

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La recolección precisa y sistemática de datos de precipitación constituye un componente esencial para la formulación, diseño y ejecución de proyectos de ingeniería civil. Estos datos son particularmente relevantes en la planificación de sistemas de drenaje pluvial, obras hidráulicas y en el establecimiento de estrategias eficaces para la gestión del riesgo asociado a inundaciones y eventos hidrometeorológicos extremos. Sin embargo, a pesar de su importancia, Bolivia enfrenta un serio obstáculo estructural: la infraestructura de monitoreo meteorológico del país es insuficiente, fragmentada y en muchos casos tecnológicamente obsoleta.

De acuerdo con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología en el año, Bolivia ha registrado un total acumulado de 1527 estaciones meteorológicas en las últimas cinco décadas. No obstante, el análisis de operatividad de dichas estaciones revela una realidad preocupante: sólo el 27% continúa en funcionamiento, mientras que el restante 73% se encuentra fuera de servicio, ya sea por clausura, abandono o deterioro de sus componentes. Aún dentro del subconjunto de 374 estaciones actualmente activas, una proporción significativa de los dispositivos presenta fallas o desgaste significativo. Por ejemplo, de los 235 pluviómetros convencionales que forman parte del sistema nacional de monitoreo, sólo 15 están catalogados como plenamente operativos, lo que limita gravemente la precisión de las bases de datos pluviométricos empleadas en el ámbito técnico y científico (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2022).

Frente a estas limitaciones estructurales, diversas investigaciones desarrolladas en América Latina han propuesto soluciones tecnológicas accesibles y adaptables al contexto de regiones con recursos limitados. En Argentina, se diseñó un pluviómetro autónomo que combina sensores ultrasónicos e infrarrojos, montados sobre una estructura fabricada con materiales de bajo costo. Este equipo, concebido con criterios de eficiencia y replicabilidad, ha sido probado exitosamente en entornos rurales, demostrando su eficacia en la captura precisa de datos de precipitación (de Rosas et al., 2020). La validación de su desempeño ha estimulado su reproducción en otras regiones con condiciones similares.

De manera paralela, en Colombia, un grupo de estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Católica desarrolló una estación meteorológica integral utilizando la plataforma de hardware libre Arduino. Este sistema permite registrar variables

climatológicas fundamentales como temperatura, humedad relativa y precipitación acumulada. Su aplicación práctica ha sido demostrada en proyectos reales de ingeniería civil, con resultados positivos tanto en precisión de datos como en facilidad de mantenimiento (Medina Molina & Ramírez Galvis, 2019). Este tipo de soluciones también fomenta la formación de capacidades técnicas en estudiantes y comunidades locales.

Asimismo, la literatura científica reciente ha aportado evidencia empírica sobre la funcionalidad y confiabilidad de sensores de bajo costo en condiciones de campo. Un estudio publicado en arXiv presentó el desarrollo de un prototipo basado en tecnología resistiva, evaluado en paralelo con estaciones meteorológicas profesionales (Parth Saxena et al., 2024). Los resultados revelaron una alta correlación en las mediciones de precipitación, validando la pertinencia de su uso en contextos con restricciones presupuestarias y limitaciones tecnológicas. Estos avances permiten pensar en la posibilidad de establecer redes de monitoreo descentralizadas y participativas.

Esta propuesta no solo tiene el potencial de ampliar significativamente la cobertura en zonas actualmente desprovistas de estaciones meteorológicas activas, sino que también permite modernizar la infraestructura existente, optimizar la recolección de datos y apoyar la toma de decisiones informadas en el diseño, planificación y mantenimiento de obras civiles. Además, representa una oportunidad para fomentar la innovación tecnológica local y el fortalecimiento de capacidades en el ámbito académico y profesional.

1.2 Problema de investigación

1.2.1 Planteamiento del problema

En los últimos años, la necesidad de una planificación territorial fundamentada en datos meteorológicos precisos ha evidenciado una debilidad estructural significativa: la escasa disponibilidad de información sobre precipitaciones. Esta carencia compromete la eficacia en la toma de decisiones ante eventos climáticos extremos, como lluvias intensas, dificultando la capacidad de respuesta tanto de las autoridades como de las comunidades frente a emergencias hidrometeorológicas.

Durante el año 2023, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), con respaldo del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, instaló 33 nuevas estaciones en distintas regiones de Bolivia, entre las cuales se distribuyeron 17 estaciones

meteorológicas y 16 hidrológicas. En 2024, se llevó a cabo una visita técnica al SENAMHI de Perú, fortaleciendo la cooperación regional mediante el intercambio de metodologías, experiencias y estrategias para mejorar la vigilancia climática. A pesar de estos avances, la cobertura a nivel local sigue siendo limitada, impidiendo una caracterización detallada y oportuna de los patrones de precipitación.

Uno de los factores más restrictivos para ampliar la red de monitoreo es el elevado costo de adquisición, instalación y mantenimiento de los pluviómetros automáticos. Estos instrumentos, imprescindibles para el registro confiable de lluvias, requieren inversiones significativas que exceden las capacidades presupuestarias de muchas instituciones estatales y comunidades rurales. Además, su operación depende de componentes importados y de personal técnico altamente especializado, dificultando su implementación en regiones remotas o con infraestructura limitada.

A esta situación se suma la marcada variabilidad climática del territorio boliviano, intensificada por los efectos del cambio climático global. Se han documentado cambios notables en la duración e intensidad del período de lluvias, así como una disminución progresiva en la disponibilidad de fuentes hídricas. Este escenario plantea riesgos críticos para el abastecimiento de agua destinada al consumo humano, el riego agrícola y otras actividades productivas esenciales. La ausencia de datos climáticos precisos y localizados obstaculiza el diseño e implementación de políticas de adaptación eficaces, afectando especialmente a poblaciones vulnerables como las comunidades indígenas, cuya subsistencia depende directamente de los ciclos climáticos. En este contexto, la instrumentación con pluviómetros representa una herramienta estratégica para generar información crítica sobre disponibilidad hídrica, anticipar eventos extremos como sequías o inundaciones y sustentar decisiones basadas en evidencia científica.

La red de estaciones meteorológicas boliviana presenta aún una cobertura desigual, con notorias deficiencias en regiones de alta montaña y zonas rurales. Muchos de los registros existentes carecen de procesos de validación y homogeneización, lo que limita su aplicabilidad para análisis climatológicos rigurosos. Esta debilidad estructural impide la construcción de modelos de pronóstico robustos y el establecimiento de sistemas de alerta temprana eficaces frente a amenazas hidrometeorológicas.

Ante este panorama, una solución emergente y viable es el diseño de pluviómetros de bajo costo mediante el uso de tecnologías de impresión 3D y plataformas de hardware libre como Arduino. Estas innovaciones permiten la fabricación de dispositivos personalizados y de mantenimiento sencillo, adaptados a contextos con limitaciones económicas. Además, su diseño modular posibilita la incorporación de sensores para otras variables atmosféricas, dando lugar a estaciones meteorológicas integrales.

1.2.2 Formulación del problema

¿El uso de tecnologías impresión 3D y Arduino puede ser aplicada en el diseño y construcción de pluviómetros de bajo costo para ampliar la cobertura de registro de datos de precipitación dadas condiciones actuales de la red de estaciones meteorológicas?

1.2.3 Sistematización del problema

- ¿Cuál es la situación actual de la red de estaciones meteorológicas y qué limitaciones técnicas y económicas presentan los pluviómetros utilizados actualmente?
- ¿Cómo pueden las nuevas tecnologías integrarse en el diseño, ensamblaje y automatización de pluviómetros reduciendo costos, para contextos con limitaciones presupuestarias?
- ¿Qué grado de confiabilidad se puede alcanzar con pluviómetros desarrollados con tecnologías accesibles frente a la obsolescencia y bajo porcentaje de cobertura de los equipos actuales?
- ¿En qué medida la implementación masiva del prototipo puede ser viable y contribuir al fortalecimiento de capacidades técnicas y científicas locales en medición de precipitaciones?

1.3 Objetivos generales y específicos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, construir y calibrar un prototipo de pluviómetro de bajo costo utilizando tecnologías de impresión 3D y Arduino, con el fin de desarrollar una propuesta para ampliar la cobertura de datos de precipitación y contribuir a la modernización de la red de monitoreo meteorológico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el estado actual de la red nacional de estaciones meteorológicas, incluyendo las tecnologías actualmente empleadas, con el objetivo de identificar soluciones a bajo costo.
- Diseñar y ensamblar un prototipo operativo de pluviómetro de bajo costo, utilizando plataformas como SolidWorks, impresión 3D y microcontroladores Arduino, para obtener documentación técnica detallada y especificaciones funcionales.
- Calibrar y validar el prototipo construido mediante protocolos experimentales alineados con las normativas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), realizando comparaciones con instrumentos de medición de referencia, a fin de garantizar precisión y confiabilidad operativa.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de la implementación masiva del prototipo en nuestra región, considerando su sostenibilidad y adaptabilidad para su incorporación en sistemas de monitoreo meteorológico.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación teórica

Desde el enfoque teórico, esta investigación se sustenta en fundamentos interdisciplinarios provenientes de la hidrología, la ingeniería ambiental y la fabricación digital. El desarrollo de un pluviómetro empleando tecnologías accesibles tiene como propósito contrastar y consolidar teorías sobre el estudio de precipitaciones, el comportamiento hidrológico de microcuencas y el procesamiento de datos en tiempo real. Este enfoque se alinea con las directrices técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) respecto a criterios de precisión, resolución temporal y cobertura lo cual permite comparar y contrastar datos con estudios profesionales, contribuyendo así a la ciencia aplicada en hidrología.

1.4.2 Justificación metodológica

Esta investigación contribuye al diseño de un modelo replicable y de código abierto para la construcción, calibración y validación de instrumentos meteorológicos de bajo costo, centrándose en el pluviómetro como dispositivo de referencia. La integración de

herramientas como la impresión 3D, el diseño paramétrico, la programación en plataformas como Arduino y el uso de sensores digitales, permite optimizar la relación costo-beneficio en la producción de tecnología científica., se incorporan estrategias de calibración basadas en la comparación con pluviómetros estándar, sirviendo como base para futuras investigaciones o adaptaciones según diferentes contextos técnicos o educativos.

1.4.3 Justificación práctica

Esta propuesta responde a la necesidad urgente de ampliar la red de monitoreo pluviométrico en zonas con escasa cobertura, la fabricación de un pluviómetro con componentes locales, de fácil mantenimiento y operación, representa una estrategia de bajo costo para generar datos esenciales en la toma de decisiones vinculadas a la planificación territorial, la agricultura sostenible, la gestión de riesgos hidrometeorológicos y el diseño de infraestructura hidráulica. Su aplicación puede extenderse a universidades, institutos técnicos, gobiernos municipales, ONGs y organizaciones comunitarias interesadas en fortalecer la resiliencia climática, el dispositivo puede ser utilizado con fines pedagógicos, como herramienta didáctica en la enseñanza de ciencias ambientales, electrónica o tecnología aplicada.

1.5 Alcance del trabajo

Este proyecto tiene como objetivo principal la construcción de un pluviómetro automático o utilizando tecnología de impresión 3D y Arduino. Se iniciará con el diseño y modelado, incluyendo la creación de un modelo 3D y la elaboración de planos detallados para la correcta impresión de las piezas.

Una vez impresas las piezas plásticas, se procederá al armado de los componentes electrónicos que consiste en conectar el sensor de efecto hall al corazón del sistema que es la placa Arduino, la programación del microcontrolador Arduino mediante el software Arduino IDE que me permite realizar la lectura y conversión de los pulsos enviados por el sensor de efecto hall en datos de precipitación, siendo más precisos el microcontrolador será programado para:

- Medir la cantidad de agua recogida por la cuchara basculante.

- Utilizar un sensor de efecto Hall para detectar cada inversión de la cubeta basculante.
- Registrar los pulsos generados por cada inversión y enviar estos datos para su análisis.

Esta etapa culminará con el ensamblaje de las piezas impresas, montaje del sensor de efecto hall, integrando el imán de tal manera que su posición permita una activación confiable del sensor durante cada inversión de cuchara, por estas razones es importante en el diseño del modelo se prevea los espacios correspondientes a cada componente.

La calibración del dispositivo se llevará a cabo en distintas fases: primero, calibrando el volumen necesario para cada inversión de la cuchara, y verificando que cada inversión de la cuchara sea detectada correctamente y esta sea enviada como pulso al Arduino; segundo, aplicando diferentes intensidades de precipitación para verificar la precisión de las lecturas del pluviógrafo, y, asegurando que cumplan con las normativas nacionales e internacionales regidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Las actividades planteadas se realizarán con el apoyo del Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), a través de sus instalaciones y equipos de impresoras 3D que dispondrán para tal efecto, en articulación con las líneas de investigación que actualmente desarrollan.

1.6 Hipótesis

La construcción y calibración de un pluviógrafo utilizando impresión 3D y tecnología Arduino es una opción factible técnica y económica, que permite obtener mediciones para contribuir a la disponibilidad de datos más precisos y actualizados de precipitación e intensidad de lluvia en nuestra región.

CAPÍTULO 2.

MARCO DE

REFERENCIA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Pluviómetro

Un pluviómetro es un instrumento diseñado para recolectar y medir la cantidad de lluvia caída. La precipitación acumulada durante un período específico se expresa en milímetros, lo que representa la altura que alcanzaría el agua si se distribuyera uniformemente sobre una superficie horizontal.

La unidad de precipitación es la profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área). Las cantidades diarias de precipitación deberían leerse con una resolución de 0,2 mm y, de ser posible, con una resolución de 0,1 mm; las cantidades semanales o mensuales deberían leerse con una resolución de 1 mm. Las mediciones diarias de la precipitación deberían efectuarse a horas fijas comunes para toda la red de interés cortos (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).

2.1.2 Tipos de pluviómetros automáticos

2.1.2.1 Pluviómetro de cubeta basculante

El pluviómetro de cubeta basculante o de balancín es uno de los más utilizados por su sencillez y eficacia.

Consta de un embudo receptor que dirige el agua a una cubeta doble montada sobre un eje como una balanza. Cuando una de las pequeñas cubetas acumula una cantidad predeterminada de agua, su peso hace que bascule, vaciándose y colocando la otra cubeta bajo el embudo.

Cada volteo representa un volumen fijo de precipitación, y un sensor cuenta el número de volteos para calcular la lluvia acumulada. Este mecanismo permite registrar no solo el total de lluvia, sino también su distribución temporal, estimando la intensidad de la precipitación en intervalos cortos (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).

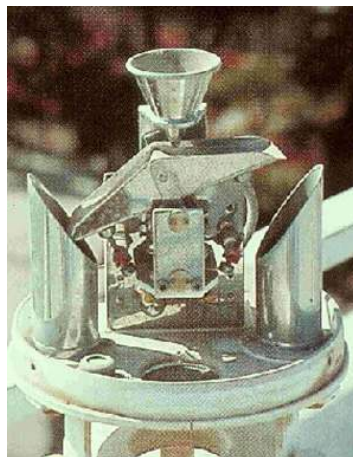


Figura 2.1 Pluviómetro de cubeta basculante

Fuente: Artajo Iparraguirre, 2010, p.6.

Aplicaciones: Debido a su equilibrio entre costo y desempeño, los pluviómetros basculantes se usan en gran cantidad de estaciones meteorológicas nacionales, redes de alerta de inundaciones y en agricultura para monitorear lluvia. Son ideales cuando se necesita resolución temporal alta. En entornos tropicales con lluvias muy intensas, puede complementarse con algoritmos de corrección de intensidad o usarse junto con otros tipos de sensores para asegurar la precisión.

2.1.2.2 Pluviómetro de pesaje

El pluviómetro de pesaje mide la precipitación acumulada mediante el peso del agua recogida. Típicamente, el agua de lluvia cae en un recipiente o cubeta fija situada sobre una balanza electrónica. El sistema registra de forma continua el incremento de peso, que se convierte en altura de lluvia acumulada

Algunos modelos están diseñados para vaciarse automáticamente cuando alcanzan cierta capacidad, mientras que otros pueden almacenar toda la lluvia de un evento, incluyendo nieve y granizo, midiendo su equivalente en agua mediante dispositivos calefactores o aditivos anticongelantes (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).



Figura 2.2 Pluviómetro de pesaje

Fuente: Artajo Iparraguirre, 2010, p.4.

Aplicaciones: Se emplean en estaciones meteorológicas de referencia, estaciones climatológicas, redes de investigación hidrológica y donde se necesite medir con gran exactitud acumulados de lluvia y nieve. También son comunes en aeropuertos y centros meteorológicos nacionales para obtener datos de precipitación de alta calidad. Su capacidad de registrar intensidades muy bajas y muy altas con igual fidelidad los hace ideales para estudios de cambio climático y calibración de radares meteorológicos.

2.1.2.3 Pluviómetro de presión

El pluviómetro de presión utiliza un sensor de presión para medir la altura o volumen de agua acumulada. En lugar de una balanza mecánica, incorpora un transductor en la base de un depósito colector. A medida que el agua de lluvia se acumula, la presión hidrostática ejercida sobre el sensor aumenta; dicha presión se convierte electrónicamente en una medida de la lámina de agua caída. En la práctica, el funcionamiento es similar al de un pluviómetro de pesaje, pero el sensor suele no tener piezas móviles y puede estar sellado, lo que lo hace apto para exteriores hostiles e incluso plataformas en movimiento (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).

Aplicaciones: Se utilizan en estaciones automáticas modernas que buscan reducir mantenimiento, así como en entornos especiales: por ejemplo, en barcos, boyas meteorológicas marinas o estaciones sísmicas donde las vibraciones harían poco fiables a los pluviómetros con partes móviles. También son útiles en climas extremos donde se

desean instrumentos sellados. Su uso no es tan común como los de cubeta basculante o pesaje, pero podrían implementarse en redes remotas alimentadas por energía solar debido a su relativa simplicidad un sensor de presión consume poca energía comparada con sistemas de pesaje con celdas de carga.

2.1.2.4 Otros tipos relevantes

Además de los anteriores, existen otros diseños de pluviómetros automáticos menos comunes pero útiles en situaciones específicas:

Pluviógrafo de sifón: es un aparato mecánico que registra la lluvia de forma continua sobre papel. Consta de un embudo, flotador y un tambor giratorio con papel milimétrico. A medida que el flotador sube con la lluvia acumulada, una pluma traza la curva de intensidades en el tiempo; cuando se llena el depósito, un sifón lo vacía automáticamente y el ciclo continúa. Proporciona registros históricos detallados en papel (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).

Si bien hoy en día ha sido reemplazado en gran medida por sensores electrónicos, muchos principios de calibración actuales derivan de este método clásico.

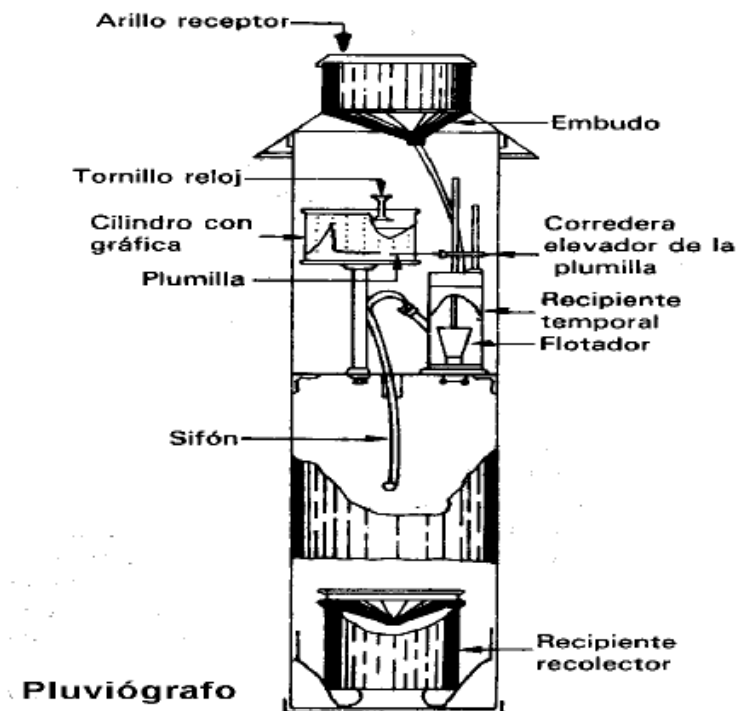


Figura 2.3 Pluviógrafo de sifón

Fuente: Artajo Iparraguirre, 2010, p.5.

Sensores de precipitaciones por radar/microonda: recientemente se han desarrollado sensores como el radar meteorológico en miniatura o sensores de microondas que estiman la lluvia a partir de la dispersión de ondas en las gotas, por ejemplo, es el sensor WS100 de Lufft, que utiliza tecnología radar Doppler para detectar tamaño y velocidad de gotas sin partes móviles, categorizando tipo e intensidad de precipitación de forma manteniéndose libre de mantenimiento.

2.1.3 Principio de medición

La lluvia se recoge en un colector y luego es canalizada hacia una cubeta basculante que se encarga de medir la cantidad de agua. Esta cubeta tiene dos posiciones de equilibrio como se muestra en la figura 2.4: cuando el agua cae, se va acumulando en una de las dos partes. Cuando el volumen de agua alcanza un valor previamente establecido, la pieza cambia de posición y vacía el contenido, al hacer esto, se detecta el cambio de posición y el proceso vuelve a comenzar, pero ahora con la otra cubeta.

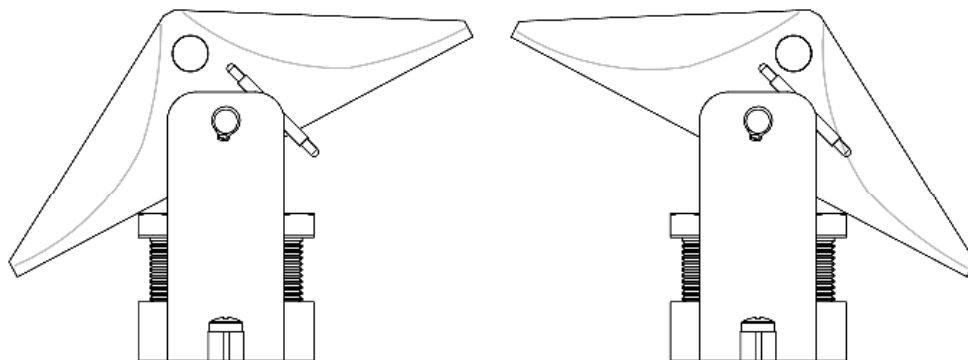


Figura 2.4 Pieza basculante y posición de equilibrio

Fuente: Almada, 2020, p. 57.

El volumen de agua necesario para que la cubeta bascule y cambie de lado se puede ajustar usando dos tornillos en la base, lo que forma parte de la calibración del dispositivo. Al llenarse, el agua genera un momento angular figura 2.5 suficiente para que la pieza alterne entre sus dos posiciones de equilibrio.

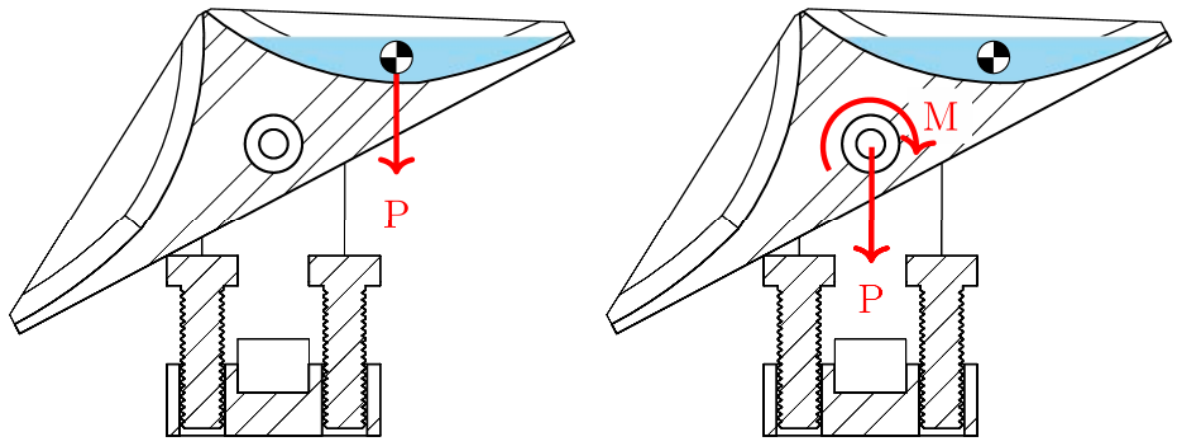


Figura 2.5 Momento de rotación y centro de gravedad

Fuente: Almada, 2020, p. 57.

La lectura del cambio de posición se hace gracias a la interacción entre un interruptor magnético y un imán de neodimio. Como se muestra en la figura 2.4, hay una posición donde el imán y el interruptor están cerca, lo que hace que el interruptor se cierre y esto se detecta electrónicamente. En la otra posición de equilibrio, el imán se aleja y el interruptor permanece abierto, situación que también es registrada. Así, cada vez que la cubeta bascula y descarga el agua, el interruptor cambia de estado, permitiendo la medición(Almada, 2020).

2.1.4 Tecnologías de bajo costo para el monitoreo

Dada la necesidad de expandir y densificar las observaciones en terreno, surge la oportunidad de aprovechar tecnologías modernas de bajo costo. En los últimos años se han desarrollado sensores meteorológicos económicos, plataformas electrónicas abiertas y soluciones de conectividad inalámbrica, que en conjunto pueden integrarse para crear estaciones automáticas a una fracción del costo de los equipos tradicionales. Diversos autores sostienen que la combinación de dispositivos de bajo costo con Internet de las Cosas (IoT), aprovechando la amplia difusión de las comunicaciones móviles y las tecnologías abiertas, ofrece una posible solución a los problemas de monitoreo meteorológico en países en desarrollo.

2.1.4.1 Programación

Arduino IDE es un entorno de desarrollo de código abierto que permite programar microcontroladores como el ESP32 mediante una sintaxis basada en C/C++. Ofrece una interfaz amigable, compatibilidad con múltiples bibliotecas y facilidad para cargar programas mediante conexión USB. Su comunidad activa y la gran cantidad de documentación disponible lo convierten en una herramienta ideal para el desarrollo de prototipos rápidos y proyectos educativos.

A través del Arduino IDE, se pueden gestionar tareas como la lectura de sensores, el manejo de archivos en la tarjeta SD y la sincronización con el módulo RTC, además de la conexión WiFi y el envío de datos a servidores en la nube como ThingSpeak.

El ecosistema de Arduino se complementa con librerías que simplifican la interacción con los periféricos. Entre ellas, RTCLib permite el manejo del módulo RTC DS3231, SD.h gestiona el almacenamiento en tarjeta SD, y WiFi.h junto a HTTPClient.h hacen posible la conexión a Internet y el envío de datos. Estas librerías abstraen detalles de bajo nivel y facilitan la escritura de código modular, reutilizable y mantenible.

2.1.4.2 Diseño e impresión

Dentro del diseño 3D juega un rol importante el programa SolidWorks que es una herramienta de diseño asistido por computadora CAD desarrollada por Dassault Systèmes. Se utiliza ampliamente en el diseño de componentes funcionales y estructuras para distintas ramas de la ingeniería. Este software se basa en el modelado paramétrico, una técnica que permite definir la geometría de un modelo en función de parámetros y restricciones. Esto permite al diseñador modificar rápidamente el modelo sin tener que reconstruirlo desde cero, haciendo posible un flujo de trabajo más eficiente y adaptativo. Una de las ventajas más notables de SolidWorks es su enfoque intuitivo para el modelado tridimensional, lo que permite desarrollar prototipos virtuales detallados con un alto grado de precisión. Además, integra herramientas para la creación de ensamblajes complejos, simulaciones básicas y generación de documentación técnica, todo dentro de un entorno unificado.

Una función esencial para la fabricación aditiva es la exportación de modelos en formato STL. Este tipo de archivo convierte las superficies del modelo en una malla de triángulos que puede ser interpretada por softwares de laminado para impresoras 3D. SolidWorks

permite ajustar la resolución de esta malla, equilibrando la calidad geométrica con el tamaño del archivo.

De acuerdo con BARR (2023), SolidWorks no solo facilita el modelado de piezas individuales, sino que también agiliza la transición del diseño conceptual hacia la ingeniería de detalle, constituyéndose en una herramienta clave para proyectos interdisciplinarios.

Para la impresión es indispensable Ultimaker Cura que es una aplicación de software de código abierto diseñada para preparar modelos 3D antes de ser impresos. Su principal función es la de convertir modelos digitales (usualmente en formato STL, OBJ o 3MF) en archivos de instrucciones (G-code) que las impresoras 3D pueden interpretar para ejecutar el proceso de deposición de material. Cura ha sido desarrollado por la empresa Ultimaker, pero su compatibilidad se extiende a muchas otras marcas de impresoras 3D.

Una de las funcionalidades más útiles para la impresión de componentes funcionales es la posibilidad de crear estructuras de soporte personalizadas y configurar el tipo de relleno interno para mejorar la resistencia mecánica o reducir el peso. Además, ofrece perfiles optimizados para distintos materiales como PLA, ABS, PETG, TPU y otros, lo cual es fundamental para seleccionar el tipo de filamento adecuado según las condiciones de uso del objeto.

Según la documentación técnica de Diosdado, 2014, Cura está diseñado para proporcionar un equilibrio entre facilidad de uso y profundidad funcional, permitiendo tanto la impresión rápida de prototipos como la producción precisa de piezas técnicas.

El uso conjunto de SolidWorks y Ultimaker Cura conforma una cadena de herramientas altamente eficaz para llevar un modelo digital desde su concepción hasta su realización física.

2.1.4.3 Recolección de datos

A través ThingSpeak , el ESP32 puede enviar datos mediante solicitudes, los cuales se almacenan en canales específicos, ThingSpeak ofrece herramientas para generar gráficos, detectar patrones y ejecutar scripts de análisis utilizando MATLAB, convirtiéndose en una opción poderosa para el monitoreo remoto y el procesamiento inteligente de datos (MathWorks, 2023).

2.1.5 Importancia del monitoreo de precipitaciones

El monitoreo de las precipitaciones reviste una importancia crítica en múltiples ámbitos técnico-ambientales, desde el estudio del cambio climático hasta la gestión de desastres naturales, se analizan cuatro contextos clave donde la observación sistemática de la lluvia resulta fundamental:

2.1.5.1 Monitoreo de precipitaciones y cambio climático

En el contexto del cambio climático, dar seguimiento a las precipitaciones es esencial para detectar tendencias y cambios en el ciclo hidrológico.

El calentamiento global intensifica la dinámica del agua: una atmósfera más cálida puede retener mayor vapor de agua, lo que puede derivar en eventos de lluvia más extremos. De hecho, se ha observado que las precipitaciones intensas tienden a incrementar aproximadamente un 7% en intensidad por cada grado Celsius de aumento de temperatura global, en línea con la capacidad de carga de humedad del aire. Esta intensificación implica mayor riesgo de inundaciones repentinas, erosión e impactos en infraestructura. Al mismo tiempo, algunas regiones experimentan descensos pluviométricos y sequías más severas, evidenciando una redistribución espacial y estacional de las lluvias atribuible al cambio climático.

Para entender y proyectar estos cambios es indispensable contar con registros históricos de precipitación de alta calidad. El monitoreo de largo plazo permite discernir señales de cambio climático en las variaciones en promedios anuales o en la frecuencia de eventos extremos diferenciándolas de la variabilidad natural. Estos datos alimentan los modelos climáticos globales y regionales, validando sus simulaciones de precipitación bajo distintos escenarios. Además, los registros pluviométricos sirven como línea base para evaluar desviaciones en el régimen de lluvias futuro. Como señalan expertos de NASA, “necesitamos el pasado para modelar el futuro; la climatología de precipitaciones nos da la base para comprender qué tan extremos pueden ser los eventos venideros”. La vigilancia constante de las precipitaciones es un pilar para comprender la aceleración del ciclo hidrológico bajo el cambio climático y diseñar estrategias de adaptación, ajustando planes de cultivo o infraestructura hídrica a nuevos patrones de lluvia (NASA, 2019).

