CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

CAPITULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

La infiltración del agua en el suelo es un proceso muy importante en la ingeniería civil, ya que afecta la estabilidad del terreno, el diseño de drenajes y la prevención de problemas como la erosión y los daños en carreteras y edificios. Para medir la infiltración, se usan diferentes métodos, y uno de los más conocidos es el “infiltrómetro de doble anillo”, que permite calcular la velocidad con la que el agua entra en el suelo. Sin embargo, hay factores como el tipo de suelo, su dureza y las condiciones del terreno que pueden afectar la precisión de este método.

A nivel mundial, se han hecho muchos estudios sobre la infiltración del agua en el suelo y su impacto en la construcción. Bouwer (1986) explicó que el infiltrómetro de doble anillo es útil para medir la infiltración en campo y ayudar a diseñar sistemas de drenaje. Hillel (1998) destacó que conocer la infiltración ayuda a evitar problemas como erosión o inestabilidad en las construcciones. En Bolivia, varios estudios han demostrado que la infiltración cambia según el tipo de suelo y el clima, lo que hace necesario contar con herramientas precisas para medirla.

El objetivo de este estudio es analizar la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo en los barrios Torrecillas y Jesús María en Tarija. Para ello, se realizarán mediciones in situ, se analizarán los factores que pueden afectar la precisión del equipo y se compararán los resultados con el método de Kostiakov.

Desde el punto de vista teórico, la investigación se sustenta en la mecánica de suelos y la hidrología aplicada. Se consideran principios de infiltración y porosidad del suelo, aspectos clave en la ingeniería civil para el diseño de sistemas de drenaje y estabilidad de taludes. La aplicación práctica de estas teorías permitirá mejorar la comprensión de la infiltración en suelos naturales y optimizar la metodología de medición con el infiltrómetro de doble anillo. Además, los resultados obtenidos serán relevantes para la

planificación urbana, ayudando a mitigar problemas de escorrentía superficial y erosión, lo que impacta directamente en la seguridad y durabilidad de infraestructuras viales y edificaciones.

1.2 Antecedentes

La infiltración del suelo es un factor importante en la ingeniería civil, ya que influye en la estabilidad de las infraestructuras viales, el diseño de sistemas de drenaje y la prevención de daños estructurales. Diversos estudios han abordado la importancia de la medición de la infiltración y la eficiencia de los equipos utilizados, como el infiltrómetro de doble anillo.

Bouwer (1986) destaca la relevancia del infiltrómetro de doble anillo en estudios hidrológicos y geotécnicos, resaltando su capacidad para obtener mediciones directas y precisas en campo.

Hillel (1998) enfatiza la necesidad de comprender los procesos de infiltración para prevenir problemas de erosión y garantizar la estabilidad del suelo en proyectos de ingeniería civil.

Vargas (2012) señala que, si bien el infiltrómetro de doble anillo es una herramienta confiable, su precisión puede verse afectada por la heterogeneidad del suelo, la compactación y la presencia de materia orgánica, por lo que recomienda calibraciones específicas según el sitio de estudio. Asimismo, estudios recientes aplican modelos empíricos como el de Kostiakov (1932) para complementar las mediciones experimentales.

En cuanto a investigaciones realizadas en la ciudad de Tarija, no se han identificado estudios previos que analicen específicamente la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo en los barrios Torrecillas y Jesús María. No obstante, la región presenta una variabilidad de tipos de suelo que hace relevante la evaluación de su capacidad de infiltración para optimizar el diseño de infraestructuras y prevenir problemas de acumulación de humedad y erosión.

Este estudio busca llenar este vacío, proporcionando datos empíricos sobre la infiltración en suelos naturales de Tarija y analizando la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo en estas condiciones.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación académica

El presente estudio se basa en la teoría de la mecánica de suelos y la hidrología aplicada, áreas fundamentales de la ingeniería civil, especialmente en la geotecnia y el diseño de infraestructura vial. La infiltración del agua en el suelo es un factor determinante en la estabilidad y durabilidad de las carreteras, ya que una infiltración deficiente o excesiva puede causar erosión, asentamientos y fallas estructurales en pavimentos y sistemas de drenaje. Este trabajo contribuirá al conocimiento sobre la interacción agua-suelo en la ciudad de Tarija, proporcionando información esencial para el diseño de infraestructuras sostenibles.

1.3.2 Justificación sobre la aplicación técnica - práctica

El uso del infiltrómetro de doble anillo en la medición de la infiltración es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería civil debido a su facilidad de aplicación y precisión. Este estudio permitirá establecer una metodología estandarizada y replicable para la evaluación de la capacidad de infiltración de suelos en proyectos de infraestructura. La aplicación de los resultados obtenidos facilitará la toma de decisiones en la construcción y mantenimiento de carreteras, sistemas de drenaje y obras hidráulicas, optimizando los diseños en función de las características del suelo.

1.3.3 Justificación e importancia social

La correcta gestión del agua en los suelos tiene un impacto directo en la calidad de vida de la población, especialmente en zonas urbanas y periurbanas donde la infraestructura vial es clave para la conectividad y el desarrollo económico. La implementación de

medidas basadas en un adecuado conocimiento de la infiltración permitirá reducir riesgos de inundaciones, deterioro de carreteras y erosión de suelos, lo que se traduce en menores costos de mantenimiento y mayor seguridad para los usuarios de la infraestructura. Asimismo, este estudio favorecerá la planificación urbana y el desarrollo sostenible, promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico y la mejora de las obras civiles en la ciudad de Tarija.

1.4. planteamiento del problema

1.4.1. situación problemática

La infiltración del agua en el suelo es un proceso muy importante en la ingeniería civil, ya que afecta la estabilidad del terreno, el diseño de drenajes y la prevención de problemas como la erosión y los daños en carreteras y edificios. Para medir la infiltración, se usan diferentes métodos, y uno de los más conocidos es el “infiltrómetro de doble anillo”, que permite calcular la velocidad con la que el agua entra en el suelo. Sin embargo, hay factores como el tipo de suelo, su dureza y las condiciones del terreno que pueden afectar la precisión de este método.

En la ciudad de Tarija, los suelos son muy variados, y en algunas zonas es difícil medir la infiltración de manera exacta. Esto se debe a que el suelo cambia de un lugar a otro, hay plantas y raíces que pueden afectar el flujo del agua, y la actividad humana también altera el terreno. Estas diferencias pueden hacer que el infiltrómetro de doble anillo no siempre dé resultados confiables.

Si no se mejora la forma en que se mide la infiltración del agua, podrían aparecer problemas en la construcción de calles, drenajes y edificios. Si no se conocen bien las características del suelo, es posible que las carreteras sufran daños, que los drenajes no funcionen correctamente o que haya más erosión e inundaciones. Esto afectaría la seguridad y la calidad de las construcciones.

En esta investigación se analizará qué tan efectivo es el infiltrómetro de doble anillo en

los barrios Torrecillas y Jesús María en Tarija. Se harán pruebas en el campo y en laboratorio para comparar los resultados con otros modelos matemáticos, como el de Kostiakov. Con esto, se podrá determinar si el infiltrómetro es una herramienta confiable y si es necesario hacer ajustes para obtener mejores mediciones en diferentes tipos de suelo.

1.4.2. delimitación temporal y espacial

1.4.2.1 Delimitación espacial

Este estudio se enmarca dentro del campo de la ingeniería civil, específicamente en la geotecnia y la hidrología aplicada. La investigación se centra en la medición de la infiltración del agua en suelos naturales para mejorar el diseño y mantenimiento de infraestructuras viales y sistemas de drenaje en áreas urbanas y periurbanas.

La investigación se llevará a cabo en la ciudad de Tarija, Bolivia, específicamente en los barrios Torrecillas y Jesús María. Estos lugares fueron seleccionados debido a su variabilidad en los tipos de suelo, lo que permite evaluar el comportamiento de la infiltración.

Los resultados de este estudio serán aplicables en proyectos de infraestructura vial, sistemas de drenaje y manejo del agua en suelos naturales. Los datos obtenidos ayudarán a optimizar el diseño y mantenimiento de carreteras, mejorar la planificación urbana y reducir problemas asociados a la acumulación de agua y erosión del suelo.

1.4.2.2 Delimitación Temporal

Tabla 1: *Tabla de delimitación temporal*

Fecha aproximada	**Evento**	**¿Cómo tributa este dato?**
Marzo del 2023	Exploracion de los barrios a estudiar la infiltración	Se verifica el estado deficiente y la necesidad de medir la infiltración
Abril del 2023	Selección de las zonas de estudio en Tarija	Se determinan los sitios adecuados para realizar las pruebas de infiltración.
Mayo del 2023	Planificación y diseño del trabajo de campo.	Se elabora un plan de medición con el infiltrómetro de doble anillo.
Junio del 2023	Se da procedente el título de la propuesta	Esto es en la Junta de Departamento.
Junio del 2023	Se aprueba la asignatura CIV 501	Perfil aprobado en sus diseños; teóricos y metodológico.
Agosto del 2024	Obtención de permisos para realizar mediciones.	Se gestionan autorizaciones con entidades locales y universidades.
Septiembre del 2024	Inicio de mediciones de infiltración en campo.	Se obtiene información empírica sobre la capacidad de infiltración del suelo.
Octubre del 2024	Análisis de los datos obtenidos y procesamiento estadístico.	Se interpretan los resultados para su posterior aplicación en proyectos de infraestructura.
Noviembre del 2024	Redacción del informe y validación de resultados.	Se genera el documento con conclusiones y recomendaciones.
Diciembre del 2024	Entrega de borrador del trabajo de grado.	Se presenta para revisión y corrección.
Diciembre del 2024	Presentación final del estudio.	Defensa ante tribunal académico.

Fuente: Elaboración propia.

1.4.3. formulación del problema

¿Cómo en el análisis del infiltrómetro de doble anillo se determina su eficiencia cuando se lo aplica en los barrios de Torrecillas y Jesús María de Tarija?

1.5. objetivos

1.5.1 objetivo general

Analizar la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo; considerando mediciones en estado natural en los barrios de Torrecillas y Jesús María en la ciudad de Tarija; de tal manera, se pueda establecer la confiabilidad y precisión de su uso para las obras civiles.

1.5.2 objetivo especifico

- Seleccionar el lugar de suelo natural del estudio.
- Caracterizar el suelo natural seleccionado con ensayos de laboratorio de suelos.
- Estimar la tasa de infiltración en suelos naturales.
- Determinar los factores que puedan afectar la precisión y confiabilidad de las mediciones.
- Comparar la infiltración utilizando el infiltrómetro de doble anillo y el modelo empírico de Kostiakov.

1.6. Hipótesis

Las mediciones con el infiltrómetro en suelos naturales son de alta eficiencia.

1.7 Conceptualización de la variable

Tiene una sola variable: “Eficiencia del infiltrómetro de doble anillo”

Tabla 2: Conceptualización y operación de las variables

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor / Acción
Eficiencia del infiltrómetro de doble anillo	Capacidad del infiltrómetro para proporcionar mediciones precisas y representativas de la infiltración del suelo.	Hidrologia	[mm/h]	Comparación de tasas de infiltración obtenidas con valores esperados según la literatura.
	Tiempo de estabilización del flujo de agua en el suelo.	Tiempo	[min]	Medición del tiempo que tarda la infiltración en alcanzar un régimen estable.
	Variabilidad de mediciones en diferentes zonas del estudio.	Estadistica	[%]	Cálculo del coeficiente de variación entre diferentes mediciones.
	Influencia de factores externos en la medición.	Factores ambientales	[°C, %]	Registro de temperatura y humedad
	Precisión del equipo en la medición de infiltración.	Instrumentación	[%]	Calibración y comparación con métodos alternativos de medición.

Fuente: Elaboración propia

1.8 Alcance y tipo de la investigación

Figura 1: Identificación del tipo de investigación

Fuente: Elaboración propia

La variable propuesta no es manipulable por el investigador definiéndola con un Diseño no experimental y por tener variable única es del tipo Descriptivo; el levantamiento de la información para la investigación será una sola vez (momento único) por lo que su orientación es transeccional o transversal.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPITULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Eficiencia

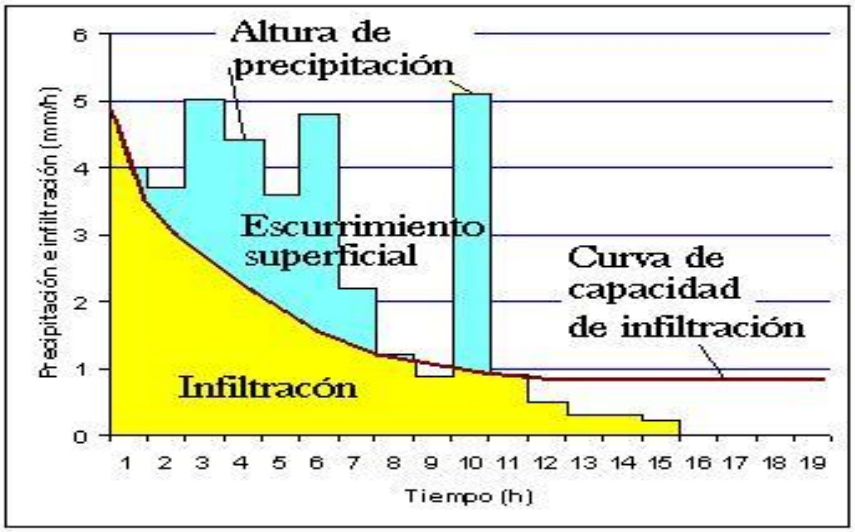
Grado de precisión y confiabilidad del infiltrómetro de doble anillo para medir la tasa de infiltración del suelo, minimizando errores y variaciones en los datos debido a factores ambientales, instrumentales y metodológicos.

2.1.2 Infiltración

La infiltración se refiere al movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia las capas subyacentes del suelo. Este proceso es crítico para el manejo del agua de lluvia o de escorrentía en proyectos de infraestructura vial, ya que un control inadecuado de la infiltración puede comprometer la estabilidad y la durabilidad de las estructuras viales. (Hillel, D. 1998).

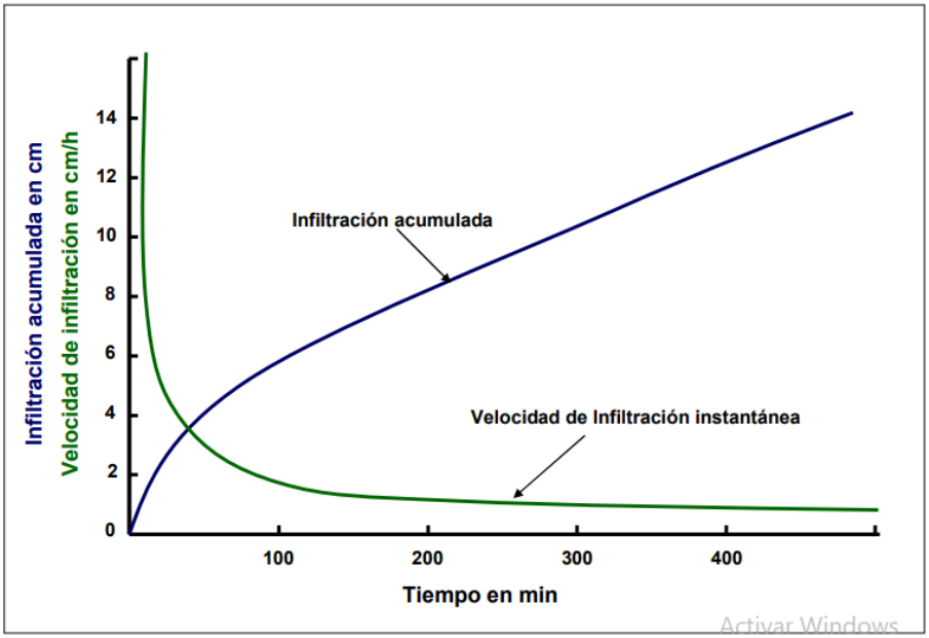
La infiltración es el proceso mediante el cual el agua que se encuentra en la superficie del suelo penetra hacia el interior del suelo, moviéndose a través de los poros y espacios vacíos del material terrestre. Este proceso es crucial en ingeniería ya que determina la cantidad de agua que se filtra hacia el subsuelo, contribuyendo a la recarga de acuíferos y reduciendo el escurrimiento superficial, lo cual puede influir en la erosión y la formación de cuerpos de agua subterráneos. La tasa de infiltración depende de diversos factores, como el suelo, el contenido de humedad inicial, la cobertura vegetal, y la pendiente del terreno. (*Brady, N. C., & Weil, R. R. 2008).*

Gráfico 1: *Velocidad de infiltración*



Fuente: Bouwer, H. (1986).

