

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**PROPIEDADES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DE LOS LECHOS DE  
ADSORCIÓN DE PIROCLASTOS DEL TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO, DE  
9500 MICRAS DE DIÁMETRO**

Autor(es):

ADRIANA MARCELA PÁEZ PINO

LUIS FELIPE DONOSO GÓMEZ

Tutor:

ING. ALFONSO ARELLANO BARRIGA MGS.

**Riobamba - Ecuador**

**Año 2020**

## **REVISIÓN**

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **“PROPIEDADES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DE LOS LECHOS DE ADSORCIÓN DE PIROCLASTOS DEL TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO, DE 9500 MICRAS DE DIÁMETRO”** presentado por Luis Felipe Donoso Gómez, Adriana Marcela Páez Pino y dirigida por: Ing. Alfonso Arellano. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

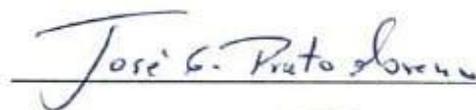
Ing. Alfonso Arellano

**Tutor del proyecto**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alfonso', written over a horizontal line.

Dr. José Prato

**Miembro del Tribunal**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José G. Prato Donoso', written over a horizontal line.

Ing. Marcel Paredes

**Miembro del Tribunal**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marcel Paredes', written over a horizontal line.

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

Yo, Ing. Alfonso Arellano, en calidad de Tutor de Tesis, cuyo tema es: “**PROPIEDADES MECÁNICAS E HIDRÁULICAS DE LOS LECHOS DE ADSORCIÓN DE PIROCLASTOS DEL TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO, DE 9500 MICRAS DE DIÁMETRO**” CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a los estudiantes Luis Felipe Donoso Gómez y Adriana Marcela Páez Pino para que se presenten ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,

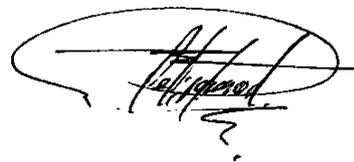
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alfonso', written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Ing. Alfonso Arellano

**Tutor de Tesis**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACION

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de graduación, corresponde exclusivamente a: Luis Felipe Donoso Gómez y Adriana Marcela Páez Pino e Ing. Alfonso Arellano; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Luis Felipe Donoso Gómez

C.I. 0604500199



Adriana Marcela Páez Pino

C.I. 0605182765

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y a la Virgencita por su infinito amor y por acompañarme en el transcurso de mi vida, por darme paciencia y sabiduría para culminar mis metas propuestas.

A mi madre y a mis hermanos por su confianza dedicación, paciencia, y por todo lo que me han dado en toda mi vida.

Finalmente, a mi tutor Ing. Alfonso Arellano que con sus conocimientos y apoyo me oriento en la investigación

*Adriana Marcela Páez Pino*

Quiero agradecer a Dios, por la sabiduría y la paciencia en el transcurso de mi vida y en cada uno de sus aspectos

Agradezco a mi familia, en especial a mi padre que ha sido el pilar fundamental para alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mis amigos más cercanos, que han presenciado mi crecimiento personal y académico a lo largo de estos años.

A mi docente y tutor Ing. Alfonso Arellano por su invaluable guía en el desarrollo de este proyecto.

*Luis Felipe Donoso Gómez*

## **DEDICATORIA**

Dedico esta investigación con todo amor y cariño a mi madre que es mi motivación y la guía de mi vida, mi compañera y sobre todo mi amiga.

A mis hermanos Octavio, Xavier, Walter y Germán quienes son el apoyo en cada actividad que emprendo y sin sus consejos y motivación esto no hubiera sido posible.

A mi papacallito que a pesar que físicamente no esta fue mi compañía en cada paso que di, para ti todos mis logros.

Son mi motor para seguir adelante cada día. Los amo.

*Adriana Marcela Páez Pino*

Este logro personal va dedicado a mi hermano Andrés que ha sido mi inspiración, mi ejemplo a seguir durante mi carrera y toda mi vida.

A mis padres cuyo esfuerzo y guía me han permitido mantenerme de pie frente a las adversidades que se han presentado y se presentarán.

Finalmente, a Evelyn quien se ha mantenido a mi lado y ha presenciado los momentos más importantes de mi vida, celebrando las victorias y compartiendo las derrotas, quien me ha dado las fuerzas necesarias para levantarme más veces de las que puedo recordar, esta victoria es de los dos.

*Luis Felipe Donoso Gómez*

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	13
<b>2</b>	<b>Objetivos</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Objetivo General:</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específico:</b> .....	18
<b>3</b>	<b>Estado del arte</b> .....	19
<b>4</b>	<b>Metodología</b> .....	22
<b>5</b>	<b>Discusión y resultados</b> .....	35
<b>5.1</b>	<b>Conductividad Hidráulica</b> .....	35
<b>5.2</b>	<b>Densidades</b> .....	49
<b>5.3</b>	<b>Análisis Microbiológico de las Muestras</b> .....	50
<b>6</b>	<b>Introducción</b> .....	54
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	59
<b>7.1</b>	<b>Conclusiones</b> .....	59
<b>7.2</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	60
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b> .....	61
<b>9</b>	<b>Anexos</b> .....	63
<b>9.1</b>	<b>Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 4</b> .....	63
<b>9.2</b>	<b>Conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 4</b> .....	65

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Mapa Esquemático de las regiones fisiográficas del Ecuador. 1.- Cuenca Oriente, 2.- Zona Sub-Andina, 3.- Cordillera Oriental, 4.- Costa, 5.- Cuenca Alamor-Lancones, 6.- Cordillera Occidental y 7.- Valle Interandino.....	54
Ilustración 2. Cobertura de agua potable y Alcantarillado en el Ecuador .....	55
Ilustración 4. Diagrama de Metodología .....	22
Ilustración 5 Punto de referencia de recolección de muestra Chimborazo.....	23
Ilustración 6 Lugar de la toma de muestra .....	23
Ilustración 7 Punto de referencia de recolección de muestra Tungurahua .....	24
Ilustración 8 Recipiente perforado para agitar los piroclastos .....	25
Ilustración 9 Ubicación de la caseta de cloración de Tamaute.....	26
Ilustración 10. Malla metálica para fondo del filtro. ....	27
Ilustración 11, Caucho hermético para la unión de mangueras y llaves.....	28
Ilustración 12.Envase para recolección de muestra de 1 Litro .....	29
Ilustración 13. Recipientes estériles de 100ml .....	29
Ilustración 14 Grafica de Cajas y Bigotes .....	31
Ilustración 15 Intervalos de Confianza.....	32
Ilustración 16 Campana de Gauss .....	32
Ilustración 17. Análisis de Regresión Polinomio Tungurahua, Tamiz 3/8, H 11.2 cm..	47
Ilustración 18. Análisis de Regresión Polinomio Chimborazo, Tamiz 4, H 11.2 cm.....	48
Ilustración 19 Análisis de Regresión Polinomio Chimborazo, Tamiz 3/8, H 11.2 cm ..	48
Ilustración 20 Aguas Cruda vs Agua filtrada Chimborazo.....	51
Ilustración 21 Agua Cruda vs Agua filtrada Tungurahua.....	52

## Índice de tablas

Tabla 1. Cobertura de agua en Ecuador.....	55
Tabla 2. Número de datos obtenidos de Quintana y Nilve.....	20
Tabla 3 Conductividad Hidráulica de suelos volcánicos de Costa Rica.....	20
Tabla 4 Rango de conductividad Hidráulica suelos chilenos.....	21
Tabla 5 Pesos unitarios secos.....	21
Tabla 6 Parámetros que considera el INGECAP.....	30
Tabla 7. Rango de relación según Evans.....	33
Tabla 8. Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 1cm.....	35
Tabla 9. Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 11.2cm.....	35
Tabla 10 Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 22.2cm.....	36
Tabla 11. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 3/8, carga hidráulica 1cm .....	36
Tabla 12. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 3/8, carga hidráulica 11.2cm.....	37
Tabla 13. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No.3/8, carga hidráulica 22.2cm.....	37
Tabla 14. Grafica Tipo - Rango de Datos Estabilizados.....	38
Tabla 15. Tungurahua tamiz No.4 Carga Hidráulica 1 cm.....	38
Tabla 16. Tungurahua tamiz No. 4 Carga Hidráulica 11.2 cm.....	39
Tabla 17. Tungurahua tamiz No. 4 Carga Hidráulica 22.2 cm.....	39
Tabla 18. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 1 cm.....	40

Tabla 19. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 11.2 cm .....	40
Tabla 20. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 22.2 cm .....	41
Tabla 21. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 1 cm.....	41
Tabla 22. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 11.2 cm.....	41
Tabla 23. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 22.2 cm.....	42
Tabla 24. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 1 cm .....	42
Tabla 25. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 11.2 cm .....	42
Tabla 26. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 22.2 cm .....	43
Tabla 27 Tabla de resumen estadístico de la Campana de Gauss para la conductividad hidráulica K .....	44
Tabla 28 ANOVA de un solo factor para datos normales.....	45
Tabla 29 Análisis de Regresión Polinomial para datos normales .....	46
Tabla 30 Datos Estadísticos de Densidades $\text{g/cm}^3$ .....	49
Tabla 31 Ensayos de Agua Cruda .....	50
Tabla 32 Porcentajes Ensayos Químicos Chimborazo .....	51
Tabla 33 Porcentaje Ensayo Químico Tungurahua .....	52

## Resumen

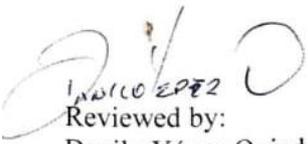
La presente investigación tuvo como objetivo determinar las propiedades mecánicas e hidráulicas de los lechos de adsorción de piroclastos del Tungurahua y Chimborazo en el tamaño de 9500 micras para el mejoramiento del agua potable de la comunidad de Tamaute. Se realizaron pruebas para medir la conductividad hidráulica  $K$  con tres cargas hidráulicas de diferentes alturas:  $H_1=1$  cm,  $H_2=11.2$  cm y  $H_3=22.2$  cm. Se realizó análisis físico químicos y microbiológicos del agua cruda y del agua filtrada por los lechos para ser comparadas. Se recopilaron datos de tesis previas que utilizaron piroclastos de los mismos volcanes retenidos en el tamiz No. 4, con la intención de comparar esos resultados con los obtenidos en este trabajo. Con la ayuda del software Minitab se determinó el rango de confiabilidad de los datos y ecuaciones que describen la relación estadística entre el tiempo y la conductividad. La densidad de los piroclastos retenidos en el tamiz N°3/8 de Chimborazo varían entre 0.674 y 0.736 y de Tungurahua entre 0.816 y 0.845. La carga Hidráulica  $H_1$  de Chimborazo es la más eficaz eliminando: color 85%, dureza total 45%, turbidez 95 %, conductividad y solidos disueltos totales el 2%.

**Palabras Clave:** Calidad del agua, piroclasto volcánico, filtros de piroclastos, propiedades hidráulicas y mecánicas.

## Abstract

The main objective of this investigation is to determine the mechanical and hydraulic properties of the pyroclasts adsorption beds of Tungurahua and Chimborazo in the size of 950 microns for the improvement of drinking water in the community of Tamaute. There were conducted tests to measure the hydraulic conductivity K with three hydraulic loads of different heights: H1 = 1 cm, H2 = 11.2 cm and H3 = 22.2 cm. Physical, chemical and microbiological analyzes of the raw water and the water filtered by the beds were performed to be compared. We used previous thesis data that used pyroclasts from the same volcanoes retained in sieve No. 4, to compare those results with the results in this work. With the help of the software, Minitab we determine the range of data reliability and equations that describe the statistical relationship between time and conductivity. The density of the pyroclasts retained in the sieve N°3 / 8 of Chimborazo affected between 0.674 and 0.736 and of Tungurahua between 0.816 and 0.845. The Hydraulic load H1 of Chimborazo is the most effective eliminating: color 85%, total hardness 45%, turbidity 95%, conductivity and total dissolved solids 2%.

**Keywords:** Water quality, volcanic pyroclasts, pyroclasts filters, hydraulic and mechanical properties.

  
Danilo Yépez Oviedo

Reviewed by:  
Danilo Yépez Oviedo  
English professor UNACH



## 1 Introducción

El Ecuador es uno de los 5 países más expuesto a procesos naturales geológicos por su ubicación geográfica y por la constitución geológica, consta de 76 volcanes (Silva, 2011), algunos de ellos no se encuentran en actividad volcánica como son el Chimborazo, el Pan de Azúcar y el Chulpatán, y otros erupcionaron en los últimos años o siguen en proceso de erupción como son el Cotopaxi, Tungurahua, Sangay y Reventador según Vallejo Ximena. (2011).

Los volcanes cercanos a la Provincia de Chimborazo que tienen relevancia por su tamaño o erupciones volcánicas es el Tungurahua encontrándose en la Cordillera Oriental y el Volcán Chimborazo ubicado en el Valle Interandino.

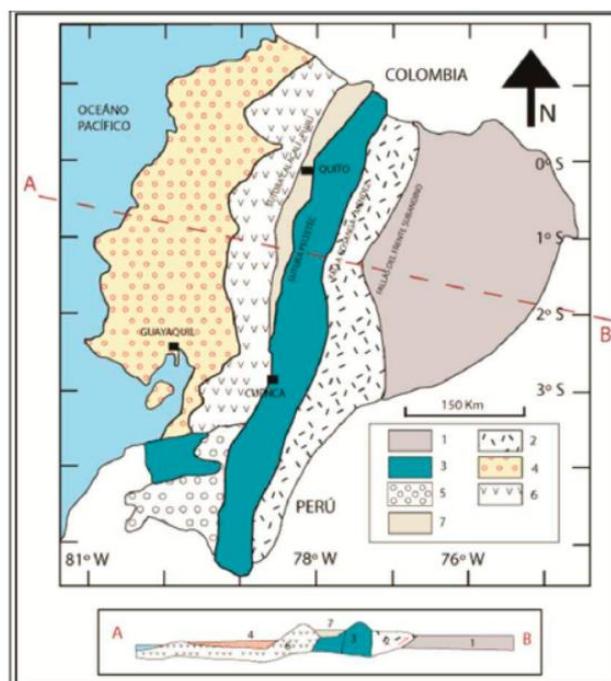


Ilustración 1 Mapa Esquemático de las regiones fisiográficas del Ecuador. 1.- Cuenca Oriente, 2.- Zona Sub-Andina, 3.- Cordillera Oriental, 4.- Costa, 5.- Cuenca Alamor-Lancones, 6.- Cordillera Occidental y 7.- Valle Interandino

Fuente: (Vallejo, 2011)

Ecuador es uno de los países más ricos en recursos hídricos de Sudamérica: dispone de 43500 m<sup>3</sup> por persona al año (2.5 veces superior al promedio mundial). Sin embargo, es el país con más retraso en la región andina en cuanto a cobertura de servicios de agua y alcantarillado (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

Tabla 1. Cobertura de agua en Ecuador

País	Cobertura de agua potable			Cibertura de alcantarillado		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
<b>Bolivia</b>	73.5	93.1	44.0	63.5	82.3	35.3
<b>Colombia</b>	90.6	98.0	73.0	83.4	97.0	51.0
<b>Ecuador</b>	70.3	81.5	51.4	58.0	70.5	37.0
<b>Perú</b>	75.4	86.8	50.7	73.7	89.5	39.5

Fuente: Organización Panamericana de la Salud (OPS).