2.1.5.2 Gestión ambiental y monitoreo de lluvias

En gestión ambiental, la precipitación es un factor que influye directamente en ecosistemas terrestres y acuáticos. Un régimen de lluvias adecuado sostiene bosques, pastizales y humedales; por el contrario, alteraciones en ese régimen pueden conducir a degradación ecológica. Monitorear las precipitaciones permite evaluar la disponibilidad de agua para ecosistemas, detectar estrés hídrico ambiental, déficits prolongados de lluvia provocan sequías que incrementan el riesgo de incendios forestales, pérdida de biodiversidad y desertificación. Contar con redes de monitoreo ayuda a identificar regiones con lluvias por debajo de lo normal y activar planes de conservación como restringir usos del agua o iniciar programas de reforestación.

Un régimen de lluvias adecuado sustenta bosques, pastizales y humedales; sin embargo, alteraciones en los patrones de precipitación pueden desencadenar procesos de estrés hídrico, pérdida de biodiversidad y degradación del suelo. De acuerdo con Sucozhañay & Célleri, una red bien distribuida de pluviómetros es indispensable para representar correctamente las precipitaciones espaciales, lo cual permite fortalecer los modelos de predicción de escorrentía y, en consecuencia, mejorar las decisiones de manejo ambiental. El monitoreo de precipitaciones informa la gestión sostenible de los recursos naturales, permitiendo anticipar y mitigar impactos ambientales adversos, permite evaluar la efectividad de políticas ambientales a lo largo del tiempo, comprobando si la restauración de cuencas mejora la infiltración y reduce la escorrentía superficial en eventos de lluvia intensa.

2.1.5.3 Recursos hídricos y planificación hídrica

Los recursos hídricos de una región dependen en gran medida de las aportaciones por precipitación. La lluvia alimenta ríos, lagos, acuíferos y reservorios que abastecen de agua a poblaciones, agricultura e industria, medir con precisión la precipitación es fundamental para la planificación y gestión del agua. En la práctica, organismos hidrológicos monitorean lluvias para elaborar balances hídricos comparando precipitación con escorrentía, evapotranspiración y así estimar la recarga de acuíferos o el llenado de embalses. Las decisiones de operación de represas, cuánta agua almacenar o liberar dependen de pronósticos e indicadores de lluvia acumulada en la cuenca, un monitoreo

deficiente podría llevar a errores: subestimar la lluvia puede dejar embalses vacíos antes de una sequía, o sobrestimarla podría obligar a vertidos preventivos innecesarios.

Un estudio reciente sobre las tendencias de precipitación destaca la alta variabilidad interanual e intra anual de las lluvias, sin tendencias significativas a largo plazo, pero con diferencias regionales que deben considerarse en la planificación hídrica (Vicente Serrano et al., 2022).

En ingeniería hidráulica y sanitaria, los diseños de drenajes pluviales urbanos, alcantarillado pluvial, diques de contención, canales de riego utilizan datos de precipitación de muchos años para definir eventos de diseño. Estos cálculos curvas intensidad-duración-frecuencia, caudales máximos de escorrentía requieren registros confiables de precipitaciones máximas en distintas escalas temporales. Por ello, mantener estaciones pluviométricas y pluviográficas en diversas regiones asegura información local para una planificación territorial resiliente, en zonas rurales, conocer la distribución estacional de la lluvia es vital para la planificación agrícola y para manejar sistemas de riego.

2.1.5.4 Prevención de desastres naturales

La prevención y gestión de desastres hidrometeorológicos depende fuertemente del monitoreo de las precipitaciones. Eventos extremos como lluvias torrenciales pueden detonar inundaciones repentinas, deslizamientos de tierra y flujos de lodo, con grandes pérdidas humanas y económicas, contar con sistemas de observación en tiempo real de la lluvia permite emitir alertas tempranas y activar planes de emergencia. muchos países operan redes telemétricas de pluviómetros en cuencas vulnerables: si la lluvia acumulada o la intensidad superan ciertos umbrales críticos, se alerta a Protección Civil y a las comunidades para evacuaciones preventivas. Estas alarmas pluviométricas se basan en umbrales calibrados con datos históricos de eventos que causaron desbordes o deslaves.

La medición in situ, se utilizan radares meteorológicos y estimaciones satelitales de precipitación para vigilancia casi instantánea de tormentas severas. Un radar meteorológico puede mostrar núcleos de lluvia extrema y su desplazamiento, anticipando qué áreas estarán en riesgo en las siguientes horas. Los satélites, por su cobertura amplia, detectan sistemas convectivos de meso escala o ciclones que podrían generar desastres en

zonas remotas sin otro tipo de observación. La integración de datos pluviómetros en tierra, radar y satélite, proporciona una visión completa para la gestión de riesgos.

El monitoreo de lluvias también cumple un rol post-desastre: tras una inundación, los registros de precipitación ayudan a explicar la magnitud del evento. Esto retroalimenta la planificación de infraestructura y ordenamiento territorial para el futuro por otra parte, más allá de inundaciones, existen desastres acumulativos como la sequía cuya monitorización requiere seguimiento de lluvias por meses a años. La ausencia prolongada de precipitación, vigilada mediante índices como el Índice Estandarizado de Precipitación, activas acciones de emergencia como racionamiento de agua y asistencia alimentaria antes de que la situación se agrave.

Monitorear las precipitaciones salva vidas y bienes al sustentar sistemas de alerta temprana y al mejorar las predicciones de eventos extremos. Estudios recientes resaltan que una vigilancia precisa de la lluvia es “crucial para comprender el cambio climático y los peligros asociados a las lluvias a escala local”, subrayando su importancia tanto para la ciencia climática como para la gestión práctica del riesgo, estas observaciones, hoy se puede mejorar la previsión de eventos extremos que causan peligros naturales y, en consecuencia, fortalecer la resiliencia de las comunidades ante un clima cada vez más variable (Junlin Hua et al., 2023).

2.1.6 Aplicaciones científicas y técnicas de los datos de precipitación

Los datos recopilados mediante los diversos métodos de monitoreo de precipitaciones no son un fin en sí mismos, sino que nutren innumerables aplicaciones científicas y técnicas, algunas de las principales aplicaciones en ámbitos de modelización climática, predicción de eventos extremos y planificación territorial son:

2.1.6.1 Modelación climática y meteorológica

Los modelos computacionales del clima y del tiempo atmosférico requieren grandes volúmenes de observaciones para su calibración y validación. Las series de precipitación observada son fundamentales para ajustar parámetros de los modelos climáticos globales (GCM) y regionales (RCM) referentes a procesos convectivos, formaciones de nubes y ciclo hidrológico. Una aplicación concreta es la elaboración de escenarios de cambio climático: a partir de proyecciones modeladas, los climatólogos comparan las salidas con

registros históricos de lluvia para asegurarse de que el modelo reproduce adecuadamente las precipitaciones presentes antes de confiar en sus predicciones futuras. En estudios de atribución, cuando ocurre un evento extremo como una inundación sin precedente), se usan datos observados para contrastar simulaciones con y sin cambio climático y así estimar cuánto más probable o intensa la hizo el calentamiento global.

En la meteorología operativa, la asimilación de observaciones de lluvia de radares y satélites principalmente ha mejorado las predicciones numéricas de corto plazo. Además, los datos de lluvia alimentan modelos hidrológicos acoplados a los meteorológicos: así se pueden predecir no solo cuánto lloverá, sino cuánto escurrirá esa lluvia en ríos y quebradas, anticipando crecen, en el proyecto GPM que una de las aplicaciones importantes de los datos de precipitación es en la modelización meteorológica y climática, cimiento para estudiar el tiempo a corto plazo y el clima a largo plazo. Sin datos de entrada fiables, los modelos arrojarían pronósticos erróneos; por ello cada mejora en el monitoreo mejor resolución de radar, nuevos satélites se traduce en mejoras directas en la calidad de los pronósticos y proyecciones (NASA, 2019).

2.1.6.2 Predicción y manejo de eventos extremos

Ya se ha discutido el papel del monitoreo en alerta temprana, pero además los datos históricos de precipitación sirven para entender la frecuencia y patrón de eventos extremos. Mediante análisis estadísticos de percentiles y periodos de retorno de precipitaciones máximas, los científicos pueden estimar la probabilidad de lluvias catastróficas. Esto es vital para el diseño de obras de mitigación bajo los criterios de gestión del riesgo. Además, con series temporales largas, se pueden observar tendencias en los extremos: si las lluvias muy intensas de corta duración que causan inundaciones repentinas urbanas están aumentando en frecuencia debido al cambio climático o efecto de isla de calor.

Una aplicación técnica es la elaboración de mapas de amenaza de inundación: combinando datos de precipitación máxima esperable con modelos digitales de terreno, se identifican las zonas que serían cubiertas por el agua bajo diferentes escenarios de lluvia. Estos mapas apoyan a los planificadores urbanos en decidir dónde no desarrollar o qué defensas construir. Igualmente, en áreas propensas a deslizamientos, se utilizan umbrales de lluvia

acumulada en 3 días como indicador de suelos saturados susceptibles al colapso; esos umbrales se obtienen analizando eventos pasados medidos por la red de lluvia.

En el campo de la salud pública las precipitaciones influyen en enfermedades transmitidas por vectores mosquitos en charcos tras lluvias o por agua contaminada. Con datos de lluvia y temperatura, epidemiólogos construyen modelos que predicen brotes de dengue, malaria o cólera. Fuertes lluvias seguidas de calor pueden predecir aumento de mosquitos, mientras que lluvias intensas que colapsan saneamiento pueden anticipar brotes de diarreas. De hecho, se reconoce que entender el régimen de lluvias ayuda a “prever no solo desastres, sino también enfermedades y seguridad alimentaria”, en conexión con otros factores (NASA, 2019).

2.1.6.3 Planificación territorial y adaptación de infraestructura

En la planificación territorial, los datos climáticos, particularmente de precipitación, guían decisiones de ordenamiento del suelo e inversión en infraestructura. Un análisis robusto del clima local de precipitaciones es parte de planes de desarrollo urbano o regional. Conocer dónde llueve más o dónde hay gradientes de precipitación permite zonificar usos de suelo compatibles para reservar zonas inundables como parques en vez de urbanizarlas. La infraestructura verde parques, humedales artificiales, permeabilización de superficies se diseña óptimamente usando información de cuánta lluvia puede absorber el terreno localmente, por otro lado, proyectos de carreteras, puentes y alcantarillado dimensionan sus obras de drenaje según las lluvias máximas esperadas; si los datos indican una tendencia al alza en extremos, los ingenieros incorporan márgenes de seguridad más altos para evitar fallos prematuros.

En agricultura y ordenamiento rural, la planificación territorial apoya la seguridad alimentaria eligiendo cultivos apropiados al régimen de lluvias y su variabilidad. Regiones con lluvias escasas pero confiables pueden destinarse a cierto tipo de agricultura de temporal, mientras que zonas con lluvias abundantes pero erráticas tal vez requieran sistemas de riego o reservorios para regular el agua, esto se basa en estudios climáticos que parten del monitoreo histórico de precipitaciones.

Las políticas de adaptación al cambio climático a nivel local usan las proyecciones de cómo podrían cambiar las lluvias para tomar acciones anticipatorias. Si se espera un 10% menos de precipitación en los próximos 30 años en cierta cuenca, la planificación

territorial podría incluir estrategias de recolección de agua de lluvia en edificios, construcción de pequeñas presas, protección de zonas de recarga hídrica, etc. Sin la línea base que brindan los datos de monitoreo, estas acciones carecerían de sustento cuantitativo.

2.1.6.4 Investigación científica e innovación continua

Cabe destacar que los datos de precipitación recopilados han sido la base para numerosas investigaciones fundamentales, desde estudiar patrones de las lluvias que vinculan con fenómenos remotos como El Niño hasta evaluar la eficacia de técnicas de *siembra de nubes* para inducir lluvia, el monitoreo provee la evidencia empírica necesaria. En hidrología, ha permitido desarrollar y refinar modelos lluvia-escorrentía que predicen caudales en ríos a partir de series de lluvia, lo cual es crucial para la ingeniería de recursos hídricos. En geomorfología, registros de lluvias extremas se correlacionan con episodios de erosión masiva o cambios en cauces fluviales, incluso en ciencias sociales, el impacto de las lluvias anormales sobre economías locales un claro ejemplo son pérdidas agrícolas que generan fluctuaciones de precios las cuales se estudia con datos climáticos históricos. El entrenamiento académico y técnico se apoya en la disponibilidad de estos datos. En la formación universitaria de ingeniería ambiental, civil, geografía o ciencias atmosféricas, los estudiantes utilizan registros reales de precipitación para aprender métodos estadísticos, calibrar modelos y comprender la variabilidad climática. Esto conecta la teoría con la realidad observada, con la apertura de bases de datos globales, un estudiante puede comparar las precipitaciones de su localidad con las de otros continentes e inferir diferencias climáticas, fomentando una visión global.

El monitoreo de las precipitaciones sustenta un amplio espectro de aplicaciones: mejorar la comprensión del sistema climático, retroalimentar modelos, probar hipótesis y técnicas de diseñar infraestructura resiliente, manejar recursos hídricos, reducir riesgos de desastre, planificar el uso del territorio. La calidad y extensión de los datos pluviométricos determinan la fiabilidad de nuestras decisiones en esos campos, la inversión en mantener y mejorar los sistemas de observación de lluvias no solo satisface una curiosidad científica, sino que redundan en beneficios prácticos para la sociedad (NASA, 2019).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Pluviómetro automático

Dispositivo electrónico diseñado para registrar la cantidad de precipitación que cae sobre una superficie, de forma continua y sin intervención humana. Su funcionamiento puede basarse en diferentes principios: cubetas basculantes, sensores de presión o pesaje, cada uno adaptado a distintos entornos y niveles de precisión. Los datos recolectados pueden almacenarse localmente o transmitirse vía radiofrecuencia, WiFi o satélite a una base central de monitoreo. Su uso se ha expandido a sistemas de alerta, monitoreo territorial y control de procesos hídricos (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990).

2.2.2 Arduino

Plataforma de desarrollo de hardware y software libre que permite el diseño de sistemas embebidos. Basado en microcontroladores programables, es ampliamente utilizado en proyectos de automatización, robótica, monitoreo y educación. Su lenguaje de programación se basa en C/C++ y permite la integración con sensores, actuadores y módulos de comunicación. (Kurniawan, 2019)

2.2.3 ESP32

Microcontrolador de alto rendimiento con arquitectura de doble núcleo, que integra conectividad WiFi y Bluetooth. Fabricado por Espressif Systems, permite una gestión eficiente de datos, tanto en adquisición como en transmisión. Es compatible con múltiples interfaces digitales (I2C, SPI, UART), lo que lo hace ideal para sistemas de monitoreo IoT. Se utiliza en diversos entornos donde se requiere procesamiento distribuido con bajo consumo energético. (Kurniawan, 2019)

2.2.4 IoT (Internet of Things)

Conjunto de tecnologías y arquitecturas que permiten la interconexión de dispositivos físicos a través de Internet, dotándolos de capacidades para capturar, procesar y enviar datos en tiempo real. Facilita el desarrollo de sistemas automáticos distribuidos que

reportan información desde puntos remotos sin intervención humana directa. (Kurniawan, 2019; MathWorks, 2023).

2.2.5 Módulo lector de tarjeta SD

Dispositivo periférico utilizado para almacenar datos de sensores en una tarjeta de memoria. Funciona a través del protocolo SPI y permite registrar datos incluso en ausencia de conexión a Internet. Es ideal para operaciones en campo donde se requiere registrar grandes volúmenes de datos de forma continua. Se integra fácilmente con microcontroladores como el ESP32 o Arduino. (Kurniawan, 2019)

2.2.6 ThingSpeak

Plataforma de IoT desarrollada por MathWorks, que permite almacenar, visualizar y analizar datos en la nube. Es compatible con dispositivos como ESP32 y Arduino, y permite integrar scripts en MATLAB para análisis estadísticos, detección de patrones o automatización. (MathWorks, 2023)

2.2.7 RTC (Real Time Clock)

Componente electrónico que mantiene el registro del tiempo real (hora, minutos, segundos, fecha) incluso cuando el sistema principal está apagado. Funciona con una batería de respaldo que garantiza su funcionamiento continuo. Es esencial para registrar eventos con marca de tiempo y sincronizar actividades en sistemas de adquisición de datos automatizados. (Kurniawan, 2019)

2.2.8 Sensor Hall KY-003

Sensor digital basado en el efecto Hall, que detecta la presencia de un campo magnético cercano y emite una señal digital. Su uso es común en sistemas de conteo, como la detección del basculamiento de cubetas en pluviómetros automáticos. Tiene un tiempo de respuesta rápido, bajo consumo y no requiere contacto físico, lo que prolonga su vida útil. (Kurniawan, 2019)

2.2.9 Impresión 3D con filamento

Tecnología de impresión 3D que funde filamento termoplástico (como PLA, ABS o PETG) y lo deposita capa por capa sobre una superficie. Es el método más utilizado por

su bajo costo, facilidad de uso y disponibilidad de materiales. Es adecuado para crear estructuras resistentes para exteriores, siempre que se utilicen materiales durables. (Diosdado, 2014)

2.2.10 PETG (Polietileno Tereftalato con Glicol)

Filamento termoplástico utilizado en impresión 3D, que combina la resistencia del ABS con la facilidad de impresión del PLA. Ofrece excelente resistencia química, térmica y a los rayos UV, lo que lo hace ideal para aplicaciones al aire libre. Es ligeramente flexible y no se deforma fácilmente. (Diosdado, 2014)

2.2.11 Impresión 3D en resina

Tecnología de impresión que utiliza resina líquida fotopolimerizable, solidificada mediante luz UV, ya sea por láser (SLA) o proyector (DLP). Se caracteriza por su alta resolución y excelente acabado superficial. Es ideal para fabricar componentes pequeños y complejos con gran precisión. Requiere posprocesamiento con alcohol isopropílico y curado adicional. (Diosdado, 2014).

2.2.12 Resina fotopolimerizable

Material líquido utilizado en tecnologías de impresión 3D como SLA o DLP. Se endurece al ser expuesto a luz ultravioleta, permitiendo fabricar objetos con gran detalle y precisión. Existen diferentes tipos de resina según su aplicación: estándar, flexible, resistente al calor, entre otras. Es especialmente útil para piezas que requieren acabados finos, como cubiertas de sensores o componentes internos complejos. (Diosdado, 2014)

2.2.13 Calibración Estática

Proceso mediante el cual se ajusta un instrumento de medición bajo condiciones fijas, comparando su respuesta con valores de referencia previamente conocidos. En pluviómetros, consiste en aplicar cantidades exactas de agua para verificar que el conteo de eventos corresponde con el volumen calibrado. Permite establecer una relación precisa entre el evento físico y el valor digital registrado. (Artajo Iparraguirre, 2010)

2.2.14 Calibración Dinámica

Evaluación del sistema de medición bajo condiciones operativas reales. Se simulan flujos de agua variables en intensidad y duración para validar el comportamiento del sensor y su tiempo de respuesta. Este tipo de calibración es fundamental para evaluar la precisión del sistema frente a variaciones reales. (Almada, 2020)

2.3 Marco espacial

2.3.1 Densidad de pluviómetros y cobertura efectiva

El diseño de una red de estaciones pluviométricas debe considerar la cobertura espacial necesaria para captar la variabilidad de la precipitación. La lluvia puede variar drásticamente en cortas distancias, especialmente en regiones montañosas o convectivas, por lo que la separación o densidad entre pluviómetros es un factor crítico. Existen recomendaciones de organismos internacionales, como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), sobre la densidad mínima de pluviómetros según la topografía y el régimen de lluvias de la región.

De acuerdo con la OMM, en regiones montañosas la red debe ser más densa se recomienda al menos un pluviómetro por cada 250 km². En cambio, en regiones llanas interiores terrenos de topografía suave y clima más homogéneo podría bastar un pluviómetro por cada 575 km²

Estas cifras equivalen aproximadamente a distancias de alrededor de 15–24 km entre estaciones, respectivamente. Sin embargo, son valores orientativos mínimos; para estudios hidrológicos locales o cuencas críticas, a menudo se instalan redes mucho más densas (Hui-Chung Yeh et al., 2017) .

En el contexto de Bolivia, país con marcadas regiones geográficas, estas recomendaciones toman especial relevancia:

Altiplano: Incluye la meseta andina y cordilleras, con gran variación espacial de la precipitación debido a la altitud y efectos orográficos. Siguiendo a la OMM, se sugiere una alta densidad de 1 estación/250 km² o incluso más densa en cuencas pequeñas de alta montaña. Esto significa estaciones relativamente cercanas entre sí para capturar diferencias locales. Actualmente el altiplano boliviano tiene escasez de estaciones en

muchas zonas, lo que dificulta estimar adecuadamente eventos como granizadas locales o lluvias altiplánicas de verano.

Valles interandinos: Presentan terreno irregular de valles y serranías con microclimas variados. Aquí también se justifica una densidad alta a moderada, cercana al criterio de zonas montañosas 250 km² por estación como referencia. Las precipitaciones en los valles pueden ser muy focalizadas por convección local y efectos de exposición de las laderas, complementada con estaciones en cuencas altas para pronóstico de crecidas.

Llanos orientales: Comprenden el oriente y Amazonía boliviana, con extensas planicies. La lluvia aquí es abundante, pero tiende a ser más homogénea en áreas amplias, salvo convección puntual. La OMM indica que en terrenos llanos podría usarse una densidad menor, por ejemplo, cada 575 km². No obstante, dado el interés en monitorear eventos extremos ejemplos claros son las inundaciones en Beni, Pando, Santa Cruz y la influencia de sistemas convectivos, una densidad práctica recomendada podría ser cada 20–30 km en redes operativas. Para estudios climatológicos de grandes áreas, la cifra de 500–600 km por estación puede ser aceptable, mientras que para alertas hidrológicas se implementan densidades mayores cerca de ríos y poblaciones (Cordero, 2016).

2.3.2 Criterios de emplazamiento

El emplazamiento de los pluviómetros constituye un aspecto crítico en la obtención de datos confiables de precipitación. La presencia de obstáculos como árboles, edificios, muros o cualquier otro elemento vertical cercano al sensor puede afectar la medición, generando errores por turbulencia, obstrucción del flujo de gotas o salpicaduras. Por este motivo, la OMM establece directrices claras sobre la selección de ubicaciones mediante una clasificación de cinco clases, asociadas a diferentes niveles de incertidumbre.

Clase 1: Representa el estándar óptimo. Se refiere a un terreno plano, horizontal y abierto, con una pendiente menor a 19° (1/3). El pluviómetro debe estar rodeado únicamente por obstáculos bajos y uniformes situados a una distancia mínima de 2 a 4 veces su altura, dentro de un ángulo de elevación de 14° a 26°. Es la condición ideal para una instalación sin interferencias.

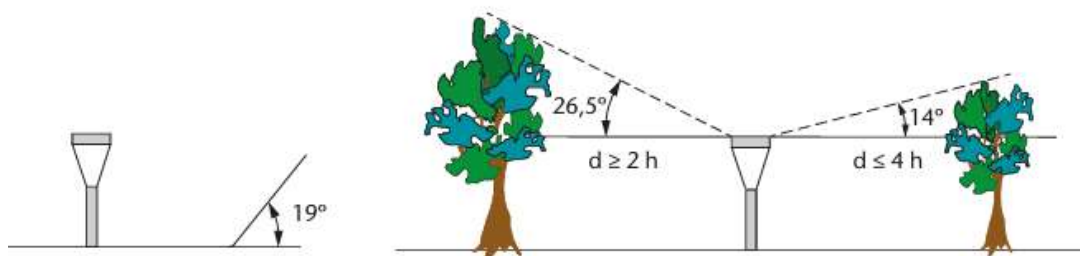


Figura 2.6 Criterio de emplazamiento clase 1

Fuente: (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990)

Clase 2: Similar a la clase 1 pero con leves desviaciones. Los obstáculos deben situarse al menos a 2 veces su altura y no superar un ángulo de elevación de 26,5°. En esta clase, la incertidumbre adicional esperada es de hasta un 5 %. Se acepta en sitios donde las condiciones ideales no son posibles, pero aún se puede garantizar una buena calidad de datos.

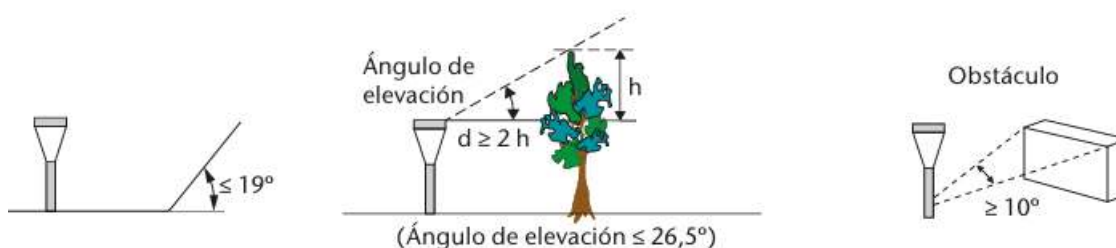


Figura 2.7 Criterio de emplazamiento clase 2

Fuente: (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990)

Si bien existen 5 clases se optó por emplazamientos que cumplan con los requisitos de clase 1 y clase 2. Esta decisión busca reducir al mínimo los errores sistemáticos, asegurar la representatividad de los datos recolectados y validar el desempeño del prototipo bajo condiciones de campo controladas. (Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, 1990)

2.4 Marco temporal

El calendario hidrológico en Bolivia inicia en el mes de octubre, cuando comienzan a registrarse los primeros eventos significativos de precipitación en gran parte del territorio nacional. Este inicio marca el comienzo del monitoreo hidrológico anual, el periodo de

lluvias se extiende generalmente hasta el mes de marzo, alcanzando su mayor intensidad en los meses de diciembre, enero y febrero.

La fase de pruebas de campo se llevó a cabo entre los meses de diciembre de 2024 y marzo de 2025, aprovechando el aumento en la frecuencia e intensidad de lluvias que caracteriza este ciclo. Esta elección temporal se fundamenta en la necesidad de validar el desempeño del instrumento bajo condiciones reales de lluvia, permitiendo evaluar con mayor fidelidad su capacidad de respuesta ante diferentes rangos de intensidad pluviométrica.

Realizar las pruebas durante el periodo lluvioso permitió simular condiciones operativas reales, capturar eventos de lluvia ligera, moderada y fuerte, y verificar el funcionamiento continuo del sistema en escenarios críticos de humedad, salpicadura y acumulación, esta etapa se evaluó el comportamiento del sistema en campo, incluyendo la frecuencia de activación del mecanismo de medición, la integridad de los datos almacenados y la consistencia de los registros en comparación con observaciones de referencia., esto contribuyo a identificar posibles ajustes estructurales y electrónico

CAPÍTULO 3.

INGENIERÍA DEL

PROYECTO

3.1 Diseño

3.1.1 Dimensiones iniciales

En el presente documento se realiza un análisis estático detallado para determinar de forma precisa y sistemática las dimensiones óptimas de un pluviógrafo de cubeta basculante. Este análisis está orientado a asegurar el rendimiento confiable y preciso del instrumento en condiciones operativas reales, abordando especialmente los aspectos clave del embudo colector, el balancín basculante y el mecanismo magnético que controla su funcionamiento.

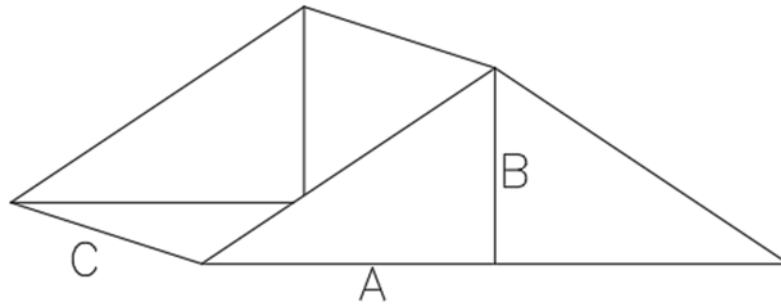


Figura 3.1 Esquema de la propuesta

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.1 Embudo

Superficie de captación

La precisión de la medición en un pluviómetro depende inicialmente del área efectiva de recolección de agua, proporcionada por el embudo. Para este análisis, se utiliza un embudo comercial con un diámetro previamente determinado de 26,7 cm.

$$S_c = \frac{\pi \times D_o^2}{4} \quad (1)$$

Donde: S_c = superficie de captación [cm^2]

D_c = diámetro del embudo [cm]

$$S_o = \frac{\pi \times 26,70^2}{4} = 559,90 \text{ cm}^2$$

Esta medida específica proporciona una superficie de captación efectiva de aproximadamente 559,90 cm². Este valor cumple estrictamente con la resolución estándar recomendada por la OMM, correspondiente a 0,1 litros por metro cuadrado (l/m²), asegurando que el instrumento se ajuste plenamente a las exigencias internacionales

3.1.1.2 Balancín

Las fuerzas que actúan y son importantes de analizar durante el diseño del balancín.

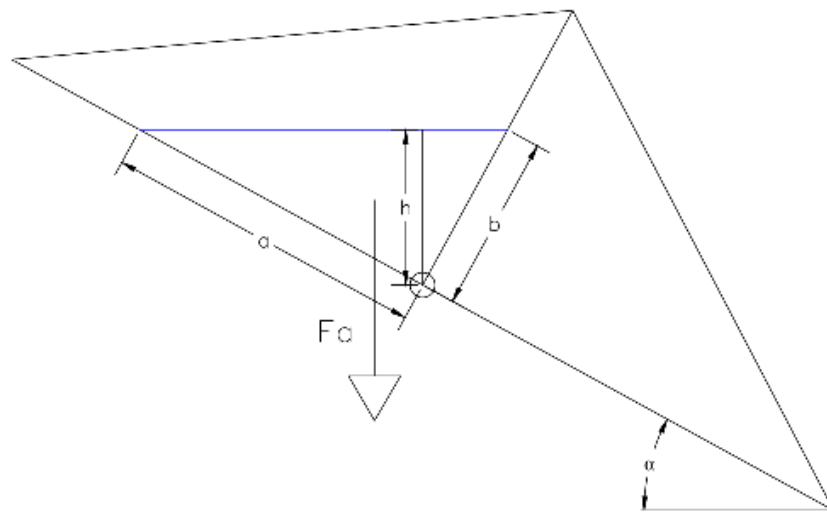


Figura 3.2 Fuerza del agua en el balancín

Fuente: Elaboración propia

Agua

Se refiere a la cantidad de agua necesaria para hacer que el balancín se incline, vaciando su contenido donde se aplica los ciertos criterios para su determinación:

- Volumen de basculación: El volumen de basculación determinado por diseño es de 5,6 ml, asegura que la fuerza generada por el agua al llenarse la cubeta sea suficiente para activar el mecanismo de basculación.

$$V_a = r \times S_c \quad (2)$$

Donde: V_a = volumen de basculación[l]

$r =$ resolución estándar [l/m^2]

$S_C =$ superficie de captación [m^2]

$$V = 0,10 \times 5,60 \times 10^{-2} = 5,60 \times 10^{-3} \text{ l}$$

- Fuerza del agua: Dada la densidad del agua (ρ_a) es 1000 kg/m^3 , se obtiene el peso del agua necesario para generar el momento de basculación

$$F_a = V_a \times \rho_a \times g \quad (3)$$

Donde: $F_a =$ fuerza del agua [N]

$V_a =$ volumen de agua [m^3]

$\rho_a =$ densidad del agua [kg/m^3]

$g =$ gravedad [m/s^2]

$$F_a = 5,60 \times 10^{-6} \times 1000 \times 9,81 = 5,49 \times 10^{-2} \text{ N}$$

- Brazo con respecto al eje de rotación: Se considera el brazo desde el eje de giro hasta la línea de acción de la fuerza generada por el peso del agua

$$x_a = \cos(\alpha) \times \frac{a}{3} - \sin(\alpha) \times \frac{b}{3} \quad (4)$$

Donde: $x_a =$ brazo de rotación de la fuerza del agua [m]

$\alpha =$ ángulo de inclinación [$^\circ$]

a y $b =$ dimensiones que cubre el agua en el balancín [m]

Balancín

Se realiza el análisis del balancín que está compuesto por tres partes fundamentales: una parte lateral, una base y un divisor interno.

