

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Esta investigación presenta una comparación de métodos para la obtención del coeficiente de permeabilidad, el cual nos indica la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso, existen métodos directos e indirectos para poder determinar el coeficiente de permeabilidad.

El flujo de agua a través de medios porosos, de gran interés en la Mecánica de Suelos, está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henri Darcy en 1856. Darcy investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos, lo cual es particularmente afortunado para la aplicación de los resultados de la investigación a la Mecánica de Suelos.

Los métodos indirectos para la medición del coeficiente de permeabilidad han sido propuestos por varios investigadores, las cuales están elaboradas a base de investigaciones ya que para la validación de cada una de ellas se han realizado numerosos ensayos de suelos en laboratorio, para el presente proyecto es comprobar aquellas teorías con suelo granular de nuestro entorno local y poder determinar valores de confianza.

En la presente investigación toma en cuenta muestras de suelos granulares del entorno local, provenientes de ríos. Los ensayos para poder determinar el coeficiente de permeabilidad se realizaron en laboratorio.

1.2. Situación Problémica

La permeabilidad nos indica la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso, considerando el permeámetro de carga constante y el método indirecto a partir de fórmulas empíricas, existe una variación entre uno del otro.

Al haber diferentes ecuaciones empíricas para la determinación del coeficiente de permeabilidad, para suelos granulares, puede surgir la incertidumbre de la confianza, al momento de la selección.

Si la selección de la ecuación empírica para la determinación del coeficiente de permeabilidad no es la adecuada, esta situación tendrá como consecuencia una variación mayor de los datos obtenidos.

Es necesario comparar el coeficiente de permeabilidad obtenido mediante el permeámetro de carga constante con métodos indirectos, de tal manera, se podrá establecer parámetros de aplicación y confianza.

1.2.1. Problema

Después de haber expuesto la situación problemática se describe el problema de la investigación de la siguiente manera:

¿Cómo comparar la metodología del ensayo de permeabilidad en suelos granulares, a través del permeámetro de carga constante y los métodos empíricos?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Al no tener disponible el permeámetro de carga constante para poder determinar el coeficiente de permeabilidad se recurre al uso de métodos indirectos a partir de ecuaciones empíricas, por lo tanto hace falta conocer un parámetro de aplicación y confianza, de estas fórmulas empíricas en suelos granulares. Por lo tanto, es necesario comparar la obtención del coeficiente de permeabilidad con ecuaciones empíricas con relación al ensayo de carga constante.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

Mientras no cambie la composición del suelo de los ríos seleccionados, los valores de este proyecto de investigación seguirán siendo útiles.

Los suelos utilizados para esta investigación son granulares, se realizó las operaciones en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.3. Justificación

Hoy en día existen varias ecuaciones empíricas para obtener el resultado del coeficiente de permeabilidad, existiendo una incertidumbre de saber cuál es la más confiable.

El tema de investigación planteado titulado “Comparación de métodos de los ensayos aplicados a suelos granulares para obtener el coeficiente de permeabilidad y conocer su eficiencia óptima”, donde con los ensayos correspondientes se pueda obtener el coeficiente de permeabilidad mediante el permeámetro de carga constante y ecuaciones empíricas, y a base de los resultados obtenidos realizar un análisis y comparación, y poder establecer parámetros de aplicación y confianza.

El resultado de esta investigación proporcionará una información útil en laboratorio cuando se necesite conocer el coeficiente de permeabilidad en un suelo granular.

1.4. Objetivos

Los objetivos planteados para la siguiente investigación se dividen en dos partes.

1.4.1. Objetivo General

Comparar la metodología del ensayo de permeabilidad en suelos granulares, a través del permeámetro de carga constante y los métodos empíricos; con la finalidad, de establecer parámetros de aplicación y confianza entre ellos.

1.4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que ayudarán en el desarrollo del proyecto son los siguientes:

- Caracterizar las muestras extraídas de suelos granulares.
- Determinar el coeficiente de permeabilidad mediante el permeámetro de carga constante.
- Determinar empíricamente el coeficiente de permeabilidad.
- Comparar los datos obtenidos del coeficiente de permeabilidad y obtener los porcentajes de variación.
- Realizar un análisis estadístico a través del programa Statgraphics.

- Realizar ajuste de los modelos matemáticos de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, determinando las constantes de cada fórmula.

1.5. Hipótesis

Si, al comparar la metodología del ensayo de permeabilidad en suelos granulares, a través del permeámetro de carga constante y los métodos empíricos, se podrá establecer parámetros confiables de aplicación entre ellos.

1.6. Operacionalización de las variables

Se trata de medir y comparar la confianza entre un método directo y métodos indirectos en la permeabilidad; no hay manipulación de variables, tratándose de una investigación de tipo descriptivo.

1.6.1. Variable 1

- Métodos de obtención de la permeabilidad.

1.6.2. Variable 2

- Confiabilidad.

Variable 1	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Métodos de obtención de la permeabilidad	Método directo, se basa en pruebas cuyo objetivo general es la medición del coeficiente, método indirecto proporcionando el coeficiente en forma secundaria por formulas empíricas.	Curva granulométrica	Grafica	Realizada en función de la cantidad de suelo retenido en cada tamiz.
		Tamaño efectivo	cm	Valor extraído de la curva granulométrica.
		Temperatura	°C	Temperatura del agua.
		Porosidad	Porcentaje (%)	Relación del volumen de vacíos y el volumen de masa.
		Ensayo de carga constante	cm/seg	Mide la cantidad de cantidad de agua que fluye a través de muestra, en un cierto tiempo.

Variable 2	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Confiabilidad	Se refiere a la comparación de valores obtenidos, con las ecuaciones empíricas respecto al método de carga constante.	Método directo de carga constante	cm/seg	Mide la cantidad de cantidad de agua que fluye a través de muestra, en un cierto.
		Método indirecto a partir de ecuaciones empíricas	cm/seg	Calculo a partir de la curva granulométrica y porosidad. Se usara 3 ecuaciones empíricas.

1.7. Identificación del tipo de investigación

El tipo de investigación para el desarrollo de este proyecto es el diseño no experimental, basado en el tipo descriptivo donde las variables no son manipulables.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio y decisión ayudan a visualizar los elementos sobre el cual se desarrolló la investigación, para ello se tiene lo siguiente:

1.8.1. Unidad de estudio

Se denomina como unidad de estudio, aquel elemento que nos brindara la información necesaria:

Las unidades a estudiarse son “Los ensayos de laboratorio para suelos”.

1.8.2. Población

La caracterización de los suelos, tiene una lista extensa de ensayos, que se realizan en un laboratorio de suelos. Por lo tanto:

La población comprende “Los ensayos de laboratorio para suelos granulares”.

1.8.3. Muestra

La muestra se refiere específicamente a los ensayos que realmente se requirieron en la presente investigación:

Ensayo de Contenido de humedad

Ensayo de Granulometría

Ensayo de Peso específico de los sólidos

Ensayo de Coeficiente de permeabilidad (carga constante)

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

El criterio a seguir fue adoptar un muestreo probabilístico simple “No aleatorio”, se seleccionará muestras por conveniencia.

Para el muestreo se extrae muestras de los ríos de las provincias Cercado y Méndez del departamento de Tarija de tal manera que cada una ellas tenga la misma probabilidad de ser elegidas para este trabajo de investigación.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Se utilizó dos métodos y técnicas de investigación: Empíricas y teóricas.

Empíricos

Se realizó experimentos, a través de ensayos de laboratorios, con el fin de determinar las permeabilidades de los granulares provenientes de ríos del departamento de Tarija.

Teóricos

Toda la teoría disponible relacionada a lo que va estudiar la presente investigación, tales como conceptos, definiciones y normas.

1.10. Procesamiento de la información

Se hizo uso de estadística descriptiva para hallar la media y desviación, y se utilizará estadística inferencial para establecer un parámetro de confianza a partir del ensayo patrón (permeámetro de carga constante), para ver la confiabilidad del uso de las ecuaciones empíricas para la obtención del coeficiente de permeabilidad.

1.11. Alcance de la investigación

En la investigación se desarrolló dos métodos para obtener el coeficiente de permeabilidad y realizar una comparación de ambos métodos, se trabajó en suelo granular que corresponde a una clasificación de los grupos GW, GP, SW y SP provenientes de los ríos La Victoria, Tolomosa y Erquis.

El coeficiente de permeabilidad de las muestras se determinó a través del permeámetro de carga constante como método directo y con las ecuaciones empíricas de los autores Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi como métodos indirectos para obtener el coeficiente de permeabilidad a partir de la curva granulometría y la porosidad.

CAPÍTULO II
PERMEABILIDAD Y SUS
CONSIDERACIONES
GENERALES



CAPÍTULO II

PERMEABILIDAD Y SUS CONSIDERACIONES GENERALES

Al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua del suelo.

Existen varios fenómenos que tienen relación directa con la permeabilidad de los suelos, ya que la permeabilidad es un valor altamente sensible que depende de la naturaleza del suelo, de sus características mecánicas.

2.1. Suelos granulares

Figura 2.1 Suelo granular



Fuente: Elaboración propia

Los suelos granulares se definen como aquellos en los cuales las fuerzas intergranulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas. Son suelos no cohesivos, por lo cual las partículas no tienden a juntarse ni adherirse, sus partículas son relativamente grandes.

Basados en el estado de tensiones y en la estructura del suelo, normalmente definidos en función de la densidad relativa D_r , del índice de huecos o de la porosidad n , los suelos granulares además se clasifican en materiales densos o sueltos.

Normalmente, son buenos como terreno de cimentación, sobre todo si su compacidad es media o alta, y el espesor suficiente. No resisten tracciones, y su resistencia al corte, sólo es apreciable a partir de una cierta profundidad, ya que el propio peso hace aumentar el rozamiento entre los granos.

2.2. Clasificación de suelos

Para poder clasificar adecuadamente los suelos, se debe conocer su distribución granulométrica.

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices, de abertura cada vez más pequeña y con un recipiente en el fondo. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada tamiz y se determina el porcentaje acumulado de suelo que pasa a través de cada uno de ellos. El análisis granulométrico por tamizado se realiza de acuerdo a la norma (ASTM D422; AASHTO T88).

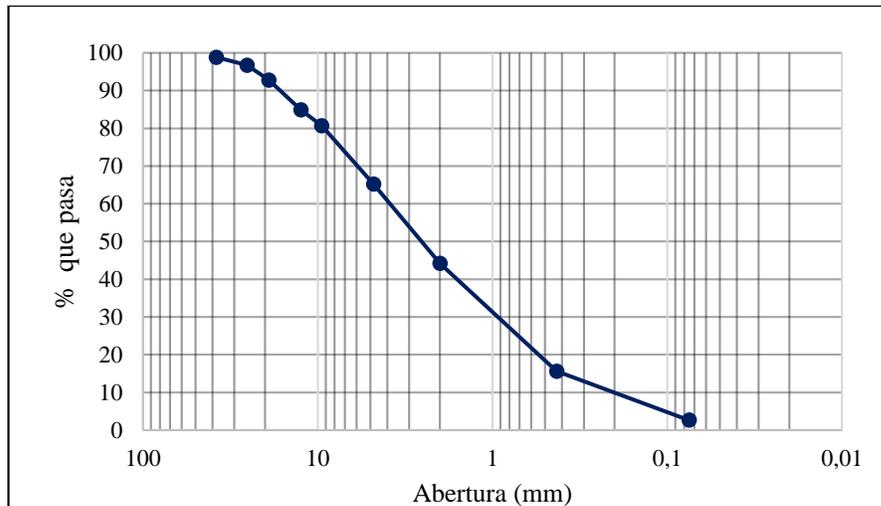
Tabla 2.1 Granulometría

Tamiz	Abertura tamiz (mm)	Peso ret. (gr)	Ret. acum. (gr)	Ret. acum. (%)	% que pasa del total
1 1/2	38,10	118,6	118,60	1,19	98,81
1	25,40	212,0	330,60	3,31	96,69
3/4	19,05	390,6	721,20	7,21	92,79
1/2	12,50	789,9	1511,10	15,11	84,89
3/8	9,50	421,6	1932,70	19,33	80,67
Nº4	4,80	1545,2	3477,90	34,78	65,22
Nº10	2,00	2101,7	5579,60	55,80	44,20
Nº40	0,43	2857,5	8437,10	84,37	15,63
Nº200	0,08	1297,6	9734,70	97,35	2,65

Fuente: Elaboración propia

La representación gráfica de la distribución granulométrica suele dibujarse con porcentajes en peso de las partículas que pasan un determinado tamiz como ordenadas y el tamaño de las partículas como abscisas en escala logarítmica (Figura 2.2).

Figura 2.2 Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de uniformidad (Cu)

Como una medida simple de la uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad (Cu). A medida que D60 se aleja más de D10, aumenta el coeficiente de uniformidad, lo que significa que mejora la graduación del material. Si, por el contrario, son muy parecidas, tenemos un material mal graduado cuya gráfica tiende a una línea vertical. El coeficiente de uniformidad viene dado por la siguiente expresión:

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

Donde:

D60 = Diámetro o tamaño de la partícula por debajo del cual queda el 60% del suelo en peso.

D10 = Diámetro o tamaño de la partícula por debajo del cual queda el 10% del suelo en peso. Llamado por Hazen diámetro efectivo.

Podría ser que entre los puntos D60 y D10 el gráfico tuviera algunas sinuosidades, por lo que conviene tener una medida intermedia (D30) que es lo que determina el coeficiente de curvatura.

Coeficiente de curvatura (Cc)

El coeficiente de curvatura es utilizado para definir si la curva granulométrica es cóncava o convexa. La curva granulométrica es cóncava cuando la mayoría de los granos son del mismo tamaño (mal graduado) y convexo cuando los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango (bien graduado).

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D10 * D60}$$

2.3. Sistema de clasificación S.U.C.S.

El sistema unificado de clasificación de suelos fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation (oficina de reclamación) de Estados Unidos y por el cuerpo de ingenieros.

El sistema S.U.C.S. clasifica los suelos en base a su granulometría, los límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica.

Tabla 2.2 Símbolos empleados según S.U.C.S.

Símbolo	Descripción
G	Grava o suelo gravoso
S	Arena o suelo arenoso
W	Bien graduado
C	Arcilla inorgánica
P	Mal graduado
M	Limo inorgánico o aren fina

Fuente: Texto guía para el Laboratorio de suelos. Soto L. K.

Clasificación de suelos gruesos (granular)

Un suelo es considerado grueso cuando más de la mitad del material queda retenido en el tamiz N°200 (Ret. N°200 > 50%). Si un suelo está dentro de los parámetros de grueso puede ser considerado arena o puede ser grava. Es grava si más de la mitad de la fracción gruesa queda retenida en el tamiza N°4. y arena si más de la mitad de la muestra pasa por el tamiz N°4.

Luego es importante analizar el porcentaje de material que pasa por el tamiz N°200. Si es menos del 5% es un material limpio, si es más del 12% es un material sucio y si estas entre el 5% y el 12% es un material considerado caso frontera.

Grupos GW y SW

Se tratan de suelos bien graduados, que contienen poco o casi nada de finos, tienen una alta capacidad de drenaje de aguas. El conjunto de partículas finas no debe ser mayor al 5% en peso. La gradación se juzga, por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad (C_u) sea mayor que 4, mientras el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad debe ser mayor que 6 y el de curvatura estar entre 1 y 3.

Grupos GP y SP

Son suelos que se encuentran mal graduados, es decir que presenta predominio de un tamaño o de un margen de tamaños, faltando algunos intermedios. Clasifican en estos grupos las arenas y gravas que no cumplen las condiciones para ser consideradas como bien graduadas.

Grupos GM y SM

Considerados suelos con presencia relevante de limo inorgánico o arena fina. Contienen plasticidad baja a media

En estos grupos el contenido de fino afecta las características de resistencia, esfuerzo-deformación y capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa

2.4. Permeabilidad

Por permeabilidad se hace referencia a la propiedad de un material, en este caso el suelo, de permitir que un líquido lo atreviese sin afectar su estructura interna. Se presentan dos casos: El de permeabilidad, cuando pasa a través del cuerpo una cantidad de fluido considerable en un tiempo determinado, y el de impermeabilidad, cuando la cantidad de fluido que pasa se puede despreciar.

Para que un material sea considerado como permeable, debe contener poros para así permitir la adsorción del fluido. Además, estos vacíos deben estar interconectados con el fin de permitir que el fluido atreviese el material.

La permeabilidad se cuantifica en base al coeficiente de permeabilidad, definido como la velocidad de traslación del agua en el seno del terreno y para un gradiente unitario.

2.4.1. Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad (K) es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso, en otras palabras, es la velocidad del agua a través de un suelo, expresado en cm/seg.

El coeficiente de permeabilidad puede variar desde 100 cm/s en el caso de gravas de grano muy grueso hasta un valor muy pequeño en el caso de arcillas.

Tabla 2.3 Clasificación de los suelos según sus coeficientes de permeabilidad

Grado de permeabilidad	Valor de K (cm/seg)
Elevada	superior a 10^{-1}
Media	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente impermeable	menor de 10^{-7}

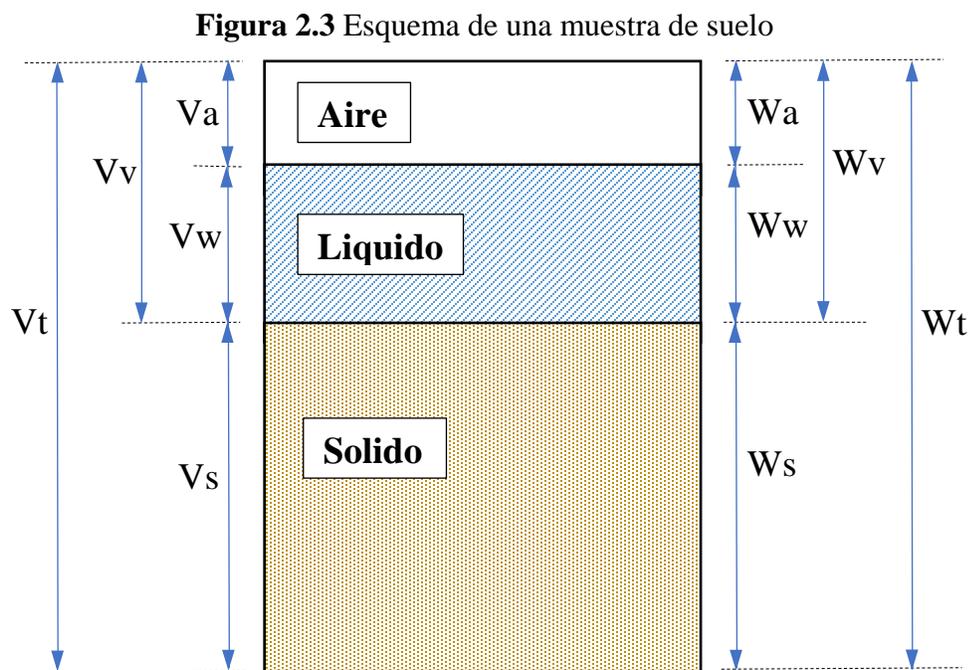
Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, W. y Whitman, R.

2.5. Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del fluido circulante. Los principales son:

- La relación de vacíos del suelo.
- La porosidad.
- La temperatura del agua.
- La estructura del suelo.
- La humedad del suelo.

2.5.1. Relación de vacíos



Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, W. y Whitman, R.

La relación de vacío de un suelo es el volumen de suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea la relación, más suelto es el suelo. El aumento de la proporción de huecos del suelo se realiza por el arado. Los organismos tales como los gusanos y las hormigas crean una cantidad significativa de espacio vacío en un suelo.

Cuando un suelo es comprimido o vibrado, el volumen ocupado por sus elementos sólidos permanece invariable, mientras que el volumen de vacíos disminuye, por lo tanto, la permeabilidad del suelo también disminuye.

La relación de vacíos que contiene una muestra de suelo, es una magnitud muy importante y de gran valor. La misma se expresa relacionada con el volumen de sólidos y se reconoce con la letra “e”.

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

Donde:

$$V_v = V_t - V_s$$

Por lo tanto:

$$e = \frac{V_t - V_s}{V_s}$$

Se conoce que:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

Quedando e igual a:

$$e = \frac{V_t - \frac{W_s}{\gamma_s}}{\frac{W_s}{\gamma_s}}$$

Simplificando:

$$e = \frac{V_t * \gamma_s - W_s}{W_s}$$

Donde:

e = Relación de vacíos

V_t = Volumen total (cm³)

V_w = Volumen del líquido (cm³)

V_s = Volumen de sólidos (cm³)

γ_w = Peso específico del agua (gr/cm³)

γ_s = Peso específico del sólido (gr/cm³)

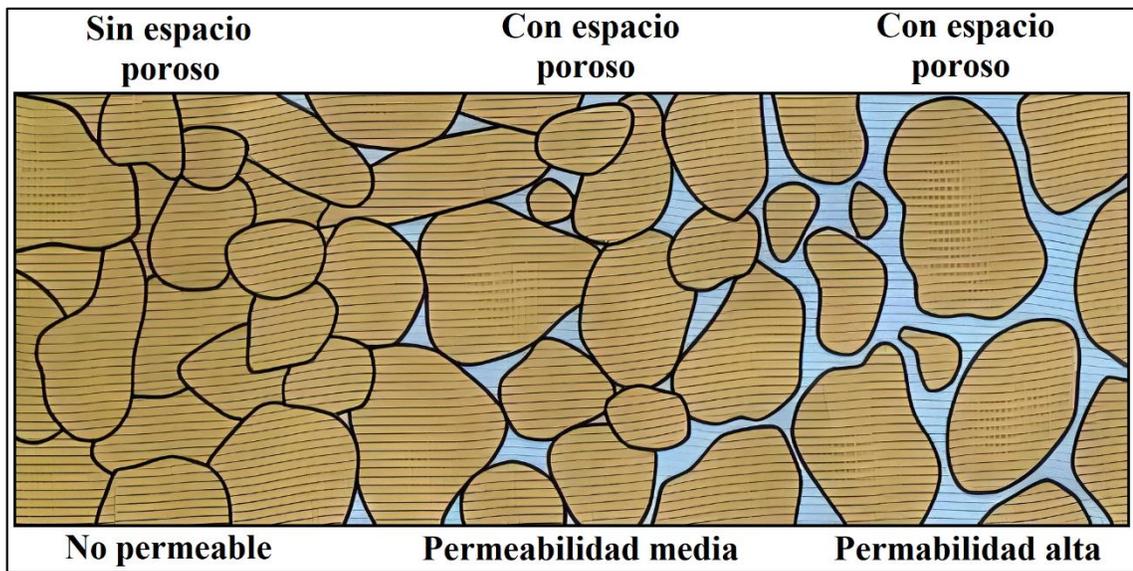
W_w = Peso del líquido (gr)

W_s = Peso de la muestra seca (gr)

W_m = Peso de la muestra (gr)

2.5.2. Porosidad

Figura 2.5 Porosidad



Fuente: Elaboración propia

La porosidad es la medida de espacios vacíos en los suelos. La porosidad generalmente se expresa en términos de fracción o porcentaje, ya que mide los espacios libres vacíos entre los suelos y la mayoría de ellos están unidos o cubiertos por los fluidos. Por lo tanto, un suelo será más permeable cuando la porosidad sea mayor.

La porosidad se designa con el valor (n) que se muestra en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{e}{1 + e} * 100$$

Donde:

n = Porosidad (%)

e = Relación de vacíos

2.5.3. Temperatura de agua

La viscosidad del fluido en los poros (normalmente agua). A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye y el coeficiente de permeabilidad aumenta; es decir, la velocidad de flujo aumenta.

De un análisis teórico surge que el valor del coeficiente de permeabilidad del suelo es proporcional a la viscosidad del agua, expresado mediante la relación:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

Donde:

K_1 = Coeficiente de permeabilidad con una viscosidad η_1 del fluido.

K_2 = Coeficiente de permeabilidad con una viscosidad η_2 del fluido.

El valor del coeficiente de permeabilidad obtenido mediante ensayos, depende de la temperatura a la que fueron realizados, normalmente se los suele referir a una temperatura $T=20^\circ\text{C}$, para los cuales se tiene:

$$K_{20^\circ\text{C}} = \frac{\eta_T}{\eta_{20^\circ\text{C}}} * K_T$$

Donde:

$K_{20^\circ\text{C}}$ = Coeficiente de permeabilidad a 20°C .

$\eta_{20^\circ\text{C}}$ = Viscosidad del agua a 20°C .

K_T = Coeficiente de permeabilidad a temperatura del ensayo.

$\eta_{20^\circ\text{C}}$ = Viscosidad del agua a temperatura del ensayo.

Donde el subíndice t hace referencia a los resultados de la prueba. La relación planteada anteriormente es válida para arenas y presenta pequeñas desviaciones para arcillas.

Tabla 2.4 Relación entre la viscosidad del agua y la temperatura

Temperatura °C	Viscosidad del agua 10⁻⁶ m²/seg
15	1,140
16	1,110
17	1,082
18	1,055
19	1,030
20	1,005
21	0,981
22	0,957
23	0,935
24	0,913
25	0,894

Fuente: Hidrología Superficial y Subterránea. Sánchez F. J. (2017).

2.5.4. Estructura del suelo

La estructura de un suelo es importante ya que de acuerdo a esta dependerá especialmente la resistencia, compresibilidad y permeabilidad.

La estructura de los suelos gruesos es diferente a la estructura de los suelos finos, en los primeros la aglomeración de partículas produce únicamente por acción gravitacional; en los suelos finos producto del ataque químico de las aguas a las rocas o a otros tipos de suelos, la forma tiende a ser aplastada, por lo que los minerales de arcilla adoptan en general la forma laminar.

El coeficiente de permeabilidad de un suelo inalterado es distinto al del mismo suelo remoldeado; cambia su estructura y estratificación. En el remoldeado quedan libres partículas de suelo, que al fluir el líquido las mueve y reacomoda, obstruyendo canales. En otras ocasiones son arrastradas al exterior, con lo cual el valor del coeficiente de permeabilidad varía durante la realización del ensayo, esto ocurre en general en suelos con valores de coeficiente de permeabilidad k entre 10^{-5} y 10^{-3} cm/seg.

En estratos la permeabilidad también puede variar; la estratificación ocasiona que los valores de su permeabilidad sean diferentes en cada estrato, incluso si se trata del mismo suelo con diferente grado de compactación o humedad, la permeabilidad seguramente será diferente.

Figura 2.6 Estratigrafía de un suelo



Fuente: Elaboración propia

2.5.5. Agujeros y fisuras

A causan de heladas, ciclos alternados de humedecimiento y secado, efectos de vegetación y pequeños organismos pueden cambiar las condiciones del suelo, provocando discontinuidades, fisuras, agujeros, etc., que hacen que las características de permeabilidad de los suelos sean diferentes.

2.5.6. Humedad del suelo

El contenido de agua o humedad es la cantidad de agua contenida en un material, tal como el suelo (la humedad del suelo), las rocas, la cerámica o la madera medida sobre la base de análisis volumétricos o gravimétricos. Esta propiedad se utiliza en una amplia gama de áreas científicas y técnicas y se expresa como una proporción que puede ir de 0 (completamente seca) hasta el valor de la porosidad de los materiales en el punto de saturación.

2.6. Valores del coeficiente de permeabilidad en distintos suelos

En la tabla 2.6 debida a A. Casagrande y R.E. Fadum, aparecen las interrelaciones entre el coeficiente de permeabilidad, los tipos de suelo y los métodos de prueba aplicada en cada caso. El valor del coeficiente de permeabilidad se ha puesto en escala logarítmica, debido a que el intervalo completo de valores que se maneja en Mecánica de suelos oscila entre 100 y 10⁻⁹ cm/seg.

Tabla 2.5 Intervalo de valores de K (cm/seg)

10 ³			
10 ²	Gravas limpias		Muy buen drenaje
10 ¹	<hr/>		
1	<hr/>		
10 ⁻¹	Arenas limpias		Buen drenaje
	Mezclas grava-arena		
10 ⁻²		Arcillas	<hr/>
		fisuradas	
10 ⁻³		y alteradas	
	Arenas muy finas		
10 ⁻⁴	Limos y arenas limosas		Mal drenaje
10 ⁻⁵	<hr/>		
10 ⁻⁶	Limos arcillosos (>20% arcilla)		Prácticamente impermeables
10 ⁻⁷	Arcillas sin fisuras		

Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, W. y Whitman, R.

Tabla 2.6 Valores de K (cm/seg)

	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Propiedad de drenaje	Buen drenaje						Mal drenaje			Prácticamente impermeable		
Tipos de suelos	Grava Limpia		Arenas limpias, Mezclas y Arena Limpias			Arenas muy Fina. Limos Orgánicos e inorgánicos. Mezclas de Arena, Limo y Arcilla.			Suelos "Impermeables", Arcillas homogéneas.			
							"Suelos Impermeables" que han sido modificados por los efectos de la vegetación y del intemperismo.					
Determinación Directa del Coeficiente de Permeabilidad	Prueba Directa de los suelos en su posición Original por ensayos de bombeo. Confiable si se conduce apropiadamente. Requiere Considerable experiencia.											
	Permeámetro de Carga Constante Requiere poca experiencia.											
				Permeámetro de Carga Variable. Confiable Requiere poca experiencia.		Permeámetro de carga variable. Rango de Permeabilidad Inestable, Requiere Mucha Experiencia para una Correcta Interpretación.			Permeámetro de Carga Variable. Aceptable Requiere Mucha Experiencia.			
Determinación Indirecta Del Coeficiente de Permeabilidad	Calculo de la Distribución Granulométrica (Formula de Hazen). Solo Aplicable a Gravas y Arenas Limpias sin Cohesión.											
				Prueba Horizontal de Capilaridad. Requiere Poca Experiencia. Especialmente Útil para la Prueba Rápida de un Gran Numero de Muestras en el Campo sin Equipo de Laboratorio.					Cálculos de las Pruebas de Consolidación. Equipo de Laboratorio Costoso. Requiere Considerable			

Fuente: Mecánica de suelos. Juares, B. y Rico, R.

Tabla 2.7 Permeabilidad de los suelos en cm/seg.

	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
SEGÚN SUCS	GW, GP					GM, SM, ML			GC, SC	
	SW, SP						OL, MH		CL, CH, OH	

Fuente: Mecánica del suelo, universidad del cauca.

2.7. Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad

El flujo de agua a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Darcy en 1856, quien investigó las características del flujo de agua a través de filtros de material térreo.

Basándose en sus trabajos sobre la mecánica de fluidos, el ingeniero francés Henry Darcy descubrió que existe una relación entre la cantidad de agua que fluye a través de una superficie, el área de esta superficie y el gradiente hidráulico. Utilizando determinados dispositivos diseño, Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas el gasto o Caudal (Q) es:

$$Q = \frac{dV}{dt} = k * A * i$$

Donde:

Q = Caudal o gasto en (cm³/seg)

dV = Variación del volumen en un diferencial de tiempo

dt = Diferencial de tiempo

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

i = Gradiente hidráulico (adimensional)

A = Sección trasversal del filtro (cm²)

La ecuación de continuidad del gasto establece que:

$$Q = v * A$$

Donde:

Q = Caudal o gasto en (cm³/seg)

v = Velocidad del flujo (cm/seg)

A = Área transversal (cm²)

Se deduce que:

$$v = K * i$$

Expresión conocida como la ley de Darcy.

Por definición la determinación de “K” solo es posible para un régimen de flujo laminar pero no para un régimen de flujo turbulento.

2.8. Métodos para la determinación del coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad de un suelo es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de Mecánica de Suelos y en muchos casos, para la elaboración de sus cálculos.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos “directos”, así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros “indirectos”, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines.

Directos

- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga Variable
- Prueba directa de los suelos en el lugar

Indirectos

- Cálculo a partir de la curva granulométrica
- Cálculo a partir de prueba de consolidación
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad

2.8.1. Método directo (permeámetro de carga constante)

El uso del permeámetro de carga constante ofrece un método simple para determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo y se recomienda ser utilizado en suelo granular. Una muestra de suelo de área transversal A y longitud L , confinada en un tubo, se somete a una carga hidráulica h . El agua fluye a través de la muestra, midiéndose la cantidad (en cm^3) que pasa en el tiempo t . Aplicando la ley de Darcy:

$$Q = K * A * i$$

Donde el caudal es igual a:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Por lo tanto:

$$V = K * A * i * t$$

El gradiente hidráulico medio:

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

Entonces tenemos que el coeficiente de permeabilidad es igual a:

$$K = \frac{V * L}{h * A * t}$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

V = Volumen de agua recolectada (cm^3)

L = Longitud de muestra (cm).

A = Área transversal de la muestra (cm^2).

t = Tiempo que fluye el agua a través de la muestra(seg).

h = Diferencia de nivel (cm).

El inconveniente del permeámetro es que, en suelos poco permeables, el tiempo de prueba se hace largo que deja de ser práctico, usando gradientes hidráulicos razonables.

Figura 2.7 Permeámetro de carga constante



Fuente: Elaboración propia

2.8.2. Métodos indirectos (fórmulas empíricas)

Desde hace tiempo se ha tratado de establecer correlaciones entre la granulometría de un material y su permeabilidad. Es obvio que existen razones para creer que pudiera establecerse tal correlación; en suelos arenosos gruesos, los poros entre las partículas minerales son relativamente grandes y por ello la permeabilidad resulta comparativamente alta; en suelos de menores tamaños, los poros entre los granos son más pequeños, por lo cual estos materiales son de menor permeabilidad. Pero, en la práctica, estas correlaciones

tienen un valor muy limitado, sobre todo debido al hecho de que otros factores, aparte del tamaño, ejercen notoria influencia en el valor del coeficiente en estudio.

Las expresiones que abajo se detallan deben verse como una manera muy tosca de valuar la permeabilidad de un suelo y de ningún modo sustituyen a métodos más precisos. Estos métodos están basados en leyes físicas y comparaciones empíricas con leyes establecidas, esto cuando las circunstancias impiden la ejecución de ensayos en laboratorio para determinar la permeabilidad.

La finalidad de este método es determinar otros parámetros del suelo cuando no es posible la ejecución de algún método directo o a manera de verificación.

La permeabilidad obedece a la variación de diversos factores, que no solo dependen de la estructura del suelo. Diversos autores como Hazen, Schlichter y Terzaghi han propuesto fórmulas que relacionan la permeabilidad con la estructura del suelo.

2.8.2.1. Allen Hazen

La permeabilidad de suelos granulares depende, principalmente, del área de los poros normales al flujo. Dado el diámetro promedio de los poros en un suelo con una porosidad dada, crece en proporción al promedio del tamaño de los granos, se espera que la permeabilidad de suelos granulares crezca.

Para arena bastante uniforme (es decir, coeficiente de uniformidad pequeño), Hazen (1911) propuso una relación empírica para el coeficiente de permeabilidad:

$$k = C * D_{10}^2$$

Hazen obtuvo su fórmula experimentando con arenas uniformes con diámetro efectivo comprendido entre 0,1 y 3 mm.

La temperatura influye, según se verá, en el valor de la permeabilidad, por alterar la viscosidad del agua. Tomando en cuenta ese factor, puede modificarse de la siguiente manera:

$$k = C(0,7 + 0,03 t) * D_{10}^2$$

Donde:

$$100 \leq C \leq 150$$

C = Constante de Allen Hazen

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

D10 = Diámetro efectivo en (cm).

t = Temperatura del agua (°C).

Sin embargo, se ve que, en primer lugar, la fórmula es inaplicable a la mayoría de los suelos, que quedan fuera del tipo de los experimentos realizados; en segundo lugar, aun para esos suelos, la variación de la constante C resulta excesiva para que la fórmula sea muy confiable.

El valor utilizado normalmente para la constante C es 100 (para K en cm/seg y D10 en cm), no obstante, diversos autores han reportado distintos valores. Los distintos rangos para esta constante se presentan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Valores de la constante C de Allen Hazen, propuesto por varios autores.

Referencia	C
Taylor (1948)	41-146
Leonards (1962)	100-150
Mansur and Kaufman (1962)	100-1000
Terzaghi and Peck (1964)	100-150
Cedergren (1967)	90-120
Lambe and Withman (1969)	1-42
Holtz and kovacs (1984)	40-120
Terzaghi et al. (1996)	50-200
Das (1997)	100-150
Coduto (1999)	80-120

Fuente: Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas. (Puga P. E.)

En la tabla 2.8 se puede observar que la constante C varía entre 1 y 1000.

2.8.2.2. Schlichter

La relación presentada por Schlichter se basa en estimar el coeficiente de permeabilidad del suelo mediante la curva granulométrica, por medio del diámetro afectivo (D10), incluyendo una constante en función de la porosidad, como se muestra en la siguiente expresión:

$$k = 771 \frac{D_{10}^2}{c} (0,7 + 0,03 t)$$

c es una función de n que responde a los valores:

n	0.26	0.38	0.46
c	84.3	24.1	12.8

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

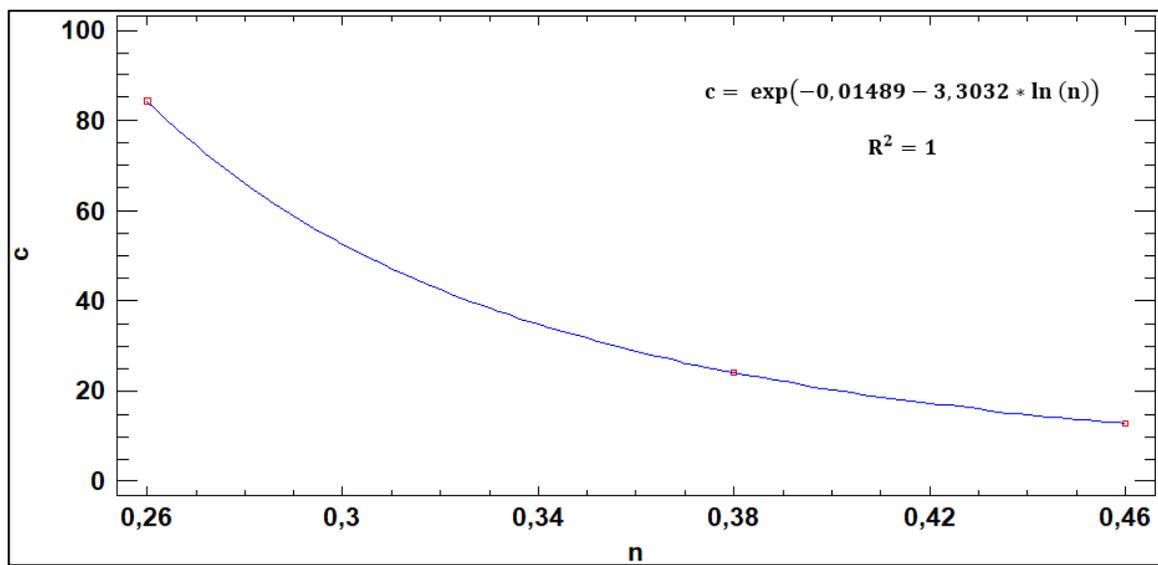
D10 = Diámetro efectivo en (cm).

t = Temperatura del agua (°C).

n = Porosidad.

c = Constante de Schlichter en función de la porosidad.