A pesar de que el Ecuador dispone de toda esta riqueza hídrica, solo siete de cada diez ecuatorianos tienen acceso al agua potable y solo cinco de cada diez tienen alcantarillado. Pero la desigualdad en el acceso a estos servicios es más profunda en las áreas rurales y en los barrios marginales (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

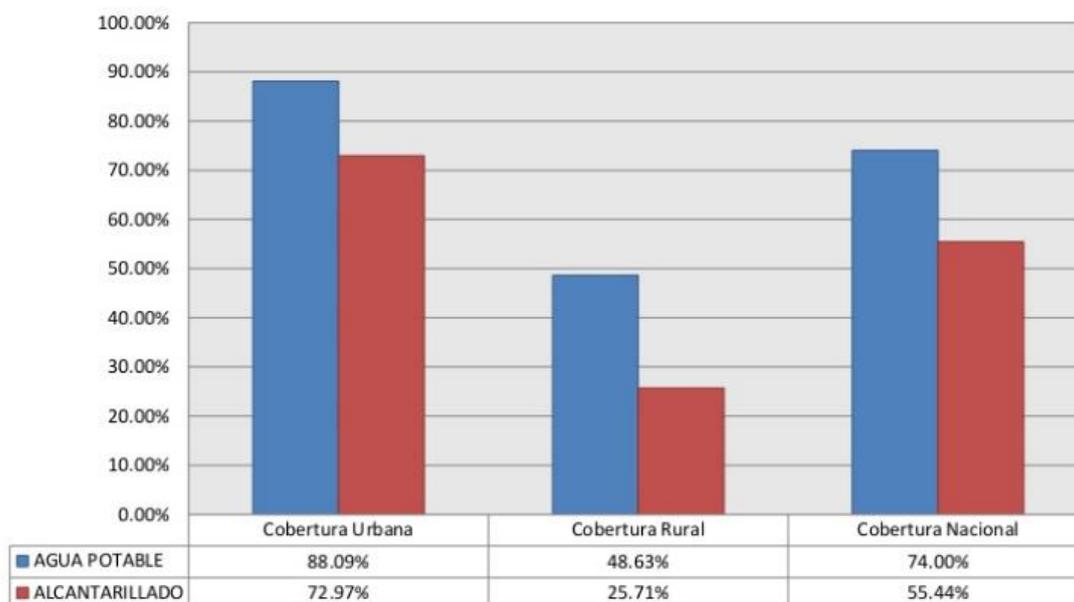


Ilustración 2. Cobertura de agua potable y Alcantarillado en el Ecuador

Fuente: INEC 2010.

Se estima que el agua en más del 70% de las cuencas hidrográficas por debajo de la cota de 2800 msnm no es apta para consumo humano directo, debido a la contaminación por microorganismos patógenos, presencia de sustancias tóxicas, contaminación con desechos sólidos, presencia de hidrocarburos, entre otras sustancias (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

Para el año 2000 A.C, en la India filtraba el agua a través del carbón vegetal y la almacenaba en contenedores de cobre para mantenerla fresca. La filtración a través de recipientes porosos e incluso la filtración con arena y grava se prescribieron durante miles de años (WaterWorld and Water & Wastewater International, 1999).

En sus escritos sobre higiene pública, Hipócrates (460 - 354 A.C) recomendó colar el agua antes de beberla, la bolsa de tela que recomendó para filtrar más tarde se conoció como la "manga de Hipócrates" (WaterWorld and Water & Wastewater International, 1999).

Los materiales rocosos provenientes del enfriamiento de la lava o aquellos que fueron expulsados en forma sólida y que se consolidaron sobre la superficie de la tierra son denominados rocas piroclásticas o tefra. (Paladines & Zamora, 2011). Estos materiales tienen propiedades particulares que los hacen diferentes a otros, su principal característica es que permiten que el agua ingrese al interior de las partículas, quedando adherida por enlaces atómicos tanto en su interior como en su exterior según Sanhueza y Palma (2011).

El material volcánico presenta características físicas importantes como su porosidad y densidad que pueden resultar efectivos para mejorar la calidad del agua mediante filtración. En Chile se llevó a cabo varias investigaciones que permitió concluir que los piroclastos pueden considerarse aptos para ser utilizados como filtros para la depuración de aguas residuales.

En base a estos conocimientos se elaboró filtros para evaluar las propiedades hidráulicas de este material y su efectividad para mejorar la calidad del agua. Los resultados pueden variar dependiendo de varios factores como el tamaño del grano o la altura del lecho. Cuanto más grande sean los granos, más agua se podrá filtrar, el material pequeño reduce la velocidad a la que circula el agua y es más probable que el filtro se sature con mayor facilidad y haya una obstrucción (Villota, 2010).

Se tomó en cuenta el material volcánico de Chimborazo y Tungurahua, con el fin de comparar ambos materiales y determinar las propiedades hidráulicas en cada uno de ellos, en lo cual se hace uso de la Ley de Darcy para determinar la conductividad hidráulica del piroclasto.

En la Universidad Nacional de Chimborazo se realizó la tesis lechos activados de rocas volcánicas de Chimborazo y Tungurahua para la retención de la dureza del agua (Bautista & Logroño, 2019), con un grano de 200 micras. Se obtuvo 10 kg de material de los volcanes Chimborazo y Tungurahua, se procedió a triturar y tamizar las muestras para conseguir el tamaño de grano deseado. Se usó 1200 gramos para tener un lecho de 21 cm de alto en un área de  $95\text{cm}^2$ , en un filtro realizado de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro. Al realizar el ensayo se mantiene constante el caudal y la carga hidráulica.

La investigación pretende definir las características mecánicas, hidráulicas y operativas de los lechos de piroclastos del Tungurahua y Chimborazo, los tamaños de los grano que serán utilizados para el diseño del filtro serán los retenidos en- el tamiz N°3/8, para el uso de agua potable de la comunidad de Tamaute. Se propone filtrar el agua con caudal constante y con carga hidráulica constante, para evaluar su conductividad hidráulica, se analizará la calidad del agua cruda antes y después de filtrarla para

determinar la eficacia del lecho filtrante y comparar los resultados con los piroclastos retenidos en la malla 4 y malla 3/8.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General:

Determinar las propiedades mecánicas e hidráulicas de los lechos de absorción de piroclastos de Chimborazo y Tungurahua, retenidos en el tamiz N° 3/8.

### 2.2 Objetivos Específico:

- Obtener la muestra de piroclastos con los tamaños de 9500 micras
- Determinar la densidad real
- Analizar los parámetros de calidad de agua potable de acuerdo a los métodos y técnicas definidas color aparente, conductividad, potencial hidrógeno pH, turbidez, sólidos disueltos totales, dureza total y coliformes totales.
- Calcular la conductividad hidráulica y el Coeficiente K de los piroclastos de Chimborazo y Tungurahua para comparar las variaciones de cada material con los retenidos por el tamiz N° 4

### 3 Estado del arte

Una ley fundamental que permite analizar la eficiencia del filtro es la ley de Darcy, es una ecuación que describe el flujo de un líquido a través de un medio poroso. Está representada por la siguiente ecuación:

$$Q = K * Seccion * \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Fuente: (Sánchez, 2017)

$Q = \text{Caudal}$

$\Delta h = \text{Diferencia de Potencial entre dos puntos del filtro (Carga Hidraulica)}$

$\Delta l = \text{Distancia del lecho}$

$K = \text{Conductividad Hidraulica}$

$\frac{\Delta h}{\Delta l} = \text{Gradiente Hidraulico}$

Para el presente proyecto el Caudal  $Q$ , la sección y la altura del lecho de piroclastos ( $\Delta l$ ) se mantuvo constantes, mientras que se modificó  $\Delta h$  para las 3 cargas hidráulicas que se van a evaluar. Uno de los objetivos es calcular la conductividad hidráulica del material analizado, por lo cual la ecuación a usarse quedaría representada de la siguiente manera.

$$K = \frac{Q * \Delta l}{Sección * \Delta h}$$

La conductividad hidráulica ( $K$ ) es la facilidad con la que un líquido circula a través de un medio poroso. Darcy realizó varios experimentos con varios materiales porosos y cambiando las variables, se pudo notar que siempre que se utilice la misma arena,  $K$

seguirá siendo constante, por lo tanto se concluyó que esa constante era característica de cada tipo de arena (Sánchez, 2017)

Según Quintana (2020) (anexo 1) y Nilve (2020) (anexo 2) realizaron ensayos con piroclastos de Tungurahua y Chimborazo respectivamente, determinaron las propiedades mecánicas e hidráulicas del material, empleando filtros con granos retenidos en el tamiz No. 4. Utilizaron las mismas condiciones que el proyecto actual, los resultados que obtuvieron son los siguientes:

Tabla 2. Número de datos obtenidos de Quintana y Nilve

<b>Carga Hidráulica</b>	<b>Números de datos</b>	
	<b>Tungurahua</b>	<b>Chimborazo</b>
<b>1 cm</b>	95	107
<b>11.2 cm</b>	84	70
<b>22.2 cm</b>	84	63

Fuente: Páez y Donoso

En el Valle central de Costa Rica se escogió cuatro sitios para la recolección de muestras volcánicas, determinaron la conductividad hidráulica saturada de campo usando el permeámetro Guelph, modelo 2800KL. El rango de variación para los productos de la meteorización de materiales volcánicos es considerablemente amplio ( $1.0E-04$  a  $1.0E-07$  m/s) (Mora, 1998).

Tabla 3 Conductividad Hidráulica de suelos volcánicos de Costa Rica

<b>Muestra</b>	<b>Litología</b>	<b>Conductividad hidráulica saturada de campo</b>	
		<b>m/s</b>	<b>cm/min</b>
<b>FI/2</b>	lahar	2.10E-07	0.00126
<b>FI/3</b>	lavas	4.30E-07	0.00258
<b>RT/2</b>	cenizas	1.30E-07	0.00078
<b>SD/2</b>	tobas	3.30E-06	0.0198
<b>SB/1</b>	tobas	1.00E-04	0.6
<b>SB/2</b>	tobas	1.50E-06	0.009

Fuente: (Mora, 1998). Modificado por: Páez Y Donoso

En Chile realizaron ensayos con métodos empíricos y pruebas de laboratorio en suelos volcánicos conocidos como Trumao, obteniendo un rango de variación:

Tabla 4 Rango de conductividad Hidráulica suelos chilenos

Método	Rangos de Conductividad hidráulica	
	cm/s	cm/min
Pruebas de Laboratorio y terreno	8.74E-05	0.0052
	6.00E-05	0.0036
Aplicación de métodos empíricos a modelos a escala	1.33E-05	0.0008
	2.47E-05	0.0015

Fuente: (Sanhueza, Palma, Valenzuela, Araneda, & Calderon, 2010) Modificado por:

Páez Y Donoso

Los pesos unitarios secos de los suelos volcánicos en Costa Rica se los considera muy bajos y es resultado al gran volumen de vacíos que cuentan los suelos que son derivados de la materialización de productos volcánicos (Mora, 1998).

Tabla 5 Pesos unitarios secos

Muestra	Litología	Peso unitario seco	Peso unitario seco
		(kN/m <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
FI/1	cenizas	9.8	0.999
FI/2	lahar	10.1	1.030
FI/3	lavas	9.7	0.989
RT/1	cenizas	12.8	1.305
RT/2	cenizas	12	1.224
RT/3	cenizas	11.5	1.173
RT/4	lavas	11.5	1.173
SD/1	tobas	11.8	1.203
SD/2	tobas	11.7	1.193
SB/1	tobas	10.1	1.030
SB/2	tobas	10.4	1.061

Fuente: (Mora, 1998). Modificado por: Páez Y Donoso

En Colombia se realizó un estudio de hidrología en la terraza de Llanogrande, se obtuvo las propiedades físicas de las cenizas volcánicas, a través de los ensayos se determinó un peso seco de 7.5 kN/m<sup>3</sup> ( 0.7665 g/cm<sup>3</sup>) (Tabon, Arias, & Jaramillo, 2003). En suelos volcánicos chilenos se obtuvo una densidad natural seca de 0.89 g/cm<sup>3</sup> (Sanhueza, Palma, Valenzuela, Araneda, & Calderon, 2010).