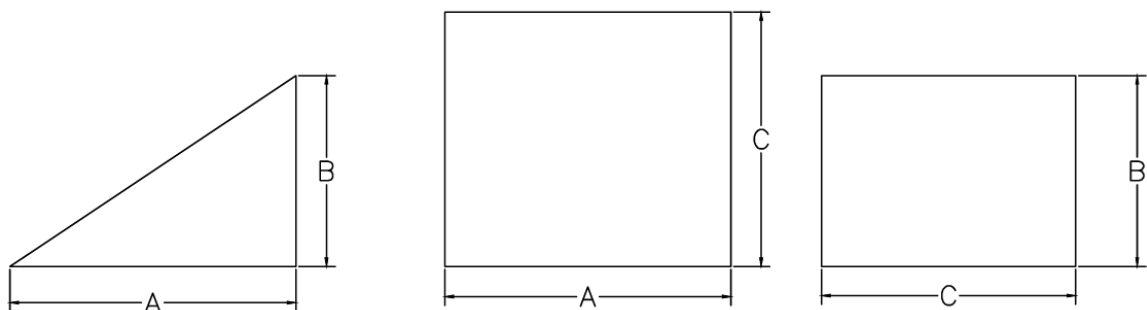


Figura 3.3 Despiece del balancín

Fuente: Elaboración propia

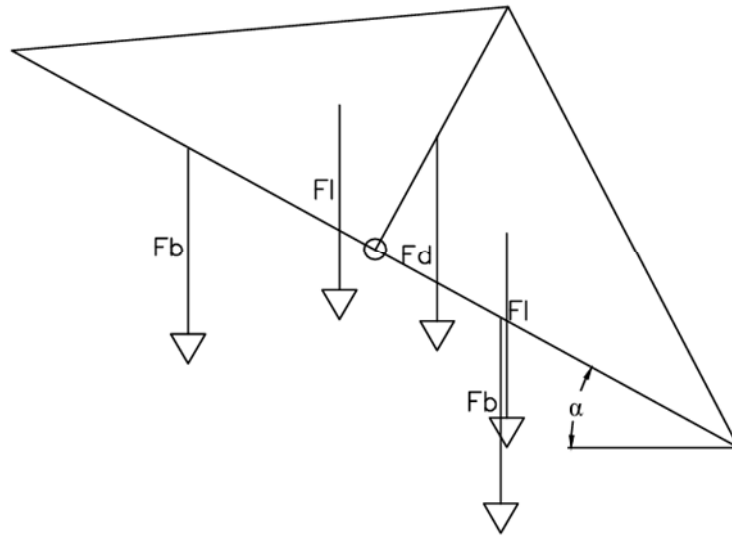


Figura 3.4 Fuerzas propias del balancín

Fuente: Elaboración propia

- Volúmenes: El espesor de las paredes de estas piezas es constante e igual a 0,001 m (1 mm), el volumen se determina según la geometría específica diseñada, asegurando equilibrio simétrico y una distribución uniforme del agua durante la operación

Lateral

$$V_l = \frac{B \times A}{2} \times 1 \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$V_l = 5 \times 10^{-4} AB \text{ m}^3$$

Base

$$V_b = A \times C \times 1 \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$V_b = 1 \times 10^{-3} AC \text{ m}^3$$

Divisor

$$V_d = C \times B \times 1 \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$V_d = 1 \times 10^{-3} CB \text{ m}^3$$

Donde: V_l , V_b y V_d = volúmenes propios de cada parte del balancín [m^3]

A, B y C = dimensiones del balancín [m]

- Fuerzas: Cada componente genera una fuerza específica en función de su volumen y la densidad del material (ρ_b) es igual a 1180 kg/m³ correspondiente al material de impresión. Estas fuerzas son cruciales para determinar el comportamiento estático del balancín durante la basculación.

Lateral

$$F_l = V_l \times \rho_b \times g \quad (8)$$

$$F_l = 5 \times 10^{-4} AB \times 1180 \times 9,81 = 5,79 AB \text{ N}$$

Base

$$F_b = V_b \times \rho_b \times g \quad (9)$$

$$F_b = 1 \times 10^{-3} AC \times 1180 \times 9,81 = 11,58 AC \text{ N}$$

Divisor

$$F_d = V_d \times \rho_b \times g \quad (10)$$

$$F_d = 1 \times 10^{-3} BC \times 1180 \times 9,81 = 11,58 BC \text{ N}$$

Donde: F_l, F_b y F_d = fuerzas de cada parte del balancín [N]

ρ_l, ρ_b y ρ_d = densidad de material compuesto por el balancín [kg/m³]

g = gravedad [m/s²]

- Brazos de rotación: Se considera el brazo desde el eje de giro hasta la línea de acción de la fuerza generada por cada parte del balancín.

Lateral

$$x_l = \cos(\alpha) \frac{A}{3} - \sin(\alpha) \frac{B}{3} \quad (11)$$

Base

$$x_b = \cos(\alpha) \frac{A}{2} \quad (12)$$

Divisor

$$x_d = \sin(\alpha) \frac{B}{2} \quad (13)$$

Donde: x_l, x_b y x_d = brazo de rotación de la fuerza que ejerce cada parte [m]

α = ángulo de inclinación [°]

Imán

Se refiere a un imán de neodimio que tiene una fuerza magnética significativa en relación con su tamaño, la fuerza magnética generada con el eje no se considera debido a que es perpendicular entre si durante la basculación.

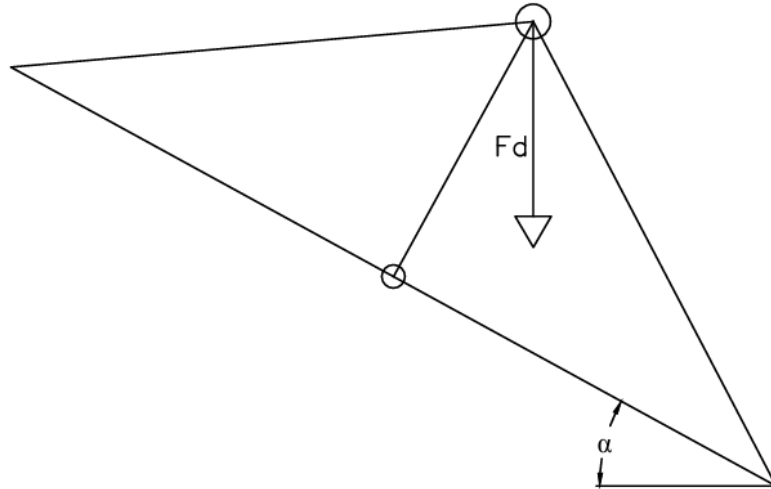


Figura 3.5 Fuerza del imán en el balancín

Fuente: Elaboración propia

- Volumen: Es un imán comercial de neodimio, con un diámetro de 6 mm y un espesor de 3 mm, el volumen del imán se calcula fácilmente a partir de su geometría cilíndrica.

$$V_i = \frac{\pi \times D_i^2}{4} \times e_i \quad (14)$$

Donde: V_i = volumen del imán [m^3]

D_i = diámetro del imán [m]

e_i = espesor del imán [m]

$$V_i = \frac{\pi \times (6 \times 10^{-3})^2}{4} \times 3 \times 10^{-3} = 8,45 \times 10^{-8} \text{m}^3$$

- Fuerza: La densidad (ρ_i) de 7400 kg/m^3 asegura un peso suficiente para mantener la estabilidad y control durante el movimiento de basculación

$$F_i = V_i \times \rho_i \times g \quad (15)$$

Donde: F_i = fuerza del imán [N]

$V_i =$ volumen del imán[m³]

$\rho_i =$ densidad del imán [kg/m³]

$g =$ gravedad [m/s²]

$$F_i = 8,48 \times 10^{-8} \times 7400 \times 9,81 = 6,16 \times 10^{-3} N$$

- Brazo de rotación: Se considera el brazo desde el eje de giro hasta la línea de acción de la fuerza generada por el peso del imán.

$$x_i = B \times \text{sen}(\alpha) \quad (16)$$

Donde: $x_i =$ brazo de rotación de la fuerza del imán [m]

$\alpha =$ ángulo de inclinación [°]

Momentos generados en la basculación

Los momentos generados durante la basculación por la interacción entre las fuerzas del agua acumulada, el peso propio del balancín y el peso del imán, se analizan detalladamente para asegurar un equilibrio dinámico delicado y altamente sensible. Esto permite que pequeñas cantidades de agua sean medidas con precisión, generando resultados confiables y repetibles.

El equilibrio de fuerzas se rige bajo el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} \sum M_o &= 0 \\ -F_b \cos(\alpha) \frac{A}{2} - 2F_l \left(\cos(\alpha) \frac{A}{3} - \text{sen}(\alpha) \frac{B}{3} \right) + F_d \text{sen}(\alpha) \frac{B}{2} \\ &+ 2F_l \left(\cos(\alpha) \frac{A}{3} + \text{sen}(\alpha) \frac{B}{3} \right) \\ + F_b \cos(\alpha) \frac{A}{2} - F_a \left(\cos(\alpha) \frac{a}{3} - \text{sen}(\alpha) \frac{b}{3} \right) - F_i \text{sen}(\alpha) \times B &= 0 \end{aligned}$$

Simplificando nos queda que:

$$4 \times F_l \text{sen}(\alpha) \frac{B}{3} + F_d \text{sen}(\alpha) \frac{B}{2} - \frac{F_a}{3} (\cos(\alpha) \times a - \text{sen}(\alpha) \times b) - F_i \text{sen}(\alpha) \times B = 0 \quad (17)$$

Se desarrollan relaciones matemáticas específicas para determinar con precisión las dimensiones óptimas.

Primera relación:

$$\text{sen} \alpha = \frac{h}{a}$$

Donde: $h =$ altura vertical hasta el nivel de agua

$$h = \operatorname{sen} \alpha \times a \quad (18)$$

Segunda relación:

$$\cos \alpha = \frac{h}{b}$$

$$b = \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} \times a = \operatorname{tg} \alpha \times a \quad (19)$$

Sustituimos en el volumen de diseño que es 5,6 ml

$$5,6 \times 10^{-6} = \frac{a \times b \times C}{2};$$

$$11,2 \times 10^{-6} = a \times b \times C;$$

$$11,2 \times 10^{-6} = a^2 \times \operatorname{tg} \alpha \times C;$$

$$a = \sqrt{\frac{11,2 \times 10^{-6}}{C \times \operatorname{tg} \alpha}} \quad (20)$$

Al sustituir los valores iniciales de volumen y dimensiones asumidas ($A=0,045$ m, $B=0,045$ m, $C=0,035$ m, $\alpha=30^\circ$) en las ecuaciones (19) y (20) tenemos:

$$a = \sqrt{\frac{11,2 \times 10^{-6}}{0,035 \times \operatorname{tg}(30)}} = 2,36 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$b = \operatorname{tg}(30) \times 2,36 \times 10^{-2} = 1,36 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Se obtienen ecuaciones finales que permiten confirmar y validar estas dimensiones como óptimas para el funcionamiento estable del instrumento.

Reemplazando en la ecuación (17) tenemos:

$$\begin{aligned} & 4 \times 5,79 AB - 0,5 \frac{B}{3} + 11,58 \times BC - \frac{B}{2} \\ & - \frac{5,6 \times 10^{-2}}{3} (0,87 \times 2,36 \times 10^{-2} - 0,5 \times 1,36 \times 10^{-2}) \\ & - 6,16 \times 10^{-3} \times 0,5B = 0 \\ & 0,17 \times B^2 + 0,10 \times B^2 - 2,49 \times 10^{-4} + 3,08 \times 10^{-3}B = 0 \\ & 0,27 \times B^2 + 3,08 \times 10^{-3} \times B - 2,49 \times 10^{-4} = 0 \\ & B = 0,030 \text{ m} \end{aligned}$$

3.1.1.3 Resumen de dimensiones

A partir del análisis estático completo, las dimensiones recomendadas para la fabricación y operación eficiente del pluviógrafo son las siguientes:

- Dimensión A: 0,045 m
- Dimensión B: 0,030 m
- Dimensión C: 0,040 m
- Ángulo α : 30°

3.1.2 Modelación en 3D

Con base en las dimensiones obtenidas mediante cálculos manuales, se desarrolló el diseño de una cuchara basculante, considerando aspectos esenciales para garantizar el correcto funcionamiento del balancín. Durante el proceso de diseño se incorporaron espacios específicos para alojar el imán de neodimio y se incluyeron espaciadores que minimizan el rozamiento, evitando así interferencias en el movimiento del balancín.

Además, se prestó especial atención a la geometría del componente, evitando esquinas que pudieran generar tensión superficial. Esta estrategia busca reducir el volumen de líquido adherido a la superficie, lo que puede influir negativamente en el comportamiento dinámico del sistema.

3.1.2.1 Criterio de modelación

El gráfico o modelo en SolidWorks representa la integración de todos los componentes críticos. Cada parte (balancín, imán y agua) ha sido modelada con precisión, lo que permite observar de forma detallada la interacción entre ellos. La figura ilustra no solo la disposición espacial, sino también las áreas de contacto y los márgenes de separación, aspectos clave para evitar rozamientos excesivos y concentraciones de tensión.

A partir de las consideraciones mencionadas, se logró desarrollar el modelo del balancín tal como se muestra en la figura 3.1.

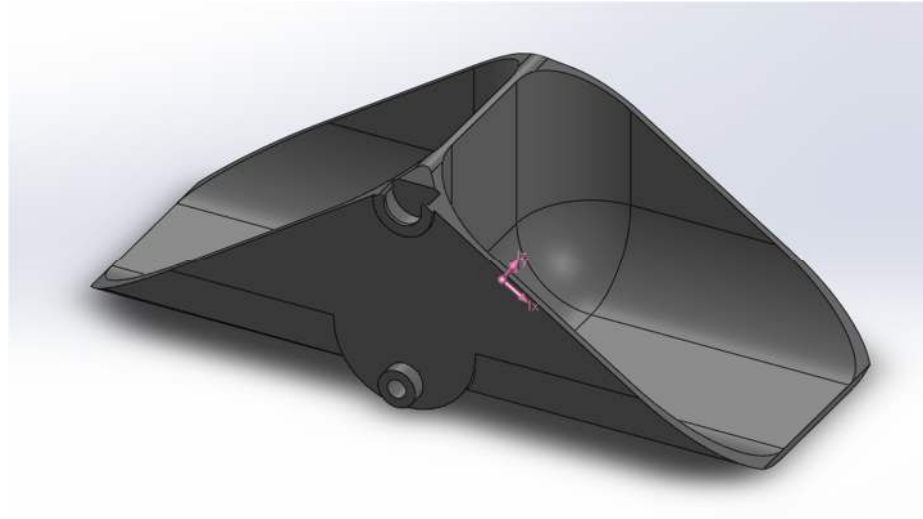


Figura 3.6 Diseño del balancín

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software SolidWorks 2024

En el mismo entorno se modelaron:

- El volumen de agua de diseño: Se evaluó su comportamiento en función de la geometría del balancín como se muestra en la figura 3.3.
- El imán de neodimio: Dado que sus fuerzas influyen directamente en el proceso de basculación, su modelado es fundamental.

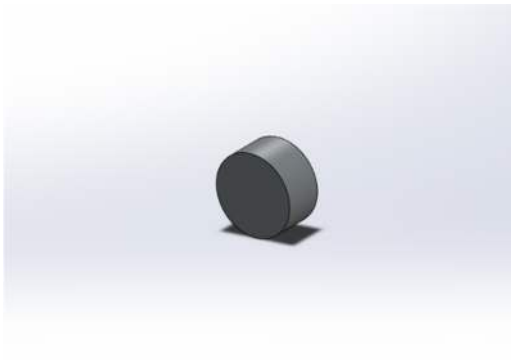


Figura 3.7 Diseño del imán de neodimio

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software SolidWorks 2024

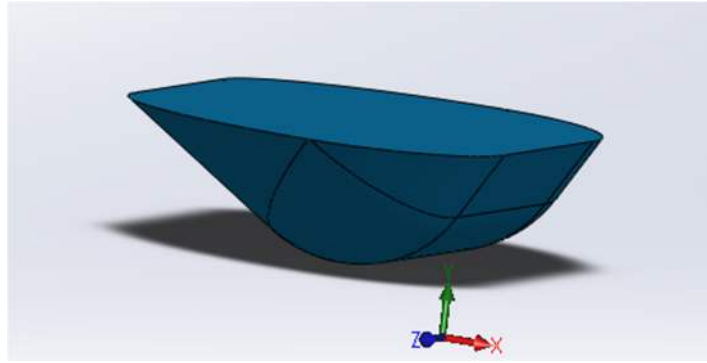


Figura 3.8 Diseño del volumen de agua

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software SolidWorks 2024

Desde SolidWorks se extrajeron las propiedades físicas esenciales de cada componente, necesarias para realizar un análisis estático que confirme la viabilidad del proceso de basculación o volcamiento del sistema. Los parámetros fundamentales considerados son el volumen y la densidad de cada componente, lo que permite calcular la masa y, a partir de ella, la fuerza de cada elemento.

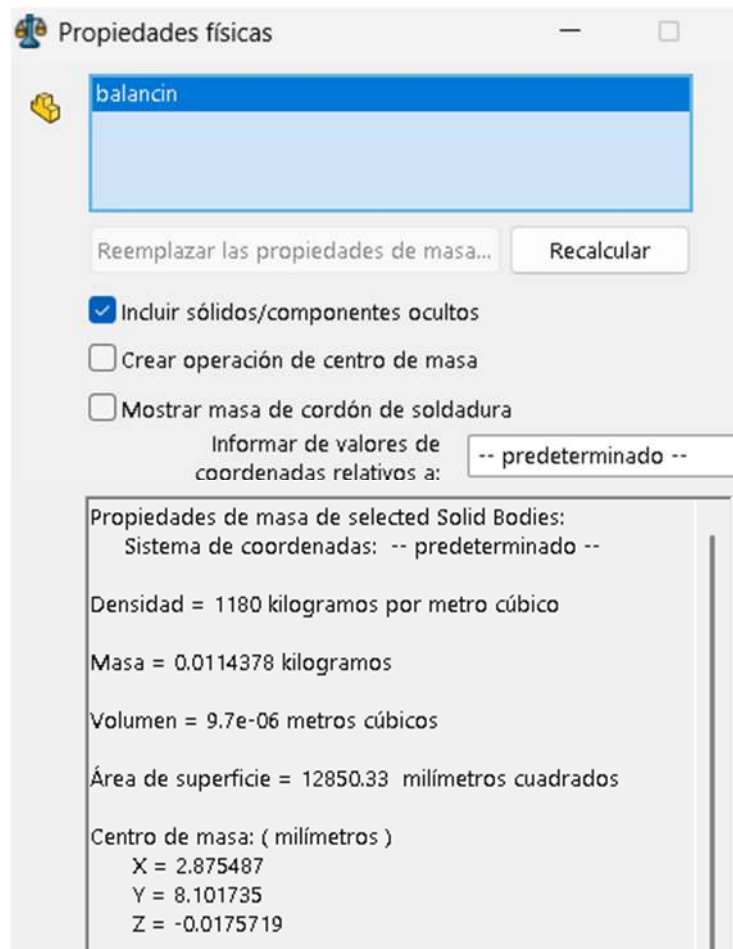


Figura 3.9 Entorno propiedades físicas

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software SolidWorks 2024

La tabla 3.1 resume los parámetros físicos clave extraídos del modelo en SolidWorks.

Volumen: Indica el espacio ocupado por cada componente, lo cual es crítico para evaluar la distribución de masa en el sistema.

Densidad: Proporciona la información necesaria para calcular la masa total, esencial para determinar las fuerzas involucradas en el proceso de basculación.

Estos datos permiten realizar un análisis detallado, en el que se verifica que el diseño cumple con los requisitos para lograr una basculación efectiva.

Tabla 3.1 Resumen de parámetros físicos

Componente	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
Balancín	$9,69 \times 10^{-6}$	1180
Imán	$8,48 \times 10^{-8}$	7400
Agua	$5,60 \times 10^{-6}$	1000

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 Verificación de dimensiones

Para obtener una verificación más precisa del funcionamiento del sistema, se estableció un criterio de equilibrio de momentos. Este criterio consiste en igualar los momentos generados por las fuerzas resistentes a aquellos que inducen la basculación, variando el ángulo de trabajo del balancín hasta alcanzar la condición de equilibrio.

Fuerzas Resistentes

Son las que se opondrán al giro o basculación tales como el balancín, imán y un parámetro adicional que consideramos es una capa de barniz de 50 micras

Peso del balancín

$$F_b = V_b \times \rho_b \times g \quad (21)$$

Donde: F_b = fuerzas del balancín [N]
 V_b = volumen del balancín [m³]
 ρ_b = densidad de material compuesto por el balancín [kg/m³]
 g = gravedad [m/s²]

$$F_b = 9,69 \times 10^{-6} \times 1180 \times 9,81 = 1,12 \times 10^{-1} \text{ N}$$

Peso del imán

$$F_i = V_i \times \rho_i \times g \quad (22)$$

$$F_i = 8,48 \times 10^{-8} \times 7400 \times 9,81 = 6,16 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Donde: F_i = fuerzas del imán [N]
 V_i = volumen del imán [m³]
 ρ_i = densidad de material compuesto por el imán [kg/m³]
 g = gravedad [m/s²]

Peso capa de barniz

$$V_c = S_b \times e_c$$

Donde: V_c = volumen de la capa de barniz [m³]

S_b = superficie del balancín [m²]

e_c = espesor de la capa de barniz [m]

$$V_c = 1,29 \times 10^{-2} \times 5 \times 10^{-5} = 6,43 \times 10^{-7}$$

$$F_c = V_c \times \rho_c \times g \quad (23)$$

Donde: F_c = fuerzas de cada parte del balancín [N]

V_c = volúmenes propios de cada parte del balancín [m³]

ρ_c = densidad de material compuesto por el balancín [kg/m³]

g = gravedad [m/s²]

$$F_c = 6,43 \times 10^{-7} \times 880 \times 9,81 = 5,55 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Fuerzas que generan basculación o vuelco

La única fuerza que contribuye al giro es la generada por el peso del agua, definida a partir de su volumen de diseño (5,6 ml).

$$F_a = V_a \times \rho_a \times g \quad (24)$$

Donde: F_a = fuerza del agua [N]

V_a = volumen de agua [m³]

ρ_a = densidad del agua [kg/m³]

g = gravedad [m/s²]

$$F_a = 5,60 \times 10^{-3} \times 1000 \times 9,81 = 5,60 \times 10^{-2} \text{ N}$$

En la tabla 3.2 se integra los datos de densidad, volumen, masa y fuerza para cada componente del sistema, la comparación de estos valores permite evaluar la distribución de fuerzas y determinar la viabilidad del equilibrio necesario para la basculación.

Tabla 3.2 Parámetros finales de verificación

Parámetro	Unidad	Balancín	Capa barniz	Imán	Agua
Densidad	kg/m ³	1180	880	7400	1000
Volumen	m ³	9,69× 10 ⁻⁶	6,43× 10 ⁻⁷	8,48× 10 ⁻⁸	5,60× 10 ⁻⁶
Masa	kg	1,14× 10 ⁻²	5,65× 10 ⁻⁴	6,28× 10 ⁻⁴	5,60× 10 ⁻³
Fuerza	N	1,12× 10 ⁻¹	5,55× 10 ⁻³	6,16× 10 ⁻³	5,49× 10 ⁻²

Fuente: Elaboración propia

La ecuación en la que se rige el balancín es el siguiente

$$\begin{aligned}M_R &= M_B \\M_b + M_i + M_c &= M_a \\x_b \times F_b + x_i \times F_i + x_c \times F_c &= x_a \times F_a\end{aligned}\tag{25}$$

Donde: x_b, x_c, x_i y x_a = Representan los brazos de las fuerzas respectivas [mm]

M_b, M_c, M_i y M_a = Son los momentos individuales [N×mm]

El comportamiento del balancín se rige por una ecuación en la cual la variable principal es el brazo de cada fuerza respecto al eje de rotación. Este brazo varía conforme se modifica el ángulo de trabajo, permitiendo identificar el ángulo exacto de basculación en el que se alcanza el equilibrio.

El equilibrio se establece cuando el momento resistente (suma de los momentos de las fuerzas que oponen la basculación) es igual al momento basculante (momento generado por el peso del agua).

La tabla 3.3 muestra cómo varían los momentos en función del ángulo de basculación. Cada fila representa un conjunto de cálculos realizados para diferentes ángulos (por ejemplo, 32°, 30°, etc.).

Momento resistente (M_R): Se compone de las contribuciones individuales del balancín, la capa de barniz y el imán.

Momento basculante (M_B): Es el momento generado por el peso del agua, que actúa en contra de los momentos resistentes.

Se compara la suma de los momentos resistentes con el momento basculante en la tabla 3.5 para determinar el ángulo de equilibrio exacto, es decir, aquel en el que se produce la basculación de manera controlada. Esta representación permite visualizar claramente la interacción de las fuerzas y los momentos, y es fundamental para ajustar y optimizar el diseño del balancín.

Tabla 3.3 Momentos resistentes

Angulo aplicado (°)	Brazos de rotación (mm)			Momentos resistentes (N×mm)			Momento resistente final (N×mm)
α	xb	xc	xi	Mb	Mc	Mi	MR
32,00	2,88	2,88	12,98	$3,23 \times 10^{-1}$	$1,59 \times 10^{-2}$	$7,99 \times 10^{-2}$	$4,18 \times 10^{-1}$
30,00	2,71	2,71	12,25	$3,04 \times 10^{-1}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$7,54 \times 10^{-2}$	$3,95 \times 10^{-1}$
30,50	2,75	2,75	12,43	$3,09 \times 10^{-1}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$7,65 \times 10^{-2}$	$4,01 \times 10^{-1}$
30,20	2,73	2,73	12,32	$3,06 \times 10^{-1}$	$1,51 \times 10^{-2}$	$7,59 \times 10^{-2}$	$3,97 \times 10^{-1}$
30,10	2,72	2,72	12,29	$3,05 \times 10^{-1}$	$1,51 \times 10^{-2}$	$7,56 \times 10^{-2}$	$3,96 \times 10^{-1}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Momento basculante

Angulo aplicado (°)	Brazo de rotación (mm)	Momento basculante (N×mm)
α	$x\alpha$	M_B
32,00	6,55	$3,60 \times 10^{-1}$
30,00	7,27	$3,99 \times 10^{-1}$
30,50	7,08	$3,89 \times 10^{-1}$
30,20	7,19	$3,95 \times 10^{-1}$
30,10	7,22	$3,97 \times 10^{-1}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5 Equilibrio final de momentos

Momento resistente (N×mm)	Momento basculante (N×mm)
M_R	M_B
$4,18 \times 10^{-1}$	$3,60 \times 10^{-1}$
$3,95 \times 10^{-1}$	$3,99 \times 10^{-1}$
$4,01 \times 10^{-1}$	$3,89 \times 10^{-1}$
$3,97 \times 10^{-1}$	$3,95 \times 10^{-1}$
$3,96 \times 10^{-1}$	$3,96 \times 10^{-1}$

Fuente: Elaboración propia

3.2 Programación

3.2.1 Diseño y montaje del circuito

Esta fase consiste en el diseño esquemático del sistema electrónico utilizando el software Fritzing, el cual proporciona una plataforma gráfica para la creación de diagramas de circuitos. Se parte por la identificación y selección de los componentes clave del sistema: microcontrolador ESP32, módulo SD, reloj de tiempo real (RTC), sensor de efecto Hall, y cables de conexión.

Los componentes se posicionan en el área de trabajo del software, respetando una disposición lógica y ordenada. Posteriormente, se establecen las conexiones eléctricas siguiendo el siguiente criterio: el pin de señal del sensor de lluvia se vincula a una entrada analógica del ESP32, mientras que la alimentación (VCC) y tierra (GND) se conectan a los pines correspondientes del microcontrolador. Este mismo procedimiento se replica para los demás módulos, asegurando compatibilidad de niveles de voltaje y evitando conflictos entre periféricos. El sensor magnético se conecta al pin GPIO4 del ESP32. El módulo RTC Tiny conecta sus líneas SDA y SCL a los pines GPIO21 y GPIO22 respectivamente, utilizando protocolo I2C. El lector de microSD utiliza comunicación SPI con los pines GPIO18 (CLK), GPIO19 (MISO), GPIO23 (MOSI) y GPIO5 (CS).

Al concluir el diseño, se exporta la imagen del esquema como referencia para el montaje físico, asegurando una implementación estructurada y libre de errores de conexonado.

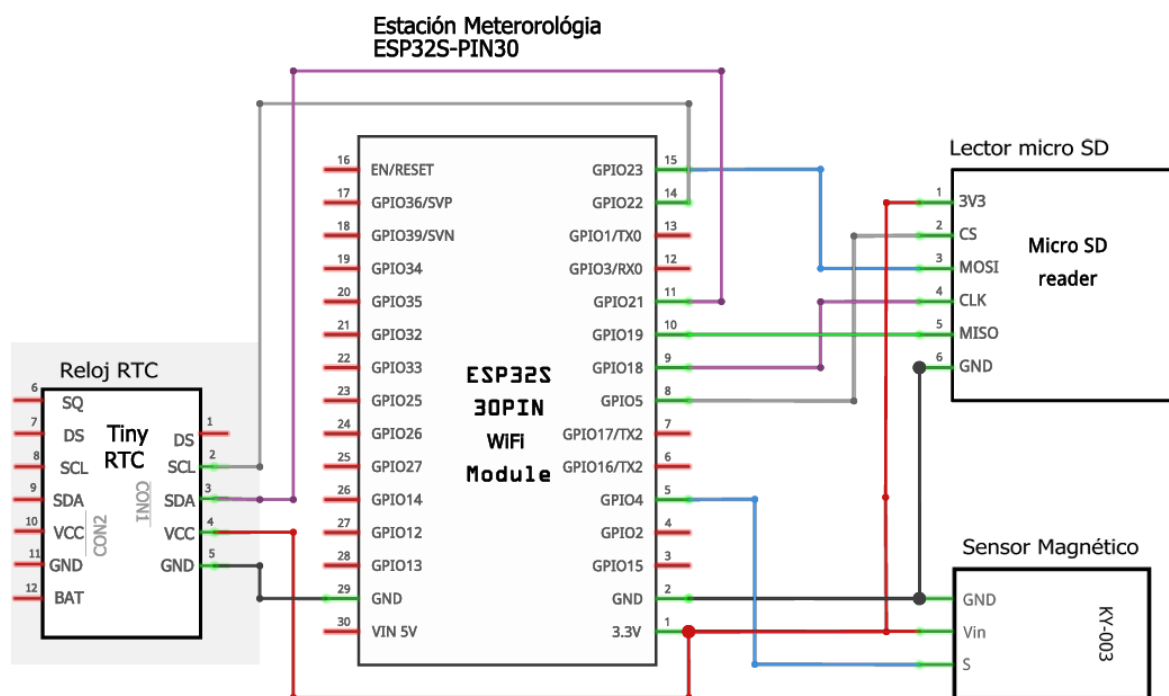


Figura 3.10 Esquematzación de conexiones

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software Fritzing

El montaje físico del sistema se realiza sobre una protoboard, replicando el diseño previamente realizado en Fritzing. Es fundamental seguir un orden sistemático: primero conectar la ESP32, luego incorporar los sensores y módulos periféricos, y finalmente establecer la alimentación.

