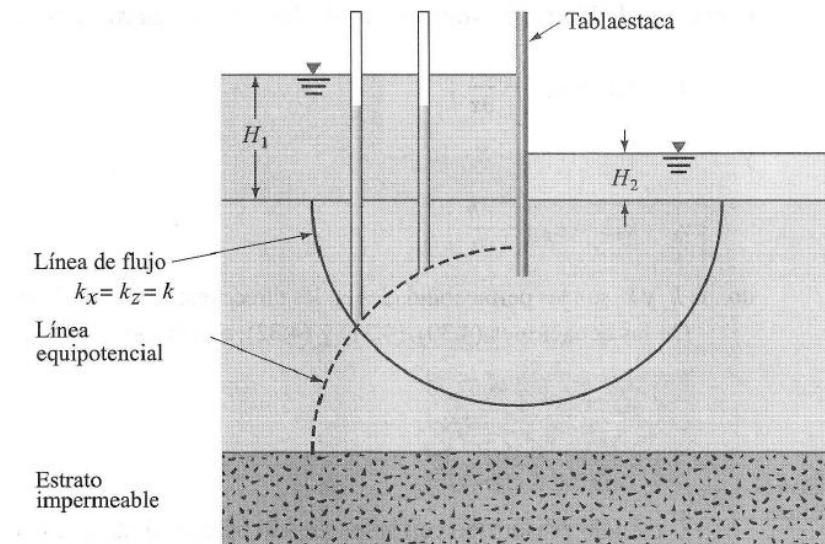


Figura 2-8. Línea equipotencial y línea de flujo (Das, 2001).

A partir de la solución para la ecuación de Laplace se puede calcular el caudal que circula a través de una sección si se construyen la red de flujo.

Para el correcto trazado de la red de flujo es necesario la delimitación de la zona de flujo que se desea estudiar, analizando sus condiciones específicas de frontera; y el trazo de dos familias ortogonales entre sí que satisfagan las condiciones de frontera y que constituyen la solución única de la ecuación de Laplace (Rico & Juárez, 1972).

Das (2001) determina que en cualquier red de flujo, la franja entre dos líneas de flujo cualquiera se llama canal de flujo. Las líneas equipotenciales forman elementos rectangulares con respecto al canal de flujo, con lo que se puede analizar la tasa de flujo a través del canal, como se muestra en la figura 2-9.

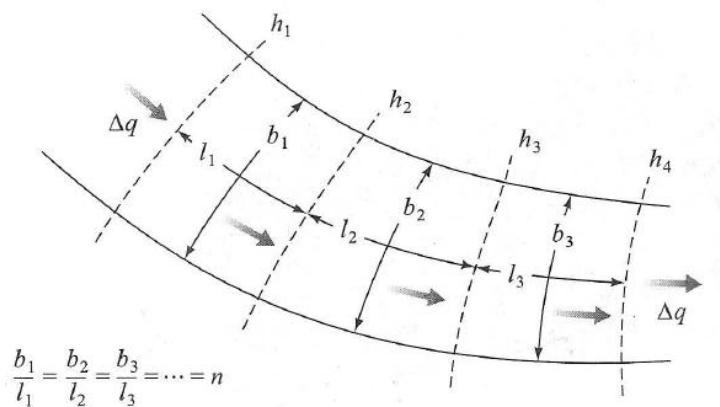


Figura 2-9. Tasa de flujo a través del canal de flujo (Das, 2001)



Considerando el mismo caudal en todos los canales de flujo y las caídas de potencial con el mismo valor, los componentes de la red se vuelven cuadrados y la tasa de flujo queda establecida por la siguiente ecuación:

$$\Delta q = k \cdot \Delta h \quad (2 - 13)$$

De esta manera, se obtiene el caudal que pasa por la red multiplicando la tasa de flujo que pasa por un canal de flujo por el número de canales de flujo. La ecuación obtenida para el caudal de la red se escribe en términos del número de caídas equipotenciales y la pérdida total del sistema, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$q = \frac{N_f}{N_e} k \cdot h_L \quad (2 - 14)$$

Donde:

$N_f$  : Número de canales de flujo

$N_e$  : Número de caídas equipotenciales

$h_L$ : Pérdida total de carga en el sistema

#### 2.3.5. Teoría de la sección transformada

Rico & Juárez, (2005) establece que la aplicación de la ecuación de Laplace considera un suelo isótropo, en el cual las permeabilidades en las direcciones de análisis del flujo bidimensional se consideran iguales. La teoría de la sección transformada permite la aplicación de la ecuación de Laplace y sus soluciones para describir el flujo de agua a través de un suelo anisótropo, en el cual las permeabilidades en las direcciones del flujo bidimensional son diferentes. La teoría de la sección transformada permite reducir al caso de un suelo homogéneo e isótropo un suelo en el que las permeabilidades son diferentes en las direcciones del flujo bidimensional.

El cambio de coordenadas en la ecuación de Laplace se realiza en una de los ejes vertical u horizontal. Las dimensiones varían según el cambio de coordenadas que se realice.

Para la dirección del eje  $x$ , se aplica la siguiente ecuación de cambio de coordenadas:



$$x' = x \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \quad (2 - 15)$$

En donde se aplica la ecuación de Laplace con respecto al cambio de coordenadas:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z'^2} = 0 \quad (2 - 16)$$

Para la dirección del eje  $z$ , se aplica la siguiente ecuación de cambio de coordenadas:

$$z' = z \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \quad (2 - 17)$$

En donde se aplica la ecuación de Laplace con respecto al cambio de coordenadas:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z'^2} = 0 \quad (2 - 18)$$

En la sección transformada, al considerarla isótropa, debe utilizarse un valor de la permeabilidad igual a la media geométrica de las permeabilidades reales por medio de la siguiente ecuación:

$$k = \sqrt{k_x \cdot k_z} \quad (2 - 19)$$

## 2.4. SUBDRENAJE

Los métodos de subdrenaje controlan el flujo que trata de brotar en el talud o en la cama del corte de un proyecto vial, reorientando el flujo y consecuentemente las fuerzas de filtración hacia un lugar menos desfavorable. El subdrenaje disminuye presiones de poro en zonas convenientes, aumenta la resistencia de los suelos al esfuerzo cortante y restringe la posibilidad de cambios volumétricos.



El tipo de subdrenaje que ha rendido excelentes resultados protegiendo las bases y sub bases de los pavimentos de las aguas que fluyen por el subsuelo es el de subdrenes interceptores longitudinales (Rico & Juárez, 1972).

#### 2.4.1. Subdrenes interceptores longitudinales

Los subdrenes interceptores son zanjas excavadas, llenas de material drenante, material filtrante y elementos de captación y transporte de agua. Estos subdrenes se presentan de diferentes maneras, como se indica en el capítulo 1.

El tipo de dren interceptor que se utiliza depende de la disponibilidad de materiales en la región, los costos y la necesidad de captación y caudal del dren (Suarez, 1998).

Usualmente los subdrenes tratan de taponarse por transporte y depósito de las partículas más finas del suelo. Para evitar este fenómeno, se debe colocar material drenante y de filtro que deben impedir el paso de las partículas finas del suelo a proteger y permitir (Suarez, 1998).

### 2.5. MATERIAL FILTRANTE Y DRENANTE EN SUBDRENES

En las obras viales, los suelos pueden ser fácilmente erosionados por las fuerzas que produce el agua al fluir a su alrededor. Los materiales filtrantes impiden la erosión interna de los suelos y permite el paso franco del agua hacia el exterior. El uso de los agregados naturales en las obras viales es predominante debido a que son económicos con respecto a otros materiales. Los agregados granulares, cuando son de buena calidad, son prácticamente eternos en comparación con la vida útil de la obra (Monroy Melgar, 2010).

Para cumplir la función de material drenante y filtrante en forma conveniente, los materiales deben cumplir algunos requerimientos básicos que se han ido imponiendo por un efecto combinado de base teórica y experimental. Muchos de los requerimientos para los materiales son de naturaleza granulométrica y otros tienen que ver con el cuidado en la manipulación y colocación.

Los materiales deben tener una mayor permeabilidad que el suelo circundante para facilitar el flujo de agua hacia el tubo perforado, y ser de un granulometría tal que impida que las partículas del suelo circundante sean transportadas por el



agua hacia los vacíos y huecos del material filtrante, impermeabilizándolo (Rico & Juárez, 1972).

#### 2.5.1. *Criterios de diseño de materiales filtrantes*

Los criterios de diseño para materiales filtrantes determinan un buen comportamiento del material y del subdren en general.

##### a) *Criterio de permeabilidad*

El criterio de permeabilidad facilita el flujo de agua a través del material drenante hacia el tubo perforado en la base del subdren, cumpliendo con las siguientes condiciones:

Terzaghi y Peck (Monroy Melgar, 2010):

$$D_{15}^F \geq 4 D_{15}^S \quad (2 - 20)$$

Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos(Monroy Melgar, 2010):

$$D_{15}^F \geq 5 D_{15}^S \quad (2 - 21)$$

Donde:

$D_x^{F/S}$  : Diámetro de partícula para el x% de pasantes en la curva granulométrica del suelo (S) o el filtro (F).

##### b) *Criterio de retención (capacidad de filtro)*

El criterio de retención está basado en el estudio de los filtros críticos a través de la prueba del filtro sin erosión (NEF – Non-Erosion Filter). Para los filtros críticos se establecen cuatro categorías basadas en el contenido de finos (menores a 0.075 mm, malla No. 200) del suelo base. El contenido de finos está determinado en una curva granulométrica con un diámetro máximo de partículas de 4.75 mm (malla No. 4). Para suelos con un diámetro máximo de partículas mayor a 4.75 mm, la curva granulométrica se debe ajustar para los materiales pasantes de la malla No.4. De esta manera se determina a que categoría pertenece el suelo base (Sherard & Dunnigan, 1989).



El diseño actual se enfoca en el uso de valores conservativos a partir del criterio de filtros críticos, como se puede ver en la tabla 2-5.

Grupo de suelo	Contenido de finos < 0.075 mm	Criterio de filtro determinado por Sherard & Dunnigan (1989)	Criterio del Estado del Arte en ingeniería de presas
1	85 - 10	$D_{15}^F = 7D_{85}^S \text{ a } 12D_{85}^S$	$D_{15}^F \leq 9D_{85}^S$
2	40 - 80	$D_{15}^F = 0.7 \text{ a } 1.5 \text{ mm}$	$D_{15}^F \leq 0.7 \text{ mm}$
3	0 - 15	$D_{15}^F = 7D_{85}^S \text{ a } 10D_{85}^S$	$D_{15}^F \leq 4 \text{ a } 12 D_{85}^S$
4	15 - 40	Intermedio entre el grupo 2 y 3	Intermedio entre el grupo 2 y 3

Tabla 2-5. Criterio de filtro (Messerklinger, 2013).

Es importante que el material drenante no posea más del 5% de material que pase la malla No. 200 para evitar la migración de finos del material drenante hacia la tubería de drenaje (Monroy Melgar, 2010).

Debido a la dificultad de encontrar un material granular que cumpla con las condiciones, la norma ASTM D 1241 – 68 recomienda dos tipos de granulometrías que cumplen con una amplia gama de suelos como se puede ver en las tablas 2-5 y 2-6.

Numero de Tamiz	Porcentaje que pasa en peso
1 1/2"	100
1"	80 a 100
3/4"	85 a 100
3/8"	40 a 80
No. 4	20 a 55
No. 10	0 a 35
No. 20	0 a 20
No. 40	0 a 12
No. 100	0 a 7
No. 200	0 a 5

Tabla 2-6. Granulometría de filtro tipo I según ASTM D 1241 – 68 (Monroy Melgar, 2010).



Numero de Tamiz	Porcentaje que pasa en peso
1"	100
3/4"	90 a 100
3/8"	40 a 100
No. 4	25 a 40
No. 8	18 a 33
No. 30	5 a 15
No. 50	0 a 7
No. 200	0 a 3

Tabla 2-7. Granulometría de filtro tipo II según ASTM D 1241 – 68 (Monroy Melgar, 2010).

## 2.6. GEOTEXTILES EN SUBDRENES

Los geotextiles son telas permeables, filtrantes, construidas con fibras sintéticas, especialmente polipropileno, poliéster, nylon y polietileno (Suarez, 1998). Los geotextiles, al ser utilizados como materiales filtrantes, deben tener una abertura aparente máxima adecuada para retener el suelo, cumpliendo simultáneamente con un valor mínimo admisible de permeabilidad, que permita el paso del flujo de una manera eficiente (PAVCO, 2009).

### 2.6.1. Funciones de los geotextiles

Las principales funciones que cumplen los geotextiles son (Monroy Melgar, 2010):

- *Función de separación*

Los geotextiles separan capas de diferente material y evita la perdida de agregados.

- *Función de refuerzo*

Se aprovecha el comportamiento a tracción de los geotextiles para trabajar como complemento de las propiedades mecánicas del suelo. Actúan como un elemento estructural y de confinamiento de los granos del suelo, permitiendo repartir y difundir las tensiones locales.



- *Función drenante*

Los geotextiles cumplen la función de captación y conducción de fluidos en el plano de los mismos. La efectividad del drenaje depende de la capacidad de drenaje de los geotextiles y del gradiente de presiones a lo largo del camino de evacuación. El espesor de los geotextiles debe ser suficiente al aumentar la tensión en el plano normal al plano de conducción.

- *Función de filtro*

Los geotextiles impiden el paso de material del suelo dependiendo del tamaño de la partícula y del tamaño del poro del filtro, sin impedir el paso de agua.

#### 2.6.2. *Tipos de geotextiles*

- a) *Geotextiles tejidos*

Los geotextiles tejidos están formados por cintas entrecruzadas mediante procesos de tejido similares a los textiles de ropa y con leves patrones de tejido tales como el patrón sencillo, patrón cruzado o patrón satinado. Los geotextiles tejidos pueden ser fabricados de monofilamentos, con fibras laminares o una combinación de ambos (PAVCO, 2009). Los geotextiles tejidos se clasifican en:

- *Geotextiles tejidos de calada*

Son formados por cintas de urdimbre (sentido longitudinal) y de trama (sentido transversal), su resistencia a la tracción es biaxial y su estructura es plana.

- *Geotextiles tejidos tricotados*

Son fabricados con hilo entrecruzado, su resistencia puede ser multiaxial o biaxial y su estructura es tridimensional (PAVCO, 2009).



### b) *Geotextiles no tejidos*

Los geotextiles no tejidos están formados por fibras o filamentos superpuestos en forma laminar, consolidándose esta estructura por distintos sistemas (Monroy Melgar, 2010). Los geotextiles no tejidos a su vez se clasifican en:

- *Geotextiles no tejidos ligados mecánicamente o punzonados por agujas*

Poseen buenas características mecánicas, gran elongación, buena protección y buenas funciones de filtración y separación.

- *Geotextiles no tejidos ligados térmicamente o termo soldados*

Su espesor y elongación son sensiblemente inferiores a los punzonados por agujas, por lo cual su transmisividad y permeabilidad son menores, tienen buenas propiedades mecánicas y poca flexibilidad.

- *Geotextiles no tejidos ligados químicamente o resinados*

No son utilizados como geotextiles de separación y protección, debido a que en su composición deben evitarse elementos químicos distintos a los polímeros que pudiesen alterar sus propiedades y provocar incompatibilidades químicas con otros materiales con los que pudiese estar en contacto. Su empleo es poco extendido debido a su elevado costo.

Los geotextiles tienen baja porosidad y el riesgo que poseen a la colmatación es muy alta, con la consecuencia de una perdida súbita de permeabilidad, razón por la cual no se recomienda usarlos como filtros en sistemas de drenaje en proyectos viales (Monroy Melgar, 2010).

#### 2.6.3. *Criterios de diseño para geotextiles*

Para el diseño de geotextiles se analizan las características hidráulicas y mecánicas que presentan los mismos de acuerdo a los criterios establecidos por la FHWA (Federal Highway Administration) (PAVCO, 2009):

*a) Criterio de retención (Tamaño de Abertura Aparente)*

El criterio de retención permite determinar el tamaño de las aberturas del geotextil para que sean lo suficientemente pequeñas y evitar la migración del suelo hacia el material drenante

$$TAA < D_{85} \cdot B \quad (2 - 22)$$

Donde:

$TAA$  : Tamaño de abertura aparente, dato suministrado por el fabricante en milímetros. Se obtiene tamizando esferas de vidrio de diámetros conocidos, cuando el 5% de un tamaño determinado de esferas pasa a través del geotextil, se define el tamaño de abertura aparente

$D_{85}$  : Diámetro de partícula para el 85% de pasantes en la curva granulométrica

$B$  : Coeficiente que depende del tipo de suelo a filtrar en contacto con el geotextil y de las condiciones de flujo, varía entre 1 y 3

- Para arenas, arenas gravosas, arenas limosas y arenas arcillosas (con menos del 50% de pasantes del tamiz No. 200),  $B$  es función del coeficiente de uniformidad  $C_u$ :

$$C_u \leq 2 \text{ ó } C_u > 8 \rightarrow B = 1 \quad (2 - 23)$$

$$2 < C_u \leq 4 \rightarrow B = 0.25 C_u \quad (2 - 24)$$

$$4 < C_u \leq 8 \rightarrow B = \frac{8}{C_u} \quad (2 - 25)$$

- Para suelos arenosos mal graduados :

$$1.5 < B < 2 \quad (2 - 26)$$



- Para suelos con más del 50% de pasantes del tamiz No. 200

$$TAA \leq D_{85} \quad \text{Para geotextiles tejidos} \quad (2 - 27)$$

$$TAA \leq 1.8 \cdot D_{85} \quad \text{Para geotextiles no tejidos} \quad (2 - 28)$$

*b) Criterio de permeabilidad*

El criterio de permeabilidad permite un adecuado paso de flujo perpendicular al plano del geotextil:

- Para condiciones de flujo estable o flujo laminar y suelos no dispersivos, con porcentajes de finos no mayores al 50%

$$K_g > K_s \quad (2 - 29)$$

Donde:

$K_{g/s}$ : Permeabilidad del geotextil o del suelo

- Para condiciones de flujo crítico, altos gradientes hidráulicos y buscando un correcto desempeño a largo plazo reduciendo riesgo

$$K_g > 10 K_s \quad (2 - 30)$$

*c) Criterio de colmatación*

Los geotextiles deben poseer un porcentaje mínimo de espacios vacíos. Los geotextiles con mayor resistencia a la colmatación son los geotextiles no tejidos punzonados por agujas, en los cuales el riesgo que se taponen es muy bajo debido al espesor que poseen y los valores de porosidad que presentan.

*d) Criterio de supervivencia*

Este criterio se basa en la resistencia que debe tener el geotextil en el tiempo por las influencias químicas, biológicas o de intemperie. El geotextil debe poseer valores mínimos de resistencia a la tensión, punzonamiento, estallido y rasgado.



## 2.7. MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO

Modelar el flujo de agua a través del suelo mediante una solución numérica puede resultar muy complejo. Los depósitos naturales de suelo son generalmente muy heterogéneos y anisótropos. De igual manera, las condiciones de frontera cambian a menudo con el tiempo y no siempre pueden ser definidas con certeza al inicio del análisis; de hecho, la condición de frontera puede ser usualmente parte de la solución. Además, cuando un suelo no está saturado, el coeficiente de permeabilidad está en función de la presión de poro negativa. La presión de poro por el agua es la principal incógnita y necesita ser determinada, por lo tanto, técnicas numéricas iterativas son requeridas para relacionar la presión de poro por el agua calculada y la propiedad del material, lo que hace que la solución sea no lineal. Estas complejidades hacen necesario el uso de análisis numérico para analizar los problemas de filtración para todos pero para los más simples casos. Una aproximación común es el uso de las formulaciones de elementos finitos y un software de filtración de agua.

El análisis mediante elementos finitos está conformado por tres partes principales:

- Discretización, donde se divide el dominio en pequeñas áreas llamadas elementos.
- Especificación y asignación de las propiedades del elemento.
- Especificación de las condiciones de frontera.

### 2.7.1. Geometría y discretización

Los métodos numéricos de elementos finitos están basados en la división de un continuum en pequeñas piezas, describiendo el comportamiento de las piezas pequeñas y reconectándolas para representar el comportamiento del continuum como un todo. Este proceso de división se conoce como discretización, donde las pequeñas piezas son los elementos finitos.

La geometría del modelo debe ser definida en su totalidad antes de realizar la discretización. GeoStudio permite el uso de regiones en la modelación para definir la geometría y facilitar la discretización. El uso de regiones se basa en el mismo principio de los elementos finitos al dividir un dominio grande en pequeñas piezas, reconectándolas luego para obtener el comportamiento del dominio completo.



### 2.7.2. Nodos del elemento

Una de las principales características de los elementos finitos son los nodos. Estos nodos existen en las esquinas de los elementos o a lo largo de los bordes de los elementos. Los nodos son requeridos para los siguientes propósitos:

- La posición de los nodos en un sistema de coordenadas es utilizada para calcular la geometría del elemento.
- Los nodos son utilizados para conocer la distribución de las incógnitas primarias en el elemento. En el análisis de la filtración de agua, la incógnita primaria puede ser la cabeza hidráulica o la presión de poro del agua.
- Los nodos conectan los elementos.
- Todas las ecuaciones de los elementos finitos son formadas en los nodos. La ecuación de filtración es realizada para cada nodo y las propiedades del material para las ecuaciones son contribuidas por los elementos a su alrededor.
- Pueden existir múltiples ecuaciones en un nodo, dependiendo del número de grados de libertad. En el análisis de filtración existe un solo grado de libertad en cada nodo, la cabeza hidráulica o la presión de poro del agua.

### 2.7.3. Distribución de la variable en el elemento

En la formulación de los elementos finitos es necesario conocer la distribución de la incógnita primaria en el elemento, la cual puede ser lineal o curva.

- *Distribución lineal*

En la distribución lineal, los nodos solo existen en las esquinas de los elementos, se les conoce como elementos de primer orden. Dos nodos a lo largo de un borde son suficientes para formar una ecuación lineal que describe la distribución de la variable en el elemento.



- *Distribución curva*

En la distribución curva, los bordes de los elementos presentan 3 nodos, se les conoce como elementos de segundo orden. Estos nodos permiten formar una ecuación cuadrática que describe la distribución de la variable en el elemento.

#### *2.7.4. Compatibilidad de elementos y de la malla*

Se dice que los elementos están conectados cuando tienen nodos en común y la distribución de la incógnita primaria en el borde debe ser la misma para un borde común de dos elementos. Los algoritmos que utiliza GeoStudio para la elaboración de la malla aseguran la compatibilidad de los elementos entre regiones.

#### *2.7.5. Integración numérica*

En la formulación de elementos finitos se determinan varias integrales, donde muchos de los casos es necesario la integración numérica, sobre todo en elementos de segundo orden. GeoStudio utiliza el esquema de la cuadratura de Gauss. Este esquema implica el muestreo de las características del elemento en puntos específicos conocidos como puntos de Gauss y luego sumar la información de las muestras.

Algunos resultados de los elementos finitos son calculados en los puntos de Gauss. GeoStudio presenta los resultados de una región de Gauss, pero los datos asociados son calculados en el punto exacto de integración de Gauss. Los datos no son necesariamente constantes en la región. El número de las regiones de Gauss es igual al número de puntos de integración de Gauss usados en el análisis. El número de puntos de Gauss depende de los nodos del elemento.

#### *2.7.6. Variables secundarias*

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones de los elementos finitos se forman en los nodos y las incógnitas primarias son calculadas en los nodos. Una



vez encontradas estas incógnitas, se pueden calcular las variables secundarias, como por ejemplo los gradientes.

Las variables secundarias son calculadas en los puntos de integración de Gauss, y para fines de contorno y gráficos, los valores de las variables secundarias son proyectados y promediados en los nodos.

#### 2.7.7. *Condiciones de frontera*

La causa del flujo de filtración es la diferencia de cabeza hidráulica total entre dos puntos o una tasa específica de flujo entrante o saliente. Todas las ecuaciones de elementos finitos justo antes de la resolución de las incógnitas se simplifican en la siguiente ecuación:

$$[k] \{H\} = \{Q\} \quad (2 - 31)$$

Donde:

$[k]$  : Matriz de la geometría y propiedades del material

$\{H\}$  : Vector de las cabezas hidráulicas totales en los nodos

$\{Q\}$  : Vector de las cantidades de flujo en los nodos

El objetivo principal es resolver para las incógnitas principales, en el análisis de la filtración es la cabeza hidráulica en cada nodo. Las incógnitas son calculadas relativas a los valores especificados de  $H$  o  $Q$  en los nodos. Estos valores especificados de  $H$  o  $Q$  son las condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera pueden ser una de las dos opciones, se puede especificar  $H$  o  $Q$  en un nodo. De esta manera, cuando se especifica el valor de  $H$  en un nodo, el valor calculado de  $Q$  es la cantidad de flujo requerida para mantener el  $H$  especificado. Cuando se especifica el valor de  $Q$  en un nodo, el valor calculado de  $H$  es la cantidad requerida de cabeza hidráulica para mantener el valor especificado de flujo  $Q$ .

Las condiciones de frontera están conectados a la geometría del modelo, de tal manera que la malla pueda ser cambiada sin perder las condiciones de frontera establecidas.

En el presente estudio se presenta el caso de establecer la condición de frontera en un lugar lejano al problema, en este caso el subdren con respecto a la topografía obtenida. En la realidad, las condiciones de frontera en campos



lejanos son desconocidas. Es común aproximar la condición de frontera especificando una condición de cabeza representando al inicio del nivel freático; es decir, la condición de frontera es especificada como la cabeza total igual a la elevación del nivel freático. La presión de poro tiene un valor de 0 en la superficie freática.

#### *2.7.8. Tipos de análisis*

En el análisis de filtración en elementos finitos existen dos clases de análisis:

- *Análisis de estado estable*

Describe una situación donde el estado del modelo es estable y no se producen cambios.

- *Análisis transitorio*

Describe un modelo que se producen cambios debido a que considera cuanto le toma al suelo responder a las condiciones de frontera establecidas.

En el presente estudio se considera el análisis de estado estable, en donde las ecuaciones dejan a un lado la variable del tiempo y omite la función del contenido de agua volumétrico. El contenido de agua volumétrico indica cuánta agua es ganada o perdida cuando se produce cambio de presión, razón por la cual no se considera en este tipo de análisis debido a que no se producen cambios de presión.

#### *2.7.9. Visualización de los resultados*

Para entender la información de los resultados obtenidos, es necesario conocer como los datos fueron obtenidos. De esta manera, recapitulando, se establece la geometría del problema, propiedades del material y las condiciones de frontera. La solución ensambla la propiedad del suelo y la geometría para cada punto de Gauss en cada elemento y lo aplica en las ecuaciones de flujo establecidas en cada nodo. Por consiguiente, en cada nodo se ha aplicado información de frontera, interpolando datos de la propiedad del suelo y geometría. De esta manera se calcula la incógnita primaria en la ecuación de cada nodo. Los datos de los puntos de Gauss son usados para establecer las ecuaciones nodales.



En la figura 2-10 se muestra el tipo de información que puede ser visualizada para cada nodo en la malla de los elementos finitos. Los resultados muestran una combinación de cabezas hidráulicas, presiones, flujo, velocidades, gradientes, permeabilidades o conductividad hidráulica y contenido de agua.

The screenshot shows a software window titled "View Result Information". At the top, there are dropdown menus for "Data type" (set to "Node") and "Data Category" (set to "All"). Below these are two columns of data for nodes 777 and 778. The columns are labeled "Parameter", "777", and "778". The data includes various hydrological parameters such as Head (m), Pore-Water Pressure (kPa), Pressure Head (m), Water Flux (m³/day), Cumulative Water Flux (m³), X-Velocity Magnitude (m/day), Y-Velocity Magnitude (m/day), XY-Velocity Magnitude (m/day), X-Gradient, Y-Gradient, XY-Gradient, X-Conductivity (m/day), Y-Conductivity (m/day), Vol. Water Content (m³/m³), and Slope of Vol. Water Content Fn. (/kPa). Most values are listed with three decimal places, except for some which are listed as "None".

Parameter	777	778
X (m)	11.994405	11.999964
Y (m)	2.5193379	2.001834
Z (m)	0	0
Head (m)	4.3276217	4.3345293
Pore-Water Pressure (kPa)	17.733839	22.876743
Pressure Head (m)	1.8082838	2.3326953
Water Flux (m³/day)	None	None
Cumulative Water Flux (m³)	None	None
X-Velocity Magnitude (m/day)	0.0043511055	0.0043886...
Y-Velocity Magnitude (m/day)	0.001340284	0.0010496...
XY-Velocity Magnitude (m/day)	0.004552854	0.0045124...
X-Gradient	0.050386752	0.0508195
Y-Gradient	0.015604883	0.012257822
XY-Gradient	0.052747864	0.052276914
X-Conductivity (m/day)	0.0864	0.0864
Y-Conductivity (m/day)	0.0864	0.0864
Vol. Water Content (m³/m³)	0.29820622	0.29820622
Slope of Vol. Water Content Fn. (/kPa)	0	0

At the bottom of the window are buttons for "Export", "Copy", "Print", and "Close".

Figura 2-10. Visualización de la información en un nodo.

Se puede apreciar la información de la posición del nodo en el dominio del problema, la cabeza hidráulica, la presión de poro de agua, flujo de agua, el flujo de agua acumulado, la velocidad en las direcciones de  $x$  y  $y$  debido a que se un análisis en dos dimensiones, la resultante de la velocidad, los gradientes en las direcciones  $x$  y  $y$ , la resultante del gradiente, la permeabilidad en la direcciones  $x$  y  $y$ , el contenido de agua volumétrico y la pendiente del contenido de agua volumétrico. Los valores del flujo de agua no muestran resultados ("None") porque la suma de los flujos que se producen en el nodo es igual a cero, es decir, no existe datos en el nodo en el tiempo ni espacio. El presente estudio analiza el gradiente hidráulico en los nodos, correspondiente al valor "xy - Gradient", debido a que proporciona información del arrastre de partículas según su valor se acerque al gradiente crítico.

#### 2.7.10. Ecuaciones aplicadas en el cálculo mediante elementos finitos

- Ecuaciones de flujo de agua para elementos finitos



Partiendo de la ecuación de la variación del gasto 2-10, se reduce la misma a la ecuación diferencial gobernante utilizada en el software SEEP/W para la formulación de elementos finitos, en función de la pendiente de la curva de almacenamiento  $m_w$ :

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2 - 32)$$

Donde:

$m_w$  : Pendiente de la curva de almacenamiento

$Q$ : Aplicación externa de flujo

$\gamma_w$ : Peso específico del agua

Aplicando el método de Galerkin para los residuos pesados a la ecuación diferencial gobernante 2-32, la ecuación de elementos finitos para filtración de dos dimensiones puede ser derivada como:

$$\begin{aligned} \tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{H\}, t \\ = q \tau \int_L (\langle N \rangle^T) dL \end{aligned} \quad (2 - 33)$$

Donde:

$[B]$  : Matriz de gradiente

$[C]$  : Matriz de permeabilidad del elemento

$\langle N \rangle$  : Vector de la función de interpolación

$q$  : Flujo unitario a través del borde de un elemento

$\tau$ : Espesor del elemento

$t$ : Tiempo

$\lambda$ : Término de almacenamiento para una filtración transitoria, igual a  $m_w \gamma_w$

El vector de la función de interpolación está conformado por una serie de funciones de interpolación de acuerdo a los nodos del elemento.