Gráfico 2: Curvas características de la velocidad de infiltración e infiltración acumulada de un suelo



Fuente: (Delgadillo, 2006)

2.1.3 Velocidad de infiltración

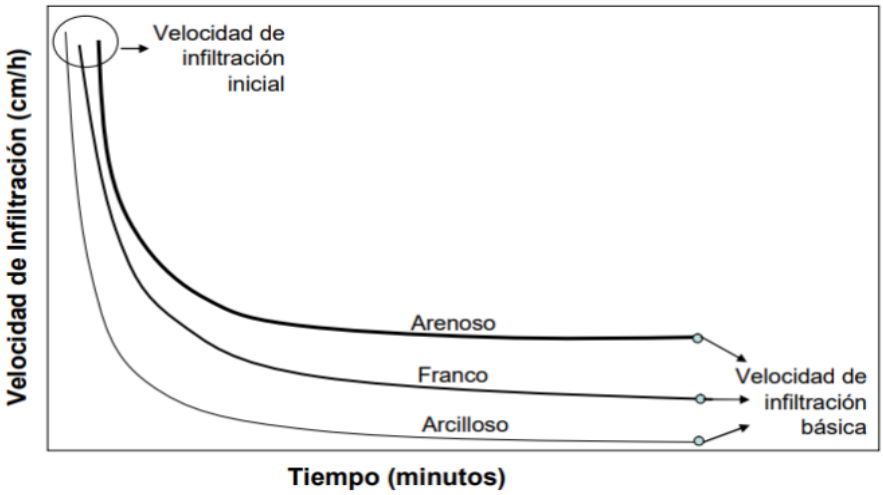
Inicialmente, al aplicar agua, el valor de infiltración es alto y, a medida que se incrementa el contenido de agua en el suelo, disminuye paulatinamente hasta llegar a un valor constante denominado velocidad de infiltración básica, como la velocidad de la infiltración del agua en el suelo, en el momento en que la variación de ésta con respecto al tiempo, es muy lenta y constante. (Delgadillo, 2006)

Generalmente, esta condición de la infiltración se consigue cuando el suelo ha alcanzado su capacidad de campo. Gráficamente, se puede observar la velocidad de infiltración básica cuando la curva de la velocidad de infiltración se vuelve asintótica con respecto a la horizontal. La velocidad de infiltración básica, depende fuertemente de la textura del suelo, así el tiempo para alcanzar esta velocidad y su valor dependerá de la textura. (Paloni, 1971)

2.1.4 Infiltración acumulada

La infiltración acumulada es la cantidad total de agua que ha sido absorbida por el suelo desde el inicio de un evento de infiltración hasta un tiempo dado. A diferencia de la tasa de infiltración, que mide la cantidad de agua infiltrada por unidad de tiempo, la infiltración acumulada considera la suma total del agua infiltrada a lo largo del tiempo.

Gráfico 3: Variación de la curva de velocidad de infiltración del suelo



Fuente: Paloni (1971)

La variación de la curva de velocidad de infiltración por la textura del suelo se refiere a cómo los diferentes tipos de suelos afectan la tasa a la cual el agua penetra y se mueve a través del suelo. La textura del suelo está determinada por la proporción de partículas de arena, limo y arcilla, y esta proporción influye directamente en la infiltración. (Brouwer, 1986).

Tabla 3: Rangos referenciales de velocidad de infiltración básica de los diferentes tipos de suelo

TIPOS DE SUELO	**(mm/h)**
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20 a 30
Franco	10 a 20
Franco arcilloso	5 a 10
Arcilla	1 a 5

Fuente: Brouwer et al. (1988)

Tabla 4: Tabla Referencial de los tipos de suelos

Tipo de Suelo	Composición	Textura	Drenaje	Retención de Agua	Fertilidad
Arenoso	>85% arena	Gruesa, granos sueltos	Excelente	Baja	Baja
Franco arenoso	50-70% arena, 15-20% limo, 10-20% arcilla	Moderadamente gruesa	Bueno	Moderada-baja	Moderada-baja
Franco limoso	0-20% arena, 60-80% limo, 10-15% arcilla	Moderadamente fina	Moderado	Buena	Buena
Franco	30-50% arena, 30-50% limo, 10-20% arcilla	Media	Bueno	Buena	Buena
Franco arcilloso	20-45% arena, 15-30% limo, 25-40% arcilla	Moderadamente fina	Moderado	Buena	Muy buena
Arcilloso	>40% arcilla	fina	pobre	Muy alta	Alta, pero puede ser difícil de manejar

Fuente: USDA (2017).

2.1.5 Factores que afectan la velocidad de infiltración

2.1.5.1 Textura de suelo

La textura del suelo (proporción de arena, limo y arcilla) determina el tamaño de los poros. Los suelos arenosos tienen poros grandes que permiten una infiltración rápida, mientras que los suelos arcillosos tienen poros pequeños que reducen la velocidad de infiltración.

2.1.5.2 Contenido de humedad del suelo

La infiltración inicial suele ser mayor en suelos secos debido a la alta capacidad de absorción. A medida que el suelo se humedece, la velocidad de infiltración disminuye. Esto se debe a que los poros disponibles se llenen de agua, reduciendo la capacidad de absorción adicional.

2.1.5.3 Presencia de materia orgánica

La materia orgánica mejora la estructura del suelo, aumentando la porosidad y la capacidad de retención de agua. Suelos ricos en materia orgánica permiten una mayor infiltración al mejorar la estabilidad de los agregados del suelo.

2.1.5.4 Condiciones de pendiente y topografía

En suelos con pendientes pronunciadas, la escorrentía superficial aumenta, lo que disminuye el tiempo que el agua tiene para infiltrarse en el suelo. En pendientes más suaves, el agua tiene más tiempo para infiltrarse antes de que se produzca escorrentía.

2.1.5.5 Compactación

La compactación del suelo debido al tránsito de maquinaria pesada o la construcción de infraestructuras disminuye la porosidad y, por tanto, reduce la velocidad de infiltración. Este fenómeno es común en zonas urbanas.

2.1.5.6 Presencia de capas impermeables

En algunos suelos, existen capas subyacentes impermeables (como el lecho rocoso o capas duras de arcilla) que restringen la infiltración. Estas capas limitan el movimiento descendente del agua, afectando la capacidad de infiltración del suelo en su conjunto. (Bouwer, 1986).

2.1.6 Infiltrómetro de doble anillo

Es un instrumento utilizado para medir la tasa de infiltración del agua en el suelo. Consta de dos anillos concéntricos de acero, generalmente de diferentes diámetros, que se introducen parcialmente en el suelo y se llenan de agua. Este dispositivo es ampliamente utilizado en estudios de ingeniería civil, particularmente en el ámbito de proyectos viales, para evaluar las características de infiltración del suelo en el lugar donde se pretende construir. Norma ASTM D3385-09 (ASTM, 2018).

2.1.6.1 Origen del Infiltrómetro de doble anillo

El infiltrómetro de doble anillo fue desarrollado para mejorar la precisión en la medición de la infiltración del agua en el suelo, reduciendo los errores causados por el flujo lateral. Su origen se remonta a principios del siglo XX, cuando ingenieros agrónomos e hidrólogos comenzaron a estudiar métodos más confiables para medir la infiltración.

El diseño de doble anillo fue propuesto por Robert E. Ring en la década de 1940 y luego refinado por investigadores como (Bouwer y van Schilfgaarde, 1963)**.** Se convirtió en un estándar en hidrología y ciencias del suelo debido a su capacidad para reducir el flujo lateral y obtener mediciones más precisas. (Bouwer & van Schilfgaarde, 1963)

2.1.6.2 Características del Infiltrómetro de doble anillo

El infiltrómetro de doble anillo es un instrumento utilizado para medir la infiltración del agua en el suelo. Su diseño ayuda a reducir la dispersión lateral del agua, permitiendo una medición más precisa de la infiltración vertical.

- **Estructura**: Consiste en dos anillos concéntricos, generalmente de metal (acero inoxidable o galvanizado).
- **Tamaño:** Los diámetros de los anillos varían, pero los más comunes son:

  Anillo interno: 30 cm de diámetro.

  Anillo externo: 60 cm de diámetro.

  Altura: Generalmente tiene 50 cm para asegurar una correcta inserción en el suelo.

  Material: Debe ser resistente a la corrosión para una mayor durabilidad.

  Método de medición: Se llena con agua ambos anillos, pero solo se mide la tasa de descenso en el anillo interno.

  Boya: Dispositivo flotante que se coloca en la columna de agua dentro del anillo interno del infiltrómetro. Su función principal es detectar y registrar los cambios en el nivel del agua a medida que esta se infiltra en el suelo

2.1.6.3 Tolerancia del Infiltrómetro de doble anillo

La tolerancia en las mediciones con el infiltrómetro de doble anillo depende de los siguientes factores:

2.1.6.3.1 Tolerancia en las Dimensiones del Infiltrómetro

- **Diámetro de los anillos:**

  Anillo interno: 30 a 60 cm, con una tolerancia de ±1 cm.

  Anillo externo: el doble del interno, con una tolerancia de ±1,5 cm.

- **Altura de los anillos:**

  Generalmente 20 a 50 cm, con una tolerancia de ±2 cm.

- **Profundidad de inserción en el suelo:**

  Se recomienda enterrar entre 5 y 10 cm, con una tolerancia de ±1 cm.

2.1.6.3.2 Tolerancia en la Medición del Nivel de Agua

- Regla graduada o flotador manual: ±1 mm.
- Sensores electrónicos: ±0,1 mm (mayor precisión).

2.1.6.3.3 Tolerancia en la Medición del Tiempo

- Para evitar errores en la tasa de infiltración, los tiempos deben registrarse con una precisión de ±5 segundos en los primeros minutos de medición.
- En mediciones prolongadas, una desviación de hasta ±30 segundos puede ser aceptable sin afectar significativamente los resultados.

2.1.6.3.4 Tolerancia en la Medición de la Tasa de Infiltración

La tasa de infiltración puede verse afectada por:

- Errores en la instalación (inserción irregular de los anillos).
- Fluctuaciones en la recarga de agua dentro de los anillos.

- Heterogeneidad del suelo.

  En condiciones óptimas, la tolerancia esperada en la tasa de infiltración es de ±5% a ±10%.

- En suelos altamente heterogéneos, la variabilidad puede alcanzar hasta ±30%.

(ASTM D3385 – 18, 2018) (FAO, 1998)

2.1.6.4 Aplicación del infiltrómetro de doble anillo

2.1.6.4.1. Diseño y mantenimiento de carreteras

- El infiltrómetro de doble anillo se utiliza para medir la capacidad de infiltración del suelo en áreas donde se construirán carreteras, autopistas o caminos rurales.
- Una correcta estimación de la infiltración es esencial para diseñar sistemas de drenaje que eviten la acumulación de agua sobre la superficie de la carretera, lo cual puede causar daños en la estructura de la vía y en áreas con baja infiltración, pueden ser necesarios sistemas de drenaje más elaborados, como cunetas o drenajes subterráneos. Por el contrario, en zonas con alta infiltración, se puede reducir la cantidad de infraestructura de drenaje.

2.1.6.4.2 Evaluación de la estabilidad de taludes

En proyectos viales, la infiltración excesiva puede desestabilizar los taludes (pendientes adyacentes a las vías), provocando deslizamientos de tierra. El infiltrómetro de doble anillo se utiliza para evaluar el comportamiento del agua en el suelo y determinar si se requiere un drenaje adicional para evitar la saturación del suelo en áreas sensibles.

2.1.6.4.3 Control de erosión

En zonas de carreteras con pendientes pronunciadas, es importante controlar la erosión del suelo. La infiltración inadecuada puede generar escorrentía superficial que arrastre suelo y materiales, afectando la durabilidad de la infraestructura vial. Al medir la tasa de

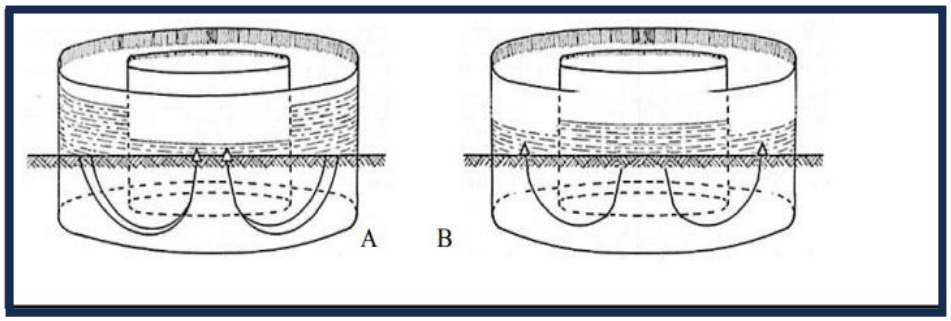
infiltración con el infiltrómetro, se pueden diseñar mejores sistemas de protección contra la erosión, como barreras vegetativas. (Bouwer, 1986).

2.1.6.5 Funcionamiento del infiltrómetro de doble anillo

El infiltrómetro de doble anillo consta de dos cilindros concéntricos, uno interno y otro externo, que se insertan en el suelo. El anillo interno se utiliza para medir la tasa de infiltración del agua en una sección específica del suelo, mientras que el anillo externo actúa como una barrera para reducir el flujo lateral del agua y asegurarse de que el movimiento del agua dentro del anillo interno sea predominantemente vertical.

- **Anillo Interior:** Es el principal responsable de medir la infiltración. Se llena con agua, y el descenso del nivel del agua se observa y registra a intervalos específicos para determinar la tasa de infiltración.
- **Anillo Exterior:** Su propósito es minimizar las pérdidas laterales del agua y mantener un flujo uniforme hacia el suelo en el área del anillo interior. (Bouwer, 1986).

Figura 2: *Infiltrómetro de doble anillo*



Fuente: (Bouwer, 1986).

2.1.6.6 Importancia del infiltrómetro de doble anillo

El infiltrómetro de doble anillo es de gran importancia en la ingeniería civil, especialmente en el ámbito vial, porque permite evaluar y medir de manera precisa la capacidad de infiltración de los suelos, lo que es fundamental para el diseño, construcción y

mantenimiento de carreteras y otras infraestructuras viales. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes que justifican su importancia:

2.1.6.6.1 Diseño adecuado de sistemas de drenaje

- En el diseño de carreteras, es crucial conocer cómo el suelo absorbe el agua de lluvia para evitar la acumulación excesiva de agua en la superficie o en el subsuelo. El infiltrómetro de doble anillo proporciona información sobre la tasa de infiltración, lo que permite a los ingenieros diseñar sistemas de drenaje eficientes (cunetas, zanjas, pozos de absorción) que eviten la formación de charcos y la erosión de la vía.

- Una infiltración inadecuada puede llevar a la corriente superficial, provocando la erosión del pavimento y aumentando los riesgos de daños estructurales.

2.1.6.6.2 Prevención de la erosión

En terrenos inclinados o en áreas propensas a lluvias intensas, el agua no infiltrada genera escorrentía que puede erosionar los taludes y las cunetas de las carreteras, comprometiendo la estabilidad de la infraestructura. El infiltrómetro de doble anillo ayuda a identificar suelos con baja capacidad de infiltración, lo que permite tomar medidas preventivas, como la instalación de muros de contención o sistemas de drenaje adicionales para evitar la erosión.

2.1.6.6.3 Estabilidad de la subrasante y subbase

- La infiltración excesiva de agua hacia la subrasante y la subbase puede reducir la capacidad de soporte del pavimento, provocando su deformación y fallos prematuros. El uso del infiltrómetro de doble anillo permite conocer la velocidad con la que el agua penetra en estas capas del suelo, ayudando a los ingenieros a tomar decisiones sobre la necesidad de implementar barreras impermeables o mejorar el drenaje en las capas subyacentes de la vía.

- Además, una medición precisa de la infiltración permite seleccionar

adecuadamente los materiales de construcción y refuerzos necesarios para evitar que el agua debilite las capas estructurales de la carretera.

2.1.6.6.4 Mantenimiento preventivo de las vías

Durante las fases de mantenimiento de carreteras es fundamental para prevenir problemas relacionados con el deterioro del pavimento debido a la infiltración inadecuada de agua. Al utilizar el infiltrómetro de doble anillo, los ingenieros pueden detectar cambios en la capacidad de infiltración del suelo a lo largo del tiempo, lo que permite realizar intervenciones preventivas antes de que ocurran daños mayores en la infraestructura vial.

2.1.6.6.5 Diseño y planificación en zonas urbanas

En áreas urbanas, donde las superficies pavimentadas limitan la infiltración natural del agua, es fundamental evaluar la capacidad de infiltración de los suelos remanentes para gestionar adecuadamente el agua de lluvia. El infiltrómetro de doble anillo se emplea para planificar sistemas de control de aguas pluviales que minimicen la escorrentía urbana, evitando inundaciones locales y reduciendo el impacto en las carreteras y sus alrededores.

2.1.6.6.6 Mitigación de inundaciones

En áreas propensas a inundaciones, conocer la tasa de infiltración del suelo es vital para diseñar medidas de control de agua. El infiltrómetro de doble anillo permite a los ingenieros anticipar cómo se comportará el suelo bajo condiciones de lluvias intensas, facilitando la implementación de soluciones de drenaje que mitiguen el riesgo de inundaciones en la vía y zonas aledañas. (Lal y Shukla, 2004).

2.1.7 Método Empírico de Kostiakov

El método empírico de Kostiakov es una fórmula matemática utilizada para describir la tasa de infiltración del agua en el suelo a lo largo del tiempo, basada en observaciones empíricas. Este método es ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería civil**,** especialmente en el diseño y gestión de infraestructuras viales**,** para entender cómo el agua

de lluvia se infiltra en los suelos que rodean las carreteras y otras infraestructuras relacionadas, lo que es crucial para el diseño de sistemas de drenaje y la prevención de daños en las vías. (Kostiakov, 1932).

2.1.7.1 Ecuación del Método de Kostiakov

El método de Kostiakov describe cómo disminuye la tasa de infiltración con el tiempo en un suelo no saturado. Este comportamiento es característico de los suelos en los que, inicialmente, la infiltración es rápida debido a la alta demanda de agua, pero con el tiempo, a medida que el suelo se satura, la tasa de infiltración disminuye. La ecuación empírica de Kostiakov es la siguiente:

$$I(t) = k * t^{\alpha}$$

Donde:

I(t)= es la tasa de infiltración a un tiempo **t**.

k= es un coeficiente que depende del tipo de suelo y de las condiciones iniciales del ensayo.

t = es el tiempo transcurrido desde el inicio del proceso de infiltración.