Figura 2.8 Relación de la porosidad (n) vs c



Fuente: Software Statgraphics

2.8.2.3. Terzaghi

Terzaghi en su fórmula para el cálculo del coeficiente de permeabilidad introduce una constante que tiene en cuenta la porosidad y el tipo de suelo, como se muestra en la ecuación:

$$K = C_1 D_{10}^2 (0,7 + 0,03 t)$$

Donde:

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$$

En donde n es la porosidad y Co un coeficiente con los valores indicados en siguiente tabla:

Arenas de granos redondeados	Co = 800
Arenas de granos angulosos	Co = 460
Arenas con limos	Co < 400

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

D10 = Diámetro efectivo en (cm).

t = Temperatura del agua (°C)

C1 = Constante de Terzaghi

n = Porosidad.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN

PRÁCTICA



Los lugares de recolección de las muestras para la presente investigación fueron los siguientes ríos: La Victoria, Tolomosa y Erquis.

Figura 3.2 Puntos de extracción de muestras del río La Victoria



Fuente: Foto satelital Google Earth.

Tabla 3.1 Coordenadas río La Victoria

Punto	Coordenadas	
	Latitud "S"	Longitud "W"
V-1	21°31'22,114"	64°48'27,596"
V-2	21°31'25,587"	64°48'30,974"
V-3	21°31'26,289"	64°48'34,453"
V-4	21°31'28,580"	64°48'35,459"
V-5	21°31'30,379"	64°48'37,505"
V-6	21°31'34,616"	64°48'37,775"
V-7	21°31'36,408"	64°48'38,620"
V-8	21°31'40,650"	64°48'42,514"
V-9	21°31'43,186"	64°48'43,181"
V-10	21°31'45,070"	64°48'45,806"
V-11	21°31'47,286"	64°48'48,118"
V-12	21°31'49,194"	64°48'49,011"
V-13	21°31'51,777"	64°48'50,745"
V-14	21°31'53,694"	64°48'53,827"
V-15	21°31'56,582"	64°48'54,384"
V-16	21°31'58,897"	64°48'56,707"

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3 Puntos de extracción de muestras del río Tolomosa



Fuente: Foto satelital Google Earth.

Tabla 3.2 Coordenadas río Tolomosa

Punto	Coordenadas	
	Latitud "S"	Longitud "W"
T-1	21°37'28,636"	64°46'3,578"
T-2	21°37'25,912"	64°46'5,979"
T-3	21°37'25,045"	64°46'11,659"
T-4	21°37'21,454"	64°46'12,602"
T-5	21°37'20,110"	64°46'18,204"
T-6	21°37'17,676"	64°46'23,224"
T-7	21°37'19,888"	64°46'28,093"
T-8	21°37'18,811"	64°46'34,024"
T-9	21°37'19,091"	64°46'38,863"
T-10	21°37'22,660"	64°46'43,027"
T-11	21°37'24,074"	64°46'47,129"
T-12	21°37'24,768"	64°46'49,119"
T-13	21°37'26,406"	64°46'51,017"
T-14	21°37'26,536"	64°46'54,114"
T-15	21°37'29,254"	64°46'0,526"
T-16	21°37'30,327"	64°45'57,375"
T-17	21°37'32,813"	64°45'56,049"
T-18	21°37'35,709"	64°45'55,84"

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4 Puntos de extracción de muestras del río Erquis



Fuente: Foto satelital Google Earth.

Tabla 3.3 Coordenadas río Erquis

Punto	Coordenadas	
	Latitud "S"	Longitud "W"
E-1	21°28'17,848"	64°48'43,126"
E-2	21°28'18,068"	64°48'46,382"
E-3	21°28'17,398"	64°48'49,715"
E-4	21°28'19,007"	64°48'53,317"
E-5	21°28'21,284"	64°48'56,809"
E-6	21°28'24,206"	64°48'57,954"
E-7	21°28'26,951"	64°48'59,714"
E-8	21°28'27,583"	64°49'2,976"
E-9	21°28'28,443"	64°49'5,709"
E-10	21°28'29,252"	64°49'8,571"
E-11	21°28'30,221"	64°49'11,624"
E-12	21°28'31,907"	64°49'15,014"
E-13	21°28'33,864"	64°49'17,47"
E-14	21°28'16,065"	64°48'39,733"
E-15	21°28'16,522"	64°48'36,647"
E-16	21°28'16,330"	64°48'33,310"

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización de los suelos

La extracción o muestreo debe ser adecuado y representativo para poder determinar de forma correcta las características y propiedades del suelo mediante ensayos de laboratorio.

Con las muestras extraídas obtenidas, se llevaron a cabo los siguientes ensayos de caracterización: Contenido de humedad, granulometría, peso específico y coeficiente de permeabilidad

3.2.1. Ensayo granulometría (ASTM D422; AASHTO T88)

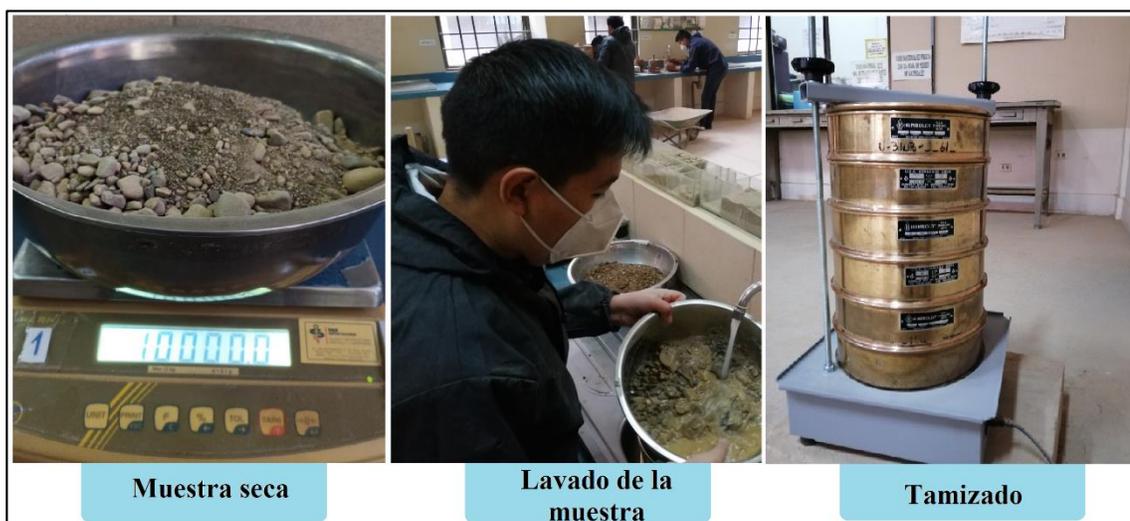
Se denomina granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación de suelo, para un análisis de sus propiedades mecánicas, el objetivo de ensayo es obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz.

El procedimiento para el ensayo de granulometría comienza con el cuarteo del material, hasta la obtención de la cantidad de material necesario, con la finalidad de que las muestras a utilizar tengan las características representativas del lugar de extracción.

Luego se seca la muestra obtenida por cuarteo en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, para su posterior lavado, y nuevamente se introduce la muestra al horno hasta que esté completamente seca.

Para el tamizado se realizó con la serie de tamices: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200.

Figura 3.5 Esquema de la práctica de granulometría



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Granulometría río La Victoria

Punto	% que pasa tamiz								
	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	N°4	N°10	N°40	N°200
V-1	100	96,64	90,74	81,53	76,30	62,78	44,62	14,48	2,81
V-2	100	92,23	86,29	79,13	75,27	64,05	47,95	14,70	2,85
V-3	100	99,47	93,19	84,26	79,02	66,43	45,92	11,50	2,61
V-4	100	96,69	92,79	84,89	80,67	65,22	44,20	15,63	2,65
V-5	100	96,38	88,89	76,62	68,37	51,44	33,71	9,25	1,54
V-6	100	97,27	91,33	81,57	76,98	65,56	50,12	20,14	3,19
V-7	100	96,58	89,55	81,08	76,38	65,79	48,66	14,01	4,60
V-8	100	97,29	92,61	84,24	78,73	63,99	43,12	9,16	1,09
V-9	100	95,66	91,52	79,10	73,75	56,56	34,53	11,32	2,10
V-10	100	96,49	87,31	76,86	71,39	56,04	34,29	3,56	0,67
V-11	100	95,45	89,42	80,13	75,11	61,51	43,19	13,34	2,10
V-12	100	96,73	91,33	79,62	71,28	49,41	29,43	9,81	0,97
V-13	100	95,99	89,42	79,29	73,16	58,17	39,55	10,81	1,87
V-14	100	92,31	87,22	73,89	66,59	51,08	33,56	7,73	2,03
V-15	100	95,59	85,28	74,34	65,70	47,58	29,08	5,22	0,70
V-16	100	96,58	90,53	81,06	75,83	61,96	39,16	12,46	2,38

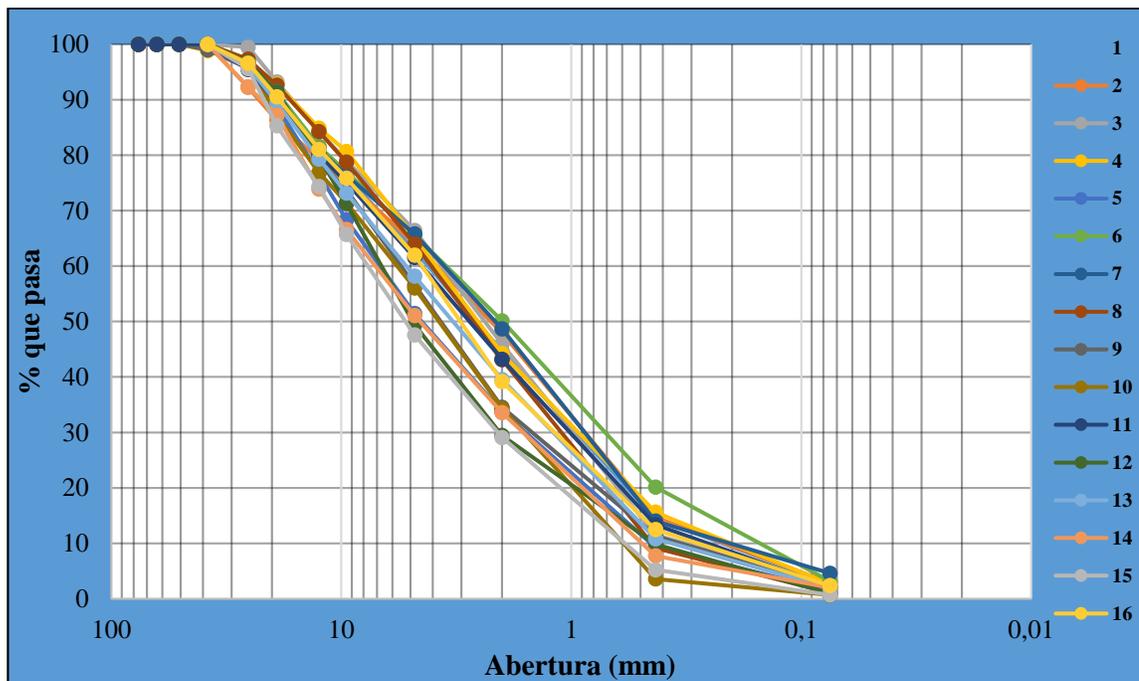
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5 Datos granulométricos río La Victoria

Punto	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
V-1	0,220	0,949	4,198	19,084	0,975
V-2	0,215	0,872	3,850	17,890	0,919
V-3	0,320	0,982	3,648	11,396	0,826
V-4	0,202	0,932	3,862	19,161	1,115
V-5	0,451	1,584	6,778	15,040	0,822
V-6	0,151	0,713	3,502	23,145	0,960
V-7	0,204	0,874	3,571	17,465	1,047
V-8	0,447	1,105	4,061	9,091	0,672
V-9	0,335	1,482	5,502	16,429	1,192
V-10	0,593	1,614	5,724	9,647	0,767
V-11	0,256	1,014	4,465	17,454	0,900
V-12	0,436	2,050	6,680	15,305	1,442
V-13	0,367	1,200	5,217	14,212	0,752
V-14	0,492	1,618	7,107	14,438	0,748
V-15	0,585	2,089	7,663	13,095	0,974
V-16	0,281	1,180	4,451	15,857	1,115

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Curvas granulométricas río La Victoria



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Composición y clasificación río La Victoria

Punto	Composición (%)					Clasificación	
	Grava > N°4	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Pasa N°200	SUCS	Descripción
V-1	37,22	18,16	30,14	11,68	2,81	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-2	35,95	16,11	33,25	11,85	2,85	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-3	33,57	20,51	34,42	8,90	2,61	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-4	34,78	21,02	28,57	12,98	2,65	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-5	48,56	17,74	24,46	7,72	1,54	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-6	34,44	15,45	29,98	16,95	3,19	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-7	34,21	17,13	34,65	9,41	4,60	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-8	36,01	20,87	33,96	8,07	1,09	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-9	43,44	22,04	23,21	9,22	2,10	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-10	43,96	21,75	30,73	2,89	0,67	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-11	38,49	18,33	29,85	11,24	2,10	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-12	50,59	19,97	19,62	8,84	0,97	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
V-13	41,83	18,63	28,74	8,94	1,87	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-14	48,92	17,52	25,83	5,70	2,03	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
V-15	52,42	18,51	23,86	4,52	0,70	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
V-16	38,04	22,81	26,69	10,08	2,38	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Granulometría río Tolomosa

Punto	% que pasa tamiz								
	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	N°4	N°10	N°40	N°200
T-1	100	90,87	82,70	67,45	61,19	52,45	48,18	28,75	2,71
T-2	100	95,98	90,22	81,67	77,05	66,48	56,97	28,28	6,85
T-3	100	90,77	82,34	71,25	64,14	54,14	49,29	19,28	2,61
T-4	100	90,53	80,36	63,82	57,15	44,79	35,64	9,64	1,03
T-5	100	94,83	85,61	76,26	71,90	61,16	53,18	30,90	6,49
T-6	100	96,18	88,34	71,98	64,04	49,72	38,41	15,09	2,90
T-7	100	92,91	82,30	72,95	66,10	55,92	48,12	15,54	1,96
T-8	100	94,74	82,96	72,59	65,36	51,73	41,02	15,00	1,54
T-9	100	87,77	75,33	63,22	57,12	47,34	40,32	15,07	2,66
T-10	98,09	95,53	90,18	75,26	66,90	50,58	38,70	8,49	0,35
T-11	100	92,47	83,07	70,62	64,02	52,82	44,75	18,33	2,79
T-12	100	94,67	86,57	68,71	59,95	45,72	37,77	16,60	1,57
T-13	100	91,22	82,32	63,50	56,71	46,37	40,75	17,83	2,04
T-14	100	96,75	89,50	75,18	65,47	47,00	34,81	14,51	3,82
T-15	100	85,15	78,15	70,06	65,02	55,21	50,09	21,68	2,70
T-16	100	93,20	84,24	72,00	64,94	53,26	45,33	17,88	2,31
T-17	100	91,42	81,59	65,63	58,75	47,05	38,78	14,41	2,16
T-18	100	93,43	83,95	71,15	61,88	48,76	38,87	12,16	1,22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8 Datos granulométricos río Tolomosa

Punto	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
T-1	0,122	0,475	8,654	70,766	0,213
T-2	0,097	0,472	2,642	27,254	0,868
T-3	0,163	0,744	7,161	44,038	0,476
T-4	0,439	1,433	10,681	24,319	0,438
T-5	0,096	0,403	4,180	43,370	0,403
T-6	0,207	1,149	7,836	37,780	0,812
T-7	0,211	0,851	6,310	29,914	0,544
T-8	0,225	1,043	7,264	32,300	0,666
T-9	0,211	1,067	10,817	51,338	0,499
T-10	0,464	1,285	7,119	15,331	0,499
T-11	0,169	0,848	7,435	44,088	0,573
T-12	0,200	1,138	9,515	47,635	0,681
T-13	0,181	0,973	10,852	59,996	0,482
T-14	0,206	1,390	7,762	37,714	1,209
T-15	0,147	0,675	6,699	45,612	0,462
T-16	0,178	0,848	7,119	40,075	0,568
T-17	0,229	1,150	9,986	43,520	0,577
T-18	0,304	1,200	8,616	28,299	0,549

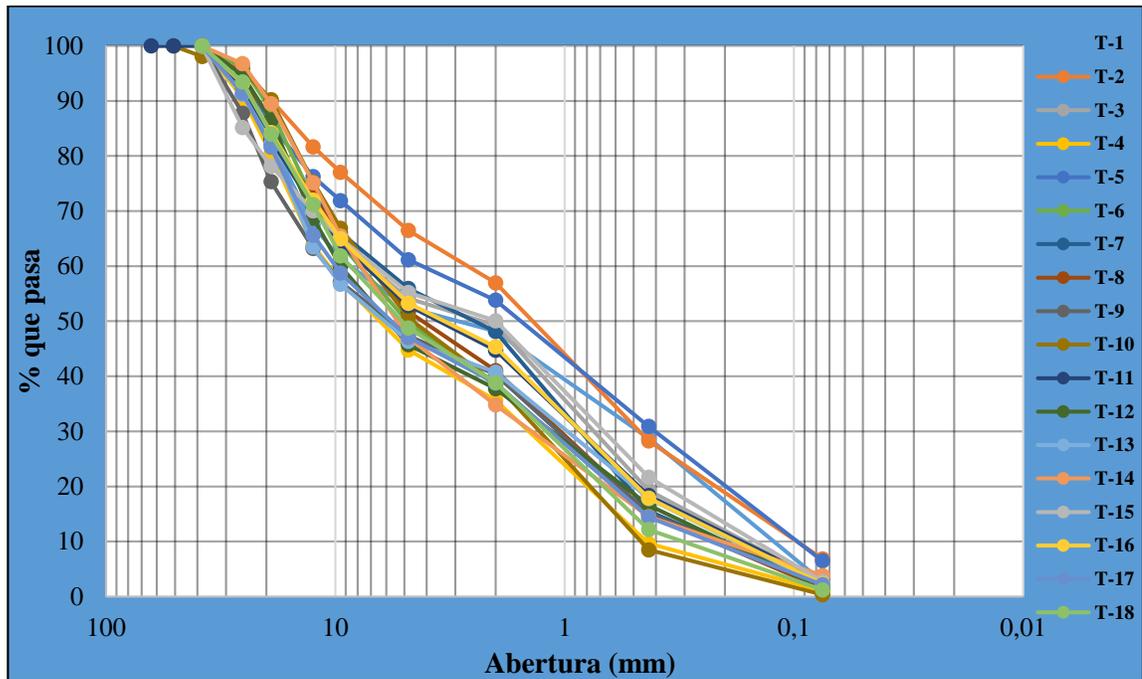
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Composición y clasificación río Tolomosa

Punto	Composición (%)					Clasificación	
	Grava > N°4	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Pasa N°200	SUCS	Descripción
T-1	47,55	4,27	19,43	26,05	2,71	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-2	33,52	9,51	28,70	21,43	6,85	SP-SM	Arenas mal graduadas, arena con limo y grava.
T-3	45,86	4,85	30,01	16,67	2,61	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-4	55,21	9,16	25,99	8,61	1,03	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-5	38,84	7,35	22,91	24,41	6,49	SP-SM	Arenas mal graduadas, arena con limo y grava.
T-6	50,28	11,31	23,32	12,18	2,90	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-7	44,08	7,80	32,59	13,57	1,96	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-8	48,27	10,71	26,03	13,46	1,54	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-9	52,66	7,02	25,25	12,42	2,66	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-10	49,42	11,88	30,21	8,14	0,35	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-11	47,18	8,08	26,41	15,55	2,79	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-12	54,28	7,95	21,17	15,03	1,57	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-13	53,63	5,61	22,93	15,79	2,04	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-14	53,00	12,19	20,29	10,70	3,82	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-15	44,79	5,12	28,42	18,98	2,70	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-16	46,74	7,93	27,45	15,57	2,31	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
T-17	52,95	8,28	24,37	12,25	2,16	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
T-18	51,24	9,89	26,70	10,95	1,22	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Curvas granulométricas río Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Granulometría río Erquis

Punto	% que pasa tamiz								
	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	N°4	N°10	N°40	N°200
E-1	100	94,40	83,71	68,60	61,08	44,60	30,55	18,53	3,69
E-2	100	93,60	88,03	75,53	68,31	52,29	36,74	17,36	3,63
E-3	100	95,35	90,59	80,39	73,83	55,36	38,46	19,31	3,98
E-4	100	94,22	88,03	79,87	74,45	60,38	44,59	21,59	3,67
E-5	98,60	90,89	76,53	70,35	64,43	52,37	40,44	17,56	2,62
E-6	100	96,49	91,75	79,30	72,56	53,22	31,92	8,48	0,87
E-7	100	91,40	84,91	74,47	69,50	59,56	47,47	22,23	4,39
E-8	100	97,14	90,36	76,74	69,71	53,40	35,24	10,29	1,78
E-9	100	99,24	92,81	79,01	69,52	47,54	29,64	13,98	3,55
E-10	100	92,91	82,09	70,06	64,25	51,93	37,86	11,62	1,90
E-11	100	94,44	87,43	75,62	69,21	53,84	37,85	16,17	2,99
E-12	100	96,82	88,26	69,40	63,30	46,07	29,69	14,66	1,62
E-13	100	94,56	87,11	76,03	69,61	54,27	36,15	16,69	1,25
E-14	100	95,04	86,66	73,30	65,79	49,09	33,70	15,37	3,19
E-15	100	94,37	86,91	76,21	70,00	54,79	38,46	15,83	2,10
E-16	100	95,52	88,06	75,37	68,84	52,85	35,01	10,13	1,52

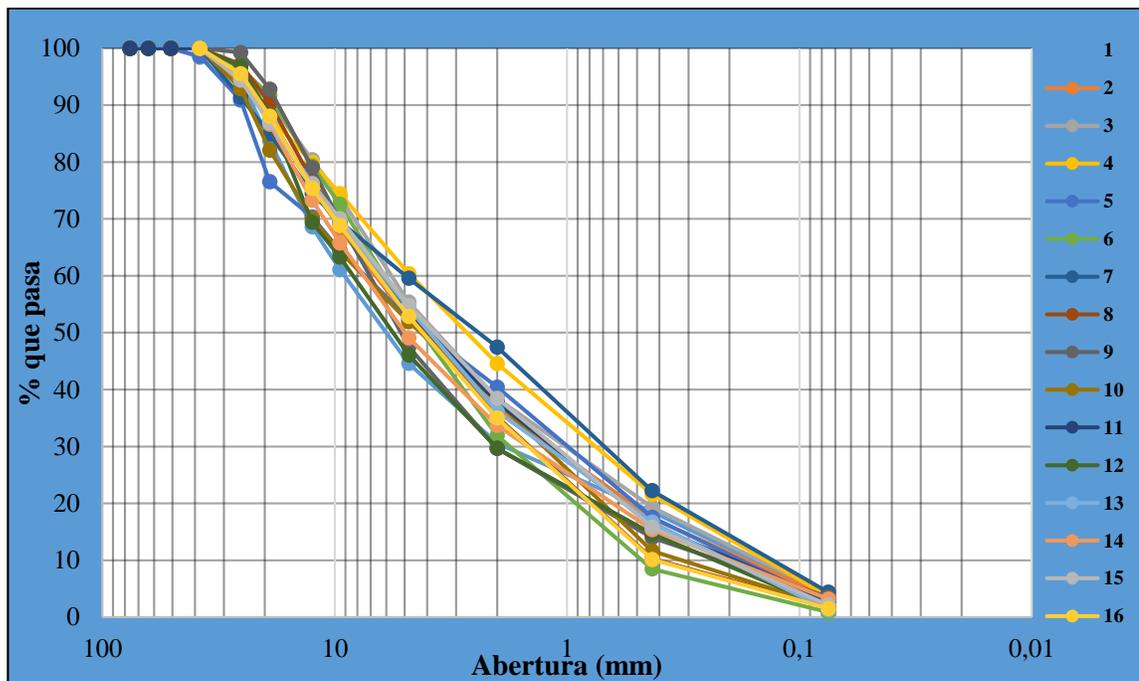
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.11 Datos granulométricos río Erquis

Punto	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
E-1	0,158	1,865	9,084	57,665	2,429
E-2	0,169	1,172	6,668	39,526	1,221
E-3	0,149	1,014	5,699	38,264	1,212
E-4	0,139	0,754	4,701	33,825	0,871
E-5	0,178	0,992	7,394	41,607	0,749
E-6	0,475	1,763	6,098	12,833	1,073
E-7	0,130	0,690	4,949	38,093	0,741
E-8	0,406	1,448	6,327	15,603	0,818
E-9	0,221	2,036	7,068	31,995	2,655
E-10	0,321	1,262	7,508	23,374	0,660
E-11	0,190	1,146	6,311	33,240	1,097
E-12	0,230	2,033	8,335	36,176	2,152
E-13	0,202	1,231	6,194	30,697	1,212
E-14	0,199	1,467	7,499	37,680	1,442
E-15	0,205	1,126	6,065	29,598	1,020
E-16	0,419	1,468	6,513	15,543	0,789

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 Curvas granulométricas río Erquis



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Composición y clasificación río Erquis

Punto	Composición (%)					Clasificación	
	Grava > N°4	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Pasa N°200	SUCS	Descripción
E-1	55,40	14,05	12,02	14,84	3,69	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
E-2	47,71	15,55	19,38	13,73	3,63	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-3	44,64	16,90	19,15	15,33	3,98	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-4	39,62	15,79	23,00	17,92	3,67	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-5	47,63	11,93	22,88	14,94	2,62	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-6	46,78	21,30	23,45	7,60	0,87	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-7	40,44	12,09	25,24	17,84	4,39	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-8	46,60	18,16	24,95	8,51	1,78	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-9	52,46	17,91	15,66	10,43	3,55	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
E-10	48,07	14,07	26,24	9,72	1,90	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-11	46,16	15,99	21,68	13,19	2,99	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-12	53,93	16,38	15,04	13,03	1,62	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
E-13	45,73	18,12	19,46	15,44	1,25	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-14	50,91	15,39	18,32	12,18	3,19	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco de finos.
E-15	45,21	16,32	22,64	13,73	2,10	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco de finos.
E-16	47,15	17,84	24,88	8,61	1,52	SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco de finos.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Ensayo contenido de humedad (ASTM D2216)

El contenido de humedad o más comúnmente la humedad de la muestra, es la relación entre el peso del agua contenido en la muestra y el peso de la muestra después de ser secada en el horno.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, su demora es de aproximadamente de 24 horas.

El procedimiento para el ensayo del contenido de comienza tomando una muestra representativa de suelo, posteriormente se coloca la muestra húmeda en un recipiente previamente pesado, para proceder a pesar la muestra húmeda más el recipiente.

Este método es el más eficaz, su demora es de aproximadamente de 24 horas y la muestra a secar en horno, se realiza a una temperatura de 110 °C.

Figura 3.9 Ensayo contenido de humedad

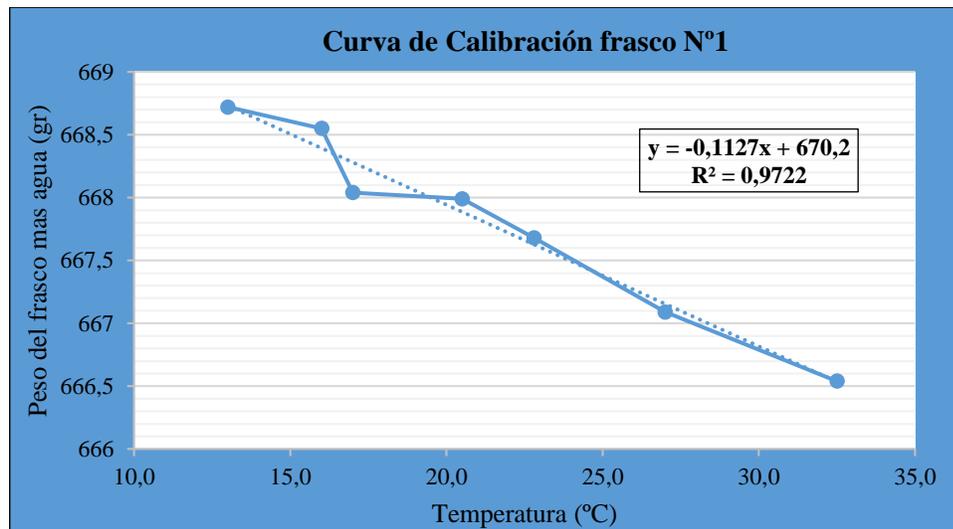


Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Ensayo peso específico

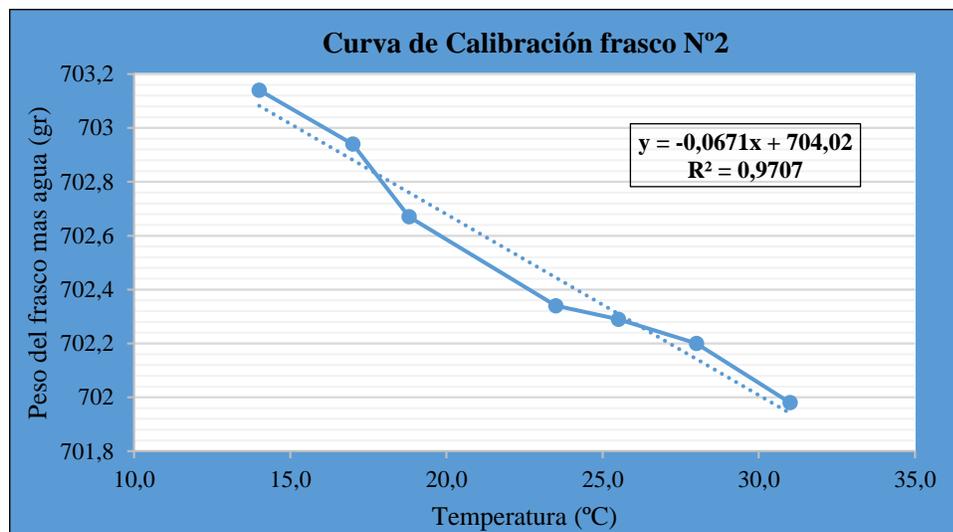
El peso específico de los sólidos de un suelo se determinó en laboratorio ya que nuestro suelo se compone de partículas mayores como menores a 5 mm, el peso específico se realizó tanto para el agregado fino como para el grueso.

Figura 3.10 Calibración de frasco N°1



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Calibración de frasco N°2



Fuente: Elaboración propia

Peso específico agregado fino (ASTM D854; AASHTO T100)

El peso específico del agregado fino se determinó haciendo uso de un frasco volumétrico con marca de enrase y materiales para el baño maría.

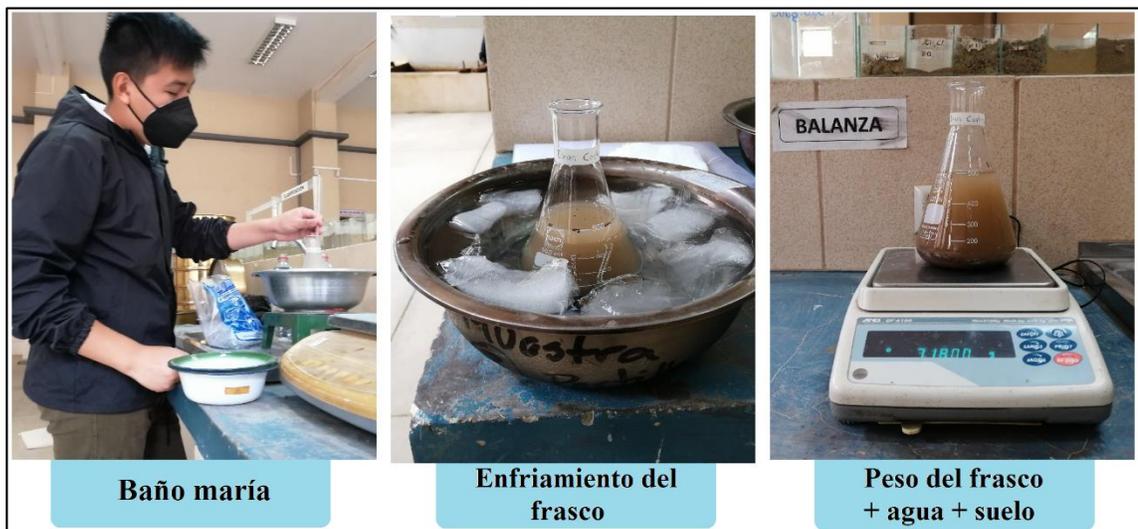
El procedimiento para el ensayo comienza con el peso del material que pasa el tamiz N°10 aproximadamente 80 gramos, este suelo se lo introduce al frasco previamente calibrado.

Se somete el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro del baño María, hasta que alcance una temperatura de 60 °C en el centro del frasco.

Luego se realiza el enfriamiento del frasco, el peso del frasco de agua con suelo se toma a diferentes temperaturas en un rango de 30 °C a 15 °C.

El peso seco se determinó antes de la prueba, luego de calculados los pesos específicos se ajustó estos datos a una temperatura patrón de 20 °C.

Figura 3.12 Ensayo peso específico agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Peso específico agregado grueso (ASTM E 127; AASHTO T85-91)

Para el agregado grueso se trabaja con el suelo retenido en el tamiz N°4.

El peso específico del agregado grueso se determinó con la ayuda de una balanza hidrostática, para obtener el peso sumergido del suelo seco superficialmente.

Se aplicó el método de peso específico del suelo seco, saturado con superficie seca y neto.

Figura 3.13 Ensayo peso específico agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Peso específico y relación de vacíos río La Victoria

Punto	Cont. Hum. (%)	Peso esp. (gr/cm ³)	Vacíos e	Porosidad	
				n	%
V-1	0,24	2,591	0,381	0,276	27,59
V-2	0,17	2,647	0,407	0,289	28,93
V-3	0,21	2,581	0,388	0,279	27,94
V-4	0,21	2,651	0,375	0,273	27,27
V-5	0,16	2,645	0,412	0,292	29,20
V-6	0,25	2,596	0,309	0,236	23,60
V-7	0,21	2,550	0,357	0,263	26,31
V-8	0,19	2,572	0,463	0,317	31,67
V-9	0,22	2,649	0,392	0,282	28,16
V-10	0,17	2,644	0,502	0,334	33,43
V-11	0,21	2,622	0,407	0,289	28,94
V-12	0,20	2,649	0,485	0,327	32,68
V-13	0,29	2,633	0,419	0,295	29,54
V-14	0,25	2,621	0,465	0,317	31,73
V-15	0,29	2,643	0,483	0,326	32,55
V-16	0,26	2,606	0,381	0,276	27,61

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14 Peso específico y relación de vacíos río Tolomosa

Punto	Cont. Hum. (%)	Peso esp. (gr/cm ³)	Vacíos e	Porosidad	
				n	%
T-1	3,84	2,591	0,359	0,264	26,42
T-2	0,25	2,601	0,251	0,201	20,09
T-3	0,25	2,558	0,313	0,239	23,85
T-4	0,88	2,618	0,368	0,269	26,92
T-5	0,42	2,579	0,369	0,270	26,98
T-6	0,45	2,651	0,297	0,229	22,87
T-7	0,57	2,592	0,428	0,300	29,98
T-8	0,27	2,625	0,336	0,251	25,13
T-9	1,10	2,589	0,404	0,288	28,75
T-10	2,37	2,623	0,469	0,319	31,94
T-11	0,54	2,604	0,322	0,243	24,34
T-12	2,59	2,620	0,324	0,245	24,47
T-13	1,79	2,633	0,296	0,229	22,85
T-14	1,02	2,645	0,281	0,219	21,93
T-15	1,34	2,595	0,343	0,255	25,51
T-16	2,15	2,631	0,335	0,251	25,07
T-17	0,91	2,624	0,352	0,260	26,01
T-18	1,44	2,631	0,385	0,278	27,80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15 Peso específico y relación de vacíos río Erquis

Punto	Cont. Hum. (%)	Peso esp. (gr/cm ³)	Vacíos e	Porosidad	
				n	%
E-1	0,28	2,641	0,308	0,236	23,55
E-2	0,36	2,653	0,327	0,246	24,62
E-3	0,42	2,628	0,314	0,239	23,89
E-4	0,39	2,636	0,318	0,241	24,13
E-5	0,40	2,646	0,386	0,278	27,85
E-6	0,25	2,624	0,460	0,315	31,49
E-7	0,32	2,593	0,311	0,237	23,70
E-8	0,67	2,564	0,352	0,261	26,06
E-9	0,90	2,535	0,272	0,214	21,39
E-10	0,77	2,632	0,452	0,311	31,12
E-11	0,43	2,622	0,329	0,248	24,76
E-12	0,28	2,606	0,351	0,260	26,01
E-13	0,24	2,606	0,341	0,255	25,45
E-14	0,61	2,633	0,334	0,251	25,06
E-15	0,29	2,614	0,343	0,255	25,55
E-16	0,56	2,614	0,421	0,296	29,61

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Ensayo del coeficiente de permeabilidad (ASTM D2434; AASHTO T215)

La permeabilidad de un suelo es la capacidad del mismo que tiene para permitir el flujo de un fluido, los suelos están formados por partículas minerales solidas que dejan vacíos entre ellas, estos vacíos están interconectados y permiten el flujo del agua a través de ellos, esto convierte a los suelos en materiales permeables.

El procedimiento para el ensayo del coeficiente de permeabilidad se empieza con la preparación de la muestra, se realizó el cuarteo del material, posteriormente se tamizó dicha muestra por el tamiz 3/4", y dejándola saturando por 24 horas, la colocación de la muestra saturada en el permeámetro se la realizo en 3 capas y en cada una 25 golpes.

Al momento de permitir el paso del agua, se verifica que no quede aire atrapado en el equipo, para la realización del ensayo se permite el paso del agua a través de la muestra, cuando el caudal sea uniforme, se inicia la recolección de agua en una probeta graduada y cronometrar el tiempo.

El coeficiente de permeabilidad (K) medido es multiplicado por un factor de corrección que tiene en cuenta la temperatura de ensayo, esto permite expresar el coeficiente k a la temperatura normal de 20 °C.

Figura 3.14 Materiales para el ensayo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Ensayo de permeabilidad



Equipo con muestra

Manteniendo un nivel constante de agua

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 K obtenidos en laboratorio río La Victoria

Punto	SUSC	K_{Lab.} (cm/seg)
V-1	SP	0,0173
V-2	SP	0,0175
V-3	SP	0,0194
V-4	SW	0,0127
V-5	SP	0,0198
V-6	SP	0,0076
V-7	SW	0,0157
V-8	SP	0,0257
V-9	SW	0,0158
V-10	SP	0,0281
V-11	SP	0,0193
V-12	GW	0,0237
V-13	SP	0,0187
V-14	SP	0,0239
V-15	GP	0,0286
V-16	SW	0,0158

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17 K obtenidos en laboratorio río Tolomosa

Punto	SUSC	K_{Lab.} (cm/seg)
T-1	SP	0,0056
T-2	SP-SM	0,0012
T-3	SP	0,0073
T-4	GP	0,0128
T-5	SP-SM	0,0007
T-6	GP	0,0047
T-7	SP	0,0164
T-8	SP	0,0139
T-9	GP	0,0055
T-10	SP	0,0270
T-11	SP	0,0084
T-12	GP	0,0169
T-13	GP	0,0068
T-14	GW	0,0039
T-15	SP	0,0054
T-16	SP	0,0089
T-17	GP	0,0126
T-18	GP	0,0174

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18 K obtenidos en laboratorio río Erquis

Punto	SUSC	K_{Lab.} (cm/seg)
E-1	GW	0,0020
E-2	SW	0,0033
E-3	SW	0,0019
E-4	SP	0,0020
E-5	SP	0,0045
E-6	SW	0,0246
E-7	SP	0,0021
E-8	SP	0,0122
E-9	GW	0,0038
E-10	SP	0,0158
E-11	SW	0,0079
E-12	GW	0,0082
E-13	SW	0,0064
E-14	GW	0,0042
E-15	SW	0,0060
E-16	SP	0,0184

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
COMPARACIÓN Y
ANÁLISIS DE
RESULTADOS



CAPÍTULO IV

COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio, como el diámetro efectivo (D10) y la porosidad (n); dan lugar para obtener el coeficiente de permeabilidad a partir de las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi.