## 4 Metodología

En el siguiente diagrama se muestra el proceso sistemático que se siguió para realizar esta investigación:

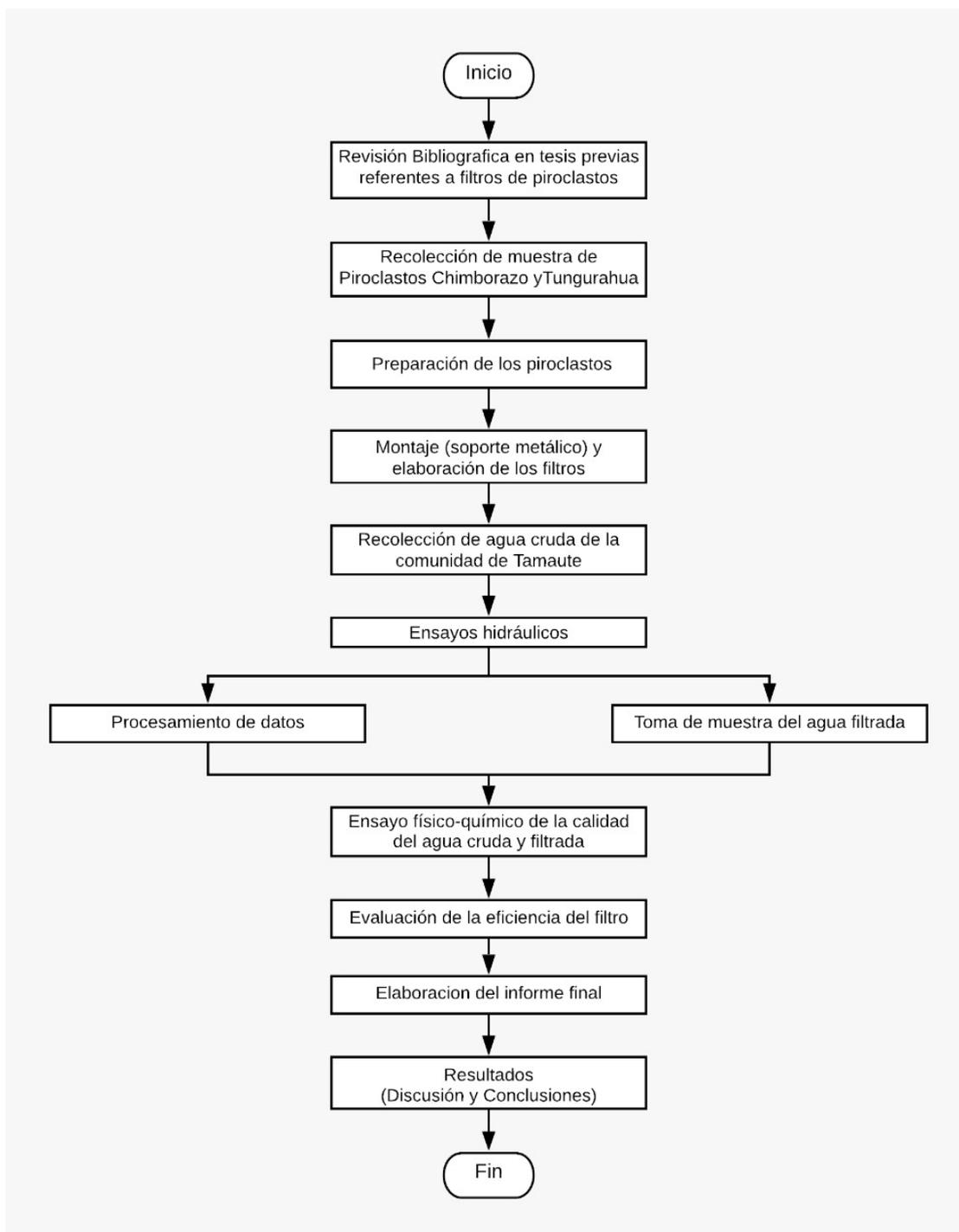


Ilustración 3. Diagrama de Metodología

Fuente: Páez Y Donoso

Para el presente trabajo se procedió con una búsqueda bibliográfica y recopilación de información. Se buscó tesis y artículos donde se analiza la elaboración de filtros, ley de Darcy y el comportamiento del material volcánico con la ayuda de la web como ResearchGate, Scopus, Repositorio digitales Universitarios y Google académico.

### Muestra de Chimborazo



Ilustración 4 Punto de referencia de recolección de muestra Chimborazo

Fuente: Google Earth. Páez Y Donoso



Ilustración 5 Lugar de la toma de muestra

Fuente: Google Earth. Páez Y Donoso

En el punto de referencia junto a la vía, se recolectó 10 kg de piroclastos de color negro, descartando los de color rojizo y blancos, muestra que se encuentra en la superficie del terreno.

### **Muestra de Tungurahua**



Ilustración 6 Punto de referencia de recolección de muestra Tungurahua

Fuente: Google Earth. Páez Y Donoso

**Coordenada x:** 783326

**Coordenada y:** 9841783

Se excava 50 cm en el punto de referencia y se toma la muestra de 10kg de material de color negro. Para obtener el tamaño deseado se coloca los materiales en la máquina trituradora de piedra, se tamiza con la ayuda de una tamizadora eléctrica y de los tamices número 4 y 3/8. Los piroclastos retenidos en el tamiz número 4 se rompe con un martillo, se vuelve a pasar por la tamizadora eléctrica, obteniendo así el material retenido en el tamiz 3/8.

## **Lavado del material**

Para retirar las impurezas adheridas a la roca volcánica se debe lavar manualmente los piroclastos mediante los siguientes pasos:

1. Colocar 2 cucharadas de sal en 5 litros de agua
2. Tomar 1 kilogramo de piroclastos
3. Depositar el piroclasto en la mezcla de agua y sal, dejar reposar por 1 minuto
4. Agitar con las manos el piroclasto
5. Botar el agua
6. Enjuagar 3 veces mientras se agita el piroclasto con abundante agua
7. Dejar secar al aire libre sobre una lona plástica y en un lugar cubierto para evitar su contaminación

8. En un recipiente plástico perforado en su parte inferior colocar la muestra de piroclastos y agitar constantemente durante 1 minuto subiendo y bajando aproximadamente 20 centímetros



Ilustración 7 Recipiente perforado para agitar los piroclastos

Fuente: Páez Y Donoso

9. Colocar la muestra en una coladora, con la ayuda de una secadora de cabello soplear durante 1 minuto mientras se agita el material.
10. Se repiten 5 veces los pasos 8 y 9.

## **Instalación del soporte, elaboración de los filtros y ensayos hidráulicos**

**Agua Cruda:** Agua de la comunidad de Tamaute, obtenida del grifo de la caseta de cloración.

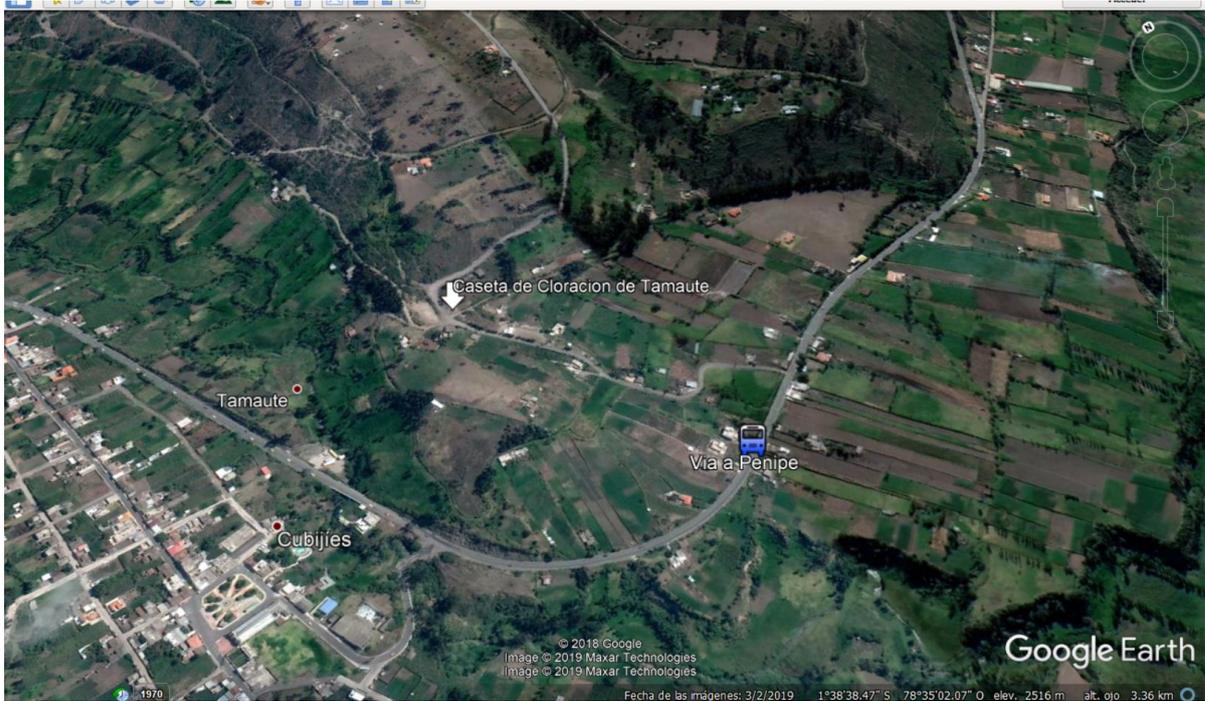


Ilustración 8 Ubicación de la caseta de cloración de Tamaute

Fuente: Google Earth. Páez Y Donoso



Partes del Soporte metálico

- 1: tapa del filtro
- 2: manguera de la tapa del filtro
- 3: llave de salida del bidón
- 4: bidón
- 5: pared de la estructura
- 6: llave desfogue carga hidráulica 1
- 7: llave desfogue carga hidráulica 2
- 8: llave desfogue carga hidráulica 3
- 9: cinta de nivel máximo de agua en el bidón
- 10: filtro
- 11: llave de desfogue del filtro
- 12: sujetadores de filtro a la pared

Ilustración 5 montaje del Soporte metálico

Fuente: Páez Y Donoso

Una vez limpio el piroclasto se procede a realizar el ensayo hidráulico. Se colocan los bidones en la parte superior de la estructura, se llena de agua del grifo hasta la marca señalada, es la altura correspondiente a 15 litros, se tapa el bidón hasta completar el montaje el filtro.

1. Colocar la rejilla metálica en el fondo de filtro, consiste en una malla número 14 y una canastilla de diámetro de 10 cm.



Ilustración 9. Malla metálica para fondo del filtro.

Fuente: Páez Y Donoso

2. Colocar 17 centímetros de lecho de piroclasto limpio y seco en el filtro

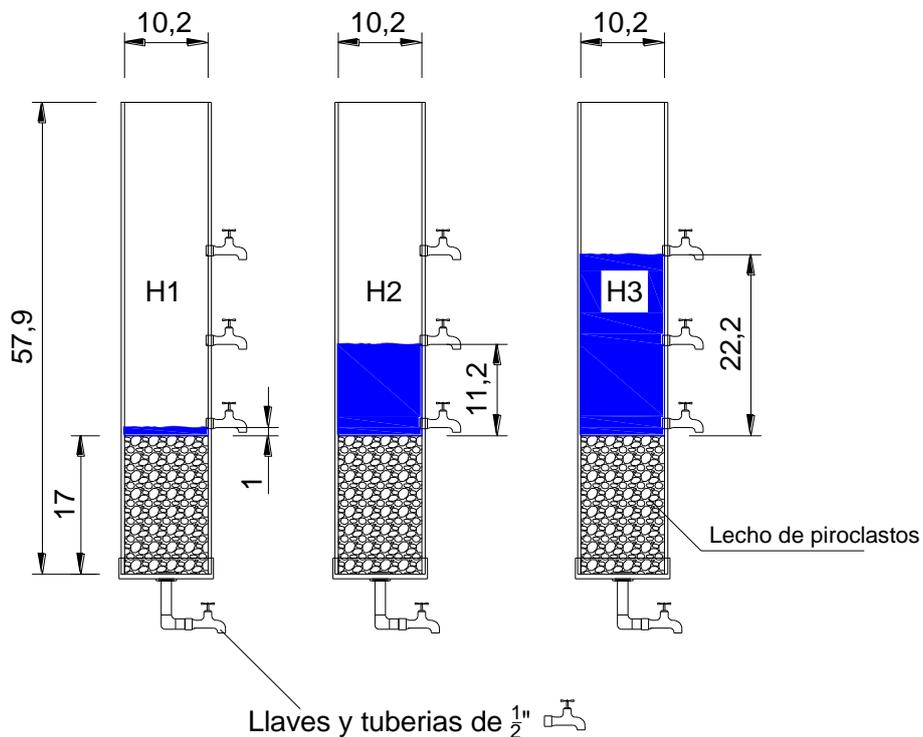


Ilustración 7 Medidas en el filtro

Fuente: Páez Y Donoso

3. Pesar el lecho de 17 cm de piroclasto con una balanza digital
4. Agitar 3 veces de arriba hacia abajo para acomodar el material.
5. Colocar la tapa del filtro
  6. En la manguera de la tapa del filtro colocar el caucho hermético y enroscar al grifo del bidón



Ilustración 10, Caucho hermético para la unión de mangueras y llaves.

Fuente: Páez Y Donoso

7. Sujetar el filtro a la pared de la estructura con los tornillos y vinchas tipo mariposa.
8. Asegurarse de tener el nivel máximo de agua en el bidón azul.
9. La llave de salida del bidón azul debe estar cerrada
10. La llave de salida del filtro debe estar abierta. De acuerdo a la carga hidráulicas que se va a realizar ya sea  $H_1$ ,  $H_2$  o  $H_3$ . Las demás deben estar cerradas
11. Retirar la tapa del bidón azul superior.
12. El bidón de recepción de agua debe estar vacío, limpio y aforado
13. Tener un cronómetro listo y las hojas de registro
14. Abrir un solo grifo del bidón azul superior
15. Tomar las medidas de los niveles del bidón de recepción cada medio minuto.

Los pasos anteriores se deberán realizar en el orden que se especifican, cada vez que se realicen los ensayos para cada carga hidráulica  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$

- $H_1=1\text{cm}$ , altura desde el piroclasto hasta la base de la primera llave del filtro

- $H_2=11.2$  cm, altura desde el piroclasto hasta la base de la segunda llave del filtro
- $H_3=22.2$  cm, altura desde el piroclasto hasta la base de la tercera llave del filtro

### **Recolección de las muestras de agua**

La recolección del agua cruda será previa a realizar los ensayos.

Para la recolección de las muestras se utilizó envases plásticos transparentes con capacidad de 1 litro que contienen agua purificada y recipientes estériles de 100ml



Ilustración 11. Envase para recolección de muestra de 1 Litro

Ilustración 12. Recipientes estériles de 100ml

Fuente: Páez y Donoso

1. Abrir el envase y botar el agua purificada.
2. Enjuagar el envase 2 veces con el agua de la muestra que se va a tomar.
3. Recolectar la muestra y sellar el envase.
4. En el recipiente de 100ml enjuagar 2 veces con el agua de la muestra que se va a tomar
5. Tomar la muestra y sellar el recipiente.
6. Etiquetar cada envase y recipiente con el nombre de la muestra y la carga hidráulica correspondiente

7. Los envases son transportados al Laboratorio Químico de la Universidad Nacional de Chimborazo para su análisis.

### **Ensayos Físico – Químicos**

Para la determinación de la calidad del agua se ensayó 7 parámetros, 5 de ellos de acuerdo al *Índice de gestión y calidad del agua potable* INGECAP, que es un valor cuantitativo representativo del agua potable de la ciudad investigada y de las gestiones de control de calidad realizada por la institución responsable. Este valor es expresado en porcentaje (Arellano, Gonzalez, & Gavilanes, 2012), el parámetro extra que se analizó es la Conductividad.

Tabla 6 Parámetros que considera el INGECAP

<b>Parámetro</b>	<b>Peso Relativo</b>
<b>1</b> Color	0.150
<b>2</b> Turbiedad	0.150
<b>3</b> pH	0.150
<b>4</b> Cloro Residua	0.200
<b>5</b> Coliforme Tot	0.200
<b>6</b> STD	0.150
Suma	1.000

Fuente: (Arellano, Gonzalez, & Gavilanes, 2012)

Se emplea el software Minitab para determinar si los datos tienen una distribución normal, si es así se determina una ecuación de regresión y un análisis de ANOVA, caso contrario se determina mediante cajas y Bigotes los datos anómalos y se realiza estadística básica con la ayuda de Microsoft Excel.