α = es un exponente que generalmente toma valores entre 0 y 1, y refleja la rapidez con la que la infiltración disminuye con el tiempo. Para suelos con alta capacidad de infiltración, α es mayor, mientras que, para suelos de baja capacidad, α es más bajo. (Kostiakov, 1932).

2.1.7.2 Aplicación del método de Kostiakov en ingeniería civil

2.1.7.2.1 Diseño de sistemas de drenaje en carreteras

El método de Kostiakov se utiliza para estimar la cantidad de agua que infiltrará el suelo alrededor de las carreteras durante y después de una lluvia. La curva de infiltración obtenida mediante esta ecuación es crucial para diseñar los sistemas de drenaje, como

zanjas, cunetas y alcantarillas, asegurando que puedan manejar tanto el flujo de escorrentía superficial como la infiltración. Este análisis ayuda a prevenir inundaciones y la acumulación de agua sobre la calzada.

2.1.7.2.2 Prevención de la saturación de la subrasante y subbase

En el diseño de pavimentos, la infiltración del agua hacia las capas inferiores de la carretera (subrasante y subbase) puede comprometer la estabilidad de la estructura vial. Con el método de Kostiakov, los ingenieros pueden estimar la velocidad a la que el agua infiltrará estas capas, lo que les permite implementar medidas para reducir la saturación, como mejorar el drenaje o impermeabilizar las capas de soporte del pavimento.

2.1.7.2.3 Gestión de la escorrentía y control de erosión

La infiltración limitada puede generar una mayor cantidad de escorrentía superficial, lo que aumenta el riesgo de erosión en los taludes y cunetas cercanas a las carreteras. El método de Kostiakov ayuda a predecir la infiltración y la generación de escorrentía, lo que permite planificar medidas de control de erosión, como revegetación, barreras físicas o muros de contención, para proteger las infraestructuras viales.

2.1.7.2.4 Planificación de zonas urbanas y áreas periurbanas

En áreas urbanas o en zonas periurbanas donde la infiltración es limitada por las superficies pavimentadas, el método de Kostiakov puede ayudar a determinar la capacidad de los suelos no pavimentados para infiltrar agua durante eventos de lluvia. Esta información es esencial para el diseño de sistemas de gestión de aguas pluviales que minimicen la escorrentía superficial y reduzcan el riesgo de inundaciones locales.

2.1.7.2.5 Evaluación de suelos para proyectos viales

Al analizar suelos a lo largo de un trazado vial, el método de Kostiakov puede ser utilizado para caracterizar la capacidad de infiltración de diferentes tipos de suelos. Esto es útil para seleccionar los tramos donde es necesario reforzar los sistemas de drenaje, estabilizar el suelo o tomar medidas preventivas para reducir el riesgo de erosión y daños en la vía.

(Hillel, 1998).

2.1.8 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un suelo es la relación entre la masa de agua presente en los poros del suelo y la masa de las partículas sólidas secas del suelo, expresada como un porcentaje. Se representa matemáticamente como:

$$W\% = \frac{Ww}{Ws} * 100$$

Dónde:

W%= Contenido de agua (%)

Ww= Peso del agua (g)

Ws = Peso del suelo seco (g)

El contenido de humedad es una propiedad física fundamental en la mecánica de suelos y es clave para determinar el comportamiento del suelo. Este parámetro tiene una influencia significativa en las propiedades del suelo como su cohesión, plasticidad, compresibilidad, densidad y resistencia al esfuerzo cortante. Además, es un factor determinante en la capacidad de soporte del suelo y en su comportamiento durante el proceso de compactación. (Hillel, 1998)

2.1.8.1 Método de secado al horno

El método de secado en horno se considera un método estándar para determinar el contenido de agua en los suelos, y es ampliamente aceptado y utilizado en aplicaciones de ingeniería y geotécnicas. (Contenido de humedad suelos, 2018).

Figura 3: *Horno de secado*

Fuente: Elaboración propia

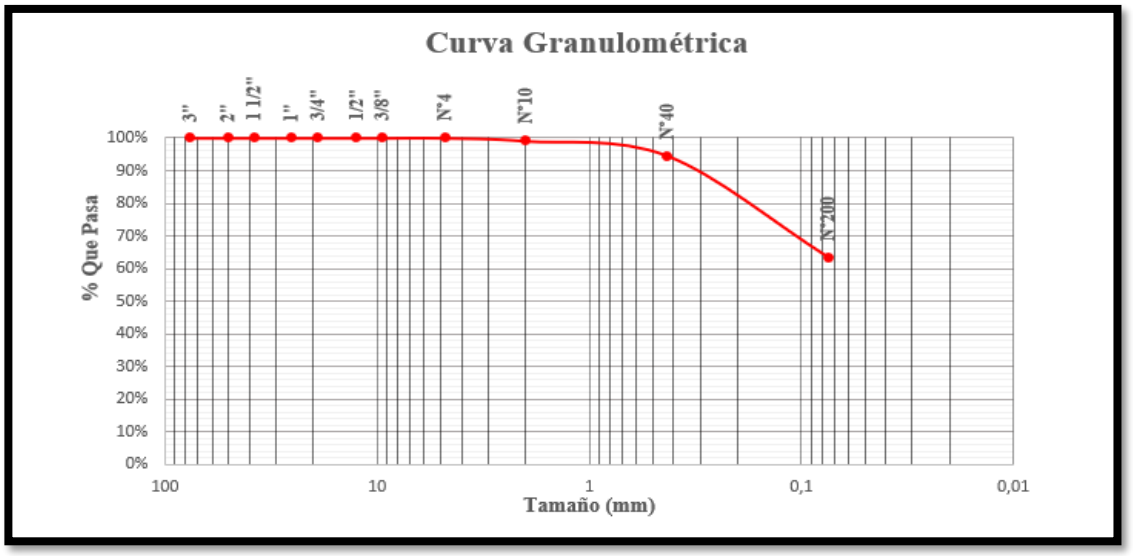
2.1.9 Análisis Granulométrico

La granulometría es el análisis de la distribución del tamaño de las partículas que componen un suelo o un material granular, como la arena, la grava, el limo o la arcilla. Es un método fundamental en la ingeniería civil y geotécnica para clasificar y caracterizar suelos y materiales en función de las proporciones de sus partículas de diferentes tamaños. Este análisis permite comprender las propiedades físicas del suelo, como la infiltración, capacidad de soporte y comportamiento ante cargas.

2.1.9.1 Curva Granulométrica

El resultado del análisis de granulometría se presenta en forma de curva granulométrica, que grafica el tamaño de las partículas (en el eje X) frente al porcentaje de material que pasa a través de los tamices (en el eje Y). Esta curva proporciona información valiosa sobre la gradación del suelo, es decir, si está bien graduada (partículas de varios tamaños) o mal graduada (predominio de partículas de un solo tamaño). (Das, 2010)

Gráfico 4: *Curva granulométrica del agregado*



Fuente: elaboración propia

2.1.9.2 Lavado por el tamiz N° 200

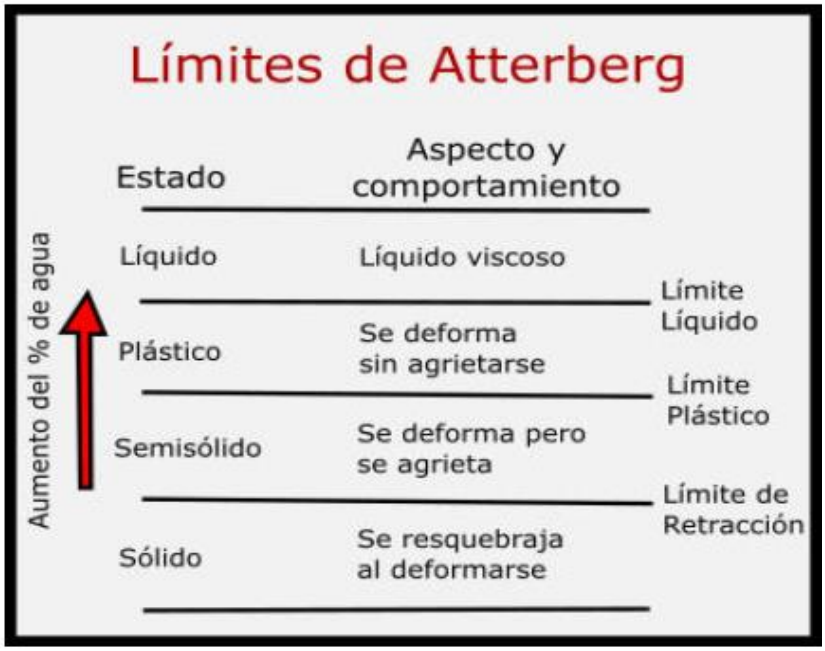
Es un procedimiento de prueba utilizado en ingeniería geotécnica para determinar la cantidad de material más fino que el tamaño del tamiz N° 200 (75 µm) mediante lavado. Este método implica lavar una muestra de agregado seco en un recipiente mediante agitación con agua, ya sea usando agua del grifo o agua que contenga un agente humectante disuelto si es necesario. El material suspendido y disuelto en el agua de lavado se decanta y se pasa a través del tamiz No. 200 hasta que el agua que pasa por el tamiz se vuelve clara. La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como un porcentaje de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje de material más fino que el tamaño del tamiz No. 200 por lavado. Este procedimiento es crucial para determinar con precisión el contenido de material fino en agregados finos o gruesos antes del tamizado en seco. (Análisis del tamaño de partículas, s.f.)

2.1.10 Límites de atterberg

Los límites de Atterberg son una serie de pruebas utilizadas en geotecnia para describir

las propiedades físicas de los suelos finos, especialmente aquellos que contienen arcilla. Estas pruebas ayudan a identificar los estados de consistencia de un suelo, que varían con el contenido de agua. Los límites de Atterberg incluyen tres valores clave: límite líquido (LL), límite plástico (LP) y límite de contracción (LC).

Gráfico 5: *Límites de atterberg*



Fuente: (Limites De Atterberg, 2019)

2.1.10.1 Límite líquido

El Límite Líquido (LL) es uno de los tres límites de Atterberg y se define como el contenido de agua (en porcentaje) a partir del cual un suelo fino (generalmente arcillas y limos) pasa de un estado plástico a un estado líquido. En este estado, el suelo tiene suficiente agua para fluir como un líquido cuando se somete a una pequeña fuerza.

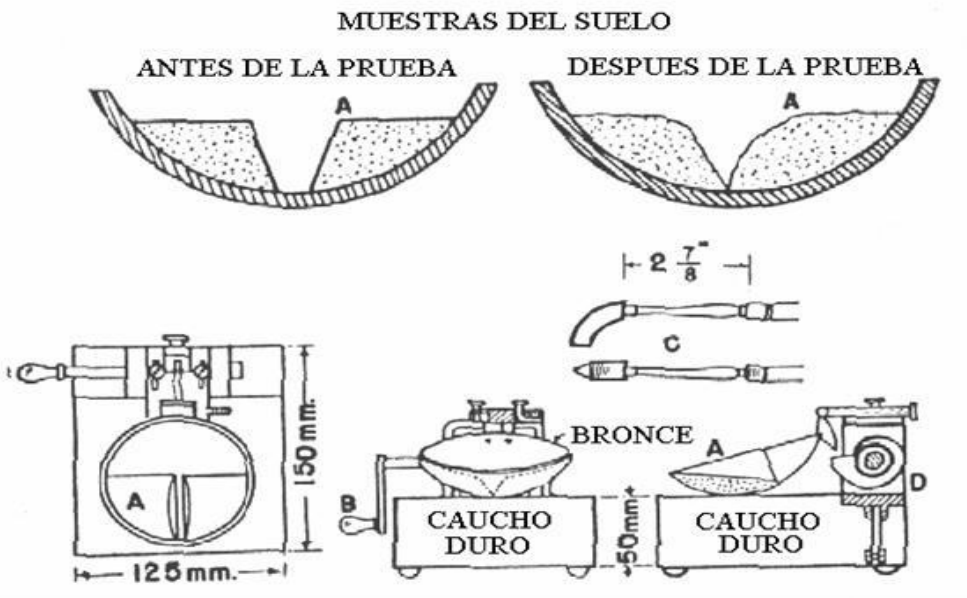
El Límite Líquido se determina en laboratorio utilizando un dispositivo conocido como copa de Casagrande, que evalúa el número de golpes que son necesarios para cerrar una ranura en una muestra de suelo en función de su contenido de humedad. El valor del

contenido de agua en el que el suelo requiere exactamente 25 golpes para que la ranura se cierre es el Límite Líquido. (Das, 2010)

2.1.10.1.1 Límite líquido por Copa de Casagrande

Para determinar el límite líquido Terzaghi le sugirió a Casagrande en 1927, que diseñará un dispositivo mecánico que pudiera eliminar en lo posible los errores del operador en la determinación del mismo. Este dispositivo consiste en una copa de latón y una base de goma dura. La copa es esférica, con radio interior de 54 mm, espesor 2 mm y peso 200 ± 20 g incluyendo el tacón. La copa de latón se puede soltar sobre la base por una leva operada por una manivela. (Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas, 2010)

Gráfico 6: *Copa de Casagrande*



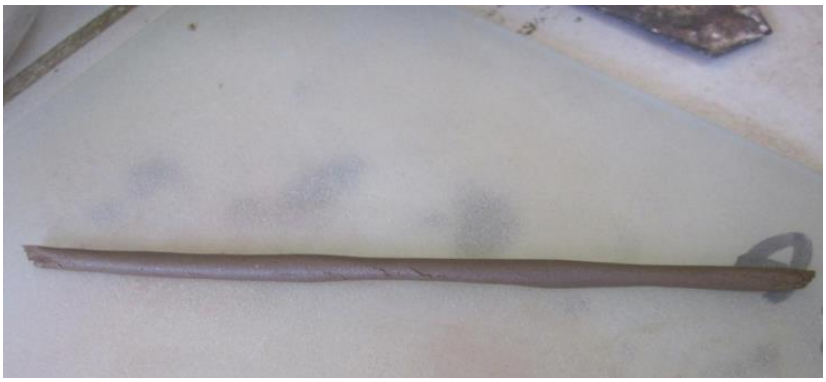
Fuente: (Lambe & Whitman, 1969)

2.1.10.2 Límite plástico

El Límite Plástico (LP) es uno de los límites de Atterberg, utilizado para describir el comportamiento de los suelos finos, como las arcillas y los limos, en función de su

contenido de agua. Es el contenido de agua en el cual un suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, es decir, es el punto en el que el suelo puede ser moldeado sin agrietarse, pero aún no es lo suficientemente líquido como para fluir. Este límite se define como el contenido de humedad mínimo en el que un suelo puede ser enrollado en filamentos o cilindros de 3 mm de diámetro sin que se agriete o rompa. (Das, 2010)

Figura 4: *Límite plástico*



Fuente: Elaboración propia

2.1.10.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es una medida que cuantifica el rango de contenido de humedad en el que un suelo exhibe propiedades plásticas. Se calcula como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) del suelo, es decir:

Índice de Plasticidad (IP)=Límite Líquido (LL) − Límite Plástico (LP)

Este índice proporciona información sobre la plasticidad y cohesividad del suelo. Un mayor índice de plasticidad indica que el suelo puede deformarse en un amplio rango de humedad sin desintegrarse, lo que suele estar asociado con suelos arcillosos, mientras que un bajo IP es característico de suelos arenosos o limosos. El índice de plasticidad es crucial en la clasificación de suelos y en la predicción de su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y humedad. (Das, 2010)

2.1.11 Clasificación de suelos

La clasificación de suelos mediante el método SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) es un sistema estándar utilizado para identificar y agrupar suelos en función de sus propiedades físicas y características de comportamiento. El SUCS clasifica los suelos en dos categorías principales: suelos granulares (arenas y gravas) y suelos finos (limos y arcillas), basándose en la granulometría y en los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico).

El sistema utiliza una serie de símbolos y letras para describir las características del suelo:

- Suelos gruesos (granulares): Se identifican con las letras G para gravas y S para arenas, seguidas de letras adicionales como W para suelos bien graduados o P para suelos mal graduados.
- Suelos finos: Se utilizan las letras M para limos y C para arcillas, acompañadas por una clasificación de baja o alta plasticidad (L o H).
- Suelos orgánicos: Se clasifican con la letra O y se diferencian por su contenido de materia orgánica.

El SUCS es ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica y construcción civil porque proporciona una forma estandarizada de describir el comportamiento de los suelos, facilitando la comunicación entre ingenieros y el diseño de proyectos. (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011)

2.1.11.1 Carta de plasticidad

La Carta de Plasticidad de Casagrande es una herramienta gráfica utilizada en la mecánica de suelos para clasificar suelos finos (arcillas y limos) en función de su límite de líquido (LL) y su índice de plasticidad (IP)**.** Esta carta permite identificar el comportamiento probable del suelo con respecto a su plasticidad y compresibilidad

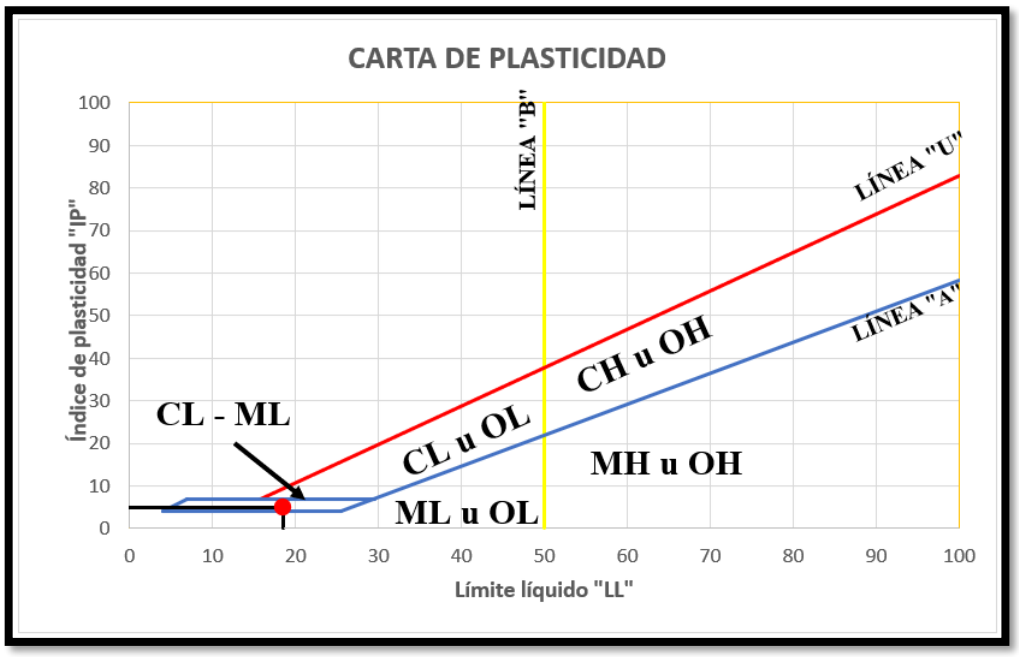
En la carta de plasticidad, se trazan dos líneas principales:

- **Línea A**: Esta línea separa los limos de las arcillas. Los suelos situados por encima de la línea A se clasifican generalmente como arcillas, mientras que los suelos situados por debajo de la línea A se consideran limos.