La matriz de gradiente está definida por las derivadas de la función de interpolación con respecto a los ejes  $x$  y  $y$ , así:



$$[B] = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \end{array} \right\} \quad (2 - 34)$$

La matriz de permeabilidad del elemento está conformada de la siguiente manera:

$$[C] = \begin{bmatrix} k_x \cos^2 \alpha + k_y \sin^2 \alpha & k_x \sin \alpha \cos \alpha + k_y \sin \alpha \cos \alpha \\ k_x \sin \alpha \cos \alpha + k_y \sin \alpha \cos \alpha & k_x \sin^2 \alpha + k_y \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (2 - 35)$$

Donde:

$\alpha$  : Angulo de dirección de las permeabilidades

La ecuación de elementos finitos para filtración de dos dimensiones 2-33 puede ser abreviada como:

$$[k]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\} \quad (2 - 36)$$

Donde:

$[M]$  : Matriz de masa del elemento

La matriz de masa del elemento está definida por:

$$[M] = \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad (2 - 37)$$

Para el análisis de estado estable, la cabeza hidráulica no es una función del tiempo, consecuentemente el término  $\{H\}, t$  se elimina, reduciéndose la ecuación de elementos finitos para filtración de dos dimensiones a:

$$[k]\{H\} = \{Q\} \quad (2 - 38)$$

Esta ecuación es la forma abreviada en elementos finitos de la ecuación de flujo de Darcy.

- *Proyección de los valores de los puntos de Gauss a los nodos*



Los valores secundarios obtenidos en los puntos de Gauss se proyectan a los nodos mediante las funciones de interpolación, siendo así:

$$x = \langle N \rangle \{X\} \quad (2 - 39)$$

Donde:

$x$  : Valores proyectados fuera de los puntos de Gauss a una coordenada local mayor a 1

$\{X\}$  : Valor de la variable en el punto de Gauss

Cuando se presentan variaciones grandes en los parámetros en los puntos de Gauss, usualmente se presentan dificultades numéricas. Este problema se reduce con una discretización más fina debido a que se producen variaciones menores.

- *Calculo de gradientes y velocidades*

Una vez que la solución ha convergido y se conocen los valores de las cabezas hidráulicas en los nodos, el software SEEP/W determina los gradientes y las velocidades de Darcy en cada uno de los puntos de integración:

$$\begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \end{Bmatrix} = [B] \{H\} \quad (2 - 40)$$

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = [C][B]\{H\} \quad (2 - 41)$$



---

## CAPÍTULO 3

---

### 3. DESCRIPCIÓN DE TRABAJO DE CAMPO, LABORATORIO Y MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO

#### 3.1. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE SITIOS DE INVESTIGACIÓN

Para el presente estudio se seleccionaron dos tramos de vías en la zona andina sur del Ecuador, en donde se presentaron subdrenes longitudinales. A continuación se presenta la ubicación de los tramos seleccionados y descripción de los puntos de recolección establecidos para la investigación.

##### *3.1.1. Ubicación de los sitios de investigación*

Los tramos seleccionados para el estudio se encuentran en la vía Troncal de la sierra E35, en la carretera Cuenca – Azogues - Biblian. El primer tramo seleccionado para la recolección de muestras se ubica en la provincia del Azuay y corresponde al tramo Salado – Guangarcucho. El tramo inicia en la abscisa 0+665.50, a partir de la carretera Panamericana Sur, que pertenece también a la vía primaria E35, tal como se puede ver en la figura 3-1.

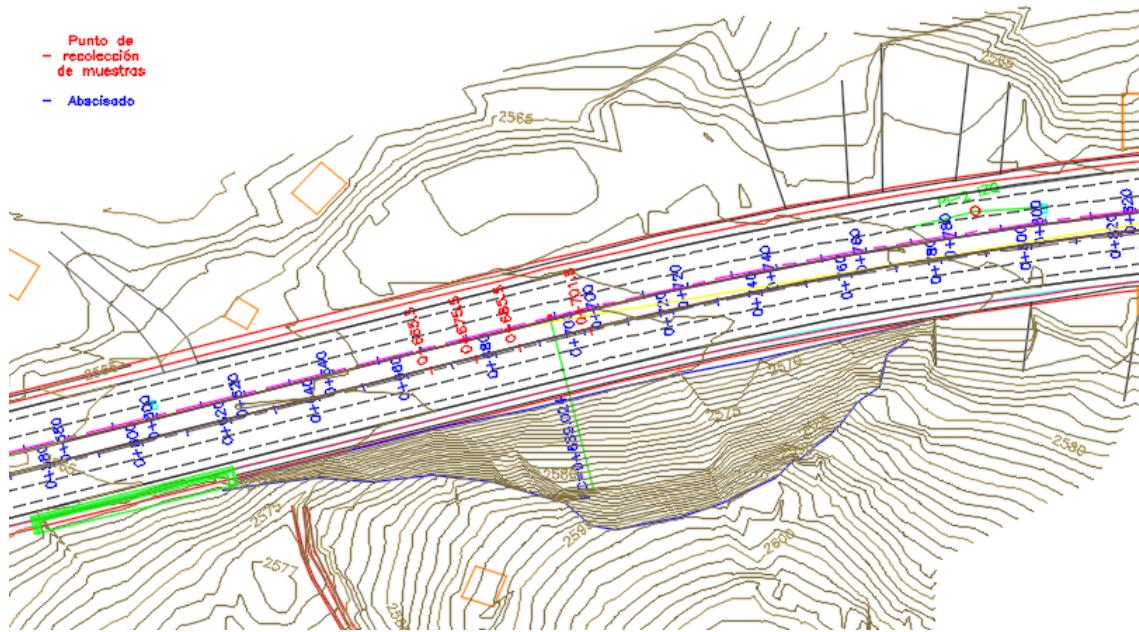


Figura 3-1. Ubicación del primer tramo seleccionado para recolección de muestras.

El segundo tramo seleccionado para la recolección de muestras se encuentra en la provincia del Cañar y corresponde al tramo Guangarcucho – Azogues. El tramo inicia en la abscisa 11+058.00, a partir del sector El Descanso, en donde la vía cruza con la línea divisoria entre la provincia de Azuay y Cañar, como se puede ver en la figura 3-2.

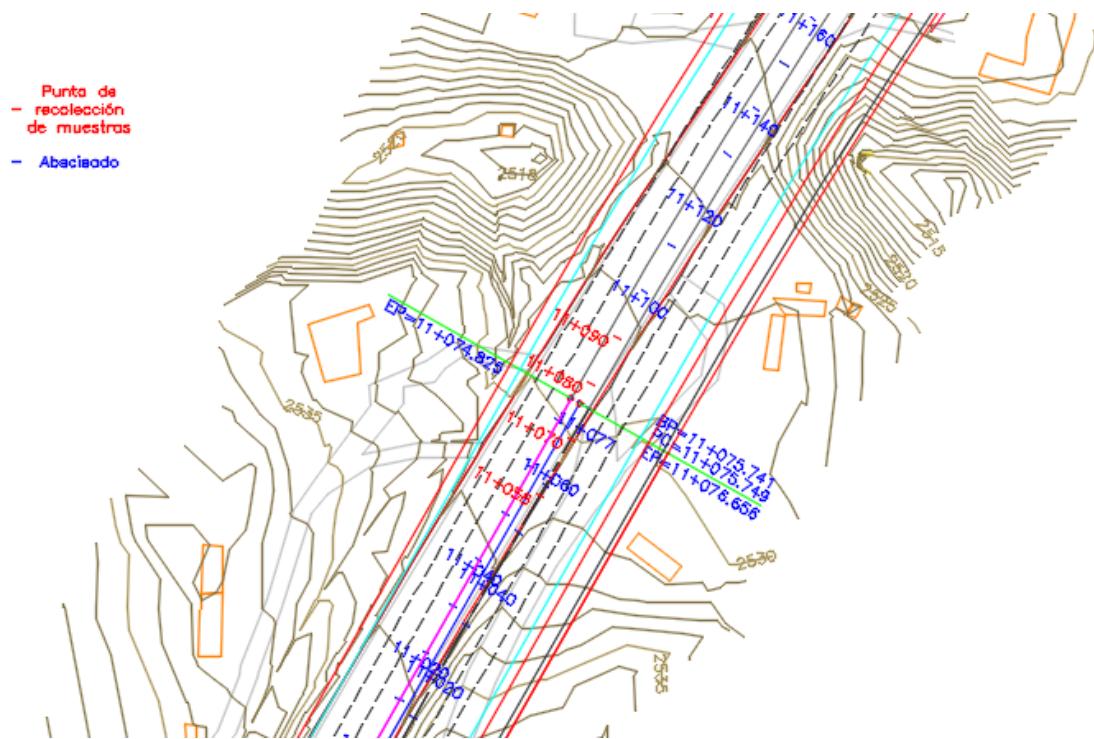


Figura 3-2. Ubicación del segundo tramo seleccionado para recolección de muestras.



### 3.1.2. Descripción de los sitios de investigación

#### a) Descripción del tramo 1

El tramo 1 presenta un subdren longitudinal construido a la orilla de la vía, el cual está conformado de material granular drenante y un tubo colector perforado sin geotextil como filtro. El subdren se encuentra conectado directamente con la estructura del pavimento, como se puede apreciar en la figura 3-3.

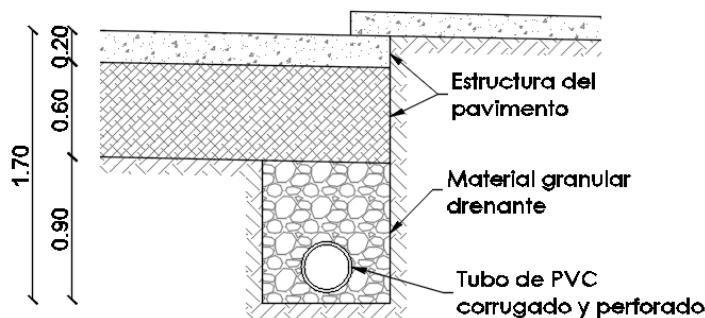


Figura 3-3. Subdren longitudinal construido en el tramo 1.

Debido a la ausencia de geotextil, el subdren se encontraba totalmente colmatado tanto en su material drenante como en el tubo colector, como se puede apreciar en la figura 3-4.



Figura 3-4. Estado actual del subdren presente en el tramo 1.

### b) Descripción del tramo 2

El tramo 2 presenta un subdren longitudinal construido en la orilla de la vía, conformado por material granular drenante, geotextil como filtro y un tubo colector perforado, como se puede ver en la figura 3-4.

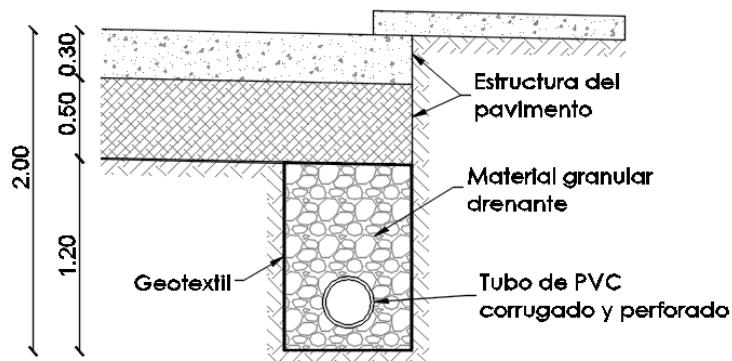


Figura 3-5. Subdren longitudinal construido en el tramo 2.

Debido a las condiciones en que se realizaban las excavaciones, no se pudo recolectar muestras del material drenante debido a la alteración de este material con el del suelo a su alrededor al momento de la excavación, como se puede verificar en la figura 3-6. Sin embargo, se recolectaron satisfactoriamente muestras del material junto al subdren y del suelo natural sin presentar alteración alguna.



Figura 3-6. Estado actual del subdren presente en el tramo 2.

## 3.2. TRABAJOS DE CAMPO Y MUESTRAS OBTENIDAS



### 3.2.1. Proceso de recolección

Para la recolección de muestras se aprovecharon las excavaciones correspondientes a las readecuaciones viales en cada uno de los tramos. Las excavaciones producidas en cada tramo dejaron en descubierto los subdrenes existentes, donde se recolectaron las muestras necesarias para el estudio. La recolección de muestras se realizó de acuerdo a la metodología de recolección explicada en el capítulo 1.

### 3.2.2. Muestras obtenidas

#### a) Muestras obtenidas en el tramo 1

En el tramo 1 se establecieron 4 puntos de recolección de muestras. En cada punto se recolectaron muestras del material junto al subdren, material natural y material granular drenante correspondiente al subdren expuesto, como se detalla en la tabla 3-1.

-	Abscisa	Punto GPS (UTM)	Zona	Profundidad (m)	Muestras obtenidas
<b>Punto 01</b>	0+665.50	718495	9676596	17 M	1.30 Suelo junto al subdren Suelo natural Material drenante
<b>Punto 02</b>	0+675.60	718496	9676620	17 M	1.30 Suelo junto al subdren Suelo natural Material drenante
<b>Punto 03</b>	0+685.50	718510	9676632	17 M	1.30 Suelo junto al subdren Suelo natural Material drenante
<b>Punto 04</b>	0+701.50	718529	9676626	17 M	1.30 Suelo junto al subdren Suelo natural Material drenante

Tabla 3-1. Puntos de recolección del tramo 1.

#### b) Muestras obtenidas en el tramo 2

Al igual que en el tramo 1 se establecieron 4 puntos de recolección de muestras. En cada punto se recolectaron muestras de suelo junto al subdren y suelo natural. La muestra de material granular drenante no se recolectó debido a las condiciones del área de recolección y el método de excavación. La descripción de cada punto de recolección de muestras se detalla en la tabla 3-2.



	Abscisa	Punto GPS (UTM)	Zona	Profundidad (m)	Muestras obtenidas
<b>Punto 05</b>	11+070.00	738009	9694368	17 M	1.50 Suelo junto al subdren Suelo natural
<b>Punto 06</b>	11+058.00	737998	9694356	17 M	1.50 Suelo junto al subdren Suelo natural
<b>Punto 07</b>	11+080.00	738015	9694372	17 M	1.50 Suelo junto al subdren Suelo natural
<b>Punto 08</b>	11+090.00	738017	9694378	17 M	1.50 Suelo junto al subdren Suelo natural

Tabla 3-2. Puntos de recolección del tramo 2.

### 3.3. TRABAJOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS

Los trabajos de laboratorio realizados sobre las muestras recolectadas son los ensayos que corresponden a las normas ASTM D – 2487 (clasificación de suelos), ASTM D – 4318 (límites de Atterberg) y ASTM D – 422 (hidrómetro), las cuales se describen en el capítulo 2.

De acuerdo a la tabla 2-1 (Límites de tamaño de suelos separados) se consideraron los tamaños de partículas de arena, limo y arcilla en las curvas granulométricas para el estudio del material fino de las muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; es decir, se ha considerado el porcentaje de material pasante del tamiz No. 4 (4.75mm). Para el estudio de las arcillas en el suelo, se consideraron el porcentaje de material pasante correspondiente a los diámetros de 0.01 mm, 0.005 mm y 0.002 mm obtenidos a partir del ensayo del hidrómetro para completar las curvas granulométricas. Los resultados de los ensayos completos de cada una de las muestras recolectadas se presentan en el anexo A.

### 3.3.1. Resultados obtenidos en el Tramo 1

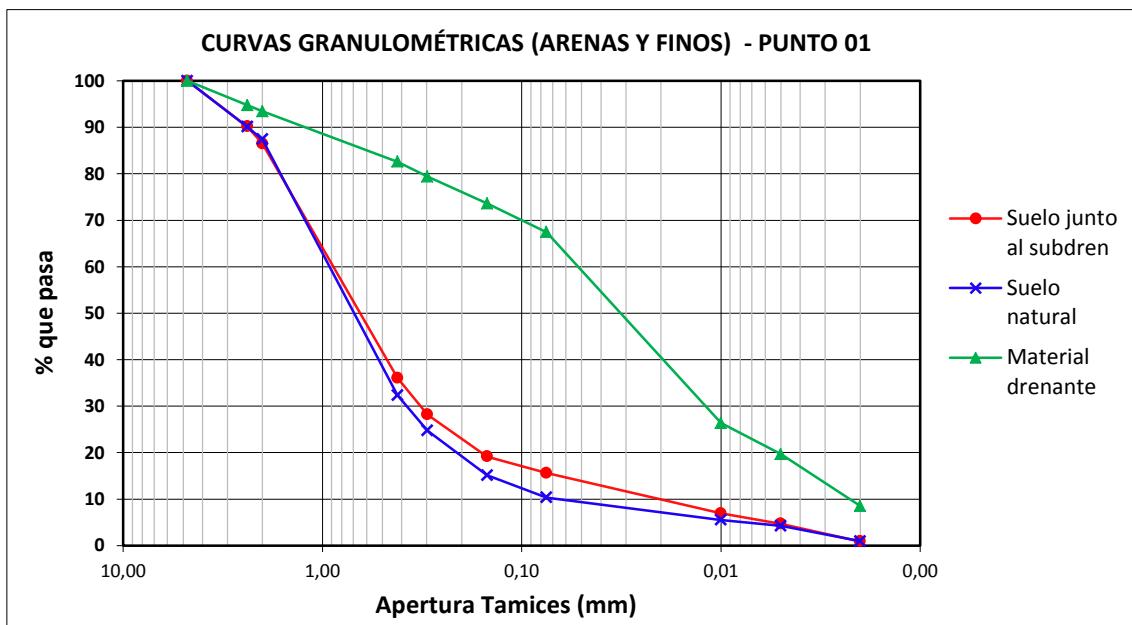


Figura 3-7. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 01 del tramo 1.

El contenido de arenas en el suelo junto al subdren y el suelo natural es mayor que el material drenante, presentando porcentajes de 84.40%, 89.66% y 32.54% respectivamente. El contenido de limos en el material drenante es mayor que el contenido en el suelo junto al subdren y el suelo natural, presentando porcentajes de 47.80%, 10.92% Y 6.09% respectivamente. El contenido de arcillas se similar en los suelo junto al subdren y el suelo natural pero mayor en el material drenante, presentando porcentajes de 4.68%, 4.25% y 19.66% respectivamente. Se ha clasificado al suelo junto al subdren como arena arcillosa (SC), al suelo natural como arena bien graduada con limo (SW-SM) y al material drenante como limo arenoso (ML).

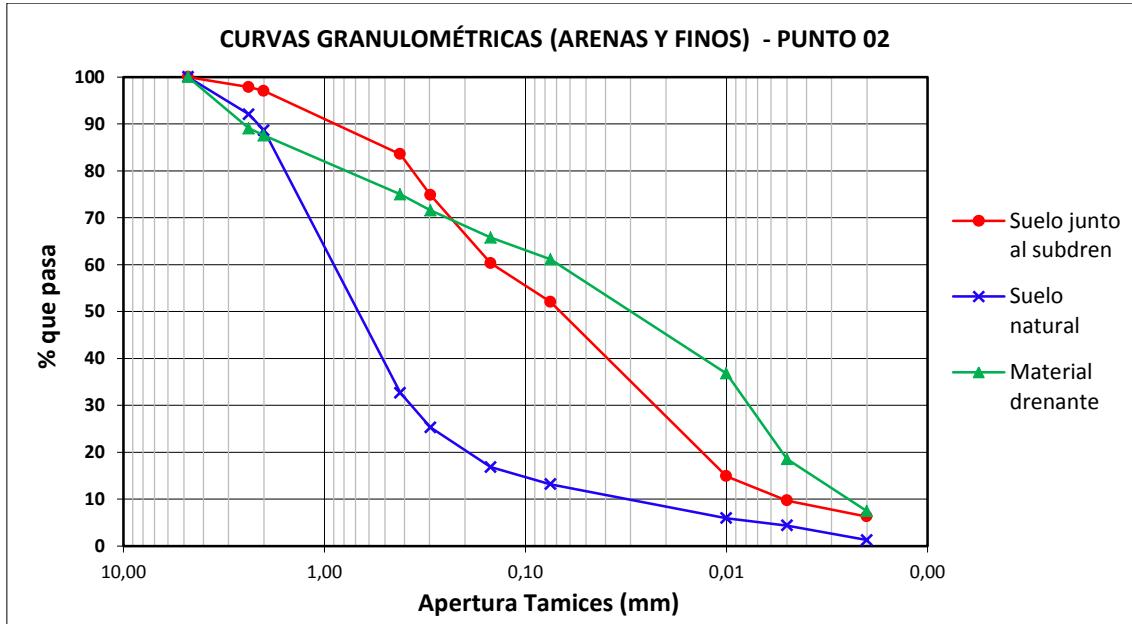


Figura 3-8. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 02 del tramo 1.

El contenido de arenas es mayor en el suelo junto al subdren y el suelo natural con respecto al material drenante, presentando contenidos de 47.94%, 86.84% y 38.88% respectivamente. El suelo natural presenta un bajo contenido de limos con respecto al suelo junto al subdren y al material dreanante, donde los contenidos se asemejan, siendo los contenidos de 8.78%, 42.37% y 42.58% respectivamente. El contenido de arcillas es mayor en el material drenante con respecto al suelo junto al subdren y al suelo natural, siendo los contenidos de 18.54%, 9.70% y 4.37% respectivamente. Se ha clasificado al suelo junto al subdren como arcilla densa arenosa (CH), al suelo natural como arena arcillosa (SC) y al material drenante como limo arenoso (ML).

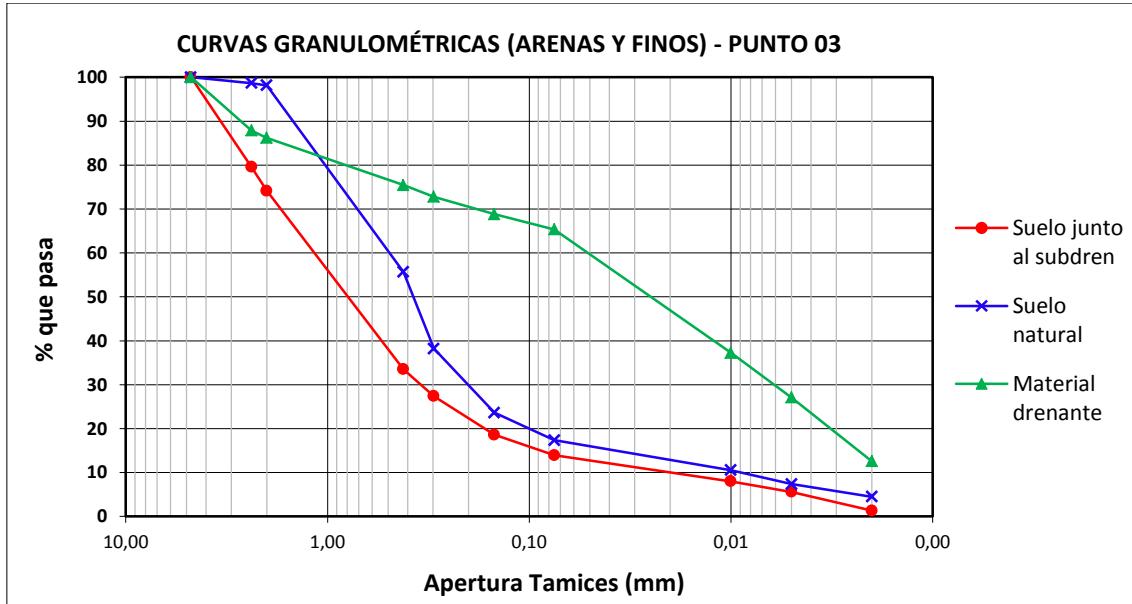


Figura 3-9. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 03 del tramo 1.

El contenido de arenas se asemejan en el suelo junto al subdren y el suelo natural con contenidos del 86.06% y 82.65% respectivamente, siendo estos contenidos mayor al del material drenante, el cual presenta un contenido de arena de 34.64%. El porcentaje de limos es mucho mayor en el material drenante con respecto al suelo junto al subdren y al suelo natural, en donde los contenidos se asemejan, siendo los contenidos de 38.27%, 8.37% y 9.99% respectivamente. El contenido de arcillas es mayor en el material drenante con respecto al suelo junto al subdren y al suelo natural, presentándose contenidos de 27.09%, 7.36% y 5.56% respectivamente. Se ha clasificado al suelo junto al subdren y al suelo natural como arena arcillosa (SC) y al material drenante como limo arenoso (ML).

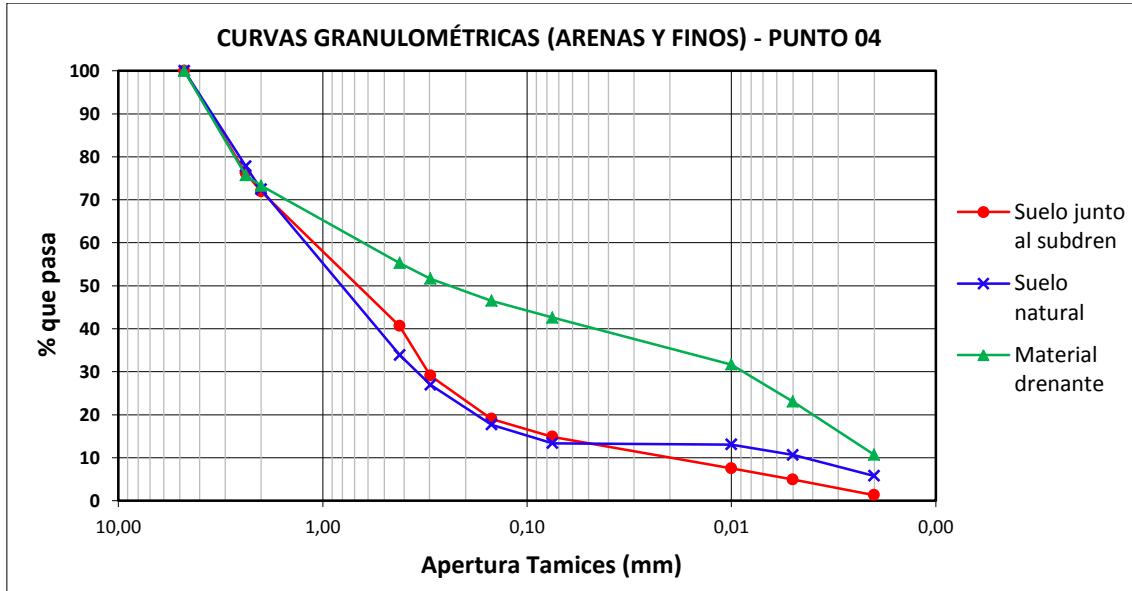


Figura 3-10. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 04 del tramo 1.

El contenido de arenas se asemeja en el suelo natural y en suelo junto al subdren, siendo los contenidos de 86.63% y 85.14% respectivamente. El material drenante presenta un contenido menor de arenas igual a 57.41%. El contenido de limos mayor en material drenante con respecto a los contenidos en el suelo junto al subdren y el suelo natural, siendo los contenidos de 19.55%, 9.97% y 2.74% respectivamente. El contenido de arcillas es mayor en el material drenante con respecto al suelo natural y al suelo junto al subdren, siendo este último el menor contenido, se presentan contenidos de 23.04%, 10.63% y 4.89%. Se ha clasificado al suelo junto al subdren y al suelo natural como arenas arcillosas (SC) y al material drenante como arena limosa (SM).

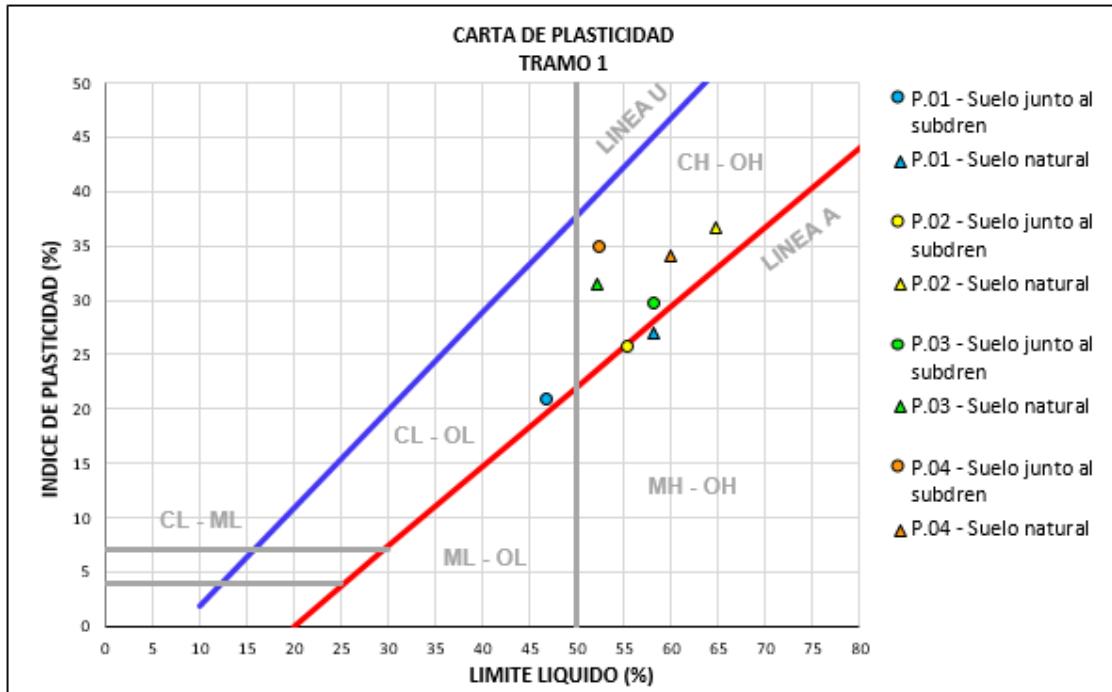


Figura 3-11. Carta de plasticidad de las muestras recogidas en el tramo 1.

De acuerdo a los límites de Atterberg obtenidos para cada muestra se puede ver según la carta de plasticidad para el tramo 1, que la mayoría de muestras caen dentro del grupo de arcillas inorgánicas de alta plasticidad, a diferencia de las muestras de suelo junto al subdren del punto 02 y el suelo natural del punto 01, quienes caen en el grupo de limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas, y la muestra de suelo junto al subdren del punto 01 que cae en el grupo de arcillas inorgánicas de plasticidad media. El límite líquido en el suelo junto al subdren es menor al límite líquido del suelo natural para el mismo punto de recolección a excepción del punto 03, donde el límite líquido es mayor en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural.