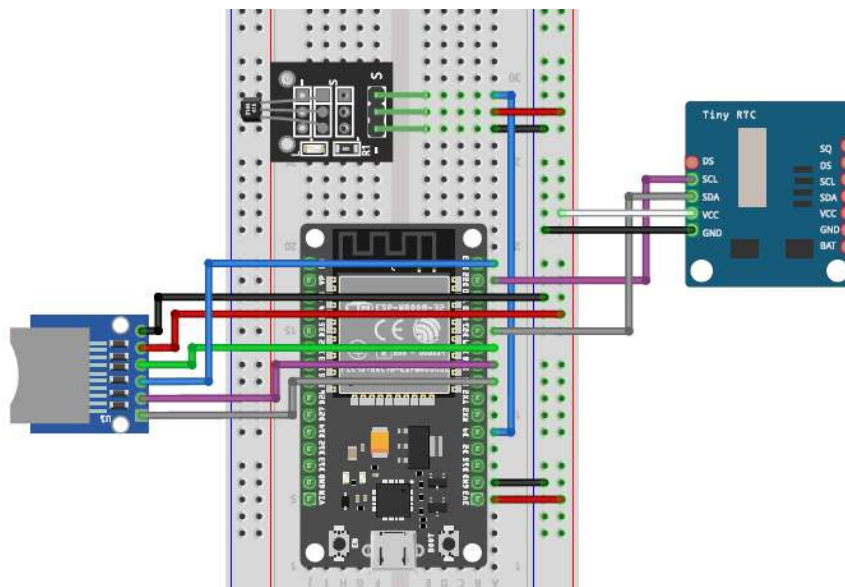


Figura 3.11 Placa de prototipos de conexiones

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software Fritzing

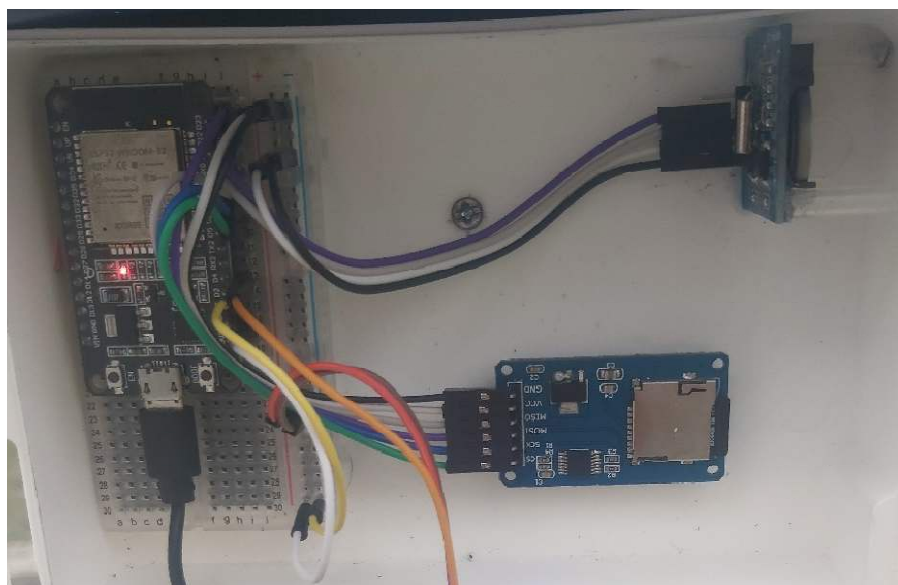


Figura 3.12 Montaje físico de componentes

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen tomada de prototipo instalado

Durante el ensamblaje, se verifico las conexiones con un multímetro para evitar cortocircuitos o errores de cableado. También consideramos seguir el código de colores usado en la esquematización y asegurar mecánicamente los módulos más sensibles.

3.2.2 Diagrama y programación

El diagrama de flujo del sistema refleja la lógica operativa del código implementado en la ESP32. Este comienza con la inicialización de los periféricos: RTC, sensor de efecto Hall, sensor de lluvia, módulo SD y conexión Wi-Fi. Luego, se ejecuta un bucle principal que es el siguiente:

El programa inicia leyendo la causa del despertar del ESP32:

- Si se activa por temporizador (cada 5 minutos), se registra un valor de 0 mm de lluvia.
- Si se activa por el sensor (cambio en el estado del sensor Hall), el sistema cuenta los pulsos durante 30 segundos.

Luego, genera y guarda un reporte en la tarjeta SD, conecta a WiFi y envía los datos a la plataforma ThingSpeak. Posteriormente entra en modo de bajo consumo (Deep Sleep), esperando el siguiente evento.

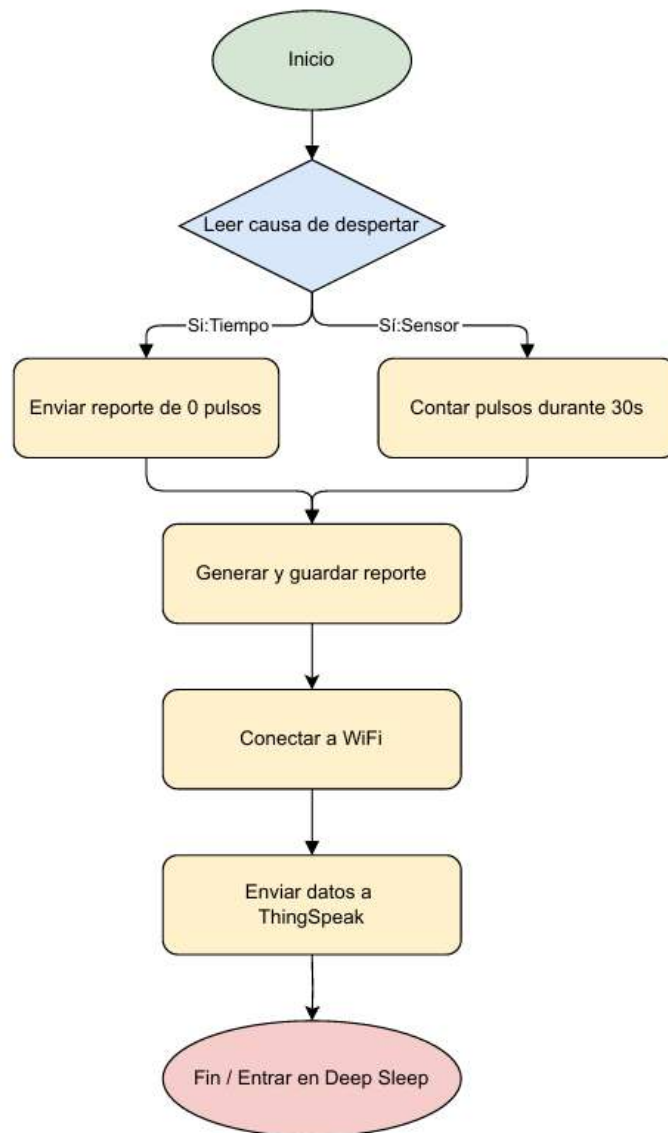


Figura 3.13 Diagrama de flujo

Fuente: Elaboración propia

La programación del sistema se lleva a cabo en Arduino IDE, configurando previamente el entorno para soportar la placa ESP32 mediante la instalación del paquete de tarjetas adecuado. Posteriormente, se desarrollan rutinas que permitan la interacción con cada componente del hardware.

En el caso del sensor de efecto Hall, se configura una interrupción digital que detecta cada evento generado por el mecanismo de balde de volteo, permitiendo llevar un conteo preciso de la cantidad de precipitación acumulada. Cada pulso representa un volumen específico de agua, determinado durante la calibración del sistema.

La incorporación del módulo RTC permite añadir a cada lectura una marca temporal precisa. Esto es fundamental para la trazabilidad de los datos y para su análisis posterior. Los valores de fecha y hora se obtienen mediante librerías como RTCLib, y se incluyen en el conjunto de datos almacenado.

Simultáneamente, se programan rutinas para escribir en la tarjeta SD. Se emplea un formato de archivo txt para facilitar la posterior manipulación de datos, por ejemplo, en hojas de cálculo. Cada registro incluye el valor de precipitación detectado, el conteo del sensor Hall y la hora correspondiente.

Además, se desarrolla una rutina de conexión a red Wi-Fi, que permite el envío periódico de los datos a la plataforma Thingspeak. Esta transmisión requiere la configuración de una clave de API para autenticar la solicitud. En Thingspeak, los datos pueden visualizarse mediante gráficos en tiempo real, establecer umbrales, y generar análisis avanzados mediante MATLAB integrado.

Este enfoque integral en la programación no solo asegura el almacenamiento local redundante y la visualización remota, sino que también sienta las bases para futuras expansiones del sistema.

Se configura el entorno para trabajar con placas ESP32 y se desarrollan funciones específicas:

- Interrupción en el pin del sensor para contar pulsos.
- Lectura del RTC mediante la librería RTCLib.
- Escritura de datos en la tarjeta microSD en formato semicolon-separated (CSV-like).
- Envío de datos a ThingSpeak a través de WiFi utilizando la API correspondiente.

Cada pulso detectado se traduce en una cantidad fija de precipitación (0,1 mm). La lectura de la hora garantiza trazabilidad y registro histórico preciso.

A continuación, se presenta el código, pero una versión condensada:

```
INICIO
RTC_DS1307 rtc;
WiFiClient cliente;
volatile int ISRContador = 0;
```

```

void IRAM_ATTR onPulse() { ISRContador++; }
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    rtc.begin(); SD.begin(5);
    pinMode(SENSOR, INPUT_PULLUP);
    if (esp_sleep_get_wakeup_cause() == ESP_SLEEP_WAKEUP_EXT0) {
        attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR), onPulse, FALLING);
        delay(30000); // 30 segundos contando lluvia
    }
    float mm = ISRContador * 0.1;
    File f = SD.open("/datalog.txt", FILE_APPEND);
    if (f) {
        DateTime now = rtc.now();
        f.printf("0.1fmm\n",
                now.year(), now.month(), now.day(), now.hour(), now.minute(),
mm);
        f.close();
    }
    WiFi.begin("Humanidades-WiFi", "Fachum123");
    if (WiFi.waitForConnectResult() == WL_CONNECTED) {
        ThingSpeak.begin(cliente);
        ThingSpeak.setField(1, mm);
        ThingSpeak.writeFields(2608955, "Y8HKS85T5J6B2MCP");
        WiFi.disconnect(true);
    }
    esp_sleep_enable_timer_wakeup(5 * 60 * 1000000);
    esp_sleep_enable_ext0_wakeup((gpio_num_t)SENSOR, 0);
    esp_deep_sleep_start();
}
void loop()
{}
FIN

```

Con el sistema ensamblado y programado, se realizan pruebas funcionales para validar su comportamiento. Estas incluyen la verificación de la lectura de sensores bajo condiciones simuladas de lluvia, la integridad de los datos almacenados en la tarjeta SD, la correcta

obtención de la fecha y hora desde el RTC, y la transmisión efectiva de datos hacia Thingspeak.

Durante esta etapa, se realizó en conjunto con la calibración dinámica que se desarrolla posteriormente, como establecer la cantidad de mililitros equivalentes a cada pulso detectado por el sensor de efecto Hall. También se evalúa la estabilidad de la conexión Wi-Fi y la eficiencia energética del sistema, especialmente si está alimentado por baterías.

3.2.3 Visualización de datos

La visualización remota de los datos se implementa mediante la plataforma IoT Thingspeak, que permite recibir, almacenar y graficar datos en tiempo real. El ESP32 se conecta a una red Wi-Fi y envía los valores de precipitación registrados a intervalos definidos.

Se configura una clave de API que autentica el canal de comunicación entre el microcontrolador y el servidor de Thingspeak. Una vez en la plataforma, se pueden generar gráficos, establecer alertas, e incluso analizar tendencias mediante herramientas de MATLAB integradas.

Esto brinda al sistema capacidades avanzadas de monitoreo y facilita la presentación de resultados a terceros o en entornos académicos y de investigación.

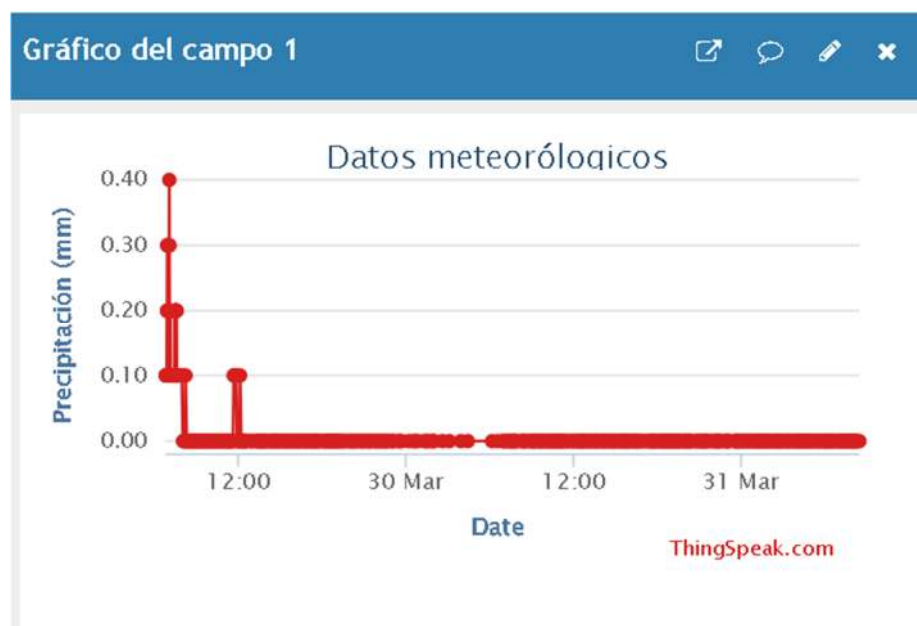


Figura 3.14 Visualización ThingSpeak

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída desde la plataforma de Thingspeak

3.3 Calibración estática

La Organización Meteorológica Mundial reconoce el uso de pluviómetros de cubeta basculante y establece directrices específicas para su calibración y mantenimiento. En el documento proporcionado, se detallan los procedimientos a seguir según el propósito del pluviómetro en cuestión, diferenciando entre aquellos utilizados para la medición de la cantidad total de precipitación y aquellos destinados al análisis de la intensidad de la precipitación. Esta última categoría es de especial interés para usuarios que requieren interpretar patrones de lluvia, modelar eventos hidrometeorológicos y realizar pronósticos climáticos.

3.3.1 Materiales y procedimiento

Para el pluviómetro analizado en este trabajo, se seguirá el procedimiento de calibración recomendado por la OMM enfocado en la medición de la cantidad de precipitación. Adicionalmente, la organización sugiere realizar calibraciones de mantenimiento de forma periódica. Estas calibraciones consisten en comparar las mediciones registradas por el instrumento con la cantidad de agua recolectada en un recipiente cilíndrico graduado, tras la ocurrencia de un evento de precipitación.

La calibración se basa en verter un volumen conocido de agua a través del pluviómetro hasta la cubeta basculante, ajustando los mecanismos internos hasta garantizar que el cambio de posición de la cubeta se produzca con el volumen de agua de diseño. Durante la calibración, se registraron los siguientes parámetros ambientales y operativos:

Temperatura ambiente: 22 °C

Tipo de agua utilizada: Agua corriente

Temperatura del agua: 18 °C

Fecha y hora de la calibración: 21 de septiembre de 2024, a las 09:12 a. m.

Para la ejecución del procedimiento, se empleó una pipeta con capacidad de 10 ml, para la calibración del mecanismo se realizó mediante los tornillos de ajuste del pluviómetro, se realizaron un total de 25 mediciones por cubeta. Los resultados de estas mediciones se presentan en la tabla y se ilustran gráficamente en la figura El objetivo de este procedimiento es verificar la precisión del ajuste realizado, asegurando que el pluviómetro opere dentro de

los márgenes de error establecidos y ofrezca mediciones confiables en el monitoreo de la precipitación.

El procedimiento se basa en los siguientes puntos:

Instrumento auxiliar: Se utiliza una pipeta calibrada de 10 ml con una exactitud de 0,1 ml.

Dispensación de agua: El agua se añade gota a gota a través de la pipeta en el balancín del pluviómetro hasta que este vuelque.

Lectura del instrumento: La medición se realiza alineando el menisco con la marca correspondiente, colocando la pipeta a la altura de los ojos y evitando inclinarla.

Repetición de mediciones: Se realizan 25 mediciones en cada lado del balancín.

Análisis estadístico: Se calculan los siguientes parámetros para evaluar el comportamiento del balancín: Media (χ), desviación estándar (σ), coeficiente de variación (CV%), error absoluto (EA) y error relativo (%)

3.3.2 Resultados de la calibración

Tras la calibración del mecanismo mediante los tornillos de ajuste del pluviómetro, se realizaron un total de 25 mediciones por cubeta. Los resultados de estas mediciones se presentan en la tabla y se ilustran gráficamente en la figura El objetivo de este procedimiento es verificar la precisión del ajuste realizado, asegurando que el pluviómetro opere dentro de los márgenes de error establecidos y ofrezca mediciones confiables en el monitoreo de la precipitación.

Cubeta izquierda

Tabla 3.6 Resultados de calibración cubeta izquierda

No.	Volumen (ml)	$\pm$ Exactitud (ml)
1	5,6	0,1
2	5,65	0,1
3	5,6	0,1
4	5,55	0,1
5	5,6	0,1
6	5,6	0,1
7	5,6	0,1

8	5,6	0,1
9	5,75	0,1
10	5,6	0,1
11	5,75	0,1
12	5,65	0,1
13	5,65	0,1
14	5,65	0,1
15	5,65	0,1
16	5,6	0,1
17	5,6	0,1
18	5,55	0,1
19	5,6	0,1
20	5,55	0,1
21	5,55	0,1
22	5,55	0,1
23	5,5	0,1
24	5,55	0,1
25	5,55	0,1

Fuente: Elaboración propia

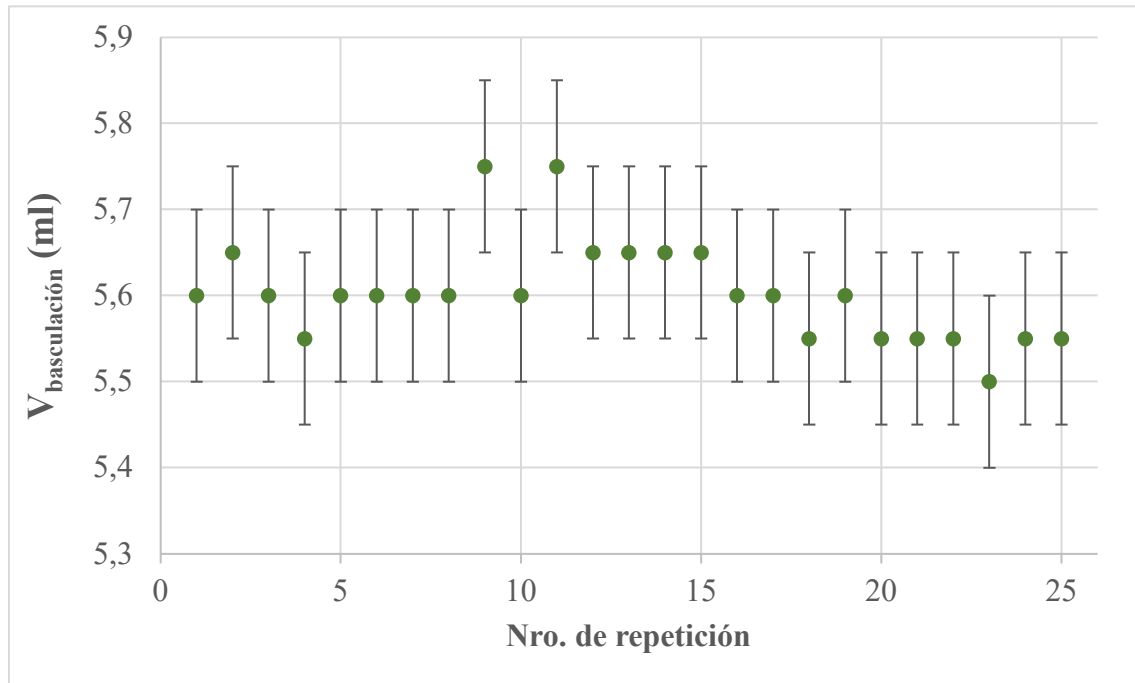


Figura 3.15 Resultados calibración cubeta izquierda

Fuente: Elaboración propia

Cubeta derecha

Tabla 3.7 Resultados de calibración cubeta derecha

No.	Volumen (ml)	$\pm$ Exactitud (ml)
1	5,75	0,1
2	5,5	0,1
3	5,6	0,1
4	5,65	0,1
5	5,6	0,1
6	5,6	0,1
7	5,5	0,1
8	5,65	0,1
9	5,65	0,1
10	5,6	0,1

11	5,65	0,1
12	5,55	0,1
13	5,6	0,1
14	5,6	0,1
15	5,6	0,1
16	5,6	0,1
17	5,55	0,1
18	5,55	0,1
19	5,45	0,1
20	5,6	0,1
21	5,45	0,1
22	5,6	0,1
23	5,55	0,1
24	5,55	0,1
25	5,5	0,1

Fuente: Elaboración propia

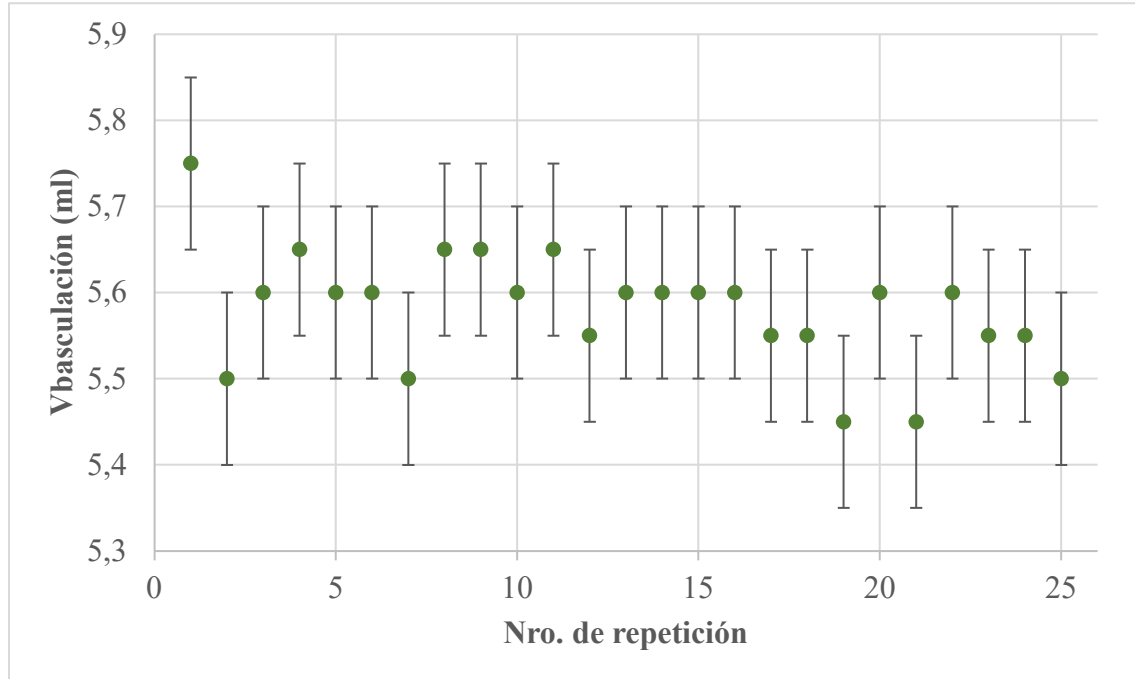


Figura 3.16 Resultados calibración cubeta derecha

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Parámetros estadísticos

Se utilizo las siguientes fórmulas para el análisis de estadísticos:

Media ($\bar{x}$)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

Donde: x_i = valor medido

n = cantidad de mediciones

Desviación Estándar (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

Donde: x_i = valor medido
 n = cantidad de mediciones

Coefficiente de variación (CV)

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right) \times 100 \quad (28)$$

Error Absoluto (EA)

$$EA = |\bar{x} - x_{\text{real}}| \quad (29)$$

Donde: x_{real} = valor teórico

Error Relativo (ER)

$$ER \% = \left(\frac{EA}{x_{\text{real}}} \right) \times 100 \quad (30)$$

Donde: x_{real} = valor teórico

Resumen de estadísticos

A continuación, se muestra en tabla, los estadísticos hallados y como estos nos ayudan a evaluar la repetibilidad y confiabilidad de las mediciones, y los rangos de aceptabilidad típicos en la evaluación meteorológica.

Tabla 3.8 Resumen de parámetros estadísticos

Parámetro	Izquierda	Derecha	Aceptabilidad	Conclusión
Media	5,60	5,58	$V_{\text{diseño}}=5,6 \text{ ml}$	Aceptable
Desviación Estándar	0,06	0,07	$\sigma \leq 0,1$	Aceptable
Coefficiente de variación	1,06	1,21	$CV \leq 2\%$	Aceptable
Error Absoluto	0,01	0,01	$EA \leq 0,1$	Aceptable
Error Relativo	0,25	0,18	$ER \leq 1\%$	Aceptable

Fuente: Elaboración propia

3.4 Calibración dinámica

3.4.1 Materiales y procedimiento

Materiales utilizados:

Para realizar una calibración precisa del comportamiento de los pluviómetros tipo balancín frente a distintas intensidades de lluvia, se diseñó un sistema experimental cuidadosamente controlado. Este montaje permitió simular diferentes tasas de precipitación en condiciones estables y reproducibles, asegurando mediciones confiables que sirvieran de base para desarrollar correcciones al diseño planteado inicialmente.

Plataforma de soporte y ajuste (A)

La estructura de soporte permite estabilidad mecánica y permitía un ajuste en la inclinación de tal manera esta represente su puesta en funcionamiento final mediante el uso de un nivel ojo de buey. Esto permitió simular con precisión la posición de trabajo del pluviómetro en campo.

Sistema de suministro de agua (B)

El agua provenía de un depósito elevado que mantenía una presión constante gracias al uso de una bomba sumergible auxiliar (flujo máx.=240 l/h) encargada de mantener el nivel en el recipiente principal.

El agua se entregaba al pluviómetro mediante un soporte metálico instalada sobre un brazo ajustable. Esta disposición permitía reproducir la forma en que el agua caería desde el embudo del instrumento en condiciones reales.

Control del caudal (C)

Se adaptó un equipo de suero donde un tornillo de sujeción de precisión actúa como regulador de flujo, lo que permitía ajustar la intensidad simulada de lluvia desde valores muy bajos (8 mm/h) hasta eventos extremos (300 mm/h).

Esta precisión fue crucial para garantizar que el flujo de agua se mantuviera estable durante toda la medición.

Instrumentos de medición y adquisición de datos (D)

Se utilizó una balanza de laboratorio (Balanza de precisión Adventurer™ de alta capacidad), con resolución de 0,1 g, que permitía detectar con gran exactitud la cantidad de agua vertida en cada segundo en el balancín.

Para el seguimiento y extracción de masas se procedió a la instalación de una cámara y con una filmación pudimos analizar el comportamiento dinámico del instrumento, pudiendo extraer datos de forma sincronizada con los vuelcos con una precisión de milisegundos.

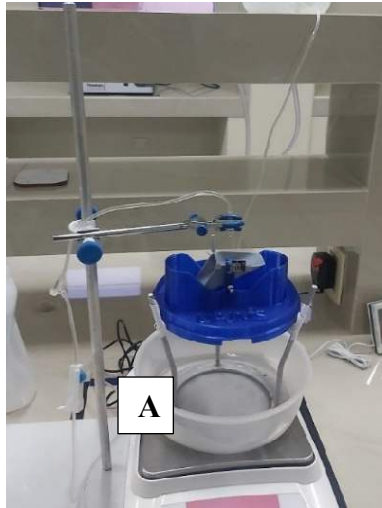


Figura 3.17 Estructura de soporte (A)

Fuente: Elaboración propia

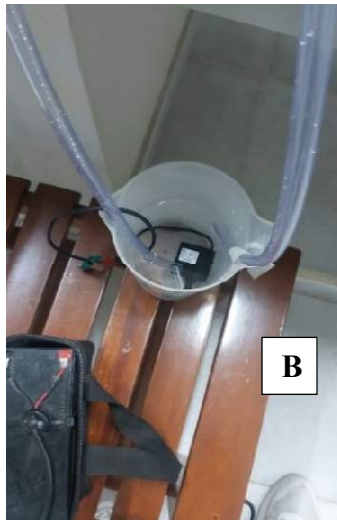


Figura 3.18 Sistema de suministro de agua (B)

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.19 Sistema de simulación de lluvia

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento para mantener intensidades constantes durante la calibración:

Simulación de intensidades de lluvia

Variando el tornillo de control de caudal, se simularon diferentes tasas de precipitación que generaron intervalos de vuelco de flujo bajo y de flujo muy alto.

Se realizaron con intensidades distintas, y en cada una se tomaron mediciones consecutivas para obtener datos confiables y estadísticamente representativos.

Las intensidades generadas se basan en intervalos de 20 segundos, llegando a alcanzar intensidades fuertes o extremas de como máxima 297 mm/h

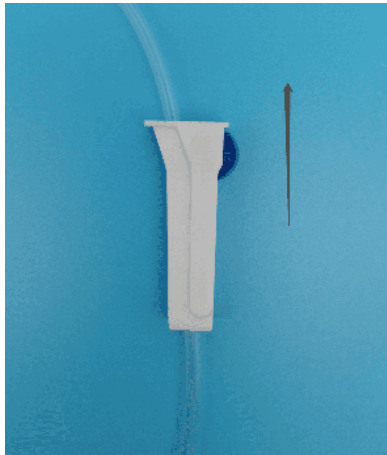


Figura 3.20 Regulación de flujo(D)

Fuente: Elaboración propia

Estabilidad del flujo hidráulico

La presión constante proporcionada por la bomba evitó fluctuaciones en el flujo de agua.

La ubicación fija de la aguja dispensadora aseguró que las condiciones de entrada de agua al balancín fueran siempre iguales.

Esto permitió mantener una intensidad de simulación constante durante cada serie de pruebas.



Figura 3.21 Principio de estabilización de flujo

Fuente: Elaboración propia

Medición y análisis del volumen vertido

Cada 20 segundos se extrajo la masa que fue pesado con la balanza de precisión, para posterior convertirlos en cantidad de precipitación.

Los valores de volumen se relacionaron con los intervalos entre vuelcos para construir una gráfica de calibración dinámica que reflejara cómo se maneja el instrumento a diferentes intensidades de lluvia, y poder corregir la misma.



Figura 3.22 Valores de la balanza de precisión

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Rangos de calibración

Con el objetivo de establecer criterios técnicos adecuados para la calibración de sensores pluviométricos automáticos, se realizó un análisis de las intensidades de precipitación registradas en estaciones automáticas del departamento de Tarija durante los años 2023 y 2024. Estas estaciones proporcionan datos con alta resolución temporal que permiten calcular la intensidad horaria de la precipitación, un parámetro clave en el estudio de eventos hidrometeorológicos extremos y en el diseño de infraestructura de drenaje.

El valor máximo registrado correspondió a la estación Trancas en 2023, con una intensidad de 71,2 mm/h. La Tabla 3.9 resume los valores máximos observados de precipitación e intensidad horaria en las estaciones consideradas para ambos años.