- **Línea U**: Indica el límite superior de plasticidad para la mayoría de los suelos naturales.

  (Casagrande, 1948)

Gráfico 7: *Carta de plasticidad*



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: *Tipos de suelos*

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
GRAVA	G	Bien Graduado	W
ARENA	S	Pobremente Graduado	P
LIMO	M	Limoso	M
ARCILLA	C	Arcilloso	C
ORGANICO	O	Baja Plasticidad	L
		Alta Plasticidad	H

Fuente: (Hillel, 1998).

2.2 Marco normativo

- **Norma ASTM D3385-09 (2018):** Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de suelos en el campo utilizando un infiltrómetro de doble anillo.
- **Norma (ASTM D2216)** Contenido de humedad.
- **Norma ASTM D854 – AASHTO T100:** Método para la determinación de la granulometría en suelos finos mediante el lavado por tamiz #200.
- **Norma (AASHTO D4318 AASHTO T90-T89)** Límites de Atterberg.
- **Manual de estudio de suelos (USDA, 2017)** Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. clasifica la textura del suelo en función de la proporción de arena, limo y arcilla.

2.3 Marco referencial

En la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho no se encontró ninguna tesis que aborde específicamente la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo en la medición de la infiltración en suelos naturales. Sin embargo, se identificaron estudios similares en otros países que han analizado el uso de este equipo en diferentes condiciones de suelo. Estas

investigaciones han servido como referencia para comparar metodologías y enfoques utilizados en el presente estudio.

- **Información informal**

  Además de la revisión de tesis, se consultó a profesionales con experiencia en ensayos de laboratorio de suelos, quienes brindaron información valiosa sobre el uso del infiltrómetro de doble anillo en campo y en laboratorio. Estas entrevistas permitieron conocer las dificultades y limitaciones del equipo, así como las mejores prácticas para mejorar la precisión de las mediciones.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

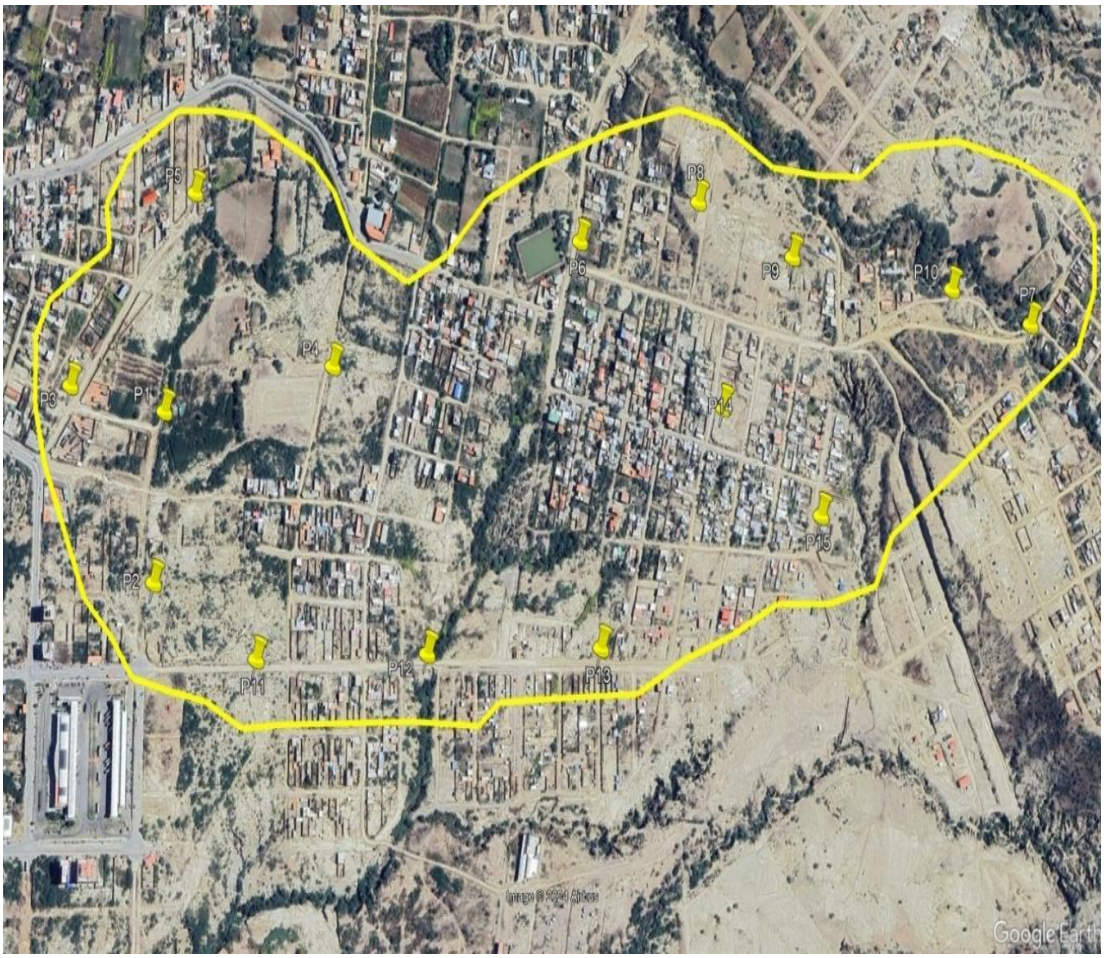
CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Ubicación de la zona de estudio

- **Barrio Torrecillas:** El barrio Torrecillas de la ciudad de Tarija, Bolivia, se extiende sobre aproximadamente 456 hectáreas, delimitado al norte por el cerro Gamoneda, al sur por la carretera Panamericana, al este por la quebrada Torrecillas y al oeste por la quebrada Cabeza del Toro.

Imagen 1: *Mapa barrio Torrecillas*



Fuente: Google Earth

- **Barrio Jesús María:** el barrio Jesús María, también en el Distrito 10 de Tarija, abarca alrededor de 50 hectáreas y está delimitado por dos quebradas. Estos límites fueron establecidos en 2019 mediante lineamientos proporcionados por la Dirección de Ordenamiento Territorial, facilitando la planificación urbana y la conexión con áreas como el mercado Abasto del Sur.

Imagen 2: *Mapa barrio Jesús María*

Fuente: Google Earth

3.2 Coordenadas U.T.M

Tabla 6: *Coordenadas barrio Torrecillas*

Muestra	Barrio	Ubicación			
1	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326387	Coordenada (N-S)	7615298

Muestra	Barrio	Ubicación			
2	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326559	Coordenada (N-S)	7615152

Muestra	Barrio	Ubicación			
3	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326250	Coordenada (N-S)	7615176

Muestra	Barrio	Ubicación			
4	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326533	Coordenada (N-S)	7615587

Muestra	Barrio	Ubicación			
5	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326182	Coordenada (N-S)	7615515

Muestra	Barrio	Ubicación			
6	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326686	Coordenada (N-S)	7616063

Muestra	Barrio	Ubicación			
7	Torrecillas	Coordenada (E-O)	327299	Coordenada (N-S)	7616677

Muestra	Barrio	Ubicación			
8	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326782	Coordenada (N-S)	7616276

Muestra	Barrio	Ubicación			
9	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326951	Coordenada (N-S)	7616373

Muestra	Barrio	Ubicación			
10	Torrecillas	Coordenada (E-O)	327171	Coordenada (N-S)	7616588

Muestra	Barrio	Ubicación			
11	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326757	Coordenada (N-S)	7615247

Muestra	Barrio	Ubicación			
12	Torrecillas	Coordenada (E-O)	326946	Coordenada (N-S)	7615505

Muestra	Barrio	Ubicación			
13	Torrecillas	Coordenada (E-O)	327138	Coordenada (N-S)	7615767

Muestra	Barrio	Ubicación			
14	Torrecillas	Coordenada (E-O)	327029	Coordenada (N-S)	7616143

Muestra	Barrio	Ubicación			
15	Torrecillas	Coordenada (E-O)	327254	Coordenada (N-S)	7616201

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7: *Coordenadas barrio Jesús María*

Muestra	Barrio	Ubicación			
16	Jesús María	Coordenada (E-O)	324968	Coordenada (N-S)	7616031

Muestra	Barrio	Ubicación			
17	Jesús María	Coordenada (E-O)	325162	Coordenada (N-S)	7616039

Muestra	Barrio	Ubicación			
18	Jesús María	Coordenada (E-O)	325181	Coordenada (N-S)	7616248

Muestra	Barrio	Ubicación			
19	Jesús María	Coordenada (E-O)	325257	Coordenada (N-S)	7616446

Muestra	Barrio	Ubicación			
20	Jesús María	Coordenada (E-O)	325324	Coordenada (N-S)	7616594

Muestra	Barrio	Ubicación			
21	Jesús María	Coordenada (E-O)	325364	Coordenada (N-S)	7616709

Muestra	Barrio	Ubicación			
22	Jesús María	Coordenada (E-O)	325284	Coordenada (N-S)	7616849

Muestra	Barrio	Ubicación			
23	Jesús María	Coordenada (E-O)	325203	Coordenada (N-S)	7616932

Muestra	Barrio	Ubicación			
24	Jesús María	Coordenada (E-O)	325082	Coordenada (N-S)	7616768

Muestra	Barrio	Ubicación			
25	Jesús María	Coordenada (E-O)	324909	Coordenada (N-S)	7616501

Muestra	Barrio	Ubicación			
26	Jesús María	Coordenada (E-O)	324816	Coordenada (N-S)	7616245

Muestra	Barrio	Ubicación			
27	Jesús María	Coordenada (E-O)	324759	Coordenada (N-S)	7616609

Muestra	Barrio	Ubicación			
28	Jesús María	Coordenada (E-O)	324917	Coordenada (N-S)	7616726

Muestra	Barrio	Ubicación			
29	Jesús María	Coordenada (E-O)	324819	Coordenada (N-S)	7616902

Muestra	Barrio	Ubicación			
30	Jesús María	Coordenada (E-O)	325020	Coordenada (N-S)	7617051

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Coordenadas Geográficas

Tabla 8: Coordenadas geográficas barrio Torrecillas

Muestra	Barrio	Ubicación			
1	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,556686	Longitud (N-S)°	-64,676682
2	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,558124	Longitud (N-S)°	-64,675038
3	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,557957	Longitud (N-S)°	-64,67749
4	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,553048	Longitud (N-S)°	-64,673602
5	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,554842	Longitud (N-S)°	-64,678384
6	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,549873	Longitud (N-S)°	-64,673338
7	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,544425	Longitud (N-S)°	-64,66779
8	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,548636	Longitud (N-S)°	-64,672598
9	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,547231	Longitud (N-S)°	-64,67099
10	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,54516	Longitud (N-S)°	-64,668683
11	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,557178	Longitud (N-S)°	-64,672876
12	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,555078	Longitud (N-S)°	-64,671225
13	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,551921	Longitud (N-S)°	-64,666701
14	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,550323	Longitud (N-S)°	-64,667833
15	Torrecillas	Latitud (E-O)°	-21,550465	Longitud (N-S)°	-64,667783

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 9: Coordenadas geográficas barrio Jesús María

Muestra	Barrio	Ubicación			
16	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,548963	Longitud (N-S)°	-64,688715
17	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,548963	Longitud (N-S)°	-64,688715
18	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,547585	Longitud (N-S)°	-64,68856
19	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,546152	Longitud (N-S)°	-64,687497
20	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,544498	Longitud (N-S)°	-64,686508
21	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,543847	Longitud (N-S)°	-64,686186
22	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,542431	Longitud (N-S)°	-64,686886
23	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,541763	Longitud (N-S)°	-64,687519
24	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,543394	Longitud (N-S)°	-64,689202
25	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,545238	Longitud (N-S)°	-64,689816
26	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,547873	Longitud (N-S)°	-64,69131
27	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,544137	Longitud (N-S)°	-64,690776
28	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,542567	Longitud (N-S)°	-64,690722
29	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,541732	Longitud (N-S)°	-64,691521
30	Jesús María	Latitud (E-O)°	-21,540199	Longitud (N-S)°	-64,688849

Fuente: Elaboración Propia.

3.4 Criterios del diseño metodológico

3.4.1 Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio de suelos y campo

3.4.2 Población

Clasificación de suelos, tasa de infiltración

3.4.3 Muestra

- Exploración
- Granulometría
- Limite líquido
- limite plástico
- Contenido de Humedad
- Clasificación de suelos
- Tasa de infiltración

3.4.4 Tamaño de muestra

Para el tamaño de la muestra se realiza de acuerdo a un nivel de confianza del 95% considerando una población infinita debido a que aún no se sabe la cantidad de muestras exactas para realizar el proyecto. mediante la metodología estratificada se puede calcular un numero coherente para calcular el número de ensayos el cual alcance un nivel de confianza del 95% y a su vez se pueda terminar en (4 a 5 meses de clases académicas).

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \sigma^2}{N\left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \sigma^2}{N}}$$

$\sigma^2 = 0{,}25$; Investigaciones que requieran mayor cantidad de tiempo y muestra.

$\sigma^2 = 0{,}15$; Investigaciones que requiera en promedio 6 meses de tiempo.

$\sigma^2 = 0{,}10$; Investigaciones que requieran entre 4-6 meses de tiempo.

Se adoptará una varianza de **($\sigma 2$ =0,15)** debido a que el tiempo asignado para la realización de trabajos está entre 4 a 5 meses.

Nivel de confianza

Nivel de Confianza (NC) %	Variable z
90	1,64
95	1,96
97	2,17
98	2,33
99	2,58

Fuente: Montgomery, DC, & Runger, GC (2010)

NC = 95% → Z= 1,96

El error correspondiente está en (e = 5%)

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \sigma^2}{N\left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \sigma^2}{N}} \qquad n = \frac{6.3}{42 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{6.3}{42}} = 35.53 \cong 36$$

$$ni = n \times fi\ (redondeado)$$

$$fi = \frac{Ni * \sigma^2}{\sum Ni * \sigma^2}$$

$$ni = n \times fi\ (redondeado)$$

Tabla 10: Elaboración de las técnicas de muestreo

ETAPAS	ENSAYOS	Ni	σ²	Ni*σ²	fi	ni	ni
Muestreo	Exploracion	3	0,15	0,45	0,07	2,5	2,5
Caracterizacion	Granulometria	3	0,15	0,45	0,07	2,5	2,5
	Limite liquido	3	0,15	0,45	0,07	2,5	2,5
	limite plastico	3	0,15	0,45	0,07	2,5	2,5
Pruebas definitivas	Barrio 1 Taza de infiltracion	15	0,15	2,25	0,36	13	10
	Barrio 3 Taza de infiltracion	15	0,15	2,25	0,36	13	10
		42		6,3			30

Fuente: elaboración propia

Total, de ensayos = 30 ensayos

3.5 Muestreo Probabilístico

Tamaño de muestra estratificada

$$Muestreo\ Estratificado = \frac{N * Z^2 * 50\% * 1}{e^2 * (N-1) + Z^2 * 50\% * 1}$$

$$Muestreo\ Estratificado = \frac{30 * 1{,}96^2 * 50\% * 1}{0.05^2 * (30-1) + 1{,}96^2 * 50\% * 1} = 29 \approx 30\ ensayos$$

Tabla 11: Muestreo estratificado desproporcional

PROVINCIA	BARRIO	MUESTRA	CLASIFICACIÓN SUCS	NÚMERO PARCIAL	TOTAL
CERCADO	TORRECILLAS	P1	CL	1	15
		P2	CL	1	
		P3	CL	1	
		P4	CL	1	
		P5	CL	1	
		P6	CL	1	
		P7	ML	1	
		P8	CL	1	
		P9	CL	1	
		P10	CL	1	
		P11	ML	1	
		P12	CL	1	
		P13	SC	1	
		P14	CL	1	
		P15	CL	1	
	JESÚS MARÍA	P16	CL	1	15
		P17	CL	1	
		P18	CL	1	
		P19	CL	1	
		P20	CL	1	
		P21	CL	1	
		P22	CL	1	
		P23	CL	1	
		P24	SC - SM	1	
		P25	SC - SM	1	
		P26	SC - SM	1	
		P27	SC - SM	1	
		P28	SC - SM	1	
		P29	SC - SM	1	
		P30	SC - SM	1	

Fuente: elaboración propia

3.5.1 Justificación del tipo de muestreo

- Cumple para los requisitos de muestreo estratificado no proporcional.
- Como cada estrato tiene una muestra proporcional, se pueden comparar los resultados de infiltración entre barrios de manera más confiable.