La comparación de resultados del coeficiente de permeabilidad obtenidos directamente e indirectamente, se realizó según el tipo de suelo que corresponde a una clasificación SUCS.

Se realizó la comparación primeramente viendo el grado de relación entre las variables que intervienen en cada ecuación empírica, para luego ver el porcentaje de variación que existe entre el coeficiente de permeabilidad obtenido el laboratorio y el obtenido a partir de las ecuaciones empíricas.

4.1. Porcentaje de variación

El porcentaje de variación se utiliza para describir la relación entre el valor del coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio y el obtenido a partir de la ecuación empírica. De manera específica, el porcentaje de variación representa la diferencia de ambos en términos de un porcentaje de los valores obtenidos en laboratorio.

$$\% \text{ de Variación} = \text{Error porcentual} = \frac{\text{valor aproximado} - \text{valor exacto}}{\text{valor exacto}} * 100$$

Donde:

Valor exacto = Valor de la permeabilidad obtenido en laboratorio.

Valor aproximado = Valor de la permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas.

% Variación (+)	Valor aproximado > Valor exacto
% Variación (-)	Valor aproximado < Valor exacto

4.2. Comparación de K en suelos SW

4.2.1. Ecuación de Allen Hazen

En la tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Allen Hazen para los puntos que corresponden a una clasificación **SW**, también nos muestra la variable (D10) que interviene en la ecuación de Allen Hazen.

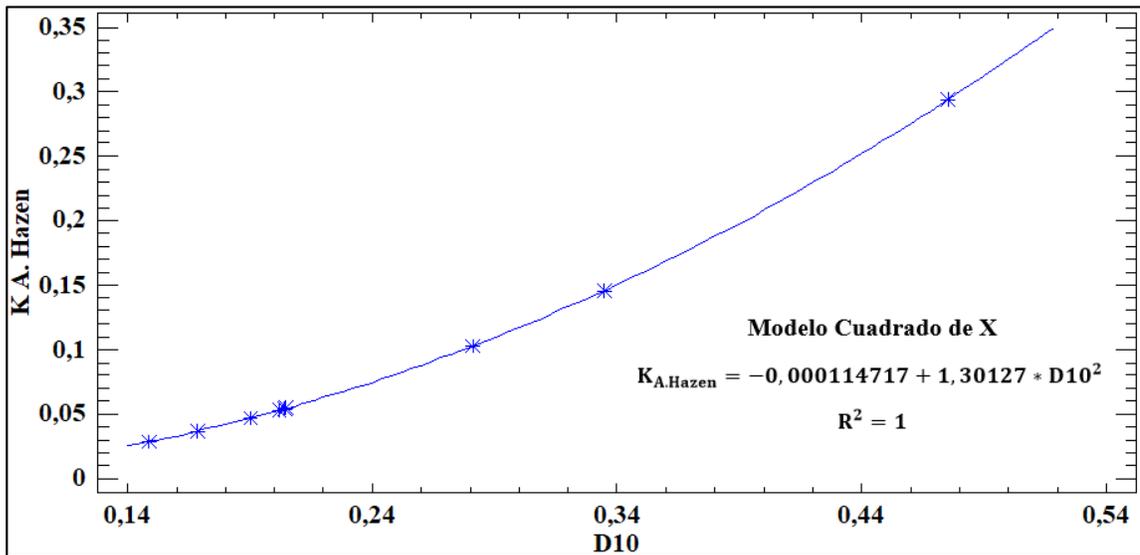
Tabla 4.1 Valores de K (Allen Hazen) suelos SW

SUCS	Punto	D10 (mm)	K Allen Hazen (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SW	V-4	0,202	0,0528	0,0127
	V-7	0,204	0,0544	0,0157
	V-9	0,335	0,1460	0,0158
	V-16	0,281	0,1024	0,0158
	E-2	0,169	0,0370	0,0033
	E-3	0,149	0,0288	0,0019
	E-6	0,475	0,2935	0,0246
	E-11	0,190	0,0469	0,0079
	E-13	0,202	0,0529	0,0064
	E-15	0,205	0,0546	0,0060
Media \bar{x}		0,241	0,0869	0,0110
Desviación estándar σ		0,098	0,0805	0,0071

Fuente: Elaboración propia

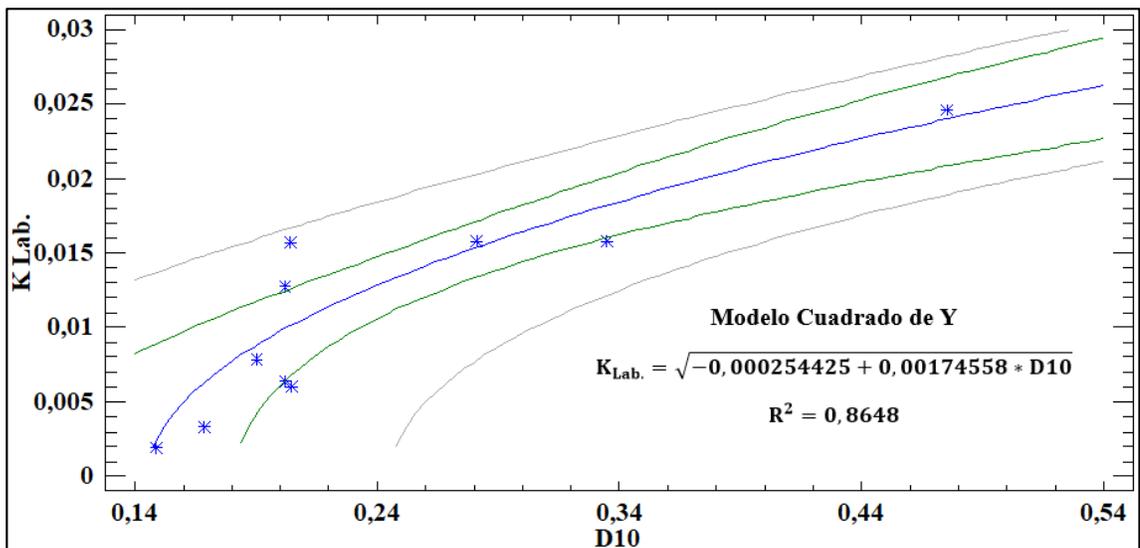
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.1 K Allen Hazen vs D10 suelos SW



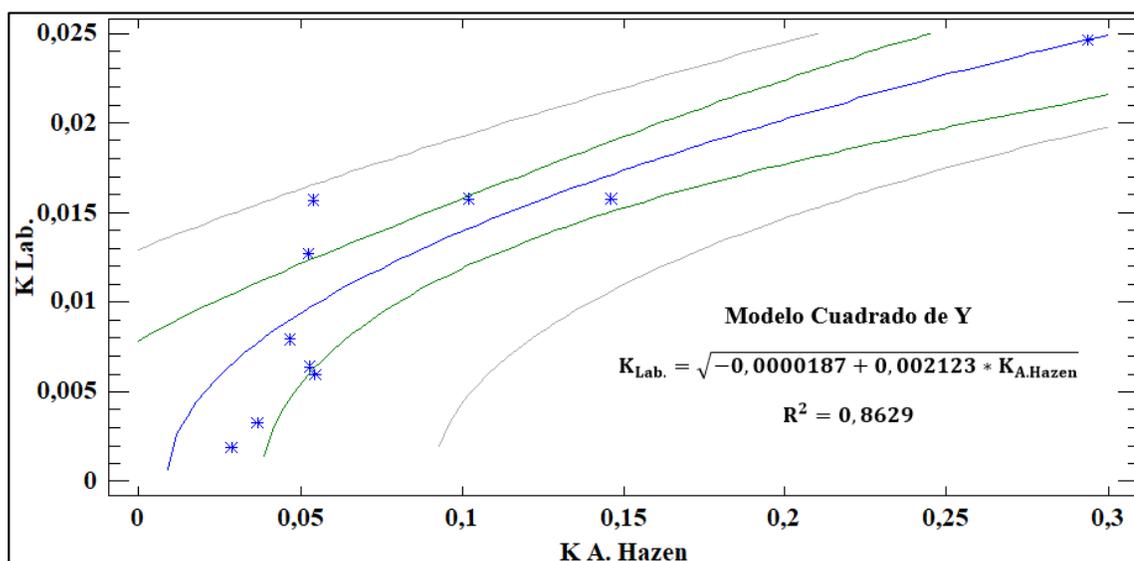
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.2 K Laboratorio vs D10 suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.3 K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.2 Grado de relación entre variables suelos SW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{A. Hazen} vs D10	Cuadrado de X	1	100%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado de Y	0,9300	86,48%	Fuerte
K _{Lab.} vs K _{A. Hazen}	Cuadrado de Y	0,9289	86,29%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.2.2. Ecuación de Schlichter

En la tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Schlichter para los puntos que corresponden a una clasificación **SW**, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Schlichter.

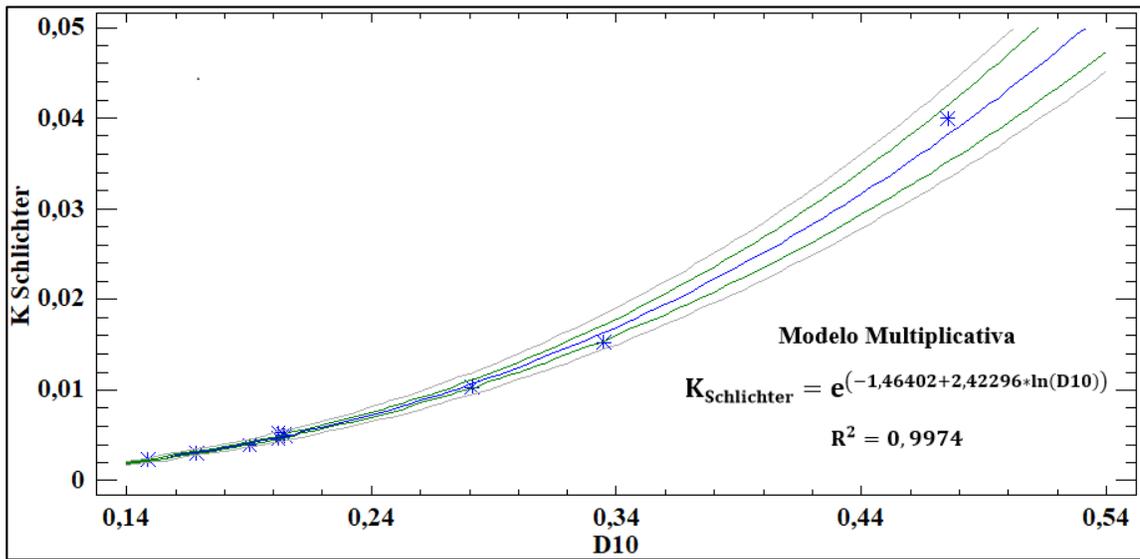
Tabla 4.3 Valores de K (Schlichter) suelos SW

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Schlichter (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SW	V-4	0,202	0,273	0,0052	0,0127
	V-7	0,204	0,263	0,0051	0,0157
	V-9	0,335	0,282	0,0153	0,0158
	V-16	0,281	0,276	0,0104	0,0158
	E-2	0,169	0,246	0,0031	0,0033
	E-3	0,149	0,239	0,0023	0,0019
	E-6	0,475	0,315	0,0399	0,0246
	E-11	0,190	0,248	0,0040	0,0079
	E-13	0,202	0,255	0,0047	0,0064
	E-15	0,205	0,255	0,0049	0,0060
Media \bar{x}		0,241	0,265	0,0095	0,0110
Desviación estándar σ		0,098	0,022	0,0114	0,0071

Fuente: Elaboración propia

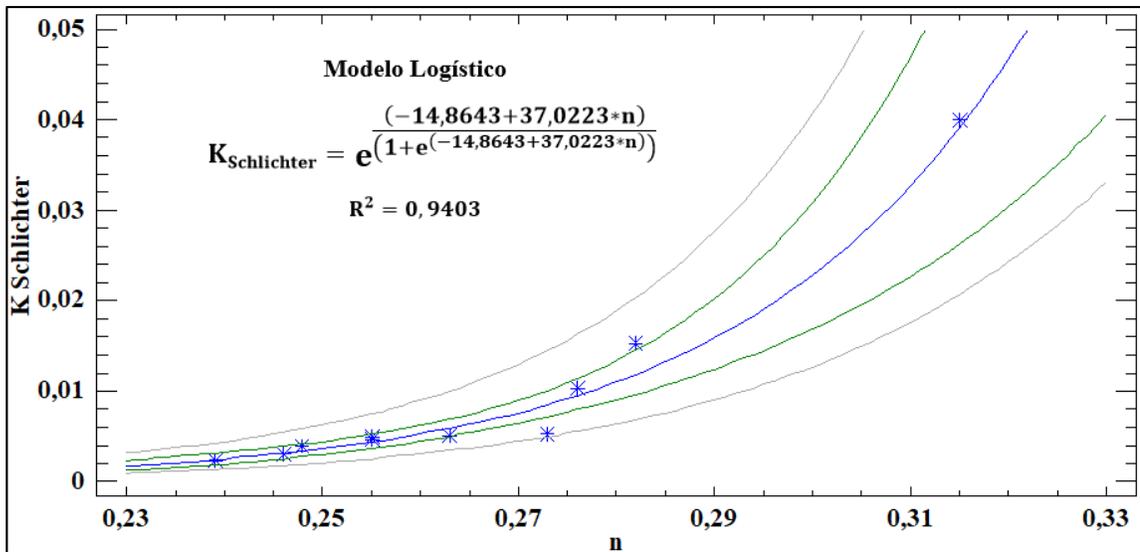
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.4 K Schlichter vs D10 suelos SW



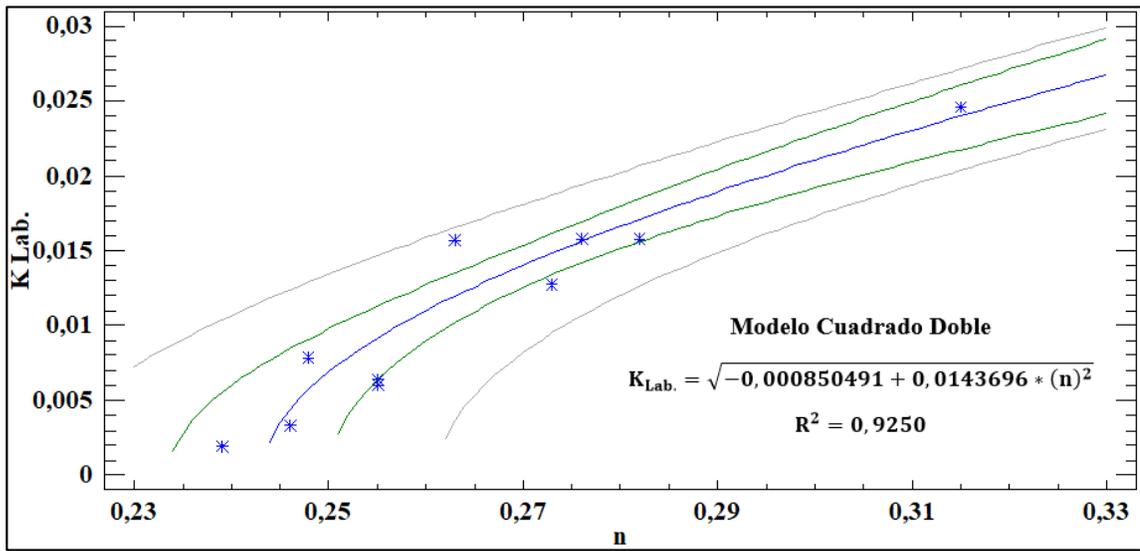
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.5 K Schlichter vs n suelos SW



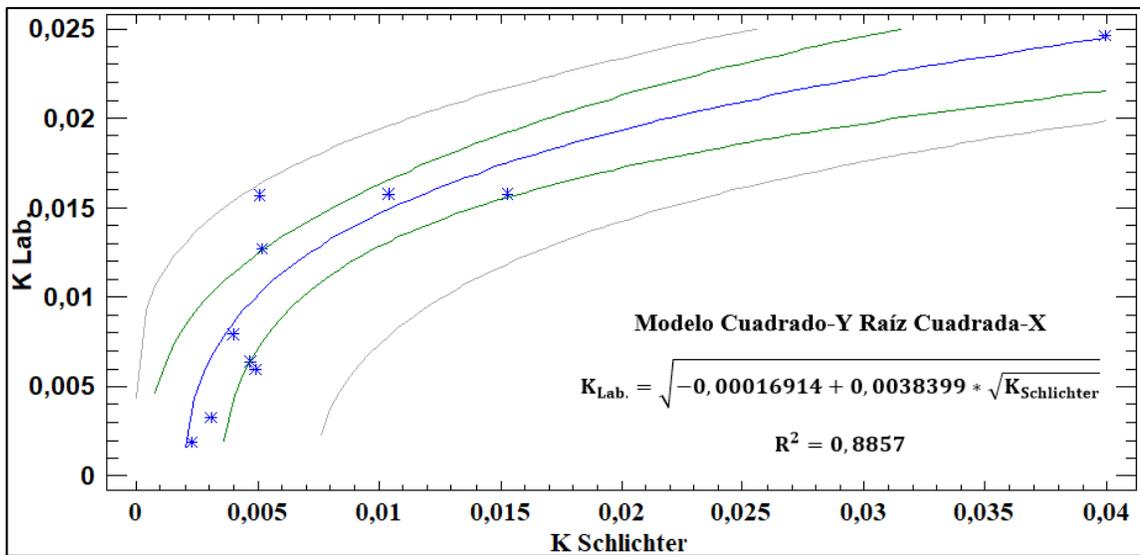
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.6 K Laboratorio vs n suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.7 K Laboratorio vs K Schlichter suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.4 Grado de relación entre variables suelos SW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
$K_{Schlichter}$ vs D10	Multiplicativa	0,9987	99,74%	Perfecta
$K_{Schlichter}$ vs n	Logístico	0,9697	94,03%	Perfecta
$K_{Lab.}$ vs D10	Cuadrado de Y	0,9300	86,48%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs n	Cuadrado Doble	0,9618	92,50%	Perfecta
$K_{Lab.}$ vs $K_{Schlichter}$	Cuadrado-Y Raiz Cuadrada-X	0,9411	88,57%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.2.3. Ecuación de Terzaghi

En la tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Terzaghi para los puntos que corresponden a una clasificación **SW**, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Terzaghi.

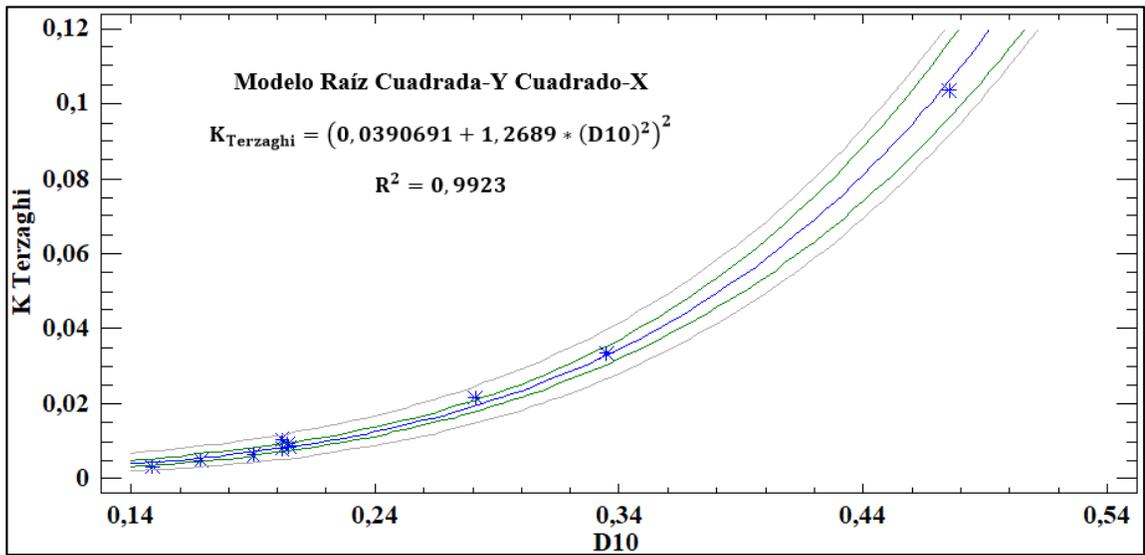
Tabla 4.5 Valores de K (Terzaghi) suelos SW

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Terzaghi (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SW	V-4	0,202	0,273	0,0107	0,0127
	V-7	0,204	0,263	0,0094	0,0157
	V-9	0,335	0,282	0,0335	0,0158
	V-16	0,281	0,276	0,0217	0,0158
	E-2	0,169	0,246	0,0048	0,0033
	E-3	0,149	0,239	0,0033	0,0019
	E-6	0,475	0,315	0,1034	0,0246
	E-11	0,190	0,248	0,0063	0,0079
	E-13	0,202	0,255	0,0080	0,0064
	E-15	0,205	0,255	0,0084	0,0060
Media \bar{x}		0,241	0,265	0,0209	0,0110
Desviación estándar σ		0,098	0,022	0,0304	0,0071

Fuente: Elaboración propia

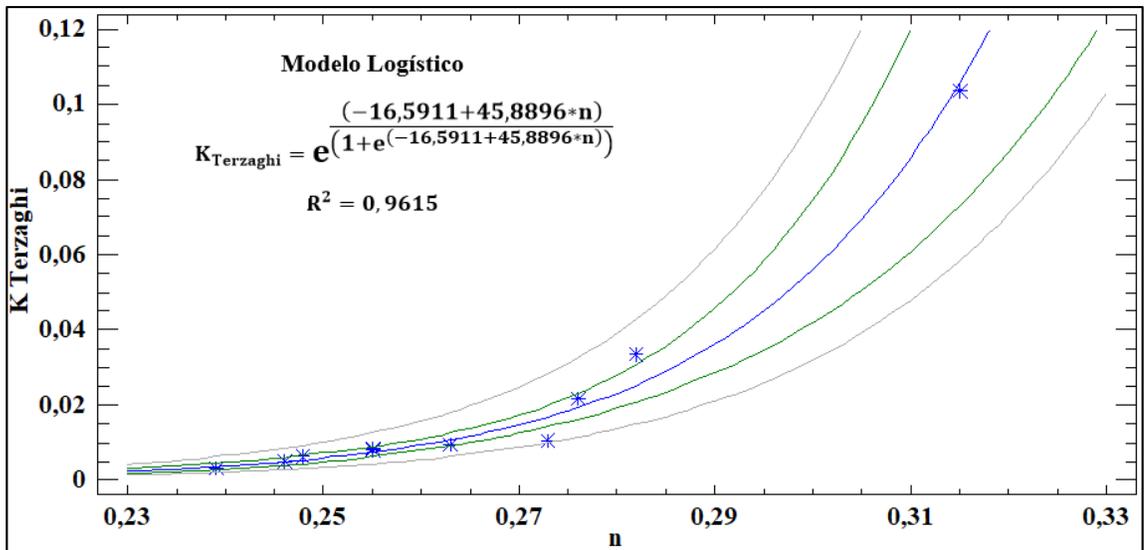
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.8 K Terzaghi vs D10 suelos SW



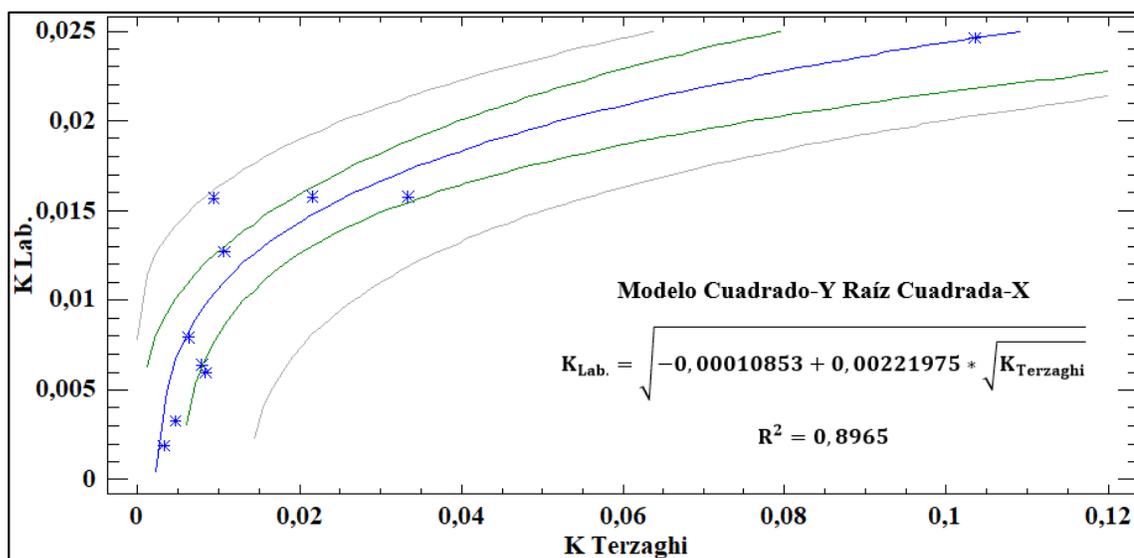
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.9 K Terzaghi vs n suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.10 K Laboratorio vs K Terzaghi suelos SW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.6 Grado de relación entre variables suelos SW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{Terzaghi} vs D10	Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9961	99,23%	Perfecta
K _{Terzaghi} vs n	Logístico	0,9805	96,15%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado de Y	0,9300	86,48%	Fuerte
K _{Lab.} vs n	Cuadrado Doble	0,9618	92,50%	Perfecta
K _{Lab.} vs K _{Terzaghi}	Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9469	89,65%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.2.4. Porcentajes de variación de K en suelos SW

En la tabla 4.7 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad en laboratorio y mediante las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para los puntos que corresponden a una clasificación SW, indicándonos el porcentaje de variación que existe en los coeficientes de permeabilidad obtenidos mediante las ecuaciones empíricas con respecto al coeficiente obtenido en laboratorio.

Tabla 4.7 Porcentajes de variación de K de suelos SW

Punto	K _{Lab.} (cm/s)	K _{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K _{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K _{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-4	0,0127	0,0528	316,18	0,0052	-58,82	0,0106	-16,16
V-7	0,0157	0,0544	246,79	0,0051	-67,68	0,0094	-39,72
V-9	0,0158	0,1458	821,75	0,0153	-3,27	0,0334	111,26
V-16	0,0158	0,1024	549,73	0,0104	-34,29	0,0217	37,59
E-2	0,0033	0,0370	1012,62	0,0031	-5,95	0,0048	45,16
E-3	0,0019	0,0288	1411,32	0,0023	22,80	0,0033	72,01
E-6	0,0246	0,2935	1095,36	0,0399	62,43	0,1034	320,88
E-11	0,0079	0,0469	493,64	0,0040	-49,44	0,0063	-20,63
E-13	0,0064	0,0529	722,09	0,0047	-27,20	0,0080	23,99
E-15	0,0060	0,0546	809,72	0,0049	-18,98	0,0084	39,49

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la tabla 4.8 se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación SW.

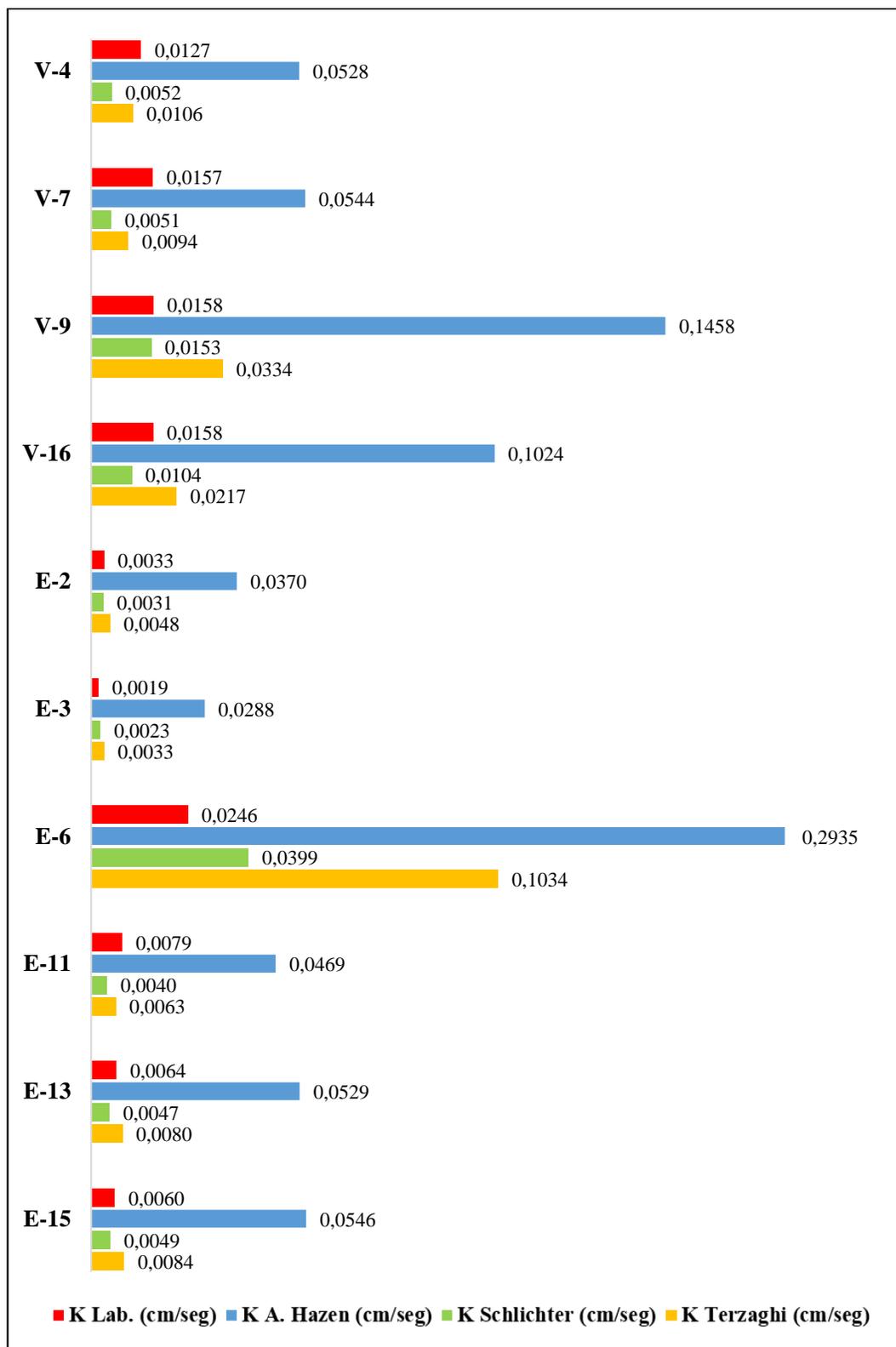
Tabla 4.8 Porcentaje de variación promedio de suelos SW

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	747,92
Schlichter	35,09
Terzaghi	72,69

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura 4.11 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación SW.

Figura 4.11 Tabla de comparaciones de K en suelos SW



Fuente: Elaboración propia

4.3. Comparación de K en suelos SP

4.3.1. Ecuación de Allen Hazen

En la tabla 4.9 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Allen Hazen para los puntos que corresponden a una clasificación **SP**, también nos muestra la variable (D10) que interviene en la ecuación de Allen Hazen.

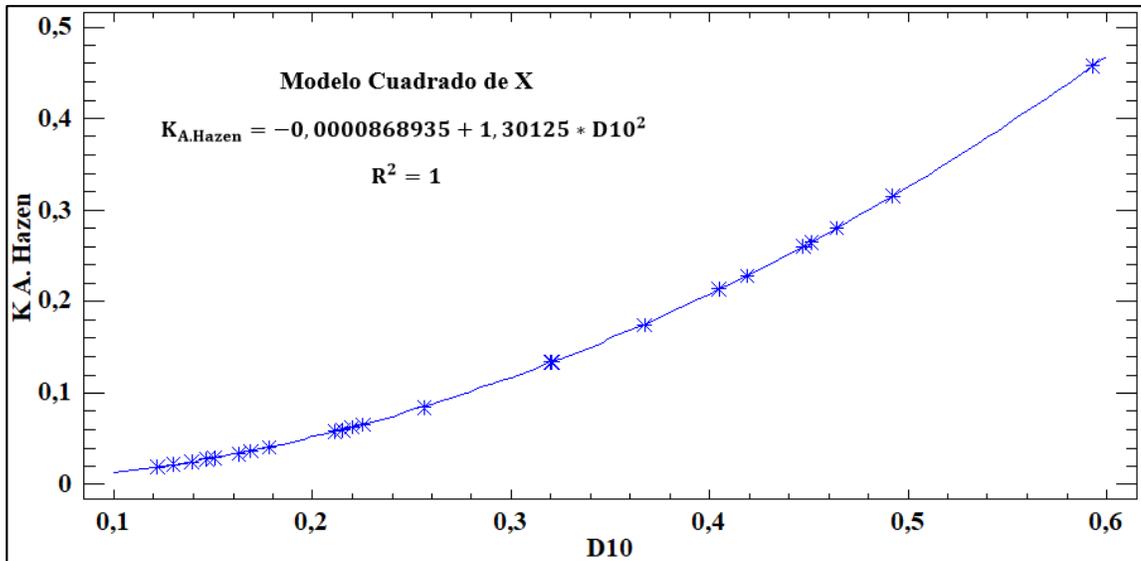
Tabla 4.9 Valores de K (Allen Hazen) suelos SP

SUCS	Punto	D10 (mm)	K Allen Hazen (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SP	V-1	0,220	0,0629	0,0173
	V-2	0,215	0,0602	0,0175
	V-3	0,320	0,1332	0,0194
	V-5	0,451	0,2640	0,0198
	V-6	0,151	0,0298	0,0076
	V-8	0,447	0,2595	0,0257
	V-10	0,593	0,4577	0,0281
	V-11	0,256	0,0851	0,0193
	V-13	0,367	0,1751	0,0187
	V-14	0,492	0,3150	0,0239
	T-1	0,122	0,0194	0,0056
	T-3	0,163	0,0344	0,0073
	T-7	0,211	0,0578	0,0164
	T-8	0,225	0,0658	0,0139
	T-10	0,464	0,2803	0,0270
	T-11	0,169	0,0370	0,0084
	T-15	0,147	0,0280	0,0054
	T-16	0,178	0,0410	0,0089
	E-4	0,139	0,0251	0,0020
	E-5	0,178	0,0411	0,0045
	E-7	0,130	0,0219	0,0021
	E-8	0,405	0,2137	0,0122
	E-10	0,321	0,1342	0,0158
E-16	0,419	0,2283	0,0184	
	Media \bar{x}	0,283	0,1279	0,0144
	Desviación estándar σ	0,139	0,1193	0,0079

Fuente: Elaboración propia

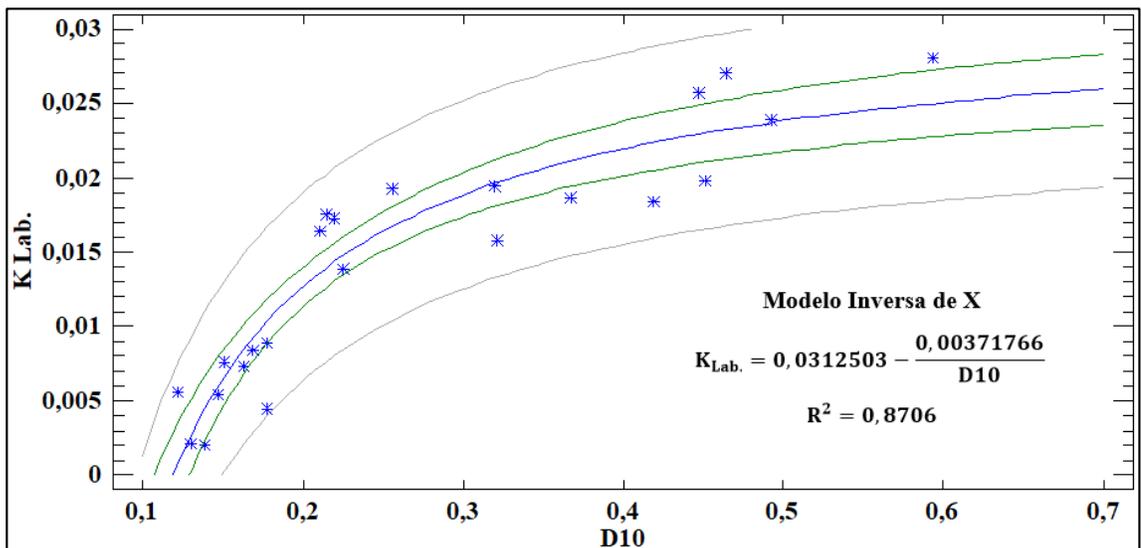
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.12 K Allen Hazen vs D10 suelos SP



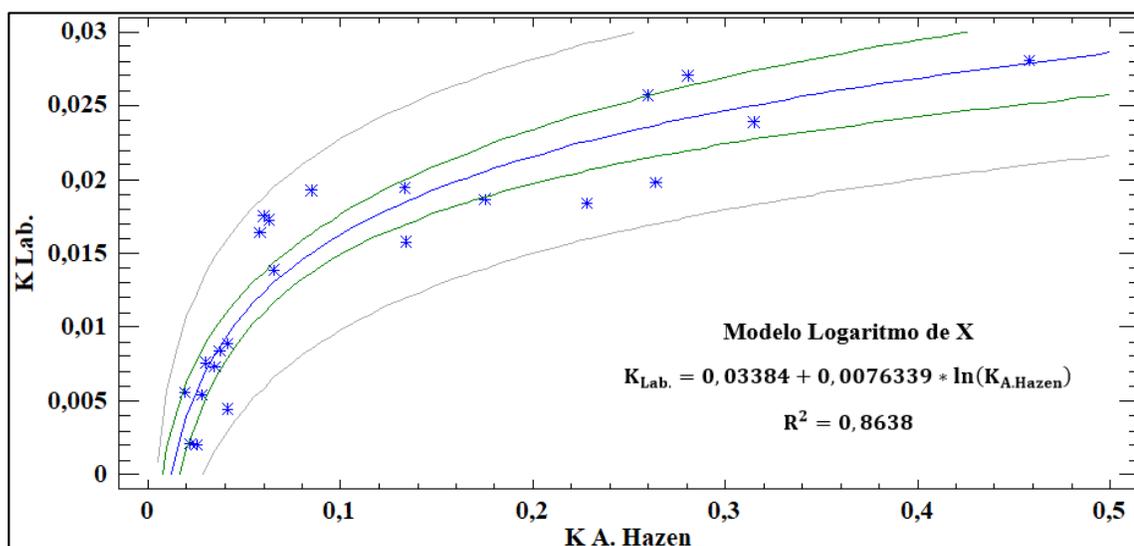
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.13 K Laboratorio vs D10 suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.14 K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.10 Grado de relación entre variables suelos SP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{A. Hazen} vs D10	Cuadrado de X	1	100%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Inversa de X	-0,9331	87,06%	Fuerte
K _{Lab.} vs K _{A. Hazen}	Logaritmo de X	0,9294	86,38	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.3.2. Ecuación de Schlichter

En la tabla 4.11 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Schlichter para los puntos que corresponden a una clasificación SP, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Schlichter.