La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si esta diferencia observada es grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de normalidad de la población. Si el valor p de esta prueba es menor que el

nivel de significancia ( $\alpha$ ) elegido (0.05 o 0.1), se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal. (Soporte de Minitab 18, 2019)

Las cajas de rango intercuartil en una gráfica de caja representan el 50% intermedio de los datos. Los bigotes se extienden hasta los puntos de datos máximo y mínimo dentro de alturas de caja de 1.5. (Soporte de Minitab 18, 2019)

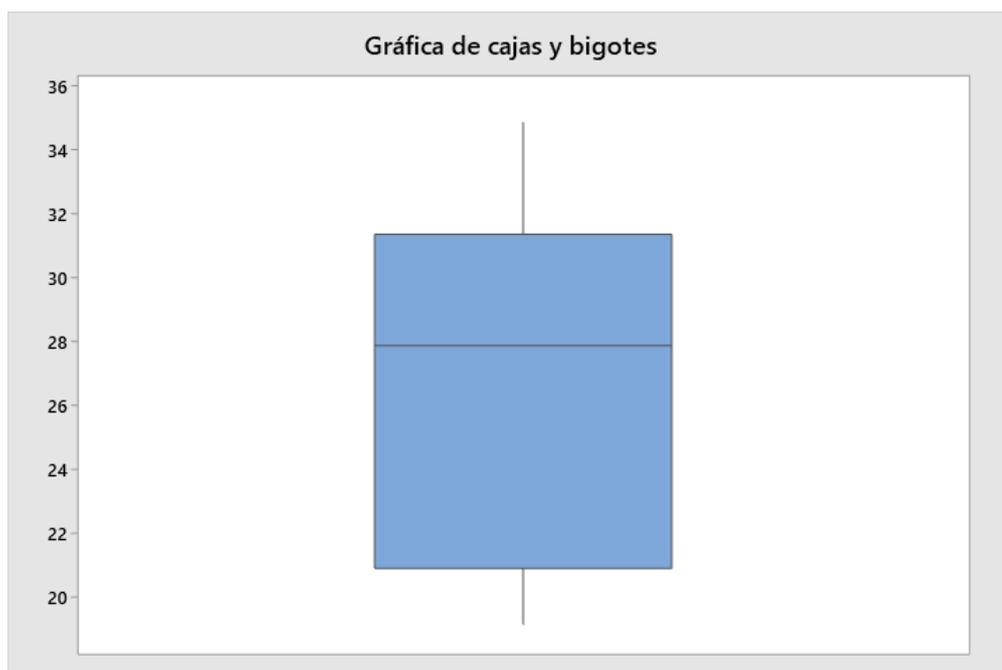


Ilustración 13 Grafica de Cajas y Bigotes

Fuente: Páez y Donoso

Cuando los datos no son normales se realiza el análisis por el método de cajas y bigotes, en el cual se eliminan los valores que se encuentran demasiado dispersos, con esto se vuelve a realizar el test de normalidad y si el resultado sigue siendo no normal se procede a analizar con estadística básica haciendo uso de la Campana de Gauss.

La campana de Gauss permite observar de forma gráfica la cantidad de datos que se encuentran dentro y fuera de un rango de confianza, mejor conocidos como intervalos de confianza. Para el análisis de los intervalos se consideró un porcentaje de confianza del

95% que es el más común al realizar este tipo de análisis. La media y la desviación estándar son necesarios en este método, los cuales se obtienen del programa Minitab

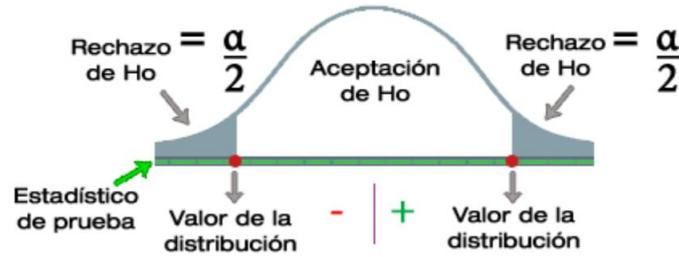


Ilustración 14 Intervalos de Confianza

Fuente: Google imágenes

La media, la moda y la mediana coinciden en el centro de la curva y es aquí donde se encuentra el valor más alto de la campana.

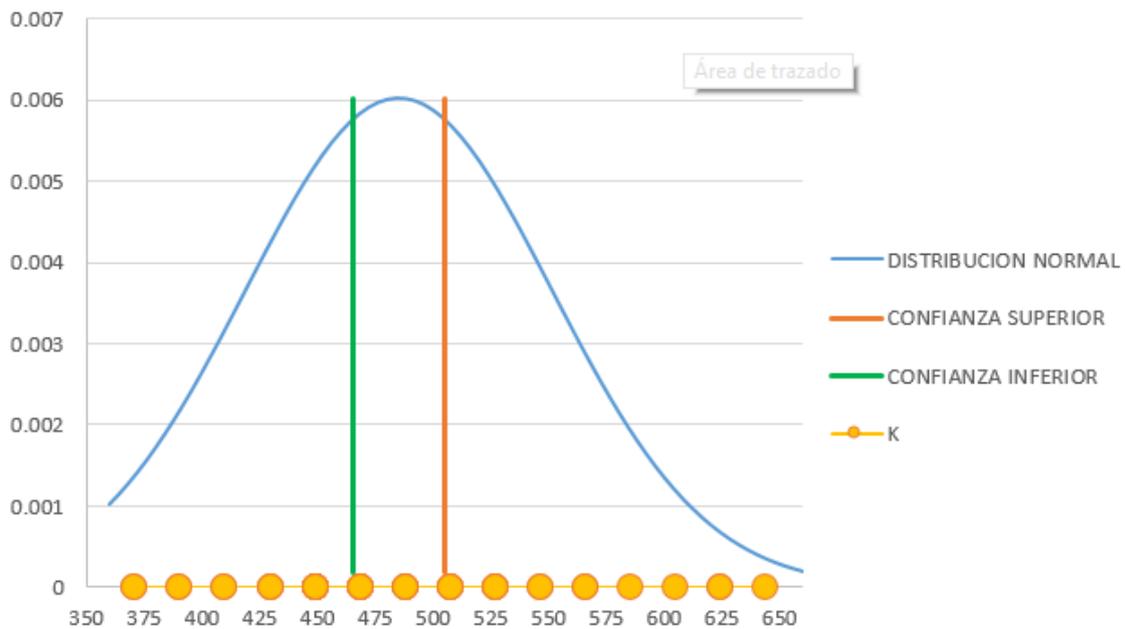


Ilustración 15 Campana de Gauss

Fuente: Páez y Donoso

El límite de confianza superior (naranja) y el límite de confianza inferior (verde) se obtienen sumando la media de los datos más el intervalo de confianza determinado, pudiéndose así con esto determinar la cantidad de datos fuera del límite de confianza y

verificar si los valores sirven para obtener una media representativa para la mayoría de situaciones.

Para los datos que siguen una distribución normal se obtiene una regresión ajustada, resultando en una ecuación que sirve para describir la relación estadística entre el tiempo y la conductividad hidráulica. El método muestra una gráfica de dispersión de los datos con una línea de regresión que representa la ecuación de regresión. (Soporte de Minitab 18, 2019). Una vez ingresado los datos en el programa da como resultado: resumen de modelo, demostrando que tan ajustado es el modelo.

La tabla de resumen de modelo ayudó para determinar si el modelo se ajusta a los datos, donde se encuentra la desviación estándar  $S$ , el porcentaje de variación de la respuesta el  $R^2$  y  $R^2$  ajustado que es el porcentaje de variación en la respuesta ajustada para el número de predictores.

El  $R^2$  determina qué tan bien se ajusta el modelo a los datos, mientras mayor sea el valor de  $R^2$ , mejor se ajustará el modelo a los datos. El  $R^2$  siempre está entre 0% y 100% (Soporte de Minitab 18, 2019). Para determinar la relación de los datos se ocupará la tabla de Evans.

Tabla 7. Rango de relación según Evans

Rango R	Relación
0	No existe correlación
0.00 a 0.10	Correlación débil
0.10 a 0.50	Correlación media
0.50 a 0.75	Correlación considerable
0.75 a 0.90	Correlación muy fuerte
0.90 a 1	Correlación perfecta

Nota: la tabla se empleó para validar el modelo usando en esa investigación

Fuente: (Hernandez, Fernández, & Baptista, 2006)

Para evaluar la importancia de los datos que siguen una distribución normal se realiza un análisis de varianza (ANOVA) (Soporte de Minitab 18, 2019), ingresando como

respuesta los datos de la conductividad hidráulica y como factor el tiempo. Se plantea la hipótesis nula: la media es significativa, y la hipótesis alterna: la media no es significativa. Analizando con el valor p si es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis nula caso contrario se la rechaza y se acepta la hipótesis alterna.

A los valores de las densidades se aplicó estadística básica obteniendo su límite inferior, superior y la media, se realiza un análisis de varianza para analizar las densidades de cada caso, aceptando o rechazando la hipótesis nula. Al aceptar la hipótesis alterna se realiza la comparación de Tukey.

Tukey es utilizado en ANOVA para establecer intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por familia en un nivel especificado. (Soporte de Minitab 18, 2019). Las medias de las agrupaciones que no comparten una misma letra son significativamente diferentes.

## 5 Discusión y resultados

### 5.1 Conductividad Hidráulica

Los piroclastos de Chimborazo y Tungurahua con material retenido en el tamiz No. 4 y en el tamiz 3/8 fueron ensayadas a 3 cargas hidráulicas diferentes, por cada carga hidráulica se generó una tabla con los valores k y sus respectivas gráficas, es decir se tiene un total de 12 tablas (3 de Chimborazo tamiz N°4, 3 de Tungurahua tamiz N°4, 3 de Chimborazo tamiz N°3/8 y 3 de Tungurahua tamiz N°3/8), las cuales se van a comparar.

Tabla 8. Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 1cm

CARGA HIDRÁULICA DE 1 cm						
densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.69	0.70	0.89	0.82	0.83	0.89
muestra	1	2	3	4	5	6
tiempo acumulado (min)	k (cm/min)					
0.5						
1.0	565.6	702.2	663.1	721.7	741.2	663.1
1.5	468.1	429.1	643.6	487.6	624.1	585.1
2.0	448.6	487.6	663.1	507.1	624.1	663.1
2.5	507.1	624.1	682.6	507.1	643.6	702.2
3.0	565.6	507.1	624.1	507.1	526.6	604.6
3.5	526.6	526.6	643.6	429.1	585.1	643.6
4.0	526.6	526.6	624.1	468.1	526.6	624.1
4.5	526.6	546.1	526.6	429.1	507.1	585.1
5.0	526.6	487.6		448.6	312.1	
5.5	409.6	331.6		409.6		
6.0				253.6		

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 9. Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 11.2cm

CARGA HIDRÁULICA DE 11.2 cm						
densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.81	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81
muestra	1	2	3	4	5	6
tiempo acumulado (min)	k (cm/min)					
0.5						
1.0	83.6	76.6	74.9	67.9	73.1	59.2
1.5	57.5	69.7	48.8	48.8	48.8	50.5
2.0	54.0	41.8	45.3	47.0	45.3	50.5
2.5	59.2	59.2	55.7	52.2	54.0	54.0
3.0	52.2	57.5	52.2	55.7	52.2	55.7
3.5	50.5	50.5	47.0	45.3	47.0	45.3
4.0	54.0	55.7	50.5	47.0	48.8	48.8
4.5	50.5	52.2	48.8	45.3	47.0	50.5
5.0			41.8	43.5	47.0	45.3

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 10 Resultados conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 3/8, carga hidráulica 22.2cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 22.2 cm</b>						
<b>densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.81	0.88	0.80	0.81	0.89	0.81
<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
<b>0.5</b>						
<b>1.0</b>						
<b>1.5</b>	42.2	41.3	51.0	49.2	47.4	48.3
<b>2.0</b>	22.0	23.7	22.8	26.4	25.5	25.5
<b>2.5</b>	21.1	20.2	20.2	24.6	22.8	24.6
<b>3.0</b>	23.7	22.8	21.1	26.4	25.5	25.5
<b>3.5</b>	23.7	23.7	22.8	25.5	25.5	21.1
<b>4.0</b>	18.4	19.3	19.3	22.8	25.5	20.2
<b>4.5</b>	18.4	18.4	18.4	24.6	26.4	23.7
<b>5.0</b>	20.2	21.1	18.4	22.8	22.8	24.6
<b>5.5</b>	19.3	18.4	18.4			

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 11. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 3/8, carga hidráulica 1cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 1 cm</b>						
<b>densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.69	0.70	0.70	0.72	0.71	0.68
<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
<b>0.5</b>		468.1	351.1	390.1	429.1	487.6
<b>1.0</b>	819.2	741.2	643.6	682.6	702.2	643.6
<b>1.5</b>	468.1	604.6	487.6	526.6	526.6	643.6
<b>2.0</b>	448.6	643.6	487.6	507.1	487.6	624.1
<b>2.5</b>	448.6	663.1	507.1	546.1	565.6	546.1
<b>3.0</b>	468.1	585.1	526.6	507.1	487.6	565.6
<b>3.5</b>	468.1	624.1	448.6	448.6	448.6	487.6
<b>4.0</b>	409.6	604.6	448.6	507.1	468.1	526.6
<b>4.5</b>	429.1	526.6	468.1	448.6	448.6	526.6
<b>5.0</b>	429.1		429.1	468.1	448.6	468.1
<b>5.5</b>	390.1		409.6	370.6	390.1	
<b>6.0</b>	448.6		370.6			
<b>6.5</b>	253.6					

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 12. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 3/8, carga hidráulica 11.2cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 11.2 cm</b>						
<b>densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.68	0.72	0.71	0.67	0.71	0.68
<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
<b>0.5</b>						
<b>1.0</b>	71.4	83.6	74.9	61.0	81.8	81.8
<b>1.5</b>	43.5	24.4	52.2	48.8	54.0	52.2
<b>2.0</b>	45.3	83.6	45.3	45.3	54.0	54.0
<b>2.5</b>	41.8	50.5	48.8	41.8	61.0	50.5
<b>3.0</b>	41.8	54.0	54.0	50.5	47.0	55.7
<b>3.5</b>	45.3	45.3	47.0	36.6	50.5	47.0
<b>4.0</b>	36.6	52.2	50.5	36.6	52.2	48.8
<b>4.5</b>	40.1	48.8	52.2	40.1	52.2	45.3
<b>5.0</b>	36.6	29.6	43.5	36.6		33.1
<b>5.5</b>	40.1			38.3		
<b>6.0</b>	27.9			29.6		

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 13. Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No.3/8, carga hidráulica 22.2cm