- Se asegura de que cada barrio (estrato) esté bien representado, permitiendo una mejor comparación de la infiltración en distintos suelos.
- Como la infiltración varía según la textura y composición del suelo, el muestreo estratificado permite analizar cada tipo de suelo de manera adecuada.

3.6 Operatividad del infiltrómetro de doble anillo

3.6.1 Eficiencia

- **Tiempo de medición:** Se midió en función del tiempo de cada prueba y el consumo de agua. Se realizaron 30 pruebas con tiempos de medición que variaron entre 120 y 330 minutos, con un promedio de 250 minutos por prueba. La eficiencia del infiltrómetro depende de la correcta ejecución del procedimiento y de factores como la textura del suelo.

Tabla 12: Tabla de tiempo promedio de la infiltración promedio

Muestras	Tiempo (min)	Tiempo promedio (min)
P1	240	250
P2	240	
P3	330	
P4	210	
P5	300	
P6	240	
P7	240	
P8	240	
P9	270	
P10	270	
P11	210	
P12	180	
P13	240	
P14	240	
P15	210	
P16	240	
P17	270	
P18	270	
P19	240	
P20	240	
P21	120	
P22	210	
P23	240	
P24	210	
P25	180	
P26	330	
P27	330	
P28	330	
P29	330	
P30	300	

Fuente: Elaboración Propia.

- **Facilidad de uso**: La instalación del infiltrómetro requiere nivelación del terreno y atención en el tiempo de registro, lo que influye en su operatividad.
- **Consumo de agua**: La cantidad de agua utilizada dependerá del tipo de suelo y la duración de la prueba.

3.6.2 Precisión

La precisión del infiltrómetro se evalúa mediante la variabilidad en los resultados, la comparación con métodos empíricos y la influencia de factores externos:

- **Variabilidad en los resultados:** La tasa de infiltración varió entre 2.36 mm/h y 18.16 mm/h, con un promedio de 8.50 mm/h, dependiendo del tipo de suelo.
- **Comparación con métodos empíricos:** Los resultados obtenidos con el infiltrómetro mostraron una alta correlación de (0.9993) con el método empírico de Kostiakov, lo que indica su precisión en la estimación de la tasa de infiltración.
- **Influencia de factores externos:** La precisión del equipo puede verse afectada por la compactación del suelo, la presencia de raíces, la heterogeneidad del terreno y errores en la instalación.

3.6.3 Confiabilidad

La confiabilidad se analiza a través de errores en las mediciones y métodos de validación:

- **Errores en las mediciones**: La norma ASTM D3385 recomienda protocolos estrictos para minimizar los errores. En condiciones óptimas, la tolerancia esperada en la tasa de infiltración es de **±5% a ±10%**, aunque en suelos heterogéneos puede alcanzar hasta **±30** %.
- **Métodos de validación**: Se utilizó el muestreo estratificado en dos barrios diferentes para garantizar representatividad. Además, se realizaron comparaciones con valores históricos y modelos matemáticos para verificar la consistencia de los resultados.

3.7 Muestreo de materiales

3.7.1 Muestreo zona de estudio

El infiltrómetro se utiliza principalmente para medir la tasa de infiltración del agua en el suelo, por lo que las zonas que vamos a definir pueden basarse en características del terreno, tipos de suelo.

El área de estudio será un barrio específico en la ciudad de Tarija. (Barrio Torrecillas, Barrio Jesús Maria). Ese será el lugar de trabajo por que facilita la investigación ya que tiene muchas áreas sin pavimentar.

Se realizo 15 puntos en cada barrio por lo que se tomó muestras de cada punto en bolsas de nylon para evitar que pierda su humedad natural y realizar los respectivos ensayos en laboratorio.

Imagen 3: *Zona de estudio*

Fuente: Elaboración propia

3.8 Contenido de humedad (ASTM D2216)

Se realizo por el método del horno, donde se tomó tres muestras representativas de cada arcilla, se pesó las muestras con su humedad natural y se llevó al horno a una temperatura constante de 110ºC durante 24 horas. Transcurrido el tiempo se sacó las muestras del horno y se pesó nuevamente, obteniendo así el peso seco de la muestra el cual servirá para determinar el contenido de humedad.

Imagen 4: *Contenido de humedad*

Fuente: Elaboración propia

Para calcular del contenido de humedad se expresa como un porcentaje:

$$\text{Contenido de humedad (W)} = \frac{(\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco})}{Peso\ seco} * 100$$

Donde:

- **Peso húmedo** es el peso de la muestra fresca más el peso del recipiente.
- **Peso seco** es el peso de la muestra seca más el peso del recipiente.
- **Peso del recipiente** se resta en ambos casos para obtener solo el peso del suelo.

Imagen 5: *Muestra natural*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: *Contenido de humedad de "P2 B/Torrecillas"*

CONTENIDO DE HUMEDAD			
Cápsula	**1**	**2**	**3**
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	66,11	63,12	72,66
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	63,79	60,45	70,13
Peso de cápsula [g]	13,1	12,65	13,69
Peso de suelo seco [g]	50,69	47,80	56,44
Peso del agua [g]	2,32	2,67	2,53
Contenido de humedad [%]	4,58	5,59	4,48
PROMEDIO	**4,88**		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Resumen del contenido de humedad de las muestras

BARRIO	MUESTRA	CONTENIDO DE HUMEDAD [%]
TORRECILLAS	P1	4,62
	P2	4,88
	P3	9,97
	P4	9,07
	P5	2,86
	P6	5,03
	P7	4,53
	P8	9,05
	P9	3,42
	P10	4,19
	P11	8,67
	P12	4,23
	P13	1,95
	P14	4,53
	P15	4,1
JESÚS MARÍA	P16	6,58
	P17	6,99
	P18	6,49
	P19	9,36
	P20	8,05
	P21	7,15
	P22	12,3
	P23	6,07
	P24	3,09
	P25	5,7
	P26	4,85
	P27	4,87
	P28	6,44
	P29	4,49
	P30	4,26

Fuente: Elaboración propia

3.9 Granulometría (ASTM D854 – AASHTO T100)

Al tratarse de suelos finos se realizó un lavado por el tamiz #200, para luego con lo retenido en el tamiz, realizar la granulometría con sus respectivos tamices.

3.9.1 Lavado por el tamiz #200 para suelos finos

Se realizo la granulometría para suelos finos usando el lavado por el tamiz #200, donde se usó una muestra secada al horno de 2000 g para cada arcilla en cada ensayo las que se dejaron 24 horas antes saturando.

Imagen 6: *Lavado por el tamiz #200*

Fuente: Elaboración propia

Después de realizado el lavado se hizo secar todo el material retenido en el tamiz #200 en un horno a temperatura constante de 110 ºC por 24 horas. Una vez secado el material se pesó y se realizó el tamizado con los tamices Nº4, Nº10, Nº40 y Nº200, los cuales son usados para suelos finos.

Imagen 7: *Tamizado de las arcillas*

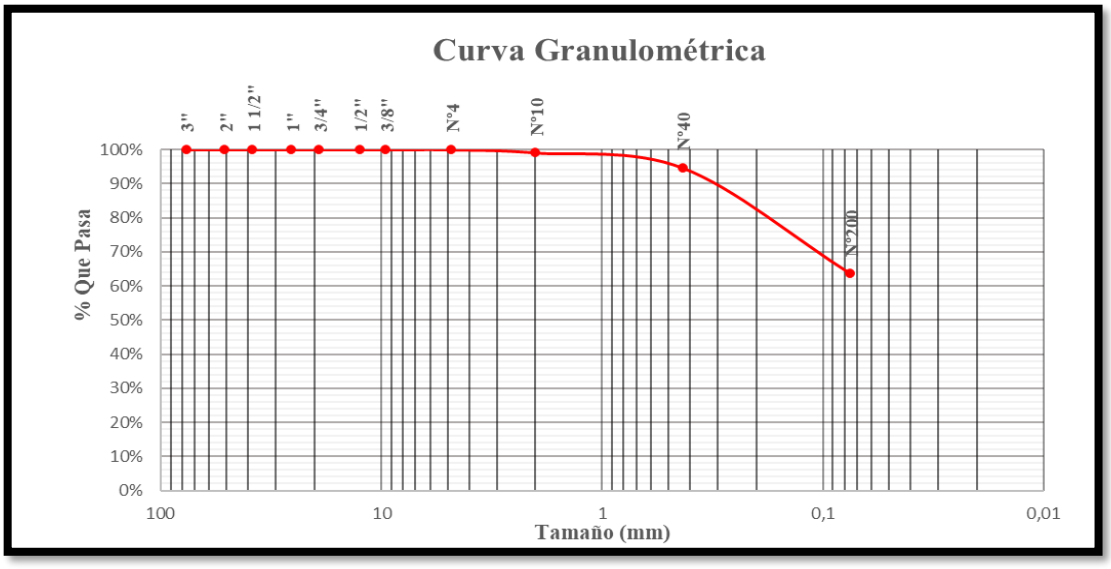
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: *Granulometría de "P2 B/Torrecillas"*

Peso Total [g]			**2000**		
Tamices	**tamaño [mm]**	**Peso Ret. [g]**	**Ret. Acum. [g]**	**[%] Ret.**	**[%] que pasa del total**
3"	76,2	0,00	0,00	0,00%	100,00%
2"	50,8	0,00	0,00	0,00%	100,00%
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00%	100,00%
1"	25,4	0,00	0,00	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00%	100,00%
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00%	100,00%
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Nº4	4,80	0,00	0,00	0,00%	100,00%
Nº10	2,00	18,00	18,00	0,90%	99,10%
Nº40	0,43	89,40	107,40	5,37%	94,63%
Nº200	0,075	621,40	728,80	36,44%	63,56%
Base		1,40			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8: Curva granulométrica de "P2 B/Torrecillas"



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Resumen granulometría de las muestras

BARRIO	MUESTRA	% PASA TAMIZ #200
TORRECILLAS	P1	66,21
	P2	63,56
	P3	96,05
	P4	96,91
	P5	81,92
	P6	85,9
	P7	83,33
	P8	96,53
	P9	75,22
	P10	77,52
	P11	96,02
	P12	88,59
	P13	41,64
	P14	85,36
	P15	89,24
JESÚS MARÍA	P16	61,14
	P17	62,47
	P18	63,27
	P19	55,41
	P20	53
	P21	55,68
	P22	54,68
	P23	57,4
	P24	34,91
	P25	41,41
	P26	37,42
	P27	33,73
	P28	37,77
	P29	38,96
	P30	34,56

Fuente: Elaboración propia

3.10 Límites de Atterberg (AASHTO D4318 AASHTO T90-T89)

Comprende el límite líquido, límite plástico y límite de contracción. Para la clasificación de las arcillas solo se usa el límite líquido y límite plástico.

3.10.1 Límite líquido (ASTM D4318 – AASHTO T89)

Se realizo por el método de Casagrande. Se instalo el equipo en una superficie plana y se calibro la altura de caída de la copa a 1 cm. Se uso 100 g de muestra que pasa el tamiz Nº40 secada al horno previamente por 24 horas. Se agrego agua y se mezcló con la espátula hasta logra una pasta homogénea. Se peso 4 capsulas luego se puso con la espátula un poco de muestra en la copa de Casagrande enrazando horizontalmente y presionando un poco para eliminar el aire de la muestra. Después con el ranurador hacer una ranura a lo largo de la copa y mover la manija de golpes con un ritmo de 2 golpes por segundo hasta que en la ranura se produzca una unión de 1.27 cm. Anotar los golpes y hacer dos cortes a la muestra perpendicular a la ranura extrayendo toda la unión y depositando en una capsula. Luego pesar en una balanza con precisión de 0.01 g y llevar al horno a 110 ºC por 24 horas y se vuelve a pesar para así calcular el peso seco y el contenido de humedad. Realizar el procedimiento para golpes entre 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35.

Imagen 8: *Límite líquido*

Fuente: Elaboración propia

3.10.2 Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 – AASHTO T90)

Terminado el ensayo del límite líquido se recogió la muestra sobrante y se amasó hasta que pueda ser manipulado plásticamente. Luego se hace una pequeña pelotita con el material y se la lleva sobre la base de vidrio para rodarla con la palma de la mano y convertirla en rollitos de 3 mm de diámetro aproximadamente, si el rollito a este diámetro no presenta rajaduras volver a hacer el ensayo hasta que el rollito presente rajaduras a los 3 mm de diámetro ya que esa será la humedad de límite plástico. Una vez logrado la rajadura del rollito a los 3 mm de diámetro cortar la muestra con la espátula en trocitos en los que se encuentren las rajaduras y poner en la capsula a pesar. Luego se mete al horno por 24 horas a una temperatura de 110 ºC y se vuelve a pesar para así calcular el peso seco y el contenido de humedad. Se debe hacer por lo menos 2 ensayos para luego hacer un promedio y tener un valor considerable

Imagen 9: *Límite plástico*

Fuente: Elaboración propia

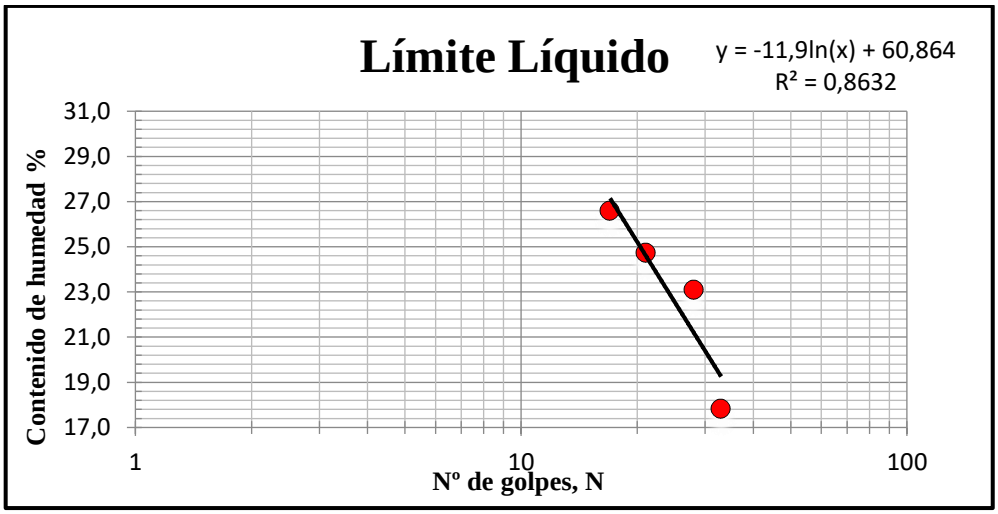
Una vez realizado el límite líquido y el límite plástico se calculó el índice de plasticidad el cual es la resta del límite líquido y el límite plástico (IP = LL – LP).

Tabla 17: *Límite líquido y límite plástico de "P2 B/Torrecillas"*

DESCRIPCÍON	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLASTICO		
cápsula Nº	1	2	3	4	1	2	3
Nº de golpes	17	21	28	33			
Peso de suelo húmedo + Cápsula [g]	41,13	43,96	37,16	36,39	19,15	23,49	17,28
Peso de suelo seco + Cápsula [g]	35,57	39,15	33,64	33,28	18,82	22,57	16,98
Peso del agua [g]	5,56	4,81	3,52	3,11	0,33	0,92	0,3
Peso de la Cápsula [g]	14,68	19,70	18,39	15,82	16,56	16,23	14,87
Peso Suelo seco [g]	20,89	19,45	15,25	17,46	2,26	6,34	2,11
Contenido de humedad [%]	26,62	24,73	23,08	17,81	14,60	14,51	14,22
Porcentaje de húmedad [%]	23,06				14,44		

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9: *Límite líquido*



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

LL = -11,9* ln (25) + 60,864 = 22,56 = 23 %

Límite plástico

LP = (14,60 + 14,51 + 14,22) / 3 = 14,44 = 14 %

Índice de plasticidad

IP = LL - IP = 23 – 14 = 9 %

Tabla 18: Resumen de límites de consistencia de las muestras

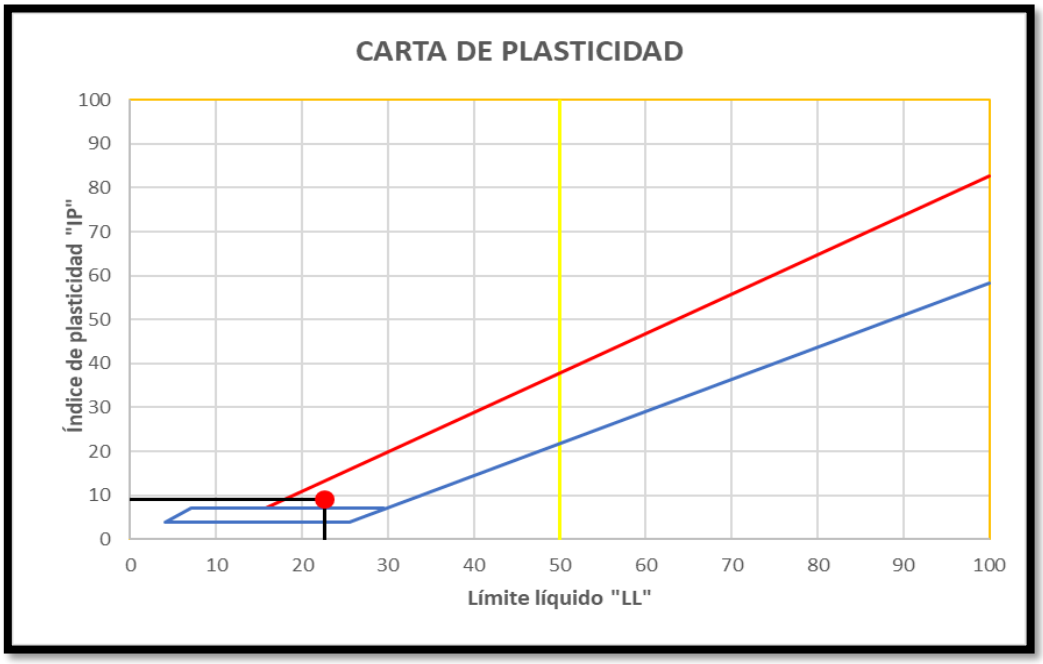
BARRIO	Muestra [Punto N°]	Límite Líquido [%]	Límite Plástico [%]	Índice de Plásticidad [%]
TORRECILLAS	P1	23	14	9
	P2	23	14	9
	P3	35	23	12
	P4	34	19	15
	P5	27	18	9
	P6	31	17	14
	P7	42	30	12
	P8	32	19	13
	P9	34	19	15
	P10	29	17	12
	P11	47	31	16
	P12	32	19	13
	P13	35	19	16
	P14	37	18	19
	P15	27	17	10
JESÚS MARÍA	P16	23	15	8
	P17	27	16	11
	P18	26	15	11
	P19	24	16	8
	P20	26	14	12
	P21	24	15	9
	P22	23	16	7
	P23	24	15	9
	P24	18	14	4
	P25	20	14	6
	P26	16	12	4
	P27	20	14	6
	P28	20	14	6
	P29	19	15	4
	P30	18	14	4

Fuente: Elaboración propia

3.11 Clasificación de suelos finos

Se realizo el sistema de clasificación S.U.C.S. para suelos finos utilizando la carta de plasticidad.