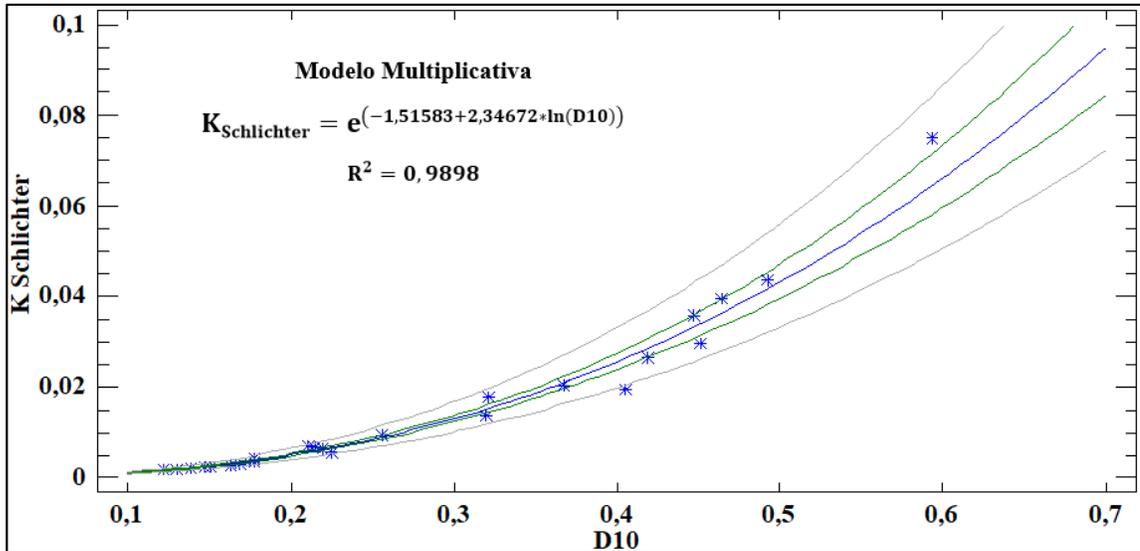
Tabla 4.11 Valores de K (Schlichter) suelos SP

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Schlichter (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SP	V-1	0,220	0,276	0,0064	0,0173
	V-2	0,215	0,289	0,0067	0,0175
	V-3	0,320	0,279	0,0138	0,0194
	V-5	0,451	0,292	0,0298	0,0198
	V-6	0,151	0,236	0,0024	0,0076
	V-8	0,447	0,317	0,0358	0,0257
	V-10	0,593	0,334	0,0750	0,0281
	V-11	0,256	0,289	0,0094	0,0193
	V-13	0,367	0,295	0,0203	0,0187
	V-14	0,492	0,317	0,0437	0,0239
	T-1	0,122	0,264	0,0018	0,0056
	T-3	0,163	0,239	0,0028	0,0073
	T-7	0,211	0,300	0,0069	0,0164
	T-8	0,225	0,251	0,0057	0,0139
	T-10	0,464	0,319	0,0396	0,0270
	T-11	0,169	0,243	0,0031	0,0084
	T-15	0,147	0,255	0,0025	0,0054
	T-16	0,178	0,251	0,0036	0,0089
	E-4	0,139	0,241	0,0021	0,0020
	E-5	0,178	0,278	0,0042	0,0045
	E-7	0,130	0,237	0,0018	0,0021
	E-8	0,405	0,261	0,0196	0,0122
E-10	0,321	0,311	0,0177	0,0158	
E-16	0,419	0,296	0,0266	0,0184	
Media \bar{x}		0,283	0,278	0,0159	0,0144
Desviación estándar σ		0,139	0,030	0,0181	0,0079

Fuente: Elaboración propia

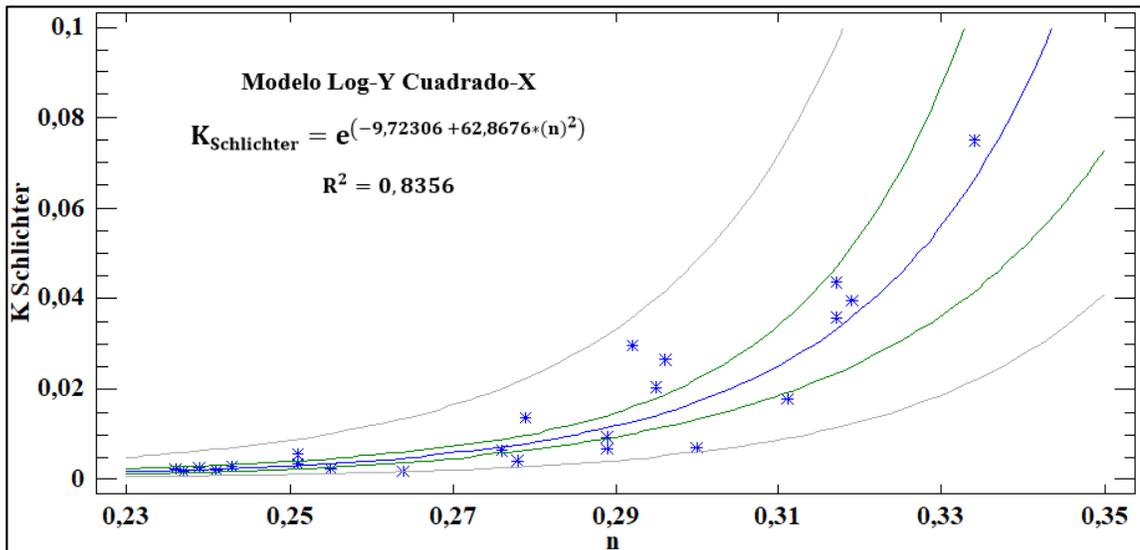
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.15 K Schlichter vs D10 suelos SP



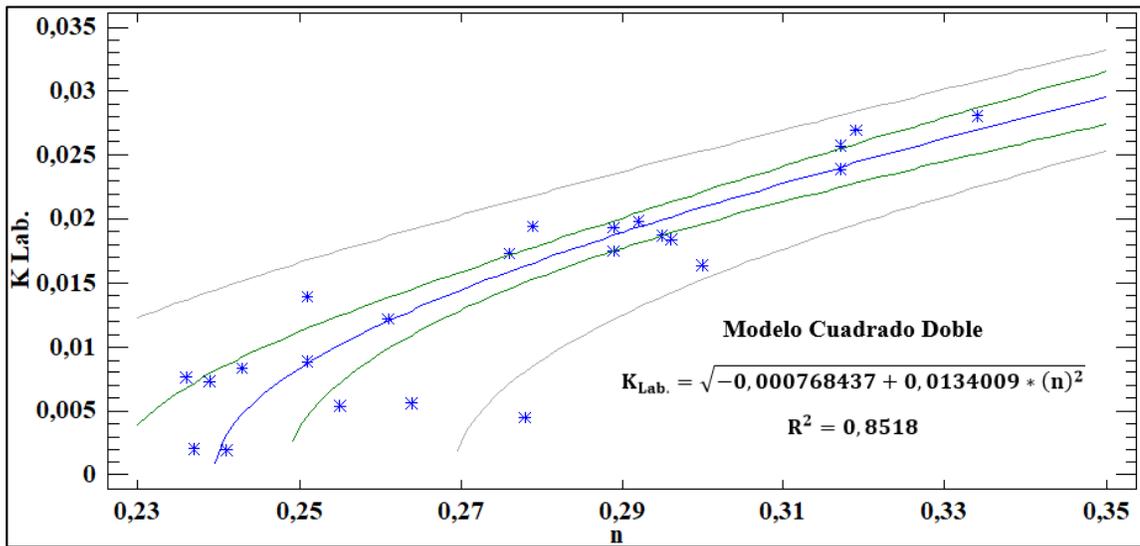
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.16 K Schlichter vs n suelos SP



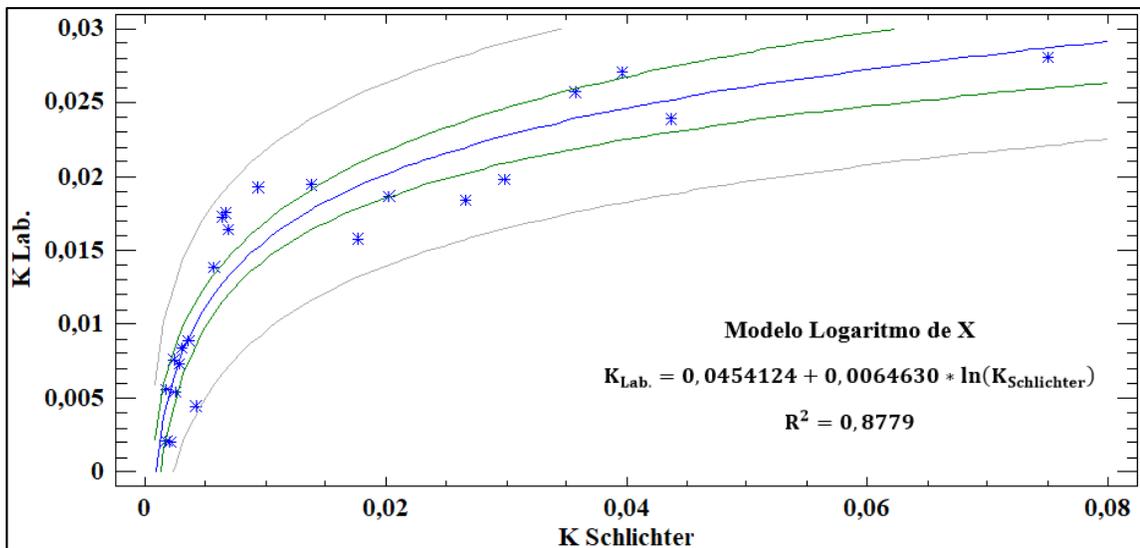
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.17 K Laboratorio vs n suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.18 K Laboratorio vs K Schlichter suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.12 Grado de relación entre variables suelos SP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
$K_{Schlichter}$ vs D10	Multiplicativa	0,9949	98,98%	Perfecta
$K_{Schlichter}$ vs n	Log-Y Cuadrado-X	0,9141	83,56%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs D10	Inversa de X	-0,9331	87,06%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs n	Cuadrado Doble	0,9230	85,18%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs $K_{Schlichter}$	Logaritmo de X	0,9370	87,79%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.3.3. Ecuación de Terzaghi

En la tabla 4.13 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Terzaghi para los puntos que corresponden a una clasificación SP, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Terzaghi.

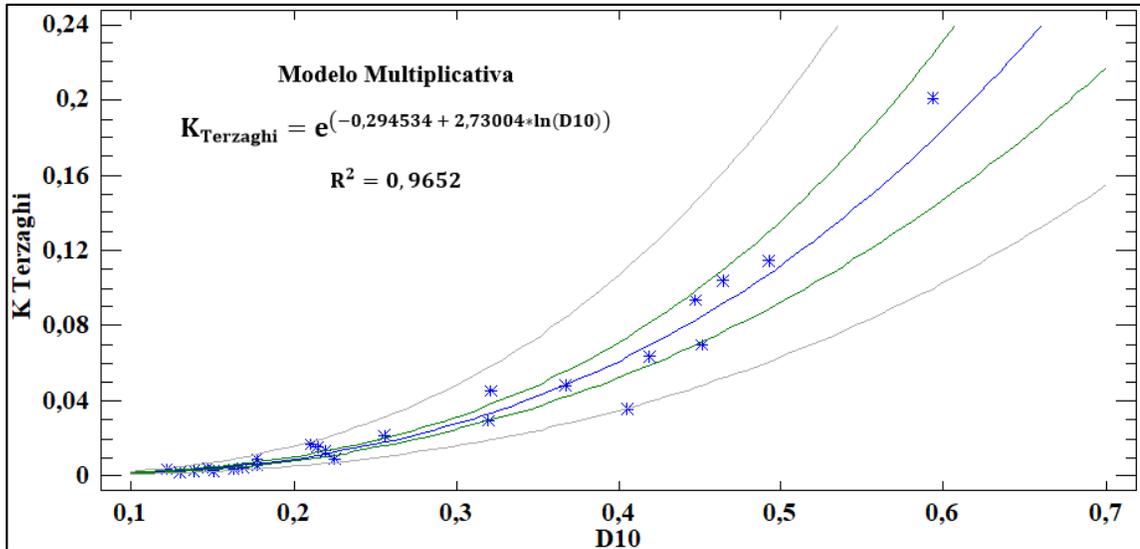
Tabla 4.13 Valores de K (Terzaghi) suelos SP

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Terzaghi (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
SP	V-1	0,220	0,276	0,0133	0,0173
	V-2	0,215	0,289	0,0154	0,0175
	V-3	0,320	0,279	0,0296	0,0194
	V-5	0,451	0,292	0,0698	0,0198
	V-6	0,151	0,236	0,0032	0,0076
	V-8	0,447	0,317	0,0932	0,0257
	V-10	0,593	0,334	0,2005	0,0281
	V-11	0,256	0,289	0,0217	0,0193
	V-13	0,367	0,295	0,0484	0,0187
	V-14	0,492	0,317	0,1141	0,0239
	T-1	0,122	0,264	0,0034	0,0056
	T-3	0,163	0,239	0,0039	0,0073
	T-7	0,211	0,300	0,0169	0,0164
	T-8	0,225	0,251	0,0094	0,0139
	T-10	0,464	0,319	0,1039	0,0270
	T-11	0,169	0,243	0,0046	0,0084
	T-15	0,147	0,255	0,0043	0,0054
	T-16	0,178	0,251	0,0058	0,0089
	E-4	0,139	0,241	0,0030	0,0020
	E-5	0,178	0,278	0,0090	0,0045
	E-7	0,130	0,237	0,0024	0,0021
	E-8	0,405	0,261	0,0357	0,0122
	E-10	0,321	0,311	0,0452	0,0158
E-16	0,419	0,296	0,0637	0,0184	
Media \bar{x}		0,283	0,278	0,0383	0,0144
Desviación estándar σ		0,139	0,030	0,0486	0,0079

Fuente: Elaboración propia

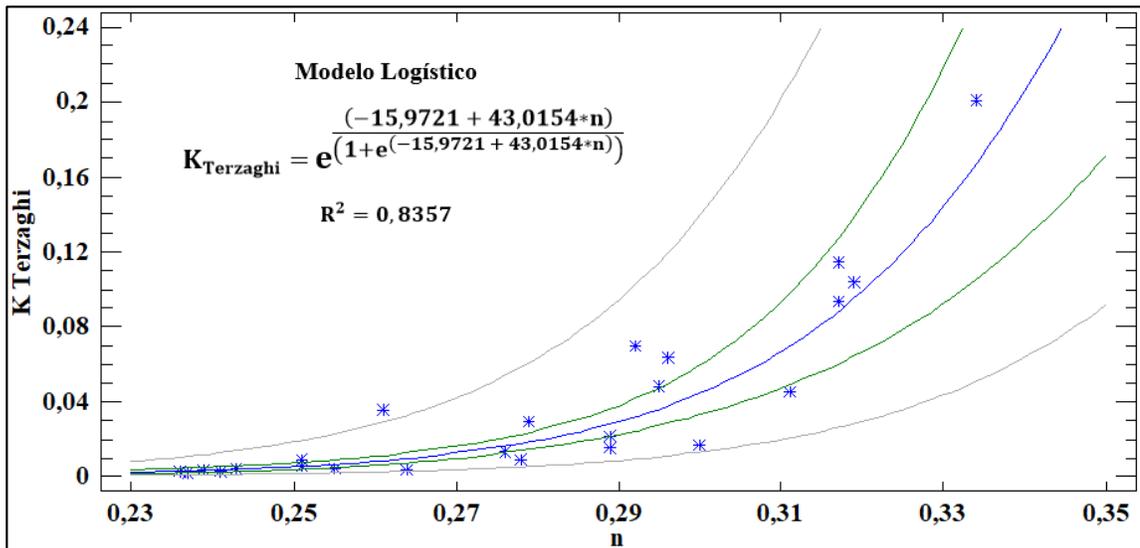
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.19 K Terzaghi vs D10 suelos SP



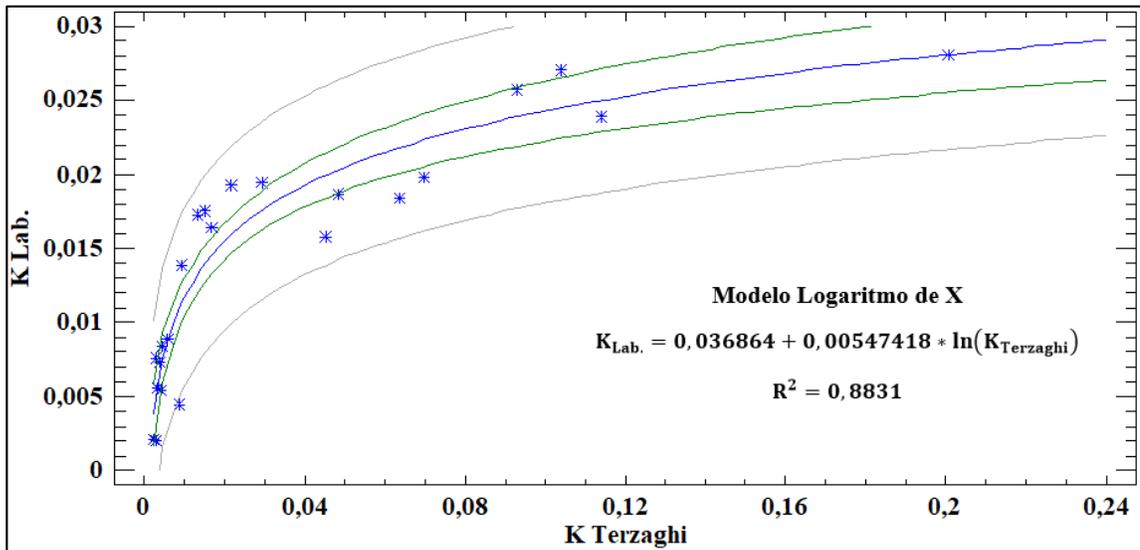
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.20 K Terzaghi vs n suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.21 K Laboratorio vs K Terzaghi suelos SP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.14 Grado de relación entre variables suelos SP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{Terzaghi} vs D10	Multiplicativa	0,9824	96,52%	Perfecta
K _{Terzaghi} vs n	Logístico	0,9142	83,57%	Fuerte
K _{Lab.} vs D10	Inversa de X	-0,9331	87,06%	Fuerte
K _{Lab.} vs n	Cuadrado Doble	0,9230	85,18%	Fuerte
K _{Lab.} vs K _{Terzaghi}	Logaritmo de X	0,9397	88,31%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.3.4. Porcentajes de variación de K en suelos SP

En la tabla 4.15 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad en laboratorio y mediante las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para los puntos que corresponden a una clasificación **SP**, indicándonos el porcentaje de variación que existe en los coeficientes de permeabilidad obtenidos mediante las ecuaciones empíricas con respecto al coeficiente obtenido en laboratorio.

Tabla 4.15 Porcentajes de variación de K de suelos SP

Punto	KLab. (cm/s)	KA. Hazen (cm/s)	Variación (%)	KSchlich. (cm/s)	Variación (%)	KTerzaghi (cm/s)	Variación (%)
V-1	0,0173	0,0629	264,24	0,0064	-63,19	0,0133	-23,02
V-2	0,0175	0,0602	243,70	0,0067	-61,92	0,0154	-12,34
V-3	0,0194	0,1332	587,36	0,0138	-28,94	0,0296	52,66
V-5	0,0198	0,2640	1231,13	0,0298	50,35	0,0697	251,67
V-6	0,0076	0,0298	291,19	0,0024	-68,69	0,0032	-57,91
V-8	0,0257	0,2594	911,04	0,0358	39,50	0,0932	263,23
V-10	0,0281	0,4577	1527,99	0,0750	166,89	0,2004	612,95
V-11	0,0193	0,0851	340,10	0,0094	-51,21	0,0217	12,35
V-13	0,0187	0,1752	837,84	0,0203	8,63	0,0484	159,06
V-14	0,0239	0,3150	1218,88	0,0437	83,11	0,1141	377,65
T-1	0,0056	0,0194	247,10	0,0018	-67,44	0,0034	-38,64
T-3	0,0073	0,0344	371,68	0,0028	-61,75	0,0039	-46,71
T-7	0,0164	0,0578	253,53	0,0069	-57,63	0,0169	3,41
T-8	0,0139	0,0657	374,08	0,0057	-58,77	0,0094	-32,31
T-10	0,0270	0,2803	936,24	0,0396	46,58	0,1040	284,30
T-11	0,0084	0,0370	337,92	0,0031	-63,54	0,0046	-45,70
T-15	0,0054	0,0280	418,55	0,0025	-53,90	0,0043	-20,93
T-16	0,0089	0,0410	358,75	0,0036	-60,25	0,0058	-35,23
E-4	0,0020	0,0251	1169,09	0,0021	4,47	0,0030	51,31
E-5	0,0045	0,0411	802,60	0,0042	-7,26	0,0090	97,83
E-7	0,0021	0,0219	930,39	0,0018	-17,12	0,0024	12,95
E-8	0,0122	0,2138	1656,95	0,0196	61,26	0,0357	193,18
E-10	0,0158	0,1341	748,49	0,0177	11,65	0,0452	185,92
E-16	0,0184	0,2283	1138,29	0,0266	44,26	0,0637	245,46

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la tabla 4.16 se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **SP**.

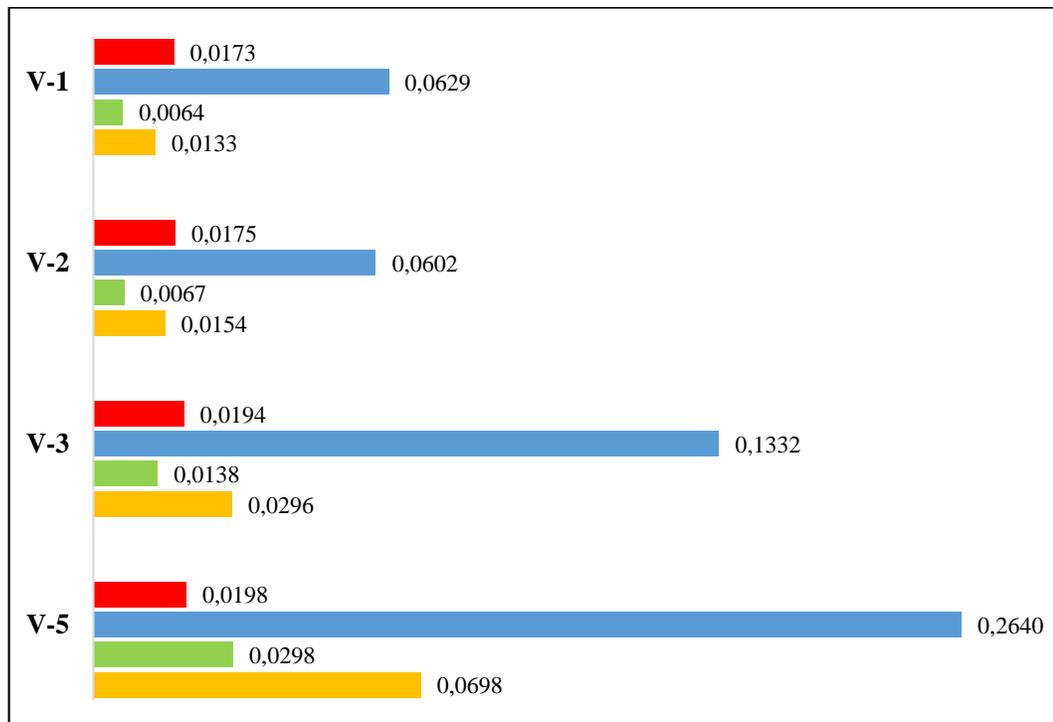
Tabla 4.16 Porcentaje de variación promedio de suelos SP

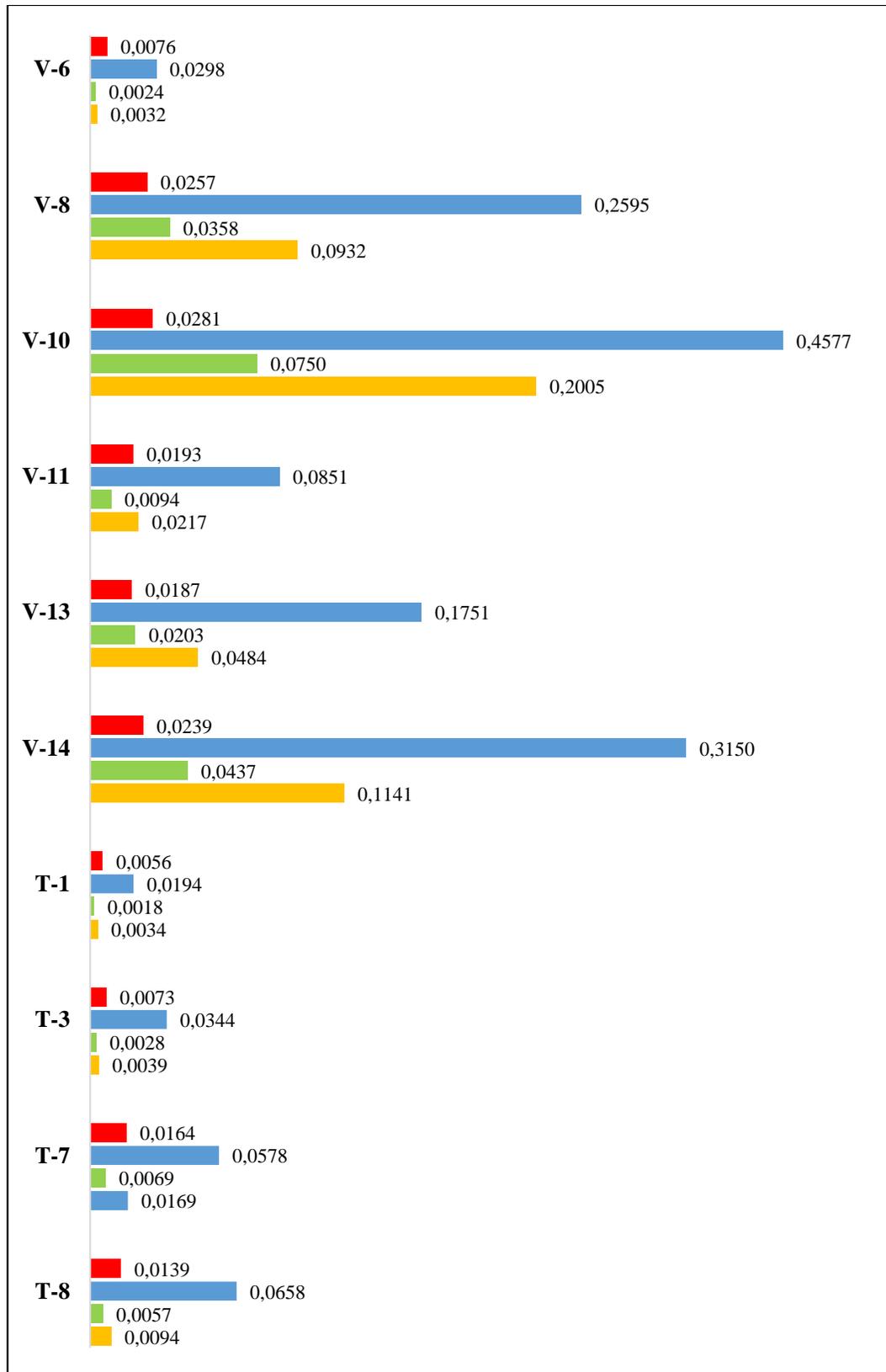
Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	716,55
Schlichter	51,60
Terzaghi	129,86

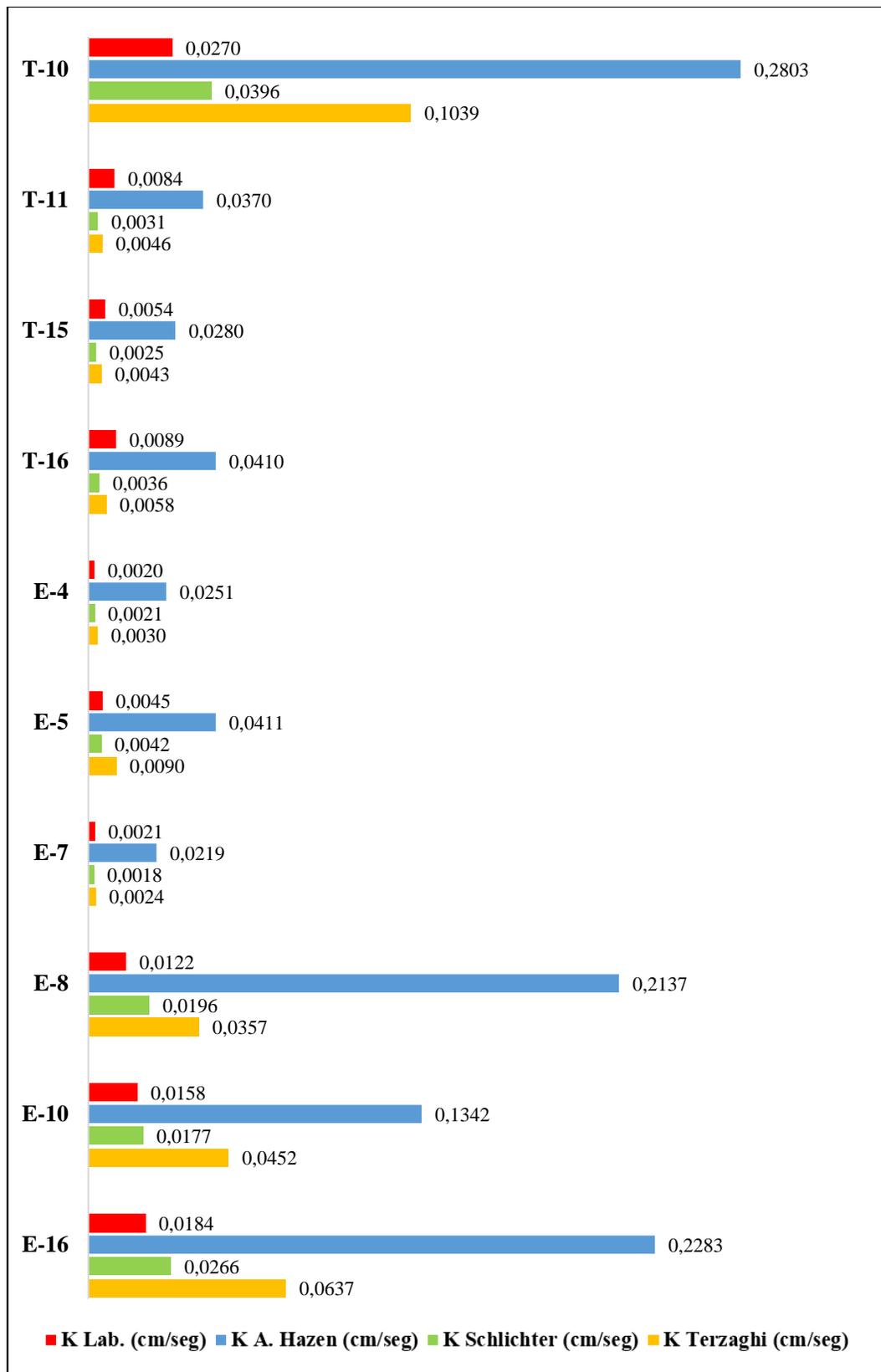
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura 4.22 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **SP**.

Figura 4.22 Tabla de comparaciones de K en suelos SP







Fuente: Elaboración propia

4.4. Comparación de K en suelos GW

4.4.1. Ecuación de Allen Hazen

En la tabla 4.17 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Allen Hazen para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**, también nos muestra la variable (D10) que interviene en la ecuación de Allen Hazen.

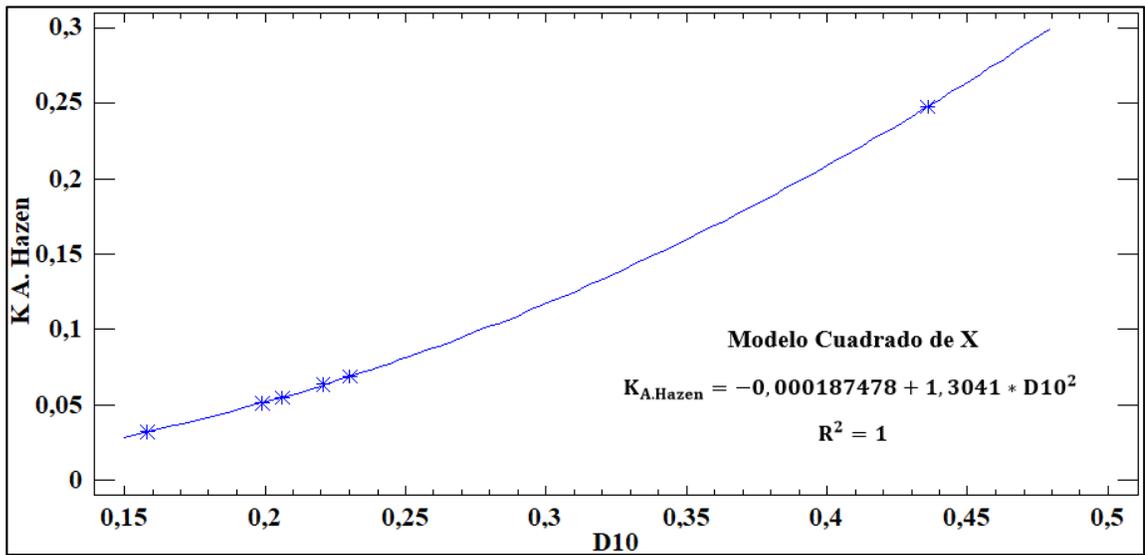
Tabla 4.17 Valores de K (Allen Hazen) suelos GW

SUCS	Punto	D10 (mm)	K Allen Hazen (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GW	V-12	0,436	0,2477	0,0237
	T-14	0,206	0,0551	0,0039
	E-1	0,158	0,0323	0,0020
	E-9	0,221	0,0634	0,0038
	E-12	0,230	0,0690	0,0082
	E-14	0,199	0,0515	0,0042
Media \bar{x}		0,242	0,0865	0,0076
Desviación estándar σ		0,099	0,0800	0,0081

Fuente: Elaboración propia

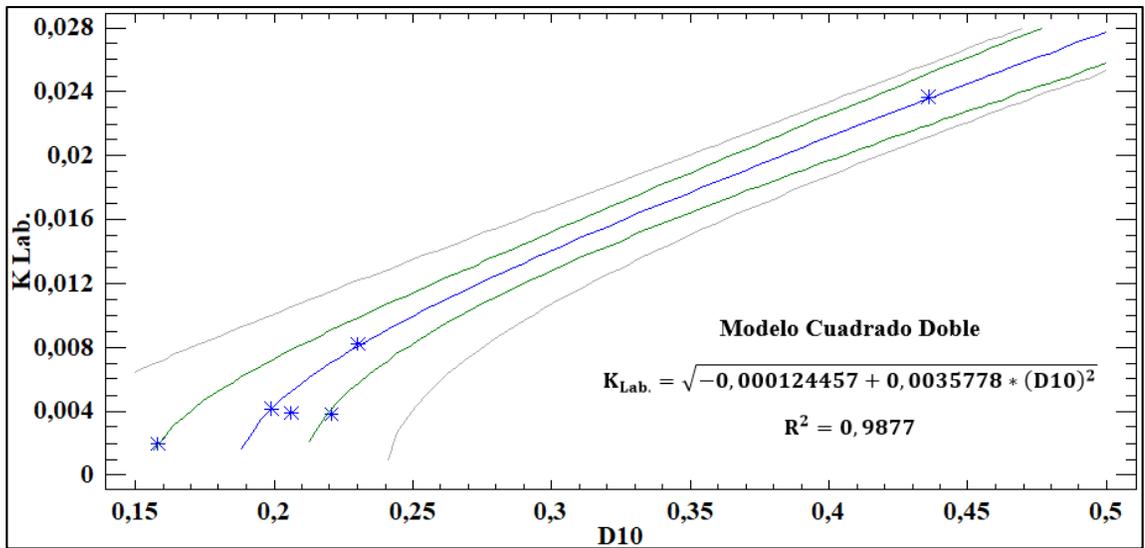
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.23 K Allen Hazen vs D10 suelos GW



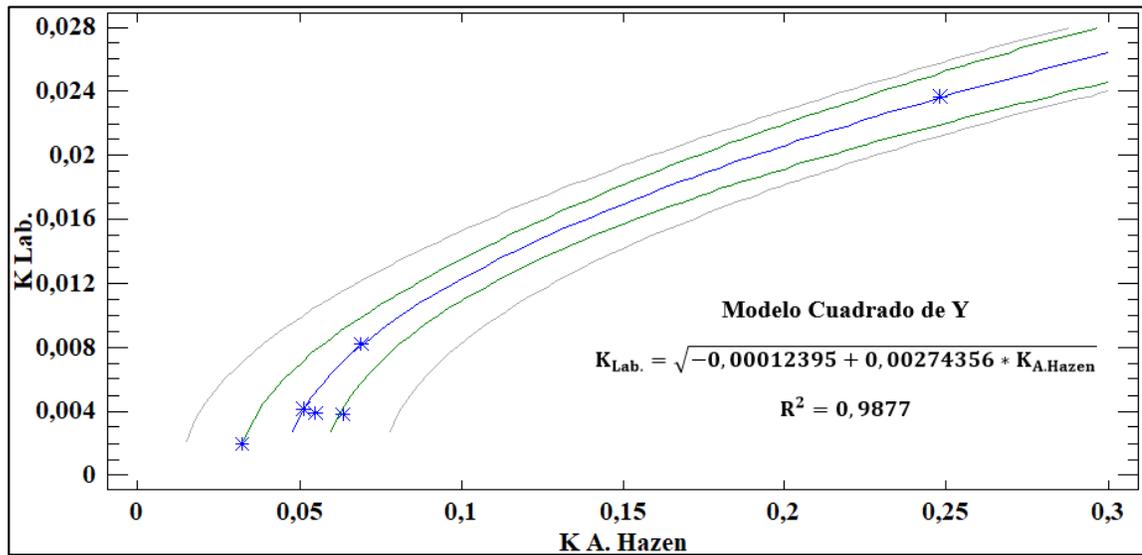
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.24 K Laboratorio vs D10 suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.25 K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.18 Grado de relación entre variables suelos GW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{A. Hazen} vs D10	Cuadrado de X	1	100%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado doble	0,9938	98,77%	Perfecta
K _{Lab.} vs K _{A. Hazen}	Cuadrado de Y	0,9938	98,77%	Perfecta

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.4.2. Ecuación de Schlichter

En la tabla 4.19 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Schlichter para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Schlichter.