Tabla 3.9 Intensidades máximas durante el 2023 - 2024

Estación	2023		2024	
	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)
Trancas	17,8	71,2	11	44
Canasmoro	13,4	53,6	10,2	40,8
Rejara	10,6	42,4	12,8	51,2
Junacas	13	52	10,2	40,8
Calderillas	11,6	46,4	11,2	44,8
San Lorenzo	15,2	60,8	9,2	36,8

Fuente: Elaboración propia

Nota: Elaborado a partir de información proporcionada por la OTN

Si bien los datos analizados corresponden a registros observacionales directos, su representatividad estadística es limitada debido al corto periodo de monitoreo, lo cual impide una estimación de extremos hidrológicos, estos valores deben considerarse como una línea base referencial y no como límites definitivos para la configuración de los instrumentos de medición.

La literatura especializada y experiencias internacionales reportan que, durante eventos meteorológicos extremos, como los asociados al fenómeno El Niño, pueden registrarse intensidades superiores a los 300 mm/h, e incluso en algunos casos valores mayores a 500 mm/h. Este tipo de eventos, aunque infrecuentes, presentan una amenaza significativa en términos de riesgo hídrico e impacto en infraestructura y poblaciones vulnerables, resulta imperativo que los equipos de medición estén calibrados para registrar correctamente intensidades en un amplio rango, que abarque desde eventos típicos hasta extremos.

En función de este análisis y de las recomendaciones técnicas para sistemas de alerta y monitoreo hidrometeorológico, se determinó que el rango de calibración de los sensores debe extenderse hasta un máximo de 300 mm/h. Esta configuración no solo garantiza la captura fidedigna de eventos de alta intensidad sin que los sensores entren en saturación o presenten pérdida de datos, sino que también permite una mejor adaptación de los sistemas de medición a escenarios de cambio climático y variabilidad interanual.

Contar con equipos con esta capacidad de medición ampliada favorece su aplicabilidad en distintas regiones geográficas y climáticas, facilitando la estandarización de sistemas y el análisis comparativo entre cuencas, además se mejora la calidad de los insumos utilizados en la calibración de modelos hidrológicos, en el diseño de obras de drenaje urbano y en los planes de gestión de riesgos de desastres.

3.4.3 Resultados de la calibración

3.4.3.1 Primera lluvia simulada

Se realizaron 5 repeticiones cada una tiene una representatividad de datos de 12 durante cada una de las pruebas.

Prueba No. 1

Tabla 3.10 Primera lluvia simulada prueba nro. 1

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	270	299,62
2	270	299,62
3	270	300,91
4	270	300,91
5	288	300,91
6	270	300,59
7	270	300,27
8	270	301,23
9	288	300,91
10	270	300,59
11	270	301,23
12	270	301,55

Fuente: Elaboración propia

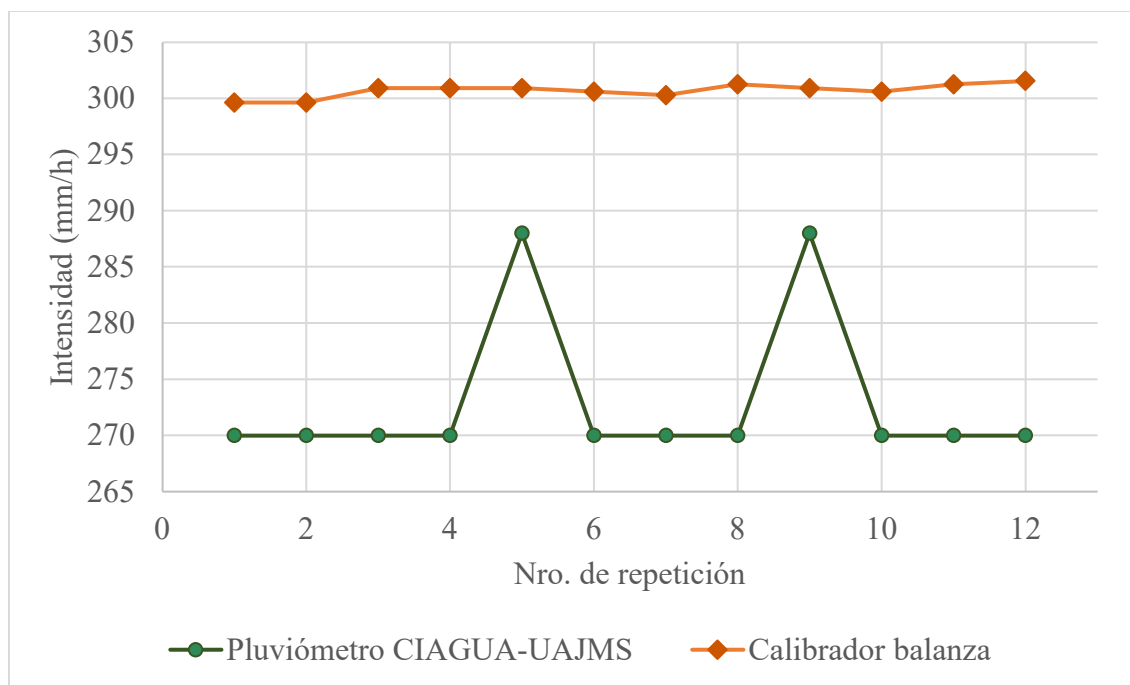


Figura 3.23 Primera lluvia simulada prueba nro. 1

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 2

Tabla 3.11 Primera lluvia simulada prueba nro. 2

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	270	297,37
2	270	296,09
3	288	296,73
4	270	297,05
5	270	296,73
6	270	296,73
7	270	296,73
8	270	296,09
9	252	296,09
10	270	296,73

11	252	296,41
12	270	297,37

Fuente: Elaboración propia

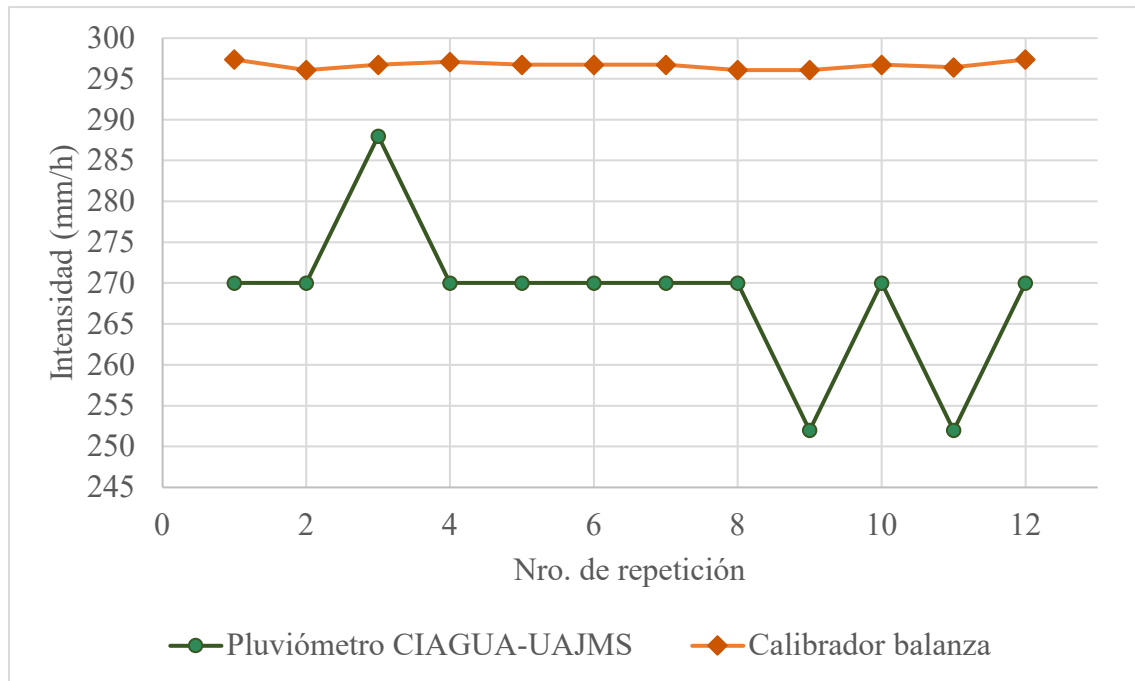


Figura 3.24 Primera lluvia simulada prueba nro. 2

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 3

Tabla 3.12 Primera lluvia simulada prueba nro. 3

No.	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Calibrador balanza (mm/h)
1	270	297,37
2	270	297,69
3	252	296,73
4	252	296,41
5	270	297,69
6	270	298,02

7	270	298,02
8	270	297,37
9	270	296,73
10	270	297,69
11	252	297,05
12	270	298,34

Fuente: Elaboración propia

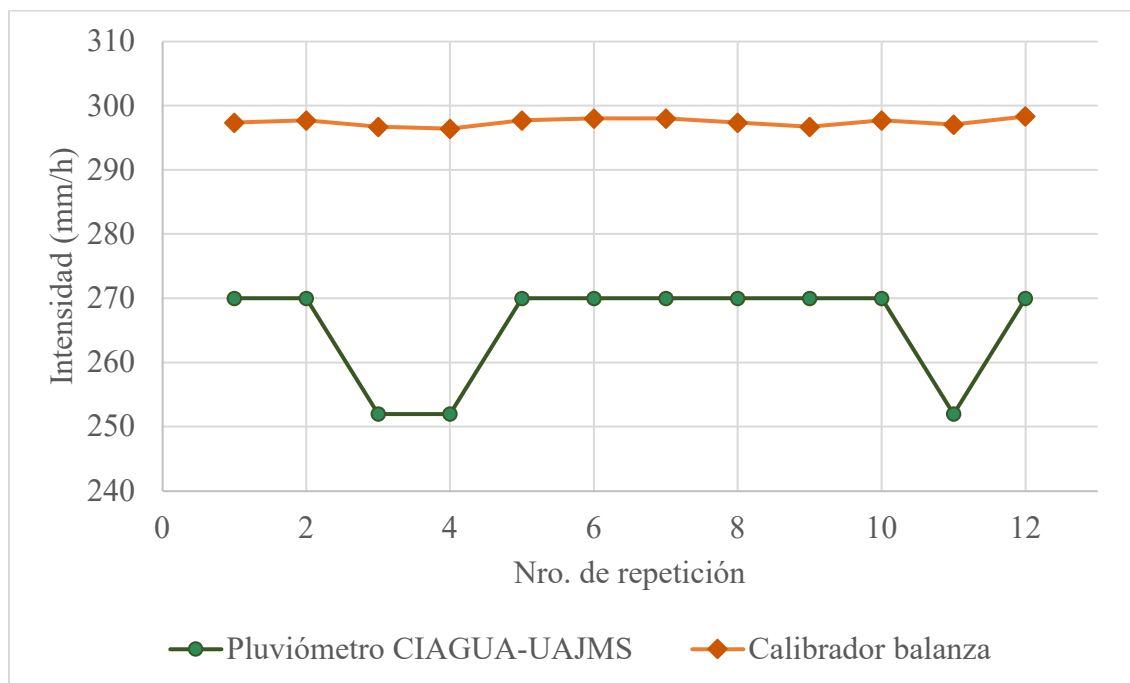


Figura 3.25 Primera lluvia simulada prueba nro. 3

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 4

Tabla 3.13 Primera lluvia simulada prueba nro. 4

No.	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Calibrador balanza (mm/h)
1	270	296,09
2	252	297,05

3	270	296,73
4	270	296,41
5	252	297,05
6	270	296,73
7	252	296,41
8	270	297,69
9	252	296,73
10	270	296,41
11	270	296,41
12	270	295,77

Fuente: Elaboración propia

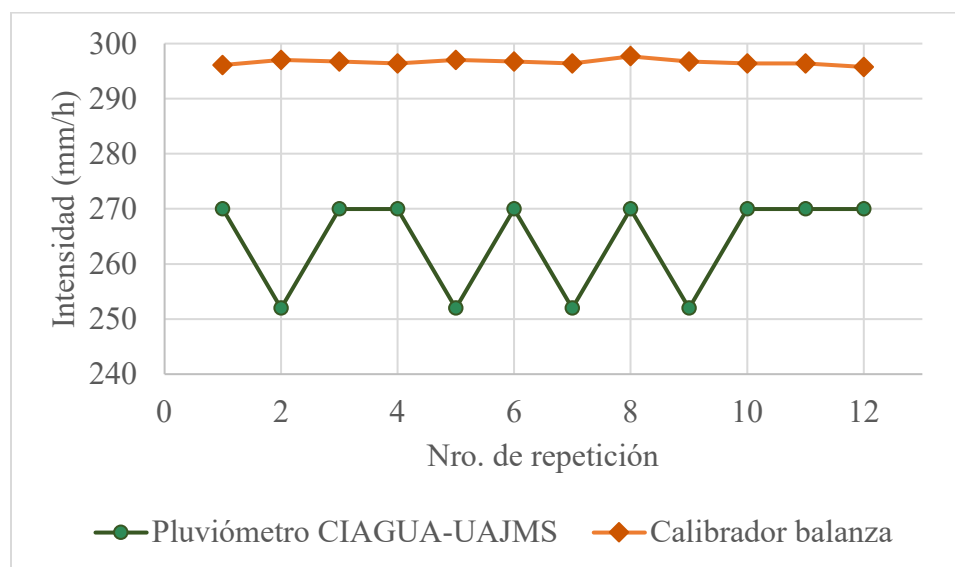


Figura 3.26 Primera lluvia simulada prueba nro. 4

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 5

Tabla 3.14 Primera lluvia simulada prueba nro. 5

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	270	297,69
2	270	297,37
3	252	297,69
4	270	298,02
5	270	297,37
6	270	297,69
7	252	297,05
8	270	297,37
9	270	297,69
10	252	298,34
11	270	298,34
12	270	298,98

Fuente: Elaboración propia

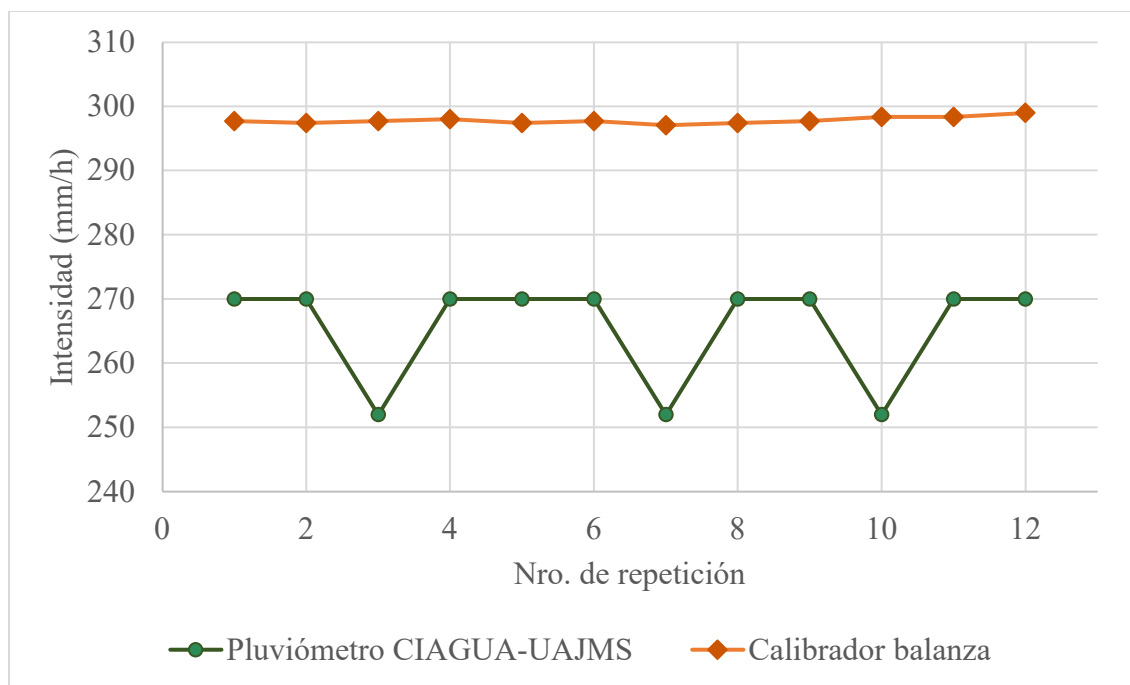


Figura 3.27 Primera lluvia simulada prueba nro. 5

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.2 Segunda lluvia simulada

Se realizaron 5 repeticiones cada una tiene una representatividad de datos de 18 durante cada una de las pruebas.

Prueba No. 1

Tabla 3.15 Segunda lluvia simulada prueba nro. 1

No.	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Calibrador balanza (mm/h)
1	198	221,82
2	198	222,15
3	198	222,15
4	198	223,11
5	198	222,15
6	198	222,79

7	198	221,82
8	198	222,15
9	216	223,11
10	198	222,15
11	198	222,47
12	198	222,79
13	198	222,15
14	198	222,79
15	198	222,79
16	198	222,47
17	198	222,47
18	216	223,11

Fuente: Elaboración propia

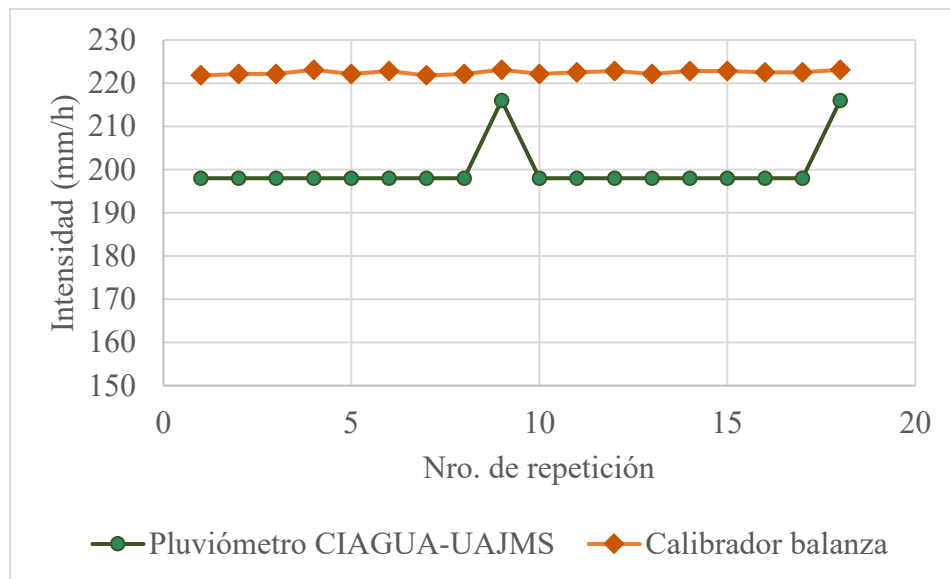


Figura 3.28 Segunda lluvia simulada prueba nro. 1

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 2**Tabla 3.16 Segunda lluvia simulada prueba nro. 2**

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	198	220,22
2	198	220,22
3	198	220,54
4	198	219,90
5	198	220,22
6	198	220,22
7	198	220,22
8	198	220,54
9	198	220,22
10	198	219,90
11	198	219,90
12	198	219,90
13	198	220,22
14	198	219,90
15	180	220,22
16	198	220,22
17	198	220,54
18	180	220,86

Fuente: Elaboración propia

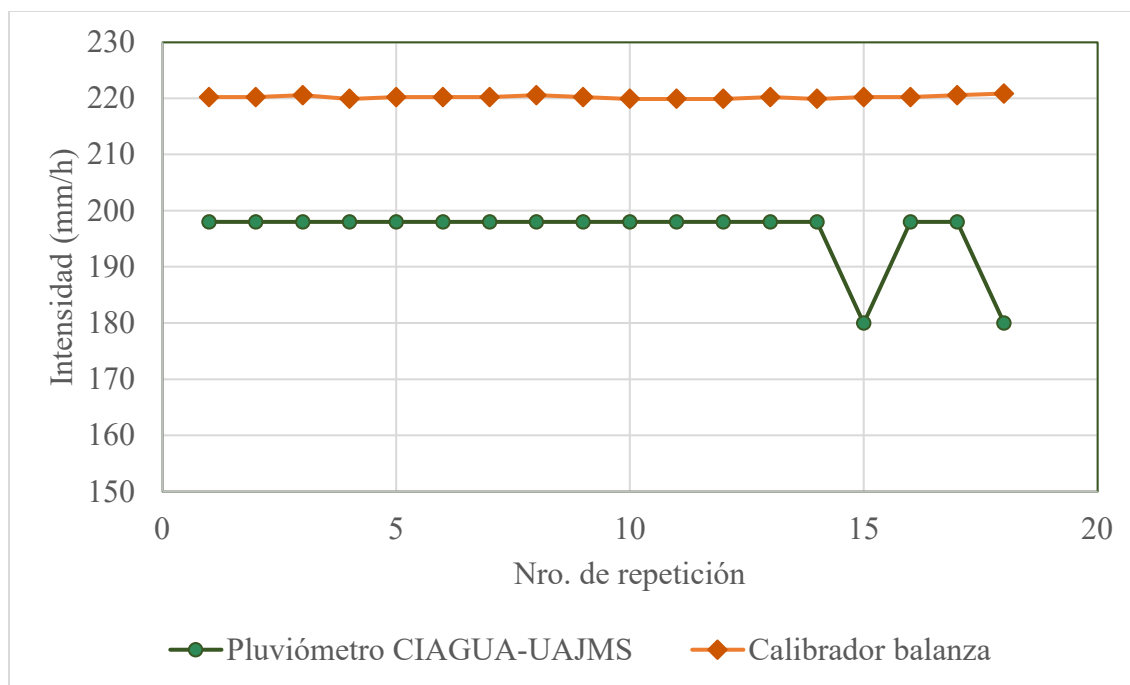


Figura 3.29 Segunda lluvia simulada prueba nro. 2

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 3

Tabla 3.17 Segunda lluvia simulada prueba nro. 3

No.	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Calibrador balanza (mm/h)
1	180	217,00
2	198	216,36
3	198	216,68
4	198	216,36
5	180	216,04
6	198	217,32
7	198	217,00
8	198	217,32
9	180	217,00
10	180	217,65

11	198	216,36
12	198	217,00
13	180	217,32
14	198	217,00
15	198	217,00
16	180	217,65
17	198	216,36
18	198	217,00

Fuente: Elaboración propia

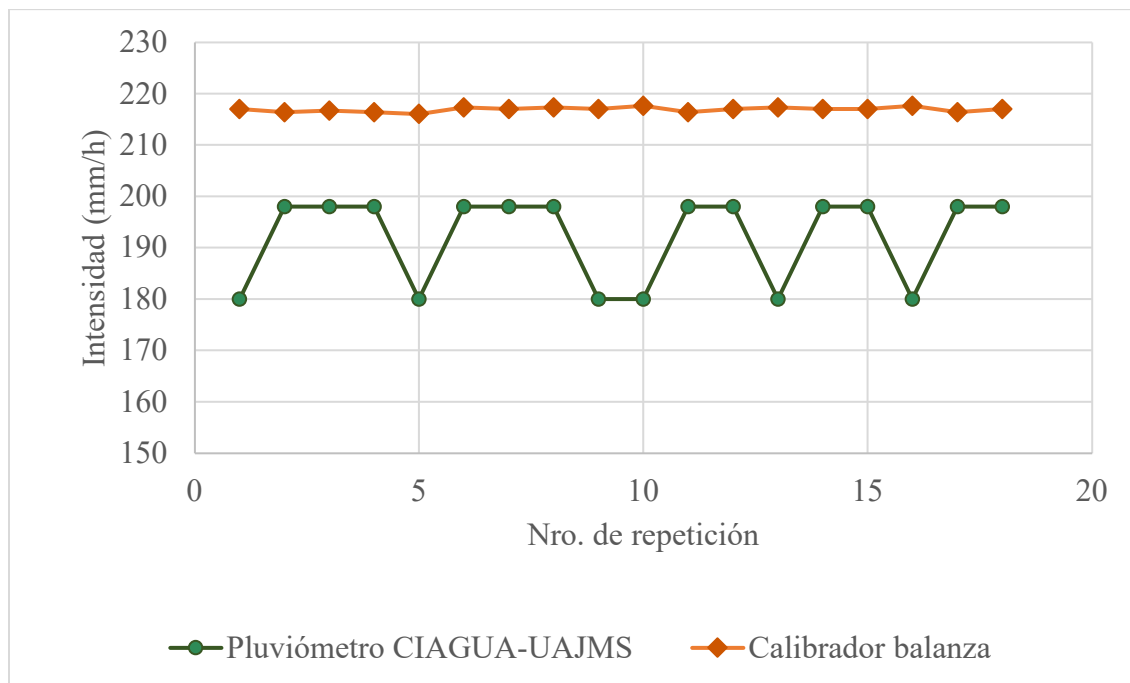


Figura 3.30 Segunda lluvia simulada prueba nro. 3

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 4**Tabla 3.18 Segunda lluvia simulada prueba nro. 4**

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	198	221,18
2	198	222,79
3	198	223,43
4	198	221,50
5	198	222,47
6	198	223,11
7	198	223,11
8	198	225,36
9	198	223,11
10	180	220,54
11	198	221,18
12	198	222,79
13	198	223,43
14	198	222,47
15	198	224,40
16	198	221,82
17	198	224,40
18	198	223,11

Fuente: Elaboración propia

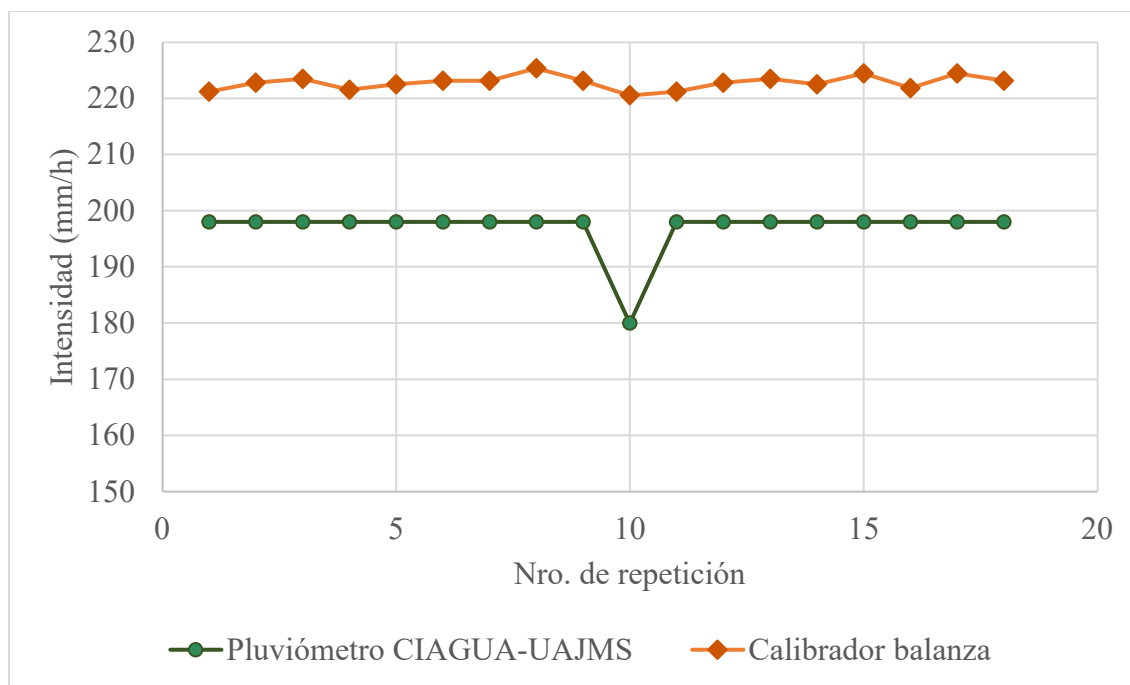


Figura 3.31 Segunda lluvia simulada prueba nro. 4

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 5

Tabla 3.19 Segunda lluvia simulada prueba nro. 5

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	180	200,28
2	180	199,96
3	162	200,93
4	180	199,96
5	180	199,32
6	180	199,64
7	180	200,61
8	180	200,93
9	162	199,32
10	180	200,61

11	180	199,96
12	180	199,96
13	180	199,64
14	180	199,32
15	162	199,32
16	180	199,64
17	180	199,00
18	180	198,36

Fuente: Elaboración propia

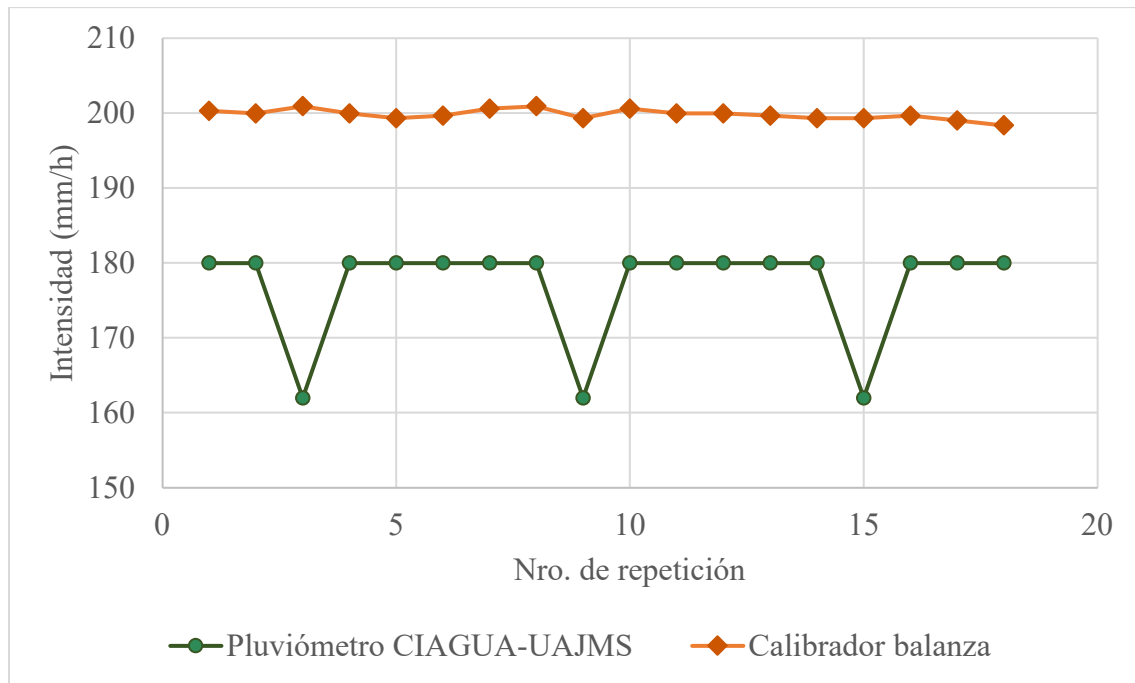


Figura 3.32 Segunda lluvia simulada prueba nro. 5

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.3 Tercera lluvia simulada

Se realizaron 5 repeticiones cada una tiene una representatividad de datos de 30 durante cada una de las pruebas.