Gráfico 10: *Clasificación con la carta de plasticidad de "P2 B/Torrecillas"*



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Resumen de clasificación de las muestras

BARRIO	Muestra [Punto N°]	Clasificación S.U.C.S
TORRECILLAS	P1	CL
	P2	CL
	P3	CL
	P4	CL
	P5	CL
	P6	CL
	P7	ML
	P8	CL
	P9	CL
	P10	CL
	P11	ML
	P12	CL
	P13	CL
	P14	CL
	P15	CL
JESÚS MARÍA	P16	CL
	P17	CL
	P18	CL
	P19	CL
	P20	CL
	P21	CL
	P22	CL
	P23	CL
	P24	CL-ML
	P25	CL-ML
	P26	CL-ML
	P27	CL-ML
	P28	CL-ML
	P29	CL-ML
	P30	CL-ML

Fuente: Elaboración propia

3.12 Procedimiento del infiltrómetro de doble anillo

En primer lugar, lo que se hizo fue la ubicación del lugar en donde se llevarían a cabo las pruebas de infiltración ya que este debería contar con algunas características especiales como la poca humedad presente en este suelo para que de esta manera no dificulte el movimiento del agua en el suelo y así no afecte la muestra.

Seguidamente se procedió a limpiar el sitio y luego a nivelar el terreno en donde se realizará la muestra de manera que el agua cuando baje lo haga uniformemente.

Imagen 10: *Limpieza de la zona de estudio*

Después de esto viene la colocada de los anillos de infiltración para tomar la muestra, como en nuestro caso son dos anillos colocamos cada anillo a una distancia céntrica del uno del otro para que no afecte en el ensayo.

Imagen 11: *Instalación de los anillos de doble cilindro*

Después de colocados los anillos hay que nivelarlos, esto se hace de una manera muy cuidadosa para que al moverlos no altere el suelo en donde se va a realizar el muestreo de infiltración y de esta manera no nos altere los resultados.

Imagen 12: *Nivelación de los anillos*

Una vez nivelados los anillos el paso a seguir es colocar la boya ya que esta nos va a servir para tomar el tiempo cada vez que el nivel de agua baje. Esta boya se coloca por dentro del primer anillo.

Imagen 13: *Instalación de la boya*

Luego dentro de los anillos de infiltración hay que vaciar agua hasta que en el primero este casi lleno para tomar varios datos y el segundo debe quedar al mismo nivel de agua que el anillo interior

Imagen 14: *Llenado de agua*

Después de haberle vaciado agua a los anillos inmediatamente hay que empezar a registrar la medida que ha bajado el agua en el cilindro interior cada cierto tiempo establecido en nuestro ensayo.

Imagen 15: *Llenado de agua del anillo interno y registro de la medida inicial*

En caso en que la altura del agua después de haber infiltrado se encuentre muy baja, añadimos agua hasta una nueva altura y midiendo dicha altura volver a realizar la medición después de un tiempo.

Imagen 16: *Aumento del agua del anillo interno*

Tomar los datos de las alturas mientras el agua infiltra en el suelo para posteriormente realizar los cálculos de la infiltración según los modelos estudiados

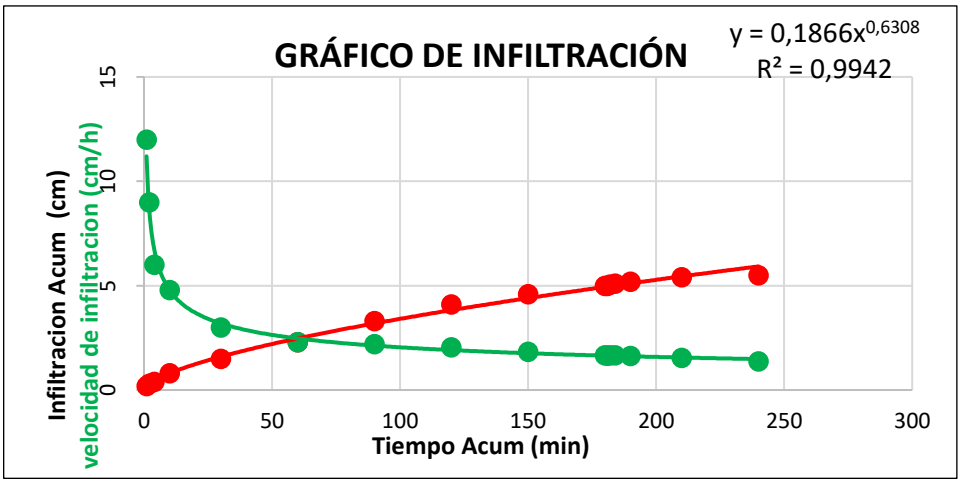
3.13 Cálculo del infiltrómetro de doble anillo método directo

Tabla 20: Cálculo de la tasa de infiltración “P1 B/Torrecillas”

CÁLCULO DE INFILTRACIÓN							
Número de datos	**Intervalo de tiempo entre lecturas [min]**	**Tiempo Acumulado [min]**	**Nivel de Agua [cm]**	**Nivel de recuperacion del agua [cm]**	**Lámina infiltrada para cada intervalo de tiempo [cm]**	**Lámina Acumulada [cm]**	**Velocidad o Tasa de infiltración instantanea [cm/h]**
1	0	0		19,7	0	0	0,0
2	1	1	19,5		0,2	0,2	12,0
3	1	2	19,4		0,1	0,3	9,0
4	2	4	19,3		0,1	0,4	6,0
5	6	10	18,9		0,4	0,8	4,8
6	20	30	18,2		0,7	1,5	3,0
7	30	60	17,4		0,8	2,3	2,3
8	30	90	16,4		1	3,3	2,2
9	30	120	15,6		0,8	4,1	2,1
10	30	150	15,1		0,5	4,6	1,8
11	30	180	14,7	19,3	0,4	5	1,7
12	1	181	19,3		0	5	1,7
13	1	182	19,25		0,05	5,05	1,7
14	2	184	19,2		0,05	5,1	1,7
15	6	190	19,1		0,1	5,2	1,6
16	20	210	18,9		0,2	5,4	1,5
17	30	240	18,8		0,1	5,5	1,4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11: Grafica de lámina acumulada vs Tiempo acumulado



Fuente: Elaboración propia

Ecuación de la curva

$Y=0.1866*X^{0,6308}$

A=0,1866

B=0,6308

a=A*B=0,1866*0,6308= 0,118

b=B-1=0,6308-1= -0,3692

tiempo básico

tb =-10*b= -10*(-0,3692) = 3,69 h

$$\boldsymbol{Velocidad_{Infiltracion} = Infiltracion_{básica}}$$

$$I_{básica} = a * (tb * 60)^{b}$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}118 * (3{,}69\ h * 60)^{-0{,}3692} = 0{,}016\ cm/min$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}016 * 60 = 0{,}96\ cm/h$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}96 * 10 = 9{,}6mm/h$$

Tabla 21: Resumen de contenido de infiltración

BARRIO	MUESTRA	INFILTRACIÓN [mm/h]
TORRECILLAS	P1	9,62
	P2	9,71
	P3	6,2
	P4	7,61
	P5	17,55
	P6	18,16
	P7	18,8
	P8	2,36
	P9	2,83
	P10	12,55
	P11	15,62
	P12	13,66
	P13	5,06
	P14	5,27
	P15	6,85
JESÚS MARÍA	P16	9,16
	P17	8,23
	P18	7,54
	P19	6,77
	P20	8,16
	P21	6,28
	P22	7,97
	P23	6,93
	P24	9,15
	P25	8,23
	P26	6,2
	P27	7,19
	P28	6,72
	P29	9,47
	P30	5,1

Fuente: Elaboración propia

3.14 Cálculo del método empírico de Kostiakov

Tabla 22: Cálculo de la infiltración método empírico de kostiakov

CÁLCULO DE INFILTRACIÓN CON LA ECUACIÓN EMPÍRICA DE KOSTIAKOV							
Número de datos	**Tiempo Acumulado [min]**	**Lámina Acumulada [cm]**	**log t**	**log I**	$\mathbf{Log^2 * t}$	$\mathbf{log^2 * I}$	**Σ logt*logI**
0	0	0					0
1	1	0,2	0,000	-0,699	0,000	0,489	0,000
2	2	0,3	0,301	-0,523	0,091	0,273	-0,157
3	4	0,4	0,602	-0,398	0,362	0,158	-0,240
4	10	0,8	1,000	-0,097	1,000	0,009	-0,097
5	30	1,5	1,477	0,176	2,182	0,031	0,260
6	60	2,3	1,778	0,362	3,162	0,131	0,643
7	90	3,3	1,954	0,519	3,819	0,269	1,013
8	120	4,1	2,079	0,613	4,323	0,376	1,274
9	150	4,6	2,176	0,663	4,735	0,439	1,442
10	180	5	2,255	0,699	5,086	0,489	1,576
11	181	5	2,258	0,699	5,097	0,489	1,578
12	182	5,05	2,260	0,703	5,108	0,495	1,589
13	184	5,1	2,265	0,708	5,129	0,501	1,603
14	190	5,2	2,279	0,716	5,193	0,513	1,632
15	210	5,4	2,322	0,732	5,393	0,536	1,701
16	240	5,5	2,380	0,740	5,665	0,548	1,762
16	1834	53,75	27,387	5,613	56,346	5,745	15,580

Fuente: Elaboración propia

$$B = \frac{(\Sigma \text{Log t*Log I}) - (\frac{\Sigma \text{Log t} * \Sigma \text{Log I}}{N°})}{\Sigma \text{Log}^2 \text{t} - (\frac{\Sigma \text{Log t}^2}{N°})}$$

$$B = \frac{(15{,}580) - (\frac{27{,}387 * 5{,}613}{16})}{56{,}346 - (\frac{27{,}387^2}{16})} = 0{,}631$$

$$\text{Log A} = \left(\frac{Log\ I}{N°}\right) - B * \left(\frac{Log\ t}{N°}\right)$$

$$\text{Log A} = \left(\frac{5{,}613}{16}\right) - 0{,}631 * \left(\frac{27{,}387}{16}\right) = -0{,}729$$

$$\text{A} = antilog\ 10^{Log\ A}$$

$$A = antilog_{10}{}^{-0{,}729} = 0{,}187$$

$$r^2 = B * (\frac{Log^2 I - Log\ I}{N°})$$

$$r^2 = 0{,}631 * \left(\frac{5{,}745 - 5{,}613}{16}\right) = 0{,}998$$

a=A*B=0,187*0,631= 0,118

b=B-1=0,631-1= -0,369

tiempo básico

tb =-10*b= -10*(-0,369) = 3,69 h

$$\boldsymbol{Velocidad_{Infiltracion}} = \boldsymbol{Infiltracion_{básica}}$$

$$I_{básica} = a * (tb * 60)^b$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}118 * (3{,}69\ h * 60)^{-0{,}369} = 0{,}016\ cm/min$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}016 * 60 = 0{,}96\ cm/h$$

$$Velocidad_{Infiltracion} = 0{,}96 * 10 = 9{,}6 mm/h$$

Tabla 23: Resumen de los resultados de infiltración

BARRIO	MUESTRA	INFILTRACIÓN [mm/h]	INFILTRACIÓN MÉTODO KOSTIAKOV [mm/h]	TIPO DE SUELO
TORRECILLAS	P1	9,62	9,62	CL
	P2	9,71	9,72	CL
	P3	6,20	6,20	CL
	P4	7,61	7,61	CL
	P5	17,55	17,70	CL
	P6	18,16	18,16	CL
	P7	18,80	18,20	ML
	P8	2,36	2,36	CL
	P9	2,83	2,83	CL
	P10	12,55	12,55	CL
	P11	15,62	15,63	ML
	P12	13,66	13,65	CL
	P13	5,06	5,06	CL
	P14	5,27	5,27	CL
	P15	6,85	6,85	CL
JESÚS MARÍA	P16	9,16	9,17	CL
	P17	8,23	8,23	CL
	P18	7,54	7,53	CL
	P19	6,77	6,80	CL
	P20	8,16	8,15	CL
	P21	6,28	6,29	CL
	P22	7,97	7,97	CL
	P23	6,93	6,93	CL
	P24	9,15	9,17	CL - ML
	P25	8,23	8,25	CL - ML
	P26	6,20	6,20	CL - ML
	P27	7,19	7,20	CL - ML
	P28	6,72	6,73	CL - ML
	P29	9,47	9,47	CL - ML
	P30	5,10	5,11	CL - ML

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Tabla de resultados de los cálculos realizados

TABLA DE ESTUDIOS DE SUELOS							
Muestra [Punto N°]	**Límite Líquido**	**Límite Plástico**	**Índice de Plásticidad**	**Clasificación S.U.C.S**	**Contenido de humedad**	**Infiltrómetro de doble anillo método Directo [mm/h]**	**Infiltrómetro de doble anillo método Kostiakov [mm/h]**
P1	23	14	9	CL	4,62	9,62	9,62
P2	23	14	9	CL	4,88	9,71	9,72
P3	35	23	12	CL	9,97	6,20	6,20
P4	34	19	15	CL	9,07	7,61	7,61
P5	27	18	9	CL	2,86	17,55	17,70
P6	31	17	14	CL	5,03	18,16	18,16
P7	42	30	12	ML	4,53	18,80	18,20
P8	32	19	13	CL	9,05	2,36	2,36
P9	34	19	15	CL	3,42	2,83	2,83
P10	29	17	12	CL	4,19	12,55	12,55
P11	47	31	16	ML	8,67	15,62	15,63
P12	32	19	13	CL	4,23	13,66	13,65
P13	35	19	16	CL	1,95	5,06	5,06
P14	37	18	19	CL	4,53	5,27	5,27
P15	27	17	10	CL	4,1	6,85	6,85
P16	23	15	8	CL	6,58	9,16	9,17
P17	27	16	11	CL	6,99	8,23	8,23
P18	26	15	11	CL	6,49	7,54	7,53
P19	24	16	8	CL	9,36	6,77	6,80
P20	26	14	12	CL	8,05	8,16	8,15
P21	24	15	9	CL	7,15	6,28	6,29
P22	23	16	7	CL	12,3	7,97	7,97
P23	24	15	9	CL	6,07	6,93	6,93
P24	18	14	4	CL-ML	3,09	9,15	9,17
P25	20	14	6	CL-ML	5,7	8,23	8,25
P26	16	12	4	CL-ML	4,85	6,20	6,20
P27	20	14	6	CL-ML	4,87	7,19	7,20
P28	20	14	6	CL-ML	6,44	6,72	6,73
P29	19	15	4	CL-ML	4,49	9,47	9,47
P30	18	14	4	CL-ML	4,26	5,10	5,11