### 3.3.2. Resultados obtenidos en el Tramo 2

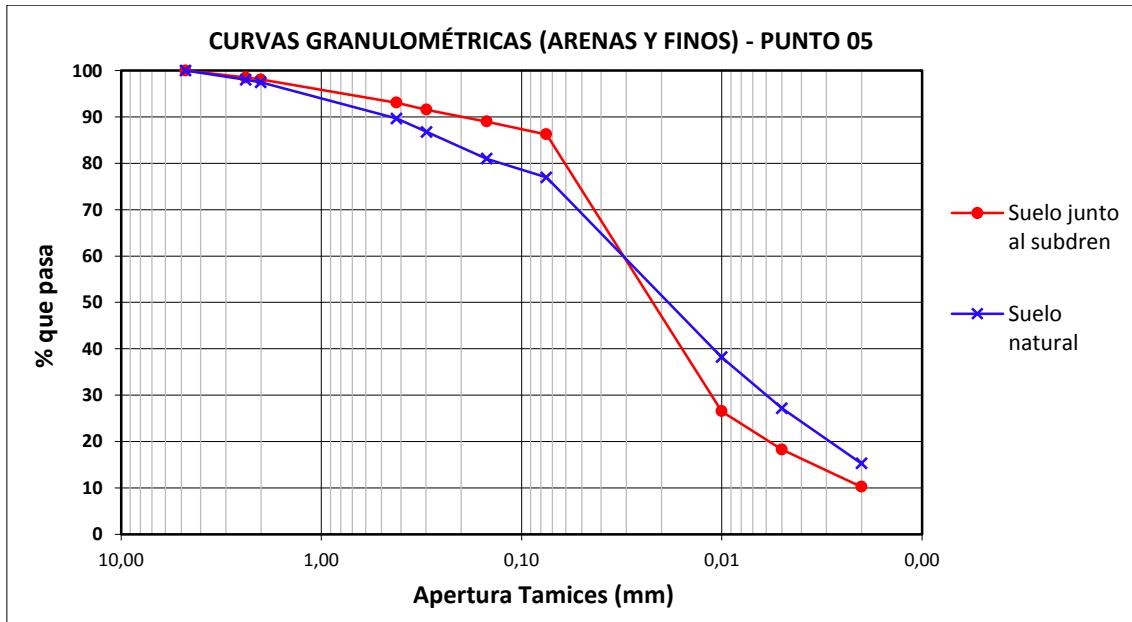


Figura 3-12. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 05 del tramo 2.

El contenido de arenas es mayor en el suelo natural con respecto al suelo junto al subdren, con contenidos de 23.04% y 13.76% respectivamente. El porcentaje de limos es mayor en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural, con contenidos de 67.68% y 49.35% respectivamente. El contenido de arcillas presenta un contenido mayor en el suelo natural que el suelo junto al subdren, siendo los contenidos de 27.61% y 18.56% respectivamente. El suelo junto al subdren y el suelo natural se han clasificado como arcillas densas arenosas (CH)

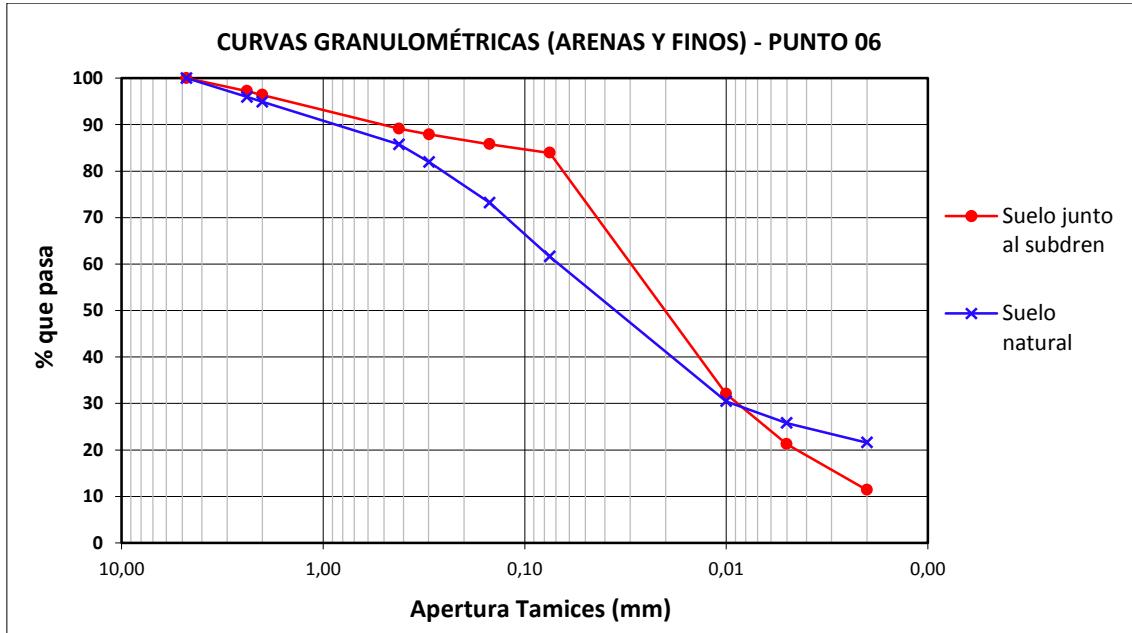


Figura 3-13. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 06 del tramo 2.

El contenido de arenas es mayor en el suelo natural que el suelo junto al subdren, con contenidos de 38.39% y 16.07% respectivamente. El contenido de arenas en el suelo junto al subdren es mayor que el contenido del suelo natural, con contenidos de 62.33% y 34.64% respectivamente. El contenido de arcilla es mayor en el suelo natural sin presentar gran diferencia con respecto al suelo junto al subdren, con contenidos de 26.97% y 21.60%. Se ha clasificado el suelo junto al subdren como arcilla densa arenosa (CH) y al suelo natural como arcilla ligera arenosa (CL).

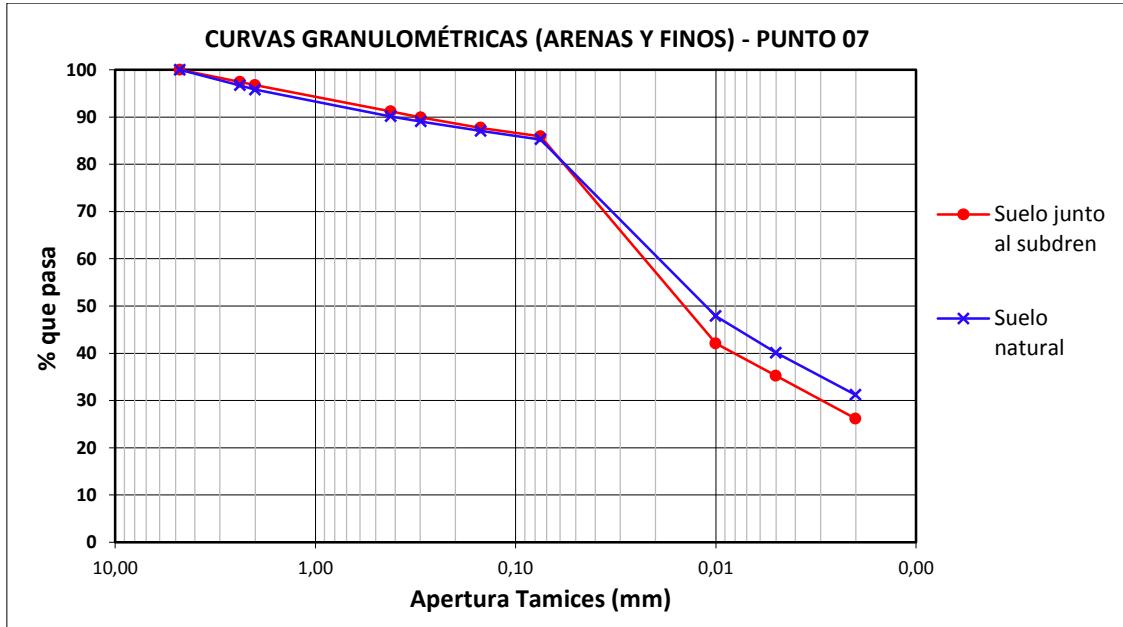


Figura 3-14. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 07 del tramo 2.

El contenido de arenas en el suelo junto al subdren y el suelo natural son semejantes, presentando contenidos de 14.08% y 14.75% respectivamente. De igual manera no se presenta gran diferencia en el contenido de limos entre el suelo natural y el suelo junto al subdren, presentando contenidos de 43.77% y 49.52%. El contenido de arcillas es mayor en el suelo natural que el suelo junto al subdren, con contenidos de 41.48% y 36.40% respectivamente. Se ha clasificado al suelo natural y al suelo junto al subdren como arcillas arenosas densas (CH).

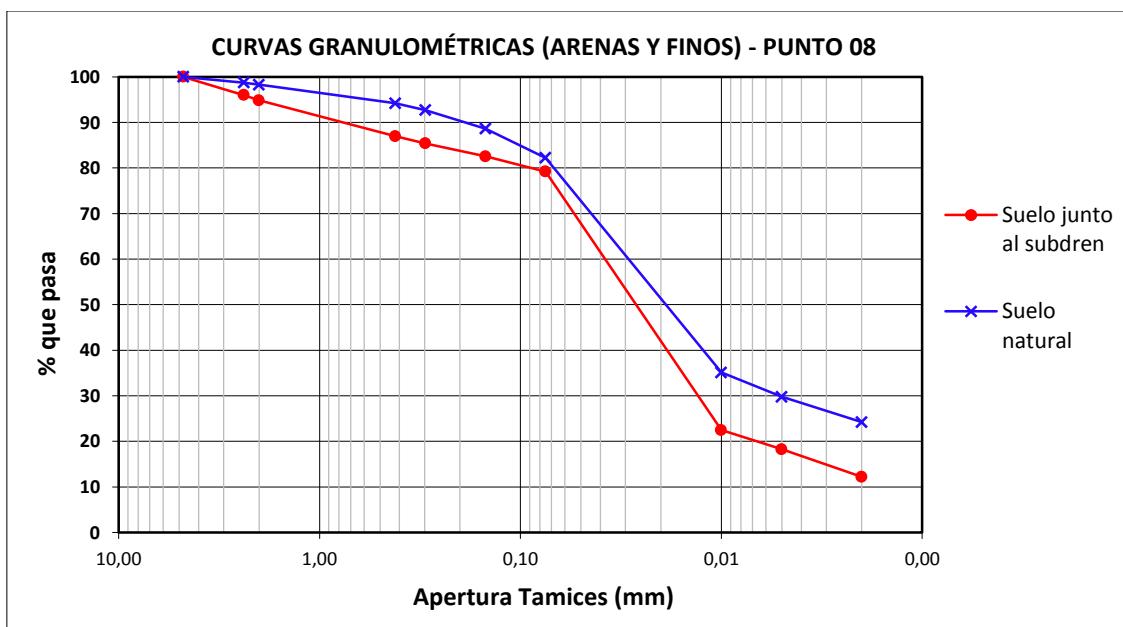


Figura 3-15. Curvas granulométricas de arenas y finos de las muestras recogidas en el punto 08 del tramo 2.

El contenido de arenas es mayor en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural, con contenidos de 20.82% y 17.79%. El contenido de limos es mayor en el suelo junto al subdren que el suelo natural, presentando contenidos de 60.51% y 51.16% respectivamente. El contenido de arcillas es menor en el suelo junto al subdren que el suelo natural, con contenidos de 18.68% y 31.04% respectivamente. El suelo junto al subdren y el suelo natural se han clasificado como arcillas densas arenosas (CH).

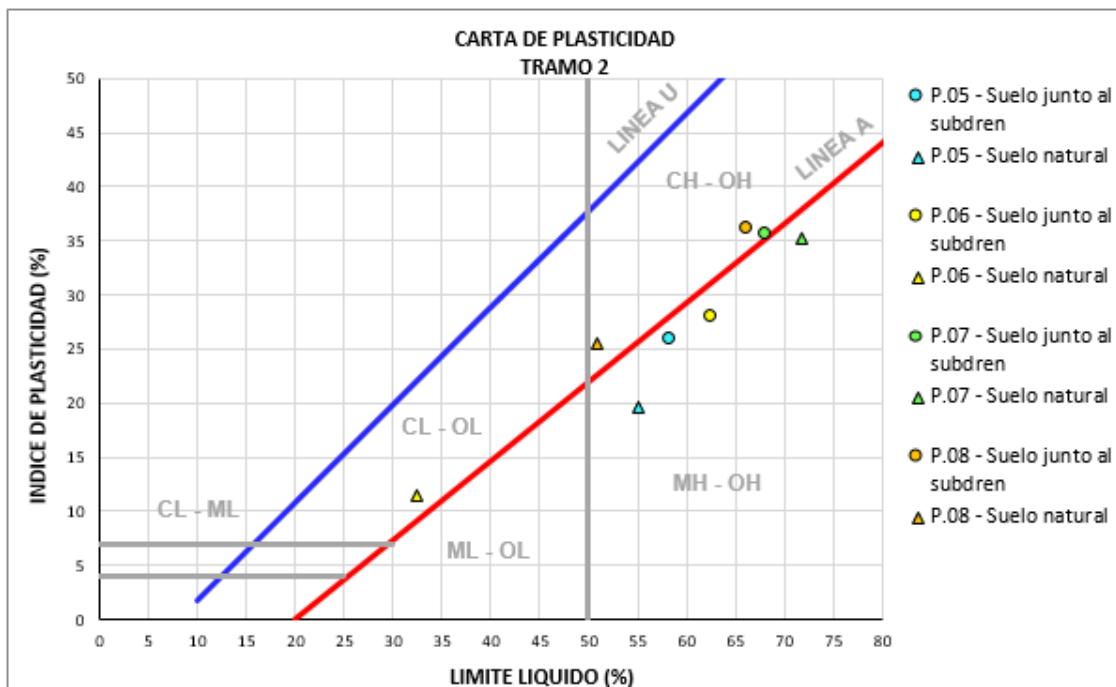


Figura 3-16. Carta de plasticidad de las muestras recogidas en el tramo 2.

Según los límites de Atterberg obtenidos para cada muestra en el tramo 2, la mayor parte de muestras cae en el grupo de limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas. Otra parte considerable de muestras cae en el grupo de arcillas inorgánicas de alta plasticidad, que corresponde a las muestras de suelo junto al subdren de los puntos 08 y 07, y la muestra de suelo natural del punto 08. La muestra de suelo natural del punto 06 cae en el grupo de arcillas inorgánicas de plasticidad media, alejada de la tendencia de las demás muestras. El límite líquido en la muestra de suelo natural es mayor que en el suelo junto al subdren para todos los puntos excepto para el punto 07, donde el límite líquido es mayor en el suelo junto al subdren que el suelo natural.

### 3.3.3. Resultados obtenidos para la muestra de geotextil obtenida en el Tramo 2



De acuerdo a la similitud en las características físicas entre la muestra de geotextil recogida en el tramo 2 y una muestra de geotextil nuevo, se ha determinado que el geotextil perteneciente al subdren ubicado en el tramo 2 pertenece al tipo geotextil no tejido 2000, el cual presenta las propiedades mostradas en la tabla 3-5.

Propiedades Mecánicas	Método de ensayo	Unidad	Valor
Resistencia a la tensión	ASTM D 4632	N (lb)	607
Elongación	ASTM D 4632	%	75
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 4833	N (lb)	360
Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D 4533	N (lb)	239
Resistencia al estallido	ASTM D 3786	kPa (psi)	1794
Propiedades Hidráulicas			
Tamaño de abertura aparente (TAA)	ASTM D 4751	mm	0.150
Permitividad	ASTM D 4491	s <sup>-1</sup>	2
Permeabilidad	ASTM D 4491	cm/s	35 x 10 <sup>-2</sup>
Tasa de flujo	ASTM D 4491	l/min/m <sup>2</sup>	6795
Espesor	ASTM D 5199	mm	1.8
Propiedades Físicas			
Resistencia UV @500 horas	ASTM D 4355	% resistencia retenida	> 70

Tabla 3-3. Propiedades del geotextil no tejido 2000 (PAVCO, 2009).

### 3.4. DESCRIPCIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA RED DE FLUJO Y RESULTADOS

La modelación de la red de flujo en cada tramo de vía seleccionado se realizó utilizando un software que utiliza elementos finitos para resolver el problema de flujo en dos dimensiones. Este análisis se realizó sobre una sección transversal representativa de cada tramo, cuyo perfil de terreno se obtuvo a partir de la topografía original.

Las condiciones de frontera para la solución del modelo se establecen en base a la carga hidráulica sobre el subdren al inicio de la red de flujo. De esta manera se estudia el gradiente hidráulico crítico ( $i_c = 1$ ) junto al subdren en base a la relación de la altura de la carga hidráulica  $H$  y la altura total desde el subdren hasta la superficie del terreno  $H_T$  al inicio de la red de flujo, a la distancia  $L$  para cada tramo (figura 3-17).

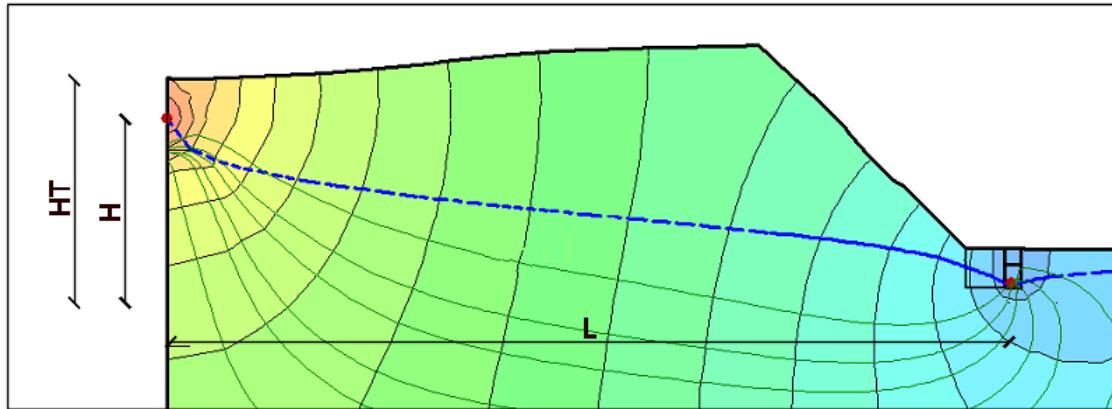


Figura 3-17. Esquema de análisis de sensibilidad.

La permeabilidad para introducir dentro del modelo ha sido tomada a partir de la figura 2-6 (valores de coeficiente de permeabilidad en cm/seg) para este tipo de materiales, esto se hizo de esta forma por cuanto las variaciones que presente este parámetro no tiene influencia en la red de flujo que se forma y por lo tanto en el cálculo del gradiente hidráulico que es el factor que nos interesa evaluar de manera más precisa, el cambio en la permeabilidad del suelo afecta el caudal que fluirá hacia el subdren pero no las condiciones de gradiente hidráulico.

GeoStudio permite el uso de regiones para definir la geometría de un problema y para facilitar su discretización. El uso de regiones proporciona la ventaja de dividir un dominio grande en piezas pequeñas, lo que permite trabajar y analizar estas piezas pequeñas, conectándolas entre sí para obtener el comportamiento del dominio completo, siguiendo el mismo concepto de los elementos finitos. Siguiendo este concepto, se han establecido regiones convenientes para el estudio en cada modelación. En cada región se han establecido las propiedades necesarias y se ha densificado la malla correspondiente a los elementos finitos en estas regiones para un análisis preciso.

#### 3.4.1. Modelación de la red de flujo en el tramo 1 y resultados

El perfil de terreno y la sección transversal representativa para el tramo 1 obtenida a partir de la topografía original se presentan en la figura 3-18.

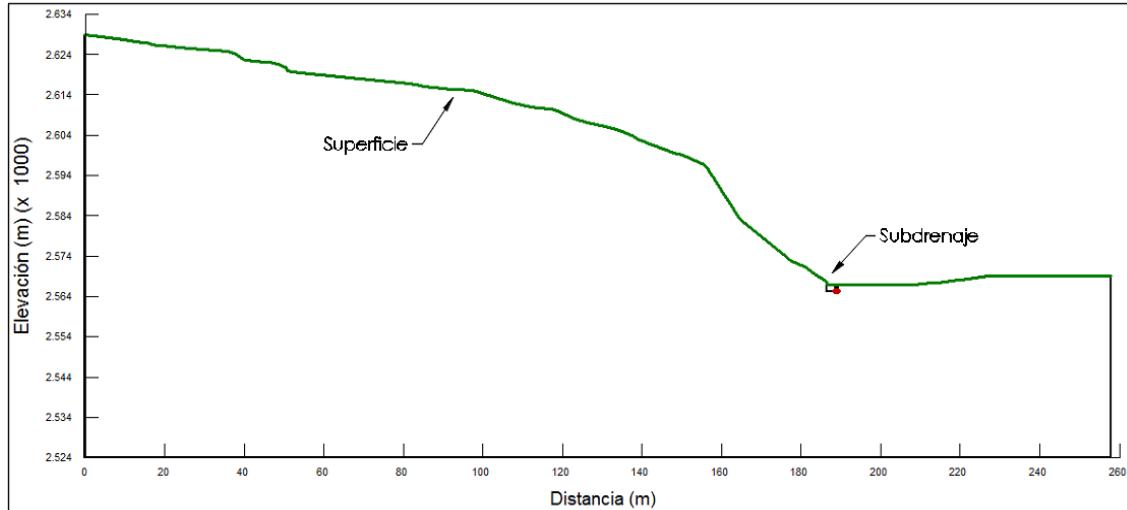


Figura 3-18. Sección transversal representativa del tramo 1 para modelación.

Las regiones determinadas en el modelo se muestran en la figura 3-19, correspondientes a la región de suelo natural, región de análisis, región de material de relleno y región de material drenante. En estas regiones se ha densificado la malla para el análisis del gradiente hidráulico. Para el suelo natural se estableció una permeabilidad de  $1e-4$  m/seg, para el material de relleno se estableció una permeabilidad de  $5e-4$  m/seg y para el material de relleno se estableció una permeabilidad de 0.1 m/seg.

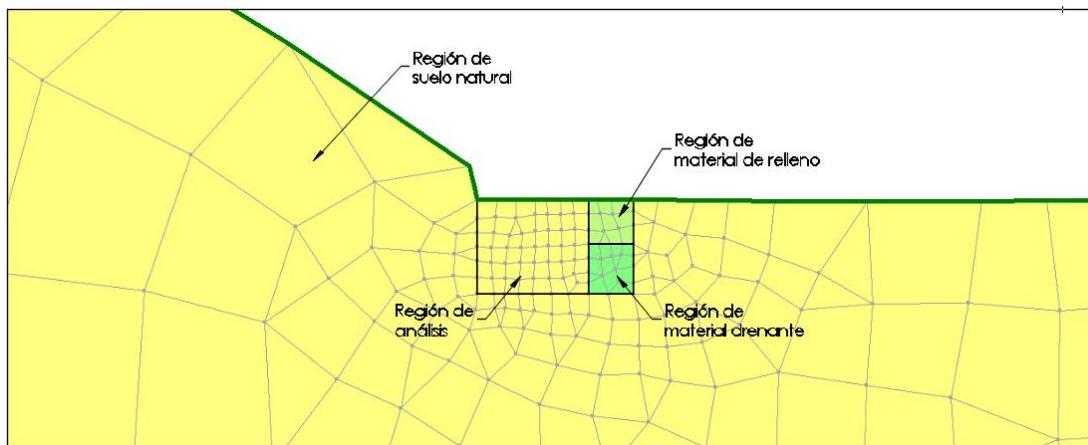


Figura 3-19. Regiones establecidas en la sección del tramo 1 para modelación.

La red de flujo obtenida a partir de las condiciones de frontera establecidas se muestra en la figura 3-20. La misma tiene inicio a una distancia  $L$  de 188.56 m, donde la altura  $H_T$  desde el subdrenaje hasta la superficie es de 63.7 m.

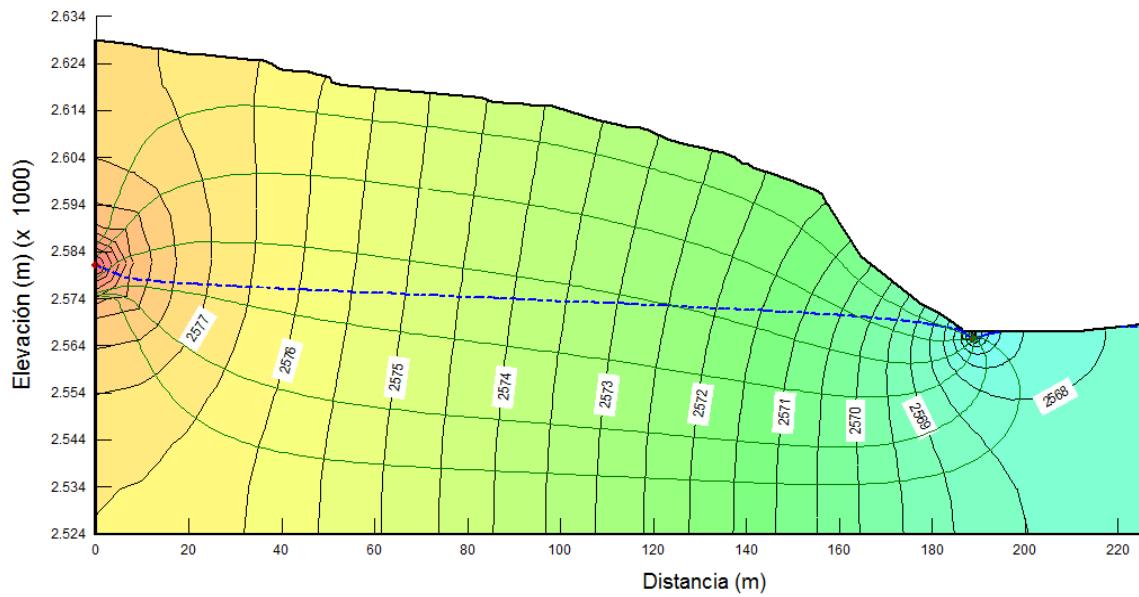
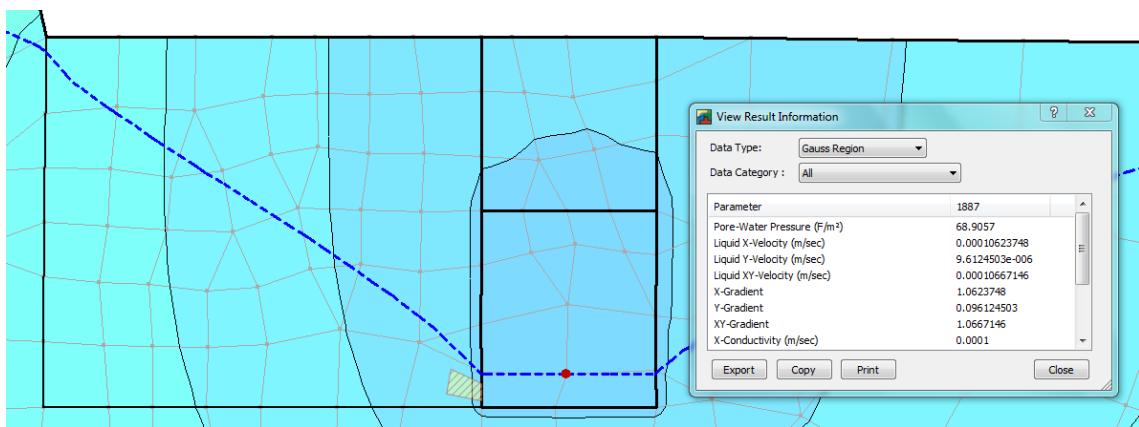
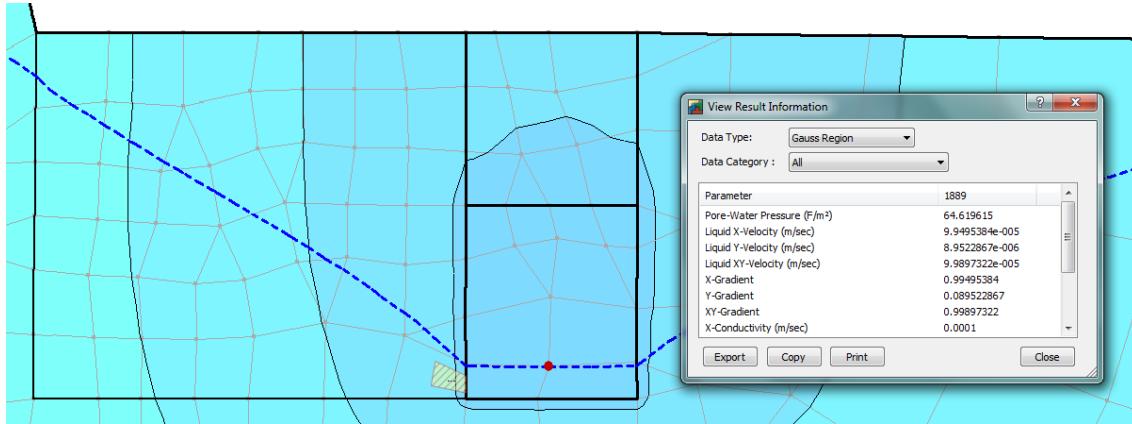
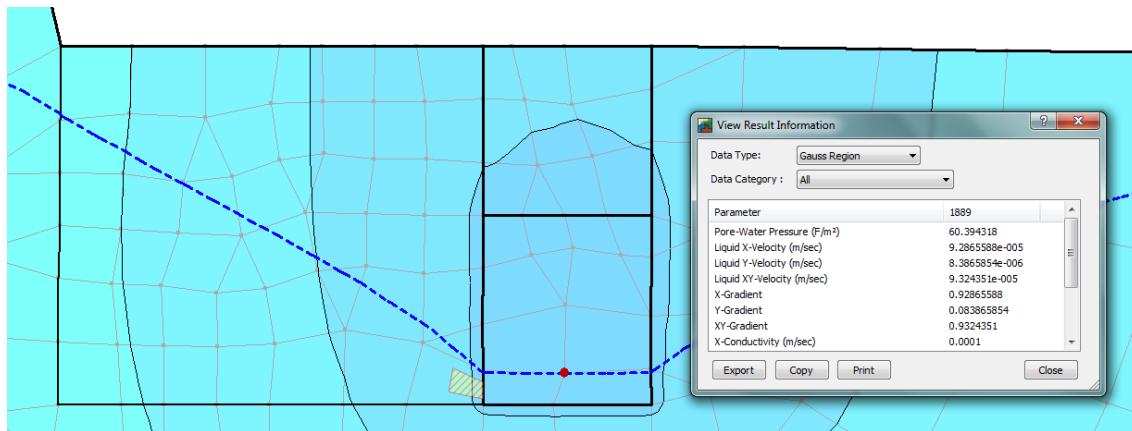


Figura 3-20. Red de flujo para el tramo 1.

Se analizan los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de la altura de la carga hidráulica sobre el subdren y la altura total desde el subdren hasta la superficie del terreno al inicio de la red de flujo, tal como se muestra en las figuras 3-21, 3-22 y 3-23.

Figura 3-21. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 15.8 m en el tramo 1.

Figura 3-22. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 14.8 m en el tramo 1.Figura 3-23. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 13.8 m en el tramo 1.

La tabla 3-6 muestra los gradientes hidráulicos obtenidos en la base del subdren para diferentes relaciones  $H/H_T$ , y las distancias a las que se produce un gradiente hidráulico de 0.6, lo que sustenta la recolección de la muestra de suelo a una distancia de 1.50 m como muestra de suelo natural.

Carga Hidráulica (H)	$H/H_T$	$H/L$	Gradiente Hidráulico (Base del subdren)	Distancia desde el subdren hasta un gradiente de 0.6 (m)
15.79	0.25	0.08	1.066	1.50
14.8	0.23	0.08	0.99	1.20
13.8	0.22	0.07	0.93	0.90
12.8	0.20	0.07	0.87	0.7
11.8	0.19	0.06	0.8	0.6
10.8	0.17	0.06	0.73	0.4

Tabla 3-4. Resultados de los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de  $H/H_T$  en el tramo 1.