Prueba No. 1**Tabla 3.20 Tercera lluvia simulada prueba nro. 1**

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Balanza (mm/h)
1	144	145,63
2	126	146,60
3	126	146,28
4	126	145,95
5	144	145,63
6	126	145,31
7	126	145,63
8	126	146,28
9	126	145,95
10	144	145,63
11	126	145,31
12	126	144,99
13	126	144,99
14	126	145,63
15	144	145,63
16	126	145,63
17	126	144,99
18	126	145,63
19	126	145,63
20	144	145,31
21	126	145,63
22	126	145,63
23	126	145,63
24	126	145,63
25	126	144,99
26	126	145,95

27	126	145,63
28	126	146,28
29	126	145,63
30	126	146,28

Fuente: Elaboración propia

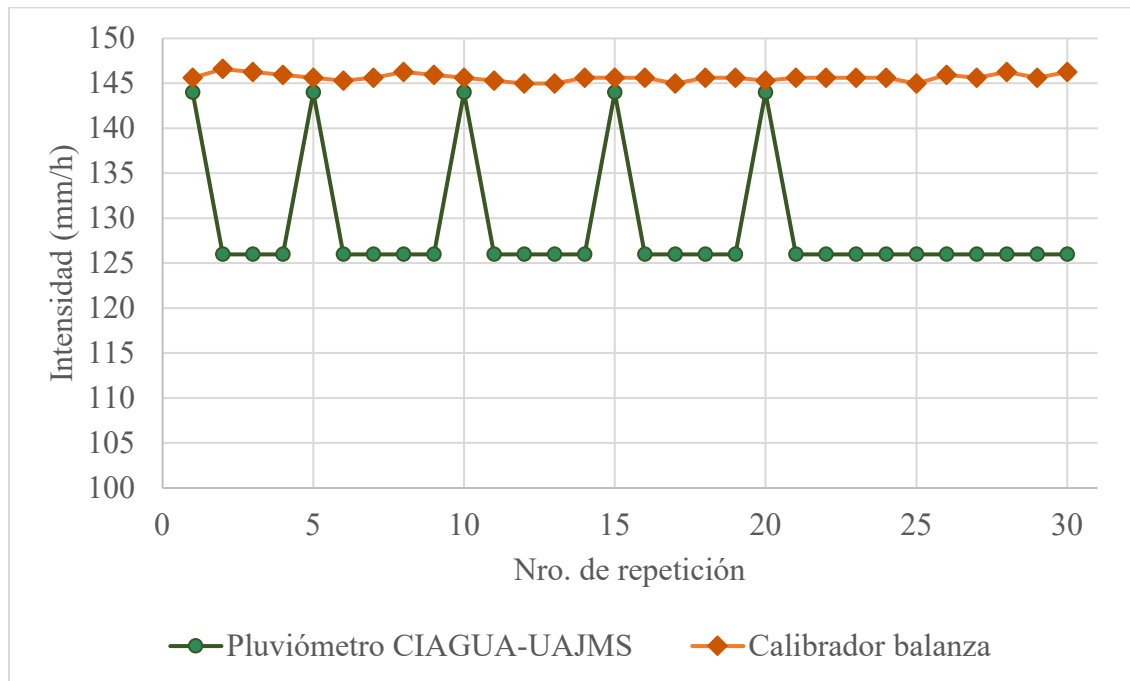


Figura 3.33 Tercera lluvia simulada prueba nro. 1

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 2

Tabla 3.21 Tercera lluvia simulada prueba nro. 2

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	balanza (mm/h)
1	108	140,81
2	108	142,10
3	126	140,49
4	126	141,77

5	126	140,81
6	126	140,81
7	126	141,77
8	126	142,10
9	126	141,13
10	126	141,77
11	126	139,85
12	126	139,52
13	126	140,81
14	126	141,45
15	108	141,13
16	108	141,45
17	126	140,49
18	126	141,13
19	126	141,13
20	126	140,49
21	126	142,10
22	126	142,42
23	126	140,49
24	126	140,49
25	126	140,17
26	126	140,17
27	108	141,13
28	126	140,81
29	126	141,77
30	126	142,10

Fuente: Elaboración propia

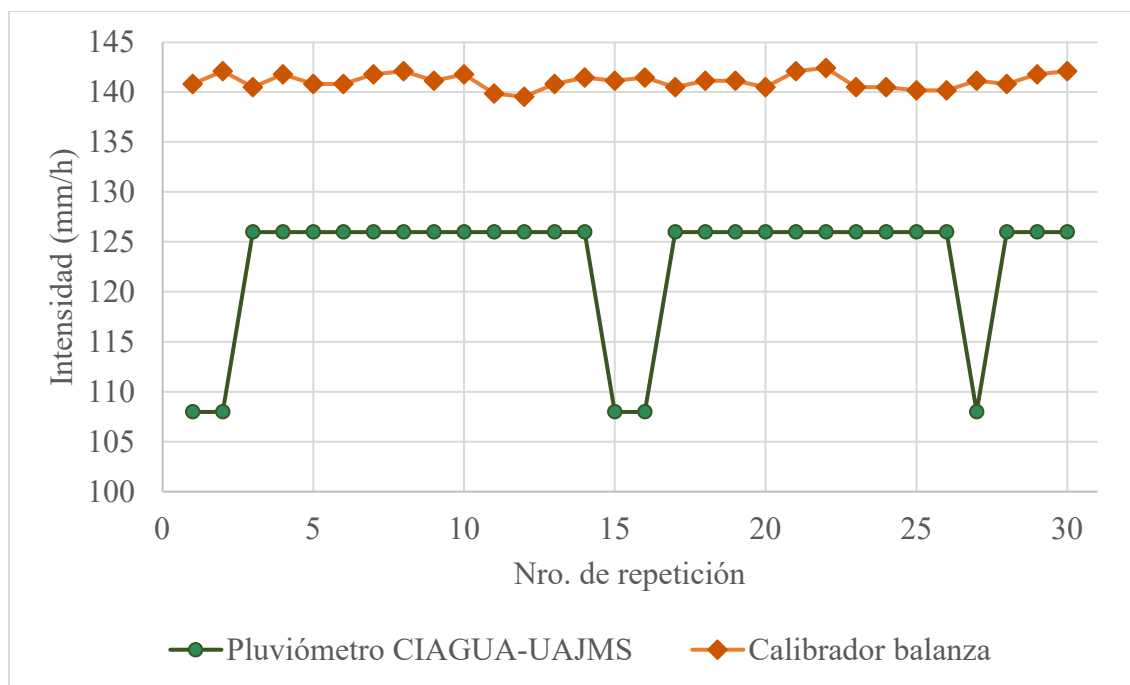


Figura 3.34 Tercera lluvia simulada prueba nro. 2

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 3

Tabla 3.22 Tercera lluvia simulada prueba nro. 3

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	126	142,74
2	126	143,06
3	126	142,74
4	126	142,42
5	126	143,38
6	126	144,03
7	108	142,42
8	126	143,06
9	126	142,42
10	126	142,10

11	126	143,06
12	126	141,45
13	126	143,38
14	126	143,06
15	126	142,42
16	126	142,42
17	126	142,10
18	126	141,45
19	108	143,06
20	126	142,42
21	126	142,74
22	126	140,81
23	126	142,74
24	126	142,42
25	126	141,45
26	126	143,70
27	126	143,38
28	126	143,70
29	126	143,38
30	126	140,81

Fuente: Elaboración propia

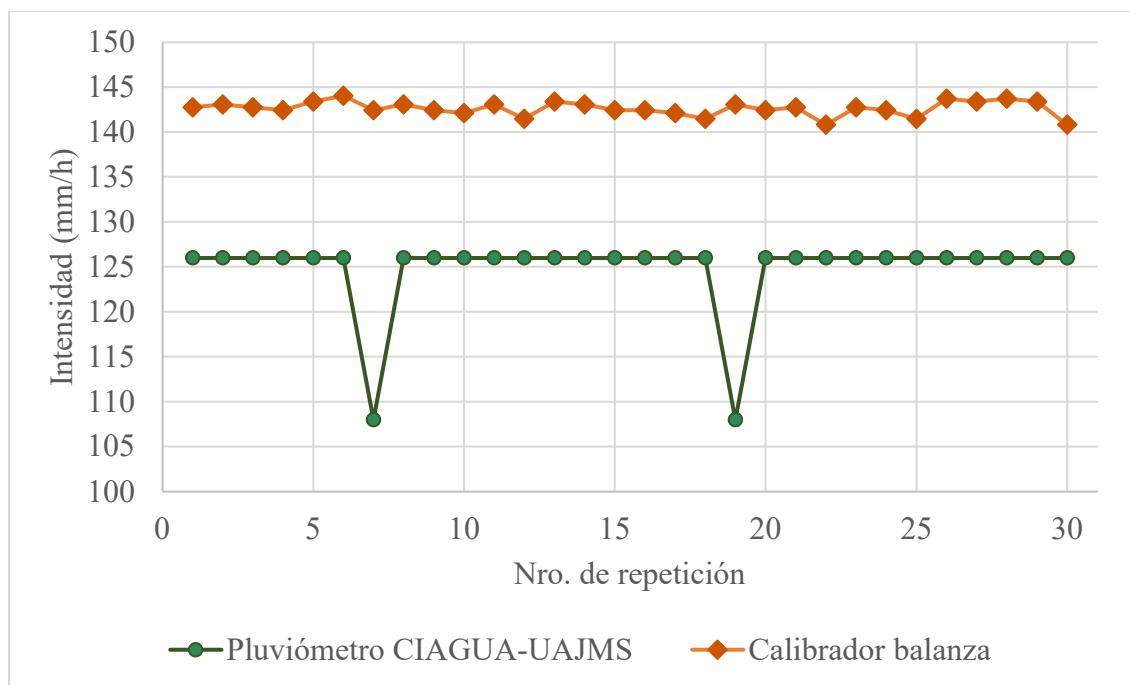


Figura 3.35 Tercera lluvia simulada prueba nro. 3

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 4

Tabla 3.23 Tercera lluvia simulada prueba nro. 4

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	126	137,60
2	108	137,27
3	126	136,31
4	126	136,63
5	126	137,92
6	108	138,56
7	126	136,95
8	126	137,92
9	108	137,92
10	126	136,95

11	126	138,56
12	126	137,92
13	108	138,24
14	126	138,24
15	126	138,24
16	108	137,60
17	126	137,27
18	126	138,24
19	126	138,24
20	108	136,63
21	126	138,56
22	126	137,92
23	108	138,24
24	126	136,95
25	126	137,60
26	108	138,24
27	126	138,24
28	126	135,99
29	126	136,95
30	108	136,95

Fuente: Elaboración propia

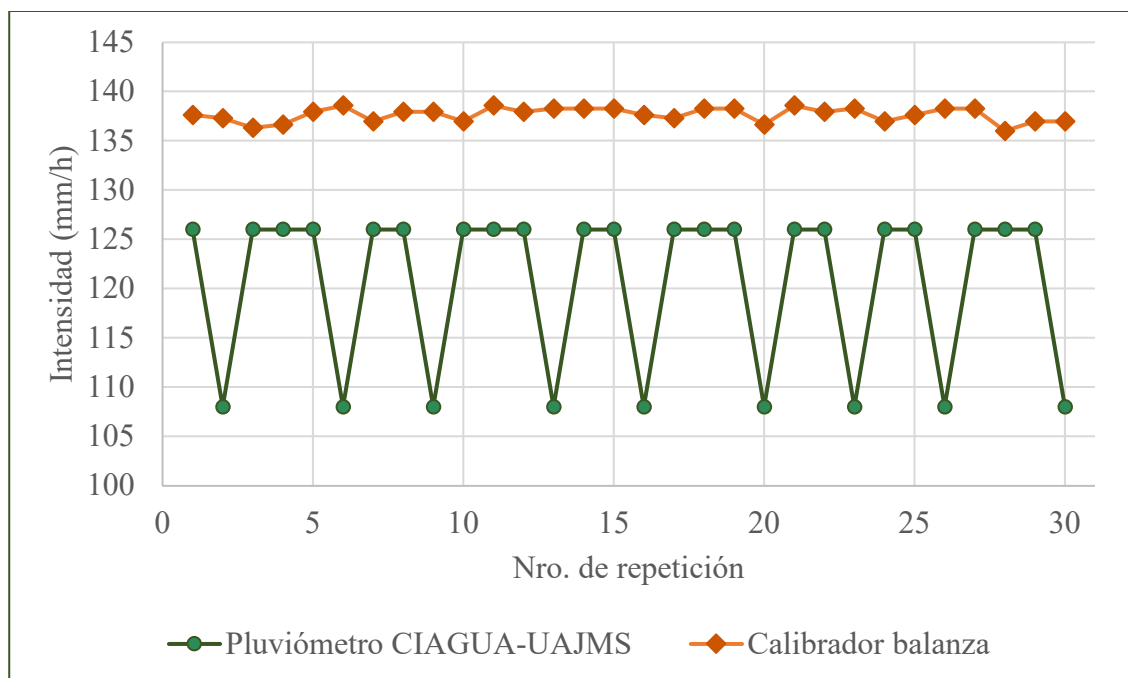


Figura 3.36 Tercera lluvia simulada prueba nro. 4

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 5

Tabla 3.24 Tercera lluvia simulada prueba nro. 5

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	Balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	108	138,24
2	126	137,92
3	108	136,95
4	126	137,60
5	126	137,27
6	108	137,27
7	126	139,20
8	126	138,56
9	126	138,24
10	108	137,92

11	126	137,27
12	126	137,60
13	108	136,63
14	126	136,95
15	126	137,92
16	108	137,60
17	126	138,88
18	126	138,56
19	126	138,56
20	108	137,60
21	126	139,20
22	126	137,27
23	108	138,56
24	126	137,27
25	126	137,27
26	108	138,88
27	126	138,88
28	126	138,56
29	126	136,95
30	108	136,95

Fuente: Elaboración propia

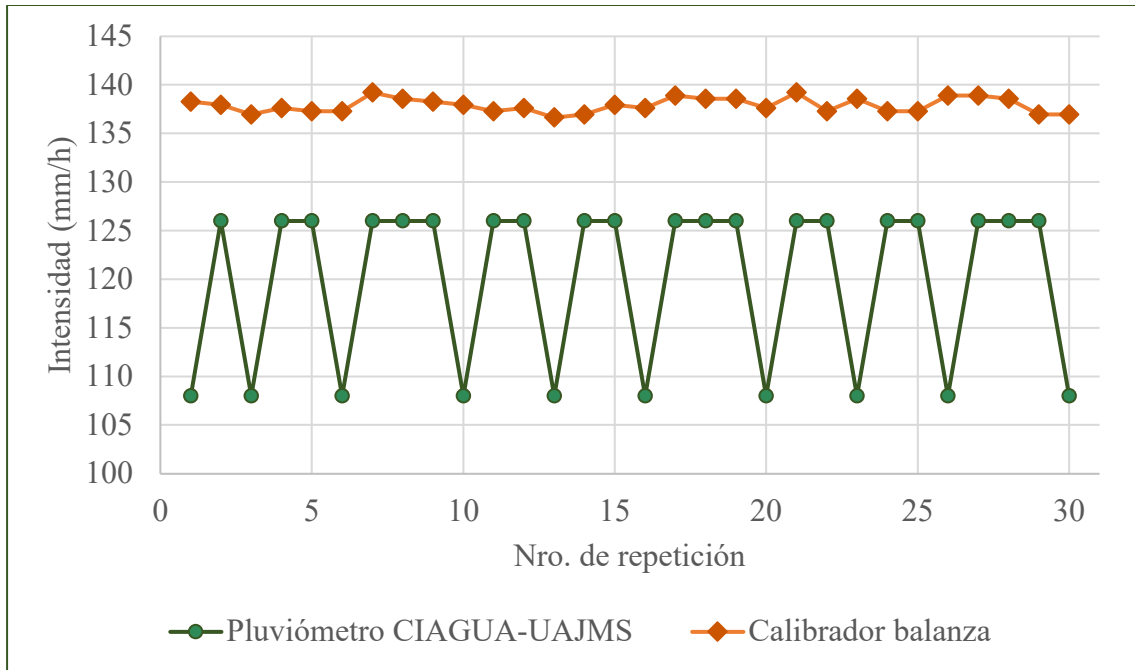


Figura 3.37 Tercera lluvia simulada prueba nro. 5

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.4 Cuarta lluvia simulada

Se realizaron 5 repeticiones cada una tiene una representatividad de datos de 18 durante cada una de las pruebas.

Prueba No. 1

Tabla 3.25 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 1

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	Balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	18	23,79
2	18	23,79
3	18	24,11
4	18	23,79
5	18	23,47
6	36	24,11
7	18	23,79

8	18	24,11
9	18	24,11
10	18	23,79
11	18	23,79
12	18	24,11
13	36	23,79
14	18	24,11
15	18	24,11
16	18	23,79
17	18	23,79
18	18	24,11
19	36	23,47
20	18	24,11
21	18	23,79
22	18	23,47
23	18	24,11
24	18	23,79
25	36	23,79
26	18	23,79
27	18	24,11
28	18	23,47
29	18	23,79
30	18	23,47

Fuente: Elaboración propia

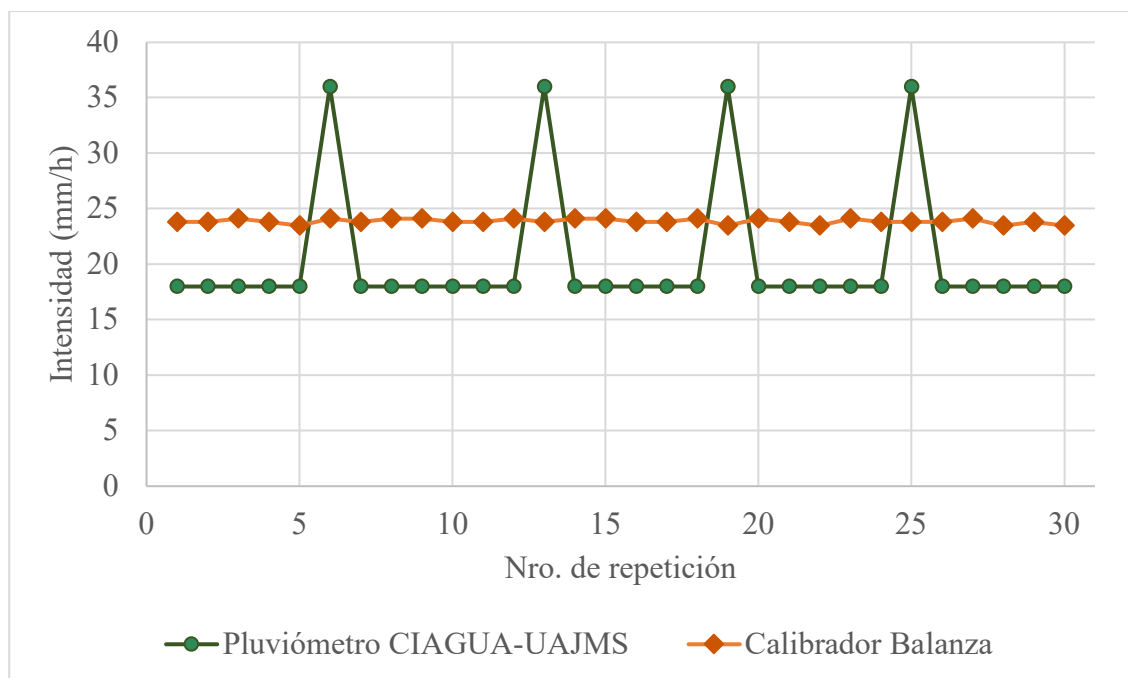


Figura 3.38 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 1

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 2

Tabla 3.26 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 2

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	Balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	36	23,79
2	18	23,47
3	18	23,79
4	18	23,47
5	18	23,79
6	18	23,79
7	18	23,47
8	36	23,79
9	18	23,79
10	18	23,79

11	18	23,79
12	18	23,47
13	18	23,47
14	36	24,11
15	18	24,11
16	18	23,79
17	18	23,47
18	18	23,47
19	18	23,47
20	18	23,79
21	36	24,11
22	18	23,47
23	18	23,47
24	18	23,79
25	18	23,79
26	18	23,79
27	18	23,47
28	18	23,47
29	18	23,79
30	18	23,47

Fuente: Elaboración propia

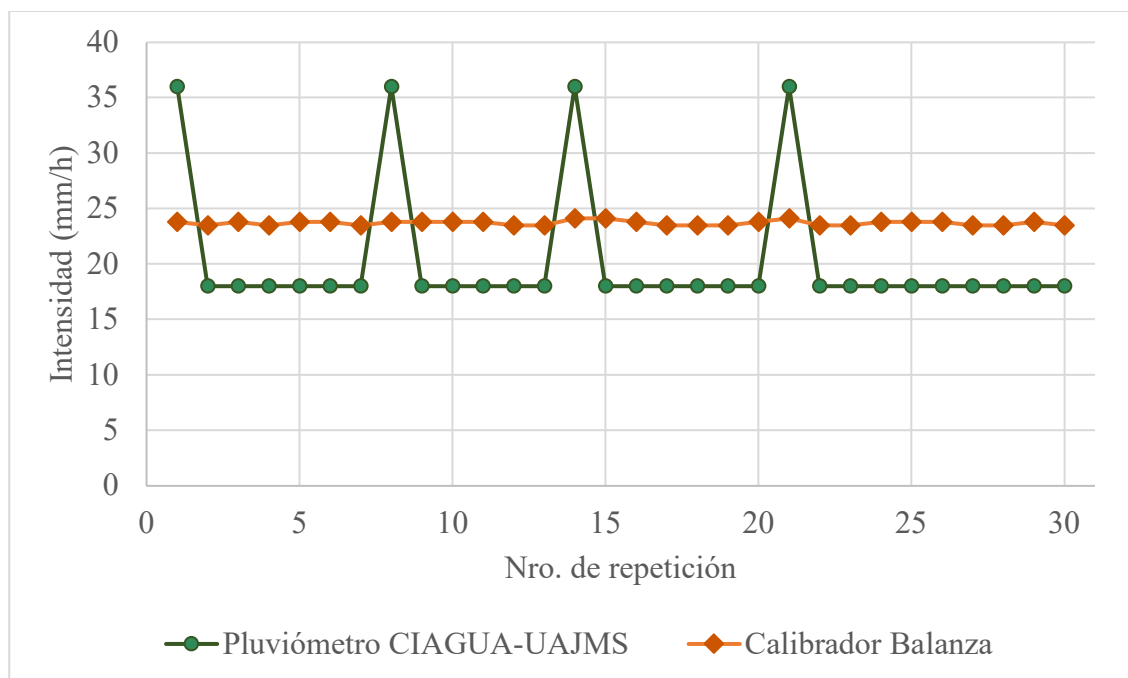


Figura 3.39 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 2

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 3

Tabla 3.27 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 3

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	Balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	18	21,86
2	18	21,86
3	18	21,86
4	18	21,86
5	18	21,54
6	18	21,86
7	36	21,86
8	18	21,86
9	18	21,54
10	18	21,54

11	18	21,86
12	18	21,86
13	18	21,86
14	18	21,54
15	18	22,18
16	18	21,86
17	18	21,86
18	18	21,54
19	18	21,22
20	18	21,54
21	18	21,54
22	18	21,22
23	18	21,54
24	18	21,22
25	18	21,22
26	18	21,22
27	18	21,22
28	18	21,22
29	18	21,22
30	18	21,54

Fuente: Elaboración propia

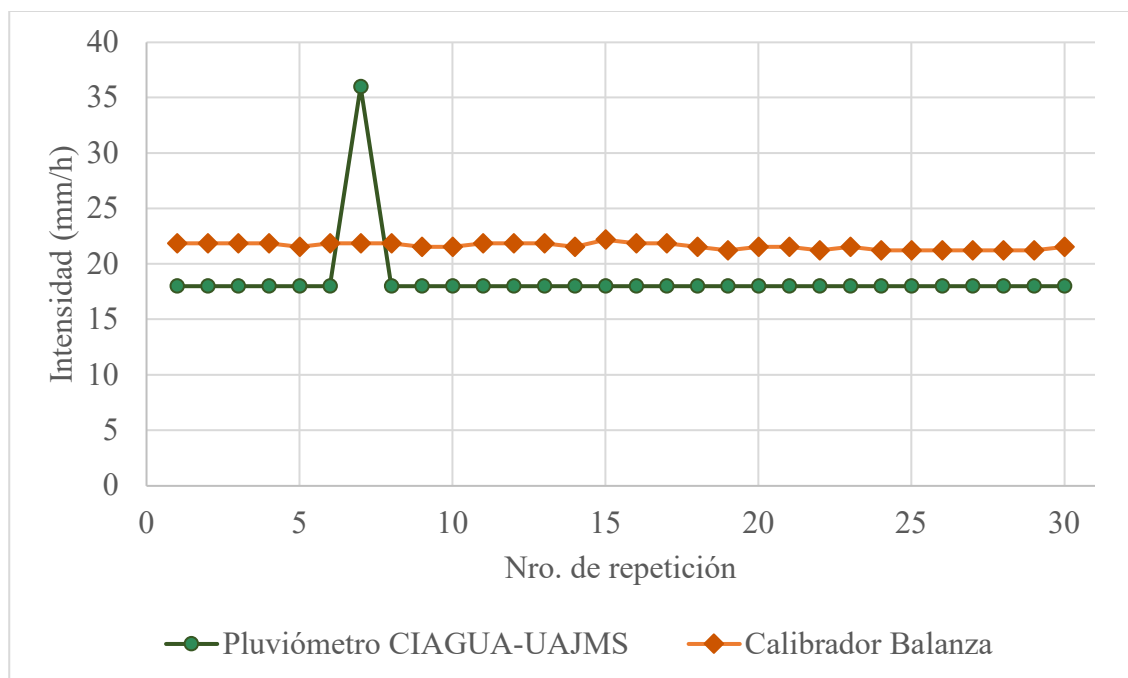


Figura 3.40 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 3

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 4

Tabla 3.28 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 4

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS	Balanza
	(mm/h)	(mm/h)
1	18	21,86
2	18	22,18
3	18	21,86
4	18	22,18
5	18	21,54
6	18	21,54
7	18	21,86
8	18	21,86
9	18	21,54
10	18	21,86

11	18	21,54
12	36	21,54
13	18	22,18
14	18	21,54
15	18	21,86
16	18	21,22
17	18	21,54
18	18	21,54
19	18	21,54
20	18	21,22
21	18	21,54
22	18	21,54
23	18	21,54
24	18	21,54
25	18	21,22
26	18	21,54
27	18	21,22
28	18	21,22
29	18	21,86
30	18	21,22

Fuente: Elaboración propia

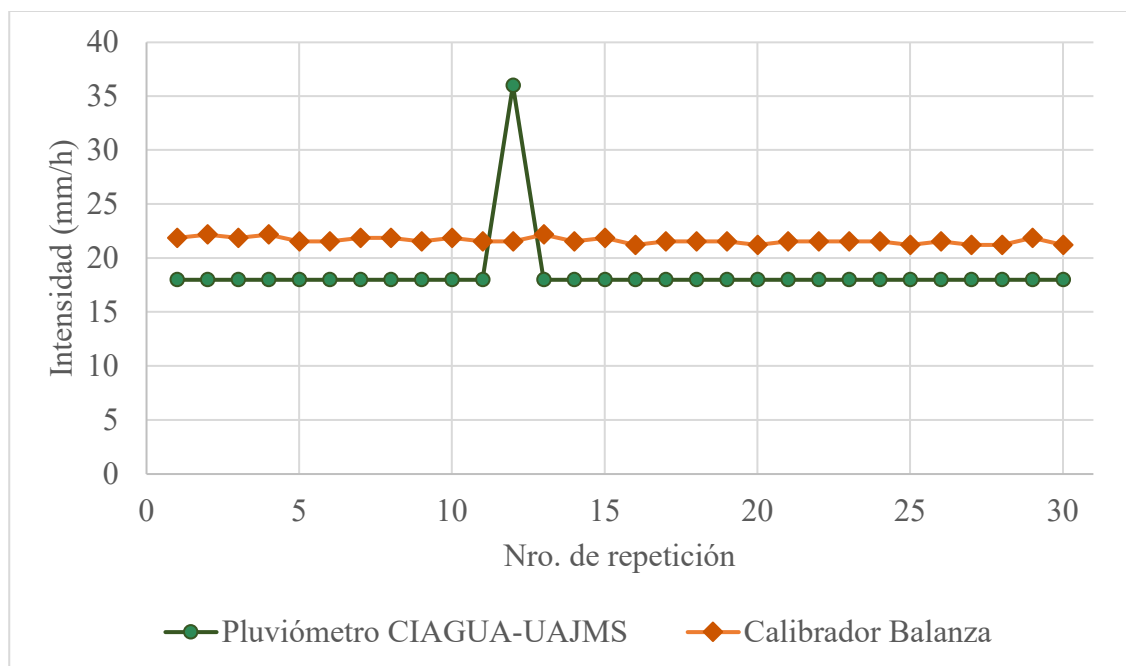


Figura 3.41 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 4

Fuente: Elaboración propia

Prueba No. 5

Tabla 3.29 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 5

No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Balanza (mm/h)
1	18	20,58
2	18	20,90
3	18	20,58
4	18	20,90
5	18	20,58
6	18	20,90
7	18	20,90
8	18	20,58
9	18	20,90
10	18	21,22

11	18	21,22
12	18	20,58
13	18	20,90
14	18	21,22
15	18	20,90
16	18	20,90
17	18	21,22
18	18	20,90
19	18	20,58
20	18	21,22
21	18	20,90
22	18	20,58
23	18	20,90
24	18	21,22
25	18	20,58
26	18	20,90
27	18	20,90
28	18	20,58
29	18	21,22
30	18	20,58

Fuente: Elaboración propia

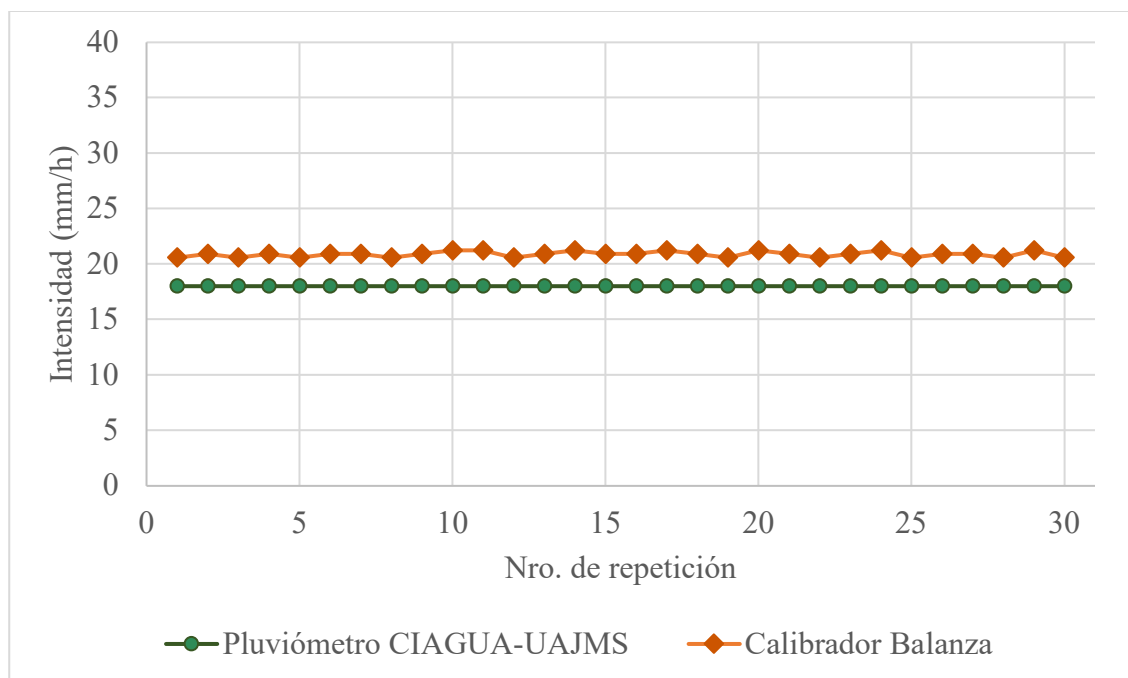


Figura 3.42 Cuarta lluvia simulada prueba nro. 5

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Curva de calibración

Se muestra un resumen del de los resultados obtenidos tanto de la intensidad de referencia generada por el calibrador, la registrada por nuestro pluviómetro.