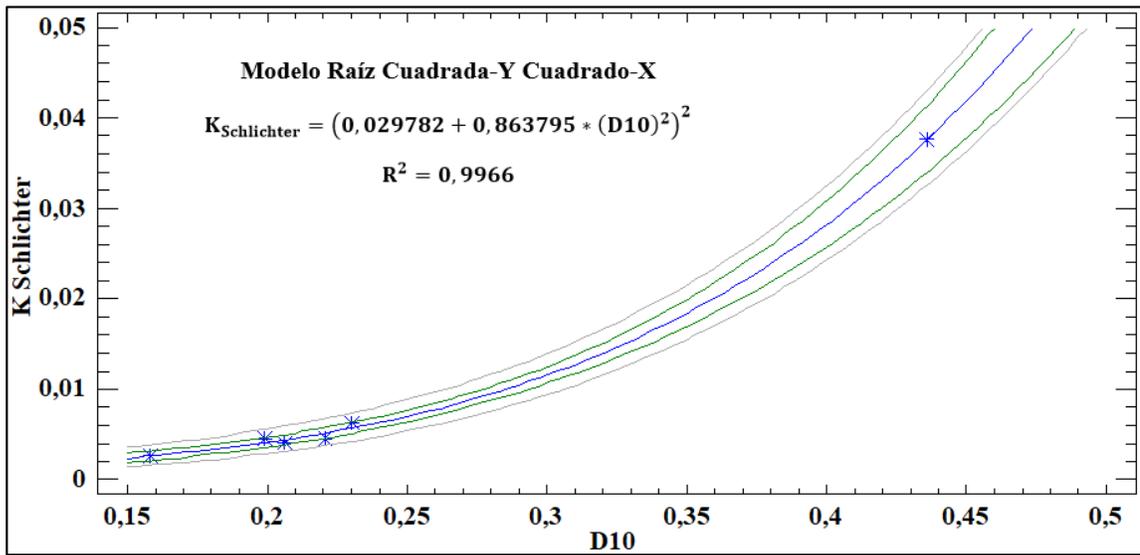
Tabla 4.19 Valores de K (Schlichter) suelos GW

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Schlichter (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GW	V-12	0,436	0,327	0,0376	0,0237
	T-14	0,206	0,219	0,0041	0,0039
	E-1	0,158	0,236	0,0026	0,0020
	E-9	0,221	0,214	0,0046	0,0038
	E-12	0,230	0,260	0,0063	0,0082
	E-14	0,199	0,251	0,0045	0,0042
Media \bar{x}		0,242	0,251	0,0099	0,0076
Desviación estándar σ		0,099	0,041	0,0136	0,0081

Fuente: Elaboración propia

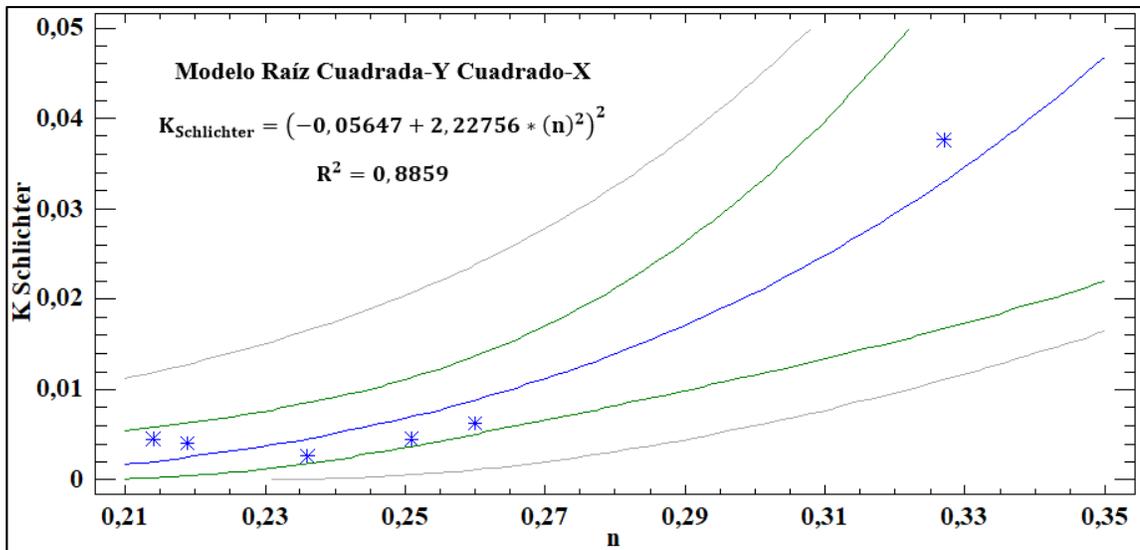
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.26 K Schlichter vs D10 suelos GW



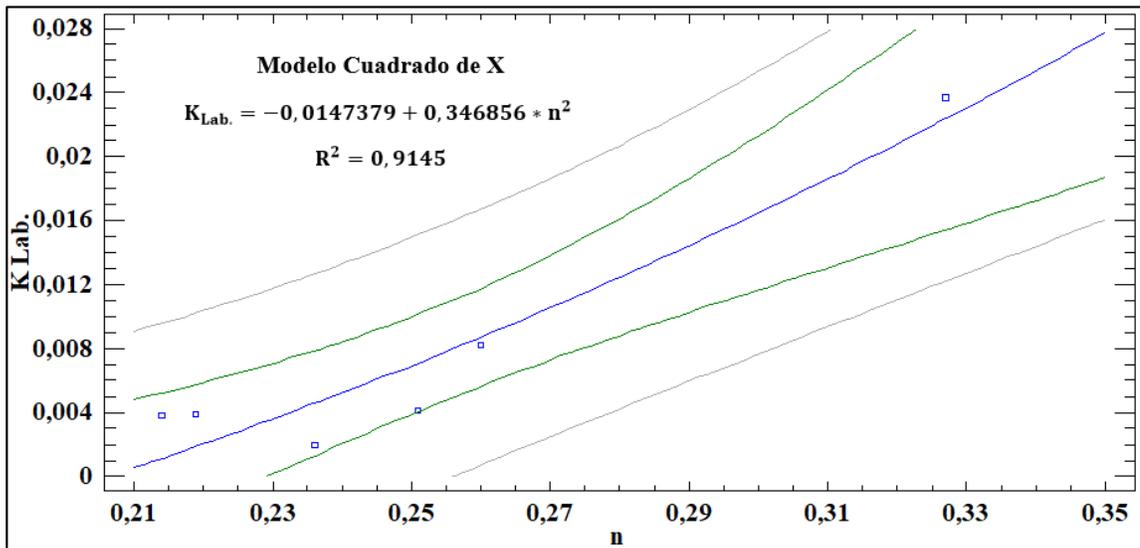
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.27 K Schlichter vs n suelos GW



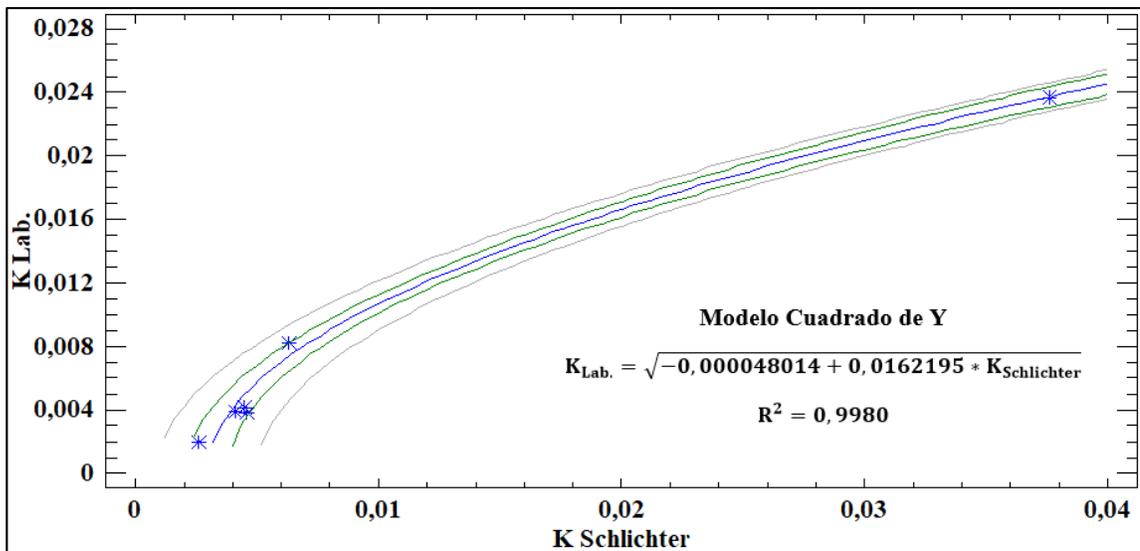
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.28 K Laboratorio vs n suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.29 K Laboratorio vs K Schlichter suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.20 Grado de relación entre variables suelos GW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
$K_{Schlichter}$ vs D10	Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9983	99,66%	Perfecta
$K_{Schlichter}$ vs n	Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9412	88,59%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs D10	Cuadrado Doble	0,9938	98,77%	Perfecta
$K_{Lab.}$ vs n	Cuadrado de X	0,9563	91,45%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs $K_{Schlichter}$	Cuadrado de Y	0,9990	99,80%	Perfecta

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.4.3. Ecuación de Terzaghi

En la tabla 4.21 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Terzaghi para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Terzaghi.

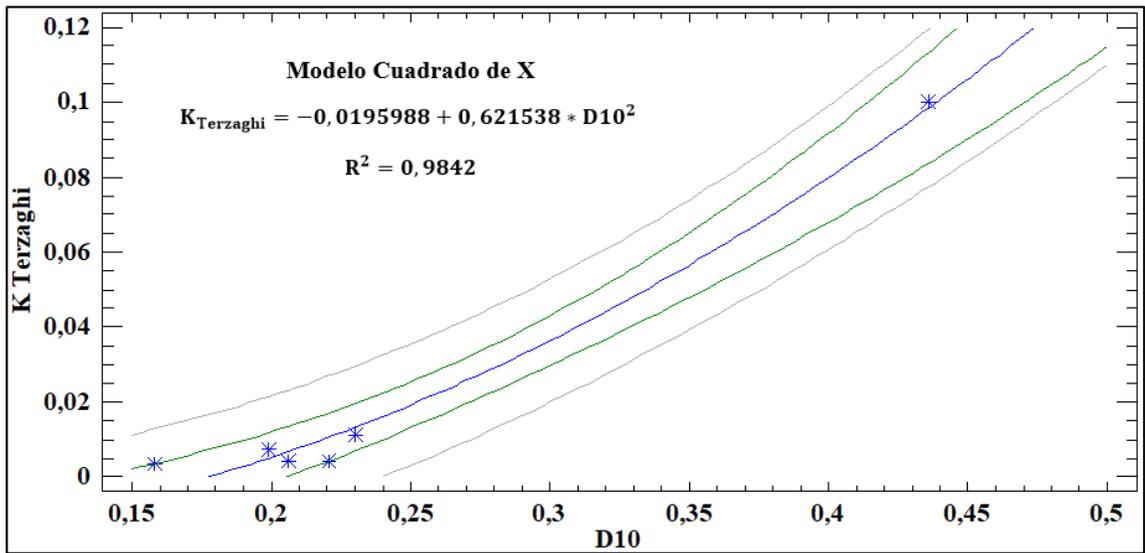
Tabla 4.21 Valores de K (Allen Hazen) suelos GW

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Terzaghi (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GW	V-12	0,436	0,327	0,0999	0,0237
	T-14	0,206	0,219	0,0041	0,0039
	E-1	0,158	0,236	0,0034	0,0020
	E-9	0,221	0,214	0,0042	0,0038
	E-12	0,230	0,260	0,0114	0,0082
	E-14	0,199	0,251	0,0073	0,0042
Media \bar{x}		0,242	0,251	0,0217	0,0076
Desviación estándar σ		0,099	0,041	0,0384	0,0081

Fuente: Elaboración propia

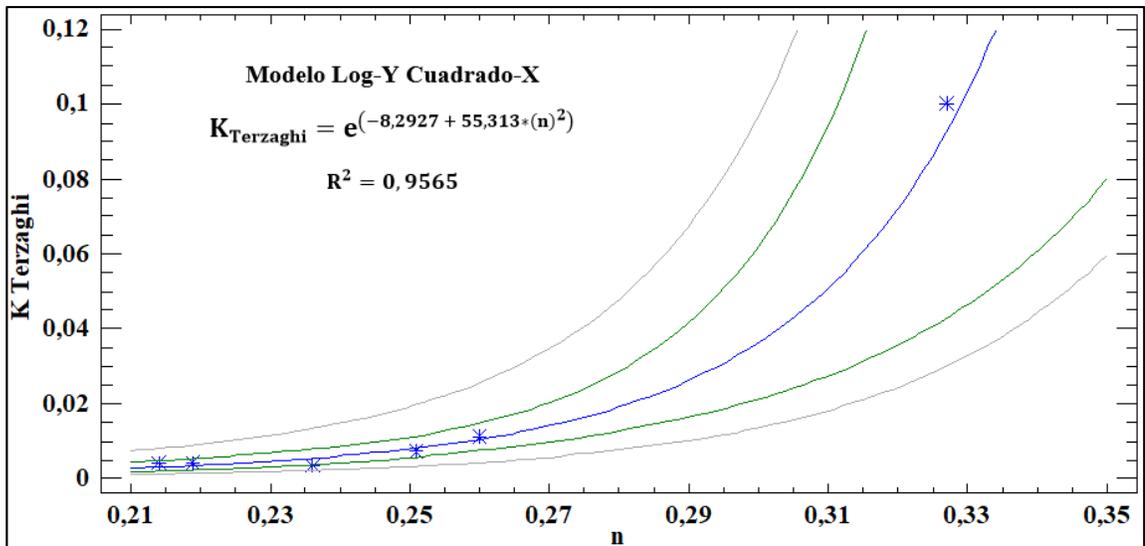
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.30 K Terzaghi vs D10 suelos GW



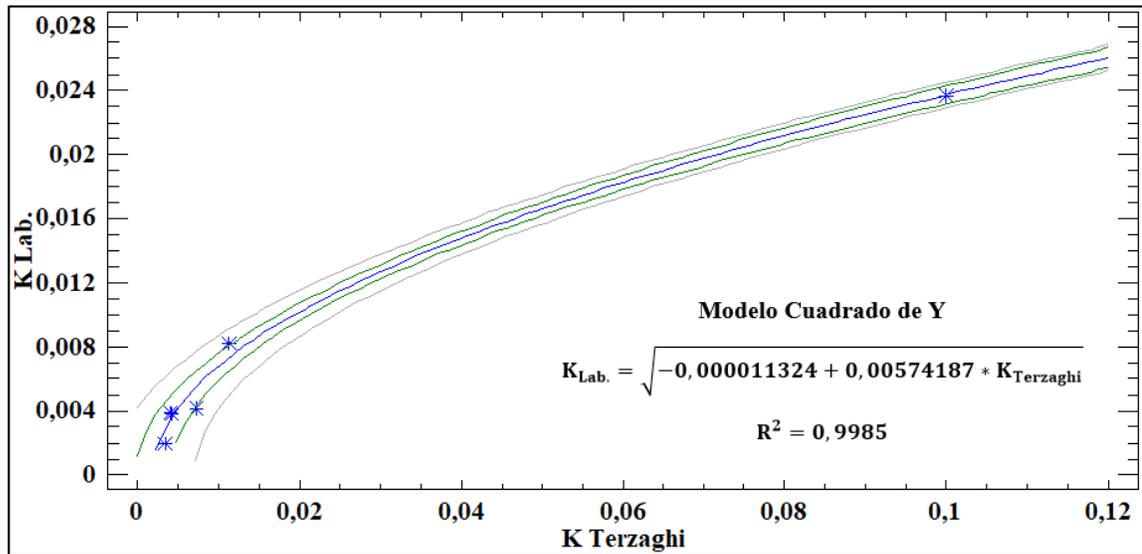
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.31 K Terzaghi vs n suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.32 K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GW



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.22 Grado de relación entre variables suelos GW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{Terzaghi} vs D10	Cuadrado de X	0,9921	98,42%	Perfecta
K _{Terzaghi} vs n	Log-Y Cuadrado-X	0,9780	95,65%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado Doble	0,9938	98,77%	Perfecta
K _{Lab.} vs n	Cuadrado de X	0,9563	91,45%	Fuerte
K _{Lab.} vs K _{Terzaghi}	Cuadrado de Y	0,9992	99,85%	Perfecta

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.4.4. Porcentaje de variación de K en suelos GW

En la tabla 4.23 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad en laboratorio y mediante las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**, indicándonos el porcentaje de variación que existe en los coeficientes de permeabilidad obtenidos mediante las ecuaciones empíricas con respecto al coeficiente obtenido en laboratorio.

Tabla 4.23 Porcentajes de variación de K de suelos GW

Punto	K_{Lab.} (cm/s)	K_{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K_{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K_{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-12	0,0237	0,2477	944,29	0,0376	58,51	0,0999	321,18
T-14	0,0039	0,0551	1315,91	0,0041	4,24	0,0041	6,48
E-1	0,0020	0,0323	1537,62	0,0026	30,75	0,0034	74,55
E-9	0,0038	0,0634	1556,57	0,0046	18,92	0,0042	9,65
E-12	0,0082	0,0690	737,88	0,0063	-23,34	0,0114	38,62
E-14	0,0042	0,0515	1125,83	0,0045	6,16	0,0073	72,79

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la tabla 4.24 se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **GW**.

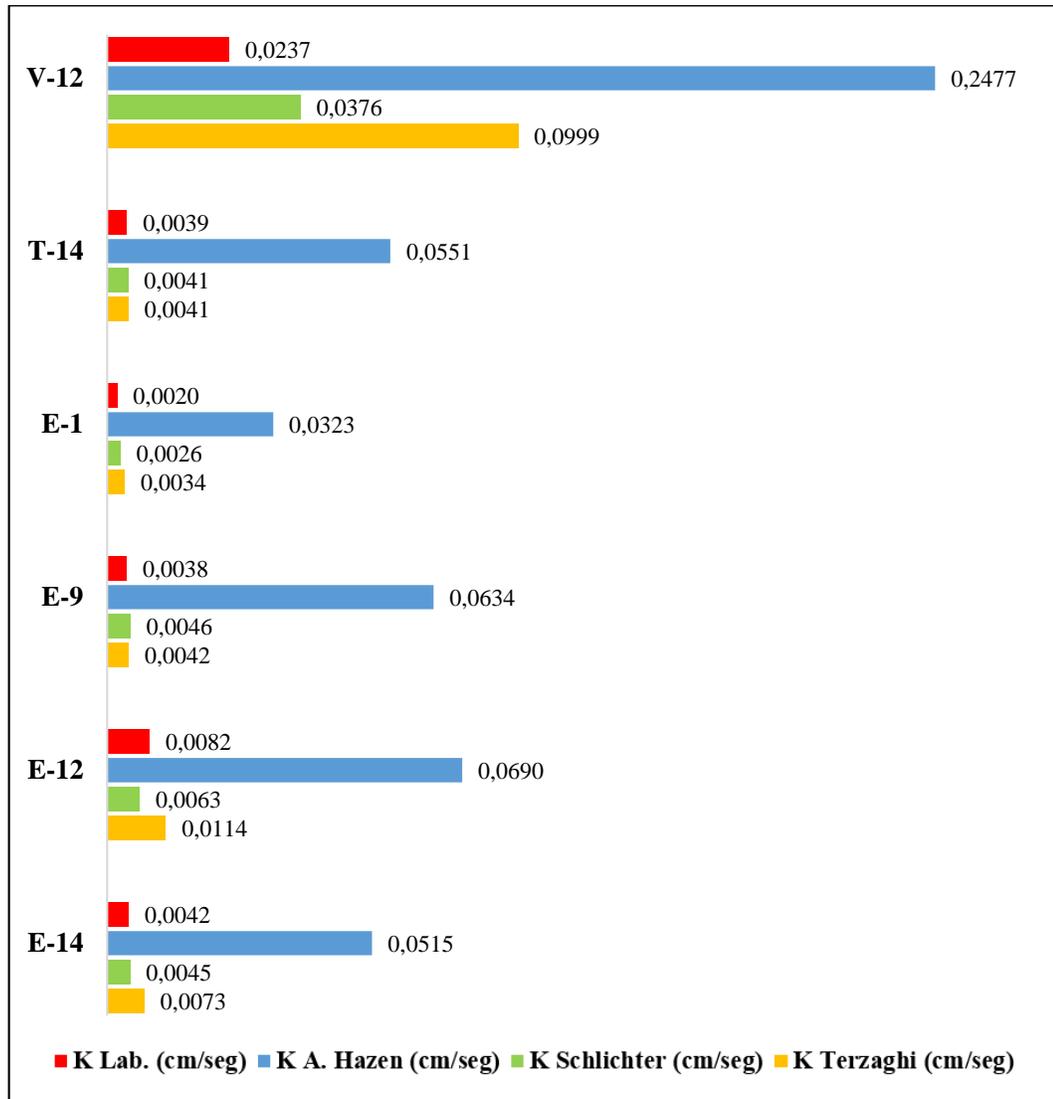
Tabla 4.24 Porcentaje de variación promedio de suelos GW

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	1203,02
Schlichter	23,65
Terzaghi	87,21

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura 4.33 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**.

Figura 4.33 Tabla de comparaciones de K en suelos GW



Fuente: Elaboración propia

4.5. Comparación de K en suelos GP

4.5.1. Ecuación de Allen Hazen

En la tabla 4.25 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Allen Hazen para los puntos que corresponden a una clasificación **GP**, también nos muestra la variable (D10) que interviene en la ecuación de Allen Hazen.

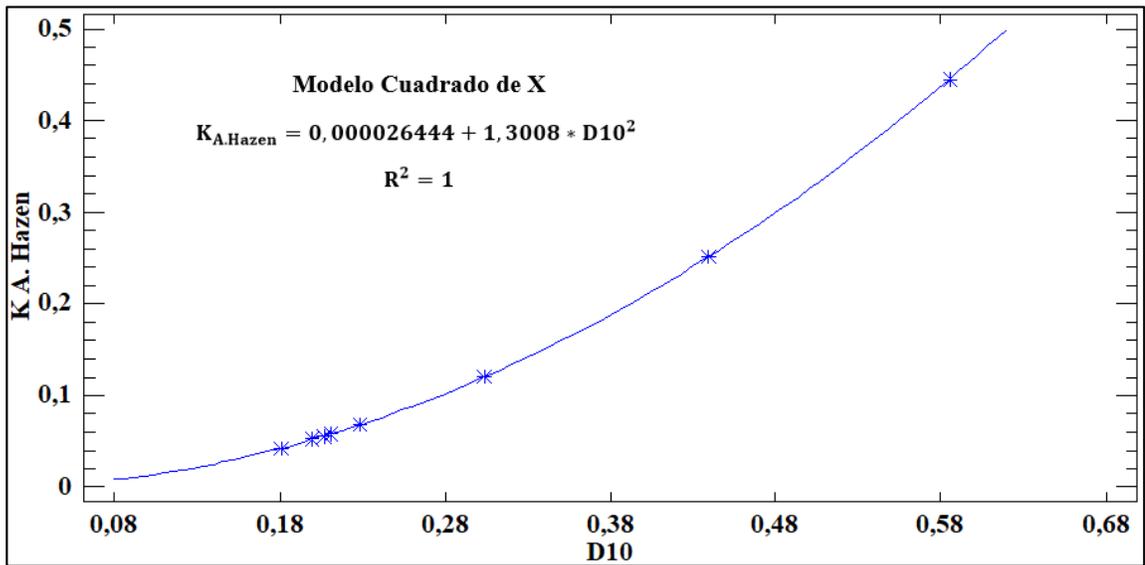
Tabla 4.25 Valores de K (Allen Hazen) suelos GP

SUCS	Punto	D10 (mm)	K Allen Hazen (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GP	V-15	0,585	0,4451	0,0286
	T-4	0,439	0,2508	0,0128
	T-6	0,207	0,0559	0,0047
	T-9	0,211	0,0577	0,0055
	T-12	0,200	0,0519	0,0169
	T-13	0,181	0,0425	0,0068
	T-17	0,229	0,0684	0,0126
	T-18	0,304	0,1205	0,0174
	Media \bar{x}	0,295	0,1366	0,0132
	Desviación estándar σ	0,145	0,1424	0,0079

Fuente: Elaboración propia

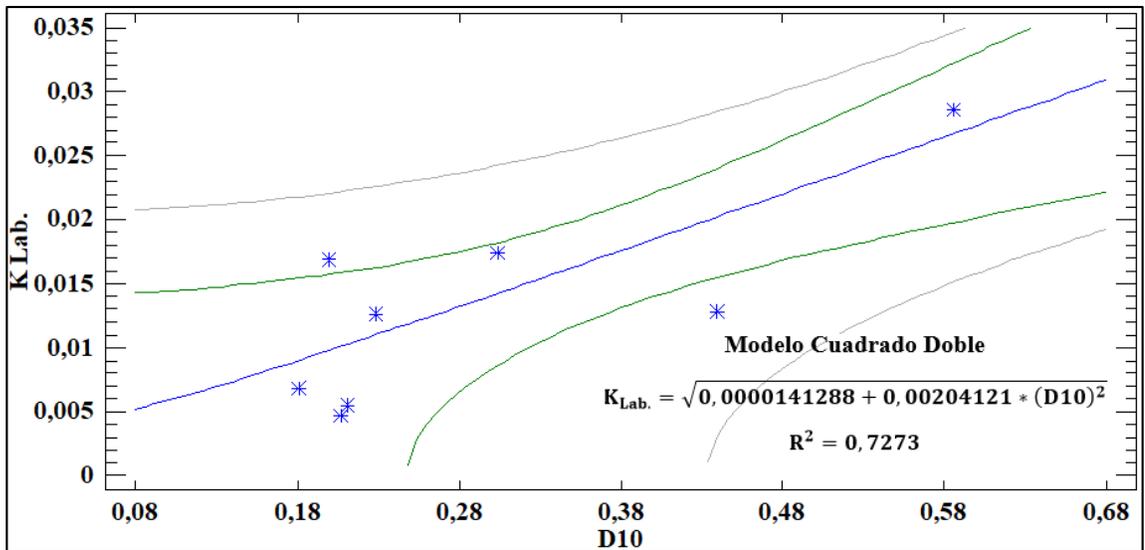
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.34 K Allen Hazen vs D10 suelos GP



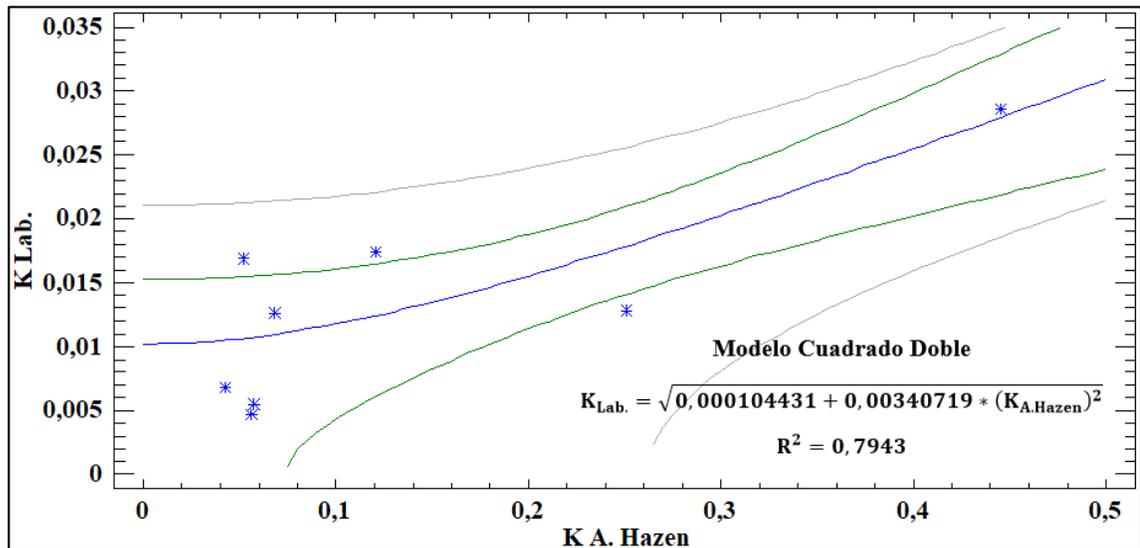
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.35 K Laboratorio vs D10 suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.36 K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.26 Grado de relación entre variables suelos GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{A. Hazen} vs D10	Cuadrado de X	1	100%	Perfecta
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado Doble	0,8528	72,73%	Significativa
K _{Lab.} vs K _{A. Hazen}	Cuadrado Doble	0,8913	79,43%	Significativa

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.5.2. Ecuación de Schlichter

En la tabla 4.27 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Schlichter para los puntos que corresponden a una clasificación GP, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Schlichter.

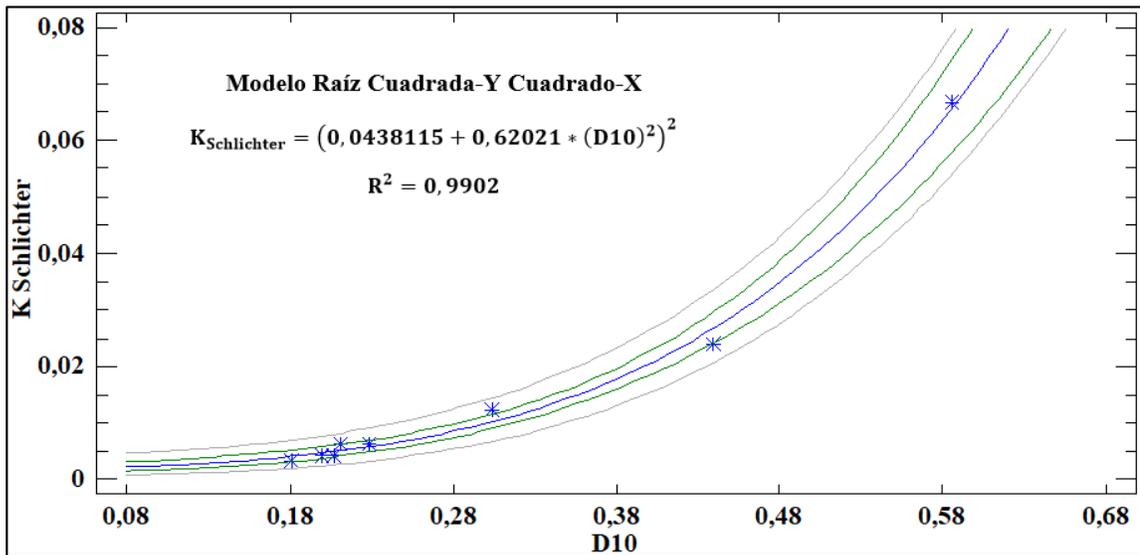
Tabla 4.27 Valores de K (Schlichter) suelos GP

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Schlichter (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GP	V-15	0,585	0,326	0,0667	0,0286
	T-4	0,439	0,267	0,0240	0,0128
	T-6	0,207	0,229	0,0043	0,0047
	T-9	0,211	0,288	0,0063	0,0055
	T-12	0,200	0,245	0,0043	0,0169
	T-13	0,181	0,229	0,0033	0,0068
	T-17	0,229	0,260	0,0063	0,0126
	T-18	0,304	0,278	0,0123	0,0174
Media \bar{x}		0,295	0,265	0,0159	0,0132
Desviación estándar σ		0,145	0,033	0,0216	0,0079

Fuente: Elaboración propia

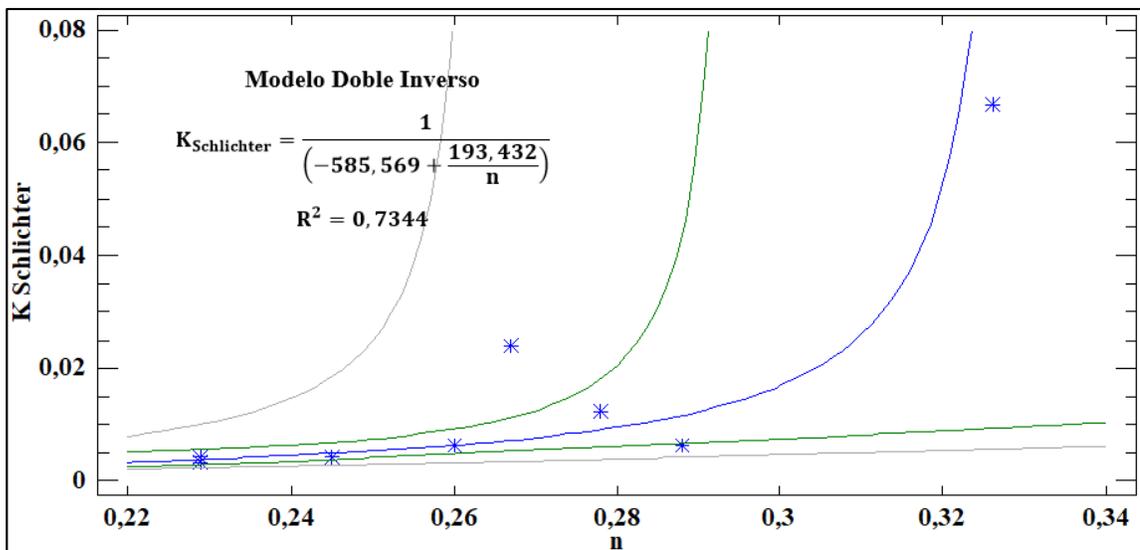
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.37 K Schlichter vs D10 suelos GP



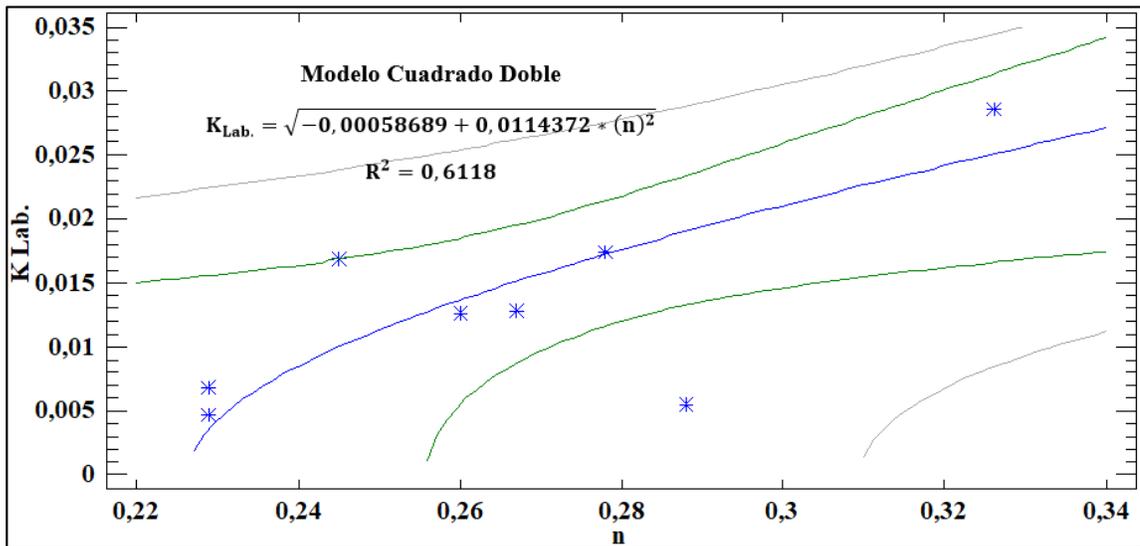
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.38 Schlichter vs n suelos GP



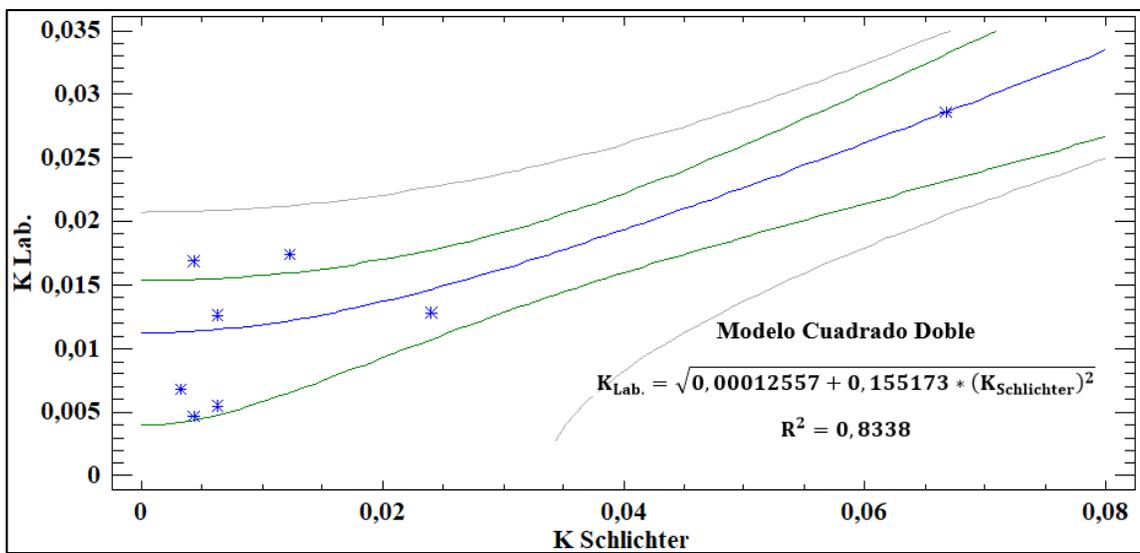
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.39 K Laboratorio vs n suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.40 K Laboratorio vs K Schlichter suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.28 Grado de relación entre variables suelos GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
$K_{Schlichter}$ vs D10	Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9951	99,02%	Perfecta
$K_{Schlichter}$ vs n	Doble Inverso	0,8570	73,44%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs D10	Cuadrado Doble	0,8528	72,73%	Fuerte
$K_{Lab.}$ vs n	Cuadrado Doble	0,7822	61,18%	Moderada
$K_{Lab.}$ vs $K_{Schlichter}$	Cuadrado Doble	0,9131	83,38%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.5.3. Ecuación de Terzaghi

En la tabla 4.29 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad mediante la ecuación de Terzaghi para los puntos que corresponden a una clasificación GP, también nos muestra las variables (D10 y n) que interviene en la ecuación de Terzaghi.