### 3.4.2. Modelación de la red de flujo en el tramo 2 y resultados

El perfil de terreno y la sección transversal representativa para el tramo 2 obtenida a partir de la topografía original se presentan en la figura 3-24.

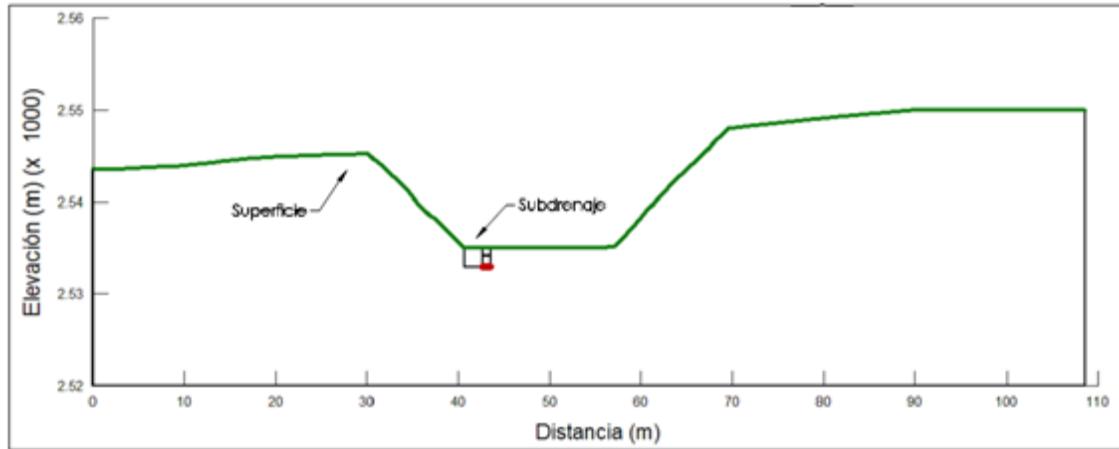


Figura 3-24. Sección transversal representativa del tramo 2 para modelación.

Las regiones determinadas en el modelo se muestran en la figura 3-25, correspondientes a la región de suelo natural, región de análisis, región de material de relleno y región de material drenante. En estas regiones se ha densificado la malla para el análisis del gradiente hidráulico.

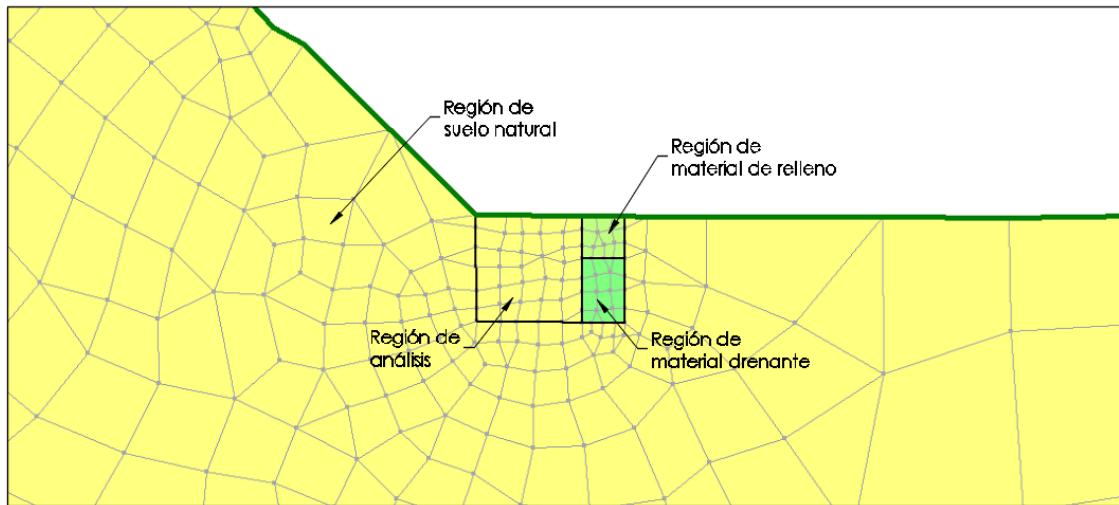


Figura 3-25. Sección transversal representativa del tramo 2 para modelación.

La red de flujo obtenida a partir de las condiciones de frontera establecidas se muestra en la figura 3-26. La misma tiene inicio a una distancia  $L$  de 42.68 m, donde la altura  $H_T$  desde el subdrenaje hasta la superficie es de 10.7 m.

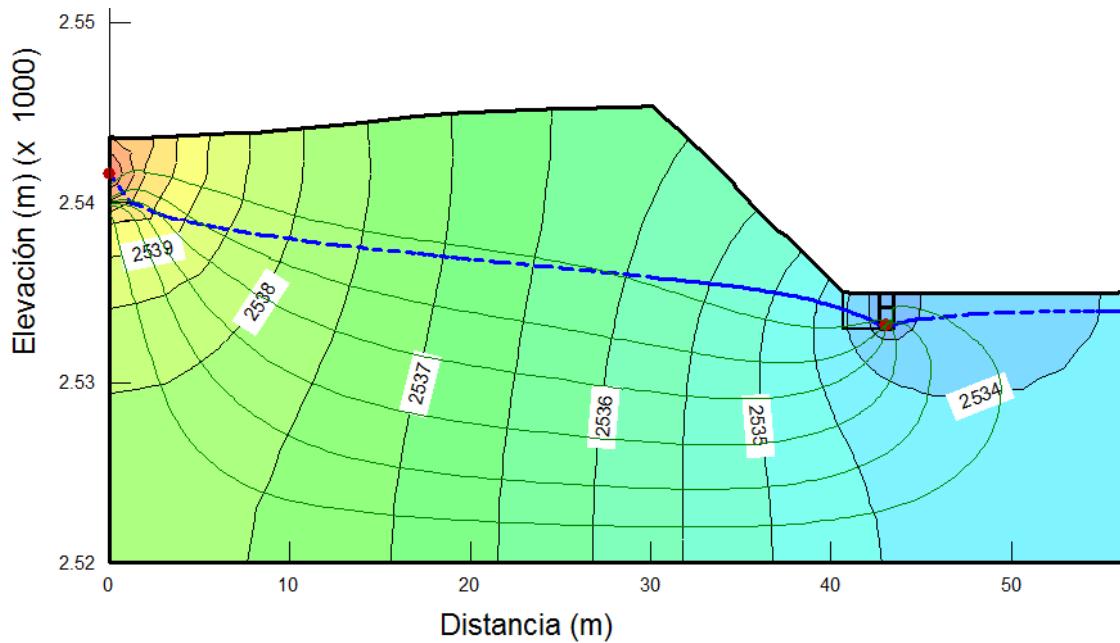


Figura 3-26. Red de flujo para el tramo 2.

Se analizan los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de la altura de la carga hidráulica sobre el subdren y la altura total desde el subdren hasta la superficie del terreno al inicio de la red de flujo, tal como se muestra en las figuras 3-27, 3-28 y 3-29.

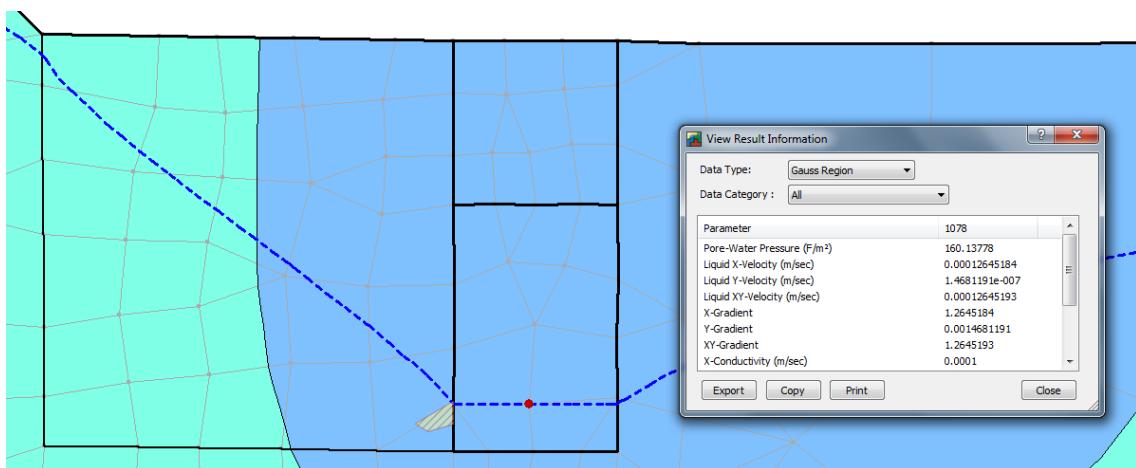
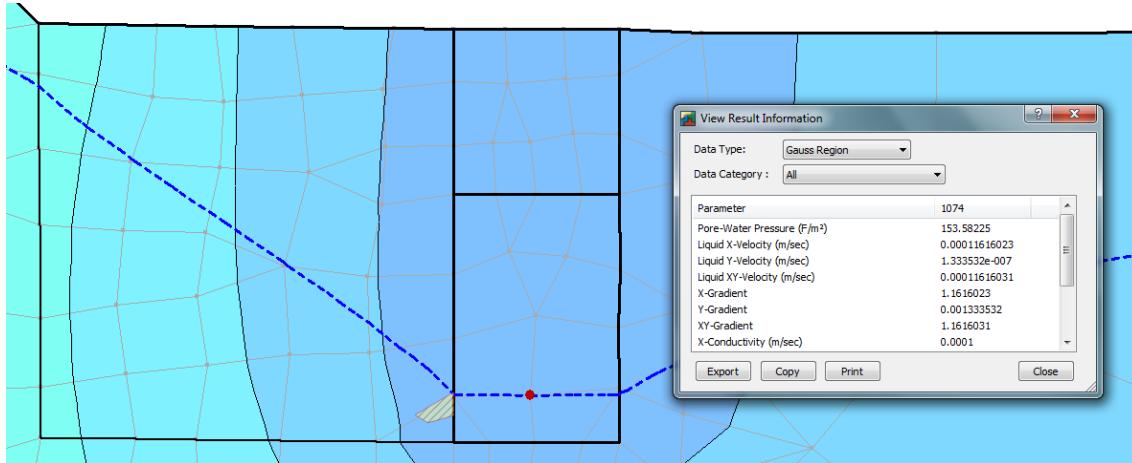
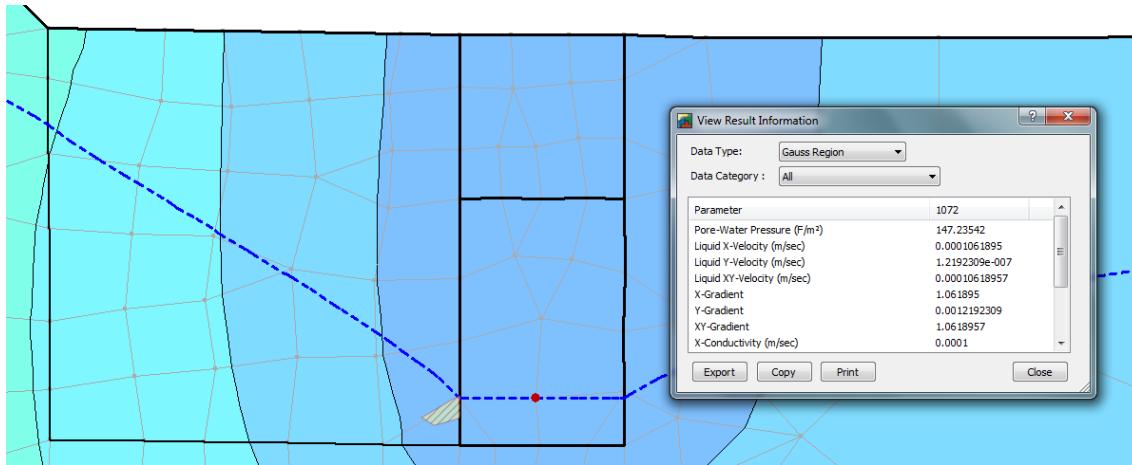


Figura 3-27. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 8.33 m en el tramo 2.

Figura 3-28. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 7.63 m en el tramo 2.Figura 3-29. Gradiente hidráulico para una carga  $H$  de 6.93 m en el tramo 2.

La tabla 3-7 muestra los gradientes hidráulicos obtenidos en la base del subdren para diferentes relaciones  $H/H_T$ , y las distancias a las que se produce un gradiente hidráulico de 0.6, lo que sustenta la recolección de la muestra de suelo a una distancia de 1.50 m como muestra de suelo natural.

Carga Hidráulica ( $H$ )	$H/H_T$	$H/L$	Gradiente Hidráulico (Base del subdren)	Distancia desde el subdren hasta un gradiente de 0.6 (m)
8.33	0.78	0.20	1.26	1.80
7.63	0.71	0.18	1.16	1.30
6.93	0.65	0.16	1.06	1.00
5.43	0.51	0.13	0.83	0.6
4.63	0.43	0.11	0.71	0.4

Tabla 3-5. Resultados de los gradientes hidráulicos para diferentes relaciones de  $H/H_T$  en el tramo 2



---

## CAPÍTULO 4

---

### 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan cada una de las curvas granulométricas pertenecientes a las muestras obtenidas en los puntos de recolección de los tramo 1 y 2. De igual manera se realiza un análisis de los límites de Atterberg obtenidos para cada muestra.

Se presenta una discusión del material filtrante óptimo para cada tramo, analizando las curvas granulométricas de suelo natural de cada muestra valida. Para el diseño óptimo del material filtrante se ha considerado los criterios de permeabilidad y retención basados en la ecuación 2-21 y la tabla 2-5 del capítulo 2, respectivamente. Según estos criterios se han establecido valores límites para la curva granulométrica del material filtrante, considerándose el criterio de que la curva granulométrica del material filtrante debería tener aproximadamente la misma forma que la curva granulométrica del suelo base, en este caso, las curvas granulométricas correspondientes al suelo natural en cada punto de recolección.

En base a los modelos de red de flujo en cada tramo se presenta un análisis de los resultados obtenidos.

#### 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL TRAMO 1

##### 4.1.1. Análisis de las curvas granulométricas en el tramo 1

###### - Punto 01

En las curvas granulométricas obtenidas para las muestras recogidas en el punto 01, se aprecia el exceso en el contenido de limos en el suelo junto al subdren en comparación al suelo natural de 4.83%, con lo que se puede concluir que existe una migración de finos a nivel de limos en este punto. No se aprecia una diferencia significativa en el contenido de arcillas entre el suelo junto al subdren y el suelo natural ya que presenta una diferencia de 0.43%, por lo que se concluye que no existe una migración de arcillas. En la figura 4-1 se presenta los contenidos de materiales en los suelos que

soportan las conclusiones establecidas de acuerdo a las curvas granulométricas.

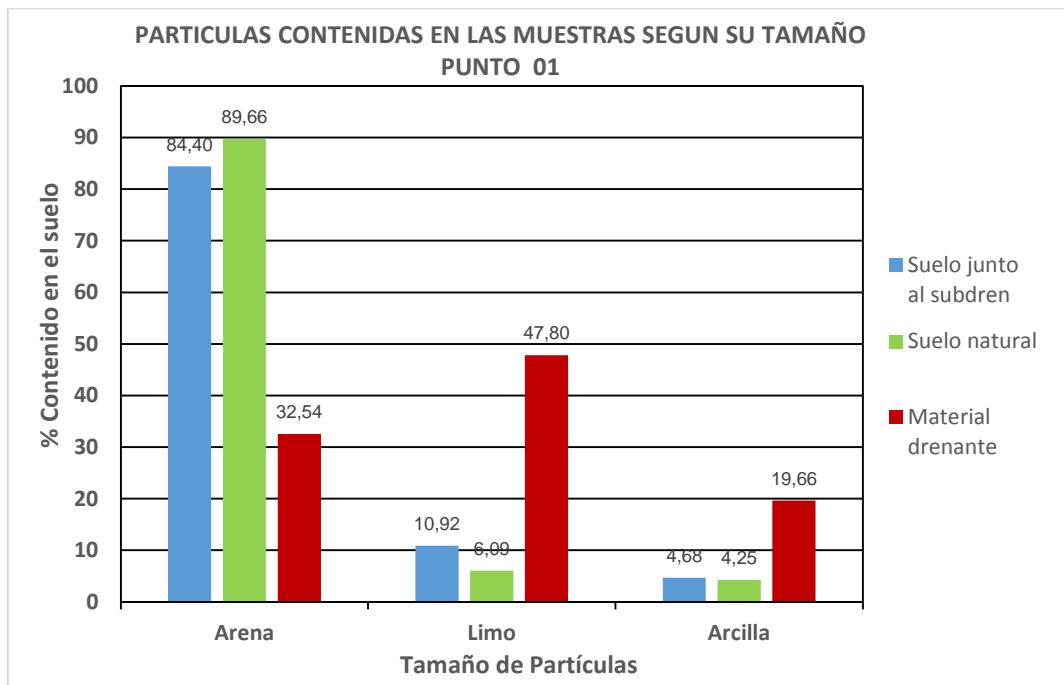


Figura 4-1. Partículas contenidas en las muestras del punto 01 según su tamaño.

El límite líquido y plástico en el suelo disminuye en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural 11% y 5.1% respectivamente, lo que corrobora la migración de limos al disminuir la plasticidad en el suelo por la presencia de limos.

El material drenante presenta un gran contenido de limos, un exceso de 36.88% con respecto al suelo junto al subdren que presenta el mayor contenido de limos frente al suelo natural, lo que soporta la conclusión una migración de limos en el suelo del punto 01.

#### - Punto 02

En los resultados obtenidos en las muestras del punto 02, se aprecia el exceso en el contenido de limos en el suelo junto al subdren en comparación al suelo natural de 33.59%, con lo que se puede concluir que existe una migración de finos a nivel de limos en este punto. Se aprecia también un ligero exceso en el contenido de arcilla en el suelo junto al subdren de 5.33%. En la figura 4-2 se presenta los contenidos de materiales en los suelos que soportan las conclusiones establecidas.

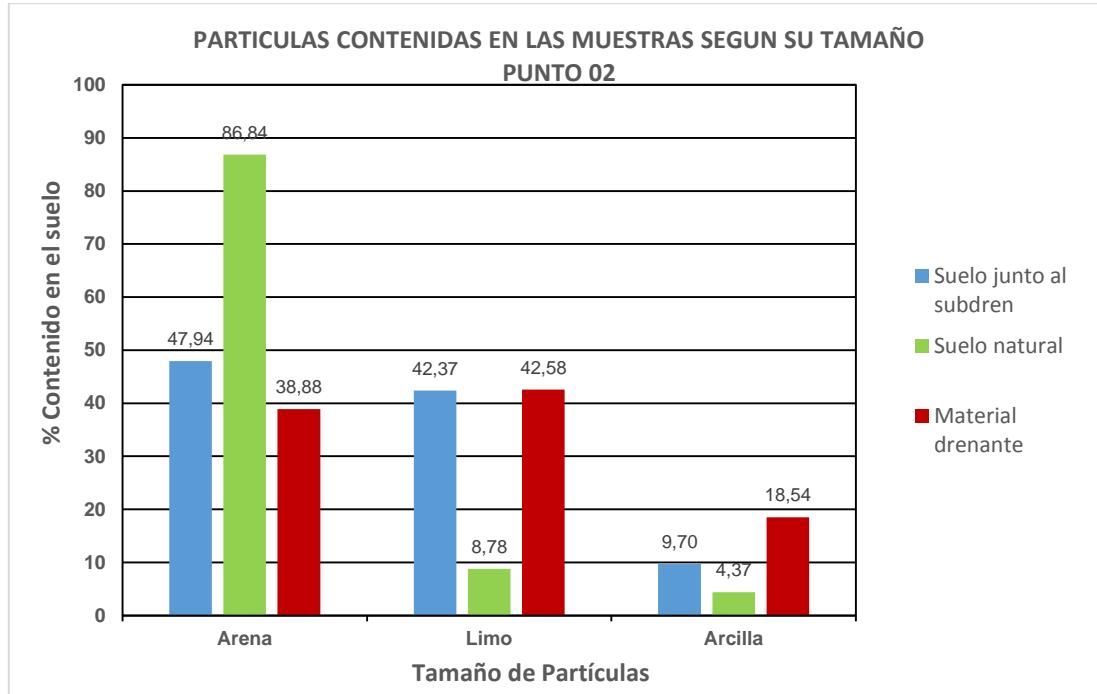


Figura 4-2. Partículas contenidas en las muestras del punto 02 según su tamaño.

El límite líquido en el suelo junto al subdren disminuye con respecto al suelo natural 9.2%, lo que corrobora la migración de limos al disminuir la plasticidad en el suelo por la presencia de limos. Sin embargo, el límite plástico del suelo junto al subdren aumenta con respecto al suelo natural 1.8% debido al ligero exceso de arcillas en el suelo junto al subdren.

El material drenante presenta un gran contenido de limos aproximado al contenido que presenta el suelo junto al subdren, con un ligero exceso de 0.21%, lo que soporta la conclusión una migración de limos en el suelo del punto 02.

- *Punto 03*

De acuerdo a los resultados obtenidos para las muestras recogidas en el punto 03, se aprecia el exceso en el contenido de todas las partículas en el suelo natural con respecto al suelo junto al subdren, arenas 3.41%, limos 1.62% y arcillas 1.8%, con lo que se concluye que no existe ninguna migración de limos en el suelo de este punto a diferencia de los puntos 01 y 02.

Los límites líquido y plástico aumentan en el suelo junto al subdren 6.1% y 8.1% respectivamente, debido a la menor presencia de limos en este suelo con respecto al suelo natural.

Debido a los resultados mencionados, se concluye que el suelo junto al subdren es diferente al suelo natural en el punto 03, por lo que no se pueden obtener conclusiones con respecto a la migración de finos.

- *Punto 04*

En los resultados obtenidos para las muestras recogidas en el punto 04, se aprecia el exceso en el contenido de limos en el suelo junto al subdren en comparación al suelo natural de 7.23%, con lo que se puede concluir que existe una migración de finos a nivel de limos en este punto. El contenido de arcillas en el suelo natural es mayor con respecto al suelo junto al subdren 5.74%. En la figura 4-3 se presenta los contenidos de materiales en los suelos que soportan las conclusiones establecidas.

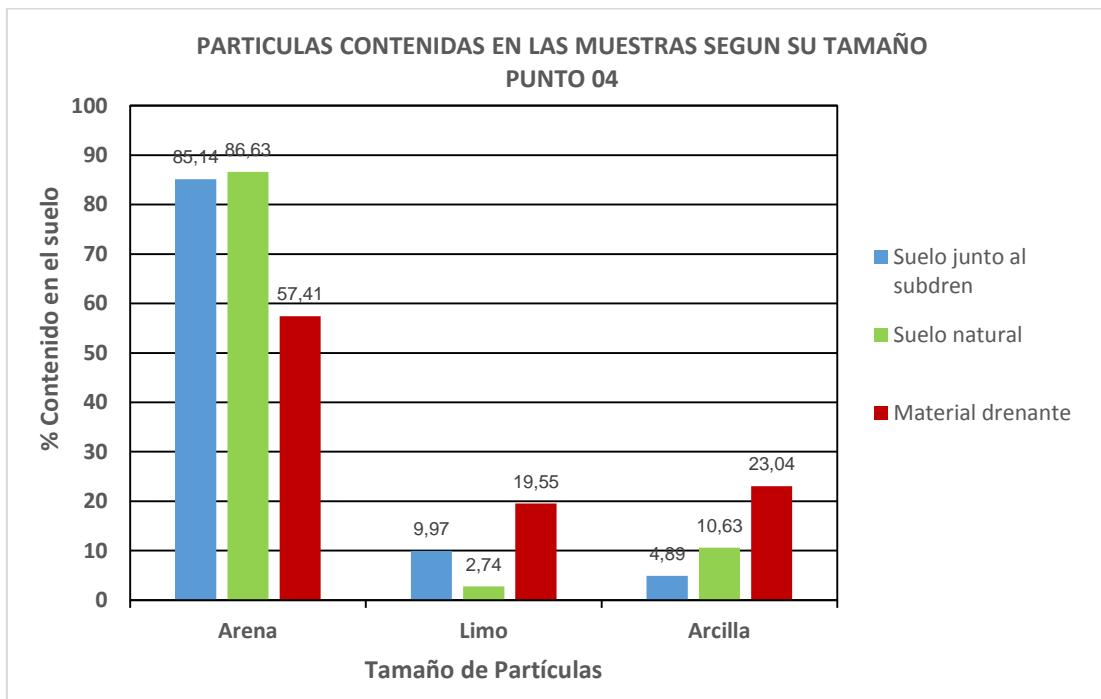


Figura 4-3. Partículas contenidas en las muestras del punto 04 según su tamaño.

El límite líquido y plástico en el suelo disminuye en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural 7.4% y 8.2% respectivamente, lo que corrobora la migración de limos al disminuir la plasticidad en el suelo por la presencia de limos.

El material drenante presenta mayor contenido de limos, 12.41% mayor contenido que el suelo junto al subdren, que presenta el mayor contenido de limos con respecto al suelo natural, lo que soporta la conclusión una migración de limos en el suelo del punto 04.

#### 4.1.2. Discusión del material filtrante óptimo para subdrenaje en el Tramo 1

En la tabla 4-1 se muestran los puntos sobre los cuales pasan las curvas para los criterios de permeabilidad y retención del material filtrante y sus graficas de muestran en las figuras 4-4, 4-5 y 4-6.

	Criterio de permeabilidad	Criterio de retención	
		Grupo de Suelo	Criterio de filtro
Punto 01	$D_{15}^F \geq 0.73 \text{ mm}$	3	$D_{15}^F \leq 9.35 \text{ mm}$
Punto 02	$D_{15}^F \geq 0.53 \text{ mm}$	3	$D_{15}^F \leq 9.05 \text{ mm}$
Punto 04	$D_{15}^F \geq 0.49 \text{ mm}$	3	$D_{15}^F \leq 14.9 \text{ mm}$

Tabla 4-1. Criterios de filtro en los diferentes puntos del Tramo 1.

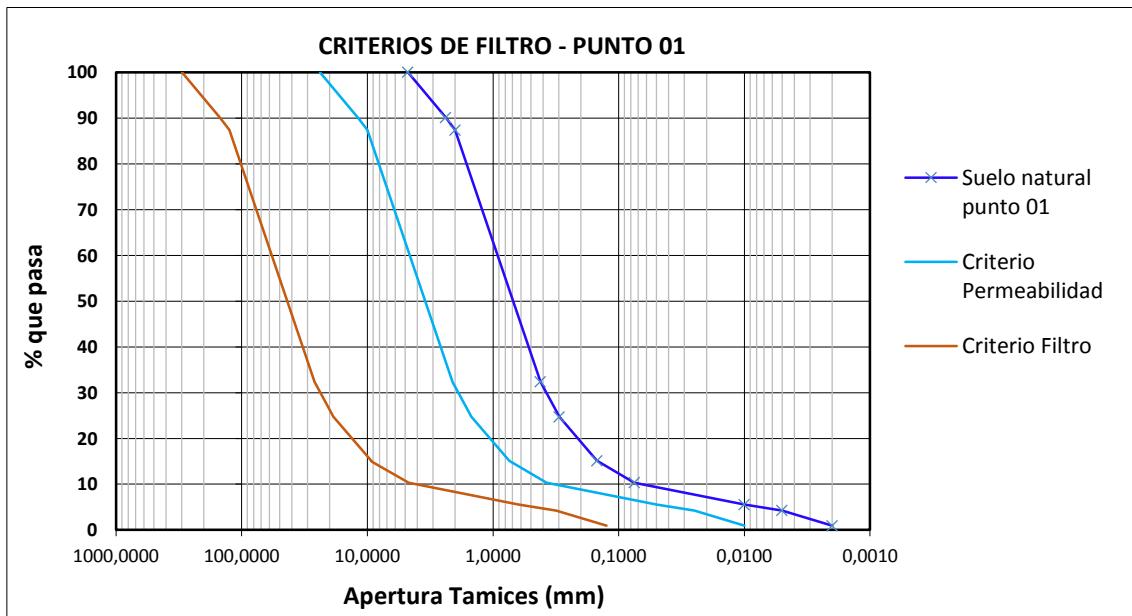


Figura 4-4. Criterios de filtro para el punto 01 del tramo 1.

El área comprendida entre las líneas de los criterios de permeabilidad y filtro es el área óptima en la que debe recaer una curva granulométrica de filtro para el suelo del punto 01 para un adecuado diseño del material filtrante.

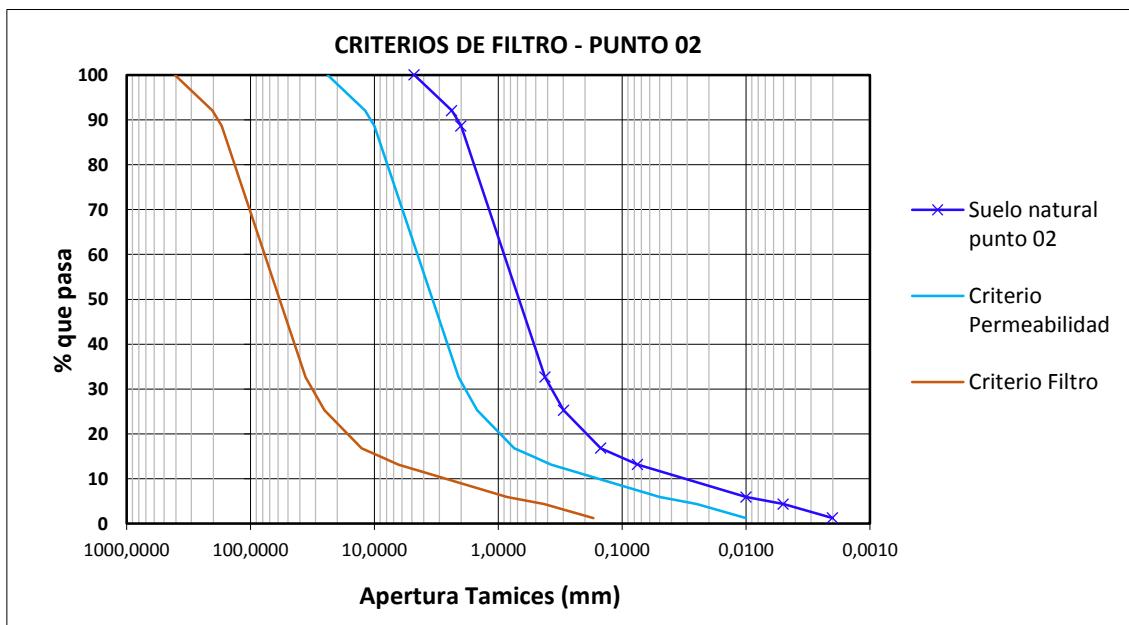


Figura 4-5. Criterios de filtro para el punto 02 del tramo 1.

El punto 02 presenta una mayor área de diseño para un adecuado material filtrante. Esta área se ve influenciada por la curva granulométrica del suelo natural debido a que las líneas de criterio de permeabilidad y filtro siguen su forma.