Tabla 3.30 Resumen de la calibración dinámica

Prueba No.	Pluviómetro	Calibrador
	CIAGUA-UAJMS (mm/h)	Balanza (mm/h)
1	273,00	300,70
2	268,50	296,68
3	265,50	297,43
4	264,00	296,62
5	265,50	297,80
1	200,0	222,5
2	196,0	220,2
3	192,0	216,9

4	197,0	222,8
5	177,0	199,8
1	129,0	145,7
2	123,0	141,1
3	124,8	142,6
4	120,6	137,6
5	120,0	137,9
1	20,4	23,9
2	20,4	23,7
3	18,6	21,6
4	18,6	21,6
5	18,0	20,9

Fuente: Elaboración propia

A continuación, plasmamos los valores medios y adicionalmente la variación expresada como un factor de corrección obtenido de la calibración, que ayudara a corregir los valores obtenidos en las mediciones de campo.

Tabla 3.31 Promedio de mediciones y factor de corrección

Pluviómetro CIAGUA- UAJMS (mm/h)	Calibrador balanza (mm/h)	Factor de corrección %
267,30	297,85	10,26
192,40	216,44	11,12
123,48	140,98	12,42
19,20	22,34	13,98

Fuente: Elaboración propia

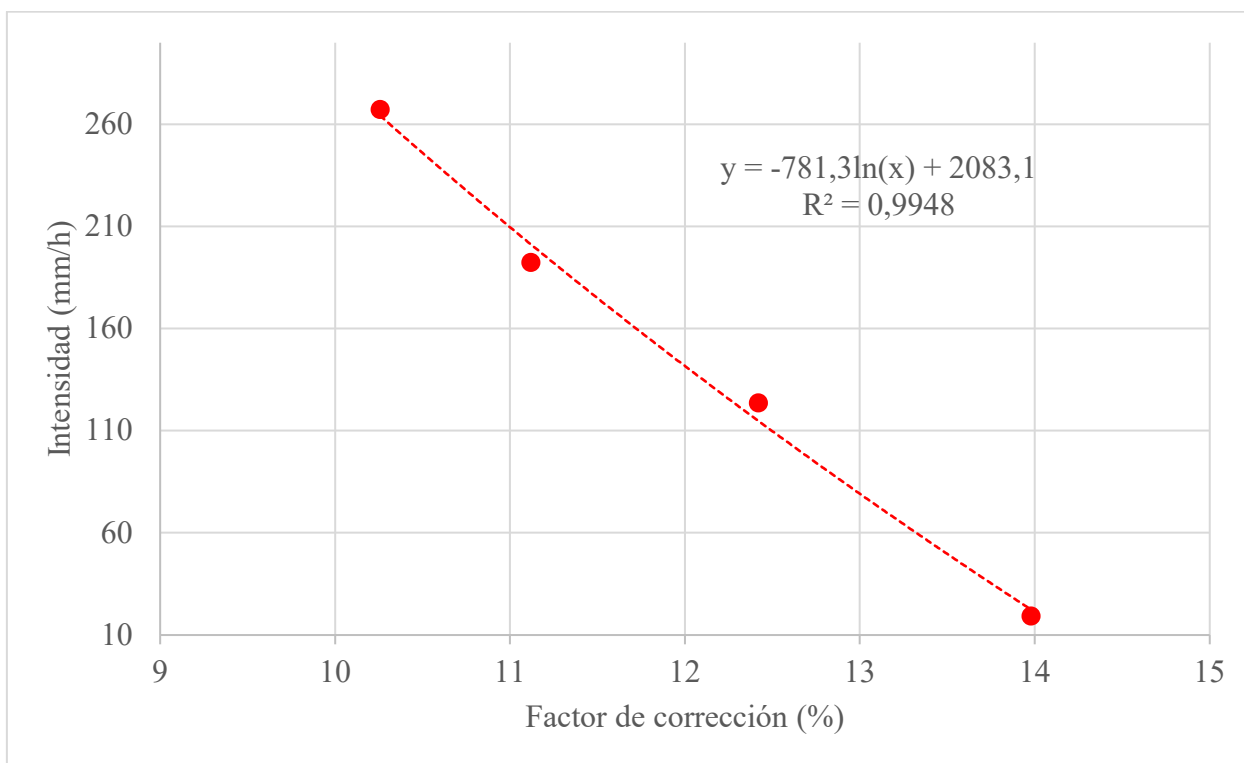


Figura 3.43 Curva de calibración

Fuente: Elaboración propia

La curva de calibración que se muestra representa la relación funcional entre una variable independiente medida en condiciones experimentales y su correspondiente valor corregido o de referencia. En este caso, se ha ajustado una regresión logarítmica a los datos, lo cual es apropiado para describir comportamientos donde la respuesta disminuye de forma no lineal a medida que aumenta la variable de entrada.

$$y = -781,3 \ln(x) + 2083,1$$

$$R^2 = 0,9948$$

La ecuación de la curva forma funcional indica una relación logarítmica que aplicaremos para correcciones sistemáticas sobre los datos adquiridos, aumentando la fiabilidad del sistema de medición. Su coeficiente de determinación implica que el 99,48% de la variabilidad de la variable dependiente puede explicarse por la ecuación propuesta. Este nivel de ajuste respalda la validez del modelo para ser empleado como referencia en la calibración continua del dispositivo de medición en entornos de campo.

CAPÍTULO 4.
INSTALACIÓN Y
RESULTADOS DE
CAMPO

4.1 Ubicación y fecha de instalación

Tras finalizar el proceso de calibración en laboratorio del pluviómetro, se procedió con su instalación definitiva en el campus universitario, considerando variables como la correcta exposición a la intemperie, la ausencia de elementos cercanos que pudieran alterar la captación de lluvia (como árboles, edificaciones o estructuras elevadas), y la facilidad de acceso para realizar labores de mantenimiento preventivo y correctivo.



Figura 4.1 Ubicación estación meteorológica El Tejar

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída de la plataforma de Google Earth Pro

El lugar seleccionado no solo cumplía con estos criterios fundamentales, sino que además se encuentra donde ya opera una estación meteorológica equipada con un pluviómetro automático. Esta particularidad representa una ventaja significativa, ya que permite realizar análisis comparativos a una resolución temporal más alta, específicamente a nivel horario, lo que resulta de gran valor para estudios hidrológicos de precisión. Esta comparación aportará

elementos para analizar fenómenos como la intensidad de eventos cortos, la respuesta del sensor ante lluvias intermitentes y la capacidad de detección en condiciones variables.

La instalación se llevó a cabo el 15 de diciembre de 2024. Durante este procedimiento se verificó la nivelación del instrumento, la firmeza de su anclaje al soporte y la correcta conexión de sus componentes.



Figura 4.2 Instalación y anclaje de pluviómetros

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.3 Puesta final de pluviómetro CIAGUA-UAJMS y totalizador

Fuente: Elaboración propia

4.2 Comparación a nivel diario

Como parte del protocolo de validación del nuevo instrumento, se optó por complementar la instalación con un pluviómetro totalizador ubicado en las proximidades inmediatas. Este equipo, que opera mediante la recolección y almacenamiento del agua de lluvia para su lectura manual acumulada, sirve como un punto de comparación confiable para contrastar las mediciones obtenidas por el pluviómetro calibrado a nivel diario.

Durante el periodo comprendido entre el 19 de diciembre de 2024 y el 29 de marzo de 2025, ambos instrumentos fueron objeto de una rutina diaria de registro de datos. Los valores recolectados fueron ingresados en una base de datos diseñada para facilitar la comparación temporal entre las lecturas de ambos equipos.

Esta etapa permitirá identificar discrepancias sistemáticas entre ambos métodos de medición. La comparación también posibilita la identificación de posibles sesgos en la recolección automática frente al sistema manual, como errores por salpicadura, obturaciones o tiempos de reacción del mecanismo de medición.

Tabla 4.1 Comparación con pluviómetro totalizador a nivel diario

Fecha (aaaa-mm-dd)	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm)	Pluviómetro Totalizador (mm)
2024-12-19	5,24	5,33
2024-12-20	0,92	1,02
2024-12-22	3,28	3,30
2024-12-23	5,88	5,84
2024-12-25	4,52	4,49
2024-12-31	1,73	1,78
2025-01-01	9,35	9,40
2025-01-02	8,48	8,38
2025-01-03	9,35	9,27
2025-01-07	17,14	17,02
2025-01-08	1,15	1,27

2025-01-09	1,04	1,14
2025-01-11	28,02	28,19
2025-01-16	10,93	12,45
2025-01-25	1,96	2,29
2025-01-26	3,53	3,56
2025-01-29	21,89	22,10
2025-02-10	4,45	4,06
2025-02-13	5,13	5,08
2025-02-14	3,31	3,30
2025-02-18	23,83	23,24
2025-02-19	5,02	4,83
2025-02-20	0,80	0,89
2025-02-27	0,68	0,76
2025-03-09	23,86	23,11
2025-03-10	3,88	3,81
2025-03-12	24,17	25,15
2025-03-14	2,17	2,03
2025-03-29	31,98	32,51

Fuente: Elaboración propia

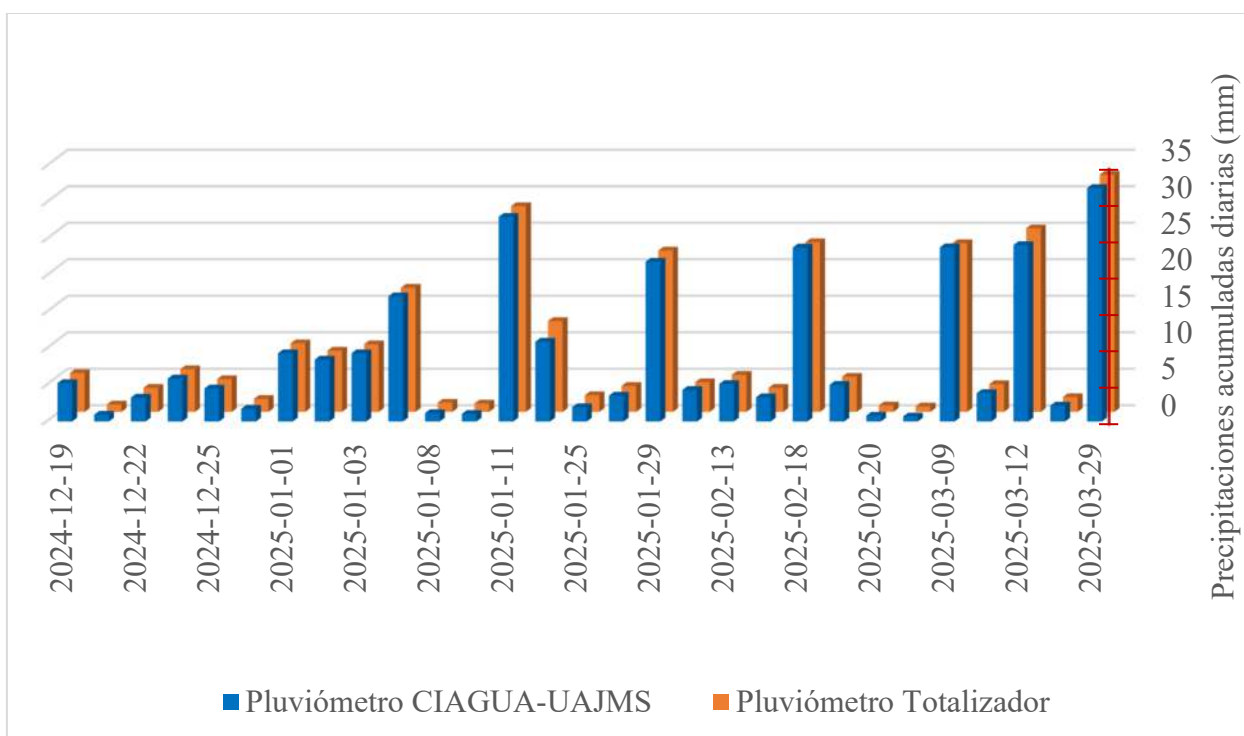


Figura 4.4 Comparación con pluviómetro totalizador a nivel diario

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Comparación general a nivel diario

Fecha (aaaa-mm-dd)	Pluviómetro CIAGUA-UAJMS (mm)	Pluviómetro Totalizador (mm)	Pluviómetro El Tejar (mm)
2025-01-25	1,96	2,29	1,60
2025-01-26	3,53	3,56	3,00
2025-01-29	21,89	22,10	20,80
2025-02-10	4,45	4,06	3,90
2025-02-13	5,13	5,08	3,90
2025-02-14	3,31	3,30	2,60
2025-02-18	23,83	23,24	19,70
2025-02-19	5,02	4,83	4,00
2025-02-20	0,80	0,89	1,80
2025-02-27	0,68	0,76	0,40

2025-03-09	23,86	23,11	20,90
2025-03-10	3,88	3,81	3,00
2025-03-12	24,17	25,15	22,50
2025-03-14	2,17	2,03	0,20
2025-03-29	31,98	32,51	30,50

Fuente: Elaboración propia

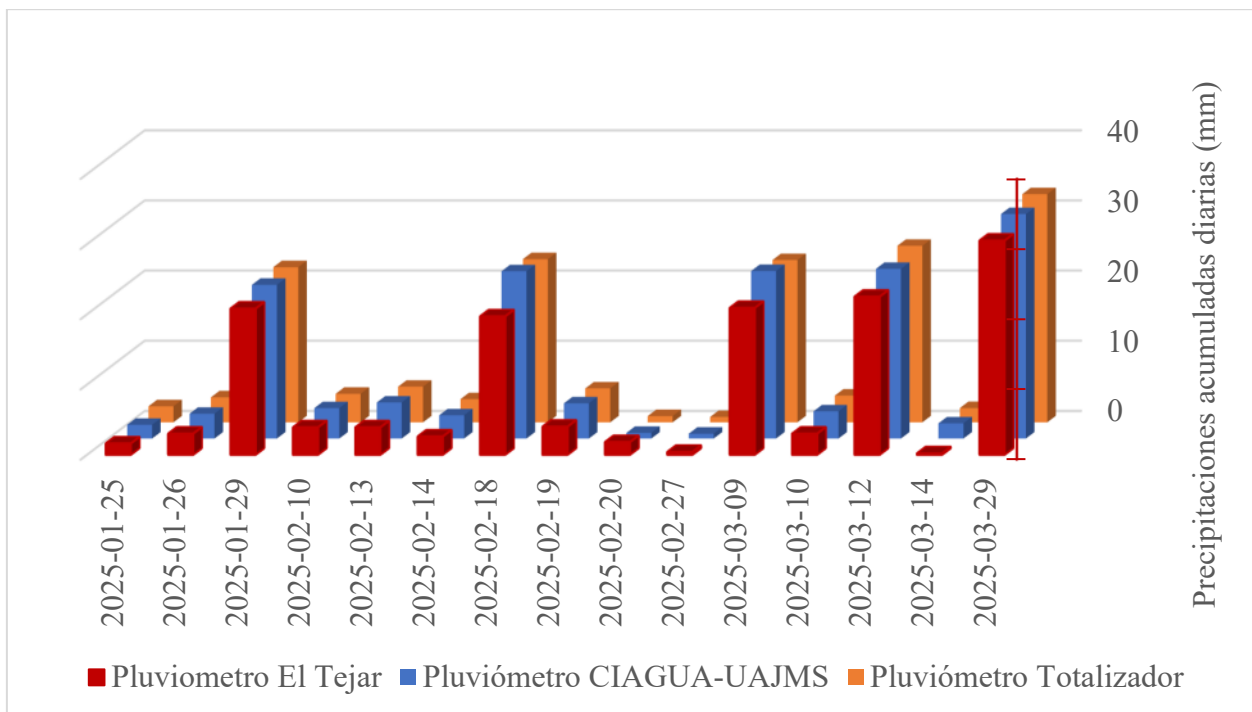


Figura 4.5 Comparación general a nivel diario

Fuente: Elaboración propia

4.3 Comparación a nivel horario

Además del análisis comparativo con el pluviómetro totalizador, se considera de alta relevancia realizar un estudio paralelo utilizando la información generada por la estación meteorológica automática existente en la misma cuenca. Esta estación cuenta con un pluviómetro de resolución temporal, capaz de registrar eventos de lluvia cada 5 min, lo que permite evaluar el comportamiento dinámico del sensor calibrado con gran precisión.

A través de esta comparación se podrá examinar la sincronía en la detección de eventos de precipitación, la capacidad del nuevo pluviómetro para captar intensidades variables en cortos periodos de tiempo, y su consistencia frente a una tecnología validada. Este enfoque es particularmente útil para modelaciones hidrológicas que requieren series de datos de alta frecuencia y para evaluar la respuesta del sensor ante fenómenos convectivos o lluvias breves pero intensas.

Durante la campaña de comparación, se planea realizar una correlación entre los registros horarios de ambos dispositivos, que permitan identificar patrones comunes o anomalías.

La combinación de análisis diarios mediante el pluviómetro totalizador y mediciones horarias mediante la estación automática representa una estrategia robusta para validar el desempeño integral del nuevo instrumento. Estos datos permitirán determinar si el pluviómetro cumple con los estándares técnicos requeridos para su uso en investigaciones académicas, monitoreos hidrometeorológicos y proyectos de gestión de recursos hídricos en el contexto del campus universitario.