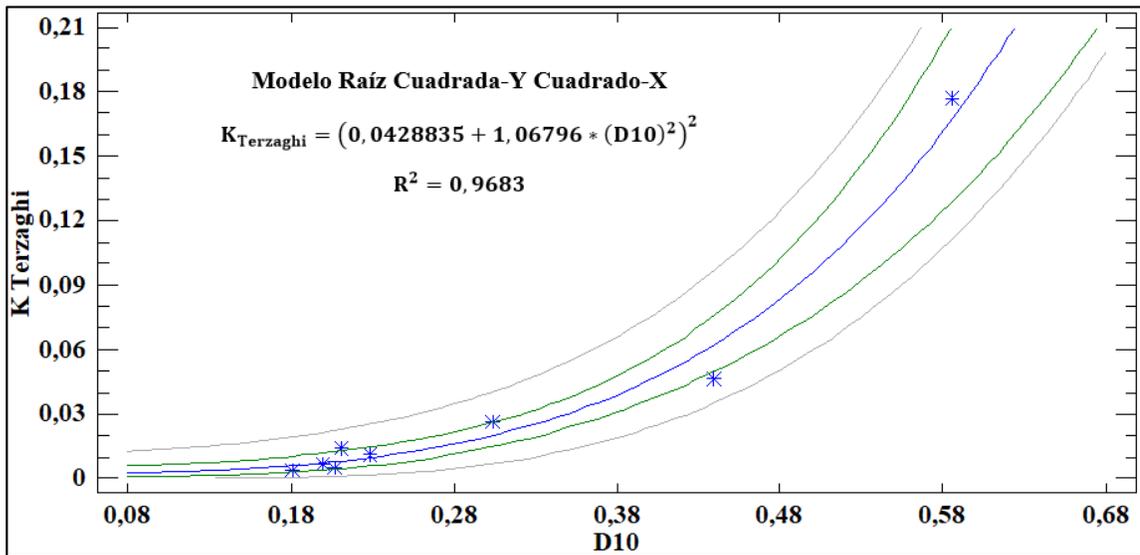
Tabla 4.29 Valores de K (Terzaghi) suelos GP

SUCS	Punto	D10 (mm)	Porosidad n	K Terzaghi (cm/seg)	K Laboratorio (cm/seg)
GP	V-15	0,585	0,326	0,1770	0,0286
	T-4	0,439	0,267	0,0464	0,0128
	T-6	0,207	0,229	0,0052	0,0047
	T-9	0,211	0,288	0,0144	0,0055
	T-12	0,200	0,245	0,0066	0,0169
	T-13	0,181	0,229	0,0039	0,0068
	T-17	0,229	0,260	0,0113	0,0126
	T-18	0,304	0,278	0,0262	0,0174
Media \bar{x}		0,295	0,265	0,0364	0,0132
Desviación estándar σ		0,145	0,033	0,0586	0,0079

Fuente: Elaboración propia

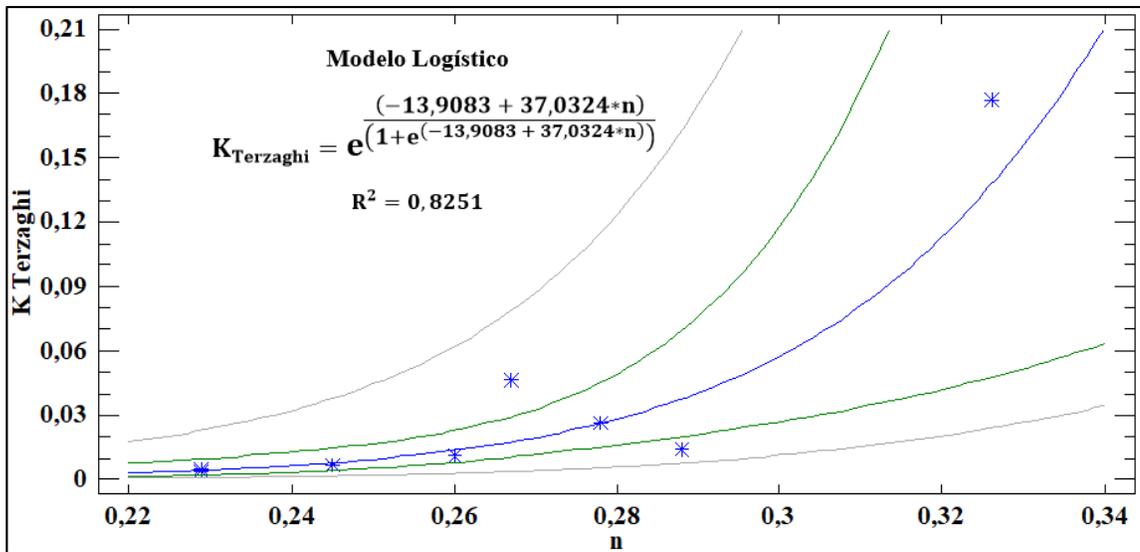
Por medio del Software Statgraphics se encontró el mejor modelo de ajuste para relacionar las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Figura 4.41 K Terzaghi vs D10 suelos GP



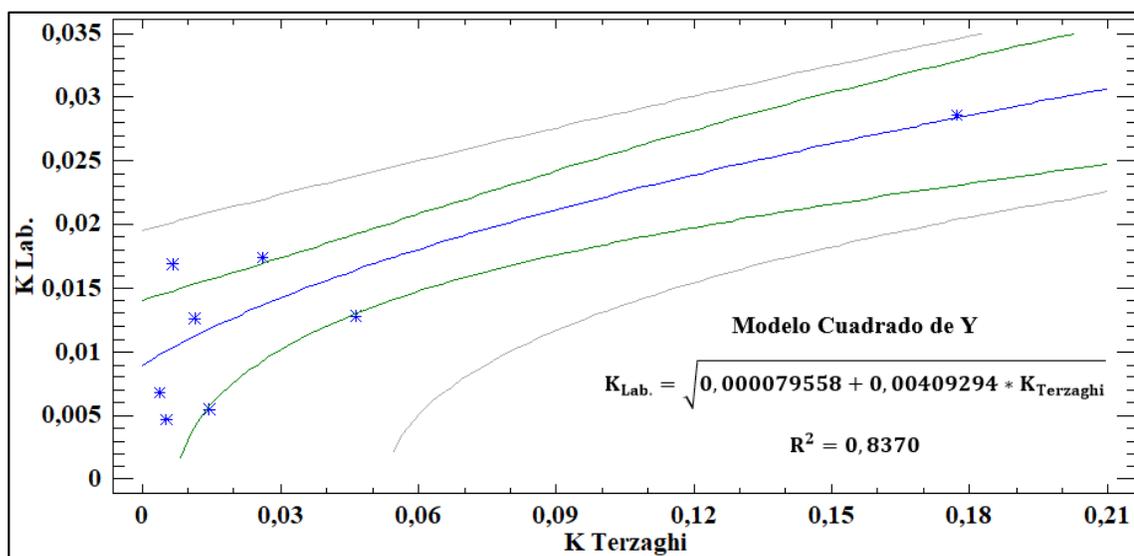
Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.42 K Terzaghi vs n suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Figura 4.43 K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GP



Fuente: Software Statgraphics

Grado de relación entre variables

Tabla 4.30 Grado de relación entre variables suelos GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. de correlación	R2	Relación de variables
K _{Terzaghi} vs D10	Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X	0,9840	96,83%	Perfecta
K _{Terzaghi} vs n	Logístico	0,9083	82,51%	Fuerte
K _{Lab.} vs D10	Cuadrado Doble	0,8528	72,73%	Fuerte
K _{Lab.} vs n	Cuadrado Doble	0,7822	61,18%	Significativa
K _{Lab.} vs K _{Terzaghi}	Cuadrado de Y	0,9149	83,70%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

4.5.4. Porcentajes Variación de K en suelos GP

En la tabla 4.31 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad en laboratorio y mediante las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para los puntos que corresponden a una clasificación **GP**, indicándonos el porcentaje de variación que existe en los coeficientes de permeabilidad obtenidos mediante las ecuaciones empíricas con respecto al coeficiente obtenido en laboratorio.

Tabla 4.31 Porcentajes de variación de K de suelos GP

Punto	K_{Lab.} (cm/s)	K_{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K_{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K_{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-15	0,0286	0,4452	1458,67	0,0667	133,66	0,1770	519,78
T-4	0,0128	0,2508	1851,84	0,0243	88,90	0,0479	273,14
T-6	0,0047	0,0559	1087,41	0,0043	-8,44	0,0052	10,11
T-9	0,0055	0,0577	941,97	0,0063	13,98	0,0144	159,36
T-12	0,0169	0,0519	206,95	0,0043	-74,28	0,0066	-61,08
T-13	0,0068	0,0425	525,20	0,0033	-51,84	0,0039	-42,27
T-17	0,0126	0,0684	444,81	0,0063	-50,13	0,0113	-9,75
T-18	0,0174	0,1205	594,20	0,0123	-28,90	0,0262	51,11

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la tabla 4.32 se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **GP**.

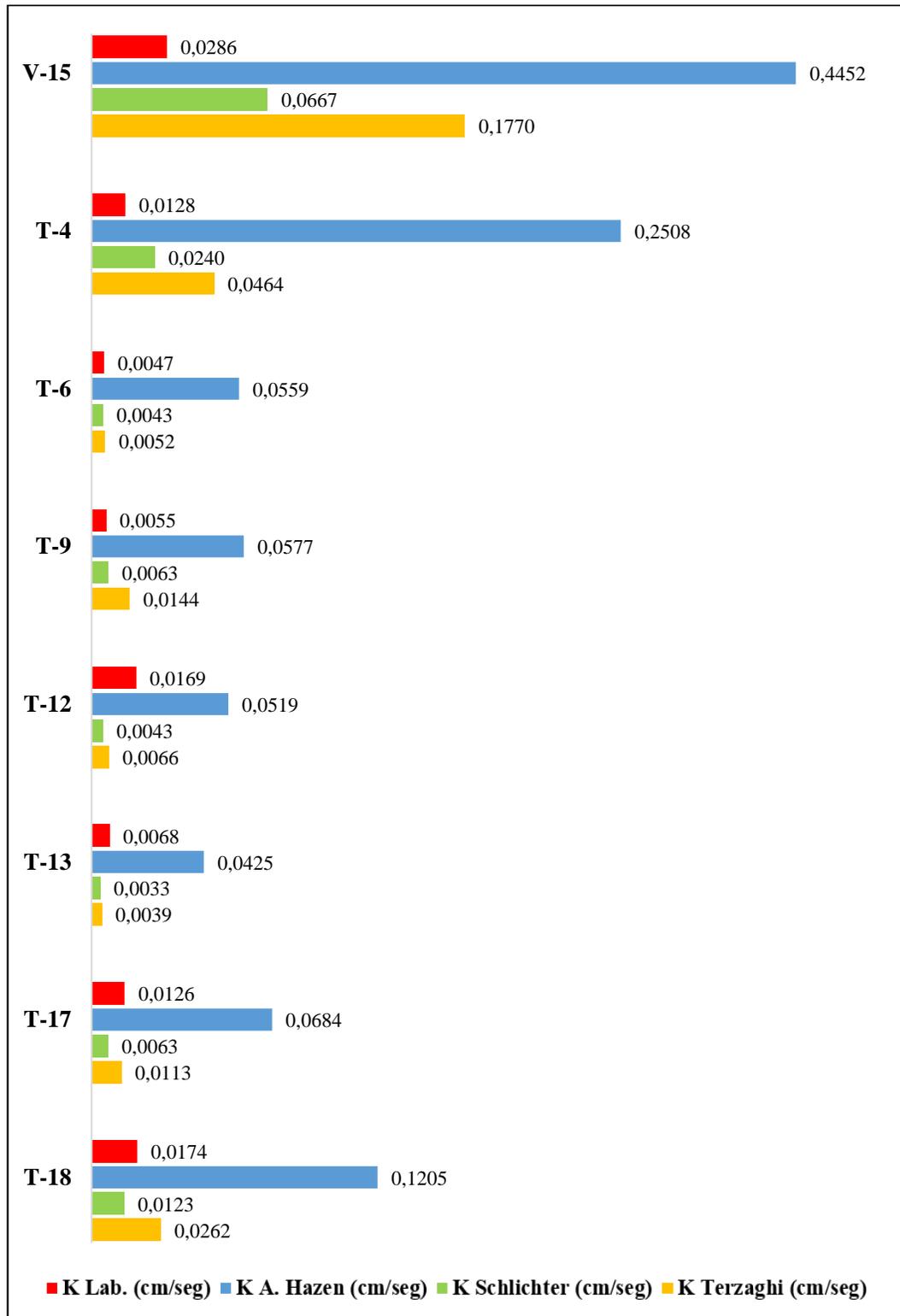
Tabla 4.32 Porcentaje de variación promedio de suelos GP

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	888,88
Schlichter	56,26
Terzaghi	140,83

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura 4.44 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **GP**.

Figura 4.44 Tabla de comparaciones de K en suelos GP



Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis de resultados

Se pudo comprobar que dos de los principales factores que influyen en la permeabilidad es el diámetro efectivo (D10) y la porosidad (n), ya que estas variables obtuvieron un buen grado de relación con el coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio.

El porcentaje de variación se utiliza para describir la relación entre el coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio y el obtenido a partir de ecuaciones empíricas.

Existe mayor variación del coeficiente de permeabilidad obtenido a partir de la ecuación empírica de Allen Hazen, ya que proporcionó valores mucho mayores en comparación al obtenido en laboratorio. Esto se pudo apreciar en todos los tipos de suelos contemplados en esta investigación.

Podemos decir que el uso de la ecuación empírica de Allen Hazen es limitado, debido a que solo toma en cuenta un solo factor como es el diámetro efectivo (D10), en relación a las ecuaciones empíricas de Schlichter y Terzaghi, que estas toman en cuenta otro factor como es la porosidad.

Tabla 4.33 Porcentajes de variación promedio según el tipo de suelo

Tipo de suelo	Porcentaje de variación promedio		
	Allen Hazen	Schlichter	Terzaghi
SW	747,92 %	35,09 %	72,69 %
SP	716,55 %	51,60 %	129,86 %
GW	1203,02 %	23,65 %	87,21 %
GP	888,88 %	56,26 %	140,83 %

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.33 se puede apreciar que la ecuación empírica de Schlichter obtuvo menores porcentajes de variación en relación a los obtenidos a partir de las ecuaciones Allen Hazen y Terzaghi. Por lo tanto, podemos decir que la ecuación de Schlichter fue la que mejor se ajustó para el uso en nuestros suelos.

4.7. Ajuste de las ecuaciones Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi

Se planteó un ajuste de las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para disminuir el porcentaje de variación.

Para el ajuste de disminución del porcentaje de variación se realizó lo siguiente:

- Conociendo el coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio, diámetro efectivo (D_{10}) y porosidad (n), se hallaron nuevas constantes para cada una de las ecuaciones empíricas, tanto para la de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi.

Ecuación de Allen Hazen

$$K = C_0(0,7 + 0,03 t) * D_{10}^2$$

Constante de Allen Hazen

Ecuación de Schlichter

$$K = 771 \frac{D_{10}^2}{C} (0,7 + 0,03 t)$$

Constante de Schlichter

Ecuación de Terzaghi

$$K = C_1 D_{10}^2 (0,7 + 0,03 t)$$

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$$

Constante de Terzaghi

- Se buscó una correlación de las nuevas constantes obtenidas con factores granulométricos, con la ayuda del programa Statgraphics se buscó el mejor modelo (ecuación) a cuál se ajuste nuestras regresiones
- Por último, se calculó el porcentaje de variación utilizando las ecuaciones ajustadas para observa cuanto reduce el porcentaje de variación.

4.7.1. Nuevas constantes de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi

Las siguientes tablas 4.34 4.35 4.36 y 4.37 muestran las diferentes constantes obtenidas para las ecuaciones de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi para cada tipo de suelo.

Tabla 4.34 Constantes para suelos SW

Punto	C_{A.HAZEN}	C_{SCHLI}	C_{OTERZ}
V-4	24,03	32,09	954,15
V-7	28,84	26,74	1327,17
V-9	10,85	71,07	378,69
V-16	15,39	50,09	581,45
E-2	8,99	85,78	551,12
E-3	6,62	116,52	465,10
E-6	8,37	92,16	190,08
E-11	16,85	45,77	1007,92
E-13	12,16	63,38	645,22
E-15	10,99	70,14	573,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.35 Constantes para suelos GP

Punto	C_{A.HAZEN}	C_{SCHLI}	C_{OTERZ}
V-15	6,42	120,17	129,08
T-4	5,12	150,49	214,39
T-6	8,42	91,55	726,53
T-9	9,60	80,34	308,45
T-12	32,58	23,67	2055,33
T-13	15,99	48,20	1385,65
T-17	18,35	42,01	886,47
T-18	14,40	53,52	529,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.36 Constantes para suelos SP

Punto	C_{A.HAZEN}	C_{SCHLI}	C_{OTERZ}
V-1	27,45	28,08	1039,27
V-2	29,10	26,50	912,59
V-3	14,55	53,00	524,05
V-5	7,51	102,63	227,48
V-6	25,56	30,16	1900,78
V-8	9,89	77,95	220,25
V-10	6,14	125,52	112,21
V-11	22,72	33,93	712,03
V-13	10,66	72,31	308,81
V-14	7,58	101,69	167,49
T-1	28,81	26,76	1303,68
T-3	21,20	36,37	1501,34
T-7	28,29	27,26	773,60
T-8	21,09	36,55	1181,85
T-10	9,65	79,89	208,17
T-11	22,84	33,76	1473,39
T-15	19,28	39,98	1011,74
T-16	21,80	35,37	1235,18
E-4	7,88	97,85	528,72
E-5	11,08	69,59	404,38
E-7	9,71	79,44	708,26
E-8	5,69	135,46	272,87
E-10	11,79	65,42	279,80
E-16	8,08	95,47	231,58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.37 Constantes para suelos GW

Punto	C_{A.HAZEN}	C_{SCHLI}	C_{OTERZ}
V-12	9,58	80,51	189,94
T-14	1,98	389,86	210,39
E-1	6,11	126,26	458,31
E-9	6,04	127,72	729,59
E-12	11,93	64,60	577,13
E-14	8,16	94,51	462,99

Fuente: Elaboración propia

4.8. Correlación de contantes para cada tipo de suelo

Se realizaron correlaciones para cada una de las nuevas constantes obtenidas con factores granulométricos en cada tipo de suelo para así saber el grado de asociación que tienen.

Las mismas correlaciones nos sirve para encontrar una ecuación de ajuste para cada constante.

La relación entre variables se mide mediante el coeficiente de correlación. Estos números varían entre límites de +1 y -1.

Tabla 4.38 Relación de variables según el coeficiente de correlación

+ 0,96	+ 1,00	Perfecta
+ 0,85	+ 0,95	Fuerte
+ 0,70	+ 0,84	Significativa
+ 0,50	+ 0,69	Moderada
+ 0,20	+ 0,49	Débil
+ 0,10	+ 0,19	Muy débil
0	0	Nula
- 0,10	- 0,19	Muy débil
- 0,20	- 0,49	Débil
- 0,50	- 0,69	Moderada
- 0,70	- 0,84	Significativa
- 0,85	- 0,95	Fuerte
- 0,96	- 1,00	Perfecta

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de correlación actúa como indicativo si existe relación entre dos variables. Esto nos facilita entender si las variables están relacionadas o no.

Cuando el coeficiente de correlación es mayor a cero ($r > 0$), se dice que hay correlación positiva. Las variables se correlacionan en un sentido directo.

Si el coeficiente de correlación es igual a 1 o -1 se habla de una correlación perfecta, existe una relación perfecta entre ambas variables.

Cuando el coeficiente de correlación es menor a cero ($r < 0$), se dice que hay correlación negativa. Las variables se correlacionan en un sentido inverso.

4.8.1. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo SW

Tabla 4.39 Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo SW

VARIABLES	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CA. Hazen vs D10	Raíz Cuad.-Y Cuad.-X	-0,2757	7,60%	Débil
CA. Hazen vs D30	Cuadrado-Y Inversa de X	0,7292	53,17%	Moderada
CA. Hazen vs D60	Cuadrado-Y Inversa de X	0,8939	79,90%	Fuerte
CA. Hazen vs Cu	Inversa-Y Cuadrado-X	0,4931	24,31%	Débil
CA. Hazen vs Cc	Log-Y Cuadrado-X	-0,4789	22,93%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°4	Cuadrado Doble	0,8691	75,53%	Fuerte
CA. Hazen vs %pasa N°10	Cuadrado Doble	0,9259	85,73%	Fuerte
CA. Hazen vs %pasa N°40	Inversa-Y Cuadrado-X	0,2368	5,61%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°200	Cuadrado Doble	0,5138	26,39%	Moderada
CA. Hazen vs Peso esp.	Cuadrado-Y Inversa de X	0,5762	33,20%	Moderada
CA. Hazen vs e	Doble Inverso	0,1288	1,66%	Muy débil
CA. Hazen vs n	Doble Inverso	0,1285	1,65%	Muy débil

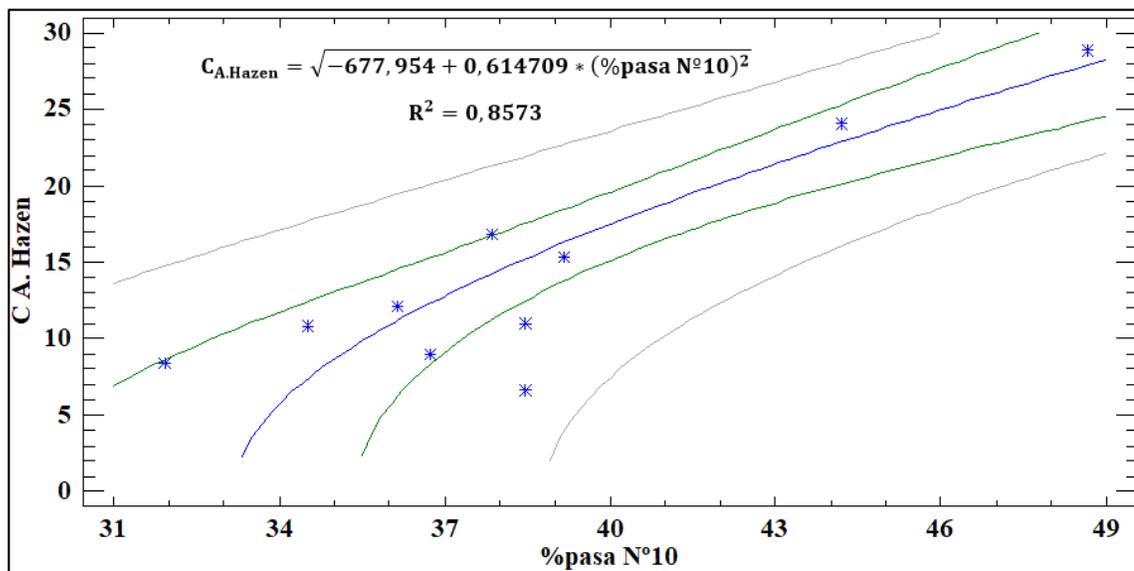
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.39 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Allen Hazen para los suelos **SW** es con el porcentaje que pasa el tamiz N°10, siendo el mejor modelo de ajuste “Cuadrado Doble” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 75,25% de la variabilidad en la constante de Allen Hazen. El coeficiente de correlación es igual 0,9259, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.45 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Cuadrado doble” para describir la relación entre la constante de Allen Hazen y el porcentaje que pasa el tamiz N°10 para los suelos **SW**.

Figura 4.45 Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs %pasa N°10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{A.Hazen} = \sqrt{-677,954 + 0,614709 * (\%pasa\ N^{\circ}10)^2}$$

4.8.2. Correlación de la constante de Schlichter para suelo SW

Tabla 4.40 Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo SW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CSch vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,2753	7,58%	Débil
CSch vs D30	Doble Inverso	0,6934	48,09%	Moderada
CSch vs D60	Doble Inverso	0,8716	75,97%	Fuerte
CSch vs Cu	Cuadrado Doble	0,4995	24,95%	Débil
CSch vs Cc	Log-Y Cuadrado-X	0,4788	22,92%	Débil
CSch vs %pasa N°4	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8642	74,69%	Fuerte
CSch vs %pasa N°10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9486	89,98%	Fuerte
CSch vs %pasa N°40	Cuadrado Doble	0,3051	9,31%	Débil
CSch vs %pasa N°200	Inversa-Y Cuadrado-X	0,4125	17,02%	Débil
CSch vs Peso esp.	Doble Inverso	0,5361	28,74%	Moderada
CSch vs e	Cuadrado-Y Inversa de X	0,1756	3,08%	Muy débil
CSch vs n	Cuadrado-Y Inversa de X	0,1754	3,08%	Muy débil

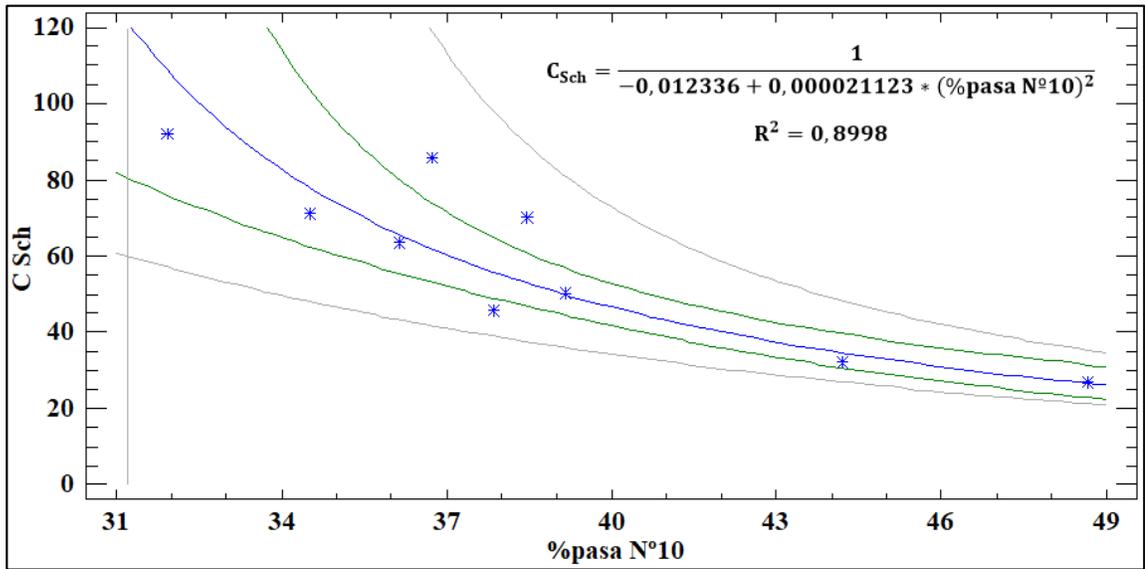
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.40 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Schlichter para los suelos **SW** es con el porcentaje que pasa el tamiz N°10, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 89,98% de la variabilidad en la constante de Schlichter. El coeficiente de correlación es igual 0,9486, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.46 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Schlichter y el porcentaje que pasa el tamiz N°10 para los suelos **SW**.

Figura 4.46 Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs %pasa N°10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{Sch} = \frac{1}{-0,012336 + 0,000021123 * (%pasa N^{\circ}10)^2}$$

4.8.3. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo SW

Tabla 4.41 Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo SW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
Co vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9060	82,08%	Fuerte
Co vs D30	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9223	85,07%	Fuerte
Co vs D60	Cuadrado-Y Inversa de X	0,6965	48,52%	Significativa
Co vs Cu	Doble Inverso	0,5349	28,61%	Moderada
Co vs Cc	Cuadrado Doble	-0,4193	17,58%	Débil
Co vs %pasa N°4	Cuadrado Doble	0,6647	44,18%	Moderada
Co vs %pasa N°10	Raíz Cuad-Y Inversa de X	-0,8805	77,52%	Fuerte
Co vs %pasa N°40	Doble Inverso	0,8102	65,63%	Significativa
Co vs %pasa N°200	Doble Inverso	0,7866	61,88%	Significativa
Co vs Peso esp.	Cuadrado-Y Inversa de X	0,6365	40,52%	Moderada
Co vs e	Inversa-Y Cuadrado-X	0,7862	61,81%	Significativa
Co vs n	Inversa-Y Cuadrado-X	0,7589	57,59%	Significativa

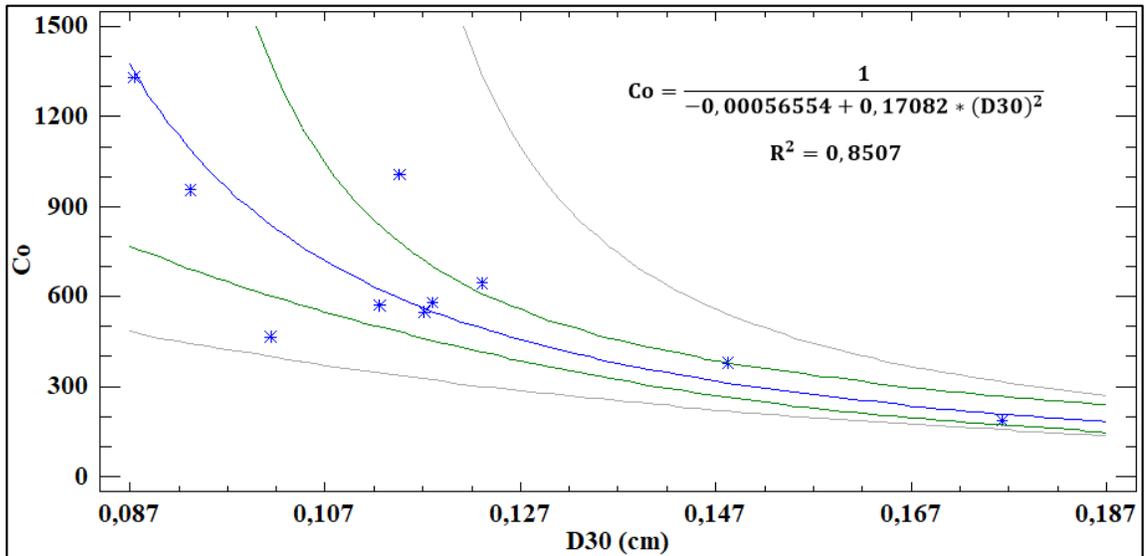
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.41 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Terzaghi para los suelos **SW** es con el D30, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 85,07% de la variabilidad en la constante de Terzaghi. El coeficiente de correlación es igual 0,9223, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.47 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Terzaghi y el D30 para los suelos **SW**.

Figura 4.47 Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D30



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_o = \frac{1}{-0,00056554 + 0,17082 * (D_{30})^2}$$

4.8.4. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo SP

Tabla 4.42 Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo SP

Variabes	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R ²	Relación de variables
CA. Hazen vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8201	67,25%	Significativa
CA. Hazen vs D30	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9055	82,00%	Fuerte
CA. Hazen vs D60	Cuadrado-Y Inversa de X	0,1759	3,09%	Muy débil
CA. Hazen vs Cu	Doble Inverso	0,528	27,88%	Moderada
CA. Hazen vs Cc	Cuadrado-Y Inversa de X	0,3553	12,62%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°4	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,2681	7,19%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°10	Doble Inverso	0,8488	72,05%	Fuerte
CA. Hazen vs %pasa N°40	Doble Inverso	0,6293	39,60%	Moderada
CA. Hazen vs %pasa N°200	Multiplicativa	0,4125	17,02%	Débil
CA. Hazen vs Peso esp.	Raíz Cuad-X Cuadrado-X	-0,1991	3,96%	Débil
CA. Hazen vs e	Log-Y Cuadrado-X	-0,4194	17,59%	Débil
CA. Hazen vs n	Log-Y Cuadrado-X	-0,4049	16,40%	Débil

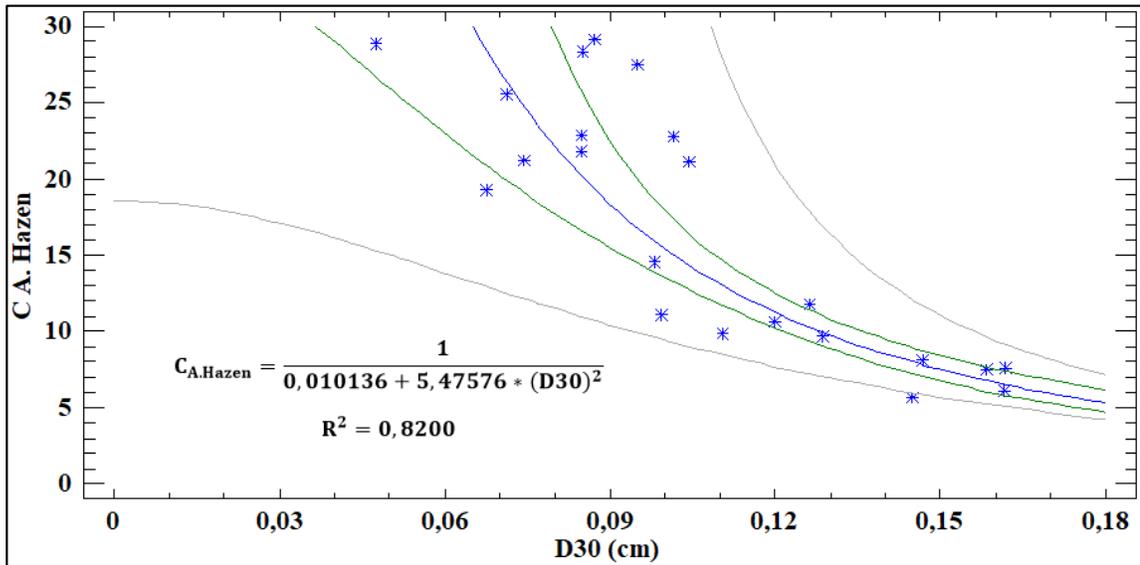
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.42 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Allen Hazen para los suelos **SP** es con el D30, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 82,00% de la variabilidad en la constante de Allen Hazen. El coeficiente de correlación es igual 0,9055, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.48 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Allen Hazen y el D30 para los suelos **SP**.

Figura 4.48 Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs D30



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{A.Hazen} = \frac{1}{0,010136 + 5,47576 * (D30)^2}$$

4.8.5. Correlación de la constante de Schlichter para suelo SP

Tabla 4.43 Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo SP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CSch vs D10	Cuadrado de X	0,8199	67,23%	Significativa
CSch vs D30	Cuadrado de X	0,9056	82,00%	Fuerte
CSch vs D60	Doble Inverso	0,1673	2,80%	Muy débil
CSch vs Cu	Inversa de X	0,5279	27,87%	Moderada
CSch vs Cc	Doble Inverso	0,3452	11,91%	Débil
CSch vs %pasa N°4	Raíz Cuad-X Cuad-X	-0,2683	7,20%	Débil
CSch vs %pasa N°10	Inversa de X	0,8488	72,04%	Fuerte
CSch vs %pasa N°40	Cuadrado-Y Inversa de X	0,6536	42,72%	Moderada
CSch vs %pasa N°200	Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0,4147	17,20%	Débil
CSch vs Peso esp.	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,1975	3,90%	Débil
CSch vs e	Raíz Cuad-X Cuad-X	0,4214	17,76%	Débil
CSch vs n	Raíz Cuad-X Cuad-X	0,4065	16,52%	Débil

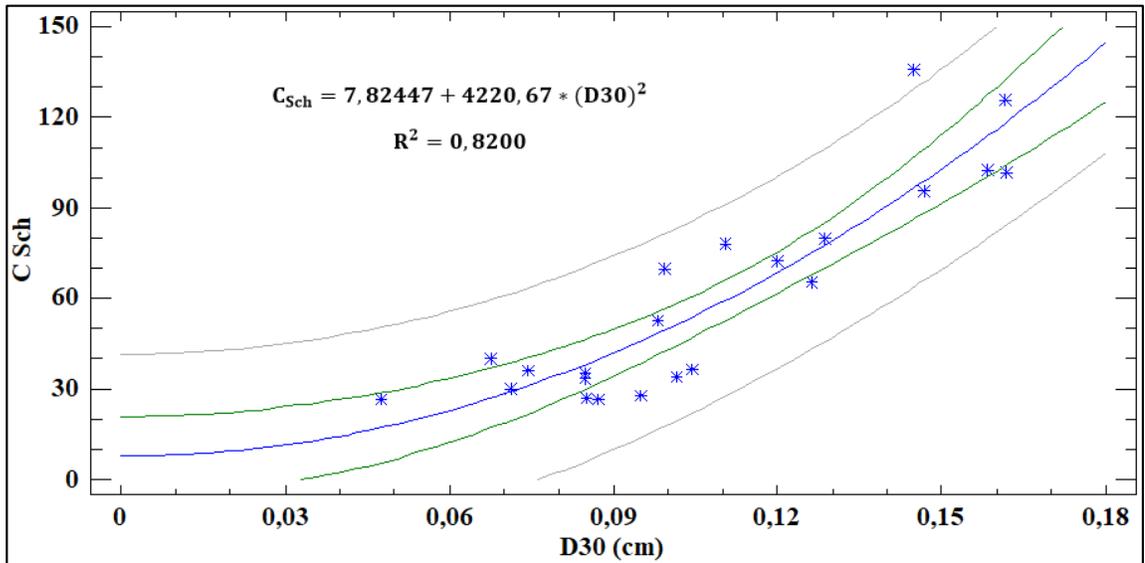
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.43 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Schlichter para los suelos **SP** es con el D30, siendo el mejor modelo de ajuste “Cuadrado de X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 82,00% de la variabilidad en la constante de Schlichter. El coeficiente de correlación es igual 0,9056, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.49 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Cuadrado de X” para describir la relación entre la constante de Schlichter y el D30 para los suelos **SP**.

Figura 4.49 Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs D30



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{Sch} = 7,82447 + 4220,67 * (D_{30})^2$$

4.8.6. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo SP

Tabla 4.44 Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo SP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
Co vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9630	92,73%	Perfecta
Co vs D30	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8805	77,53%	Fuerte
Co vs D60	Doble Inverso	-0,1532	2,35%	Muy débil
Co vs Cu	Doble Inverso	0,7400	54,76%	Significativa
Co vs Cc	Inversa de X	0,3060	9,37%	Débil
Co vs %pasa N°4	Doble Inverso	0,2633	6,93%	Débil
Co vs %pasa N°10	Log-Y Cuadrado-X	0,8820	77,79%	Fuerte
Co vs %pasa N°40	Inversa-Y Log-X	-0,9118	83,13%	Fuerte
Co vs %pasa N°200	Log-Y Raíz Cuadrada-X	0,6586	43,37%	Moderada
Co vs Peso esp.	Cuadrado de X	-0,3222	10,38%	Débil
Co vs e	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8196	67,17%	Significativa
Co vs n	Log-Y Cuadrado-X	-0,8024	64,39%	Significativa

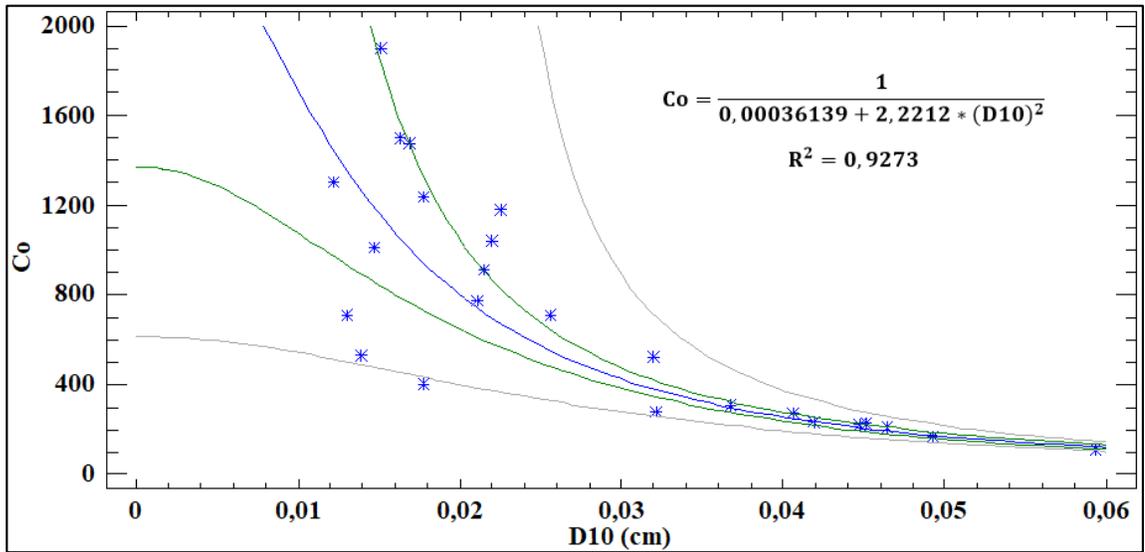
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.44 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Terzaghi para los suelos **SP** es con el D10, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 92,73% de la variabilidad en la constante de Terzaghi. El coeficiente de correlación es igual 0,9630, indicando una relación “Perfecta” entre las variables.