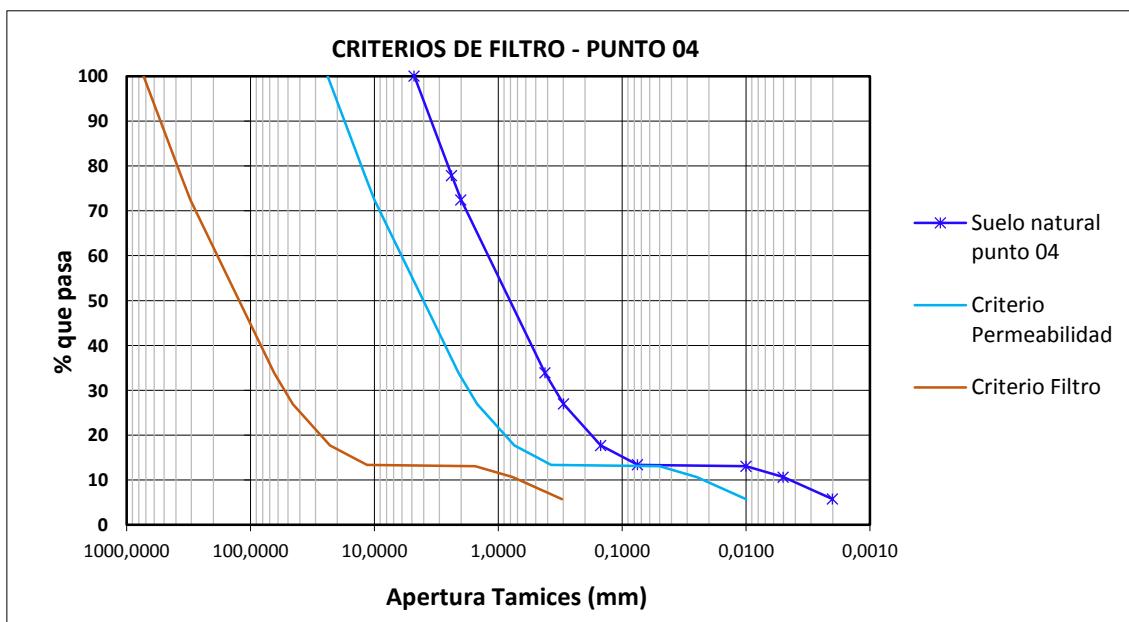


Figura 4-6. Criterios de filtro para el punto 04 del tramo 1.

El punto 04 presenta una amplia área para el diseño óptimo del material filtrante en el material superior a la malla No. 4, presenta un área pequeña de criterio de diseño para materiales menores a la malla No. 4, lo que muchas veces puede afectar el diseño del material filtrante debido a la disponibilidad que se tiene para los materiales dependiendo de la ubicación en la que se encuentre el subdren.

## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL TRAMO 2

### 4.2.1. Análisis de las curvas granulométricas en el tramo 2

#### - Punto 05

En las curvas granulométricas obtenidas para las muestras recogidas en el punto 05, se aprecia el exceso en el contenido de limos en el suelo junto al subdren en comparación al suelo natural de 44.64%, con lo que se puede concluir que existe una migración de finos a nivel de limos en este punto, en cantidad menor a los puntos del tramo 1 debido a la presencia del geotextil. El contenido de arcillas en el suelo natural es mayor que el suelo junto al subdren un 9.05%, con lo que se concluye que no existe migración de arcillas. En la figura 4-7 se presenta los contenidos de materiales en los suelos que soportan las conclusiones establecidas.

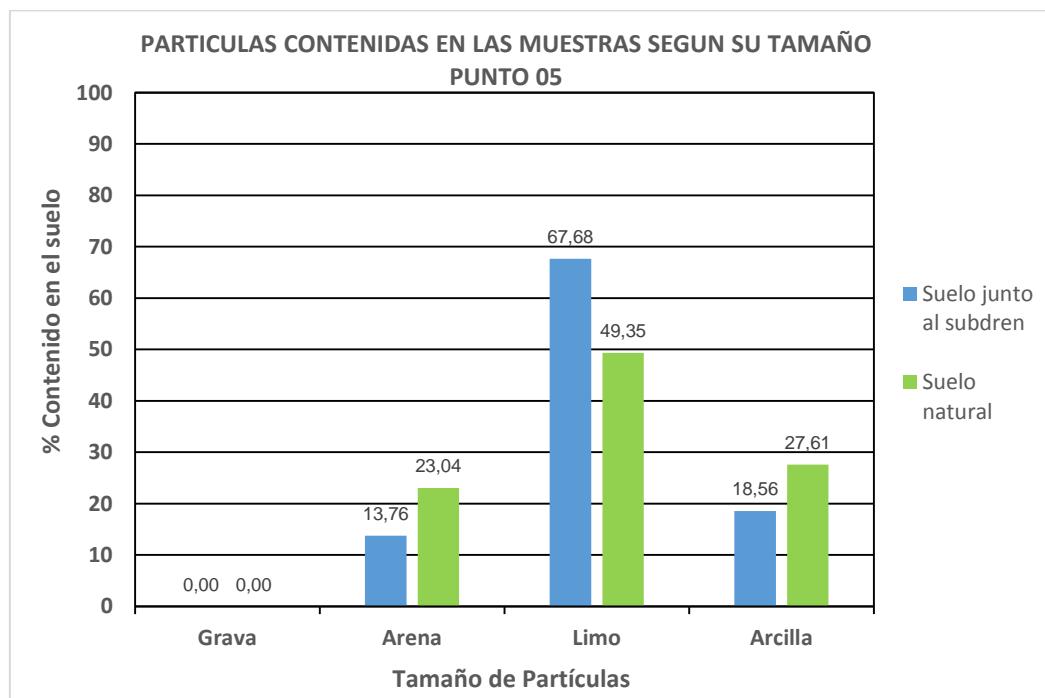


Figura 4-7. Partículas contenidas en las muestras del punto 05 según su tamaño.

El límite líquido en el suelo junto al subdren aumenta con respecto al suelo natural un 3.3%, lo cual se hace una excepción en cuanto a los resultados. El límite plástico disminuye en el suelo junto al subdren un 2.9% debido a la menor presencia de arcillas.

- *Punto 06*

En los resultados obtenidos para las muestras recogidas en el punto 06, se aprecia el exceso en el contenido de limos en el suelo junto al subdren en comparación al suelo natural de 27.69%, con lo que se puede concluir que existe una migración de finos a nivel de limos en este punto, en cantidad menor a los puntos del tramo 1 debido a la presencia del geotextil. El contenido de arcillas en el suelo natural es mayor que el suelo junto al subdren un 5.37%, con lo que se concluye que no existe migración de arcillas. En la figura 4-8 se presenta los contenidos de materiales en los suelos que soportan las conclusiones establecidas.

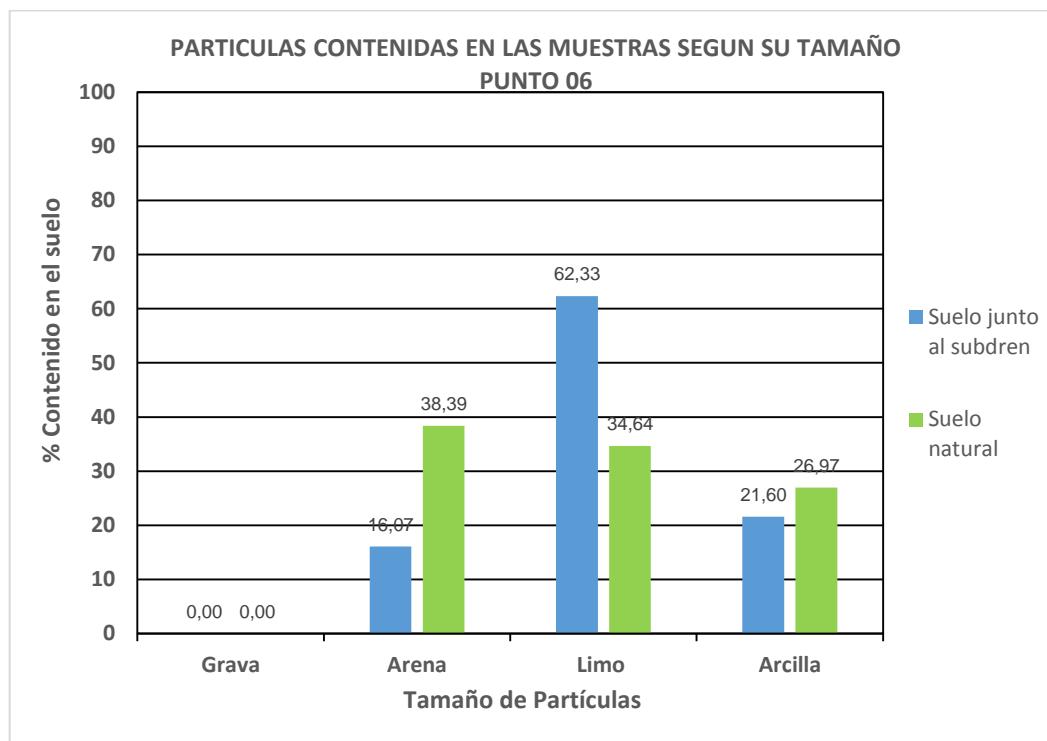


Figura 4-8. Partículas contenidas en las muestras del punto 06 según su tamaño.

El límite líquido y el límite plástico en el suelo junto al subdren aumentan con respecto al suelo natural un 30% y 13.4% respectivamente, lo cual se hace una excepción en cuanto a los resultados.



- *Punto 07*

De acuerdo a los resultados obtenidos para las muestras recogidas en el punto 07 se aprecia un exceso en el contenido de limos en el suelo natural con respecto al suelo junto al subdren de 5.75%, a diferencia de los puntos 05 y 06.

Los límites líquido y plástico del suelo junto al subdren disminuyen con respecto al suelo natural 3.5% y 3.8%.

Debido a los resultados mencionados, se concluye que el suelo junto al subdren es diferente al suelo natural en el punto 07, por lo que no se pueden obtener conclusiones con respecto a la migración de finos.

- *Punto 08*

En las curvas granulométricas obtenidas para las muestras recogidas en el punto 08 se aprecia un exceso en el contenido de todas las partículas en el suelo natural con respecto al suelo junto al subdren, arenas 12.36%, limos 3% y arcillas 11.8%, a diferencia de los puntos 05, 06 y 07.

El límite líquido disminuye en el suelo junto al subdren con respecto al suelo natural 3%, mientras que el límite plástico aumenta 11.2%.

Debido a los resultados mencionados, se concluye que el suelo junto al subdren es diferente al suelo natural en el punto 08, por lo que no se pueden obtener conclusiones con respecto a la migración de finos.

#### *4.2.2. Discusión del material filtrante óptimo para subdrenaje y análisis del geotextil en el Tramo 1*

En la tabla 4-2 se muestran los puntos sobre los cuales pasan las curvas para los criterios de permeabilidad y retención del material filtrante y sus gráficas de muestran en las figuras 4-4, 4-5 y 4-6.



	Criterio de permeabilidad	Criterio de retención	
		Grupo de Suelo	Criterio de filtro
Punto 05	$D_{15}^F \geq 0.00965 \text{ mm}$	2	$D_{15}^F \leq 0.7 \text{ mm}$
Punto 06	$D_{15}^F \geq 0.00205 \text{ mm}$	2	$D_{15}^F \leq 0.7 \text{ mm}$

Tabla 4-2. Criterios de filtro en los diferentes puntos del Tramo 2.

El tamaño de abertura aparente (TAA) del geotextil se ha considerado como el diámetro de partícula para el 15 % de pasantes para el análisis de filtro, con lo cual se determina que el geotextil se encuentra dentro del rango de criterios de filtro y permeabilidad establecidos para los puntos 05 y 06, como se puede ver en las gráficas 4-9 y 4-10.

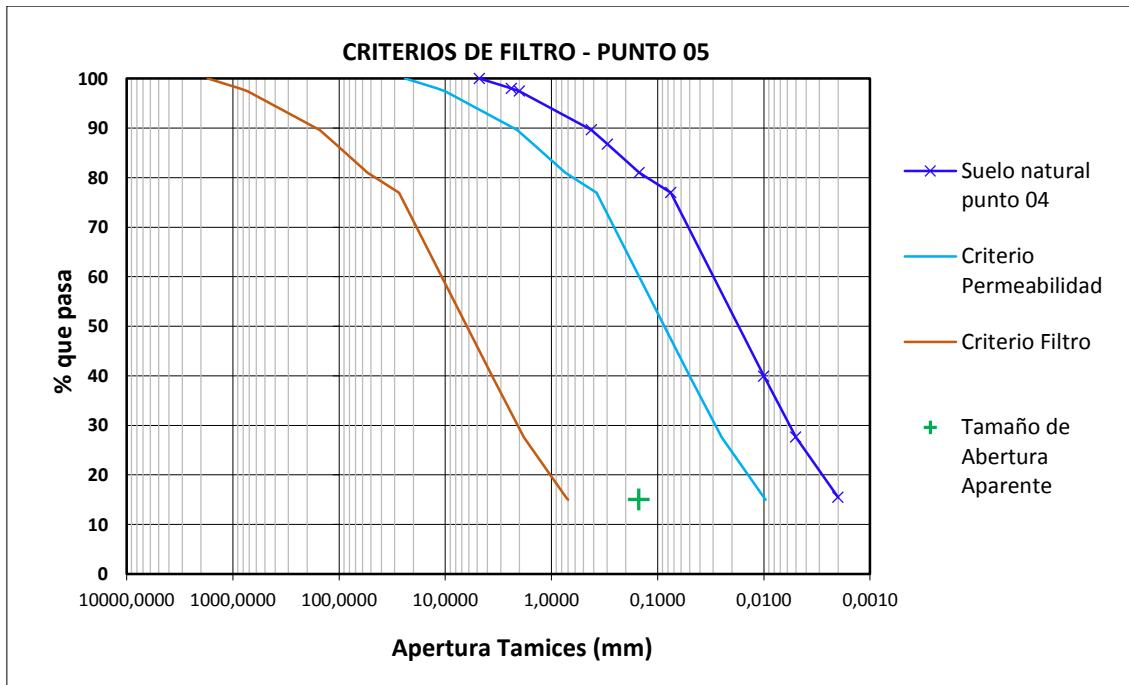


Figura 4-9. Criterios de filtro para el punto 05 del tramo 2.

El punto correspondiente al tamaño de abertura aparente del geotextil se encuentra dentro del área para un adecuado diseño de material filtrante entre las curvas de los criterios de permeabilidad y filtro. La abertura para un % de pasantes del 15 % se encuentra más próximo a la curva del criterio de permeabilidad.

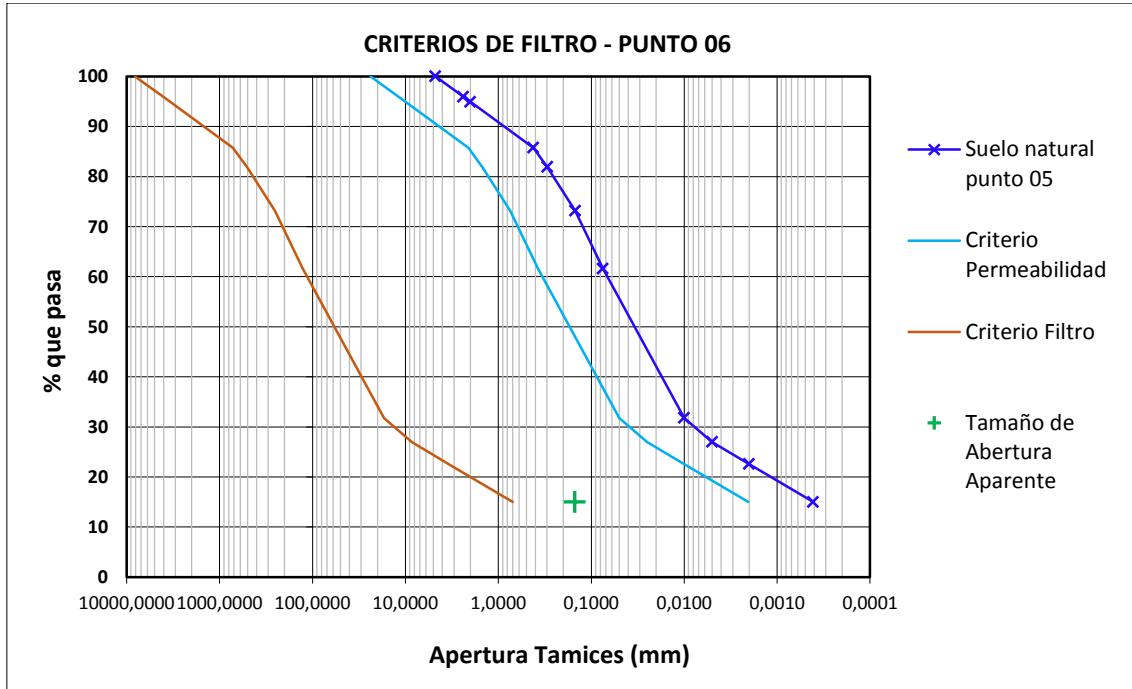


Figura 4-10. Criterios de filtro para el punto 06 del tramo 2.

El tamaño de abertura aparente del geotextil recae sobre el área para un diseño óptimo de material filtrante de acuerdo al suelo natural en el punto 06. La abertura para un % de pasantes del 15 % se encuentra más próximo a la curva del criterio de permeabilidad.

De acuerdo a las especificaciones de la muestra obtenida de geotextil, se analiza el criterio de retención (Tamaño de Abertura Aparente) establecido en la ecuación 2-26 del capítulo 2. Debido a que el suelo natural en los puntos de recolección del tramo 2 posee un porcentaje mayor al 50% que pasan la malla No. 200 en el reajuste de la curva granulométrica al considerar el material pasante la malla No. 4 para todas las muestras, se considera la ecuación 2-22 para el análisis del criterio, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4-3.

	$D_{85}$	B	TAA Máximo
Punto 05	0.24	1.8	0.432
Punto 06	0.39	1.8	0.702

Tabla 4-3. Criterio de retención (Tamaño de Abertura Aparente) para geotextiles.

Se concluye que el Tamaño de Abertura Aparente cumple con el criterio de retención para geotextiles.



El criterio de permeabilidad se ha basado en el criterio de permeabilidad para materiales filtrantes, de manera general, la permeabilidad del geotextil debe ser mayor que la del suelo.

No se ha estudiado los criterios de colmatación y de supervivencia de los geotextiles debido a que se aparta de los límites establecidos para el presente estudio.

#### 4.2.3. Relación de contenido de finos entre subdrenes

En cada tramo se analiza el contenido de limos en las muestras válidas para el estudio, en este caso los puntos de recolección 01, 02 y 04 para el tramo 1, y los puntos de recolección 05 y 06 para el tramo 2.

En cada punto se analiza la diferencia en el contenido de limos entre el suelo junto al subdren y el suelo natural, y además se determina la relación entre dichos contenidos, como se puede apreciar en la tabla 4-4.

	Contenido de limos (%)		Diferencia de contenido de limos	Relación de contenido de limos entre suelos
	Suelo junto al subdren	Suelo natural		
<b>TRAMO 1</b>				
<b>Punto 01</b>	10.92	6.09	4.83	1.79
<b>Punto 02</b>	42.37	8.78	33.59	4.83
<b>Punto 04</b>	9.97	2.74	7.23	3.64
<b>TRAMO 2</b>				
<b>Punto 05</b>	67.68	49.35	18.33	1.37
<b>Punto 06</b>	62.33	34.64	27.69	1.80

Tabla 4-4. Análisis de contenido de limos entre los suelos de cada punto válido en los tramos 1 y 2.

Se puede ver que la relación de contenido de limos entre suelo junto al subdren y el suelo natural es mayor a 1.7 y puede llegar a tomar valores de hasta 4.8. En el tramo 2 se producen relaciones de contenido de limos menores a 1.8.



---

## CAPÍTULO 5

---

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que la migración de finos se produce tanto en subdrenes con material filtrante (geotextil) como en subdrenes sin material filtrante.
- La migración de finos es mayor en el subdren sin filtro que en el subdren con filtro. De los cuatro casos analizados en cada uno de los subdrenes, tres casos sustentaron la migración de finos en el subdren sin filtro y dos casos lo hicieron en el subdren con filtro, siendo la cantidad de finos que migraron menor en el dren con filtro. Esto se comprueba porque la relación del contenido de limos entre el suelo junto al subdren y el suelo natural es mayor en el subdren sin filtro.
- La migración de finos corresponde en su totalidad a limos, de acuerdo a las curvas granulométricas obtenidas en los diferentes casos de cada subdren. En consecuencia, el cambio de la permeabilidad del suelo junto al subdren es mínima debido a que la permeabilidad es mayormente afectada por el contenido de arcillas antes que por el contenido de limos.
- El uso de material filtrante en subdrenajes extiende la vida útil y funcionabilidad de los mismos. La ausencia de material filtrante produce colmatación completa del subdrenaje como se pudo apreciar en el subdren sin material filtrante. El material que produjo la colmatación en el subdren sin filtro es material limoso, como se pudo comprobar en la clasificación en el material drenante del subdren.
- De acuerdo a los resultados de laboratorio y la modelación realizada para cada subdren se determina que la migración de finos se produce en una distancia menor a 1.50 m en dirección del flujo de agua hacia el subdren. Los resultados de laboratorio muestran la diferencia en la constitución del suelo natural y el suelo junto al subdren debido a la migración de finos y la modelación realizada soporta la idea presentando gradientes



hidráulicos de aproximadamente 0.6 a esta distancia, lo cual no produce afección alguna al suelo pero incrementan en distancias más próximas al subdren

- El geotextil utilizado en la carretera Cuenca – Azogues – Biblian cumple con los criterios de retención y permeabilidad de acuerdo al suelo presente en esta carretera.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda replicar y validar este estudio en base a otras vías de la zona y del país.
- Se recomienda el uso de material filtrante en los sistemas de subdrenaje para su correcta funcionabilidad y vida útil.
- Gracias a los resultados objetivos y técnicos sobre la migración de finos, este estudio puede ser citado con respecto a los criterios que se vierten sobre la baja vida útil de los subdrenes por la migración de finos.



---

## REFERENCIAS

---

- Angelone, S., Garibay, M.T., & Cauhapé, M., 2006, *Permeabilidad de Suelos*, Universidad de Rosario.
- Babić, B., Prager, A., & Rukavina, T., 2000, Effect of fine particles on some characteristics of granular base courses.
- Das, B.M., 2001, *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, Cengage Learning Latin Am.
- Matute, L., 2008, *Notas de clase*, Cuenca.
- Messerklinger, S., 2013, The design of filter materials and their importance in geotechnical engineering.
- Monroy Melgar, F.J., 2010, *Diseño de sistemas de subdrenaje con elementos filtrantes en obras viales*, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- PAVCO, 2009, *Manual de diseño con geosintéticos*, Bogotá.
- Rawal, A., Shah, T., & Anand, S., 2010, Geotextiles: production, properties and performance.
- Rico, A. & Juárez, E., 1969, *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos*, México.
- Rico, A. & Juárez, E., 1972, *Mecánica de suelos III: Flujo de agua en suelos*, México.
- Rochon, J. & Aquitaine, E., 1995, Mechanisms of Formation Damage by Retention of Particles Suspended in Injection Water..
- Sherard & Dunnigan, L.P., 1989, Critical filters for impervious soils.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., & Talbot, J.R., 1984, Basic properties of sand and gravel filters.
- Suarez, J., 1998, *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*, Bucaramanga.



## **ANEXOS**

#### A. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

## A.1 Resultados de los ensayos de clasificación de suelos en las muestras del Tramo 1



**GEO LAB**  
EXPLORACION Y LABORATORIO

**CLASIFICACIÓN DE SUELOS - ASTM 2487**

<b>Muestra:</b> PCA 01-01	<b>Prof.:</b>
<b>Ubicación:</b> 0+665,50	

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct.-15

Número de tamó	103	157	LIMI
Muestra humedad + tamó (gr)	27.94	33.96	
Muestra seca + tamó (gr)	23.90	28.12	
Peso de tamó (gr)	14.53	16.24	
Peso de agua (gr)	3.94	5.44	
Peso muestra seca (gr)	9.37	11.98	
Porcentaje de humedad	42.0%	45.8%	
Número de gotas / Promedio Hum.	36	31	
<b>FRACCIÓN FINA</b>			
Peso para tambo de medida que pesó (gr)	500		
Peso seco antes de lavado (gr)	465.7		
Peso seco total después del lavado (gr)	400.1		
Peso seco total después del ensayo	400.1		
Error	0.00%		
Tamiz	Apertura (mm)	Peso ref.	Peso ref.
34"	19.10	0.0	0
12"	12.70	9.8	9.8
38"	9.52	2.2	2.2
Nº 4	4.76	21.2	21.2
Nº 8	2.38	42.7	42.7
Nº 10	2.00	16.1	16.1
Nº 40	0.42	219.1	219.1
Nº 50	0.297	341.3	341.3
Nº 100	0.149	392.2	392.2
Nº 200	0.075	15.5	15.5
FONDO		0.0	465.7

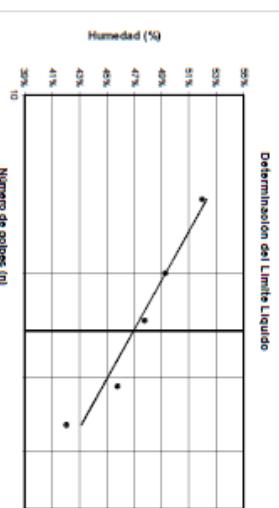
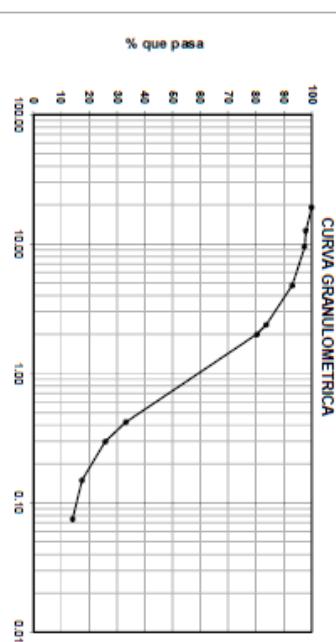


Figura A-1. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 01 del Tramo 1.



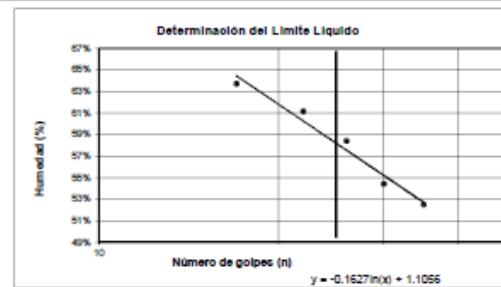
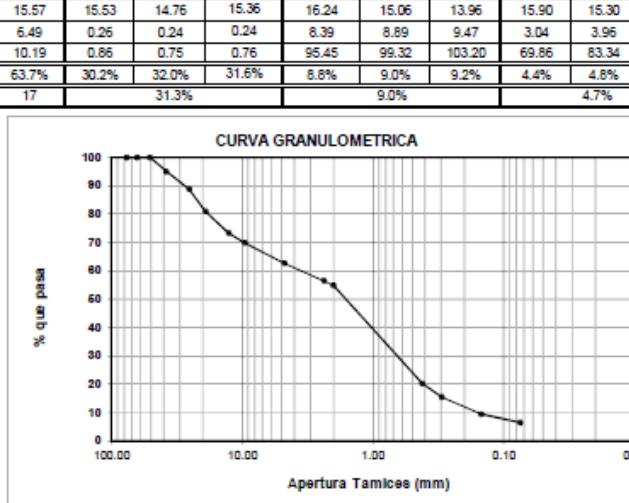
## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 01 - 02  
Ubicación: 0+665.50

Prof. :

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL			HUM. GRANULOM.		
	150	128	98	132	99	152	102	146	157	105	187	129	117	97
Muestra húmeda + tarro (gr)	31.65	31.66	31.31	33.63	32.25	16.65	15.75	16.36	120.06	123.27	126.63	68.80	102.60	104.00
Muestra seca + tarro (gr)	26.07	25.65	25.20	26.70	25.76	16.39	15.51	16.12	111.69	114.38	117.16	85.76	98.64	99.97
Peso de tarro (gr)	15.06	14.24	14.74	15.37	15.57	15.53	14.76	15.36	16.24	15.06	13.96	15.90	15.30	17.20
Peso de agua (gr)	5.78	6.21	6.11	6.93	6.49	0.26	0.24	0.24	8.39	8.89	9.47	3.04	3.95	4.03
Peso muestra seca (gr)	11.01	11.41	10.46	11.33	10.19	0.86	0.75	0.76	95.45	99.32	103.20	69.86	83.34	82.77
Porcentaje de humedad	52.5%	54.4%	58.4%	61.2%	63.7%	30.2%	32.0%	31.6%	8.8%	9.0%	9.2%	4.4%	4.8%	4.9%
Número de golpes - Promedio	35	30	26	22	17									
<b>FRACTI覩N GRUESA</b>														
Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	3530													
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	3530													
Error	0.00%													
Humedad de material que pasa # 4	4.66%													
Peso seco total después del ensayo (gr)	3430													
Tamiz	Apertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	%	%								
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa								
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0								
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0								
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0								
11/2"	38.10	170	170	170	5.0	95.0								
1"	25.40	215	215	385	11.2	88.8								
3/4"	19.10	270	270	655	19.1	80.9								
1/2"	12.70	260	260	915	26.7	73.3								
3/8"	9.52	120	120	1035	30.2	69.8								
Nº 4	4.76	245	245	1280	37.3	62.7								
PASA Nº 4		2250	2250											
<b>FRACTI覩N FINA</b>														
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500													
Peso seco antes de lavado (gr)	458.83													
Peso seco después de lavado (gr)	411.40													
Peso seco total después del ensayo	411.30													
Error	0.02%													
Tamiz	Apertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	Porcentaje	Porcentaje								
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa								
Nº 8	2.36	45.4	45.4	45.4	9.9	90.1	56.5							
Nº 10	2.00	12.4	12.4	57.8	12.6	87.4	54.8							
Nº 40	0.42	252.5	252.6	310.4	67.7	32.3	20.3							
Nº 50	0.297	35.0	35.0	345.4	75.3	24.7	15.5							
Nº 100	0.149	44.0	44.0	389.4	84.9	15.1	9.5							
Nº 200	0.075	22.0	22.0	411.4	89.7	10.3	6.5							
FONDO		0.0	47.4	458.8	100.0									



$$D_{10} = 0.158$$

$$D_{30} = 0.652$$

$$D_{60} = 3.528$$

$$C_u = 22.3$$

$$C_0 = 0.8$$

$$\begin{aligned} \text{L. Líquido} &= 58.2\% \\ \text{L. Plástico} &= 31.3\% \\ \text{I. Plasticidad} &= 26.9\% \\ \text{H. Natural} &= 9.0\% \\ \text{I. Liquidez} &= -0.83 \end{aligned}$$

SUCS: SP - SM  
AASHTO: A-2-7 (o)

JEFE DE LABORATORIO

*Luis Matute D.*

Nota: Para la granulometria de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometria.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabcuenca@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174

Figura A-2. Resultados del suelo natural en el punto 01 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 01 - 03  
 Ubicación: 0+665.50