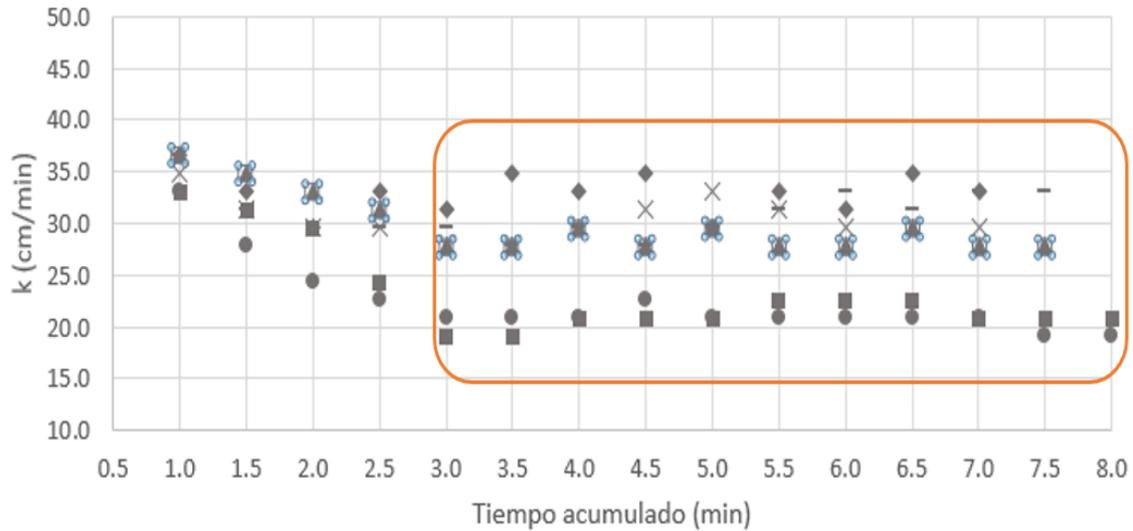
<b>CARGA HIDRÁULICA DE 22.2 cm</b>						
<b>densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.74	0.71	0.71	0.68	0.72	0.70
<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
<b>0.5</b>						
<b>1.0</b>						
<b>1.5</b>	43.0	45.7	42.2	45.7	41.3	46.6
<b>2.0</b>	23.7	22.0	22.0	22.0	22.8	22.8
<b>2.5</b>	20.2	21.1	20.2	22.0	21.1	21.1
<b>3.0</b>	22.8	21.1	22.0	22.0	23.7	21.1
<b>3.5</b>	22.0	22.8	22.0	22.8	23.7	23.7
<b>4.0</b>	20.2	20.2	19.3	20.2	19.3	20.2
<b>4.5</b>	19.3	18.4	18.4	19.3	18.4	19.3
<b>5.0</b>	20.2	20.2	18.4	20.2	19.3	20.2
<b>5.5</b>	18.4	18.4	18.4	19.3	19.3	18.4
<b>6.0</b>		14.1	17.6		12.3	

Fuente: Páez y Donoso

Al filtrar el agua por el lecho de los piroclastos llega un punto en el cual se saturan los poros del material volcánico y ya no se adsorbe más iones en sus superficies, en este punto el caudal que circula se estabiliza. El dato permite al Ingeniero determinar cuál es el tiempo funcional del filtro antes de que sea necesario limpiar o cambiar el lecho de piroclastos.

Al considerar los valores iniciales en el análisis estadístico existe una dispersión de datos mayor, dificultando la comparación entre los piroclastos ya que distorsiona el valor real de la conductividad.

Tabla 14. Grafica Tipo - Rango de Datos Estabilizados



Fuente: Páez y Donoso

Se tomará en cuenta a los datos una vez que se estabilizó la conductividad hidráulica, tanto para los datos del tamiz No. 4 como del tamiz No. 3/8 obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 15. Tungurahua tamiz No.4 Carga Hidráulica 1 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
tiempo acumulado (min)	k (cm/min)					
3.5	390.1	351.1	331.6	331.6	351.1	429.1
4.0	409.6	370.6	351.1	331.6	351.1	409.6
4.5	390.1	312.1	292.6	370.6	331.6	409.6
5.0	331.6	331.6	292.6	351.1	312.1	351.1
5.5	312.1	351.1	331.6	331.6	292.6	370.6
6.0	292.6	312.1	292.6	351.1	331.6	370.6
6.5	312.1	331.6	292.6	331.6	292.6	351.1
7.0	273.1	331.6	312.1	351.1	273.1	351.1
7.5	331.6	273.1	331.6	351.1	292.6	331.6
8.0	331.6	214.5	370.6	351.1	273.1	

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 16. Tungurahua tamiz No. 4 Carga Hidráulica 11.2 cm

<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
3.0	19.2	20.9	31.3	29.6	27.9	27.9
3.5	19.2	20.9	34.8	27.9	27.9	27.9
4.0	20.9	20.9	33.1	29.6	29.6	29.6
4.5	20.9	22.6	34.8	27.9	31.3	27.9
5.0	20.9	20.9	29.6	29.6	33.1	29.6
5.5	22.6	20.9	33.1	31.3	31.3	27.9
6.0	22.6	20.9	31.3	33.1	29.6	27.9
6.5	22.6	20.9	34.8	31.3	29.6	29.6
7.0	20.9	20.9	33.1	33.1	29.6	27.9
7.5	20.9	19.2		33.1		27.9
8.0	20.9	19.2				

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 17. Tungurahua tamiz No. 4 Carga Hidráulica 22.2 cm

<b>Fecha</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
3.5	13.18	14.06	12.30	8.83	14.06	15.81
4.0	14.06	12.30	13.18	11.47	14.94	14.94
4.5	13.18	14.06	14.94	11.47	17.57	14.94
5.0	12.30	13.18	14.06	10.59	16.69	14.94
5.5	13.18	15.81	14.06	13.24	13.18	13.18
6.0	14.94	11.42	11.42	14.12	11.42	14.94
6.5	14.06	12.30	12.30	9.71	14.06	13.18
7.0	13.18	12.30	11.42	11.47	14.06	12.30
7.5	15.81	13.18	13.18	10.59	13.18	13.18
8.0	13.18	13.18	13.18	11.47	12.30	13.18

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 18. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 1 cm

<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k(cm/min)</b>					
4.0	370.58	351.08	331.57	351.08	292.56	351.08
4.5	331.57	331.57	312.07	351.08	312.07	331.57
5.0	312.07	331.57	351.08	312.07	253.56	292.56
5.5	312.07	331.57	351.08	312.07	273.06	273.06
6.0	292.56	312.07	292.56	331.57	292.56	312.07
6.5	370.58	351.08	292.56	312.07	273.06	312.07
7.0	331.57	273.06	312.07	331.57	292.56	292.56
7.5	292.56	331.57	273.06	312.07	253.56	292.56
8.0	370.58	273.06	331.57	331.57	312.07	253.56
8.5	351.08	214.55	292.56	253.56	273.06	253.56
9.0		117.03	292.56	175.54	175.54	234.05

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 19. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 11.2 cm

<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k(cm/min)</b>					
3.0	33.09	34.83	47.02	38.31	38.31	41.79
3.5	33.09	33.09	41.79	41.79	41.79	40.05
4.0	34.83	34.83	36.57	33.09	33.09	36.57
4.5	31.35	33.09	40.05	36.57	36.57	34.83
5.0	33.09	27.86	40.05	36.57	41.79	40.05
5.5	31.35	33.09	38.31	36.57	36.57	36.57
6.0	34.83	31.35	36.57	33.09	31.35	33.09
6.5	27.86	33.09				
7.0	24.38	26.12				

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 20. Chimborazo tamiz No. 4 Carga Hidráulica 22.2 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k(cm/min)</b>					
4.0	18.45	17.57	14.06	21.96	18.45	18.45
4.5	20.21	18.45	15.81	19.33	20.21	16.69
5.0	16.69	18.45	16.69	20.21	17.57	15.81
5.5	16.69	16.69	15.81	21.09	20.21	16.69
6.0	19.33	17.57	18.45	19.33	15.81	16.69
6.5		16.69	16.69			15.81

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 21. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 1 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.0	448.6	643.6	487.6	507.1	487.6	624.1
2.5	448.6	663.1	507.1	546.1	565.6	546.1
3.0	468.1	585.1	526.6	507.1	487.6	565.6
3.5	468.1	624.1	448.6	448.6	448.6	487.6
4.0	409.6	604.6	448.6	507.1	468.1	526.6
4.5	429.1	526.6	468.1	448.6	448.6	526.6
5.0	429.1		429.1	468.1	448.6	468.1
5.5	390.1		409.6	370.6	390.1	
6.0	448.6		370.6			

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 22. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 11.2 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.0	45.3	83.6	45.3	45.3	54.0	54.0
2.5	41.8	50.5	48.8	41.8	61.0	50.5
3.0	41.8	54.0	54.0	50.5	47.0	55.7
3.5	45.3	45.3	47.0	36.6	50.5	47.0
4.0	36.6	52.2	50.5	36.6	52.2	48.8
4.5	40.1	48.8	52.2	40.1	52.2	45.3
5.0	36.6	29.6	43.5	36.6		33.1
5.5	40.1			38.3		

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 23. Tungurahua tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 22.2 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.0	23.7	22.0	22.0	22.0	22.8	22.8
2.5	20.2	21.1	20.2	22.0	21.1	21.1
3.0	22.8	21.1	22.0	22.0	23.7	21.1
3.5	22.0	22.8	22.0	22.8	23.7	23.7
4.0	20.2	20.2	19.3	20.2	19.3	20.2
4.5	19.3	18.4	18.4	19.3	18.4	19.3
5.0	20.2	20.2	18.4	20.2	19.3	20.2
5.5	18.4	18.4	18.4	19.3	19.3	18.4
6.0		14.1	17.6		12.3	

Fuente: Donoso Felipe y Páez Adriana

Tabla 24. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 1 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.5	507.1	624.1	682.6	507.1	643.6	702.2
3.0	565.6	507.1	624.1	507.1	526.6	604.6
3.5	526.6	526.6	643.6	429.1	585.1	643.6
4.0	526.6	526.6	624.1	468.1	526.6	624.1
4.5	526.6	546.1	526.6	429.1	507.1	585.1
5.0	526.6	487.6		448.6	312.1	

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 25. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 11.2 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.5	59.2	59.2	55.7	52.2	54.0	54.0
3.0	52.2	57.5	52.2	55.7	52.2	55.7
3.5	50.5	50.5	47.0	45.3	47.0	45.3
4.0	54.0	55.7	50.5	47.0	48.8	48.8
4.5	50.5	52.2	48.8	45.3	47.0	50.5
5.0			41.8	43.5	47.0	45.3

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 26. Chimborazo tamiz No. 3/8 Carga Hidráulica 22.2 cm

muestra	1	2	3	4	5	6
<b>Tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
2.0	22.0	23.7	22.8	26.4	25.5	25.5
2.5	21.1	20.2	20.2	24.6	22.8	24.6
3.0	23.7	22.8	21.1	26.4	25.5	25.5
3.5	23.7	23.7	22.8	25.5	25.5	21.1
4.0	18.4	19.3	19.3	22.8	25.5	20.2
4.5	18.4	18.4	18.4	24.6	26.4	23.7
5.0	20.2	21.1	18.4	22.8	22.8	24.6
5.5	19.3	18.4	18.4			

Fuente: Páez y Donoso

### Resultados Campana de Gauss para datos No Normales

Después del análisis estadístico con Minitab se determinó que 9 casos eran no normales, por lo cual se realizó el análisis de estos casos a través de las campanas de Gauss, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 27 Tabla de resumen estadístico de la Campana de Gauss para la conductividad hidráulica K

NUMERO DE DATOS	TAMIZ	CARGA HIDRAULICA	VOLCAN	LIMITE INFERIOR	MEDIA	LIMITE SUPERIOR	DESVIACION ESTANDAR	# DATOS DENTRO DEL RANGO	% VALORES DENTRO DE RANGO	# DATOS FUERA DE RANGO
46	3/8	1 cm	Tungurahua	465.39	485.06	504.73	66.25	10	21.74%	36
54	4	1 cm	Tungurahua	321.61	329.77	337.93	29.9	16	29.63%	38
33	3/8	1 cm	Chimborazo	527.64	552.6	577.56	70.4	2	6.06%	31
61	4	1 cm	Chimborazo	301.08	309.51	317.94	32.92	13	21.31%	48
60	4	11.2 cm	Tungurahua	25.64	26.934	28.23	5.013	11	18.33%	49
49	3/8	22.2 cm	Tungurahua	20.16	20.655	21.15	1.712	15	30.61%	34
56	4	22.2 cm	Tungurahua	12.88	13.233	13.58	1.305	18	32.14%	38
45	3/8	22.2 cm	Chimborazo	21.62	22.413	23.21	2.64	8	17.78%	37
33	4	22.2 cm	Chimborazo	17.19	17.838	18.48	1.818	9	27.27%	24

Fuente: Donoso y Páez

Al analizar los datos de la distribución de las campanas de Gauss se puede determinar un rango de confiabilidad dados por un límite inferior y un límite superior, el porcentaje de valores que se encuentran dentro del rango nos indica la cantidad de datos confiables en cada caso, la media de los datos permite comparar los valores obtenidos en cada situación, el ingeniero podrá utilizar los datos K dentro del rango de confiabilidad para

poder realizar cálculos con resultados aproximados. Debido a la cantidad de datos fuera de los límites de confianza no se puede determinar una media representativa para todos los valores planteados.

### **Anova y Análisis de Regresión para datos normales**

Se verificó que 3 casos tienen datos normales por lo cual se procedió al análisis estadístico utilizando Anova de un solo factor y Análisis de Regresión Polinomial

Tabla 28 ANOVA de un solo factor para datos normales

<b>Tamiz</b>	<b>Carga hidráulica</b>	<b>Volcán</b>	<b>Desviación estándar (S)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> (ajustado)</b>	<b>Relación</b>
3/8	11.2	Tungurahua	5.897	0.31	0.27	<b>media</b>
4	11.2	Chimborazo	3.512	0.43	0.39	<b>media</b>
3/8	11.2	Chimborazo	3.115	0.56	0.52	<b>considerable</b>

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 29 Análisis de Regresión Polinomial para datos normales

<b>Tamiz</b>	<b>Carga hidráulica</b>	<b>Volcán</b>	<b>Ecuación</b>	<b>p-valor</b>	<b>Hipotesis nula</b>	<b>Hipotesis alterna</b>
3/8	11.2	Tungurahua	$K = 40.08 + 7.367 t - 1.479 t^2$	0.006	rechaza	aceptada
4	11.2	Chimborazo	$K = 113.9 - 50.46 t + 10.89 t^2 - 0.7847 t^3$	0.002	rechaza	aceptada
3/8	11.2	Chimborazo	$K = 183.4 - 103.6 t + 27.08 t^2 - 2.378 t^3$	0.000	rechaza	aceptada

ξ

Fuente: Páez y Donoso

De los análisis se observó que los datos se encuentran relativamente dispersos, esto puede ser la principal causa para que en este caso se observe un valor de  $R^2$  bajo, demostrando que el modelo no se ajusta de forma adecuada a los datos. El valor p es menor a  $\alpha=0.05$ , rechazando la hipótesis nula y aceptando que la media no es significativa para la muestra.