La siguiente figura 4.50 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Terzaghi y el D10 para los suelos **SP**.

Figura 4.50 Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_o = \frac{1}{0,00036139 + 0,022212 * (D_{10})^2}$$

4.8.7. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo GW

Tabla 4.45 Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo GW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CA. Hazen vs D10	Doble Inverso	0,586	34,33%	Moderada
CA. Hazen vs D30	Cuadrado Doble	0,3627	13,15%	Débil
CA. Hazen vs D60	Inversa-Y Cuadrado-X	0,1718	2,95%	Muy débil
CA. Hazen vs Cu	Inversa-Y Cuadrado-X	0,5116	26,17%	Moderada
CA. Hazen vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	0,4662	21,74%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°4	Doble Inverso	0,3231	10,44%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°10	Cuad-Y Inversa de X	0,3332	11,10%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°40	Inversa-Y Cuadrado-X	0,4969	24,69%	Moderada
CA. Hazen vs %pasa N°200	Log-Y Cuadrado-X	-0,8803	77,49%	Fuerte
CA. Hazen vs Peso esp.	Doble Inverso	0,3166	10,02%	Débil
CA. Hazen vs e	Doble Inverso	0,7291	53,16%	Significativa
CA. Hazen vs n	Doble Inverso	0,7295	53,22%	Significativa

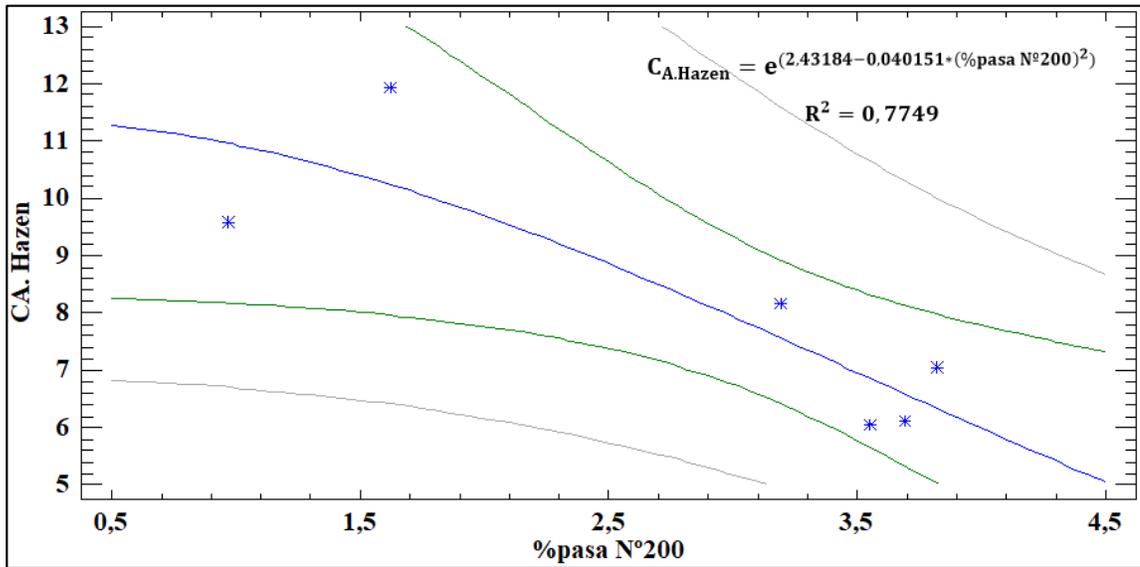
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.45 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Allen Hazen para los suelos **GW** es con el porcentaje que pasa el tamiz N°200, siendo el mejor modelo de ajuste “Log-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 77,49% de la variabilidad en la constante de Allen Hazen. El coeficiente de correlación es igual -0.8803, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.51 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Log-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Allen Hazen y el porcentaje que pasa el tamiz N°200 para los suelos **GW**.

Figura 4.51 Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs %pasa N°200



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{A.Hazen} = e^{(2,43184-0,040151*(\%pasa N^{\circ}200)^2)}$$

4.8.8. Correlación de la constante de Schlichter para suelo GW

Tabla 4.46 Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo GW

VARIABLES	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R ²	Relación de variables
CSch vs D10	Cuadrado-Y Inversa de X	0,5985	35,82%	Moderada
CSch vs D30	Inversa-Y Cuadrado-X	0,316	9,99%	Débil
CSch vs D60	Cuadrado Doble	0,2099	4,40%	Débil
CSch vs Cu	Cuadrado Doble	0,5323	28,33%	Moderada
CSch vs Cc	Cuadrado Doble	0,5416	29,33%	Moderada
CSch vs %pasa N°4	Cuadrado Doble	-0,3796	14,41%	Débil
CSch vs %pasa N°10	Doble Inverso	0,2876	8,27%	Débil
CSch vs %pasa N°40	Cuadrado Doble	0,5179	26,82%	Moderada
CSch vs %pasa N°200	Log-Y Cuadrado-X	0,8797	77,40%	Fuerte
CSch vs Peso esp.	Cuadrado-Y Inversa de X	0,3669	13,46%	Débil
CSch vs e	Cuadrado-Y Inversa de X	0,7395	54,68%	Significativa
CSch vs n	Cuadrado-Y Inversa de X	0,7399	54,75%	Significativa

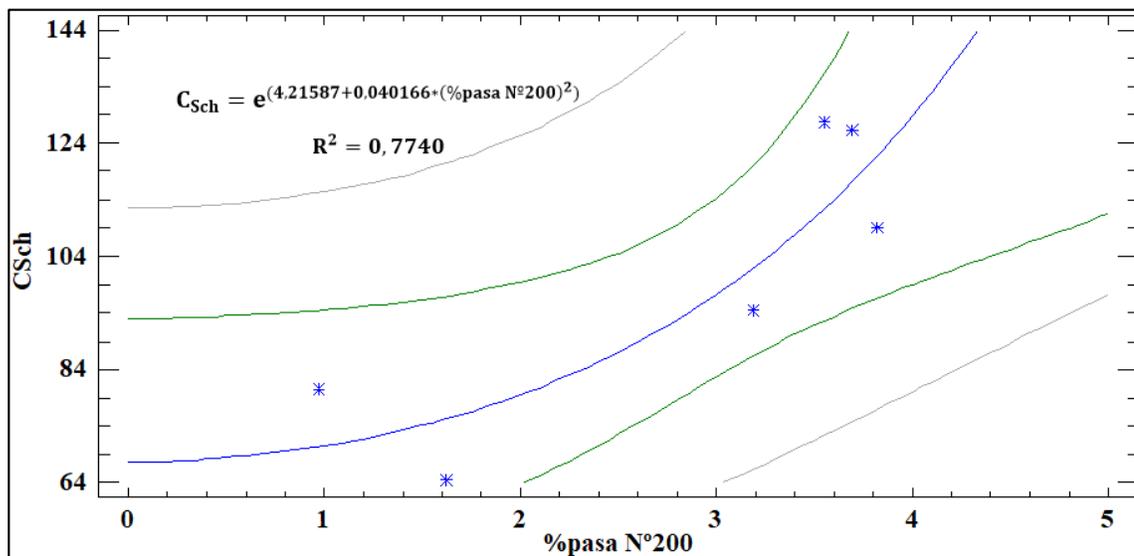
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.46 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Schlichter para los suelos **GW** es con el porcentaje que pasa el tamiz N°200, siendo el mejor modelo de ajuste “Log-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 77,40% de la variabilidad en la constante de Schlichter. El coeficiente de correlación es igual 0,8797, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.52 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Log-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Schlichter y el porcentaje que pasa el tamiz N°200 para los suelos **GW**.

Figura 4.52 Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs %pasa N°200



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{Sch} = e^{(4,21587+0,040166 \cdot (\%pasa\ N^{\circ}200)^2)}$$

4.8.9. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo GW

Tabla 4.47 Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo GW

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
Co vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9318	86,83%	Fuerte
Co vs D30	Inversa-Y Cuadrado-X	0,3727	13,89%	Débil
Co vs D60	Inversa-Y Log-X	-0,4985	24,85%	Moderada
Co vs Cu	Doble Inverso	0,8851	78,33%	Fuerte
Co vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,3695	13,66%	Débil
Co vs %pasa N°4	Inversa-Y Cuadrado-X	0,5363	28,77%	Moderada
Co vs %pasa N°10	Doble Inverso	0,3937	15,50%	Débil
Co vs %pasa N°40	Doble Inverso	0,8201	67,26%	Significativa
Co vs %pasa N°200	Doble Inverso	0,8753	76,62%	Fuerte
Co vs Peso esp.	Cuadrado-Y Inversa de X	0,5418	29,36%	Moderada
Co vs e	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9667	93,44%	Fuerte
Co vs n	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9562	91,44%	Fuerte

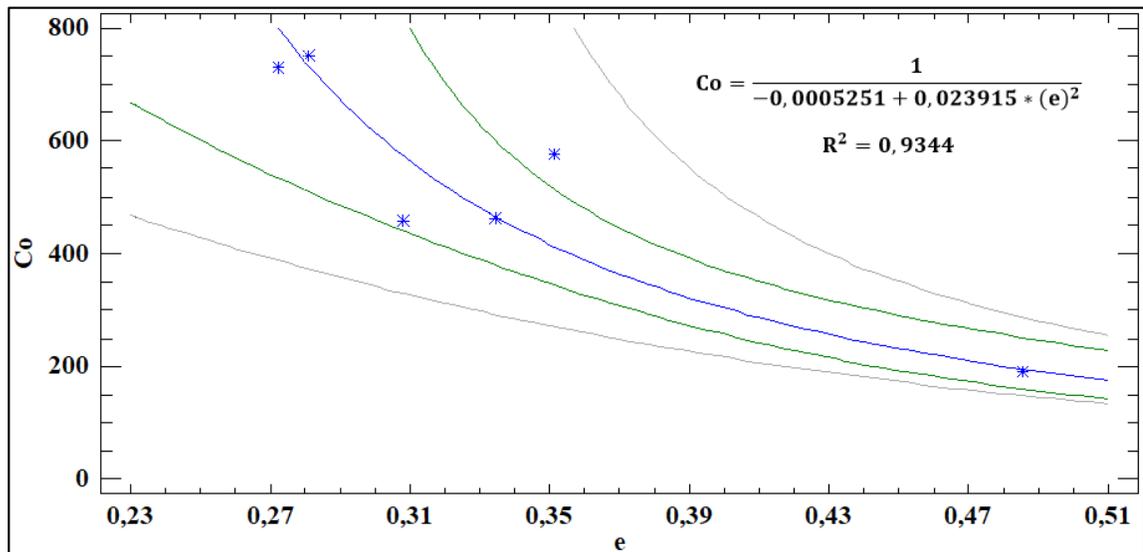
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.47 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Terzaghi para los suelos **GW** es con la relación de vacíos (e), siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 93,44% de la variabilidad en la constante de Terzaghi. El coeficiente de correlación es igual -0,9667, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.53 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Terzaghi y con la relación de vacíos (e) para los suelos **GW**.

Figura 4.53 Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs e



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_o = \frac{1}{-0,0005251 + 0,023915 * (e)^2}$$

4.8.10. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo GP

Tabla 4.48 Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CA. Hazen vs D10	Inversa-Y Log-X	0,7442	55,39%	Significativa
CA. Hazen vs D30	Inversa-Y Log-X	0,6508	42,35%	Moderada
CA. Hazen vs D60	Curva S	-0,2213	4,90%	Débil
CA. Hazen vs Cu	Inversa-Y Raíz Cuad-X	-0,6824	46,56%	Moderada
CA. Hazen vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	0,2269	5,15%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°4	Cuadrado Doble	-0,3433	11,78%	Débil
CA. Hazen vs %pasa N°10	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5979	35,75%	Moderada
CA. Hazen vs %pasa N°40	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,7394	54,67%	Significativa
CA. Hazen vs %pasa N°200	Doble Inverso	0,5395	29,11%	Moderada
CA. Hazen vs Peso esp.	Cuadrado Doble	-0,1274	1,62%	Muy débil
CA. Hazen vs e	Log-Y Cuadrado-X	-0,4788	22,92%	Débil
CA. Hazen vs n	Log-Y Cuadrado-X	-0,4714	22,22%	Débil

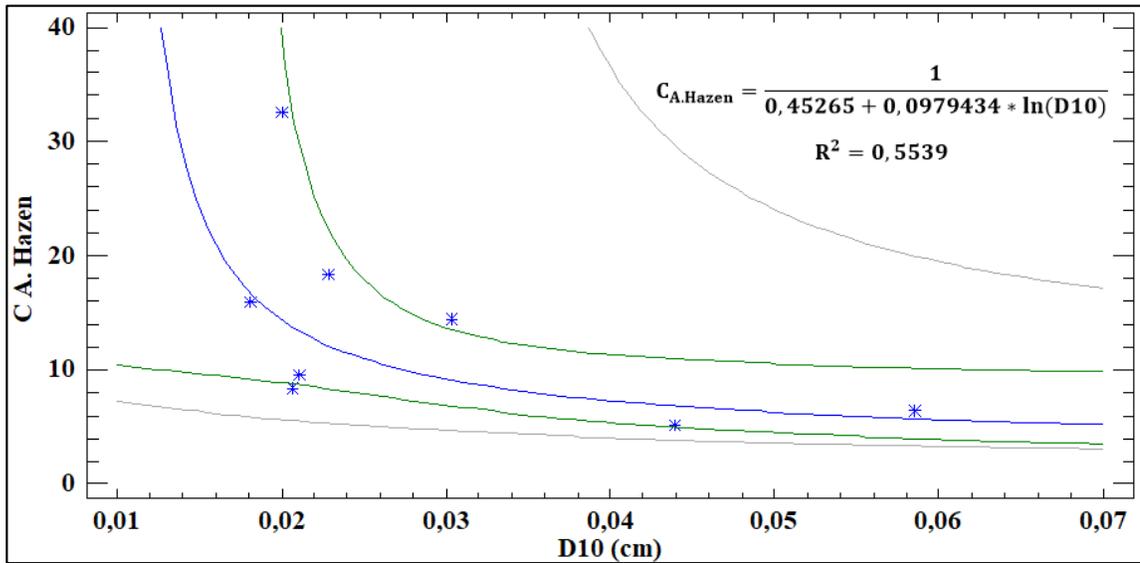
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.48 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Allen Hazen para los suelos **GP** es con el D10, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Log-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 55,39% de la variabilidad en la constante de Allen Hazen. El coeficiente de correlación es igual 0,7442, indicando una relación “Significativa” entre las variables.

La siguiente figura 4.54 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Log-X” para describir la relación entre la constante de Allen Hazen y el D10 para los suelos **GP**.

Figura 4.54 Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{A.Hazen} = \frac{1}{0,45265 + 0,0979434 * \ln(D10)}$$

4.8.11. Correlación de la constante de Schlichter para suelo GP

Tabla 4.49 Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
CSch vs D10	Cuadrado-Y Log-X	0,7633	58,27%	Significativa
CSch vs D30	Cuadrado-Y Inversa de X	-0,6828	46,63%	Moderada
CSch vs D60	Curva S	0,2216	4,91%	Débil
CSch vs Cu	Raíz Cuadrada de X	-0,6827	46,60%	Moderada
CSch vs Cc	Raíz Cuad-X Cuadrado-X	0,2371	5,62%	Débil
CSch vs %pasa N°4	Cuadrado-Y Inversa de X	0,2956	8,74%	Débil
CSch vs %pasa N°10	Cuadrado Doble	-0,6213	38,60%	Moderada
CSch vs %pasa N°40	Cuadrado de X	-0,7397	54,71%	Significativa
CSch vs %pasa N°200	Cuadrado-Y Inversa de X	0,583	33,99%	Moderada
CSch vs Peso esp.	Inversa-Y Cuadrado-X	-0,1206	1,45%	Muy débil
CSch vs e	Raíz Cuad-X Cuadrado-X	0,4802	23,06%	Débil
CSch vs n	Raíz Cuad-X Cuadrado-X	0,4733	22,41%	Débil

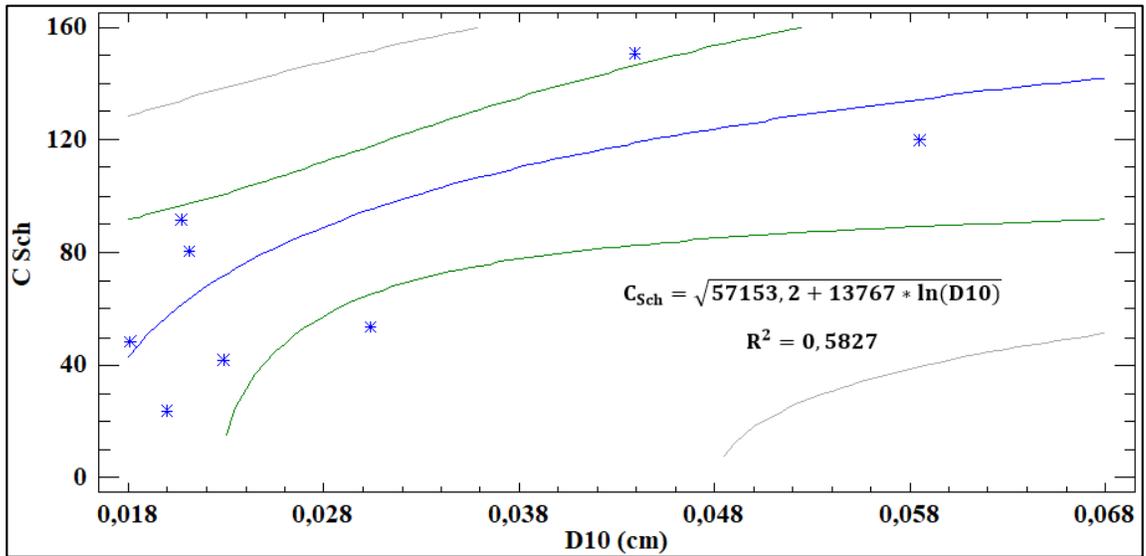
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.49 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Schlichter para los suelos **GP** es con el D10, siendo el mejor modelo de ajuste “Cuadrado-Y Log-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 58,27% de la variabilidad en la constante de Schlichter. El coeficiente de correlación es igual 0,7633, indicando una relación “Significativa” entre las variables.

La siguiente figura 4.55 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Cuadrado-Y Log-X” para describir la relación entre la constante de Schlichter y el D10 para los suelos **GP**.

Figura 4.55 Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_{Sch} = \sqrt{57153,2 + 13767 * \ln(D10)}$$

4.8.12. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo GP

Tabla 4.50 Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo GP

Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
Co vs D10	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9439	89,10%	Fuerte
Co vs D30	Inversa de Y	0,9132	83,39%	Fuerte
Co vs D60	Doble Inverso	0,3452	11,92%	Débil
Co vs Cu	Doble Inverso	0,9051	81,91%	Fuerte
Co vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	0,5103	26,04%	Moderada
Co vs %pasa N°4	Cuadrado Doble	-0,3745	14,03%	Débil
Co vs %pasa N°10	Doble Inverso	0,8738	76,35%	Fuerte
Co vs %pasa N°40	Inversa-Y Log-X	-0,9439	89,10%	Fuerte
Co vs %pasa N°200	Doble Inverso	0,8297	68,84%	Significativa
Co vs Peso esp.	Raíz Cuad-Y Inversa de X	-0,0811	0,66%	Muy débil
Co vs e	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8889	79,02%	Fuerte
Co vs n	Inversa-Y Cuadrado-X	0,8754	76,64%	Fuerte

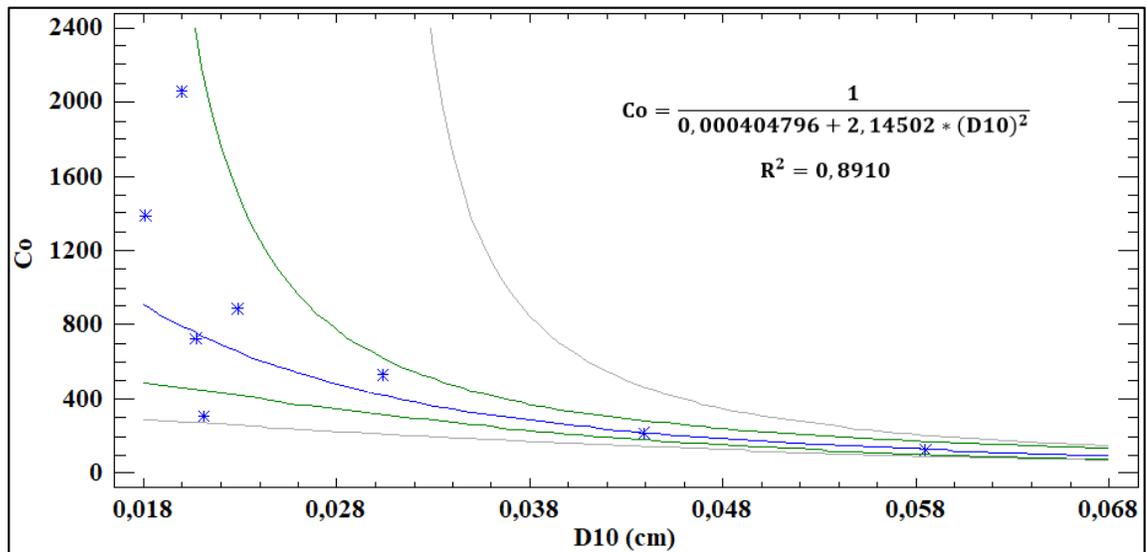
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.50 se puede observar que la mejor opción para realizar una correlación de la constante de Terzaghi para los suelos **GP** es con el D10, siendo el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para esas variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 89,10% de la variabilidad en la constante de Terzaghi. El coeficiente de correlación es igual 0,9439, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

La siguiente figura 4.56 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Inversa-Y Cuadrado-X” para describir la relación entre la constante de Terzaghi y el D10 para los suelos **GP**.

Figura 4.56 Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$C_o = \frac{1}{0,000404796 + 2,14502 * (D_{10})^2}$$

4.9. Ecuaciones obtenidas de las correlaciones

Tabla 4.51 Ecuaciones obtenidas de las correlaciones

Tipo de suelo SUCS	Allen Hazen $K = C_{AH}(0,7 + 0,03 t) * D_{10}^2$	Schlichter $K = 771 \frac{D_{10}^2}{C_{Sch}} (0,7 + 0,03 t)$	Terzaghi $K = C_1(0,7 + 0,03 t) * D_{10}^2$ $C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2$
SW	$C_{AH} = \sqrt{-677,954 + 0,61471 * (X)^2}$	$C_{Sch} = \frac{1}{-0,012336 + 0,000021123 * (X)^2}$	$C_0 = \frac{1}{-0,00056554 + 0,17082 * (D30)^2}$
SP	$C_{AH} = \frac{1}{0,010136 + 5,47576 * (D30)^2}$	$C_{Sch} = 7,82447 + 4220,67 * (D30)^2$	$C_0 = \frac{1}{0,00036139 + 2,2212 * (D10)^2}$
GW	$C_{AH} = e^{(2,43184 - 0,040151 * (Z)^2)}$	$C_{Sch} = e^{(4,21587 + 0,040166 * (Z)^2)}$	$C_0 = \frac{1}{-0,0005251 + 0,023915 * (e)^2}$
GP	$C_{AH} = \frac{1}{0,45265 + 0,0979434 * \ln(D10)}$	$C_{Sch} = \sqrt{57153,2 + 13767 * \ln(D10)}$	$C_0 = \frac{1}{0,000404796 + 2,14502 * (D10)^2}$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

X = % que pasa el tamiz N°10

e = Relación de vacíos

K: (cm/seg)

D10: (cm)

Z = % que pasa el tamiz N°200

D30: (cm)

4.10. Comparación de K utilizando las ecuaciones ajustadas

Se comparó nuevamente los coeficientes de permeabilidad, ahora utilizando las ecuaciones empíricas ajustadas, y poder observar cuanto reduce el porcentaje de variación.

4.10.1. Comparación de K(ajustado) en suelos SW

En la tabla 4.52 muestra los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas ajustadas con respecto a los obtenidos en laboratorio, para los suelos que corresponden a una clasificación SW.

Tabla 4.52 Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos SW

Punto	K _{Lab.} (cm/s)	K _{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K _{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K _{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-4	0,0127	0,0121	-4,81	0,0118	-7,14	0,0145	14,33
V-7	0,0157	0,0152	-3,31	0,0158	0,73	0,0160	1,84
V-9	0,0158	0,0108	-31,75	0,0144	-8,71	0,0131	-17,11
V-16	0,0158	0,0167	5,67	0,0158	0,44	0,0149	-5,24
E-2	0,0033	0,0046	37,01	0,0046	38,73	0,0034	1,87
E-3	0,0019	0,0044	129,83	0,0042	120,32	0,0034	80,43
E-6	0,0246	0,0127	-48,48	0,0208	-15,28	0,0272	10,90
E-11	0,0079	0,0067	-15,48	0,0065	-17,95	0,0047	-40,90
E-13	0,0064	0,0059	-8,00	0,0062	-3,25	0,0049	-23,33
E-15	0,0060	0,0083	38,39	0,0080	32,65	0,0065	9,00

Fuente: Elaboración propia

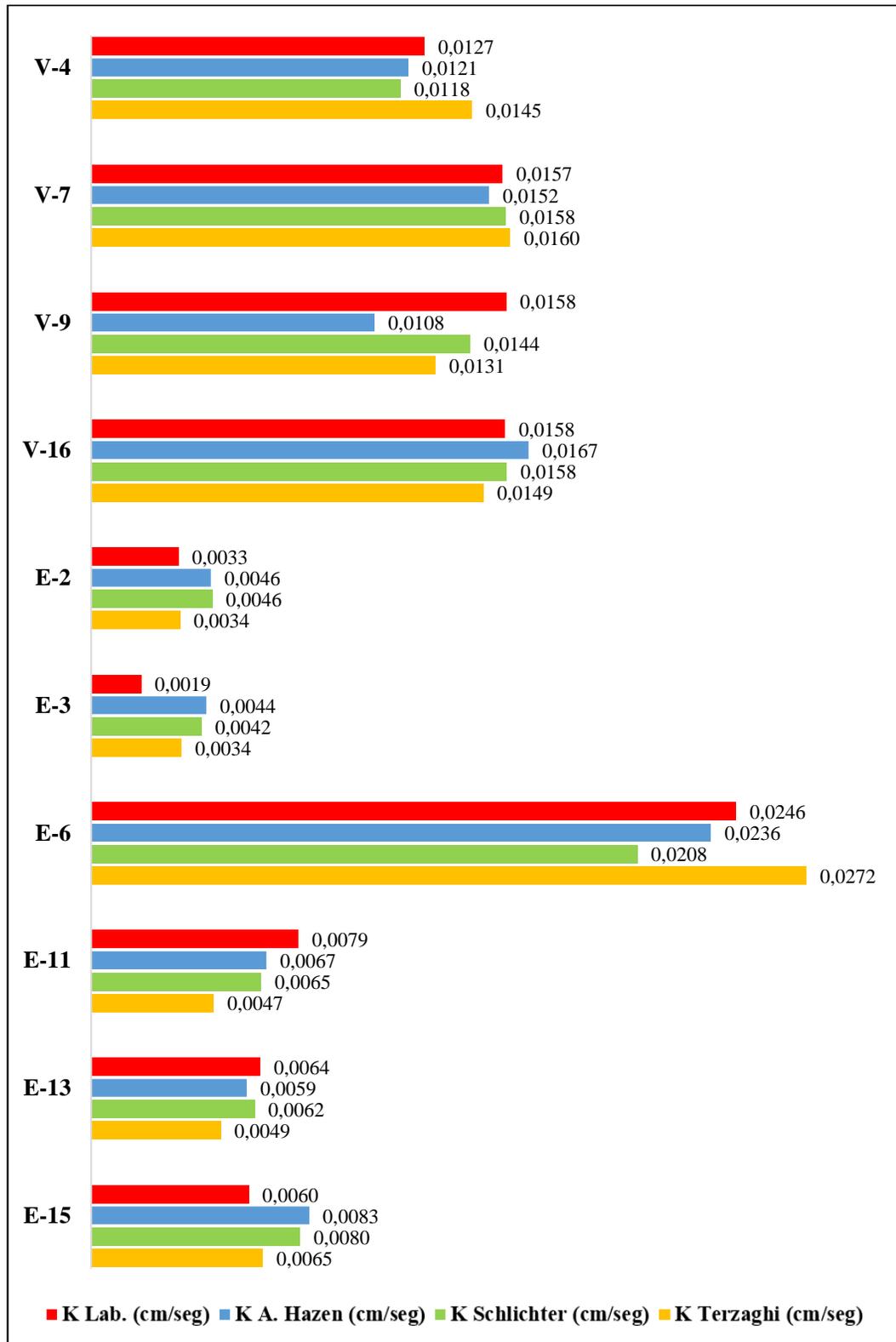
Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la tabla 4.53 se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos SW.

Tabla 4.53 Porcentaje de variación promedio de suelos SW

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	30,47
Schlichter	24,52
Terzaghi	20,49

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.57 Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos SP



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.57 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas ajustadas con respecto al obtenido en laboratorio para los suelos que corresponden a una clasificación **SW**.

4.10.2. Comparación de K(ajustado) en suelos SP

En la tabla 4.54 muestra los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas ajustadas con respecto a los obtenidos en laboratorio, para los suelos que corresponden a una clasificación **SP**.

Tabla 4.54 Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos SP

Punto	KLab. (cm/s)	KA. Hazen (cm/s)	Variación (%)	KSchlich. (cm/s)	Variación (%)	KTerzaghi (cm/s)	Variación (%)
V-1	0,0173	0,0106	-38,72	0,0106	-38,72	0,0116	-33,00
V-2	0,0175	0,0116	-33,66	0,0116	-33,66	0,0138	-21,17
V-3	0,0194	0,0212	9,18	0,0212	9,18	0,0140	-27,64
V-5	0,0198	0,0179	-9,78	0,0179	-9,76	0,0179	-9,78
V-6	0,0076	0,0078	3,01	0,0078	2,99	0,0046	-39,52
V-8	0,0257	0,0337	31,41	0,0337	31,42	0,0243	-5,29
V-10	0,0281	0,0300	6,62	0,0300	6,64	0,0306	8,93
V-11	0,0193	0,0128	-33,76	0,0128	-33,76	0,0150	-22,62
V-13	0,0187	0,0197	5,36	0,0197	5,37	0,0180	-3,47
V-14	0,0239	0,0205	-14,07	0,0205	-14,05	0,0248	3,96
T-1	0,0056	0,0087	54,49	0,0086	54,43	0,0062	10,60
T-3	0,0073	0,0085	16,50	0,0085	16,49	0,0051	-29,79
T-7	0,0164	0,0116	-28,96	0,0116	-28,96	0,0157	-4,23
T-8	0,0139	0,0094	-32,00	0,0094	-31,99	0,0079	-43,01
T-10	0,0270	0,0279	3,11	0,0279	3,13	0,0252	-6,73
T-11	0,0084	0,0075	-11,53	0,0075	-11,53	0,0058	-31,66
T-15	0,0054	0,0080	47,94	0,0080	47,92	0,0064	17,59
T-16	0,0089	0,0083	-7,27	0,0083	-7,28	0,0068	-23,79
E-4	0,0020	0,0061	207,31	0,0061	207,28	0,0047	139,28
E-5	0,0045	0,0064	41,01	0,0064	41,02	0,0106	132,66
E-7	0,0021	0,0061	184,44	0,0061	184,39	0,0041	91,75
E-8	0,0122	0,0171	40,53	0,0171	40,55	0,0111	-8,69
E-10	0,0158	0,0138	-12,80	0,0138	-12,79	0,0213	34,71
E-16	0,0184	0,0178	-3,33	0,0178	-3,32	0,0187	1,34

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la siguiente tabla se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **SP**.

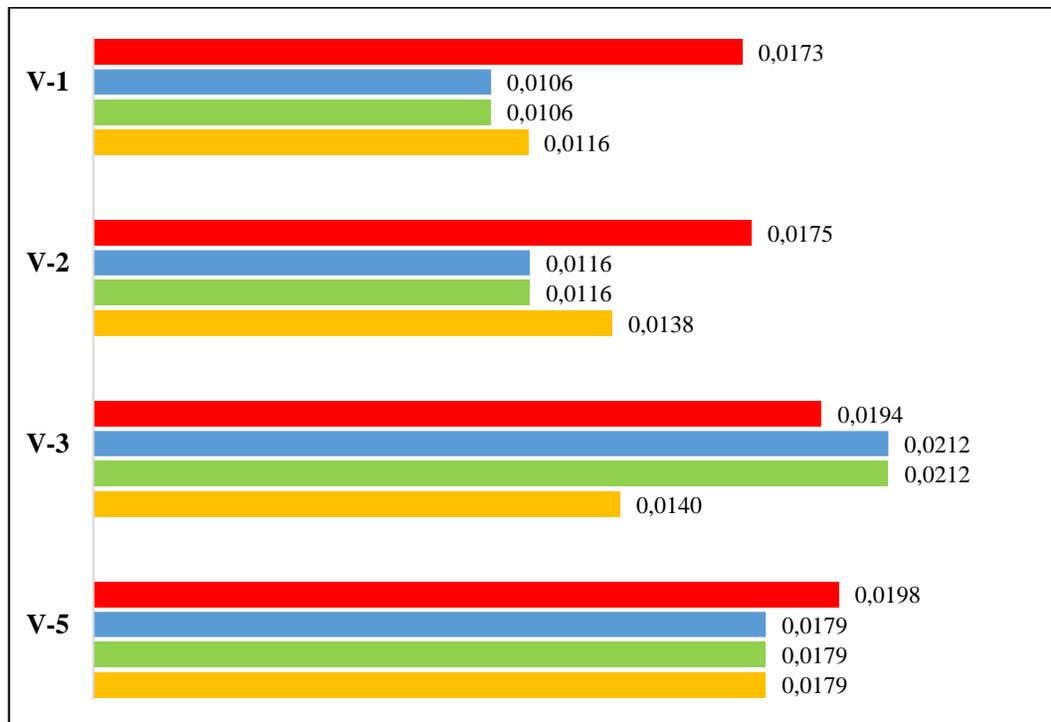
Tabla 4.55 Porcentaje de variación promedio de suelos SP

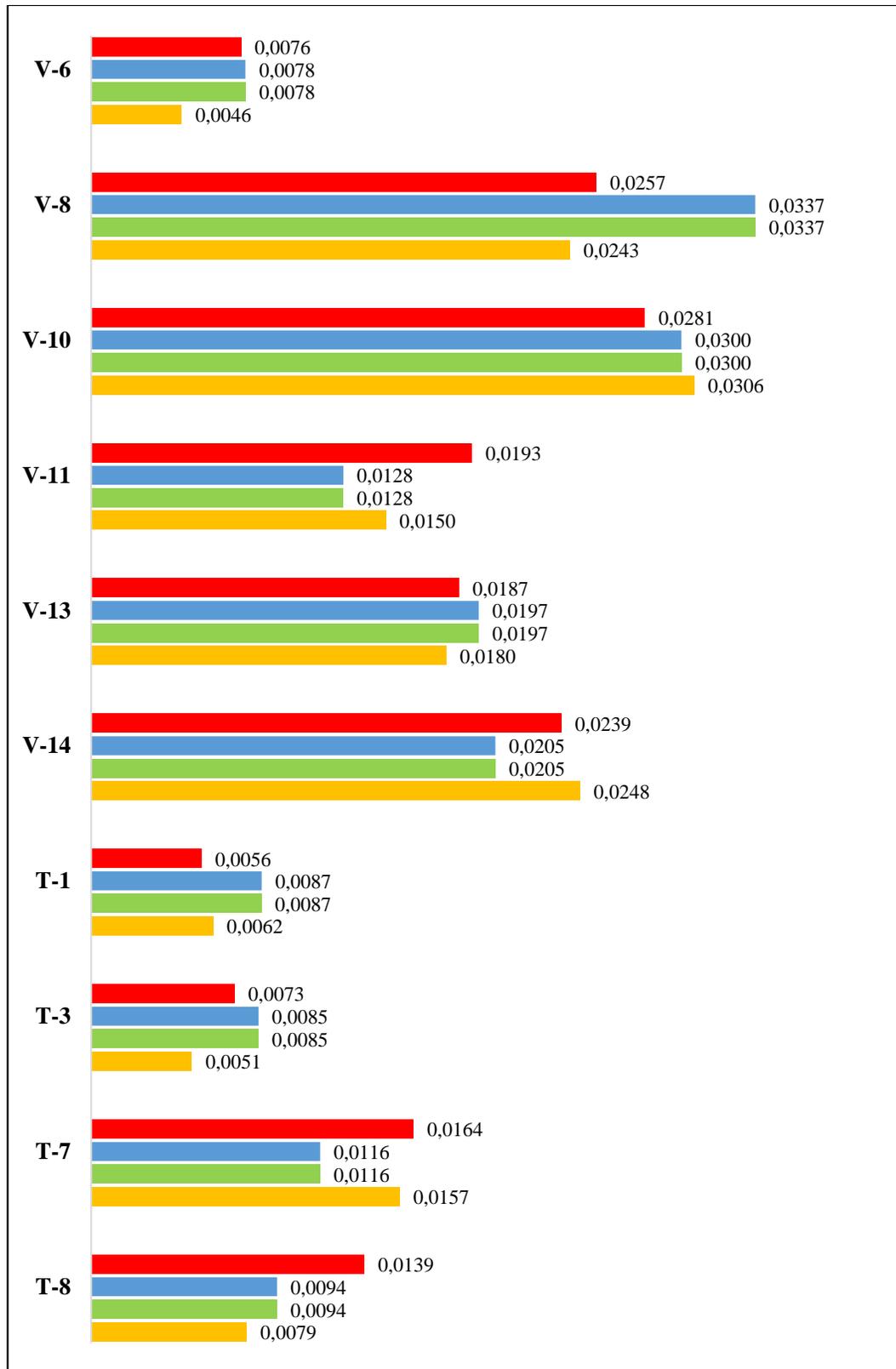
Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	29,11
Schlichter	29,10
Terzaghi	26,61

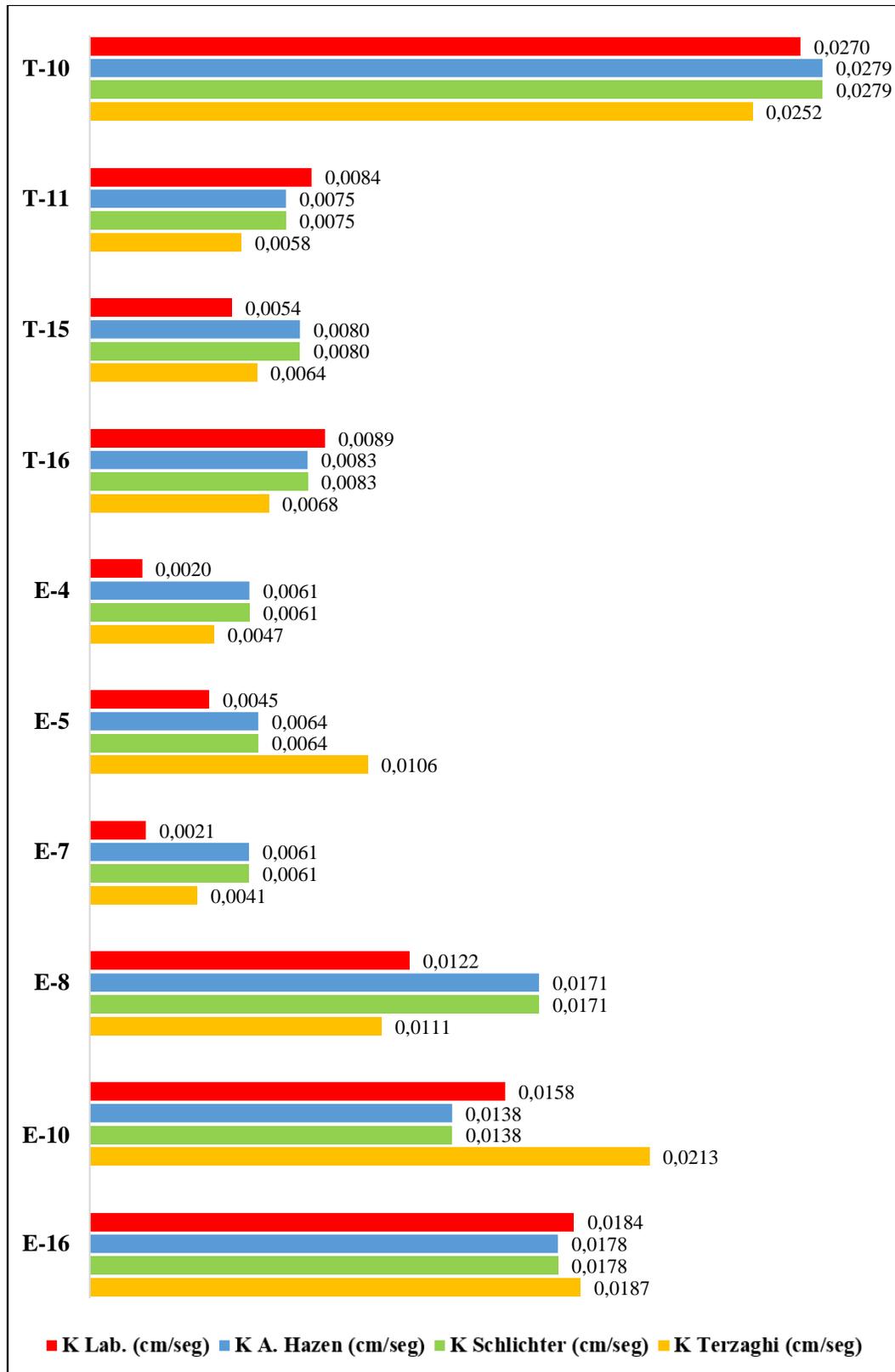
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura 4.58 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **SP**.