Prof. :

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM. NATURAL			HUM. GRANULOM.		
									125	174	132			
Muestra húmeda + tarro (gr)									98.60	104.52	98.96			
Muestra seca + tarro (gr)									87.53	92.54	87.58			
Peso de tarro (gr)									15.14	15.07	15.37			
Peso de agua (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.07	11.98	11.38	0.00	0.00	0.00
Peso muestra seca (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.39	77.47	72.21	0.00	0.00	0.00
Porcentaje de humedad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	15.3%	15.5%	15.8%			
Número de golpes - Promedio								NP		15.5%				

## FRACCION GRUESA

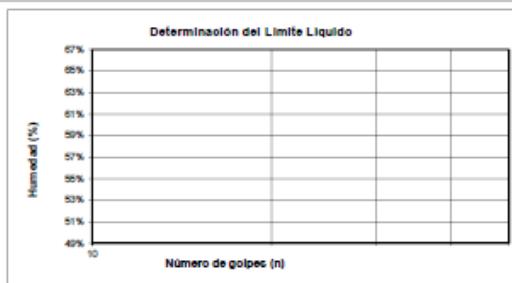
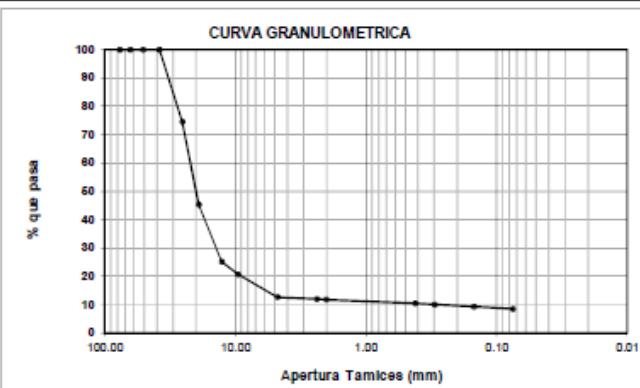
Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	3595
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	3595
Error	0.00%
Humedad de material que pasa #4	0.00%
Peso seco total después del ensayo (gr)	3595

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumul. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0
11/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0
1"	25.40	915	915	915	25.5	74.5
3/4"	19.10	1050	1050	1965	54.7	45.3
1/2"	12.70	725	725	2690	74.8	25.2
3/8"	9.52	160	160	2850	79.3	20.7
Nº 4	4.76	290	290	3140	87.3	12.7
PASA Nº 4		455	455			

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	400
Peso seco antes de lavado (gr)	346.30
Peso seco después de lavado (gr)	112.70
Peso seco total después del ensayo	112.60
Error	0.09%

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumul. (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa	Liga % que pasa
Nº 8	2.38	18.2	18.2	18.2	5.3	94.7	12.0
Nº 10	2.00	4.5	4.5	22.7	6.6	93.4	11.8
Nº 40	0.42	37.5	37.5	60.3	17.4	82.6	10.5
Nº 50	0.297	11.1	11.1	71.4	20.6	79.4	10.0
Nº 100	0.149	20.0	20.0	91.4	26.4	73.6	9.3
Nº 200	0.075	21.3	21.3	112.7	32.5	67.5	8.5
FONDO		0.0	233.6	346.3	100.0		



Nota: Para la granulometria de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometria.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabcuencia@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174

 D<sub>10</sub> = 0.284  
 D<sub>30</sub> = 14.003  
 D<sub>60</sub> = 22.038

 C<sub>U</sub> = 77.6  
 C<sub>0</sub> = 31.3

 % Grava 87%  
 % Arena 4%  
 % Finos 9%

 L. Líquido NP  
 L. Plástico NP  
 I. Plasticidad NP  
 H. Natural 15.5%  
 I. Liquidez

 SUCS: GP - GM  
 AASHTO: A-1-b (o)

JEFE DE LABORATORIO



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 02 - 01

Prof. :

Ubicación: 0+675.60

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Fecha: 5-oct-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
Número de tarro	190	124	111	154	123	116	189	125	131	171	199
Muestra húmeda + tarro (gr)	27.61	32.15	35.57	30.49	32.70	16.30	16.59	16.28	111.96	122.03	112.60
Muestra seca + tarro (gr)	23.46	26.13	28.40	24.05	26.21	15.99	16.27	16.02	95.17	103.47	95.77
Peso de tarro (gr)	15.32	14.90	15.61	12.99	15.70	14.95	15.23	15.13	15.07	16.15	15.60
Peso de agua (gr)	4.15	6.02	7.17	6.44	6.49	0.31	0.32	0.26	16.79	18.56	16.83
Peso muestra seca (gr)	8.14	11.23	12.79	11.06	10.51	1.04	1.04	0.89	80.10	87.32	80.17
Porcentaje de humedad	51.0%	53.6%	56.1%	58.2%	61.8%	29.8%	30.8%	29.2%	21.0%	21.3%	21.0%
Número de golpes / Promedio Hum.	36	30	25	20	14		29.9%				21.1%

## FRACCION FINA

	Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500				
Peso seco antes de lavado (gr)	413.0					
Peso seco después de lavado (gr)	206.0					
Peso seco total después del ensayo	205.9					
Error	0.05%					
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correcc. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0
1/2"	12.70	3.3	3.3	3.3	0.8	99.2
3/8"	9.52	3.4	3.4	6.7	1.6	98.4
Nº 4	4.76	6.4	6.4	13.1	3.2	96.8
Nº 8	2.38	6.6	6.6	21.7	5.3	94.7
Nº 10	2.00	3.4	3.4	25.1	6.1	93.9
Nº 40	0.42	54.1	54.1	79.2	19.2	80.8
Nº 50	0.297	35.0	35	114.2	27.7	72.3
Nº 100	0.149	58.6	58.7	172.9	41.9	58.1
Nº 200	0.075	33.1	33.1	206	49.9	50.1
FONDO		0.0	207.0	413.0	100.0	

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{50} &= \\ D_{60} &= 0.163 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_d &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Grava} &= 3\% \\ \% \text{ Arena} &= 47\% \\ \% \text{ Finales} &= 50\% \end{aligned}$$

L. Líquido	55.5%
L. Plástico	29.9%
I. Plasticidad	25.6%
H. Natural	21.1%
I. Liquidez	-0.35

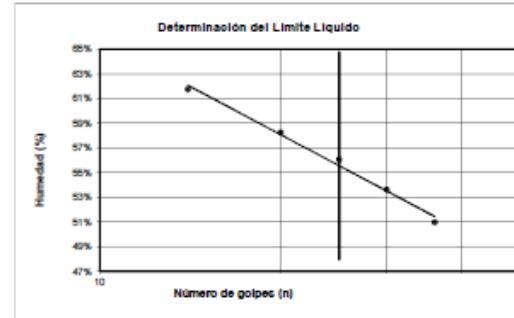
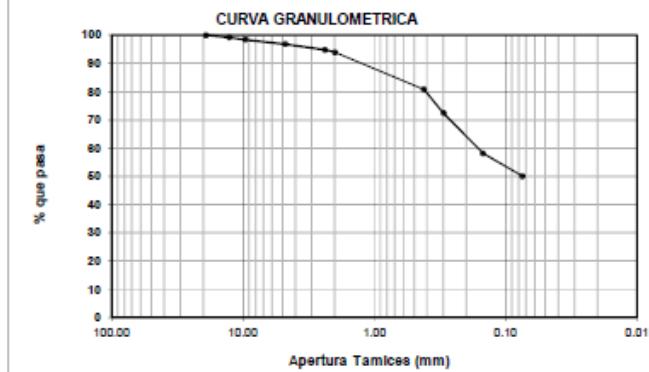
 SUCS CH  
 AASHTO A-7-6 <sup>(10)</sup>
  
JEFE DE LABORATORIO


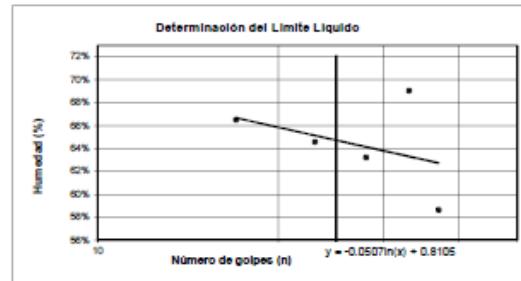
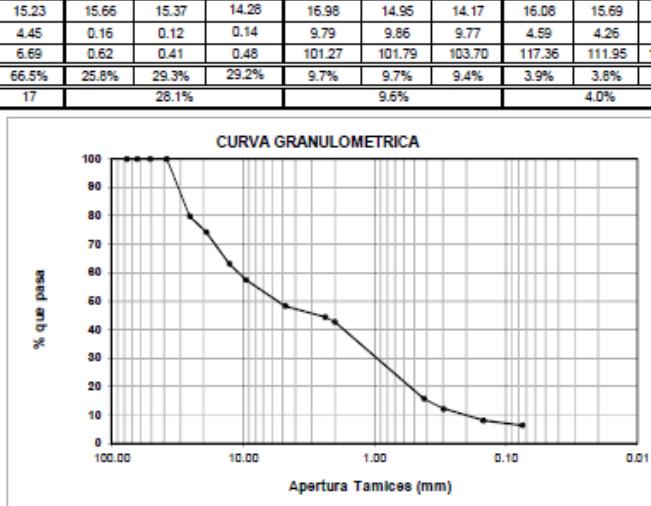
Figura A-4. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 02 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 02 - 02  
Ubicación: 0+675.60Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL			HUM. GRANULOM.		
	137	186	120	201	189	191	146	196	120	116	137	194	123	175
Muestra húmeda + tarro (gr)	27.10	26.57	25.94	29.22	26.37	16.44	15.90	14.90	128.04	126.60	127.54	138.03	131.90	131.22
Muestra seca + tarro (gr)	22.32	22.35	22.47	23.88	21.92	16.28	15.78	14.76	118.25	116.74	117.57	133.44	127.64	126.45
Peso de tarro (gr)	14.17	16.24	16.98	15.61	15.23	15.66	15.37	14.28	16.98	14.95	14.17	16.08	15.69	15.65
Peso de agua (gr)	4.78	4.22	3.47	5.34	4.45	0.16	0.12	0.14	9.79	9.86	9.77	4.59	4.26	4.77
Peso muestra seca (gr)	8.15	6.11	5.49	8.27	6.69	0.62	0.41	0.48	101.27	101.79	103.70	117.36	111.95	110.80
Porcentaje de humedad	58.7%	69.1%	63.2%	64.6%	66.5%	25.8%	29.3%	29.2%	9.7%	9.7%	9.4%	3.9%	3.8%	4.3%
Número de golpes - Promedio	37	33	28	23	17									
FRACCION GRUESA														
Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	7145													
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	7130													
Error	0.21%													
Humedad de material que pasa #4	4.01%													
Peso seco total después del ensayo (gr)	7010													
Tamiz	Apertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	%	%							
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa								
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0								
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0								
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0								
1 1/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0								
1"	25.40	1415	1415	1415	20.2	79.8								
3/4"	19.10	390	390	1805	25.8	74.2								
1/2"	12.70	780	780	2585	36.9	63.1								
3/8"	9.52	390	390	2975	42.4	57.6								
Nº 4	4.76	655	655	3630	51.8	48.2								
PASA Nº 4		3500	3515											
FRACCION FINA														
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500													
Peso seco antes de lavado (gr)	456.24													
Peso seco después de lavado (gr)	396.20													
Peso seco total después del ensayo	396.10													
Error	0.03%													
Tamiz	Apertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	%	%							
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa								
Nº 8	2.38	36.3	36.3	36.3	8.0	92.0	44.4							
Nº 10	2.00	15.6	15.6	51.9	11.4	88.6	42.7							
Nº 40	0.42	255.3	255.4	307.3	67.4	32.6	15.7							
Nº 50	0.297	33.6	33.6	340.9	74.7	25.3	12.2							
Nº 100	0.149	38.6	38.6	379.5	83.2	16.8	8.1							
Nº 200	0.075	16.7	16.7	396.2	86.8	13.2	6.3							
FONDO		0.0	60.0	456.2	100.0									



$$D_{10} = 0.205$$

$$D_{30} = 0.958$$

$$D_{60} = 10.804$$

$$C_u = 52.7$$

$$C_s = 0.4$$

$$\% \text{ Grava} \quad 52\%$$

$$\% \text{ Arena} \quad 42\%$$

$$\% \text{ Finos} \quad 6\%$$

$$L. \text{ Líquido} \quad 64.7\%$$

$$L. \text{ Plástico} \quad 28.1\%$$

$$I. \text{ Plasticidad} \quad 36.6\%$$

$$H. \text{ Natural} \quad 9.6\%$$

$$I. \text{ Liquidez} \quad -0.51$$

SUCS: GP - GC  
AASHTO: A-2-7 (0)

JEFE DE LABORATORIO

Teléfono: +593 7 288 1174

Nota: Para la granulometría de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometría.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabcuenca@gmail.com

Figura A-5. Resultados del suelo natural en el punto 02 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 02 - 03  
Ubicación: 0+675.60

Prof. :

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO		HUM. NATURAL			HUM. GRANULOM.		
								189	133	196			
Muestra húmeda + tarro (gr)								100.47	100.28	93.36			
Muestra seca + tarro (gr)								86.99	87.14	80.84			
Peso de tarro (gr)								15.27	16.88	15.68			
Peso de agua (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.48	13.14	12.52	0.00	0.00	0.00
Peso muestra seca (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.72	70.26	65.16	0.00	0.00	0.00
Porcentaje de humedad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	18.8%	18.7%	19.2%			
Número de golpes - Promedio							NP		18.9%				

## FRACCION GRUESA

Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	3835
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	5080
Error	24.51%
Humedad de material que pasa # 4	0.00%
Peso seco total después del ensayo (gr)	3835

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0
1 1/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0
1"	25.40	320	845	845	22.0	78.0
3/4"	19.10	365	975	1820	47.5	52.5
1/2"	12.70	675	750	2570	67.0	33.0
3/8"	9.52	375	420	2990	78.0	22.0
Nº 4	4.76	1335	445	3435	89.6	10.4
PASA Nº 4	2010	400				

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	400
Peso seco antes de lavado (gr)	336.41
Peso seco después de lavado (gr)	130.80
Peso seco total después del ensayo	130.70
Error	0.08%

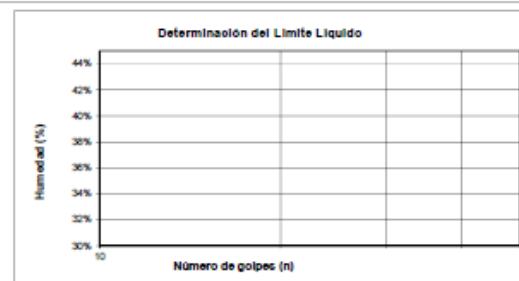
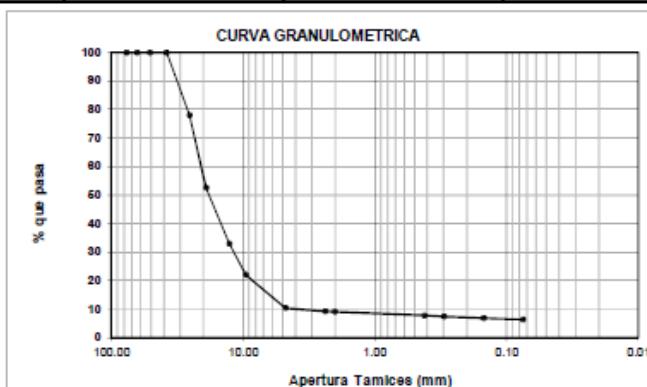
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa	Liga % que pasa
Nº 8	2.38	36.9	36.9	36.9	11.0	89.0	9.3
Nº 10	2.00	5.0	5.0	41.9	12.5	87.5	9.1
Nº 40	0.42	42.2	42.3	84.2	25.0	75.0	7.8
Nº 50	0.297	11.4	11.4	95.6	28.4	71.6	7.5
Nº 100	0.149	19.6	19.6	115.2	34.2	65.8	6.9
Nº 200	0.075	15.6	15.6	130.8	38.9	61.1	6.4
FONDO	0.0	205.6	336.4	100.0			

Nota: Para la granulometria de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometria.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabcuenca@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174



$$D_{10} = 3.668$$

$$D_{30} = 11.740$$

$$D_{60} = 20.766$$

$$C_u = 5.7$$

$$C_0 = 1.8$$

$$\% \text{ Grava} \quad 90\%$$

$$\% \text{ Arena} \quad 4\%$$

$$\% \text{ Fina} \quad 6\%$$

$$\text{L. Líquido} \quad \text{NP}$$

$$\text{L. Plástico} \quad \text{NP}$$

$$\text{I. Plasticidad} \quad \text{NP}$$

$$\text{H. Natural} \quad 18.9\%$$

$$\text{I. Liquidez} \quad$$

SUCS:3W - GM  
AASHTO: A-1-b (o)

JEFE DE LABORATORIO

Figura A-6. Resultados del material drenante en el punto 02 del Tramo 1.



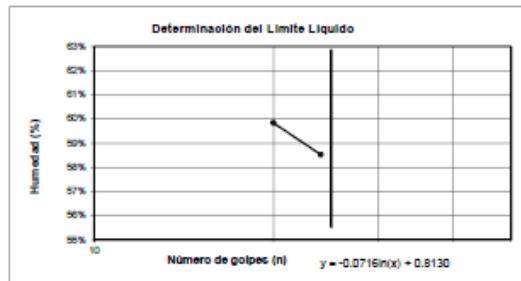
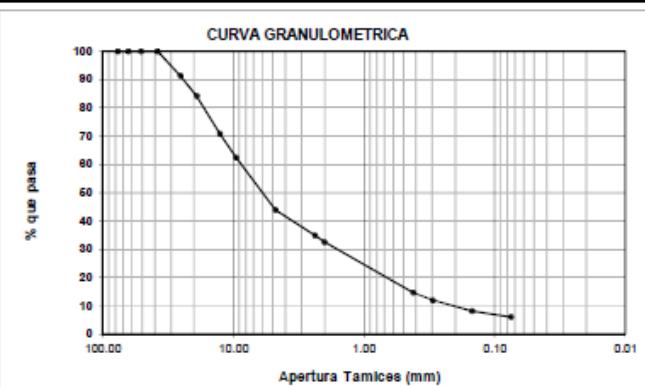
## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 03 - 01  
Ubicación: 0+685.50

Prof. :

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct.-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL			HUM. GRANULOM.		
	47	18	14	115	150	124	135	133	170	D <sub>10</sub>	0.207	
Muestra húmeda + tarro (gr)	20.99	20.03					7.30	7.29	7.13	128.17	130.01	123.46
Muestra seca + tarro (gr)	15.81	14.89					7.21	7.19	7.01	119.80	120.85	115.11
Peso de tarro (gr)	6.96	6.30					6.89	6.86	6.58	16.42	15.06	14.90
Peso de agua (gr)	5.18	5.14	0.00	0.00	0.00		0.09	0.10	0.12	8.37	9.16	8.35
Peso muestra seca (gr)	8.85	8.59	0.00	0.00	0.00		0.32	0.33	0.43	103.38	105.79	100.21
Porcentaje de humedad	58.5%	59.8%	NP	NP	NP		28.1%	30.3%	27.9%	8.1%	8.7%	8.3%
Número de golpes - Promedio	24	20					28.8%			8.4%		4.9%
FRACCION GRUESA												
Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	4670											
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	4670											
Error	0.00%											
Humedad de material que pasa #4	4.93%											
Peso seco total después del ensayo (gr)	4571											
Tamiz	Apertura	Peso ref. partcial (gr)	Peso ref. correg. (gr)	Peso ref. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa						
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0						
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0						
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0						
1 1/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0						
1"	25.40	395	395	395	8.6	91.4						
3/4"	19.10	330	330	725	15.9	84.1						
1/2"	12.70	605	605	1330	29.1	70.9						
3/8"	9.52	385	385	1715	37.5	62.5						
Nº 4	4.76	850	850	2565	56.1	43.9						
FONDO		2105	2105									
FRACCION FINA												
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500											
Peso seco antes de lavado (gr)	461.41											
Peso seco después de lavado (gr)	397.10											
Peso seco total después del ensayo	397.00											
Error	0.03%											
Tamiz	Apertura	Peso ref. partcial (gr)	Peso ref. correg. (gr)	Peso ref. acumu. (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa	Liga % que pasa					
Nº 8	2.38	94.2	94.2	94.2	20.4	79.6	34.9					
Nº 10	2.00	25.2	25.2	119.4	25.9	74.1	32.5					
Nº 40	0.42	187.4	187.5	306.9	66.5	33.5	14.7					
Nº 50	0.297	28.2	28.2	335.1	72.6	27.4	12.0					
Nº 100	0.149	40.5	40.5	375.6	81.4	18.6	8.2					
Nº 200	0.075	21.5	21.5	397.1	86.1	13.9	6.1					
FONDO		0.0	54.3	461.4	100.0							



D<sub>10</sub> = 0.207  
 D<sub>30</sub> = 1.603  
 D<sub>60</sub> = 8.679

C<sub>U</sub> = 41.9  
 C<sub>G</sub> = 1.4

% Grava 56%  
 % Arena 38%  
 % Finos 6%

L. Líquido 58.3%  
 L. Plástico 28.8%  
 I. Plasticidad 29.5%  
 H. Natural 8.4%  
 I. Liquidez -0.60

SUCS:GW - GC  
 AASHTO: A-2-7 (0)

JEFE DE LABORATORIO

Nota: Para la granulometria de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometria.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabocuenca@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174

Figura A-7. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 03 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 03 - 02  
 Ubicación: 0+685.50

 Prof.:  
 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct.-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
Número de tarro	35	59	4	94	27	179	193	202	138	190	123
Muestra húmeda + tarro (gr)	23.22	25.04	28.44	22.58	18.00	15.92	15.90	17.51	125.22	115.29	116.45
Muestra seca + tarro (gr)	17.94	19.08	21.45	17.65	13.79	15.78	15.81	17.39	113.62	104.80	105.77
Peso de tarro (gr)	6.55	6.47	6.98	8.14	6.23	15.13	15.36	16.81	16.04	15.31	15.70
Peso de agua (gr)	5.28	5.96	6.99	4.93	4.21	0.14	0.09	0.12	11.60	10.49	10.68
Peso muestra seca (gr)	11.39	12.61	14.47	9.51	7.56	0.65	0.45	0.58	97.58	89.49	90.07
Porcentaje de humedad	46.4%	47.3%	48.3%	51.8%	55.7%	21.5%	20.0%	20.7%	11.9%	11.7%	11.9%
Número de golpes / Promedio Hum.	38	34	30	25	21				20.7%		11.8%
FRACCION FINA											
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500										
Peso seco antes de lavado (gr)	447.1										
Peso seco después de lavado (gr)	371.0										
Peso seco total después del ensayo	370.9										
Error	0.03%										
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa					
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0					
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0					
3/8"	9.52	0.0	0	0	0.0	100.0					
Nº 4	4.76	5.1	5.1	5.1	1.1	98.9					
Nº 8	2.38	5.9	5.9	11	2.5	97.5					
Nº 10	2.00	2.2	2.2	13.2	3.0	97.0					
Nº 40	0.42	186.1	188.2	201.4	45.0	55.0					
Nº 50	0.297	77.4	77.4	278.8	62.4	37.6					
Nº 100	0.149	64.5	64.5	343.3	76.8	23.2					
Nº 200	0.075	27.7	27.7	371	83.0	17.0					
FONDO		0.0	76.1	447.1	100.0						

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{30} &= 0.206 \\ D_{60} &= 0.506 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L. \text{ Líquido} &= 52.2\% \\ L. \text{ Plástico} &= 20.7\% \\ I. \text{ Plasticidad} &= 31.5\% \\ H. \text{ Natural} &= 11.8\% \\ I. \text{ Liquidez} &= -0.28 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_d &= \end{aligned}$$

 SUCS SC  
 AASHTO A-2-7 (d)

JEFE DE LABORATORIO

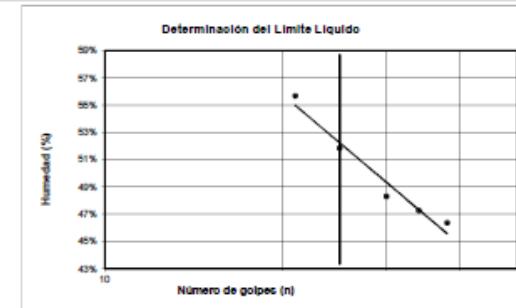
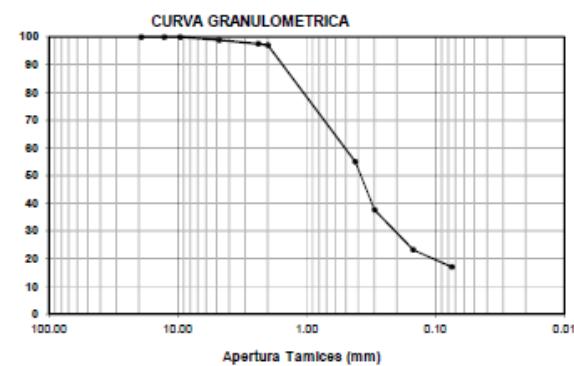
 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador


Figura A-8. Resultados del suelo natural en el punto 03 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 03 - 03  
Ubicación: 0+685.50

Prof. :

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct.-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM. NATURAL			HUM. GRANULOM.		
									145	99	163			
Muestra húmeda + tarro (gr)									106.00	110.56	96.92			
Muestra seca + tarro (gr)									92.81	96.67	85.06			
Peso de tarro (gr)									14.49	15.57	15.69			
Peso de agua (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.19	13.89	11.86	0.00	0.00	0.00
Peso muestra seca (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.32	81.10	69.37	0.00	0.00	0.00
Porcentaje de humedad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	16.8%	17.1%	17.1%			
Número de golpes - Promedio									NP		17.0%			

## FRACCION GRUESA

Peso húmedo total antes del ensayo (gr) 3700

Peso húmedo total después del ensayo (gr) 3700

Error 0.00%

Humedad de material que pasa # 4 0.00%

Peso seco total después del ensayo (gr) 3700

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0
11/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0
1"	25.40	635	635	635	22.6	77.4
3/4"	19.10	815	815	1650	44.6	55.4
1/2"	12.70	765	765	2415	65.3	34.7
3/8"	9.52	320	320	2735	73.9	26.1
Nº 4	4.76	455	455	3190	86.2	13.8
PASA Nº 4		510	510			

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr) 600

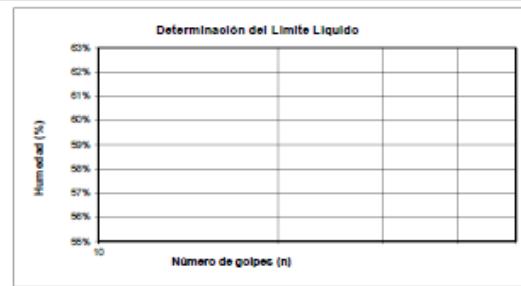
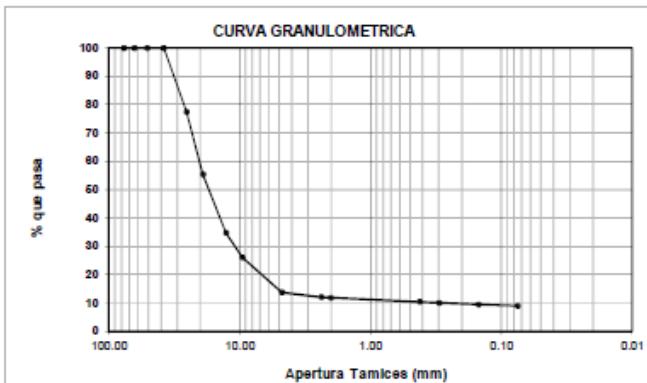
Peso seco antes de lavado (gr) 427.27

Peso seco después de lavado (gr) 148.00

Peso seco total después del ensayo 147.90

Error 0.07%

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa	Liga % que pasa
Nº 8	2.38	51.7	51.8	51.8	12.1	87.9	12.1
Nº 10	2.00	7.2	7.2	59.0	13.8	86.2	11.9
Nº 40	0.42	45.9	45.9	104.9	24.6	75.4	10.4
Nº 50	0.297	11.3	11.3	116.2	27.2	72.8	10.0
Nº 100	0.149	17.1	17.1	133.3	31.2	68.8	9.5
Nº 200	0.075	14.7	14.7	148.0	34.6	65.4	9.0
FONDO	0.0	279.3	427.3	100.0			



D <sub>10</sub> =	0.284
D <sub>30</sub> =	10.848
D <sub>60</sub> =	20.270

C <sub>U</sub> =	71.3
C <sub>G</sub> =	20.4

% Grava	86%
% Arena	5%
% Finos	9%

L. Líquido	NP
L. Plástico	NP
I. Plasticidad	NP
H. Natural	17.0%
I. Liquidez	

SUCS: GP - GM  
AASHTO: A-1-b (o)

JEFE DE LABORATORIO

Nota: Para la granulometría de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometría.