Fuente: Elaboración Propia

3.15 Cálculo de la eficiencia

- Formulas utilizadas

$$\text{Error Absoluto (EA)} = \frac{Método\ Directo}{Método\ kostiakov}$$

$$\text{Error Absoluto (EA)} = \frac{9,62}{9,62} = 0 \text{ mm/h}$$

$$\text{Error Relativo (ER)} = \frac{Error\ Absoluto}{Método\ Directo} * 100$$

$$\text{Error Relativo (ER)} = \frac{0}{9,62} * 100 = 0,02\%$$

$$\text{Eficiencia Individual (EI)} = 100\% - \text{Error Relativo}$$

$$\text{Eficiencia Individual (EI)} = 100\% - 0,02 = 99,98\%$$

Tabla 25: Cálculo de la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo

BARRIO	MUESTRA	INFILTRACIÓN DIRECTA (mm/h)	INFILTRACIÓN MÉTODO KOSTIAKOV (mm/h)	ERROR ABSOLUTO (EA) (mm/h)	ERROR RELATIVO (ER) (%)	ERROR INDIVIDUAL (EI) (%)
TORRECILLAS	P1	9,62	9,62	0,00	0,02	99,98
	P2	9,71	9,72	0,01	0,10	99,90
	P3	6,20	6,20	0,00	0,05	99,95
	P4	7,61	7,61	0,00	0,00	100
	P5	17,55	17,70	0,15	0,85	99,15
	P6	18,16	18,16	0,00	0,00	100
	P7	18,80	18,20	0,60	3,19	96,81
	P8	2,36	2,36	0,00	0,13	99,87
	P9	2,83	2,83	0,00	0,00	100
	P10	12,55	12,55	0,00	0,02	99,98
	P11	15,62	15,63	0,01	0,06	99,94
	P12	13,66	13,65	0,01	0,07	99,93
	P13	5,06	5,06	0,00	0,00	100
	P14	5,27	5,27	0,00	0,00	100
	P15	6,85	6,85	0,00	0,06	99,94
JESÚS MARÍA	P16	9,16	9,17	0,01	0,11	99,89
	P17	8,23	8,23	0,00	0,02	99,98
	P18	7,54	7,53	0,01	0,11	99,89
	P19	6,77	6,80	0,03	0,44	99,56
	P20	8,16	8,15	0,01	0,12	99,88
	P21	6,28	6,29	0,00	0,08	99,92
	P22	7,97	7,97	0,00	0,05	99,95
	P23	6,93	6,93	0,00	0,00	100
	P24	9,15	9,17	0,02	0,22	99,78
	P25	8,23	8,25	0,02	0,24	99,76
	P26	6,20	6,20	0,00	0,05	99,95
	P27	7,19	7,20	0,01	0,08	99,92
	P28	6,72	6,73	0,01	0,15	99,85
	P29	9,47	9,47	0,00	0,01	99,99
	P30	5,10	5,11	0,01	0,14	99,86

Fuente: Elaboración Propia

Suma de errores absolutos = 0,92

Número de mediciones (n) = 30

Promedio de Errores Absolutos = 0,92/30 = 0,031

Promedio de Mediciones = 8,83

Eficiencia Global = (1 - 0,031/8,83) × 100% = 99,65%

La eficiencia global del infiltrómetro de doble anillo es del 99,65%

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS VALORES OBSERVADO

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS VALORES OBSERVADOS

4.1 Distribución de las tasas de infiltración

BARRIO	MUESTRA	INFILTRACIÓN [mm/h]	INFILTRACIÓN MÉTODO KOSTIAKOV [mm/h]	TIPO DE SUELO
TORRECILLAS	P1	9,62	9,62	CL
	P2	9,71	9,72	CL
	P3	6,20	6,20	CL
	P4	7,61	7,61	CL
	P5	17,55	17,70	CL
	P6	18,16	18,16	CL
	P7	18,80	18,20	ML
	P8	2,36	2,36	CL
	P9	2,83	2,83	CL
	P10	12,55	12,55	CL
	P11	15,62	15,63	ML
	P12	13,66	13,65	CL
	P13	5,06	5,06	CL
	P14	5,27	5,27	CL
	P15	6,85	6,85	CL
JESÚS MARÍA	P16	9,16	9,17	CL
	P17	8,23	8,23	CL
	P18	7,54	7,53	CL
	P19	6,77	6,80	CL
	P20	8,16	8,15	CL
	P21	6,28	6,29	CL
	P22	7,97	7,97	CL
	P23	6,93	6,93	CL
	P24	9,15	9,17	CL - ML
	P25	8,23	8,25	CL - ML
	P26	6,20	6,20	CL - ML
	P27	7,19	7,20	CL - ML
	P28	6,72	6,73	CL - ML
	P29	9,47	9,47	CL - ML
	P30	5,10	5,11	CL - ML

- El estudio de infiltración realizado en los barrios Torrecillas y Jesús María permitió analizar la variabilidad de la tasa de infiltración en función de las

características del suelo. Se registraron valores de infiltración que oscilan entre 2.36 mm/h y 18.80 mm/h**,** lo que indica diferencias significativas en la permeabilidad del suelo

- Las muestras con infiltración más baja (entre 1 y 5 mm/h) son P8 y P9, ambas con suelos CL (arcillosos), lo que sugiere que el suelo arcilloso tiene una menor capacidad de infiltración.

- Las muestras con mayor infiltración, como P6 y P7 (con infiltración superior a 18 mm/h), corresponden a suelos ML (limosos), lo cual es consistente con lo esperado, ya que suelos más limosos permiten una mayor infiltración.

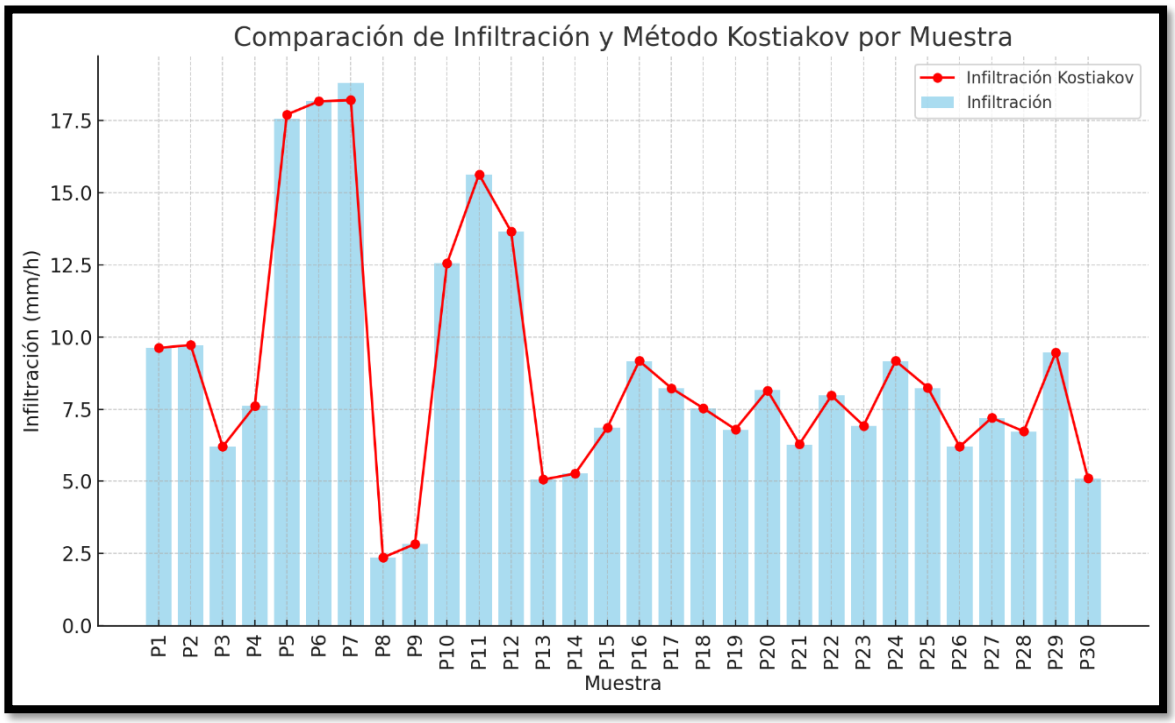
4.2 Infiltración comparada con el método Kostiakov

- Los resultados obtenidos por el método Kostiakov son muy similares a las mediciones de infiltración directa. Las diferencias son mínimas, lo que sugiere que el modelo de Kostiakov proporciona una buena estimación de la tasa de infiltración en este tipo de suelos.

- El mayor desvío observado es en la muestra P7, donde el método Kostiakov da 18,20 mm/h, ligeramente diferente de la medición directa de 18,80 mm/h.

4.3 Comparación de infiltración y el método de kostiakov por tipo de muestra

Gráfico 12: *Resultados por los dos métodos*



Fuente: Elaboración propia

- El gráfico muestra claramente cómo varían las tasas de infiltración en cada muestra. Las barras azules representan la infiltración medida directamente, mientras que la línea roja marca las estimaciones del método de Kostiakov. Ambas muestran una correspondencia muy cercana.

- Se observa que las muestras con suelos limosos (P7, P11) tienen las tasas de infiltración más altas, mientras que las muestras con suelos más arcillosos (P8, P9) tienen las tasas más bajas.

4.4 Comparación de infiltración entre los tipos de suelo

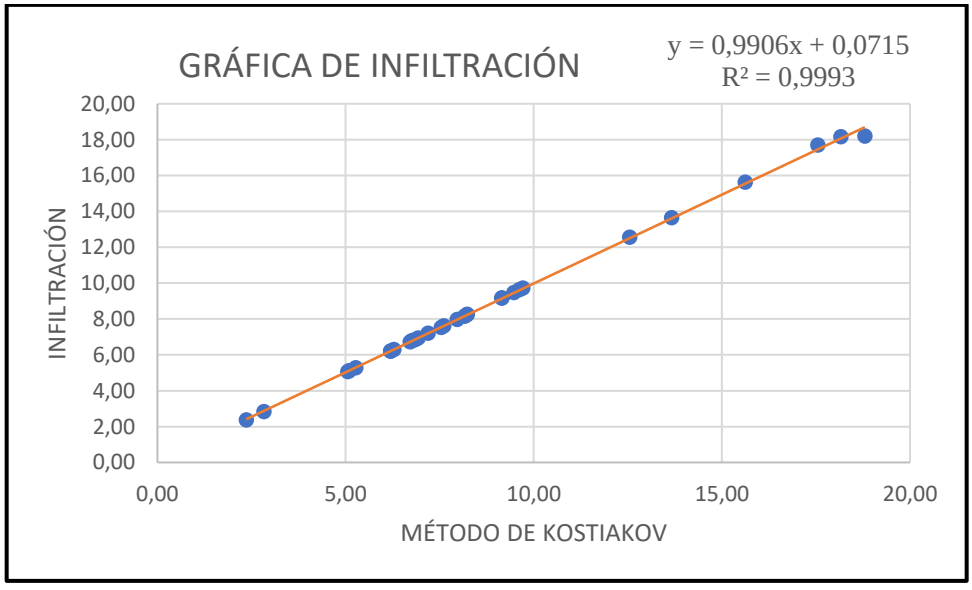
- Suelos CL (Arcillosos): La tasa de infiltración promedio es 8,50 mm/h, con valores mínimos de 2,36 mm/h y máximos de 18,16 mm/h. Esto muestra una amplia variabilidad en las muestras de suelos arcillosos.

- Suelos CL-ML (Mezcla de arcilla y limo): La infiltración promedio es 7,44 mm/h, con un rango más estrecho de entre 5,10 mm/h y 9,47 mm/h, lo que indica una menor variabilidad.

- Suelos ML (Limosos): Tienen una infiltración promedio de 17,21 mm/h, con valores que van desde 15,62 mm/h hasta 18,80 mm/h, lo que confirma que estos suelos tienen una mayor capacidad de infiltración.

4.5 Correlación entre la infiltración y el método de Kostiakov

Gráfico 13: Infiltrómetro vs el método de Kostiakov



Fuente: Elaboración propia

Se observa que existe una correlación de (0,9993) entre los resultados obtenidos con el infiltrómetro y las estimaciones del método de Kostiakov, lo que sugiere que el equipo y el método están proporcionando resultados muy consistentes y altamente preciso para estimar la infiltración en este conjunto de datos.

4.6 Comparación entre los Barrios Torrecillas y Jesús María

Tabla 26: *Tabla de comparación*

Barrio	**Tasa de infiltración (mm/h)**	**Tipo de Suelo Predominante**
Torrecillas	9,62 - 18,80	Arcilloso y limoso
Jesús María	5,10 - 9,47	Arcilloso

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el barrio Torrecillas presentó tasas de infiltración más altas, lo que presento mayor contenido de limo, mientras que Jesús María presentó valores más bajos debido a su mayor contenido de arcilla.

4.7 Análisis de la Eficiencia del Infiltrómetro de Doble Anillo

Tabla 27: *Eficiencia del infiltrómetro*

BARRIO	MUESTRA	INFILTRACIÓN DIRECTA (mm/h)	INFILTRACIÓN MÉTODO KOSTIAKOV (mm/h)	ERROR ABSOLUTO (EA) (mm/h)	ERROR RELATIVO (ER) (%)	ERROR INDIVIDUAL (EI) (%)
TORRECILLAS	P1	9,62	9,62	0,00	0,02	99,98
	P2	9,71	9,72	0,01	0,10	99,90
	P3	6,20	6,20	0,00	0,05	99,95
	P4	7,61	7,61	0,00	0,00	100
	P5	17,55	17,70	0,15	0,85	99,15
	P6	18,16	18,16	0,00	0,00	100
	P7	18,80	18,20	0,60	3,19	96,81
	P8	2,36	2,36	0,00	0,13	99,87
	P9	2,83	2,83	0,00	0,00	100
	P10	12,55	12,55	0,00	0,02	99,98
	P11	15,62	15,63	0,01	0,06	99,94
	P12	13,66	13,65	0,01	0,07	99,93
	P13	5,06	5,06	0,00	0,00	100
	P14	5,27	5,27	0,00	0,00	100
	P15	6,85	6,85	0,00	0,06	99,94
JESÚS MARÍA	P16	9,16	9,17	0,01	0,11	99,89
	P17	8,23	8,23	0,00	0,02	99,98
	P18	7,54	7,53	0,01	0,11	99,89
	P19	6,77	6,80	0,03	0,44	99,56
	P20	8,16	8,15	0,01	0,12	99,88
	P21	6,28	6,29	0,00	0,08	99,92
	P22	7,97	7,97	0,00	0,05	99,95
	P23	6,93	6,93	0,00	0,00	100
	P24	9,15	9,17	0,02	0,22	99,78
	P25	8,23	8,25	0,02	0,24	99,76
	P26	6,20	6,20	0,00	0,05	99,95
	P27	7,19	7,20	0,01	0,08	99,92
	P28	6,72	6,73	0,01	0,15	99,85
	P29	9,47	9,47	0,00	0,01	99,99
	P30	5,10	5,11	0,01	0,14	99,86

Fuente: Elaboración propia

Suma de errores absolutos = 0,92

Número de mediciones (n) = 30

Promedio de Errores Absolutos = 0,92/30 = 0,031

Promedio de Mediciones = 8,83

Eficiencia Global = (1 - 0,031/8,83) × 100% = 99,65%

El infiltrómetro mostró una eficiencia del 99.65%, calculada a partir del promedio de errores absolutos de 0.031 mm/h sobre un promedio de mediciones de 8.83 mm/h.

4.8 Análisis Estadístico

Gráfico 14: *Análisis estadístico*

Fuente: Elaboración propia

4.8.1 Estadística Descriptiva

4.8.1.1 Estadística Descriptiva (Barrio Torrecillas)

Tabla 28: *Distribución de datos*

BARRIO	Muestra (Punto N°)	Infiltrómetro de doble anillo método Directo (mm/h)
T O R R E C I L L A S	P1	9,62
	P2	9,71
	P3	6,20
	P4	7,61
	P5	17,55
	P6	18,16
	P7	18,80
	P8	2,36
	P9	2,83
	P10	12,55
	P11	15,62
	P12	13,66
	P13	5,06
	P14	5,27
	P15	6,85

Rango de datos = Dato mayor - Dato menor

R = 18,80 – 2,36 = 16,44 mm/h

Distribución de clases o categoría

n = 15

N° de clases = 1+3,322*log(n)

N° de clases = 1+3,322*log (15) =4,91 ≅ 5 Clases

Intervalo de clase, límite de clase, ancho y marca de clase

$$Ancho\ de\ clase = \frac{Límite\ superior\ - Límite\ inferior}{número\ de\ clase}$$

$$Ancho\ de\ clase = \frac{18{,}80\ - 2{,}36}{5} = 3{,}29$$

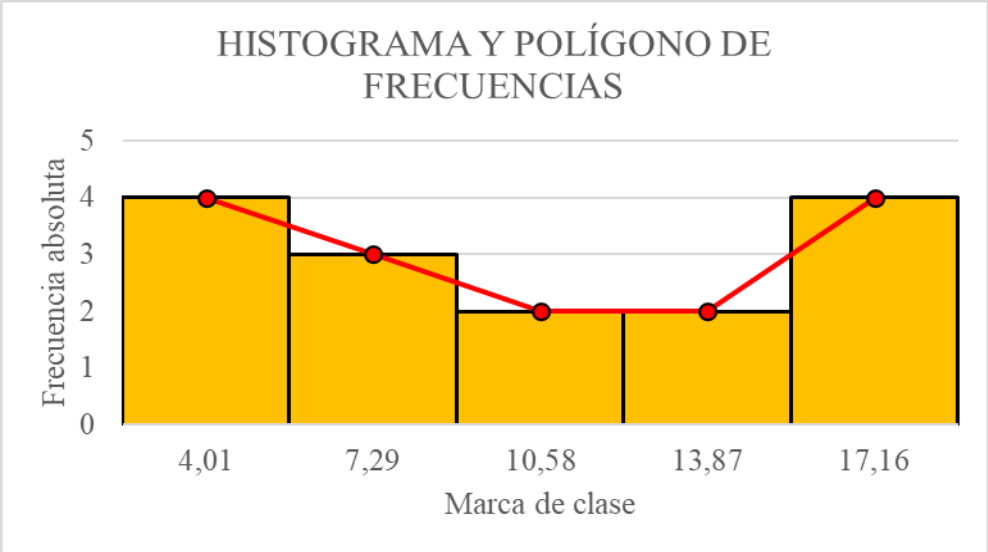
Tendencias y Comportamiento de los Datos (Frecuencia Absoluta y Relativa)

Tabla 29: *Distribución de frecuencias*

NC	Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
1	2,36	5,65	4,01	4	4	26,667	26,667
2	5,65	8,94	7,29	3	7	20,000	46,667
3	8,94	12,23	10,58	2	9	13,333	60,000
4	12,23	15,51	13,87	2	11	13,333	73,333
5	15,51	18,80	17,16	4	15	26,667	100
Σ=	15					100,000	