Figura 4.58 Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos SP







Fuente: Elaboración propia

4.10.3. Comparación de K(ajustado) en suelos GW

En la tabla 4.56 muestra los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas ajustadas con respecto a los obtenidos en laboratorio, para los suelos que corresponden a una clasificación **GW**.

Tabla 4.56 Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos GW

Punto	K_{Lab.} (cm/s)	K_{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K_{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K_{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-12	0,0237	0,0271	14,41	0,0271	14,41	0,0244	3,03
T-14	0,0039	0,0035	-10,21	0,0035	-10,23	0,0038	-2,24
E-1	0,0020	0,0021	7,75	0,0021	7,73	0,0025	25,01
E-9	0,0038	0,0044	13,72	0,0044	13,70	0,0042	9,95
E-12	0,0082	0,0071	-14,22	0,0071	-14,22	0,0059	-28,67
E-14	0,0042	0,0039	-7,38	0,0039	-7,40	0,0042	0,53

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la siguiente tabla se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **GW**.

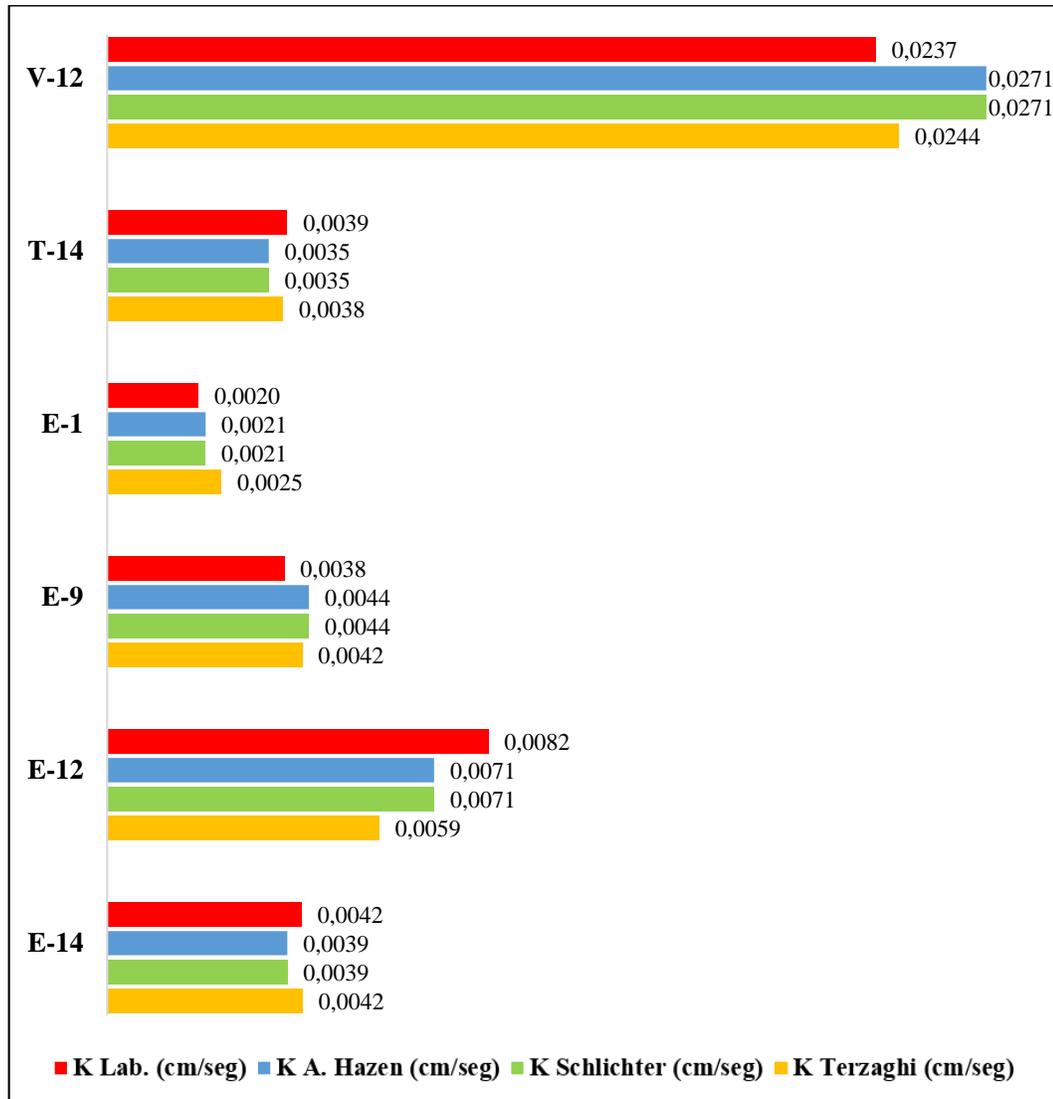
Tabla 4.57 Porcentaje de variación promedio de suelos GW

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	11,28
Schlichter	11,28
Terzaghi	11,57

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura 4.59 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **GW**.

Figura 4.59 Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos GW



Fuente: Elaboración propia

4.10.4. Comparación de K(ajustado) en suelos GP

En la tabla 4.58 muestra los porcentajes de variación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas ajustadas con respecto a los obtenidos en laboratorio, para los suelos que corresponden a una clasificación **GP**.

Tabla 4.58 Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos GP

Punto	K _{Lab.} (cm/s)	K _{A. Hazen} (cm/s)	Variación (%)	K _{Schlich.} (cm/s)	Variación (%)	K _{Terzaghi} (cm/s)	Variación (%)
V-15	0,0286	0,0255	-10,75	0,0255	-10,62	0,0286	-0,03
T-4	0,0128	0,0171	33,20	0,0163	26,62	0,0132	2,68
T-6	0,0047	0,0077	62,53	0,0070	48,56	0,0049	3,68
T-9	0,0055	0,0077	39,68	0,0070	26,80	0,0132	138,90
T-12	0,0169	0,0075	-55,75	0,0070	-58,67	0,0065	-61,41
T-13	0,0068	0,0071	4,81	0,0075	10,21	0,0044	-34,78
T-17	0,0126	0,0083	-34,32	0,0073	-41,68	0,0092	-26,47
T-18	0,0174	0,0109	-37,26	0,0097	-43,84	0,0137	-21,07

Fuente: Elaboración propia

Considerando el porcentaje de variación en valor absoluto, en la siguiente tabla se observa el promedio del porcentaje de variación para los suelos que corresponden a una clasificación **GP**.

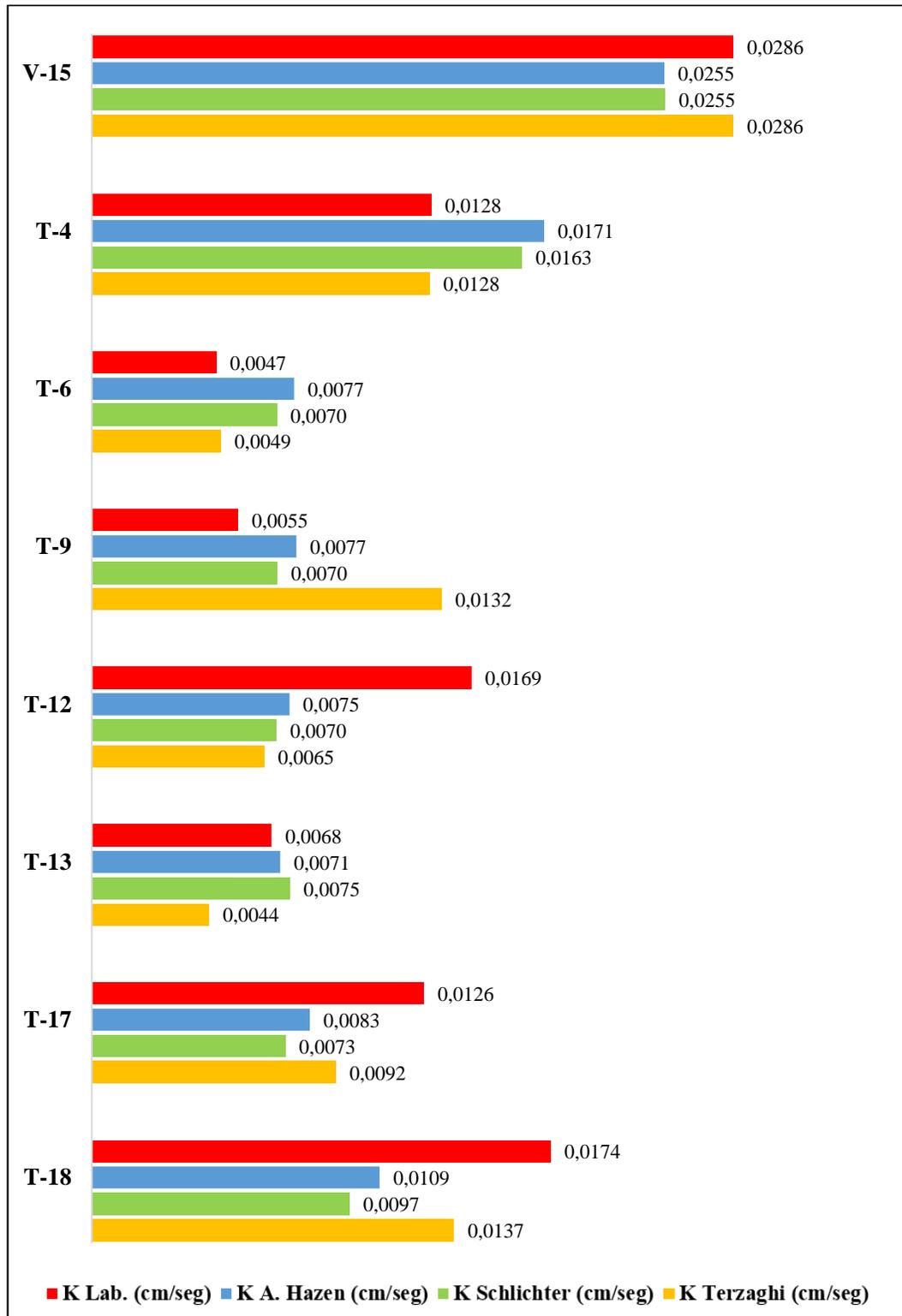
Tabla 4.59 Porcentaje de variación promedio de suelos GP

Ecuación Empírica	% de Variación
Allen Hazen	34,79
Schlichter	33,37
Terzaghi	36,13

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura 4.60 muestra gráficamente como varían los coeficientes de permeabilidad obtenido mediante las ecuaciones empíricas con respecto a los obtenidos en laboratorio para los puntos que corresponden a una clasificación **GP**.

Figura 4.60 Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos GP



Fuente: Elaboración propia

4.11. Análisis de Resultados

Con el ajuste de las ecuaciones empíricas se pudo reducir los porcentajes de variación en relación a los porcentajes obtenidos inicialmente.

A continuación, se presenta los porcentajes de variación promedio después de realizar el ajuste de las ecuaciones empíricas para cada tipo de suelo.

Tabla 4.60 Porcentajes de variación promedio con el ajuste de ecuaciones

Tipo de suelo	Porcentaje de variación promedio		
	Allen Hazen	Schlichter	Terzaghi
SUSC			
SW	30,47 %	24,52 %	20,49 %
SP	29,11 %	29,10 %	26,61 %
GW	11,28 %	11,28 %	11,57 %
GP	34,79 %	33,37 %	36,13 %

Fuente: Elaboración propia

Con el ajuste de las ecuaciones empíricas y calculando nuevamente los coeficientes de permeabilidad, redujo los porcentajes de variación con respecto a los porcentajes de variación obtenidos inicialmente sin el ajuste de las ecuaciones empíricas.

Según los porcentajes de variación promedio (tabla 4.60) se puede observar que la ecuación empírica de Terzaghi arrojó menores porcentajes de variación en el caso de las arenas, y en las gravas la ecuación empírica de Schlichter presento porcentajes de variación menores.

4.12. Correlación de K con factores granulométricos

Después de haber realizado el ajuste de las ecuaciones empíricas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio; da lugar a que podamos realizar una correlación directa para el coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio. Como un aporte a esta investigación y con el fin de aprovechar los resultados obtenidos de nuestros ensayos, se buscó una relación directa del coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio con factores granulométricos, para cada tipo de suelo contemplados en esta investigación.

4.12.1. Correlaciones de K para suelos SW

Tabla 4.61 Correlaciones de K para suelos SW

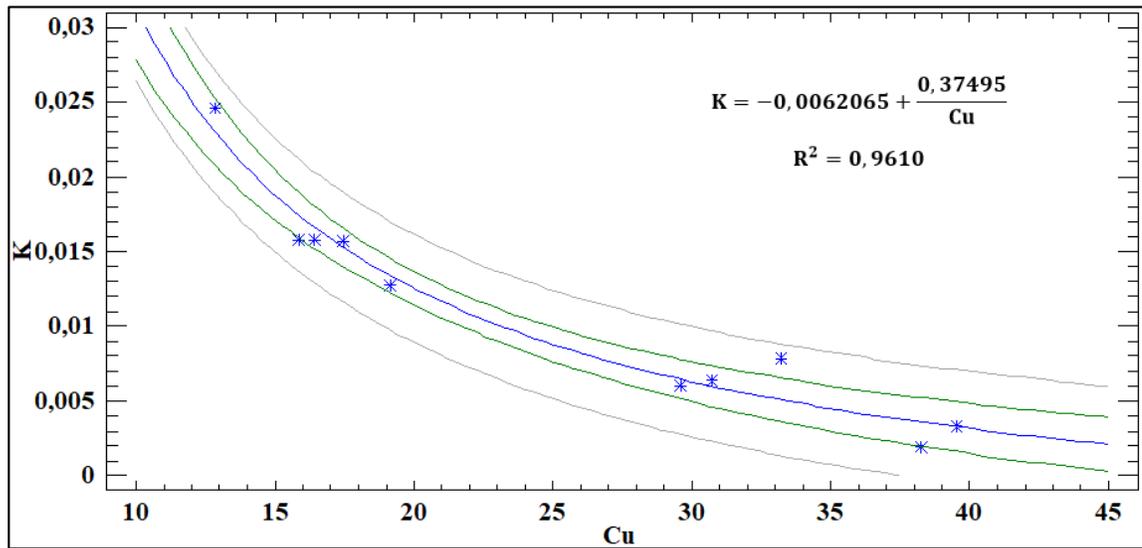
Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
K vs D10	Cuadrado de Y	0,9300	86,48%	Fuerte
K vs D30	Cuadrado Doble	0,7297	53,25%	Significativa
K vs D60	Log-Y Cuadrado-X	-0,4773	22,78%	Débil
K vs Cu	Inversa de X	0,9803	96,10%	Perfecta
K vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	0,5530	30,58%	Moderada
K vs %pasa N°4	Multiplicativa	0,4422	19,55%	Débil
K vs %pasa N°10	Cuadrado-Y Inversa de X	0,3349	11,22%	Débil
K vs %pasa N°40	Cuadrado-Y Inversa de X	0,9660	93,31%	Perfecta
K vs %pasa N°200	Cuadrado-Y Inversa de X	0,6516	42,45%	Moderada
K vs Peso esp.	Curva S	0,2496	6,23%	Débil
K vs e	Cuadrado Doble	0,9658	93,27%	Perfecta
K vs n	Cuadrado Doble	0,9624	92,62%	Perfecta

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.61 se puede observar que la mejor opción para establecer una correlación del coeficiente de permeabilidad para suelos **SW** es con el coeficiente de uniformidad (Cu), siendo “Inversa de X” el mejor modelo de ajuste para relacionar estas dos variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 96,10% de la variabilidad en el coeficiente de permeabilidad (K). El coeficiente de correlación es igual 0,9803, indicando una relación “Perfecta” entre las variables.

Figura 4.61 Modelo ajustado de K vs Cu



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$K = \sqrt{-0,00048602 + \frac{0,0091124}{(\% \text{pasa } N^{\circ}40)}}$$

4.12.2. Correlaciones de K para suelos SP

Tabla 4.62 Correlaciones de K para suelos SP

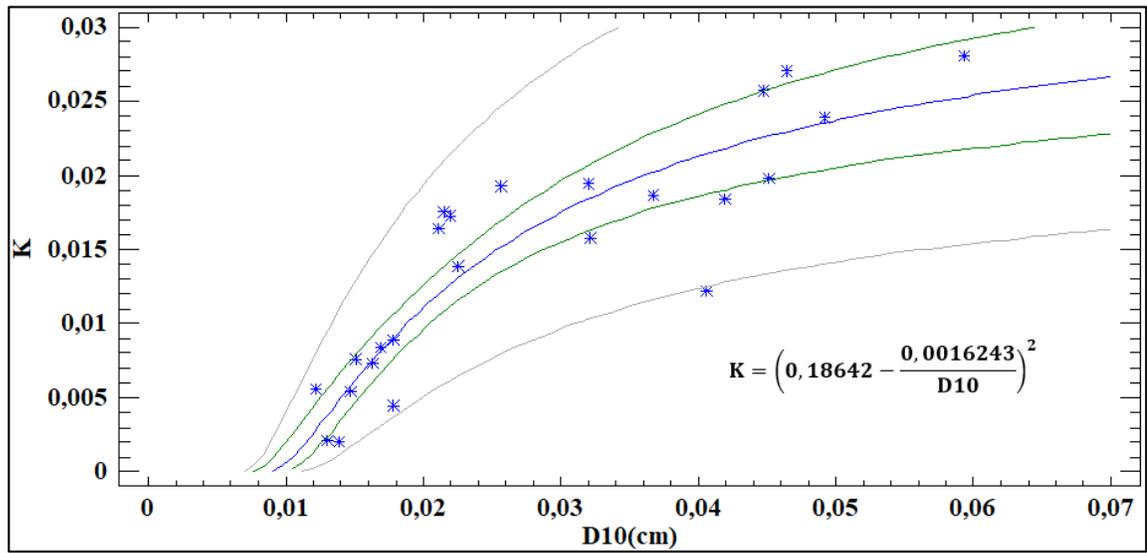
Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
K vs D10	Raíz Cuad-Y Inversa de X	-0,9023	81,42%	Fuerte
K vs D30	Logaritmo de X	0,7473	55,85%	Significativa
K vs D60	Cuadrado Doble	-0,2011	4,04%	Débil
K vs Cu	Cuadrado-Y Inversa de X	0,8644	74,72%	Fuerte
K vs Cc	Inversa de X	-0,2686	7,21%	Débil
K vs %pasa N°4	Doble Inverso	-0,1257	1,58%	Muy débil
K vs %pasa N°10	Cuadrado de X	-0,5789	33,51%	Moderada
K vs %pasa N°40	Raíz Cuadrada de X	-0,8973	80,51%	Fuerte
K vs %pasa N°200	Log-Y Cuadrado-X	-0,8332	69,41%	Significativa
K vs Peso esp.	Cuadrado Doble	0,2027	4,11%	Débil
K vs e	Cuadrado Doble	0,9012	81,22%	Fuerte
K vs n	Cuadrado Doble	0,8926	79,68%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.62 se puede observar que la mejor opción para establecer una correlación del coeficiente de permeabilidad para suelos **SP** es con el diámetro efectivo (D10), siendo “Raíz Cuadrada-Y Inversa de X” el mejor modelo de ajuste para relacionar estas dos variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 81,42% de la variabilidad en el coeficiente de permeabilidad (K). El coeficiente de correlación es igual -0,9023, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

Figura 4.62 Modelo ajustado de K vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$K = \left(0,18642 - \frac{0,0016243}{D10}\right)^2$$

4.12.3. Correlaciones de K para suelos GW

Tabla 4.63 Correlaciones de K para suelos GW

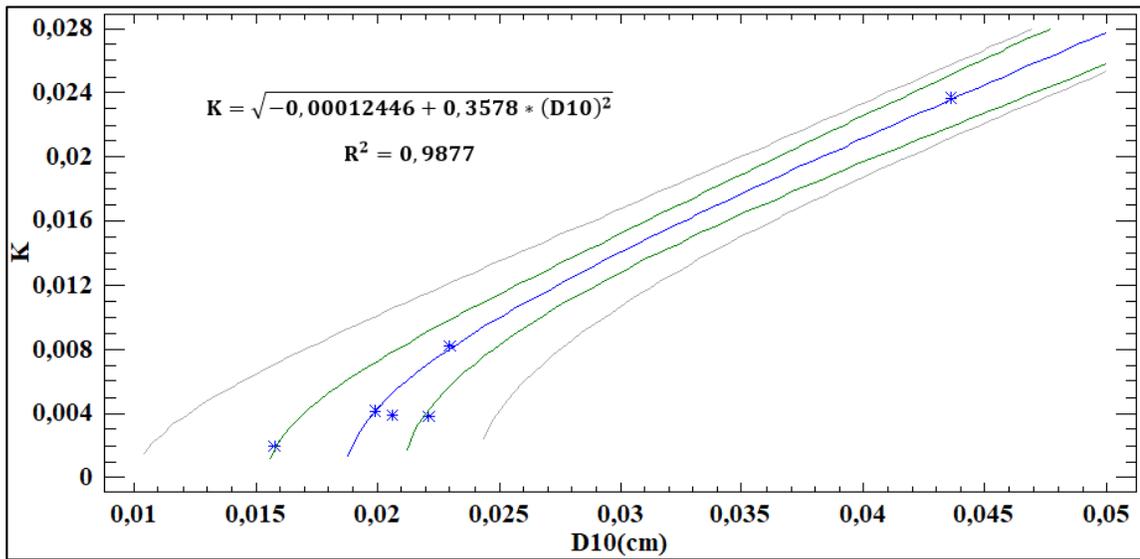
Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R2	Relación de variables
K vs D10	Cuadrado Doble	0,9938	98,77%	Perfecta
K vs D30	Cuadrado de X	0,4666	21,77%	Débil
K vs D60	Inversa-Y Cuadrado-X	0,7057	49,80%	Significativa
K vs Cu	Cuadrado-Y Inversa de X	0,9667	93,46%	Fuerte
K vs Cc	Inversa-Y Cuadrado-X	0,4607	21,22%	Débil
K vs %pasa N°4	Doble Inverso	0,6961	48,46%	Significativa
K vs %pasa N°10	Inversa de X	0,4515	20,38%	Débil
K vs %pasa N°40	Inversa de X	0,9446	89,24%	Fuerte
K vs %pasa N°200	Raíz Cuad-Y Inversa de X	0,9803	96,10%	Perfecta
K vs Peso esp.	Cuadrado Doble	0,3361	11,29%	Débil
K vs e	Cuadrado de X	0,9703	94,14%	Perfecta
K vs n	Cuadrado de X	0,9575	91,68%	Fuerte

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.63 se puede observar que la mejor opción para establecer una correlación del coeficiente de permeabilidad para suelos **GW** es con el diámetro efectivo (D10), siendo “Cuadrado Doble” el mejor modelo de ajuste para relacionar estas dos variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 98,77% de la variabilidad en el coeficiente de permeabilidad (K). El coeficiente de correlación es igual 0,9938, indicando una relación “Perfecta” entre las variables.

Figura 4.63 Modelo ajustado de K vs D10



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$K = \sqrt{-0,00012446 + 0,3578 * (D10)^2}$$

4.12.4. Correlaciones de K para suelos GP

Tabla 4.64 Correlaciones de K para suelos GP

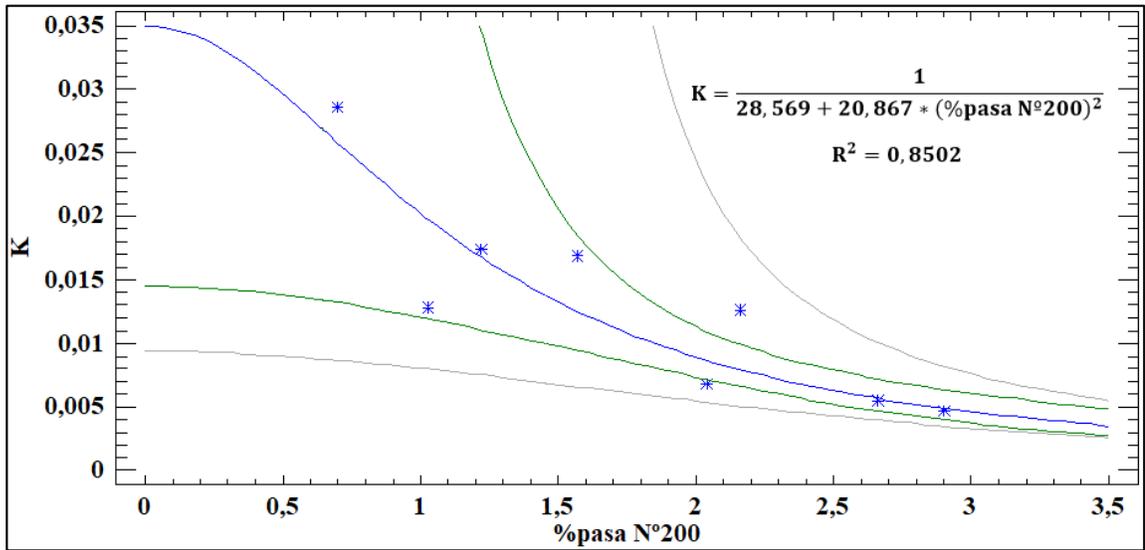
Variables	Mejor modelo de ajuste	Coef. De correlación	R ²	Relación de variables
K vs D10	Cuadrado Doble	0,8528	72,73%	Fuerte
K vs D30	Cuadrado Doble	0,9136	83,46%	Fuerte
K vs D60	Cuadrado-Y Inversa de X	0,5945	35,35%	Moderada
K vs Cu	Cuadrado-Y Inversa de X	0,8972	80,49%	Fuerte
K vs Cc	Cuadrado Doble	0,7205	51,92%	Significativa
K vs %pasa N°4	Inversa-Y Cuadrado-X	0,3939	15,52%	Débil
K vs %pasa N°10	Cuadrado-Y Inversa de X	0,9134	83,43%	Fuerte
K vs %pasa N°40	Cuadrado-Y Inversa de X	0,8988	80,79%	Fuerte
K vs %pasa N°200	Inversa-Y Cuadrado-X	0,9220	85,02%	Fuerte
K vs Peso esp.	Cuadrado-Y Inversa de X	-0,3386	11,46%	Débil
K vs e	Cuadrado Doble	0,8038	64,62%	Fuerte
K vs n	Cuadrado Doble	0,7794	60,75%	Significativa

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.64 se puede observar que la mejor opción para establecer una correlación del coeficiente de permeabilidad para suelos **GP** es con el porcentaje que pasa el tamiz N°200, siendo “Inversa-Y Cuadrado-X” el mejor modelo de ajuste para relacionar estas dos variables.

El R² indica que el mejor modelo ajustado explica 85,02% de la variabilidad en el coeficiente de permeabilidad (K). El coeficiente de correlación es igual 0,9220, indicando una relación “Fuerte” entre las variables.

Figura 4.64 Modelo ajustado de K vs % que pasa el tamiz N°200



Fuente: Software Statgraphics

Ecuación del modelo ajustado es:

$$K = \frac{1}{28,569 + 20,867 * (\%pasa N^{\circ}200)^2}$$

Tabla 4.65 Ecuaciones obtenidas para K según el tipo de suelo.

Tipo de suelo SUCS	Permeabilidad K
SW	$K_{SW} = \sqrt{-0,00048602 + \frac{0,0091124}{(Y)}}$
SP	$K_{SP} = \left(0,18642 - \frac{0,0016243}{D10}\right)^2$
GW	$K_{GW} = \sqrt{-0,00012446 + 0,3578 * (D10)^2}$
GP	$K_{GP} = \frac{1}{28,569 + 20,867 * (Z)^2}$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

Y = % que pasa el tamiz N°40

K: (cm/seg)

Z = % que pasa el tamiz N°200

D10: (cm)

4.13. Pruebas de hipótesis

4.13.1. Verificación de la hipótesis en suelo SW

El análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis a la diferencia entre dos medias ($\mu_1 - \mu_2$) de muestras provenientes de distribuciones normales. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Tabla 4.66 Pruebas de hipótesis en suelo SW

Variable	C _{A.H}	C _{SCH}	Co	D30	%pasa N°10	K	Cu
Identificación	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7
Tamaño de muestra	10	10	10	10	10	10	10
Media muestral	14,31	65,37	667,44	1,19	38,61	0,0110	25,31
Desviación	7,18	27,94	335,96	0,26	4,76	0,0071	10,02
C _{A.H} vs %pasa N°10	Valor-P = $5,03 \times 10^{-8}$	Hipótesis nula	X	Se rechaza			
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta			
C _{Sch} vs %pasa N°10	Valor-P = 0,007928	Hipótesis nula	X	Se rechaza			
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta			
Co vs D30	Valor-P = $6,49 \times 10^{-6}$	Hipótesis nula	X	Se rechaza			
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta			
K vs Cu	Valor-P = $2,52 \times 10^{-7}$	Hipótesis nula	X	Se rechaza			
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta			

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis alterna, se aceptó en las correlaciones para cada constante de suelos SW. Puesto que el valor-P para cada prueba es menor que 0,05, puede rechazarse las hipótesis nulas con un 95% de nivel de confianza.

4.13.2. Verificación de la hipótesis en suelo SP

El análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis a la diferencia entre dos medias ($\mu_1 - \mu_2$) de muestras provenientes de distribuciones normales. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Tabla 4.67 Pruebas de hipótesis en suelo SP

Variable	C _{A.H}	C _{SCH}	C _o	D10	D30	K
Identificación	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6
Tamaño de muestra	24	24	24	24	24	24
Media muestral	16,18	62,96	718,31	0,28	1,04	0,0144
Desviación	8,24	33,71	511,76	0,14	0,33	0,0079
C _{A.H} vs D30	Valor-P = 0	Hipótesis nula	X	Se rechaza		
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta		
C _{Sch} vs D30	Valor-P = 0	Hipótesis nula	X	Se rechaza		
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta		
C _o vs D10	Valor-P = $1,41 \times 10^{-8}$	Hipótesis nula	X	Se rechaza		
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta		
K vs D10	Valor-P = 0	Hipótesis nula	X	Se rechaza		
		Hipótesis alterna	✓	Se acepta		

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis alterna, se aceptó en las correlaciones para cada constante de suelos **SP**. Puesto que el valor-P para cada prueba es menor que 0,05, puede rechazarse las hipótesis nulas con un 95% de nivel de confianza.

4.13.3. Verificación de la hipótesis en suelo GW

El análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis a la diferencia entre dos medias ($\mu_1 - \mu_2$) de muestras provenientes de distribuciones normales. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Tabla 4.68 Pruebas de hipótesis en suelo GW

Variable	C _{A.H}	C _{SCH}	Co	D10	%pasa N°200	K	e
Identificación	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7
Tamaño de muestra	6	6	6	6	6	6	6
Media muestral	8,15	100,46	528,22	0,24	2,81	0,0076	0,339
Desviación	2,29	25,31	207,99	0,10	1,21	0,0081	0,078
CA. H vs %pasa N°200		Valor-P = 0,000499		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
				Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
CSch vs %pasa N°200		Valor-P = 2,69x10 ⁻⁶		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
				Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
Co vs e		Valor-P = 9,93x10 ⁻⁵		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
				Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
K vs D10		Valor-P = 1,16x10 ⁻⁶		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
				Hipótesis alterna	✓	Se acepta	

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis alterna, se aceptó en las correlaciones para cada constante de suelos **GW**. Puesto que el valor-P para cada prueba es menor que 0,05, puede rechazarse las hipótesis nulas con un 95% de nivel de confianza.

4.13.4. Verificación de la hipótesis en suelo GP

El análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis a la diferencia entre dos medias ($\mu_1 - \mu_2$) de muestras provenientes de distribuciones normales. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Tabla 4.69 Pruebas de hipótesis en suelo GP

Variable	C _{A.H}	C _{SCH}	Co	D10	K	%pasa N°200
Identificación	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6
Tamaño de muestra	8	8	8	8	8	8
Media muestral	13,86	76,24	779,41	0,295	0,0132	1,78
Desviación	8,90	42,98	658,60	0,145	0,0079	0,79
CA. H vs D10	Valor-P = 0,000719		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
			Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
CSch vs D10	Valor-P = 0,000195		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
			Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
Co vs D10	Valor-P = 0,004802		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
			Hipótesis alterna	✓	Se acepta	
K vs %pasa N°200	Valor-P = $1,874 \times 10^{-5}$		Hipótesis nula	X	Se rechaza	
			Hipótesis alterna	✓	Se acepta	

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis alterna, se aceptó en las correlaciones para cada constante de suelos **GP**. Puesto que el valor-P para cada prueba es menor que 0,05, puede rechazarse las hipótesis nulas con un 95% de nivel de confianza.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En relación a este tema se llegó a las siguientes conclusiones:

- En el presente proyecto de investigación se ha cumplido, tanto el objetivo general como los objetivos específicos.
- Las ecuaciones empíricas de Allen Hazen y Terzaghi, no son aplicables para el contexto del suelo granular usado en esta investigación.
- Mediante la comparación se observó que la ecuación empírica de Schlichter fue la que nos arrojó valores del porcentaje de variación menores en relación a los obtenidos mediante Allen Hazen y Terzaghi, por lo tanto, podemos decir que la ecuación de Schlichter fue la que mejor se ajustó para el uso en nuestros suelos, arrojándonos valores más próximos a los obtenidos en laboratorio.
- Aclarar que a un inicio se pudo evidenciar que no existía punto de comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio y el hallado mediante las ecuaciones empíricas, más específicamente en las ecuaciones de Allen Hazen y Terzaghi, debido al gran porcentaje de variación que existía en ellos, por esta razón se realiza dichas correlaciones.
- Las correlaciones obtenidas en esta investigación permiten un ajuste de las constantes de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, permitiendo que sus ecuaciones empíricas sean aplicables a suelos que corresponden a una clasificación según SUCS GW, GP, SW y SP.
- Mediante la comparación que se realizó en gráficos y tablas de resultados obtenidos, se pudo observar la variación de los coeficientes de permeabilidad hallados en laboratorio y mediante las fórmulas empíricas.
- Los valores de coeficientes de permeabilidad obtenidos en laboratorio están en un rango de 0,0019 y 0,0286 cm/seg entrando estos valores dentro de los parámetros 10^{-3} y 10^{-1} cm/seg (Tabla 2.6) que significa que la infiltración en nuestros suelos granulares es “buena”.

- Se comprobó que dos de los principales factores que influyen en la permeabilidad es el diámetro efectivo (D₁₀) y la porosidad (n), ya que estas variables obtuvieron un buen grado de relación con el coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio.
- Se pudo observar en laboratorio que uno de los factores que más influyen al momento de realizar el ensayo de permeabilidad, es el porcentaje de fino que tiene el suelo, por lo tanto, mientras más porcentaje de fino más se demoraba en pasar el agua por el permeámetro, por esta razón la norma indica que el ensayo de carga constante para determinar el coeficiente de permeabilidad, solo se debe utilizar cuando el porcentaje que pasa el Tamiz N°200 no sea mayor al 10%.
- De acuerdo a las granulometrías de las muestras estudiadas de los ríos La Victoria, Tolomosa y Erquis se determinó una clasificación según SUCS como GP (grava mal graduada, con arena con poco finos o sin ellos), GW (grava bien graduada, con arena con poco fino o sin ellos), SP (arena mal graduada, arenas con grava con pocos finos o sin ellos) y SW (arena bien graduada, arena con gravas, con poco o nada de finos).
- Según los resultados obtenidos de las muestras estudiadas, estas demostraron que el valor promedio del peso específico de los suelos fue 2,616 (gr/cm³).
- Los valores obtenidos de la porosidad de todos los puntos de estudio están en un rango de 21,39 % y 33,53 %.
- Se pudo establecer una correlación del coeficiente de permeabilidad obtenido en laboratorio y factores granulométricos para cada tipo de suelos contemplados en esta investigación.
- El uso del permeámetro de carga constante es muy eficaz y de fácil uso, garantizando una obtención de datos confiables sobre el coeficiente de permeabilidad.
- Con nuestro análisis y comparación se puede afirmar que los resultados obtenidos en laboratorio del coeficiente de permeabilidad son más confiables, ya que ninguna ecuación empírica reemplaza un ensayo de laboratorio.

5.2. Recomendaciones

- En los ensayos de laboratorio que se realizan tener cuidado de no cometer errores de apreciación, de los cuales o con los cuales podemos hacer variar el resultado y tratar de seguir los pasos que estén especificados en el manual de laboratorio.
- Para el uso del suelo realizar un cuarteo para obtener muestras representativas.
- Al momento de realizar el ensayo de carga constante para obtener el coeficiente de permeabilidad, la muestra debe estar totalmente saturada por ello para garantizar la saturación, se recomienda almacenar la muestra en un recipiente con agua por 24 horas aproximadamente.