En las gráficas de Regresión Polinomial, especialmente en las ecuaciones cúbicas se puede distinguir una zona de aproximadamente 2 minutos en la que la conductividad hidráulica se estabiliza, es decir, el lecho de piroclastos se satura, después de esto la conductividad hidráulica disminuye, por lo cual este periodo de estabilización ayudará al ingeniero a determinar el tiempo en el que el filtro deberá ser limpiado o reemplazado según sea el caso.

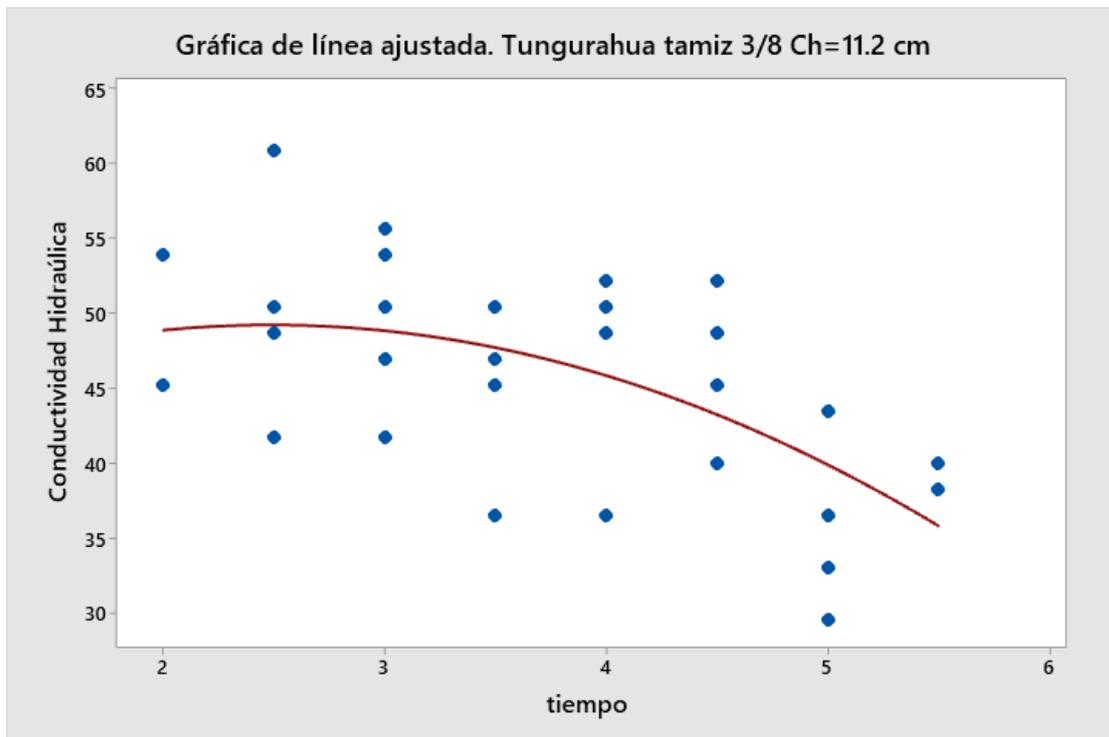


Ilustración 16. Análisis de Regresión Polinomio Tungurahua, Tamiz 3/8, H 11.2 cm

Fuente: Páez y Donoso

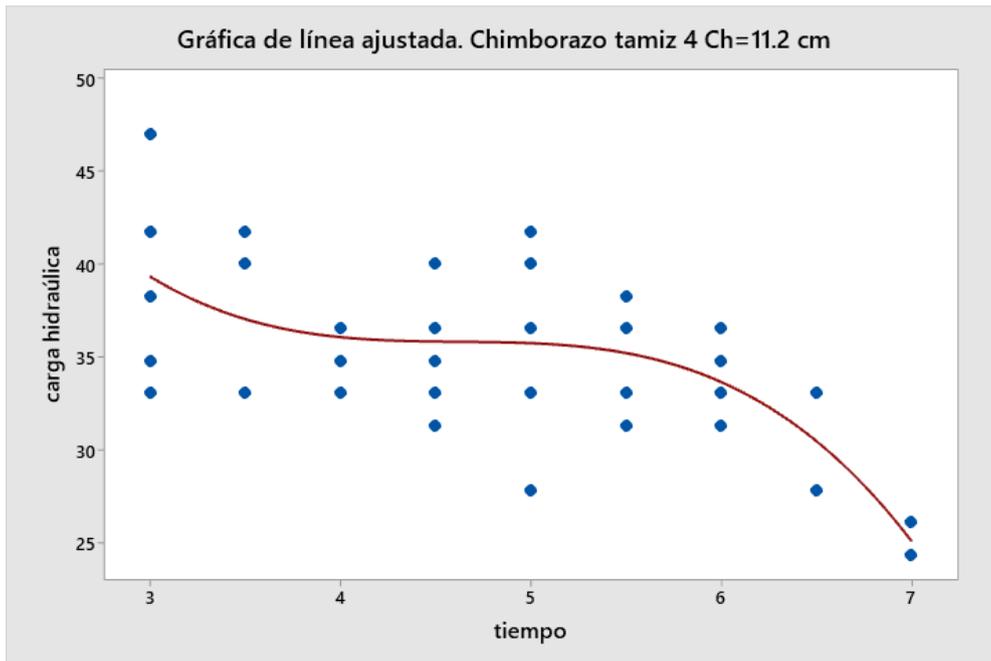


Ilustración 17. Análisis de Regresión Polinomio Chimborazo, Tamiz 4, H 11.2 cm

Fuente: Páez y Donoso

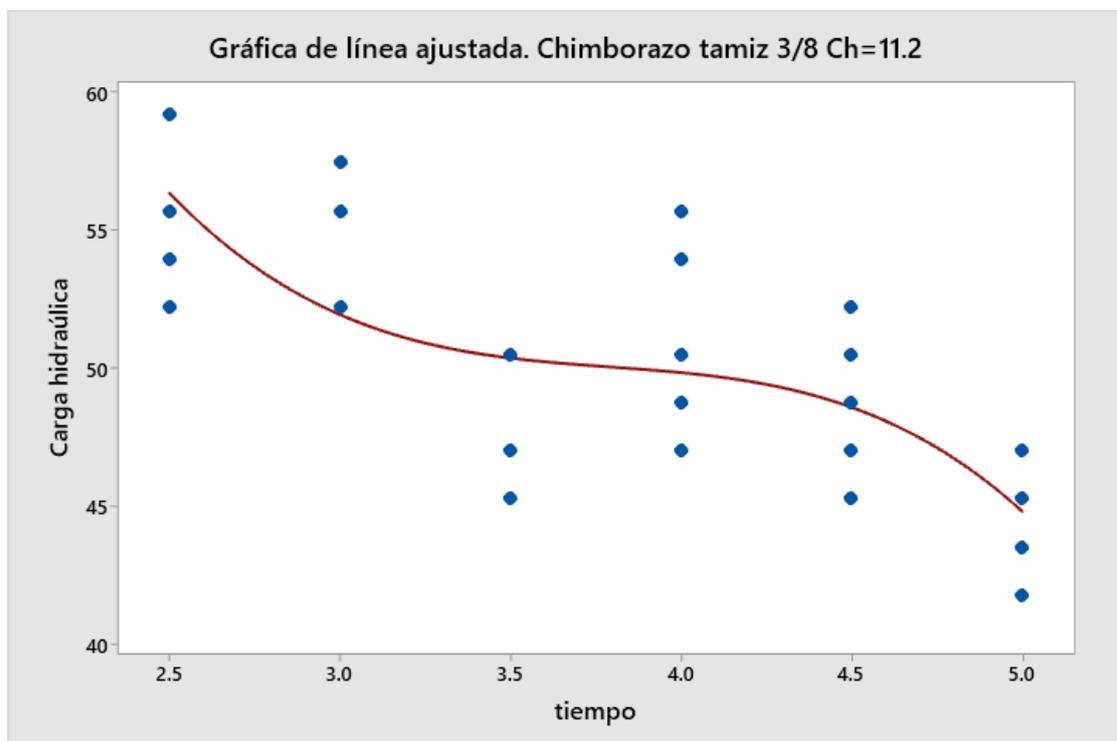


Ilustración 18 Análisis de Regresión Polinomio Chimborazo, Tamiz 3/8, H 11.2 cm

Fuente: Páez y Donoso

Las conductividades hidráulicas de los piroclastos de Chimborazo y Tungurahua, tanto del tamiz No. 4 como del tamiz 3/8, tienen un valor mayor a los datos determinados por materiales de otros países, esto es debido al tamaño que se utilizó en este trabajo ya que al tener diámetros de grano relativamente grandes la conductividad hidráulica aumenta.

## 5.2 Densidades

Tabla 30 Datos Estadísticos de Densidades g/cm<sup>3</sup>

Tamiz	VOLCAN	Desviación estándar (S)	Media	Limite inferior	limite superior	Agrupación		
4	Tungurahua	0.02615	0.82134	0.76883	0.81563		B	
4	Chimborazo	0.0481	0.9149	0.8646	0.9522	A		
3/8	Tungurahua	0.02041	0.70116	0.67381	0.73644			C
3/8	Chimborazo	0.0549	0.8156	0.8063	0.845		B	

R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	Relación	Desviación estándar agrupada (S)	p-valor	Hipotesis nula	Hipotesis alterna
0.79	0.77	muy fuerte	0.04009	0.000	rechaza	aceptada

Fuente: Páez y Donoso

Al comparar las 4 medias obtenidas, el valor p es menor al valor de significancia  $\alpha=0.05$ , por lo que se determina que todas las medias no son iguales, rechazando la hipótesis nula. Podemos determinar que la media entre Chimborazo con el tamiz 3/8 y la media de Tungurahua del tamiz 4 son significativamente iguales. En este caso el R<sup>2</sup> tiene un valor Alto por lo cual el modelo se ajusta de forma adecuada a los datos.

El peso unitario seco de los suelos volcánicos de Colombia y de Chile son similares a los de los volcanes de Chimborazo y Tungurahua, las densidades de los piroclastos de Ecuador son menores a las de Costa Rica.

### 5.3 Análisis Microbiológico de las Muestras

Para los análisis de las muestras de agua en laboratorio se evaluaron 7 parámetros los cuales sirvieron para determinar en qué condiciones se tienen los mejores resultados. Se muestran los valores de los dos ensayos de agua cruda realizadas.

Tabla 31 Ensayos de Agua Cruda

Análisis Químico		AC1	AC2	Agua Cruda
Tiempo de filtrado del agua		agua cruda 1er	agua cruda	Promedio
Parámetros:	Unidad	Ensayo	2Do ensayo	
pH x 100	[H <sup>+</sup> ]	738	731	734.5
Conductividad	μS/cm	984	959	971.5
Color x10	upt-co	210	180	195
Solidos Disueltos Totales	mg/l	492	479	485.5
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /l	492	166	329
Turbidezx100	NTU	64	7	35.5
Coliformes Totalesx100	NMP/100 ml	700	100	400

Fuente: Páez y Donoso

La muestra AC1 fue tomada a las 8 Am, mientras que la AC2 fue tomada a la 1 Pm. Después de realizar el análisis químico de la AC1 junto con las muestras de Chimborazo y Tungurahua, existieron varios datos anómalos que evidenciaban una posible contaminación externa de los piroclastos, es necesario un segundo análisis para descartar estos datos y corregirlos. Como las muestras se tomaron a horas diferentes, las condiciones del agua pueden variar, por lo que es necesario una segunda muestra de agua cruda AC2 para poder comparar los datos.

Se realizó un promedio entre las dos muestras de agua cruda para tener un solo valor, que permita la comparación entre los datos de los piroclastos obtenidos.

En la Ilustración 20 y 21 se detallan los resultados de cada ensayo realizado de Chimborazo y Tungurahua respectivamente. Los porcentajes que se mencionan se encuentran detallados en la tabla 32 y tabla 33 en donde se muestra el porcentaje de contaminantes que aumenta (positivo) y reduce (negativo).

Tabla 32 Porcentajes Ensayos Químicos Chimborazo

CONTROL DE CALIDAD DE AGUA								
Análisis Químico		Agua Cruda	Carga 1 cm		Carga 11.2 cm		Carga 22.2 cm	
Tiempo de filtrado del agua		Promedio	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion
Parámetros:	Unidad							
pH x 100	[H <sup>+</sup> ]	734.5	760	3%	771	5%	753	3%
Conductividad	µS/cm	971.5	956	-2%	951	-2%	969	0%
Color x10	upt-co	195	30	-85%	40	-79%	70	-64%
Solidos Disueltos Totales	mg/l	485.5	478	-2%	475	-2%	484	0%
Dureza total	mg CaCO3/l	329	182	-45%	160	-51%	324	-2%
Turbidezx100	NTU	35.5	3	-92%	43	21%	49	38%
Coliformes Totalesx100	NMP/100 ml	400	400	0%	1200	200%	200	-50%
Total				<b>-221%</b>		<b>91%</b>		<b>-76%</b>