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

Teléfono: +593 7 288 1174

Figura A-9. Resultados del material drenante en el punto 03 del Tramo 1.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 04 - 01  
Ubicación: 0+701.50

Prof. :

Proyecto: Tesis  
Solicitado por: Esteban Sarmiento  
Fecha: 5-oct-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM. NATURAL			HUM. GRANULOM.		
Número de tarro	141	203	127	144	194	186	200	184	101	141	100	178	98	113
Muestra húmeda + tarro (gr)	37.08	32.55	31.61	26.48	25.03	16.68	15.43	15.61	129.12	143.20	132.95	80.28	77.06	72.30
Muestra seca + tarro (gr)	30.39	27.23	26.48	22.41	21.75	16.62	15.31	15.53	118.57	131.60	121.24	77.45	74.00	69.91
Peso de tarro (gr)	15.10	15.77	16.79	14.91	16.09	16.24	14.68	15.10	13.91	15.10	14.66	14.63	14.74	14.23
Peso de agua (gr)	6.69	5.32	5.13	4.07	3.26	0.06	0.12	0.08	10.55	11.60	11.71	2.83	3.06	2.39
Peso muestra seca (gr)	15.29	11.45	9.69	7.50	5.66	0.38	0.63	0.43	104.66	116.50	106.58	62.82	59.26	55.68
Porcentaje de humedad	43.8%	46.4%	52.9%	54.3%	58.0%	15.8%	19.0%	18.6%	10.1%	10.0%	11.0%	4.5%	5.2%	4.3%
Número de golpes - Promedio	36	32	27	23	19	17.8%			10.3%			4.7%		

## FRACCION GRUESA

Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	3385						
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	3385						
Error	0.00%						
Humedad de material que pasa #4	4.65%						
Peso seco total después del ensayo (gr)	3330						
Tamiz	Aertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	%	%	
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa	
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0	
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0	
2"	50.80	160	160	160	4.8	95.2	
11/2"	38.10	0	0	160	4.8	95.2	
1"	25.40	335	335	495	14.9	85.1	
3/4"	19.10	405	405	900	27.0	73.0	
1/2"	12.70	380	380	1280	38.4	61.6	
3/8"	9.52	295	295	1575	47.3	52.7	
Nº 4	4.76	565	565	2140	64.3	35.7	
PASA Nº 4		1245	1245				

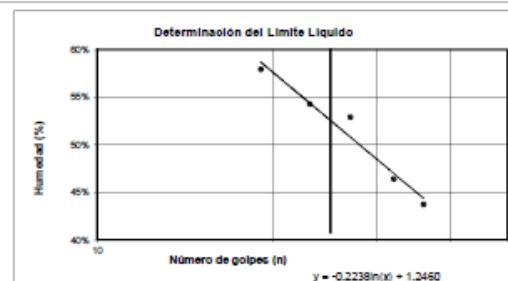
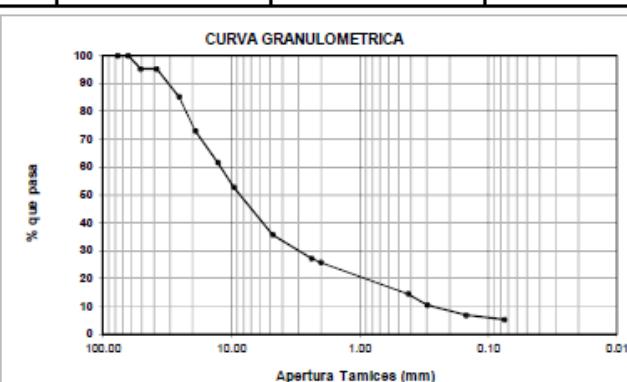
## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500						
Peso seco antes de lavado (gr)	453.14						
Peso seco después de lavado (gr)	385.80						
Peso seco total después del ensayo	385.60						
Error	0.05%						
Tamiz	Aertura	Peso ret.	Peso ret.	Peso ret.	Porcentaje	Porcentaje	Determinación del Límite Líquido
	Tamiz (mm)	parcial (gr)	correg. (gr)	acumu. (gr)	retenido	que pasa	
Nº 8	2.38	107.8	107.8	107.8	23.8	76.2	27.2
Nº 10	2.00	19.3	19.3	127.1	26.0	72.0	25.7
Nº 40	0.42	141.8	142.0	269.1	59.4	40.6	14.5
Nº 50	0.297	52.3	52.3	321.4	70.9	29.1	10.4
Nº 100	0.149	45.5	45.5	366.9	81.0	19.0	6.8
Nº 200	0.075	18.9	18.9	365.8	85.1	14.9	5.3
FONDO		0.0	67.3	453.1	100.0		

Nota: Para la granulometría de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometría.

geolabocuenca@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

$$D_{10} = 0.276 \\ D_{60} = 2.983 \\ D_{80} = 12.073$$

$$C_u = 43.8 \\ C_s = 2.7$$

$$\% \text{ Grava} \quad 64\% \\ \% \text{ Arena} \quad 30\% \\ \% \text{ Finos} \quad 5\%$$

$$\begin{aligned} L. \text{ Líquido} & 52.6\% \\ L. \text{ Plástico} & 17.8\% \\ I. \text{ Plasticidad} & 34.8\% \\ H. \text{ Natural} & 10.3\% \\ I. \text{ Liquidez} & -0.21 \end{aligned}$$

SUCS: 3W - GC  
AASHTO: A-2-7 (o)

Jefe de Laboratorio



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 04 - 02

Prof. :

Ubicación: 0+701.50

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct-15

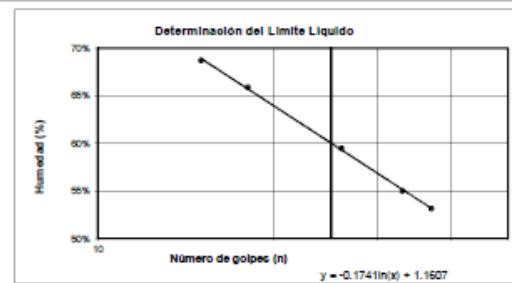
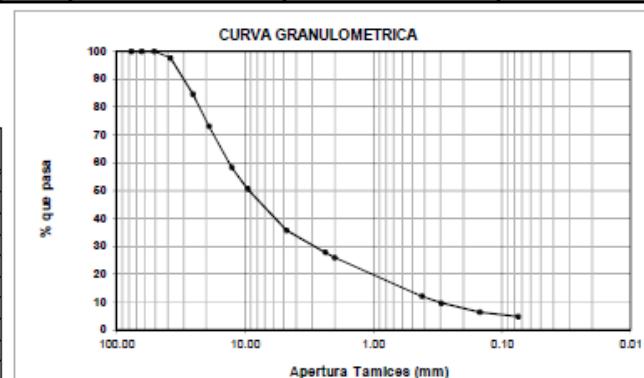
LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM. NATURAL			HUM. GRANULOM.								
Número de tarro	124	101	126	163	132	133	100	142	111	147	142	102	110	121					
Muestra húmeda + tarro (gr)	25.21	24.97	23.94	29.07	27.89	17.47	15.35	15.91	131.34	127.56	123.99	93.33	115.27	105.81					
Muestra seca + tarro (gr)	21.63	21.04	20.32	23.75	22.79	17.35	15.21	15.75	120.28	117.02	113.39	89.85	110.83	101.97					
Peso de tarro (gr)	14.90	13.90	14.24	15.68	15.37	16.88	14.66	15.16	15.59	17.26	15.16	13.98	15.04	15.45					
Peso de agua (gr)	3.58	3.93	3.62	5.32	5.10	0.12	0.14	0.16	11.06	10.54	10.60	3.48	4.44	3.84					
Peso muestra seca (gr)	6.73	7.14	6.08	8.07	7.42	0.47	0.55	0.59	104.69	99.76	98.23	75.87	95.79	86.52					
Porcentaje de humedad	53.2%	55.0%	59.5%	65.9%	68.7%	25.5%	25.5%	27.1%	10.6%	10.6%	10.6%	4.6%	4.6%	4.4%					
Número de golpes - Promedio	37	33	26	18	15	26.0%			10.6%			4.6%							
FRACCION GRUESA																			
Peso húmedo total antes del ensayo (gr)	3805																		
Peso húmedo total después del ensayo (gr)	3805																		
Error	0.00%																		
Humedad de material que pasa # 4	4.56%																		
Peso seco total después del ensayo (gr)	3744																		
Tamiz	Apertura	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa													
	Tamiz (mm)																		
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0													
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0													
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0													
11/2"	38.10	90	90	90	2.4	97.6													
1"	25.40	485	485	575	15.4	84.6													
3/4"	19.10	430	430	1005	26.8	73.2													
1/2"	12.70	555	555	1560	41.7	58.3													
3/8"	9.52	290	290	1850	49.4	50.6													
Nº 4	4.76	555	555	2405	64.2	35.8													
PASA Nº 4	1400	1400																	
FRACCION FINA																			
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500																		
Peso seco antes de lavado (gr)	451.91																		
Peso seco después de lavado (gr)	391.50																		
Peso seco total después del ensayo	391.50																		
Error	0.00%																		
Tamiz	Apertura	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa													
	Tamiz (mm)																		
Nº 8	2.38	100.2	100.2	100.2	22.2	77.8	27.8												
Nº 10	2.00	24.4	24.4	124.6	27.6	72.4	25.9												
Nº 40	0.42	174.2	174.2	298.8	66.1	33.9	12.1												
Nº 50	0.297	31.4	31.4	330.2	73.1	26.9	9.6												
Nº 100	0.149	41.8	41.8	372.0	82.3	17.7	6.3												
Nº 200	0.075	19.5	19.5	391.5	86.6	13.4	4.8												
FONDO		0.0	60.4	451.9	100.0														

Nota: Para la granulometria de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometria.

 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador

geolabcuenca@gmail.com

Teléfono: +593 7 288 1174



JEFE DE LABORATORIO

$$D_{10} = 0.313$$

$$D_{30} = 2.876$$

$$D_{60} = 13.296$$

$$C_u = 42.5$$

$$C_d = 2.0$$

$$\% \text{ Grava} \quad 64\%$$

$$\% \text{ Arena} \quad 31\%$$

$$\% \text{ Fines} \quad 5\%$$

$$L. \text{ Líquido} \quad 60.0\%$$

$$L. \text{ Plástico} \quad 26.0\%$$

$$I. \text{ Plasticidad} \quad 34.0\%$$

$$H. \text{ Natural} \quad 10.6\%$$

$$I. \text{ Liquidez} \quad -0.45$$

SUCS: GW

AASHTO: A-2-7 (o)



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 04 - 03  
 Ubicación: 0+701.50

Prof. :

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					178	109	193	HUM. NATURAL		HUM. GRANULOM.	
	Muestra húmeda + tarro (gr)	Muestra seca + tarro (gr)	Peso de tarro (gr)	Peso de agua (gr)	Peso muestra seca (gr)	Porcentaje de humedad	NP	NP	NP	15.3%	14.8%	15.0%
Muestra húmeda + tarro (gr)										98.58	109.80	116.16
Muestra seca + tarro (gr)										87.42	97.52	102.96
Peso de tarro (gr)										14.53	14.42	15.36
Peso de agua (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.16	12.26	13.18	0.00	0.00	0.00
Peso muestra seca (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.79	83.10	87.62	0.00	0.00	0.00
Porcentaje de humedad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	15.3%	14.8%	15.0%
Número de golpes - Promedio							NP			15.1%		

## FRACCION GRUESA

Peso húmedo total antes del ensayo (gr) 3815

Peso húmedo total después del ensayo (gr) 3810

Error 0.13%

Humedad de material que pasa #4 0.00%

Peso seco total después del ensayo (gr) 3815

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. corregr. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retido	% que pasa
3"	76.20	0	0	0	0.0	100.0
2 1/2"	63.50	0	0	0	0.0	100.0
2"	50.80	0	0	0	0.0	100.0
11/2"	38.10	0	0	0	0.0	100.0
1"	25.40	665	665	665	17.4	82.6
3/4"	19.10	720	720	1385	36.3	63.7
1/2"	12.70	915	920	2305	60.4	39.6
3/8"	9.52	410	410	2715	71.2	28.8
Nº 4	4.76	580	580	3295	86.4	13.6
PASA Nº 4	520	520				

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr) 500

Peso seco antes de lavado (gr) 434.59

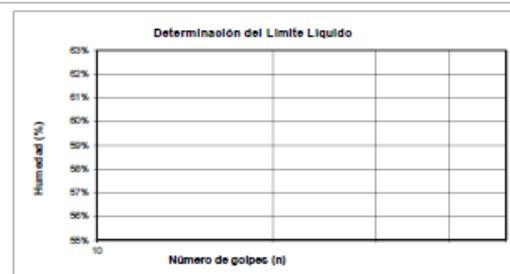
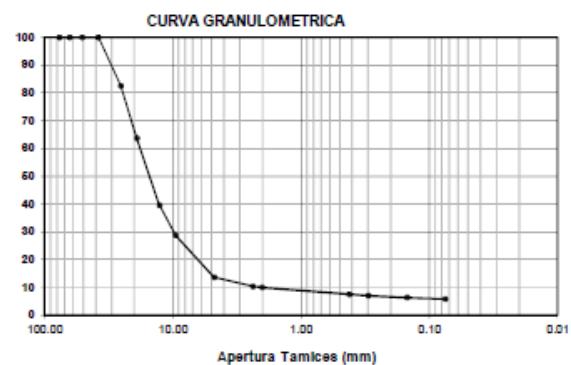
Peso seco después de lavado (gr) 249.50

Peso seco total después del ensayo 249.40

Error 0.04%

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. corregr. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	Porcentaje retido	Porcentaje que pasa	Liga % que pasa
Nº 8	2.38	105.5	105.6	105.6	24.3	75.7	10.3
Nº 10	2.00	10.5	10.5	116.1	26.7	73.3	10.0
Nº 40	0.42	78.2	78.2	194.3	44.7	55.3	7.5
Nº 50	0.297	15.8	15.8	210.1	48.3	51.7	7.0
Nº 100	0.149	22.4	22.4	232.5	53.5	46.5	6.3
Nº 200	0.075	17.0	17.0	249.5	57.4	42.6	5.8
FONDO		0.0	185.1	434.6	100.0		

Nota: Para la granulometría de la serie fina se usa la humedad natural, en tanto que, para la serie gruesa se considera la humedad de granulometría.

 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador

 D<sub>10</sub> = 2.012  
 D<sub>30</sub> = 9.823  
 D<sub>60</sub> = 17.942

 C<sub>u</sub> = 8.9  
 C<sub>0</sub> = 2.7  
 % Grava 86%  
 % Arena 8%  
 % Fines 6%

 L. Líquido NP  
 L. Plástico NP  
 I. Plasticidad NP  
 H. Natural 15.1%  
 I. Liquidez

 SUCS: SW - GM  
 AASHTO: A-1-b (b)

JEFE DE LABORATORIO

Teléfono: +593 7 288 1174



## A.2 Resultados de los ensayos de clasificación de suelos en las muestras del Tramo 2

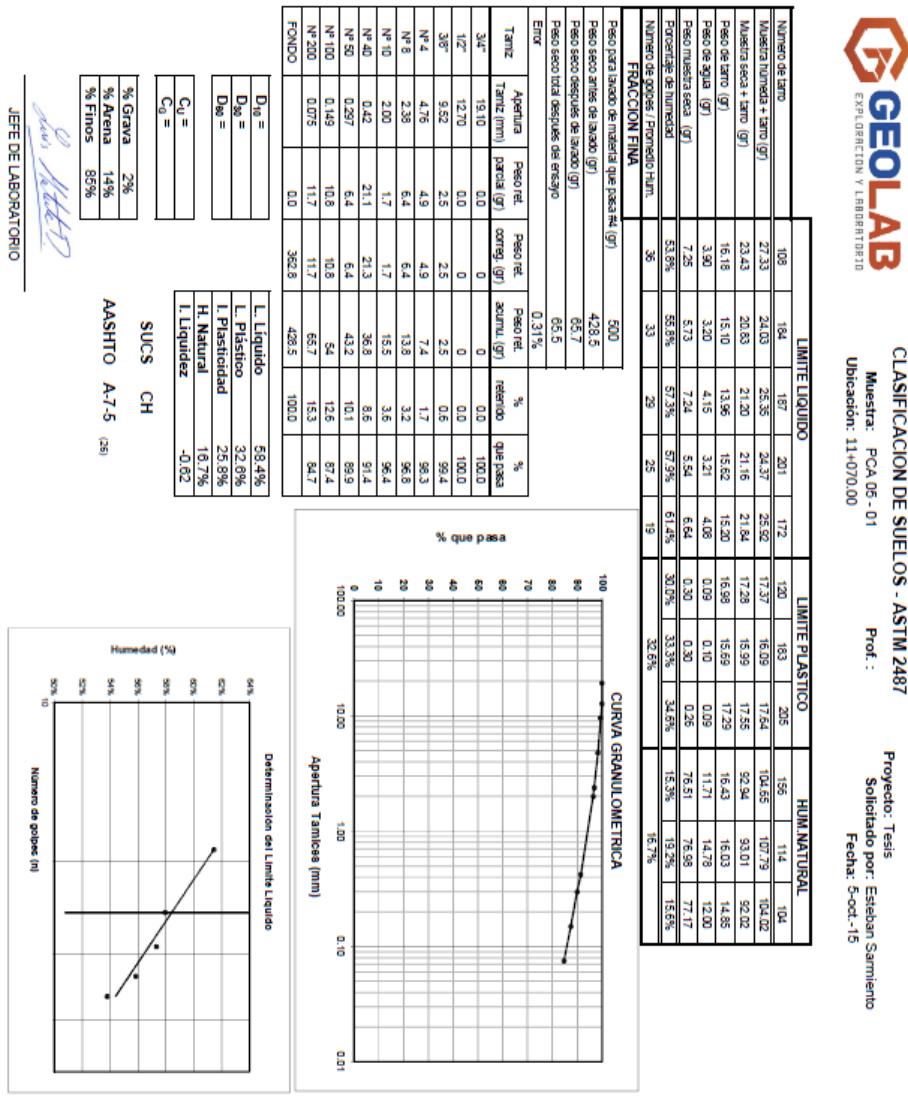


Figura A-13. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 05 del Tramo 2.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 05 - 02

Prof. :

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
	187	113	101	170	122	23	129	133	200	106	134
Muestra húmeda + tarro (gr)	24.21	30.39	25.84	25.80	27.26	7.79	16.73	17.61	105.82	109.00	104.27
Muestra seca + tarro (gr)	20.70	24.79	21.63	22.05	22.99	7.60	16.51	17.42	94.15	97.08	92.83
Peso de tarro (gr)	13.96	14.24	13.91	15.40	15.71	7.06	15.90	16.88	14.68	15.15	14.17
Peso de agua (gr)	3.51	5.60	4.21	3.75	4.27	0.19	0.22	0.19	11.67	11.92	11.44
Peso muestra seca (gr)	6.74	10.55	7.72	6.65	7.28	0.54	0.61	0.54	79.47	81.93	78.66
Porcentaje de humedad	52.1%	53.1%	54.5%	56.4%	58.7%	35.2%	36.1%	35.2%	14.7%	14.5%	14.5%
Número de golpes / Promedio Hum.	38	32	27	21	16	35.5%			14.6%		

FRACCION FINA					
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido
3/4"	19.10	0.0	0	0	100.0
1/2"	12.70	3.0	3	3	0.7
3/8"	9.52	2.9	2.9	5.9	1.4
Nº 4	4.76	9.7	9.7	15.6	3.6
Nº 8	2.38	8.4	8.4	24	5.5
Nº 10	2.00	2.4	2.4	26.4	6.1
Nº 40	0.42	33.0	33.1	59.5	13.6
Nº 50	0.297	12.2	12.2	71.7	16.4
Nº 100	0.149	24.3	24.3	96	22.0
Nº 200	0.075	17.1	17.1	113.1	25.9
FONDO		0.0	323.2	436.3	100.0

$$\begin{matrix} D_{10} = \\ D_{30} = \\ D_{60} = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} C_u = \\ C_d = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \% \text{ Grava} & 4\% \\ \% \text{ Arena} & 22\% \\ \% \text{ Finos} & 74\% \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} L. \text{ Líquido} & 55.1\% \\ L. \text{ Plástico} & 35.5\% \\ I. \text{ Plasticidad} & 19.8\% \\ H. \text{ Natural} & 14.6\% \\ I. \text{ Liquidez} & -1.07 \end{matrix}$$

 SUCS CH  
 AASHTO A-7-5 (16)

JEFE DE LABORATORIO

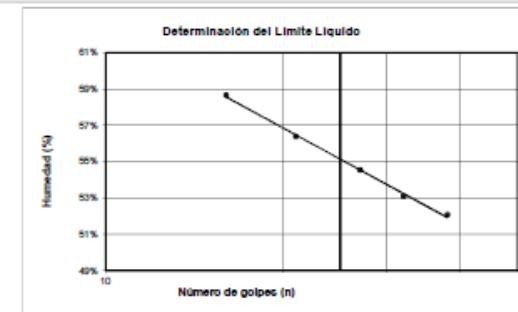
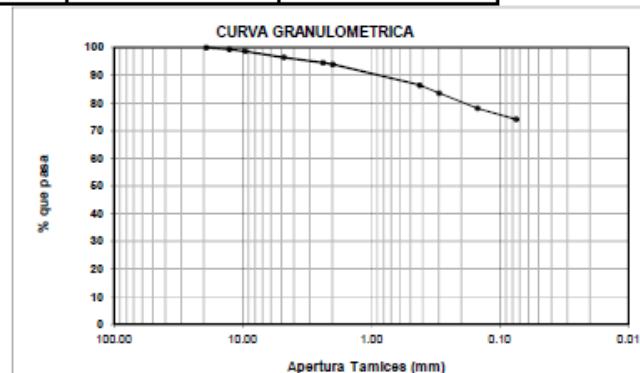
 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador


Figura A-14. Resultados del suelo natural en el punto 05 del Tramo 2.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 06 - 01

Prof. :

Ubicación: 11+058.00

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Fecha: 5-oct.-15

Número de tarro	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
	142	178	189	133	128	129	111	112	203	98	152
Muestra húmeda + tarro (gr)	26.81	27.76	24.06	27.75	24.57	16.35	16.14	16.20	117.35	109.55	113.76
Muestra seca + tarro (gr)	22.68	22.89	20.65	23.48	20.48	16.24	16.00	16.07	101.51	94.67	98.29
Peso de tarro (gr)	15.16	14.62	15.23	16.89	14.24	15.92	15.61	15.68	15.77	14.74	15.53
Peso de agua (gr)	4.13	4.87	3.41	4.27	4.09	0.11	0.14	0.13	15.84	14.88	15.47
Peso muestra seca (gr)	7.52	8.27	5.42	6.59	6.24	0.32	0.39	0.39	65.74	79.93	82.76
Porcentaje de humedad	54.9%	58.5%	62.9%	64.8%	65.5%	34.4%	35.9%	33.3%	18.5%	18.6%	18.7%
Número de golpes / Promedio Hum.	36	34	27	23	18	34.5%			18.6%		

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500					
Peso seco antes de lavado (gr)	421.6					
Peso seco después de lavado (gr)	75.4					
Peso seco total después del ensayo	75.2					
Error	0.27%					
Tamiz	Apertura	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0
3/8"	9.52	1.6	1.6	1.6	0.4	99.6
Nº 4	4.76	7.0	7	8.6	2.0	98.0
Nº 8	2.38	11.5	11.5	20.1	4.8	95.2
Nº 10	2.00	3.5	3.5	23.6	5.6	94.4
Nº 40	0.42	30.1	30.3	53.9	12.8	87.2
Nº 50	0.297	5.1	5.1	59	14.0	86.0
Nº 100	0.149	8.8	8.8	67.8	16.1	83.9
Nº 200	0.075	7.6	7.6	75.4	17.9	82.1
FONDO		0.0	346.2	421.6	100.0	

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{30} &= \\ D_{60} &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_d &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Grava} &= 2\% \\ \% \text{ Arena} &= 16\% \\ \% \text{ Finos} &= 82\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L. \text{ Líquido} &= 62.5\% \\ L. \text{ Plástico} &= 34.5\% \\ I. \text{ Plasticidad} &= 28.0\% \\ H. \text{ Natural} &= 18.6\% \\ I. \text{ Liquidez} &= -0.57 \end{aligned}$$

SUCS CH

AASHTO A-7-5 (27)

JEFE DE LABORATORIO

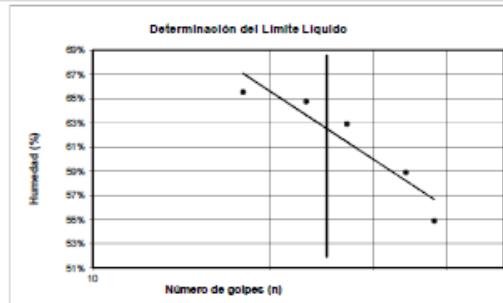
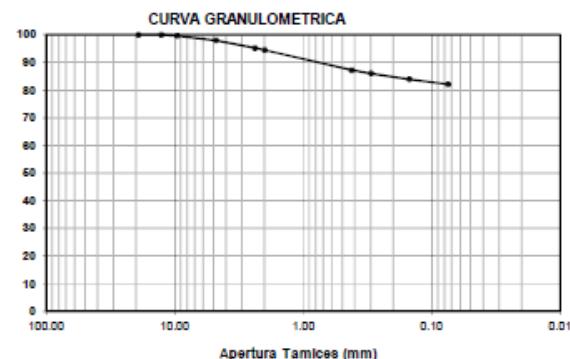
Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
Cuenca - Azuay - Ecuador

Figura A-15. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 06 del Tramo 2.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 06 - 02  
 Ubicación: 11+058.00

Prof. :

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct.-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL								
	90	60	55	10	58	60	14	22	198	151	146						
Muestra humeda + tarro (gr)	31.40	25.20	25.25	18.96	19.29	6.81	7.22	7.52	107.99	107.78	105.15						
Muestra seca + tarro (gr)	25.96	21.18	20.60	15.95	15.88	6.70	7.11	7.42	100.11	99.68	97.54						
Peso de tarro (gr)	8.02	7.88	6.24	6.75	5.99	6.21	6.58	6.92	14.28	14.41	15.36						
Peso de agua (gr)	5.44	4.02	4.65	3.01	3.41	0.11	0.11	0.10	7.88	7.90	7.61						
Peso muestra seca (gr)	17.94	13.30	14.36	9.20	9.89	0.49	0.53	0.50	85.83	85.47	82.18						
Porcentaje de humedad	30.3%	30.2%	32.4%	32.7%	34.5%	22.4%	20.8%	20.0%	9.2%	9.2%	9.3%						
Número de golpes / Promedio Hum.	38	33	27	23	18	21.1%			9.2%								
<b>FRACCION FINA</b>																	
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500																
Peso seco antes de lavado (gr)	457.8																
Peso seco después de lavado (gr)	197.2																
Peso seco total después del ensayo	197.1																
Error	0.05%																
Tamiz	Aertura Tamiz (mm)	Peso ret. partida (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa											
3/4"	19.10	7.1	7.1	7.1	1.6	98.4											
1/2"	12.70	2.3	2.3	9.4	2.1	97.9											
3/8"	9.52	10.4	10.4	19.8	4.3	95.7											
Nº 4	4.76	13.2	13.2	33	7.2	92.8											
Nº 8	2.38	17.3	17.3	50.3	11.0	89.0											
Nº 10	2.00	4.5	4.5	54.8	12.0	88.0											
Nº 40	0.42	39.1	39.1	93.9	20.5	79.5											
Nº 50	0.297	16.4	16.4	110.3	24.1	75.9											
Nº 100	0.149	37.4	37.4	147.7	32.3	67.7											
Nº 200	0.075	49.4	49.5	197.2	43.1	56.9											
FONDO		0.0	260.6	457.8	100.0												

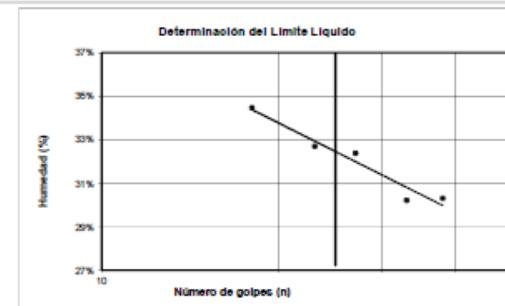
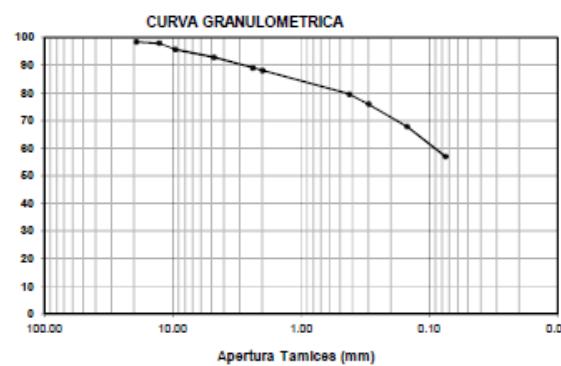
$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{50} &= \\ D_{60} &= 0.091 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_d &= \end{aligned}$$

L. Liquido	32.5%
L. Plástico	21.1%
I. Plasticidad	11.4%
H. Natural	9.2%
I. Liquidez	-1.04

 SUCS CL  
 AASHTO A-6 (4)

JEFE DE LABORATORIO

 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador




## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 07 - 01

Prof. :

Ubicación: 11+080.00

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Fecha: 5-oct.-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
Número de tarro	140	153	112	119	151	105	191	205	180	97	186
Muestra húmeda + tarro (gr)	27.37	30.93	27.16	26.68	25.23	15.67	16.33	18.11	96.38	100.00	104.91
Muestra seca + tarro (gr)	22.65	24.77	22.55	22.28	20.77	15.51	16.17	17.91	87.62	90.82	95.18
Peso de tarro (gr)	15.42	15.60	15.69	15.81	14.41	15.05	15.65	17.29	16.67	17.20	16.25
Peso de agua (gr)	4.72	6.16	4.61	4.40	4.46	0.16	0.16	0.20	8.76	9.18	9.73
Peso muestra seca (gr)	7.23	9.17	6.86	6.47	6.36	0.46	0.52	0.62	70.95	73.62	78.93
Porcentaje de humedad	65.3%	67.2%	67.2%	68.0%	70.1%	34.8%	30.8%	32.3%	12.3%	12.5%	12.3%
Número de golpes / Promedio Hum.	38	34	28	24	19	32.6%			12.4%		

FRACCION FINA						
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)						
500						
Peso seco antes de lavado (gr)						
444.9						
Peso seco después de lavado (gr)						
74.9						
Peso seco total después del ensayo						
74.9						
Error						
0.00%						
Tamiz	Aertura Tamiz (mm)	Peso ref. parcial (gr)	Peso ref. correg. (gr)	Peso ref. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0
3/8"	9.52	2.6	2.6	2.6	0.6	99.4
Nº 4	4.76	11.2	11.2	13.8	3.1	96.9
Nº 8	2.38	11.1	11.1	24.9	5.6	94.4
Nº 10	2.00	3.0	3	27.9	6.3	93.7
Nº 40	0.42	24.0	24	51.9	11.7	88.3
Nº 50	0.297	5.6	5.6	57.5	12.9	87.1
Nº 100	0.149	9.5	9.5	67	15.1	84.9
Nº 200	0.075	7.7	7.7	74.7	16.8	83.2
FONDO		0.2	370.2	444.9	100.0	

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{30} &= \\ D_{60} &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_s &= \end{aligned}$$

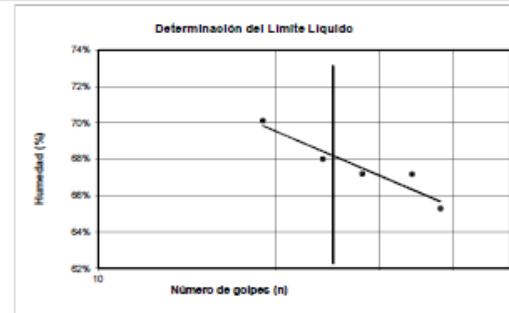
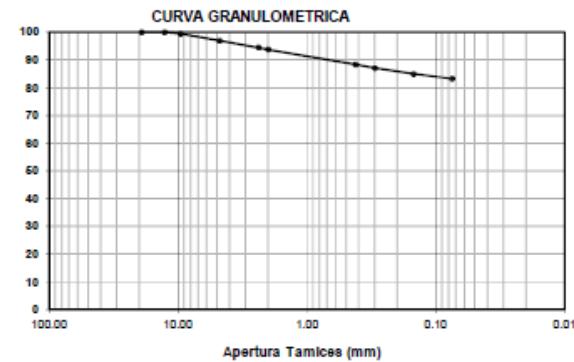
$$\begin{aligned} \% \text{ Grava} & 3\% \\ \% \text{ Arena} & 14\% \\ \% \text{ Finos} & 83\% \end{aligned}$$

L. Líquido 68.2%  
 L. Plástico 32.8%  
 I. Plasticidad 35.8%  
 H. Natural 12.4%  
 I. Liquidez -0.57

SUCS CH  
 AASHTO A-7-5 (34)

JEFE DE LABORATORIO

Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador





## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 07 - 02  
 Ubicación: 11+080.00