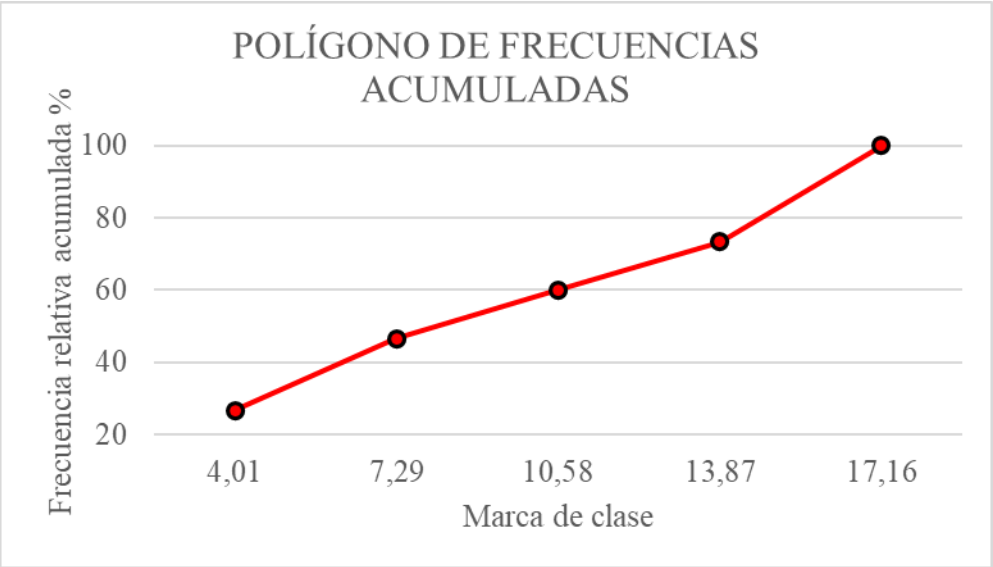
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 15: *Histograma y Polígono de Frecuencias*



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 16: *Polígono de frecuencias acumuladas*



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30: *Medidas de Tendencia y Dispersión Torrecillas*

Medidas de Tendencia		Medidas de Dispersión	
Media	Mediana	Desviación estandar	Varianza
10,12	9,62	5,60	31,36

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones Descriptivas

- Existe una alta variabilidad en las tasas de infiltración en el barrio Torrecillas.
- La infiltración promedio es moderada (10,12 mm/h), pero hay valores tanto bajos como altos (desde 2,36 hasta 18,80 mm/h).
- La mayor frecuencia se concentra en los valores extremos, lo que podría deberse a diferencias significativas en las características del suelo entre puntos.
- La distribución no es perfectamente simétrica, y aunque la media y la mediana son similares, los datos extremos indican cierta dispersión.

4.9.1.2 Estadística Descriptiva (Jesús María)

Tabla 31: *Distribución de datos*

BARRIO	Muestra (Punto N°)	Infiltrómetro de doble anillo método Directo (mm/h)
J E S Ú S M A R Í A	P16	9,16
	P17	8,23
	P18	7,54
	P19	6,77
	P20	8,16
	P21	6,28
	P22	7,97
	P23	6,93
	P24	9,15
	P25	8,23
	P26	6,20
	P27	7,19
	P28	6,72
	P29	9,47
	P30	5,10

Rango de datos = Dato mayor - Dato menor

R = 9,47 – 5,10 = 4,37 mm/h

Distribución de clases o categoría

n = 15

N° de clases = 1+3,322*log(n)

N° de clases = 1+3,322*log (15) =4,91 ≅ 5 Clases

Intervalo de clase, límite de clase, ancho y marca de clase

$$Ancho\ de\ clase = \frac{Límite\ superior\ - Límite\ inferior}{número\ de\ clase}$$

$$Ancho\ de\ clase = \frac{9{,}47\ - 5{,}10}{5} = 0{,}87$$

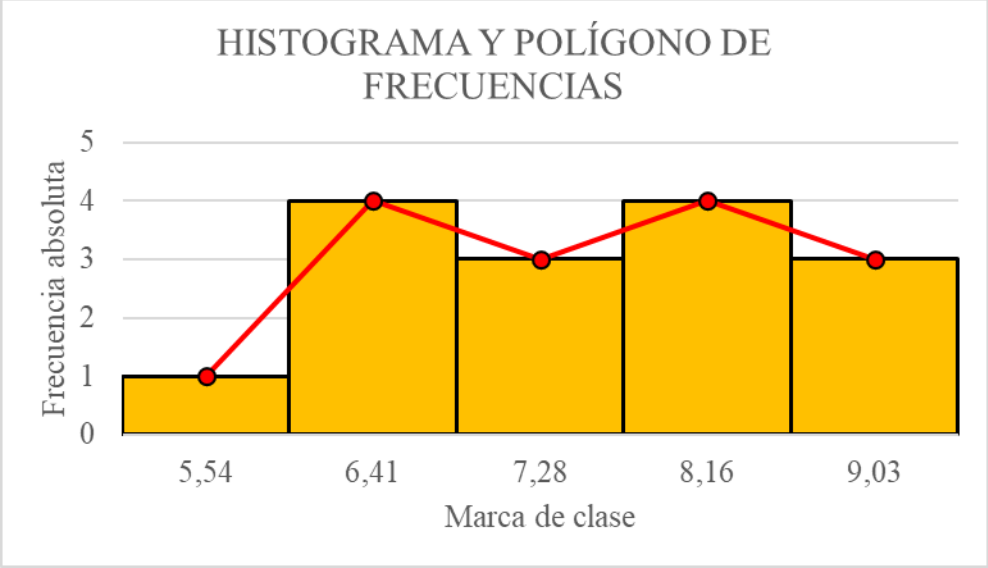
Tendencias y Comportamiento de los Datos (Frecuencia Absoluta y Relativa)

Tabla 32: *Distribución de frecuencias*

NC	Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
1	5,10	5,97	5,54	1	1	6,667	6,667
2	5,97	6,85	6,41	4	5	26,667	33,333
3	6,85	7,72	7,28	3	8	20,000	53,333
4	7,72	8,59	8,16	4	12	26,667	80,000
5	8,59	9,47	9,03	3	15	20,000	100,000
Σ=				15		100,000	

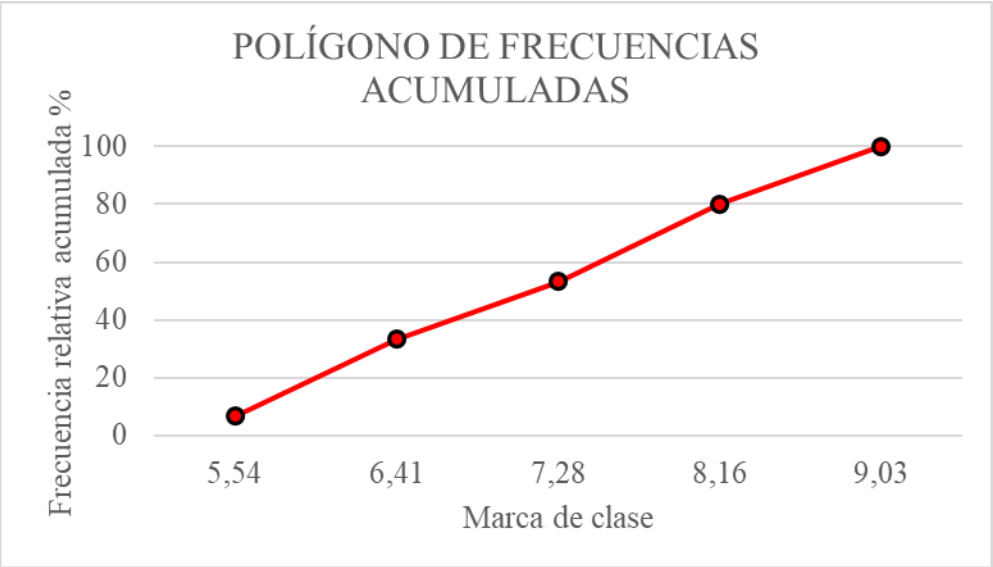
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 17: *Histograma y Polígono de Frecuencias*



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 18: *Polígono de frecuencias acumuladas*



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33: *Estadísticas*

Medidas de Tendencia		Medidas de Dispersión	
Media	Mediana	Desviación estandar	Varianza
7,54	7,54	1,24	1,54

- Las tasas de infiltración en el barrio Jesús María son moderadas y bastante homogéneas, con valores entre 5,10 y 9,47 mm/h.
- La media y la mediana coinciden (7,54 mm/h), lo cual indica una distribución simétrica de los datos.
- La baja dispersión (desviación estándar: 1,24 mm/h) indica que no hay grandes diferencias entre los puntos muestreados.
- La mayoría de los valores se agrupan en torno al promedio, lo que sugiere que el suelo en este sector presenta condiciones físicas similares.

4.8.2 Estadística Inferencial

4.8.2.1 Intervalo de confianza

Media	8,83	
Desviacion	4,20	
NC =	95%	1,96
n=	30	

LÍmites del intervalo

lÍmite superior	u =	10,33
lÍmite inferior	u =	7,33

intervalo de confianza

7,33	≤	X	≤	10,33
		8,83		

4.8.2.2 Prueba de Hipótesis

La hipótesis de investigación, que establece que “las mediciones con el infiltrómetro en suelos naturales son de alta eficiencia”, se transforma en hipótesis nula con el fin de ser sometida a una prueba estadística.

HIPÓTESIS NULA (H_0): Las mediciones con el infiltrómetro en suelos naturales no presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_0: \mu \leq \mu_o$$

HIPÓTESIS ALTERNATIVA (H_1): Las mediciones con el infiltrómetro en suelos naturales presentan una eficiencia significativamente alta.

$$H_1: \mu > \mu_o$$

Nivel de confianza y nivel de significancia

NC = 95% = 0,95

Significancia para una sola cola = α =5% =0,05

Prueba de Chi Cuadrado

Tabla 34: Valor de frecuencia observada (f_o)

Barrios	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Total
Torrecillas	4	3	2	2	4	15
Jesús María	1	4	3	4	3	15
Total	5	7	5	6	7	**30**

Tabla 35: Cálculo de la frecuencia esperada (f_e)

Barrios	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Torrecillas	2,5	3,5	2,5	3	3,5
Jesús María	2,5	3,5	2,5	3	3,5

Tabla 36: Determinando el $\boldsymbol{X^2_{calculado}}$

Barrios	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Total
Torrecillas	0,9	0,07	0,10	0,33	0,07	1,48
Jesús María	0,9	0,07	0,10	0,33	0,07	1,48
						2,95

Determinando el $\boldsymbol{X^2_{crítico}}$

Grado de libertad

n = 4

$$\boldsymbol{X^2_{crítico} = 9,49}$$

Regla de decisión:

- Si $\boldsymbol{X^2_{calculado}} < \boldsymbol{X^2_{crítico}}$, **NO se rechaza** la hipótesis nula (H_0).

- Si $\boldsymbol{X^2_{calculado}} > \boldsymbol{X^2_{crítico}}$, **se rechaza** la hipótesis nula (H_0) y se acepta la alternativa (H_1).

$$\boldsymbol{X^2_{crítico}} < \boldsymbol{X^2_{calculado}}$$

$$9{,}49 < 2{,}95$$

Dado que el valor calculado es menor al valor crítico, no se rechaza la hipótesis nula (H_0). Por lo tanto, se concluye que no existen diferencias significativas entre las mediciones obtenidas en los dos barrios estudiados.

Este resultado permite sustentar la afirmación de que las mediciones realizadas con el infiltrómetro de doble anillo en suelos naturales presentan una eficiencia uniforme y consistente, lo que respalda la hipótesis de investigación.

4.9 Especificaciones técnicas puntuales del proceso y requerimientos mínimos

Para llevar a cabo el presente estudio sobre la eficiencia del infiltrómetro de doble anillo, se establecen las siguientes especificaciones técnicas del procedimiento, así como los requerimientos mínimos necesarios para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

4.9.1 Proceso técnico

El procedimiento experimental se desarrolló en campo, empleando el método del infiltrómetro de doble anillo, el cual permite medir la tasa de infiltración de agua en suelos naturales, minimizando los efectos del flujo lateral. Este método fue ejecutado conforme a la norma ASTM D3385-09.

Las etapas del proceso fueron las siguientes:

- **Selección del sitio de ensayo:** Se identificaron puntos con suelo en estado natural, sin alteraciones visibles, sin vegetación densa y con superficie relativamente nivelada.

- **Preparación del terreno:** Se limpió el área de ensayo retirando material orgánico superficial, piedras sueltas y raíces. Se procedió al nivelado manual del terreno para facilitar una distribución uniforme del agua.
- **Instalación del infiltrómetro:** Se introdujeron manualmente los anillos concéntricos (interno y externo) a una profundidad uniforme entre 10 y 15 cm, asegurando su verticalidad y estabilidad mediante nivel de burbuja.
- **Llenado de anillos:** Se agregó agua en ambos anillos hasta alcanzar un nivel constante. El anillo externo se llenó para evitar el flujo lateral, mientras que el nivel del anillo interno fue utilizado para la medición de infiltración.
- **Registro de datos:** Se realizó la medición de la lámina de agua infiltrada a intervalos de tiempo regulares, registrando la variación de nivel en el anillo interno mediante una regla milimétrica y cronómetro digital.
- **Finalización del ensayo:** El ensayo concluyó al alcanzar una velocidad de infiltración constante o al cumplirse el tiempo establecido. Posteriormente, los datos fueron organizados y utilizados para calcular la tasa de infiltración y validar la eficiencia del equipo mediante análisis estadístico.

4.9.2 Requerimientos mínimos

Para garantizar el correcto desarrollo del ensayo, se establecieron los siguientes requerimientos mínimos:

Equipos y materiales:

- Infiltrómetro de doble anillo (anillo interno: 30 cm de diámetro; anillo externo: 60 cm)
- Regla milimétrica
- Cronómetro digital
- Recipientes con capacidad suficiente de agua para mantener niveles constantes durante el ensayo

- Nivel de burbuja para instalación precisa
- Boya (opcional, para facilitar la lectura del nivel de agua)

Condiciones del sitio:

- Suelo en estado natural, sin alteraciones recientes
- Ausencia de lluvias de 48 a 72 horas antes del ensayo
- Superficie del terreno nivelada y libre de obstáculos
- Temperatura ambiental estable durante el desarrollo de la prueba

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se concluye que el infiltrómetro de doble anillo es una herramienta eficiente, precisa y confiable para medir la infiltración en suelos naturales, como se evidenció en los barrios Torrecillas y Jesús María de la ciudad de Tarija aportando datos útiles para el diseño de obras civiles.
- Los barrios Torrecillas y Jesús María en la ciudad de Tarija fueron elegidos como zonas representativas debido a sus características de suelo en estado natural y su baja intervención urbana. Esto permitió obtener datos más precisos sobre la infiltración de agua, ofreciendo un entorno adecuado para estudiar la infiltración de suelos naturales.
- En cada sitio de estudio, se realizaron ensayos de laboratorio (límites de Atterberg y granulometría) para determinar el tipo de suelo. Los resultados muestran una variación de los suelos, identificándose suelos arcillosos y limosos. Esto permitió el análisis de infiltración en función de las propiedades específicas del suelo.
- Las pruebas de campo con el infiltrómetro de doble anillo indican que los suelos arcillosos presentan una tasa de infiltración menor en comparación con suelos más limosos, debido a su tamaño y menor porosidad. En promedio, los suelos presentaron infiltraciones de 8,50 mm/h, con valores mínimos de 2,36 mm/h y máximos de 18,16 mm/h.
- La comparación entre los valores obtenidos experimentalmente con el infiltrómetro de doble anillo y los calculados mediante el método empírico de Kostiakov muestra una alta confiabilidad, con una correlación de $R^2 = 99{,}93\%$ lo que confirma la eficiencia para estimar la tasa de infiltración con el infiltrómetro de doble anillo.
- El análisis descriptivo mostró que las tasas de infiltración medidas con el infiltrómetro de doble anillo fueron consistentes entre los barrios Torrecillas y Jesús María. Además, la prueba de Chi Cuadrado confirmó que no existen diferencias significativas entre las mediciones, lo que respalda la eficiencia y

confiabilidad del equipo en suelos naturales.

- El infiltrómetro de doble anillo mostró un nivel de eficiencia del 96.5%, lo que confirma su alta precisión y confiabilidad en la medición de la infiltración en suelos naturales. Esta alta eficiencia, junto con la correlación (0.9993) con el modelo de Kostiakov, valida el uso del método en estudios de campo, siendo adecuado para apoyar el diseño y mantenimiento de obras civiles.

5.2 Recomendaciones

- Es recomendable realizar ensayos asegurando la nivelación adecuada del terreno y el posicionamiento correcto de los anillos para evitar interferencias en la medición. Esto ayudará a minimizar los errores y mejorar la precisión de los datos recolectados.
- Incorporar métodos de laboratorio como pruebas de límites de Atterberg y análisis granulométrico antes de realizar ensayos de infiltración permitirá una clasificación más precisa del suelo y mejorará la interpretación de los resultados de infiltración.
- Para mejorar la confiabilidad de los datos, es importante capacitar al personal en el uso adecuado del infiltrómetro de doble anillo, siguiendo protocolos estandarizados.
- Se recomienda que para realizar el ensayo para esta prueba se necesita mucha atención por parte del operador para llevar los tiempos exactos y realizar las medidas y el relleno a tiempo, porque puede dar resultados falsos que perjudicaría los cálculos.
- Se debe tener cuidado al despejar la zona en la que nuestros anillos se van a introducir ya que esta puede tener material rocoso el cual dificultara dejar la zona apta para poder realizar nuestro ensayo.