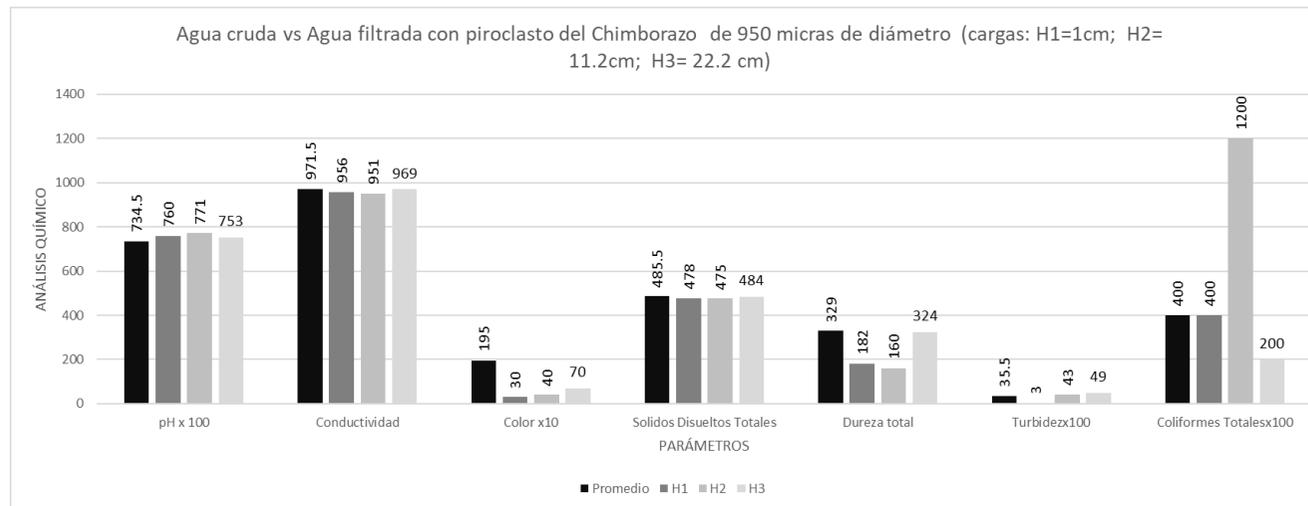


Ilustración 19 Aguas Cruda vs Agua filtrada Chimborazo

Fuente: Páez y Donoso

Tabla 33 Porcentaje Ensayo Químico Tungurahua

CONTROL DE CALIDAD DE AGUA								
Análisis Químico		Agua Cruda	Carga 1 cm		Carga 11.2 cm		Carga 22.2 cm	
Tiempo de filtrado del agua		Promedio	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion	Agua Filtrada	Reduccion de la filtracion
Parámetros:	Unidad							
pH x 100	[H <sup>+</sup> ]	734.5	758	3%	765	4%	756	3%
Conductividad	µS/cm	971.5	959	-1%	952	-2%	961	-1%
Color x10	upt-co	195	70	-64%	50	-74%	40	-79%
Solidos Disueltos Totales	mg/l	485.5	480	-1%	476	-2%	480	-1%
Dureza total	mg CaCO3/l	329	304	-8%	178	-46%	324	-2%
Turbidezx100	NTU	35.5	64	80%	20	-44%	25	-30%
Coliformes Totalesx100	NMP/100 ml	400	700	75%	700	75%	200	-50%
Total:				<b>84%</b>		<b>-89%</b>		<b>-160%</b>

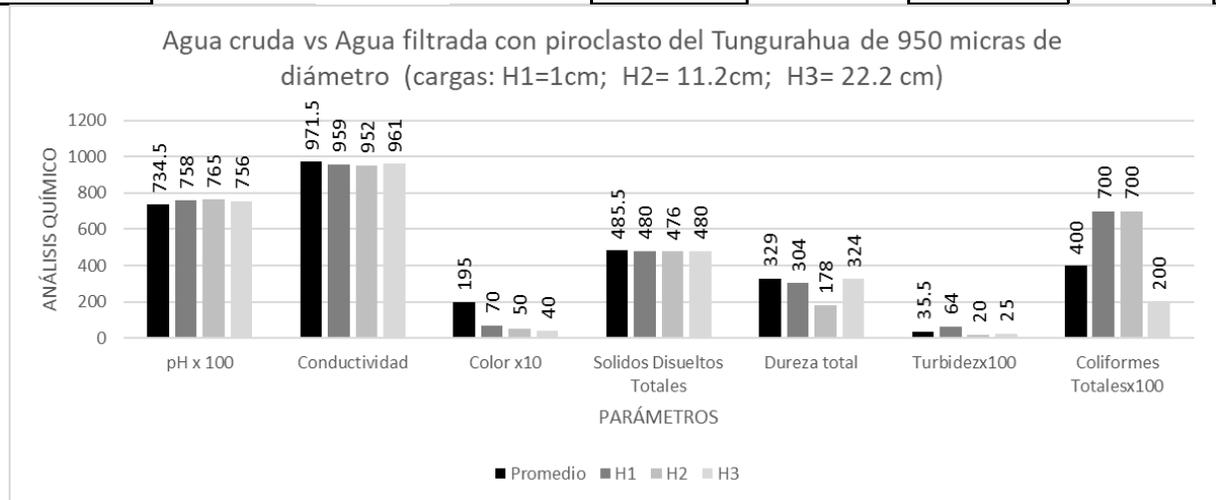


Ilustración 20 Agua Cruda vs Agua filtrada Tungurahua

Fuente: Páez y Donoso

Fórmula para el porcentaje de reducción de filtración

$$\text{Reducción de filtración} = \frac{(\text{Agua filtrada} - \text{Promedio}) * 100\%}{(\text{Agua filtrada})}$$

$$\text{Reducción de filtración} = \frac{(760 - 734.5) * 100\%}{734.5}$$

$$\text{Reducción de filtración} = 3\%$$

Al realizar la suma de los porcentajes de los parámetros obtenidos de cada carga hidráulica, se obtiene un valor que indica si aumenta (positivo) o disminuye (negativo) la contaminación. Este dato permite comparar la efectividad del filtro en las diferentes situaciones.

Al comparar los 3 casos del piroclasto de Chimborazo, la carga hidráulica de 1 cm reduce los contaminantes de 5 parámetros, siendo la más eficiente a pesar que no existe reducción en coliformes totales. La carga hidráulica 2 de 11,2 cm presenta un aumento de contaminación causado principalmente por el incremento del 200 % de los coliformes totales.

En los piroclastos de Tungurahua se evidencia que se retiene 6 contaminantes en la carga hidráulica 3 de 22.2 cm, siendo la más eficaz de los 3 casos. En la carga hidráulica de 1 cm el porcentaje de contaminantes aumenta debido al incremento en la turbidez y los coliformes totales.

Al comparar entre los piroclastos retenidos en el tamiz N°3/8 de los dos volcanes, el material de Chimborazo tiene una mayor reducción en la sumatoria de sus contaminantes en la carga hidráulica de 1 cm

## 6 Introducción

El Ecuador es uno de los 5 países más expuesto a procesos naturales geológicos por su ubicación geográfica y por la constitución geológica, consta de 76 volcanes (Silva, 2011), algunos de ellos no se encuentran en actividad volcánica como son el Chimborazo, el Pan de Azúcar y el Chulpatán, y otros erupcionaron en los últimos años o siguen en proceso de erupción como son el Cotopaxi, Tungurahua, Sangay y Reventador según Vallejo Ximena. (2011).

Los volcanes cercanos a la Provincia de Chimborazo que tienen relevancia por su tamaño o erupciones volcánicas es el Tungurahua encontrándose en la Cordillera Oriental y el Volcán Chimborazo ubicado en el Valle Interandino.

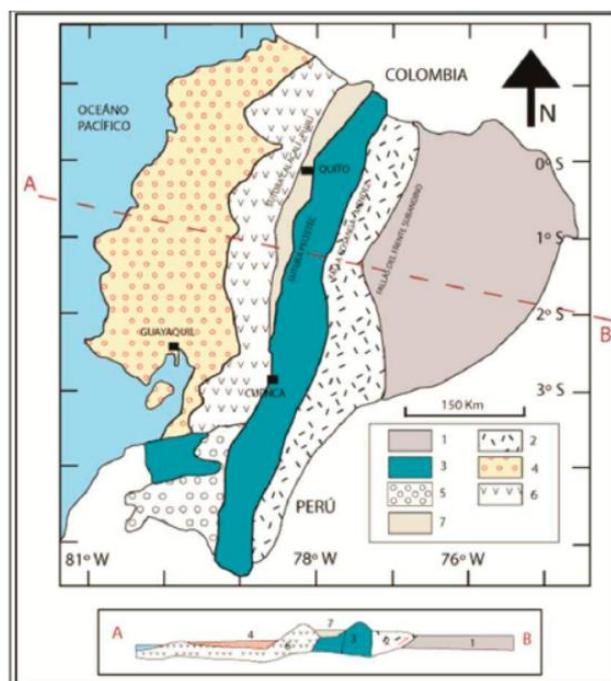


Ilustración 21 Mapa Esquemático de las regiones fisiográficas del Ecuador. 1.- Cuenca Oriente, 2.- Zona Sub-Andina, 3.- Cordillera Oriental, 4.- Costa, 5.- Cuenca Alamor-Lancones, 6.- Cordillera Occidental y 7.- Valle Interandino

Fuente: (Vallejo, 2011)

Ecuador es uno de los países más ricos en recursos hídricos de Sudamérica: dispone de 43500 m<sup>3</sup> por persona al año (2.5 veces superior al promedio mundial). Sin embargo, es el país con más retraso en la región andina en cuanto a cobertura de servicios de agua y alcantarillado (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

Tabla 34. Cobertura de agua en Ecuador

País	Cobertura de agua potable			Cibertura de alcantarillado		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
<b>Bolivia</b>	73.5	93.1	44.0	63.5	82.3	35.3
<b>Colombia</b>	90.6	98.0	73.0	83.4	97.0	51.0
<b>Ecuador</b>	70.3	81.5	51.4	58.0	70.5	37.0
<b>Perú</b>	75.4	86.8	50.7	73.7	89.5	39.5

Fuente: Organización Panamericana de la Salud (OPS).

A pesar de que el Ecuador dispone de toda esta riqueza hídrica, solo siete de cada diez ecuatorianos tienen acceso al agua potable y solo cinco de cada diez tienen alcantarillado. Pero la desigualdad en el acceso a estos servicios es más profunda en las áreas rurales y en los barrios marginales (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

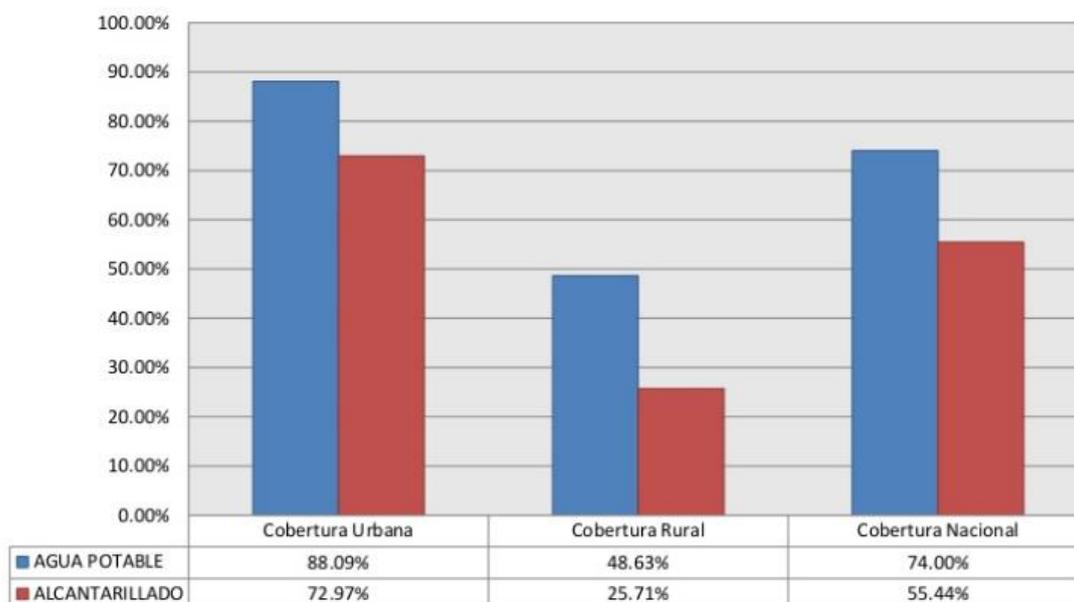


Ilustración 22. Cobertura de agua potable y Alcantarillado en el Ecuador

Fuente: INEC 2010.

Se estima que el agua en más del 70% de las cuencas hidrográficas por debajo de la cota de 2800 msnm no es apta para consumo humano directo, debido a la contaminación por microorganismos patógenos, presencia de sustancias tóxicas, contaminación con desechos sólidos, presencia de hidrocarburos, entre otras sustancias (Cabrera, Garces, & Paredes, 2012).

Para el año 2000 A.C, en la India filtraban el agua a través del carbón vegetal y la almacenaban en contenedores de cobre para mantenerla fresca. La filtración a través de recipientes porosos e incluso la filtración con arena y grava se prescribieron durante miles de años (WaterWorld and Water & Wastewater International, 1999).

En sus escritos sobre higiene pública, Hipócrates (460 - 354 A.C) recomendó colar el agua antes de beberla, la bolsa de tela que recomendó para filtrar más tarde se conoció como la "manga de Hipócrates" (WaterWorld and Water & Wastewater International, 1999).

Los materiales rocosos provenientes del enfriamiento de la lava o aquellos que fueron expulsados en forma sólida y que se consolidaron sobre la superficie de la tierra son denominados rocas piroclásticas o tetra. (Paladines & Zamora, 2011). Estos materiales tienen propiedades particulares que los hacen diferentes a otros, su principal característica es que permiten que el agua ingrese al interior de sus porosidades, quedando adherida por enlaces atómicos tanto en su interior como en su exterior según Sanhueza y Palma (2011).

El material volcánico presenta características físicas importantes como su porosidad y densidad que pueden resultar efectivos para mejorar la calidad del agua mediante filtración. En Chile se llevó a cabo varias investigaciones que permitió concluir que los piroclastos pueden considerarse aptos para ser utilizados como filtros para la depuración de aguas residuales.

En base a estos conocimientos se elaboró filtros para evaluar las propiedades hidráulicas de este material y su efectividad para mejorar la calidad del agua. Los resultados pueden variar dependiendo de varios factores como el tamaño del grano o la altura del lecho. Cuanto más grande sean los granos, más agua se podrá filtrar, el material pequeño reduce la velocidad a la que circula el agua y es más probable que el filtro se sature con mayor facilidad y haya una obstrucción (Villota, 2010).

Se tomó en cuenta el material volcánico de Chimborazo y Tungurahua, con el fin de comparar ambos materiales y determinar las propiedades hidráulicas en cada uno de ellos, en lo cual se hace uso de la Ley de Darcy para determinar la conductividad hidráulica del piroclasto.

En la Universidad Nacional de Chimborazo se realizó la tesis lechos activados de rocas volcánicas de Chimborazo y Tungurahua para la retención de la dureza del agua (Bautista & Logroño, 2019), con un grano de 200 micras. Se obtuvo 10 kg de material de los volcanes Chimborazo y Tungurahua, se procedió a triturar y tamizar las muestras para conseguir el tamaño de grano deseado. Se usó 1200 gramos para tener un lecho de 21 cm de alto en un área de  $95\text{cm}^2$ , en un filtro realizado de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro. Al realizar el ensayo se mantiene constante el caudal y la carga hidráulica.

La investigación pretende definir las características mecánicas, hidráulicas y operativas de los lechos de piroclastos del Tungurahua y Chimborazo, los tamaños de los granos que serán utilizados para el diseño del filtro serán los retenidos en- el tamiz N°3/8, para el uso de agua potable de la comunidad de Tamaute. Se propone filtrar el agua con caudal constante y con carga hidráulica constante, para evaluar su conductividad hidráulica, se analizará la calidad del agua cruda antes y después de filtrarla para

determinar la eficacia del lecho filtrante y comparar los resultados con los piroclastos retenidos en la malla 4 y malla 3/8.