 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL					
Número de tarro	137	102	175	99	116	174	142	122	108	130	192			
Muestra húmeda + tarro (gr)	24.49	21.97	24.31	22.44	23.12	15.76	15.87	16.47	98.53	98.61	92.54			
Muestra seca + tarro (gr)	20.34	19.04	20.72	19.57	19.62	15.58	15.68	16.26	85.70	85.81	80.27			
Peso de tarro (gr)	14.17	14.75	15.56	15.56	14.94	15.07	15.15	15.71	16.17	16.31	13.97			
Peso de agua (gr)	4.15	2.93	3.59	2.87	3.50	0.18	0.19	0.21	12.83	12.80	12.27			
Peso muestra seca (gr)	6.17	4.29	5.06	4.01	4.68	0.51	0.53	0.55	69.53	69.50	66.30			
Porcentaje de humedad	67.3%	68.3%	70.9%	71.6%	74.8%	35.3%	35.8%	36.2%	18.5%	18.4%	18.5%			
Número de golpes / Promedio Hum.	37	33	29	24	19	36.4%			18.5%					
FRACCION FINA														
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500													
Peso seco antes de lavado (gr)	422.1													
Peso seco después de lavado (gr)	68.3													
Peso seco total después del ensayo	68.1													
Error	0.29%													
Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa								
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0								
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0								
3/8"	9.52	0.0	0	0	0.0	100.0								
Nº 4	4.76	6.7	6.7	6.7	1.6	98.4								
Nº 8	2.38	13.6	13.6	20.3	4.8	95.2								
Nº 10	2.00	3.8	3.8	24.1	5.7	94.3								
Nº 40	0.42	23.6	23.6	47.9	11.3	88.7								
Nº 50	0.297	4.6	4.6	52.5	12.4	87.6								
Nº 100	0.149	8.3	8.3	60.8	14.4	85.6								
Nº 200	0.075	7.5	7.5	68.3	16.2	83.8								
FONDO		0.0	353.8	422.1	100.0									

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{50} &= \\ D_{100} &= \end{aligned}$$

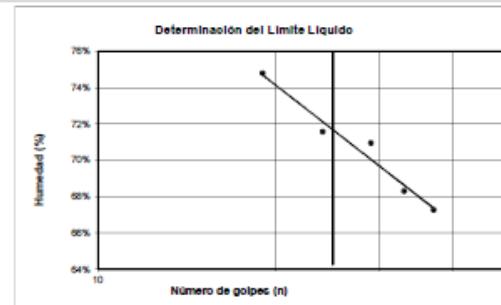
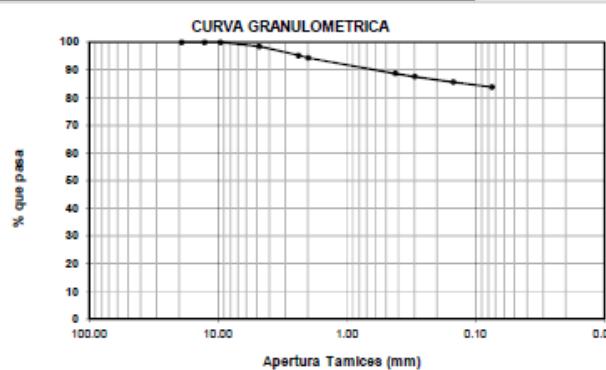
$$\begin{aligned} \text{L. Líquido} &= 71.7\% \\ \text{L. Plástico} &= 36.4\% \\ \text{I. Plasticidad} &= 35.3\% \\ \text{H. Natural} &= 18.5\% \\ \text{I. Liquidez} &= -0.51 \end{aligned}$$

 SUCS CH  
 AASHTO A-7-5 (35)

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_s &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Grava} &= 2\% \\ \% \text{ Arena} &= 15\% \\ \% \text{ Fina} &= 84\% \end{aligned}$$

JEFE DE LABORATORIO

 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador




## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

Muestra: PCA 08 - 01

Prof. :

Ubicación: 11+090.00

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Fecha: 5-oct.-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL								
Número de tarro	118	192	126	145	148	59	20	35	107	179	121						
Muestra húmeda + tarro (gr)	27.57	28.62	28.27	26.67	32.30	7.21	7.87	7.36	101.72	102.22	108.57						
Muestra seca + tarro (gr)	22.38	22.89	23.25	21.83	25.35	7.04	7.70	7.16	91.76	92.56	98.08						
Peso de tarro (gr)	14.23	13.96	15.53	14.49	15.22	6.46	7.15	6.50	14.31	15.14	15.44						
Peso de agua (gr)	5.19	5.73	5.02	4.84	6.95	0.17	0.17	0.20	9.96	9.66	10.49						
Peso muestra seca (gr)	8.15	8.93	7.72	7.34	10.13	0.58	0.55	0.66	77.45	77.42	82.64						
Porcentaje de humedad	63.7%	64.2%	65.0%	65.9%	68.6%	29.3%	30.9%	30.3%	12.9%	12.5%	12.7%						
Número de golpes / Promedio Hum.	38	33	28	24	20	30.2%			12.7%								
FRACCION FINA																	
Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500																
Peso seco antes de lavado (gr)	443.7																
Peso seco después de lavado (gr)	103.0																
Peso seco total después del ensayo	102.9																
Error	0.10%																
Tamiz	Apertura	Peso ret. partida (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ref. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa											
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0											
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0											
3/8"	9.52	2.4	2.4	2.4	0.5	99.5											
Nº 4	4.76	10.5	10.5	12.9	2.9	97.1											
Nº 8	2.38	17.4	17.4	30.3	6.8	93.2											
Nº 10	2.00	5.0	5	35.3	8.0	92.0											
Nº 40	0.42	33.9	34	69.3	15.6	84.4											
Nº 50	0.297	6.9	6.9	76.2	17.2	82.8											
Nº 100	0.149	12.3	12.3	88.5	19.9	80.1											
Nº 200	0.075	14.5	14.5	103	23.2	76.8											
FONDO		0.0	340.7	443.7	100.0												

$$\begin{matrix} D_{10} = \\ D_{50} = \\ D_{80} = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} C_u = \\ C_s = \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \% \text{ Grava} & 3\% \\ \% \text{ Arena} & 20\% \\ \% \text{ Finos} & 77\% \end{matrix}$$

L. Líquido	66.3%
L. Plástico	30.2%
I. Plasticidad	36.1%
H. Natural	12.7%
I. Liquidez	-0.48

SUCS CH  
AASHTO A-7-5 (30)

JEFE DE LABORATORIO

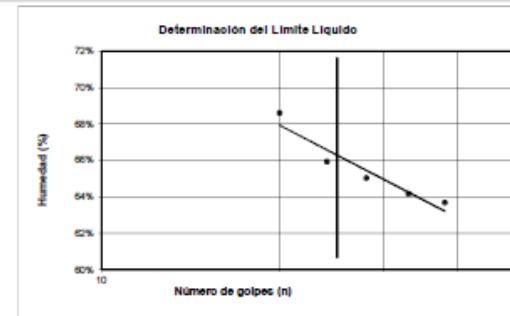
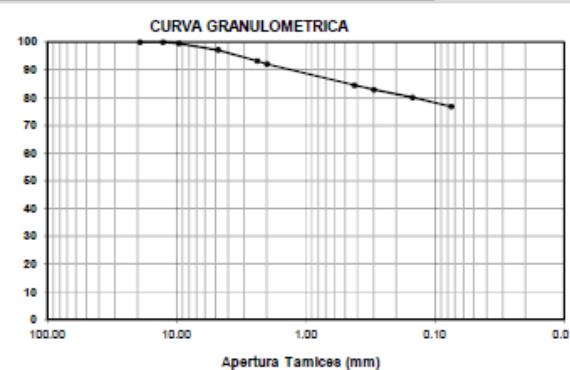
 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador


Figura A-19. Resultados del suelo junto al subdren en el punto 08 del Tramo 2.



## CLASIFICACION DE SUELOS - ASTM 2487

 Muestra: PCA 08 - 02  
 Ubicación: 11+090.00

 Prof.:  
 Proyecto: Tesis  
 Solicitado por: Esteban Sarmiento  
 Fecha: 5-oct.-15

	LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO			HUM.NATURAL		
Número de tarro	157	201	124	190	128	111	186	189	153	139	126
Muestra húmeda + tarro (gr)	26.32	26.26	26.19	24.56	25.87	16.03	16.93	16.14	109.84	105.37	102.10
Muestra seca + tarro (gr)	23.30	22.78	22.37	21.33	21.75	15.94	16.80	15.96	92.33	86.50	86.12
Peso de tarro (gr)	16.23	15.62	14.90	15.31	14.27	15.62	16.24	15.24	15.61	14.26	15.53
Peso de agua (gr)	3.02	3.48	3.82	3.23	4.12	0.09	0.13	0.18	17.51	16.87	15.98
Peso muestra seca (gr)	7.07	7.16	7.47	6.02	7.48	0.32	0.56	0.72	76.72	74.24	70.59
Porcentaje de humedad	42.7%	48.6%	51.1%	53.7%	55.1%	26.1%	23.2%	25.0%	22.6%	22.7%	22.6%
Número de golpes / Promedio Hum.	37	33	28	23	16		25.4%				22.7%

## FRACCION FINA

Peso para lavado de material que pasa #4 (gr)	500
Peso seco antes de lavado (gr)	407.4
Peso seco después de lavado (gr)	76.0
Peso seco total después del ensayo	75.9

Error 0.13%

Tamiz	Apertura Tamiz (mm)	Peso ret. parcial (gr)	Peso ret. correg. (gr)	Peso ret. acumu. (gr)	% retenido	% que pasa
3/4"	19.10	0.0	0	0	0.0	100.0
1/2"	12.70	0.0	0	0	0.0	100.0
3/8"	9.52	0.0	0	0	0.0	100.0
Nº 4	4.76	4.0	4	4	1.0	99.0
Nº 8	2.38	5.2	5.2	9.2	2.3	97.7
Nº 10	2.00	1.8	1.8	11	2.7	97.3
Nº 40	0.42	16.4	16.4	27.4	6.7	93.3
Nº 50	0.297	6.2	6.2	33.6	8.2	91.8
Nº 100	0.149	16.4	16.4	50	12.3	87.7
Nº 200	0.075	25.9	26	76	18.7	81.3
FONDO		0.0	331.4	407.4	100.0	

$$\begin{aligned} D_{10} &= \\ D_{30} &= \\ D_{60} &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L. \text{ Líquido} &= 50.9\% \\ L. \text{ Plástico} &= 25.4\% \\ I. \text{ Plasticidad} &= 25.5\% \\ H. \text{ Natural} &= 22.7\% \\ I. \text{ Liquidez} &= -0.11 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u &= \\ C_d &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Grava} &= 1\% \\ \% \text{ Arena} &= 18\% \\ \% \text{ Finales} &= 81\% \end{aligned}$$

 SUCS CH  
 AASHTO A-7-6 (22)

JEFE DE LABORATORIO

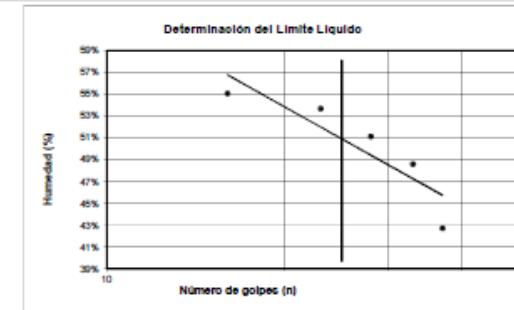
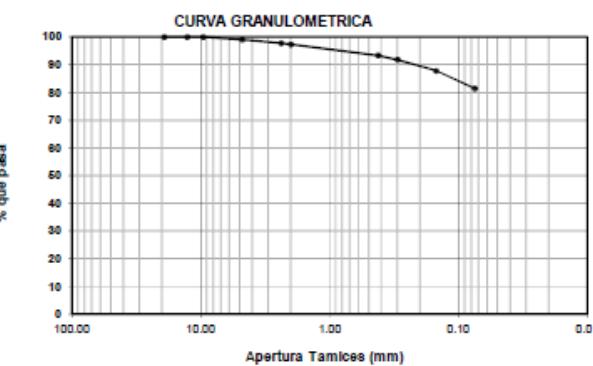
 Luis Sarmiento 1-86 y Miguel Cordero  
 Cuenca - Azuay - Ecuador


Figura A-20. Resultados del suelo natural en el punto 08 del Tramo 2.



## A.3 Resultados del ensayo del Hidrómetro en las muestras del Tramo 1

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+665.50

Fecha:

Muestra: PCA 01-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico sólidos = 2.510

% Pasante Tamiz No 10 = 80.2%

Corrección Hidrómetro = 0.0035

W = 93.52

Constante = 1777.5011

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0085	1.0050	17	14.971	1.0798	0.01480	8.89	0.0405
5	1.008	1.0045	17	15.104	1.0798	0.01480	8.00	0.0257
15	1.0072	1.0037	17	15.317	1.0798	0.01480	6.58	0.0150
30	1.006	1.0025	17	15.636	1.0798	0.01480	4.44	0.0107
60	1.0068	1.0033	17	15.423	1.0798	0.01480	5.87	0.0075
250	1.0055	1.0020	17	15.768	1.0798	0.01480	3.56	0.0037
1440	1.0036	1.0001	17	16.273	1.0798	0.01480	0.18	0.0016

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	6.42
0.005	4.34
0.002	0.85

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-21. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 01 del tramo 1.


**Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+665.50

Fecha:

Muestra: PCA 01-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Solidos = 2.550

% Pasante Tamiz No 10 = 54.8%

Corrección Hidrómetro = 0.0031

W = 136.86

Constante = 1202.0645

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0085	1.0054	17	14.865	1.0798	0.01460	6.49	0.0398
5	1.0075	1.0044	17	15.131	1.0798	0.01460	5.29	0.0254
15	1.0061	1.0030	17	15.503	1.0798	0.01460	3.61	0.0148
30	1.006	1.0029	17	15.529	1.0798	0.01460	3.49	0.0105
60	1.0059	1.0028	17	15.556	1.0798	0.01460	3.37	0.0074
250	1.005	1.0019	17	15.795	1.0798	0.01460	2.28	0.0037
1440	1.0032	1.0001	17	16.273	1.0798	0.01460	0.12	0.0016

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	3.47
0.005	2.67
0.002	0.58

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-22. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 01 del tramo 1.


**Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+665.5

Fecha:

Muestra: PCA 01-03

Peso Seco Muestra (gr) = 70  
 % Pasante Tamiz No 10 = 11.8%

Peso específico Solidos = 2.630  
 Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 593.22

Constante = 271.9895

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0251	1.0209	17	10.745	1.0798	0.01424	5.68	0.0330
5	1.0213	1.0171	17	11.755	1.0798	0.01424	4.65	0.0218
15	1.0182	1.0140	17	12.579	1.0798	0.01424	3.81	0.0130
30	1.0161	1.0119	17	13.137	1.0798	0.01424	3.24	0.0094
60	1.015	1.0108	17	13.429	1.0798	0.01424	2.94	0.0067
250	1.0118	1.0076	17	14.280	1.0798	0.01424	2.07	0.0034
1440	1.0068	1.0026	17	15.609	1.0798	0.01424	0.71	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	3.33
0.005	2.48
0.002	1.07

 Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
 Jefe de Laboratorio

Figura A-23. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 01 del tramo 1.


**Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+675.60

Fecha:

Muestra: PCA 02-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.620

% Pasante Tamiz No 10 = 93.9%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 79.87

Constante = 2024.8395

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.014	1.0098	17	13.695	1.0798	0.01428	19.84	0.0374
5	1.0131	1.0089	17	13.934	1.0798	0.01428	18.02	0.0238
15	1.012	1.0078	17	14.227	1.0798	0.01428	15.79	0.0139
30	1.0113	1.0071	17	14.413	1.0798	0.01428	14.38	0.0099
60	1.0103	1.0061	17	14.679	1.0798	0.01428	12.35	0.0071
250	1.0078	1.0036	17	15.343	1.0798	0.01428	7.29	0.0035
1440	1.007	1.0028	17	15.556	1.0798	0.01428	5.67	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	14.41
0.005	9.39
0.002	6.08

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-24. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 02 del tramo 1


**Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+675.60

Fecha:

Muestra: PCA 02-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.570

% Pasante Tamiz No 10 = 42.7%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 175.64

Constante = 931.9660

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0092	1.0050	17	14.971	1.0798	0.01451	4.66	0.0397
5	1.0088	1.0046	17	15.077	1.0798	0.01451	4.29	0.0252
15	1.0081	1.0039	17	15.263	1.0798	0.01451	3.63	0.0146
30	1.0073	1.0031	17	15.476	1.0798	0.01451	2.89	0.0104
60	1.0071	1.0029	17	15.529	1.0798	0.01451	2.70	0.0074
250	1.0061	1.0019	17	15.795	1.0798	0.01451	1.77	0.0036
1440	1.0045	1.0003	17	16.220	1.0798	0.01451	0.28	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	2.86
0.005	2.11
0.002	0.61

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio


**Determinación de Granulometria por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+675.60

Fecha:

Muestra: PCA 02-03

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.660

% Pasante Tamiz No 10 = 9.1%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 824.18

Constante = 194.4257

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diametro (mm)
2	1.0305	1.0263	17	9.310	1.0798	0.01411	5.11	0.0304
5	1.0263	1.0241	17	9.894	1.0798	0.01411	4.69	0.0199
15	1.0261	1.0219	17	10.479	1.0798	0.01411	4.26	0.0118
30	1.0223	1.0181	17	11.489	1.0798	0.01411	3.52	0.0087
60	1.0171	1.0129	17	12.871	1.0798	0.01411	2.51	0.0065
250	1.0111	1.0068	17	14.493	1.0798	0.01411	1.32	0.0034
1440	1.0071	1.0029	17	15.529	1.0798	0.01411	0.56	0.0015

Diametro mm	Porcentaje
0.010	3.82
0.005	1.93
0.002	0.77

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-26. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 02 del tramo 1.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+685.50

Fecha:

Muestra: PCA 03-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.560

% Pasante Tamiz No 10 = 32.5%

Corrección Hidrómetro = 0.0028

W = 230.77

Constante = 711.1111

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diametro (mm)
2	1.01	1.0072	17	14.386	1.0798	0.01456	5.12	0.0390
5	1.0088	1.0060	17	14.705	1.0798	0.01456	4.27	0.0250
15	1.008	1.0052	17	14.918	1.0798	0.01456	3.70	0.0145
30	1.0078	1.0050	17	14.971	1.0798	0.01456	3.56	0.0103
60	1.0071	1.0043	17	15.157	1.0798	0.01456	3.06	0.0073
250	1.0057	1.0029	18	15.529	1.0526	0.01437	2.06	0.0036
1440	1.003	1.0002	17	16.247	1.0798	0.01456	0.14	0.0015

Diametro mm	Porcentaje
0.010	3.51
0.005	2.44
0.002	0.57

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-27. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 03 del tramo 1.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+685.50

Fecha:

Muestra: PCA 03-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.580

% Pasante Tamiz No 10 = 97.0%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 77.32

Constante = 2111.8987

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.012	1.0078	17	14.227	1.0798	0.01446	16.47	0.0386
5	1.0112	1.0070	17	14.439	1.0798	0.01446	14.78	0.0246
15	1.0101	1.0059	17	14.732	1.0798	0.01446	12.46	0.0143
30	1.0092	1.0050	17	14.971	1.0798	0.01446	10.56	0.0102
60	1.0082	1.0040	17	15.237	1.0798	0.01446	8.45	0.0073
250	1.0073	1.0031	17	15.476	1.0798	0.01446	6.55	0.0036
1440	1.006	1.0018	17	15.822	1.0798	0.01446	3.80	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	10.40
0.005	7.27
0.002	4.44

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-28. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 03 del tramo 1.

Determinación de Granulometria por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+685.50

Fecha:

Muestra: PCA 03-03

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.650

% Pasante Tamiz No 10 = 11.9%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 630.25

Constante = 254.8263

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diametro (mm)
2	1.033	1.0266	17	8.645	1.0798	0.01415	7.34	0.0294
5	1.03	1.0258	17	9.443	1.0798	0.01415	6.57	0.0195
15	1.026	1.0216	17	10.506	1.0798	0.01415	5.56	0.0118
30	1.0232	1.0190	17	11.250	1.0798	0.01415	4.84	0.0087
60	1.022	1.0178	17	11.569	1.0798	0.01415	4.54	0.0062
250	1.0145	1.0103	17	13.562	1.0798	0.01415	2.62	0.0033
1440	1.0095	1.0053	17	14.891	1.0798	0.01415	1.35	0.0014

Diametro mm	Porcentaje
0.010	5.14
0.005	3.74
0.002	1.74

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-29. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 03 del tramo 1.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+701.50

Fecha:

Muestra: PCA 04-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.620

% Pasante Tamiz No 10 = 25.7%

Corrección Hidrómetro = 0.0032

W = 291.83

Constante = 554.1893

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diametro (mm)
2	1.0102	1.0070	17	14.439	1.0798	0.01428	3.88	0.0384
5	1.0091	1.0059	17	14.732	1.0798	0.01428	3.27	0.0245
15	1.0081	1.0049	17	14.998	1.0798	0.01428	2.72	0.0143
30	1.0071	1.0039	17	15.263	1.0798	0.01428	2.16	0.0102
60	1.0072	1.0040	17	15.237	1.0798	0.01428	2.22	0.0072
250	1.0058	1.0026	17	15.609	1.0798	0.01428	1.44	0.0036
1440	1.0035	1.0003	16	16.220	1.1081	0.01447	0.17	0.0015

Diametro mm	Porcentaje
0.010	2.68
0.005	1.75
0.002	0.46

Ing. Luis A. Matute Díaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-30. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 04 del tramo 1.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 0+701.50

Fecha:

Muestra: PCA 04-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.600

% Pasante Tamiz No 10 = 25.9%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 289.58

Constante = 561.1567

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.016	1.0118	17	13.164	1.0798	0.01437	6.62	0.0369
5	1.015	1.0108	17	13.429	1.0798	0.01437	6.06	0.0236
15	1.0132	1.0090	17	13.908	1.0798	0.01437	5.05	0.0138
30	1.0125	1.0083	17	14.094	1.0798	0.01437	4.66	0.0099
60	1.012	1.0078	17	14.227	1.0798	0.01437	4.38	0.0070
250	1.0102	1.0060	17	14.705	1.0798	0.01437	3.37	0.0035
1440	1.0071	1.0029	16	15.529	1.1081	0.01456	1.63	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	4.67
0.005	3.80
0.002	2.06

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-31. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 04 del tramo 1.


**Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422**

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: D+701.50

Fecha:

Muestra: PCA 04-03

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.650

% Pasante Tamiz No 10 = 10.0%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 750.00

Constante = 214.1414

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.033	1.0268	17	8.645	1.0798	0.01415	6.17	0.0294
5	1.03	1.0258	17	9.443	1.0798	0.01415	5.52	0.0195
15	1.026	1.0218	17	10.506	1.0798	0.01415	4.67	0.0118
30	1.0232	1.0190	17	11.250	1.0798	0.01415	4.07	0.0087
60	1.022	1.0178	17	11.569	1.0798	0.01415	3.81	0.0062
250	1.0145	1.0103	17	13.562	1.0798	0.01415	2.21	0.0033
1440	1.0095	1.0053	17	14.891	1.0798	0.01415	1.13	0.0014

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	4.32
0.005	3.14
0.002	1.46

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-32. Resultado del ensayo del hidrómetro en el material drenante en el punto 04 del tramo 1.



## A.4 Resultados del ensayo del Hidrómetro en las muestras del Tramo 2

Determinación de Granulometria por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+070.00

Fecha:

Muestra: PCA 05-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.410

% Pasante Tamiz No 10 = 96.4%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 77.80

Constante = 2196.9173

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.021	1.0168	17	11.835	1.0798	0.01531	36.91	0.0372
5	1.02	1.0158	17	12.101	1.0798	0.01531	34.71	0.0238
15	1.0182	1.0140	17	12.579	1.0798	0.01531	30.76	0.0140
30	1.0165	1.0123	17	13.031	1.0798	0.01531	27.02	0.0101
60	1.0145	1.0103	19	13.562	1.0266	0.01493	22.63	0.0071
250	1.0112	1.0070	18	14.439	1.0526	0.01512	15.38	0.0036
1440	1.0082	1.0040	17	15.237	1.0798	0.01531	8.79	0.0016

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	26.89
0.005	18.24
0.002	10.15

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-33. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 05 del tramo 2.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Samiento

Ubicación: 11+070.00

Fecha:

Muestra: PCA 05-02

Peso Seco Muestra (gr) = 90

Peso específico Sólidos = 2.390

% Pasante Tamiz No 10 = 93.9%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 95.85

Constante = 1793.9329

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0336	1.0294	17	8.486	1.0798	0.01542	52.74	0.0318
5	1.0313	1.0271	17	9.097	1.0798	0.01542	48.62	0.0208
15	1.0272	1.0230	17	10.187	1.0798	0.01542	41.26	0.0127
30	1.0252	1.0210	17	10.718	1.0798	0.01542	37.67	0.0092
60	1.0221	1.0179	17	11.542	1.0798	0.01542	32.11	0.0068
250	1.0164	1.0122	18	13.057	1.0526	0.01523	21.89	0.0035
1440	1.0113	1.0071	17	14.413	1.0798	0.01542	12.74	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	38.48
0.005	26.62
0.002	14.90

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-34. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 05 del tramo 2.

Determinación de Granulometria por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+058.00

Fecha:

Muestra: PCA 06-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico sólidos = 2.440

% Pasante Tamiz No 10 = 94.4%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 79.45

Constante = 2132.7407

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.0281	1.0239	19	9.948	1.0266	0.01477	50.97	0.0329
5	1.0251	1.0209	19	10.745	1.0266	0.01477	44.57	0.0217
15	1.0213	1.0171	19	11.755	1.0266	0.01477	36.47	0.0131
30	1.019	1.0148	18	12.366	1.0526	0.01496	31.56	0.0096
60	1.0162	1.0120	18	13.111	1.0526	0.01496	25.59	0.0070
250	1.0126	1.0084	18	14.067	1.0526	0.01496	17.92	0.0035
1440	1.0085	1.0043	17	15.157	1.0798	0.01515	9.17	0.0016

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	32.12
0.005	21.15
0.002	11.12

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-35. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 06 del tramo 2.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+058.00

Fecha:

Muestra: PCA 06-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.420

% Pasante Tamiz No 10 = 88.0%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 85.23

Constante = 1999.6244

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.023	1.0188	19	11.303	1.0266	0.01488	37.59	0.0354
5	1.0215	1.0173	19	11.702	1.0266	0.01488	34.59	0.0228
15	1.02	1.0158	19	12.101	1.0266	0.01488	31.59	0.0134
30	1.0188	1.0146	19	12.419	1.0266	0.01488	29.19	0.0096
60	1.0176	1.0134	18	12.738	1.0526	0.01506	26.79	0.0069
250	1.016	1.0118	18	13.164	1.0526	0.01506	23.60	0.0035
1440	1.0142	1.0100	17	13.642	1.0798	0.01526	20.00	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	29.47
0.005	25.01
0.002	20.94

Ing. Luis A. Matute Díaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-36. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo natural en el punto 06 del tramo 2.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+080.00

Fecha:

Muestra: PCA 07-01

Peso Seco Muestra (gr) = 75  
% Pasante Tamiz No 10 = 93.7%Peso específico Sólidos = 2.430  
Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 80.04

Constante = 2122.9930

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.03	1.0258	17	9.443	1.0798	0.01520	54.77	0.0330
5	1.028	1.0238	17	9.974	1.0798	0.01520	50.53	0.0215
15	1.0252	1.0210	17	10.718	1.0798	0.01520	44.58	0.0129
30	1.024	1.0198	17	11.037	1.0798	0.01520	42.04	0.0092
60	1.0225	1.0183	17	11.436	1.0798	0.01520	38.85	0.0066
250	1.0191	1.0149	18	12.340	1.0526	0.01501	31.63	0.0033
1440	1.0155	1.0113	17	13.297	1.0798	0.01520	23.99	0.0015

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	42.58
0.005	35.27
0.002	26.19

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Figura A-37. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 07 del tramo 2.

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+080.00

Fecha:

Muestra: PCA 07-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.440

% Pasante Tamiz No 10 = 94.3%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 79.53

Constante = 2130.4815

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.032	1.0278	17	8.911	1.0798	0.01515	59.23	0.0320
5	1.0301	1.0259	17	9.416	1.0798	0.01515	55.18	0.0208
15	1.028	1.0238	17	9.974	1.0798	0.01515	50.71	0.0124
30	1.027	1.0228	17	10.240	1.0798	0.01515	48.57	0.0089
60	1.0248	1.0206	18	10.825	1.0526	0.01496	43.89	0.0064
250	1.0215	1.0173	18	11.702	1.0526	0.01496	36.86	0.0032
1440	1.018	1.0138	17	12.632	1.0798	0.01515	29.40	0.0014

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	49.27
0.005	40.83
0.002	31.78

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio

Determinación de Granulometría por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+090.00

Fecha:

Muestra: PCA 08-01

Peso Seco Muestra (gr) = 70

Peso específico Sólidos = 2.430

% Pasante Tamiz No 10 = 92.0%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 76.09

Constante = 2233.3666

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diámetro (mm)
2	1.021	1.0168	18	11.835	1.0526	0.01501	37.52	0.0365
5	1.0182	1.0140	18	12.579	1.0526	0.01501	31.27	0.0238
15	1.0162	1.0120	18	13.111	1.0526	0.01501	26.80	0.0140
30	1.0142	1.0100	18	13.642	1.0526	0.01501	22.33	0.0101
60	1.0139	1.0097	18	13.722	1.0526	0.01501	21.66	0.0072
250	1.0113	1.0071	18	14.413	1.0526	0.01501	15.86	0.0036
1440	1.0092	1.0050	17	14.971	1.0798	0.01520	11.17	0.0016

Diámetro mm	Porcentaje
0.010	22.31
0.005	18.12
0.002	12.19

  
Ing. Luis A. Matute Díaz, MS

Jefe de Laboratorio

Figura A-39. Resultado del ensayo del hidrómetro en el suelo junto al subdren en el punto 08 del tramo 2.

Determinación de Granulometria por  
Hidrómetro - ASTM D 422

Proyecto: Tesis

Solicitado por: Esteban Sarmiento

Ubicación: 11+090.00

Fecha:

Muestra: PCA 08-02

Peso Seco Muestra (gr) = 75

Peso específico Sólidos = 2.410

% Pasante Tamiz No 10 = 97.3%

Corrección Hidrómetro = 0.0042

W = 77.08

Constante = 2217.4279

Tiempo (min)	Lectura de Hidrómetro	Lectura de Hidrómetro Corregida	Temp. (°C)	L	Viscosidad Dinámica (cP)	K	Porcentaje	Diametro (mm)
2	1.0261	1.0219	18	10.479	1.0526	0.01512	48.56	0.0346
5	1.024	1.0198	18	11.037	1.0526	0.01512	43.91	0.0225
15	1.022	1.0178	18	11.569	1.0526	0.01512	39.47	0.0133
30	1.0203	1.0161	18	12.021	1.0526	0.01512	35.70	0.0096
60	1.0193	1.0151	18	12.287	1.0526	0.01512	33.48	0.0068
250	1.017	1.0128	18	12.698	1.0526	0.01512	28.38	0.0034
1440	1.015	1.0108	17	13.429	1.0798	0.01531	23.95	0.0015

Diametro mm	Porcentaje
0.010	36.14
0.005	30.73
0.002	25.13

Ing. Luis A. Matute Diaz, MS  
Jefe de Laboratorio