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Los materiales recolectados de color negro presentan la particularidad de poseer un gran volumen de vacíos, dando una densidad de Chimborazo entre 0.806 y 0.952 g/cm<sup>3</sup> y de Tungurahua entre 0.674 a 0.816 g/cm<sup>3</sup>.
- En Chimborazo de las tres cargas hidráulicas ensayadas, el piroclasto presenta una mayor reducción de contaminantes en la carga hidráulica de 1 cm, reduciendo la conductividad, el color, sólidos disueltos totales, dureza total y turbidez.
- Debido a la característica de adsorción del material del piroclasto, no existe la reducción de coliformes totales en el estudio por lo tanto se puede concluir que este material se utilizara para pre tratamiento y procesos físicos de agua potable.
- Considerando las tres cargas hidráulicas de los piroclastos de Tungurahua, la carga hidráulica de 22.2 cm tiene una mayor reducción de contaminantes de los 6 parámetros a excepción del pH.
- El piroclasto de Chimborazo retiene un mayor porcentaje de contaminantes, siendo el más efectivo para mejorar la calidad del agua con respecto al piroclasto de Tungurahua.
- La conductividad hidráulica de los piroclastos retenidos en el tamiz 3/8 es mayor que la del tamiz No. 4 en todas las cargas hidráulicas, tomando en cuenta el mismo volcán.
- Los datos provenientes de los piroclastos de Chimborazo Tamiz N° 3/8, Tamiz N°4 y Tungurahua tamiz N° 3/8 en la carga hidráulica de 11.2 cm tienen una distribución normal, sus conductividades hidráulicas tienen una relación matemática con el tiempo a través de una fórmula polinómica. Para los datos que

no tienen una distribución normal se determinó una media y un límite de confiabilidad.

## **7.2 Recomendaciones**

- El Ecuador por su ubicación geográfica consta de varios volcanes, se recomienda realizar estudios de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas e hidráulicas a otros volcanes, para ayudar a nuestro país a reutilizar el material y mejorar la calidad de agua de nuestras comunidades.
- En esta investigación se estudió los piroclastos retenidos en el tamiz 3/8 y en el tamiz No. 4, comparándolos para determinar cuál es más eficiente para mejorar la calidad del agua, sin embargo, realizar estos estudios con otro tamaño de material o haciendo un lecho que convine varios tamaños de piroclastos, puede ampliar los conocimientos sobre este tema.
- Para mejorar la confiabilidad de los datos es necesario mejorar el equipo del filtro, las llaves y la variación de los caudales de entrada y salida.

## 8 Bibliografía

- Arellano, A., Gonzalez, J., & Gavilanes, A. (2012). *Metodo de Caracterizacion Urbanistica y SocioEconomica para poblaciones menores que 150.000 habitantes*. Riobamba.
- Arellano, J., & Jaime, G. (2011). *Ingenieria Ambiental*. Mexico: Alfaomega Grupo Editor S.A de C.V., Mexico.
- Bautista, A., & Logroño, J. (2019). *Lechos activados de rocas volcánicas de Chimborazo y Tungurahua para la retención de la dureza del agua*. Julio: 17.
- Cabrera, H., Garces, M., & Paredes, P. (2012). *Proyecto de Desarrollo de Capacidades para el Uso Seguro de Aguas*.
- Hernandez, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodologia de la investigación*. Mexico: McGraw-Hill.
- Mora, R. (1998). PROPIEDADES FÍSICAS, HIDRÁULICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO, EN SITIOS SELECCIONADOS DEL VALLE CENTRAL, COSTA RICA. *Geológica de América Central*, 81-98.
- Nilve, D. (2020). *Propiedades mecánicas e hidráulicas de los lechos de absorción de piroclastos del Chimborazo, menores de 200 micras de diámetro*. Riobamba: Universidad Nacional De Chimborazo.
- Paladines, J., & Zamora, C. (2011). *Impacto Provocado por el volcan Tungurahua en la Salud de los pobladores de Penipe durante el periodo Eruptivo comprendido entre el año 2003-2010*. Quito: Pontificia Universidad catolica del Ecuador.
- Quintana, D. (2020). *Propiedades mecánicas e hidráulicas de los lechos de absorción de piroclastos del Tungurahua, menores de 200 micras de diámetro*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo.
- Sánchez, J. (2017). *Ley de Darcy, Conductividad Hidraulica*. España.

- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderon, K. (2010). Evaluación del Comportamiento detecnico de suelos Volcánicos Chilenos para su uso como materia de filtro en ela depuración de aguas residuales domésticas. *Revista de la Construcción*, 66-81.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., & Calderon, K. (2011). *Evaluacion del comportamiento geotécnico de los suelos volcánicos Chilenos para su uso como material del filtro en las depuraciones de aguas residuales domésticas*. Chile: Pontificia Universidad católica de Chile.
- Silva, F. (2011). *La gestion de riesgos y su incidencia en la vulnerabilidad de los centros educativos del cantón Penipe provincia de Chimborazo*. Ambato: Universidad tecnica de Ambato .
- Soporte de Minitab 18*. (2019). Obtenido de Soporte de Minitab 18: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>
- Tabon, I., Arias, E., & Jaramillo, M. (2003). PROPIEDADES FISICAS E HIDRAULICAS DE LAS CENIZAS VOLCANICAS EN LA TERRAZA DE LLANOGRANDE (RIONEGRO, ANTIOQUIA). *Dyna*, 1-10.
- Vallejo, X. (2011). *Distribucion de las cenizas volcanicás holocénicas - tardías en la costa del ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Villota, G. (2010). *Diseño de un filtro con piroclastos gruesos para la purificacion del agua de la comunidad de Vizcaya (Baños - Ecuador)*. Riobamba.
- WaterWorld and Water & Wastewater International. (1999). *World of water 2000 : the past, present and future*. *PennWell Publishing*.

## 9 Anexos

### 9.1 Conductividad hidráulica de Tungurahua tamiz No. 4

- Carga hidráulica 1cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 1 cm</b>						
densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.85	0.81	0.85	0.83	0.84	0.86
muestra	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
tiempo acumulado (min)	k (cm/min)					
<b>0.5</b>	292.6	390.1	370.6	429.1	409.6	409.6
<b>1.0</b>	370.6	351.1	331.6	370.6	370.6	390.1
<b>1.5</b>	234.1	390.1	312.1	292.6	351.1	390.1
<b>2.0</b>	214.5	370.6	312.1	253.6	331.6	351.1
<b>2.5</b>	292.6	390.1	292.6	312.1	292.6	331.6
<b>3.0</b>	370.6	390.1	253.6	312.1	312.1	409.6
<b>3.5</b>	390.1	351.1	331.6	331.6	351.1	429.1
<b>4.0</b>	409.6	370.6	351.1	331.6	351.1	409.6
<b>4.5</b>	390.1	312.1	292.6	370.6	331.6	409.6
<b>5.0</b>	331.6	331.6	292.6	351.1	312.1	351.1
<b>5.5</b>	312.1	351.1	331.6	331.6	292.6	370.6
<b>6.0</b>	292.6	312.1	292.6	351.1	331.6	370.6
<b>6.5</b>	312.1	331.6	292.6	331.6	292.6	351.1
<b>7.0</b>	273.1	331.6	312.1	351.1	273.1	351.1
<b>7.5</b>	331.6	273.1	331.6	351.1	292.6	331.6
<b>8.0</b>	331.6	214.5	370.6	351.1	273.1	

Fuente: (Quintana, 2020)

- carga hidráulica 11.2 cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 11.2 cm</b>						
densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.84	0.86	0.81	0.83	0.82	0.80
muestra	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
tiempo acumulado (min)	k (cm/min)					
<b>0.5</b>						
<b>1.0</b>	33.1	33.1	36.6	36.6	34.8	36.6
<b>1.5</b>	31.3	27.9	33.1	31.3	31.3	34.8
<b>2.0</b>	29.6	24.4	29.6	29.6	29.6	33.1
<b>2.5</b>	24.4	22.6	33.1	29.6	29.6	31.3
<b>3.0</b>	19.2	20.9	31.3	29.6	27.9	27.9
<b>3.5</b>	19.2	20.9	34.8	27.9	27.9	27.9
<b>4.0</b>	20.9	20.9	33.1	29.6	29.6	29.6
<b>4.5</b>	20.9	22.6	34.8	27.9	31.3	27.9
<b>5.0</b>	20.9	20.9	29.6	29.6	33.1	29.6
<b>5.5</b>	22.6	20.9	33.1	31.3	31.3	27.9
<b>6.0</b>	22.6	20.9	31.3	33.1	29.6	27.9
<b>6.5</b>	22.6	20.9	34.8	31.3	29.6	29.6
<b>7.0</b>	20.9	20.9	33.1	33.1	29.6	27.9
<b>7.5</b>	20.9	19.2		33.1		27.9
<b>8.0</b>	20.9	19.2				

Fuente: (Quintana, 2020)

- carga hidráulica 22.2 cm

<b>CARGA HIDRÁULICA DE 22.2 CM</b>						
<b>densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.81	0.81	0.80	0.77	0.80	0.79
<b>muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>tiempo acumulado (min)</b>	<b>k (cm/min)</b>					
<b>0.5</b>						
<b>1.0</b>						
<b>1.5</b>	16.69	15.81	20.21	15.89	20.21	17.57
<b>2.0</b>	15.81	15.81	18.45	9.71	18.45	16.69
<b>2.5</b>	14.94	14.06	14.06	10.59	14.94	14.94
<b>3.0</b>	13.18	11.42	13.18	8.83	15.81	14.06
<b>3.5</b>	13.18	14.06	12.30	8.83	14.06	15.81
<b>4.0</b>	14.06	12.30	13.18	11.47	14.94	14.94
<b>4.5</b>	13.18	14.06	14.94	11.47	17.57	14.94
<b>5.0</b>	12.30	13.18	14.06	10.59	16.69	14.94
<b>5.5</b>	13.18	15.81	14.06	13.24	13.18	13.18
<b>6.0</b>	14.94	11.42	11.42	14.12	11.42	14.94
<b>6.5</b>	14.06	12.30	12.30	9.71	14.06	13.18
<b>7.0</b>	13.18	12.30	11.42	11.47	14.06	12.30
<b>7.5</b>	15.81	13.18	13.18	10.59	13.18	13.18
<b>8.0</b>	13.18	13.18	13.18	11.47	12.30	13.18

Fuente: (Quintana, 2020)

## 9.2 Conductividad hidráulica de Chimborazo tamiz No. 4

- Carga hidráulica 1cm

<b>CARGA HIDRAULICA DE 1 cm</b>						
<b>densidad g/cm<sup>3</sup></b>	0.98	0.96	0.97	0.96	0.95	0.94
<b>muestra de ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo acumulado</b>	<b>k(cm/min)</b>					
<b>0.5</b>	292.56	292.56	253.56	292.56	390.09	312.07
<b>1.0</b>	292.56	351.08	273.06	331.57	487.61	468.10
<b>1.5</b>	370.58	292.56	253.56	390.09	292.56	409.59
<b>2.0</b>	351.08	312.07	253.56	370.58	312.07	331.57
<b>2.5</b>	351.08	331.57	253.56	351.08	312.07	292.56
<b>3.0</b>	370.58	370.58	292.56	312.07	273.06	370.58
<b>3.5</b>	370.58	312.07	312.07	370.58	331.57	312.07
<b>4.0</b>	370.58	351.08	331.57	351.08	292.56	351.08
<b>4.5</b>	331.57	331.57	312.07	351.08	312.07	331.57
<b>5.0</b>	312.07	331.57	351.08	312.07	253.56	292.56
<b>5.5</b>	312.07	331.57	351.08	312.07	273.06	273.06
<b>6.0</b>	292.56	312.07	292.56	331.57	292.56	312.07
<b>6.5</b>	370.58	351.08	292.56	312.07	273.06	312.07
<b>7.0</b>	331.57	273.06	312.07	331.57	292.56	292.56
<b>7.5</b>	292.56	331.57	273.06	312.07	253.56	292.56
<b>8.0</b>	370.58	273.06	331.57	331.57	312.07	253.56
<b>8.5</b>	351.08	214.55	292.56	253.56	273.06	253.56
<b>9.0</b>		117.03	292.56	175.54	175.54	234.05

Fuente: (Nilve, 2020)

- Carga hidráulica 11.2cm

<b>CARGA HIDRAULICA DE 11.2 cm</b>						
<b>densidad g/cm3</b>	0.94	0.94	0.95	0.93	0.92	0.91
<b>muestra de ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo acumulado</b>	<b>k(cm/min)</b>					
<b>0.5</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.0</b>	64.43	59.21	59.21	62.69	60.95	60.95
<b>1.5</b>	40.05	41.79	34.83	53.99	50.50	53.99
<b>2.0</b>	36.57	33.09	34.83	36.57	40.05	40.05
<b>2.5</b>	31.35	33.09	43.54	36.57	38.31	34.83
<b>3.0</b>	33.09	34.83	47.02	38.31	38.31	41.79
<b>3.5</b>	33.09	33.09	41.79	41.79	41.79	40.05
<b>4.0</b>	34.83	34.83	36.57	33.09	33.09	36.57
<b>4.5</b>	31.35	33.09	40.05	36.57	36.57	34.83
<b>5.0</b>	33.09	27.86	40.05	36.57	41.79	40.05
<b>5.5</b>	31.35	33.09	38.31	36.57	36.57	36.57
<b>6.0</b>	34.83	31.35	36.57	33.09	31.35	33.09
<b>6.5</b>	27.86	33.09				
<b>7.0</b>	24.38	26.12				

Fuente: (Nilve, 2020)

- Carga hidráulica 22.2cm

<b>CARGA HIDRAULICA DE 22.2 cm</b>						
<b>densidad g/cm3</b>	0.87	0.86	0.85	0.87	0.84	0.85
<b>muestra de ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo acumulado</b>	<b>k(cm/min)</b>					
<b>0.5</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.0</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>1.5</b>	29.87	28.11	30.75	28.11	30.75	27.24
<b>2.0</b>	18.45	14.06	18.45	22.84	24.60	21.96
<b>2.5</b>	18.45	11.42	14.06	18.45	19.33	16.69
<b>3.0</b>	17.57	15.81	14.94	19.33	18.45	22.84
<b>3.5</b>	20.21	14.94	18.45	21.09	21.09	13.18
<b>4.0</b>	18.45	17.57	14.06	21.96	18.45	18.45
<b>4.5</b>	20.21	18.45	15.81	19.33	20.21	16.69
<b>5.0</b>	16.69	18.45	16.69	20.21	17.57	15.81
<b>5.5</b>	16.69	16.69	15.81	21.09	20.21	16.69
<b>6.0</b>	19.33	17.57	18.45	19.33	15.81	16.69
<b>6.5</b>		16.69	16.69			15.81

Fuente: (Nilve, 2020)