Figura 4.6 Pluviómetro CIAGUA-UAJMS y El Tejar

Fuente: Elaboración propia

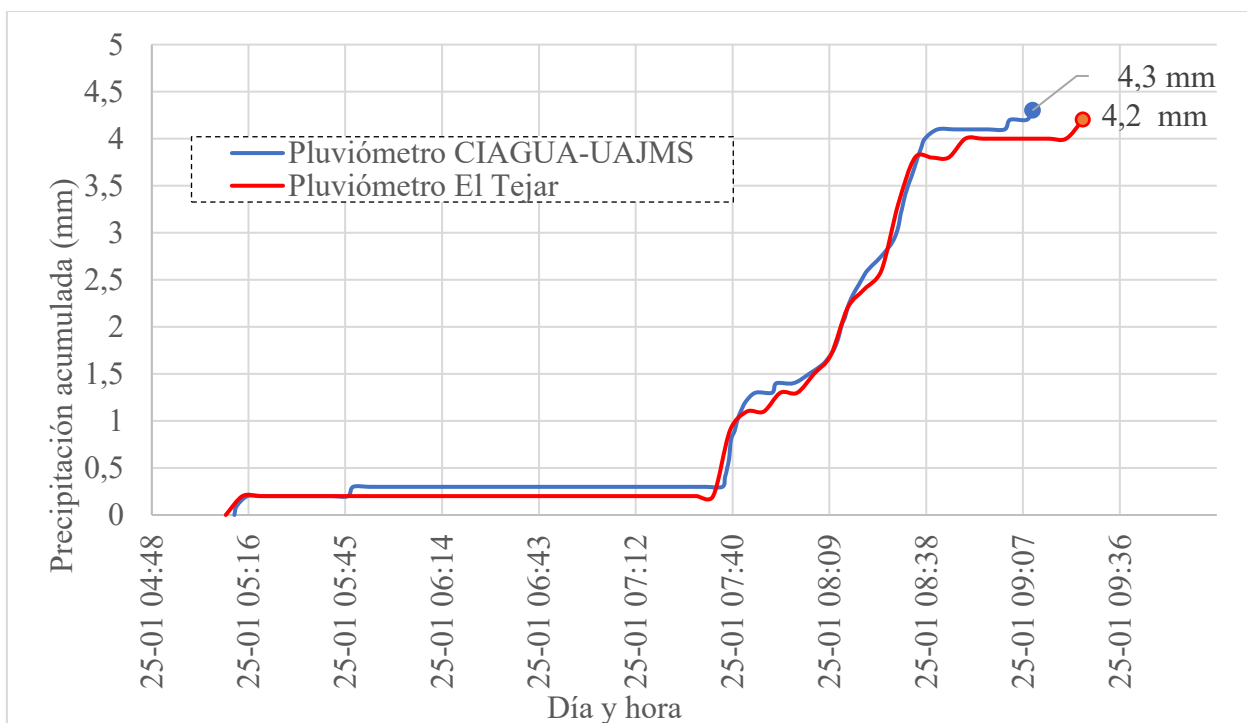


Figura 4.7 Comparación horaria 25-01-2025

Fuente: Elaboración propia

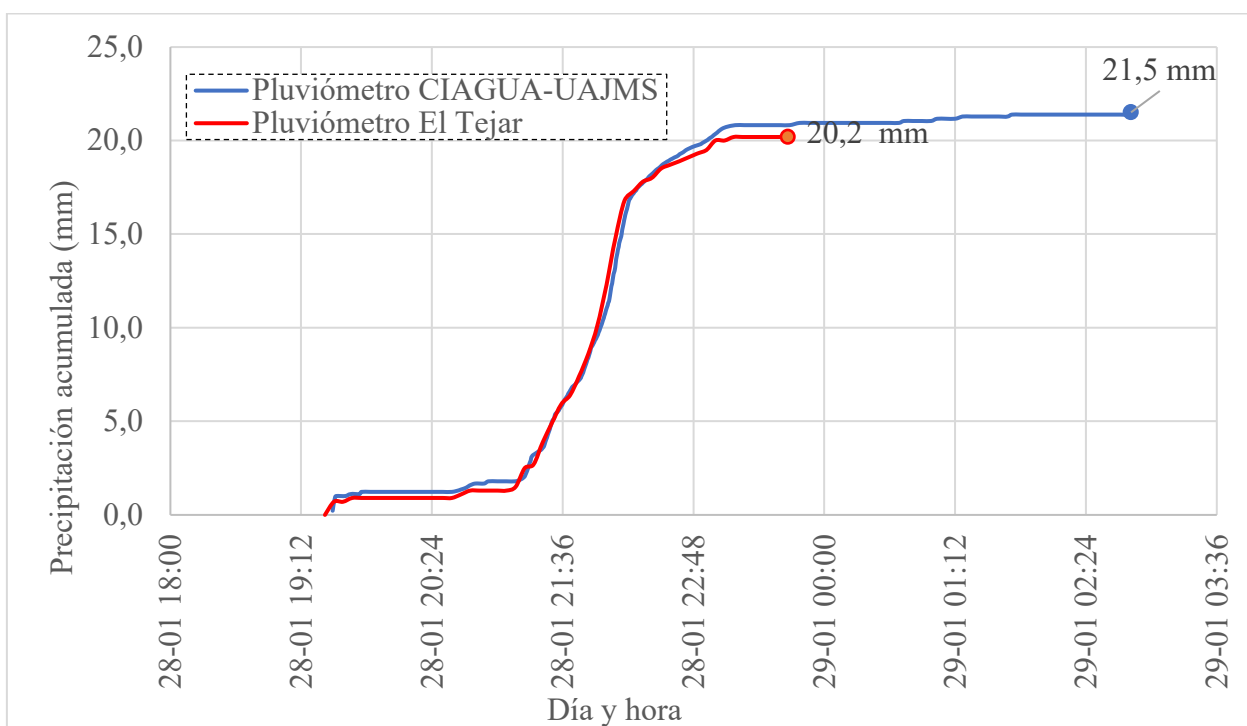


Figura 4.8 Comparación horaria 28-01-2025

Fuente: Elaboración propia

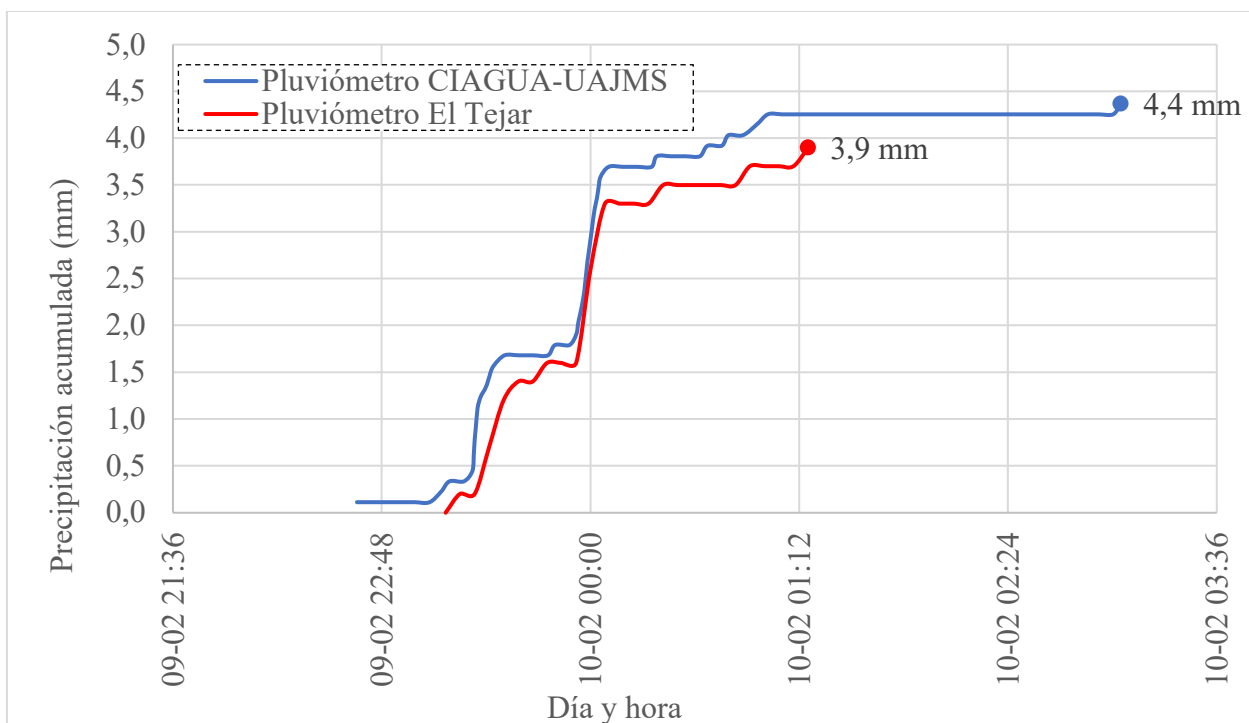


Figura 4.9 Comparación horaria 10-02-2025

Fuente: Elaboración propia

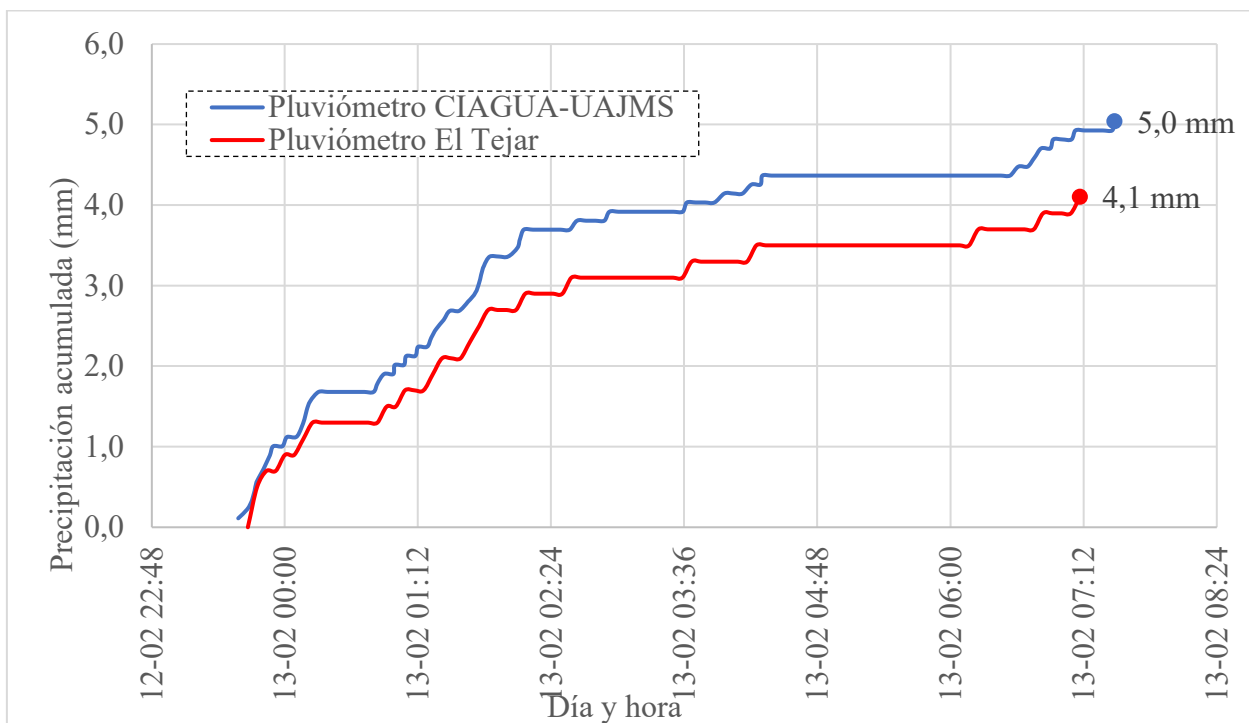


Figura 4.10 Comparación horaria 13-02-2025

Fuente: Elaboración propia

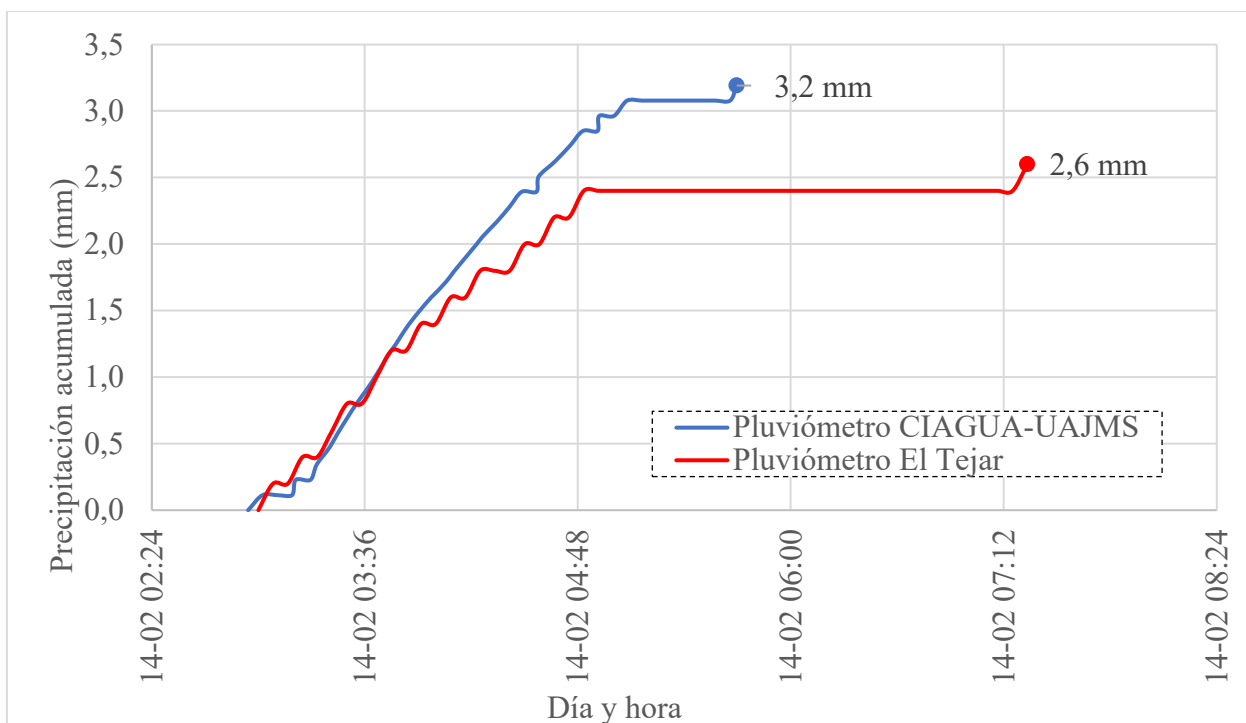


Figura 4.11 Comparación horaria 14-02-2025

Fuente: Elaboración propia

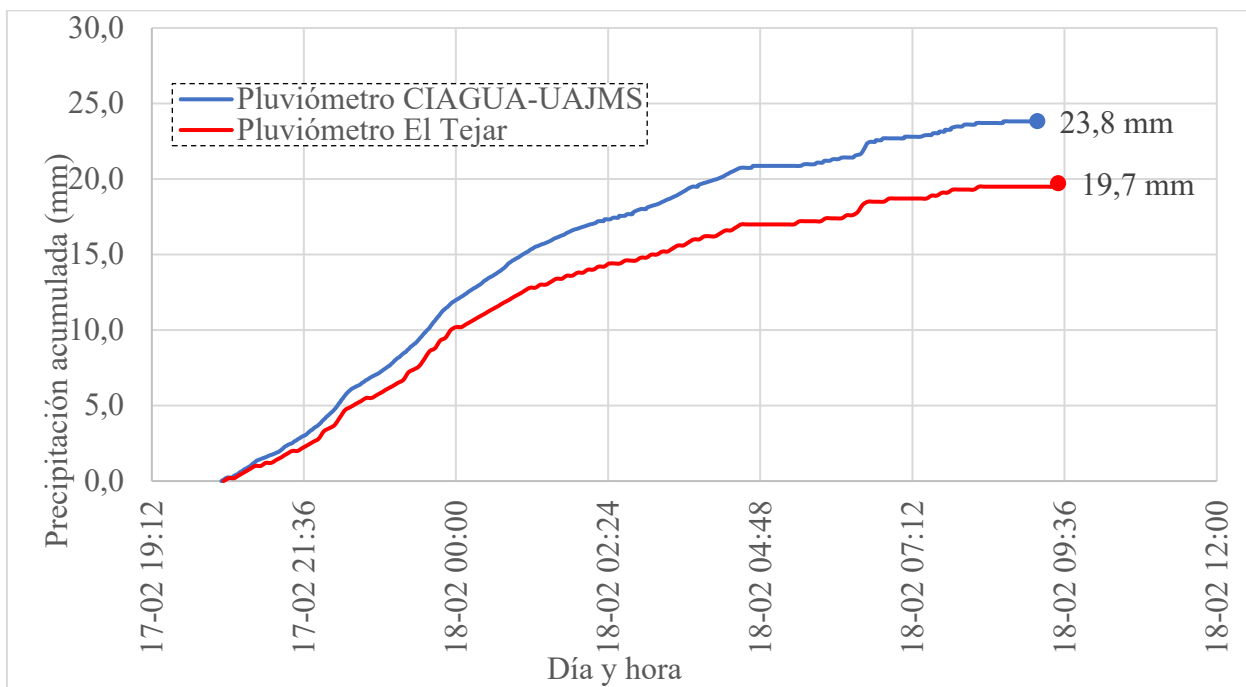


Figura 4.12 Comparación horaria 18-02-2025

Fuente: Elaboración propia

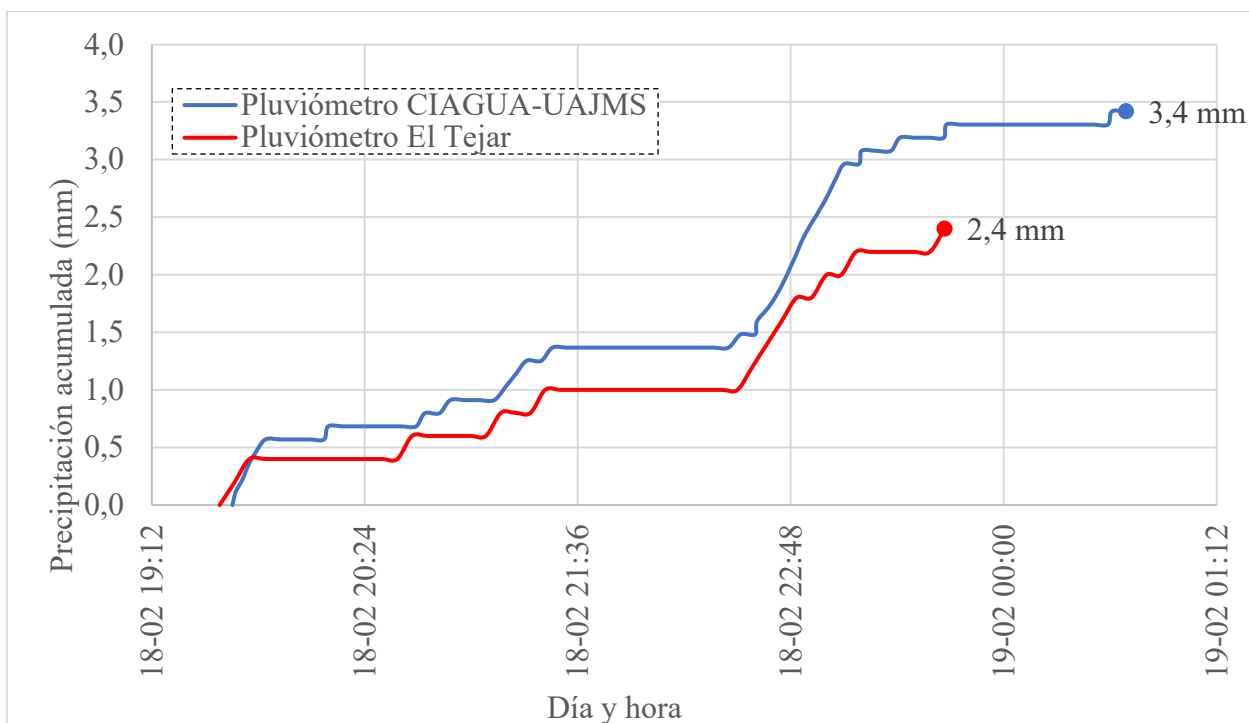


Figura 4.13 Comparación horaria 18-02-2025

Fuente: Elaboración propia

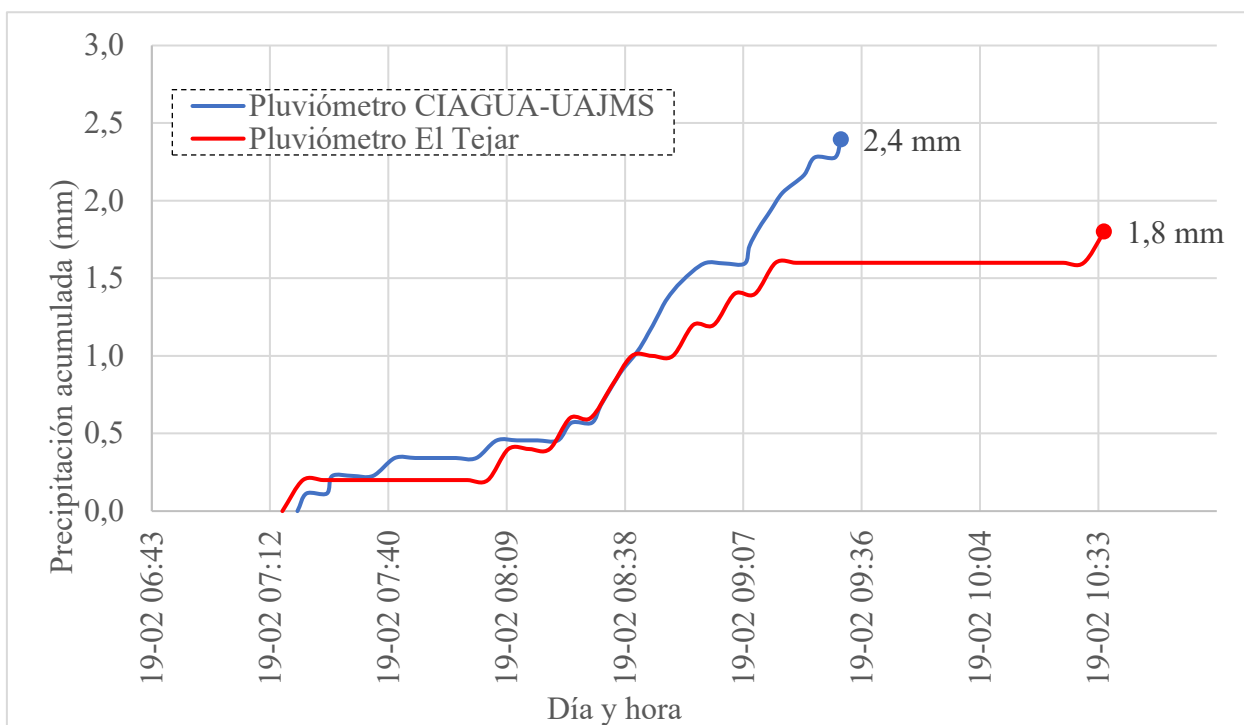


Figura 4.14 Comparación horaria 19-02-2025

Fuente: Elaboración propia

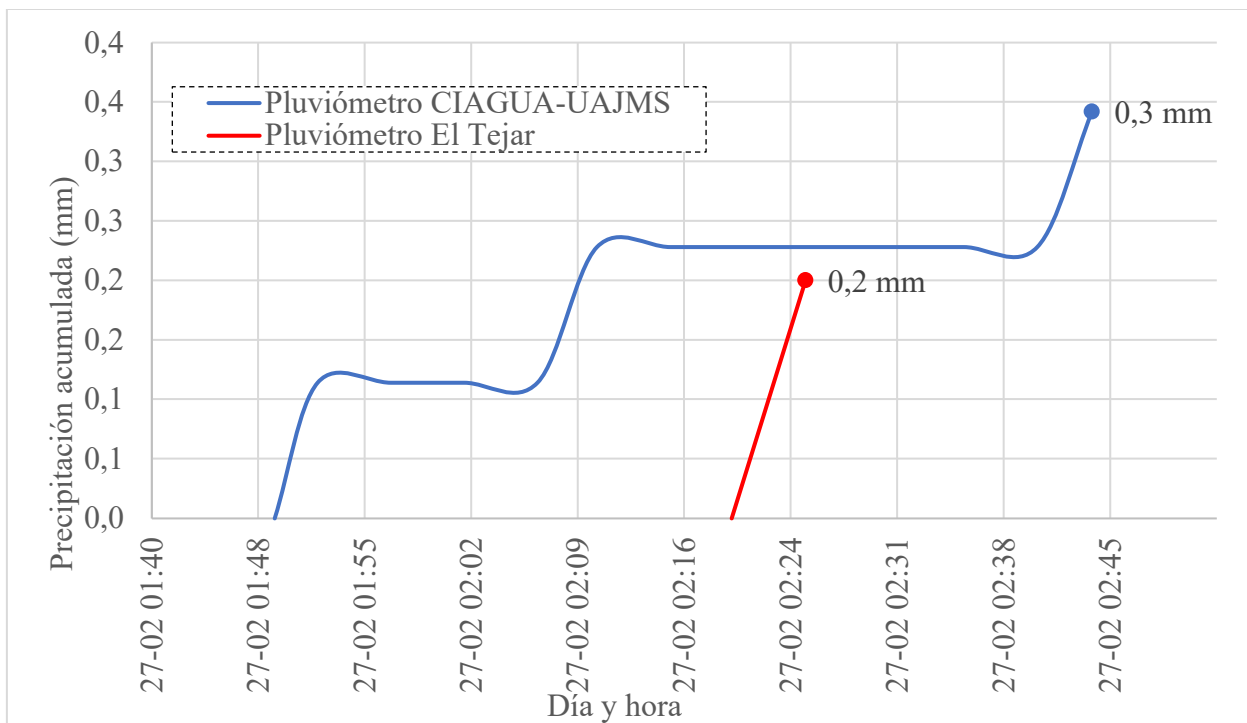


Figura 4.15 Comparación horaria 27-02-2025

Fuente: Elaboración propia

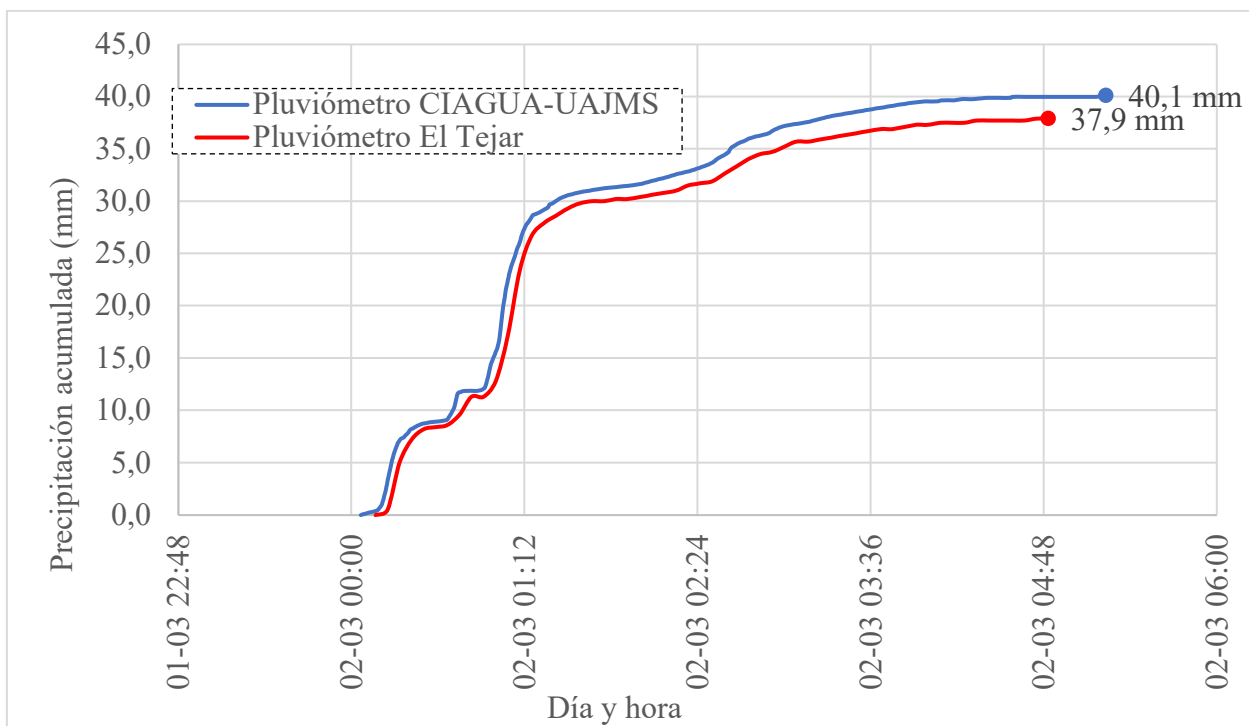


Figura 4.16 Comparación horaria 02-03-2025

Fuente: Elaboración propia

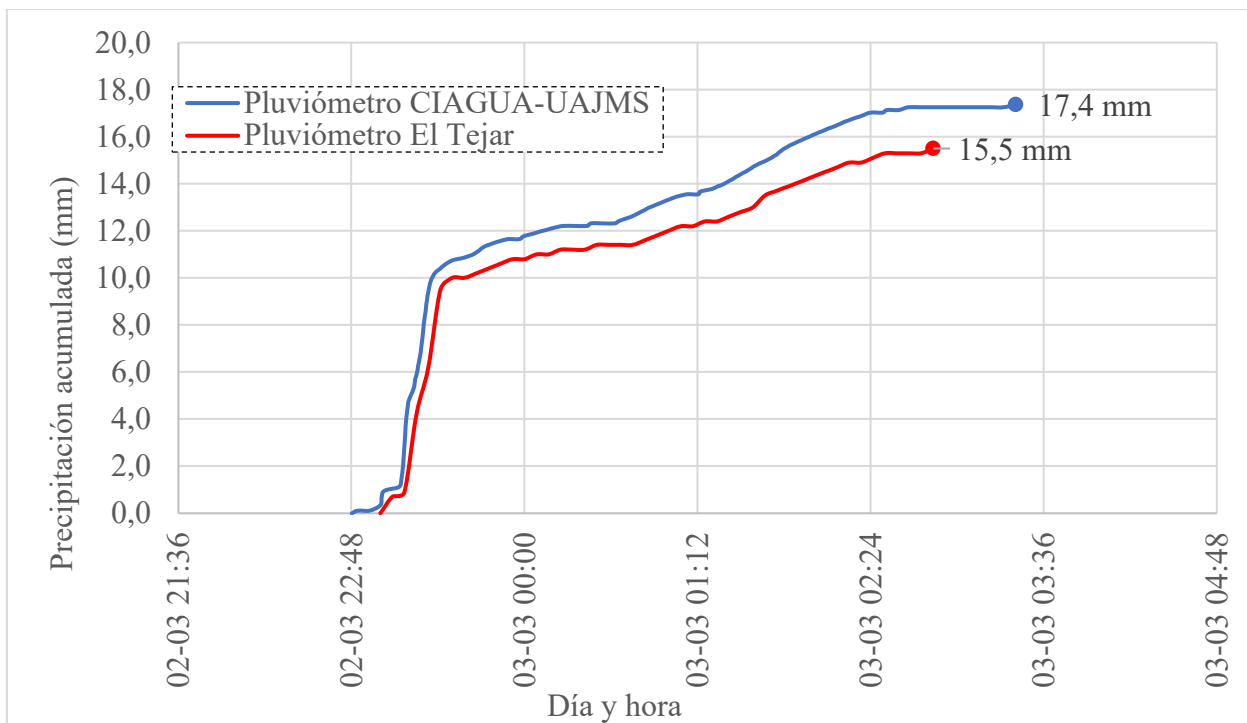


Figura 4.17 Comparación horaria 03-03-2025

Fuente: Elaboración propia

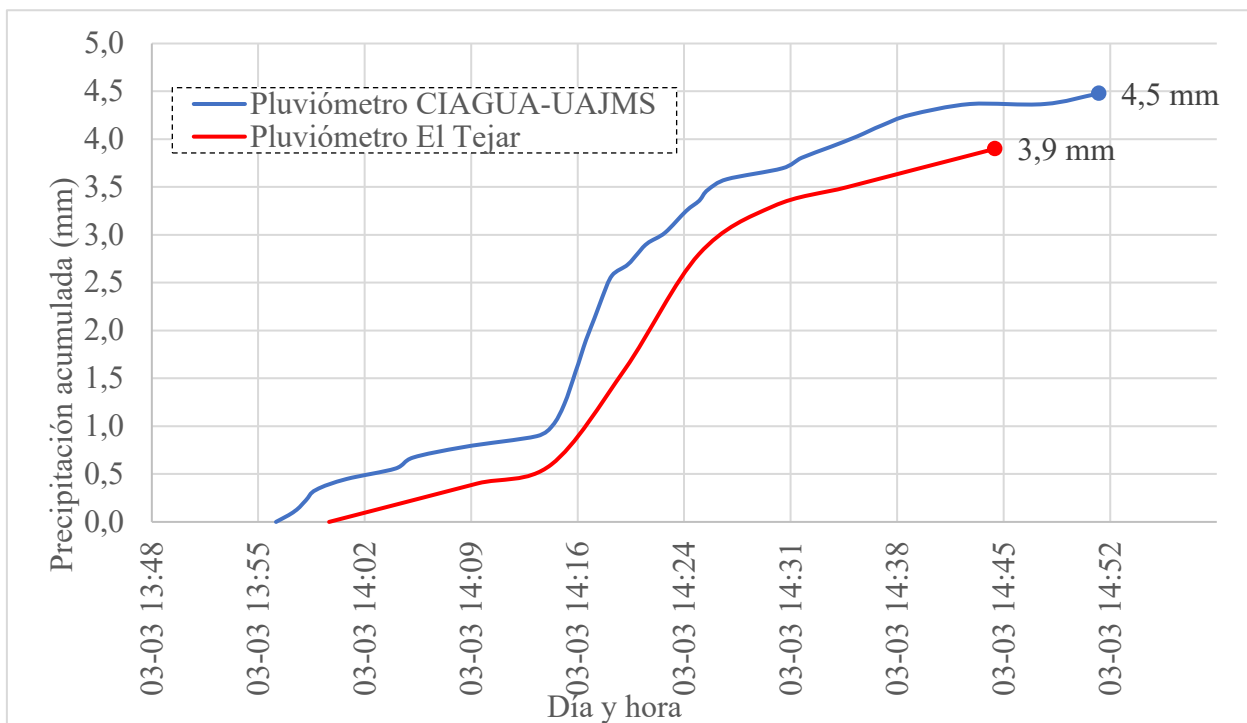


Figura 4.18 Comparación horaria 03-03-2025

Fuente: Elaboración propia

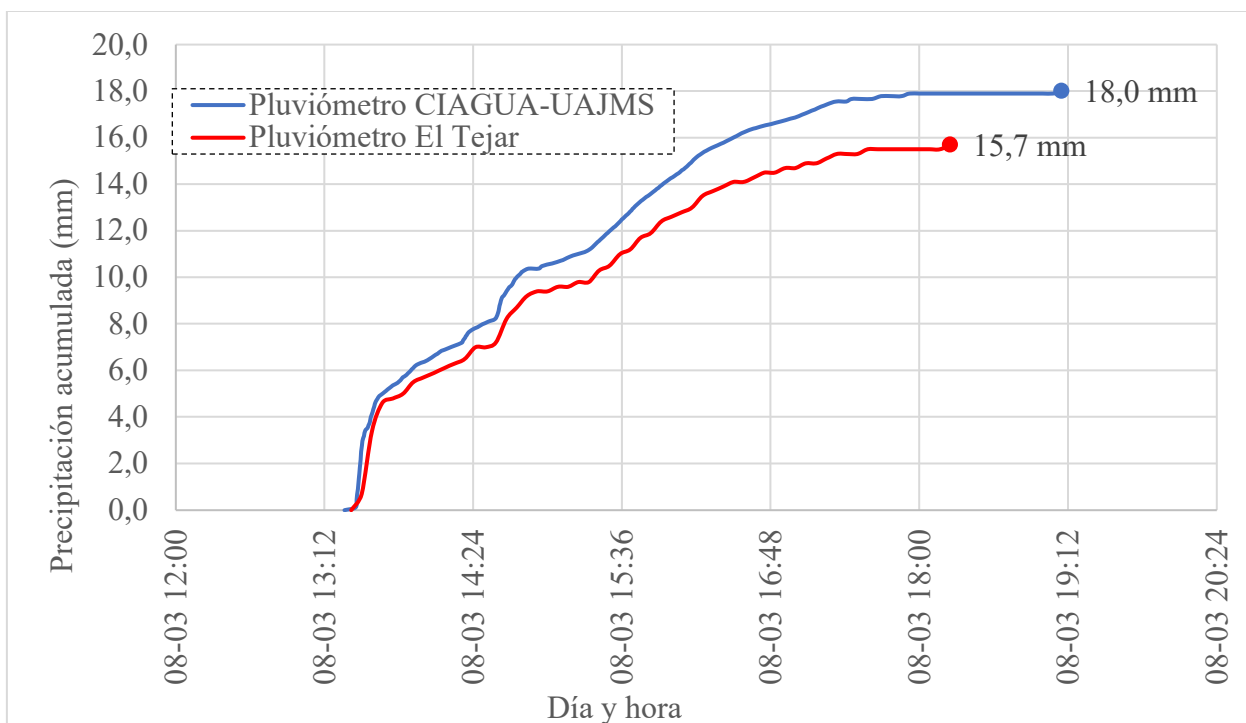


Figura 4.19 Comparación horaria 08-03-2025

Fuente: Elaboración propia

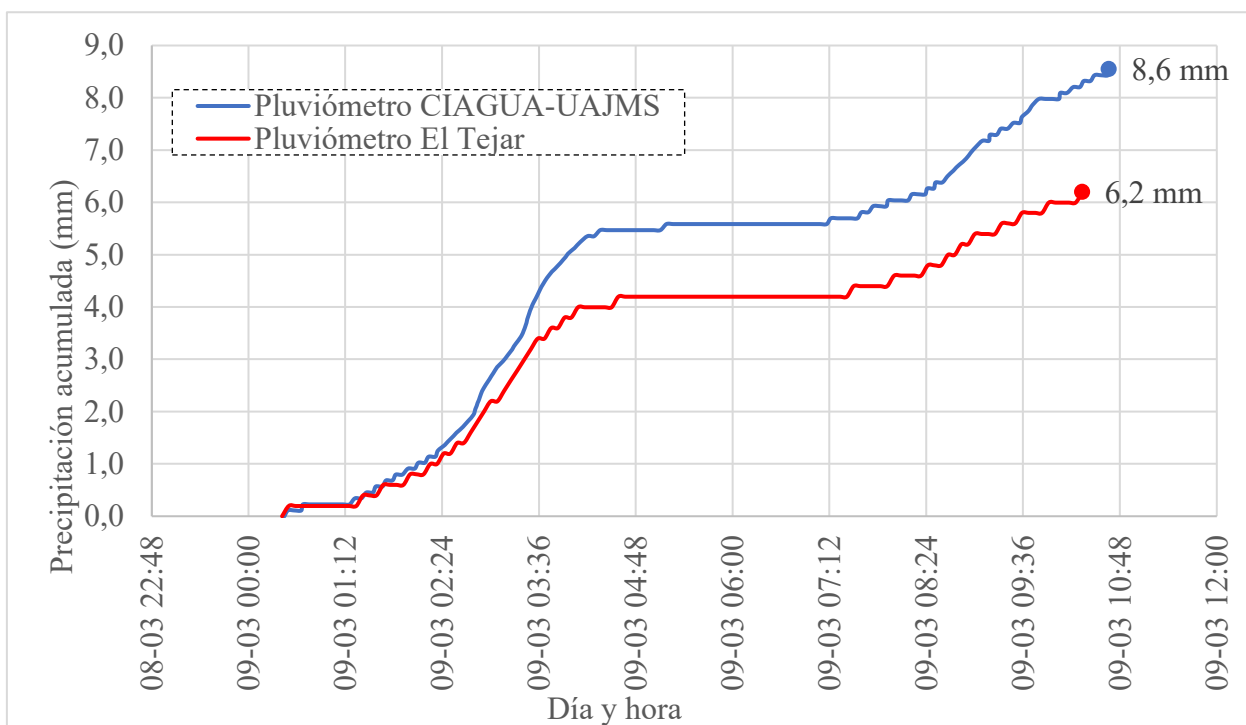


Figura 4.20 Comparación horaria 09-03-2025

Fuente: Elaboración propia

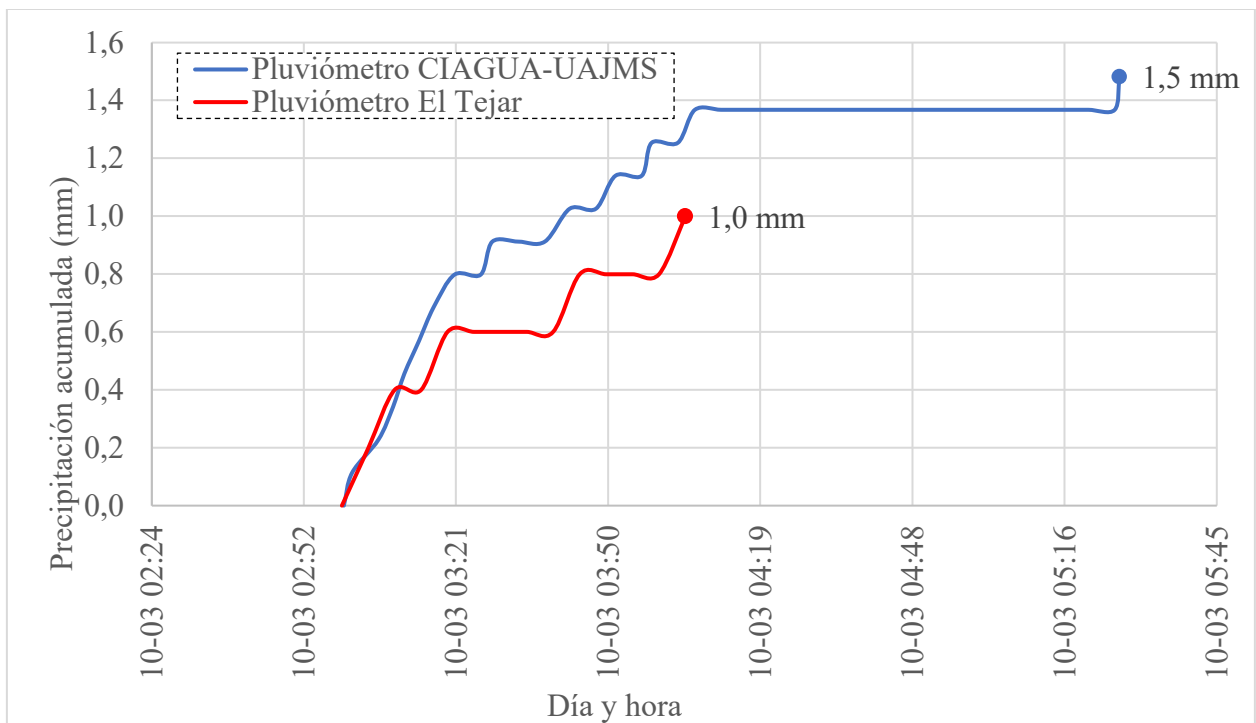


Figura 4.21 Comparación horaria 10-03-2025

Fuente: Elaboración propia

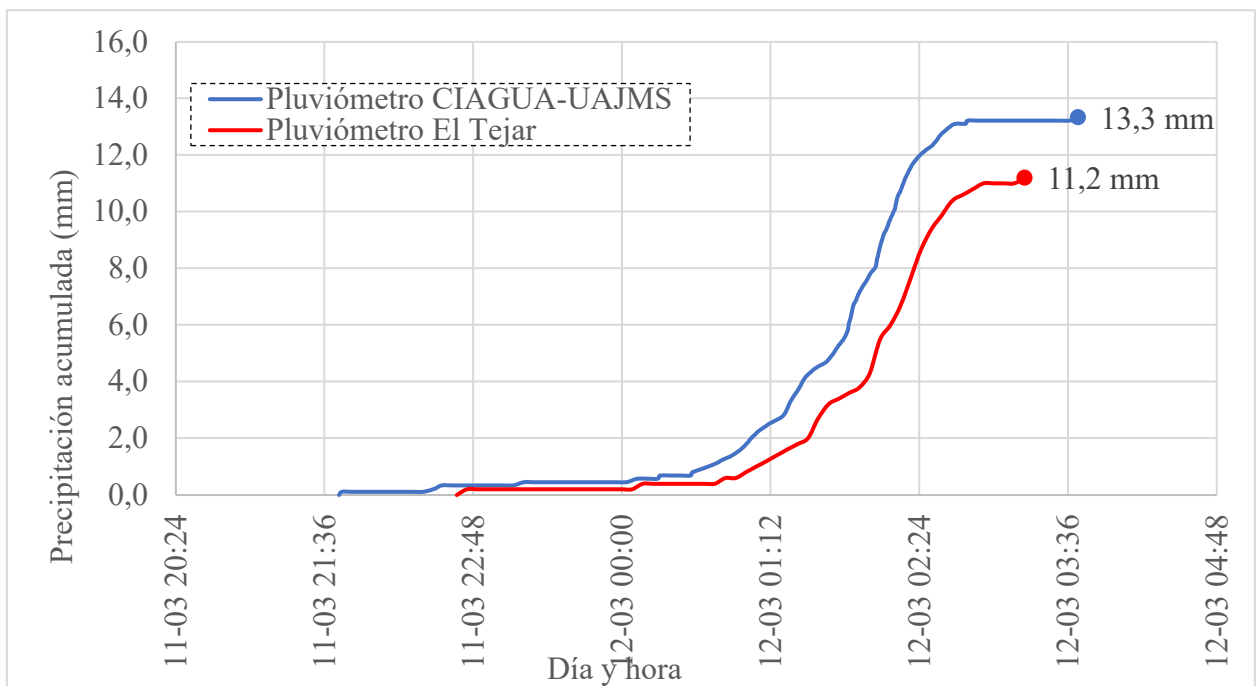


Figura 4.22 Comparación horaria 12-03-2025

Fuente: Elaboración propia

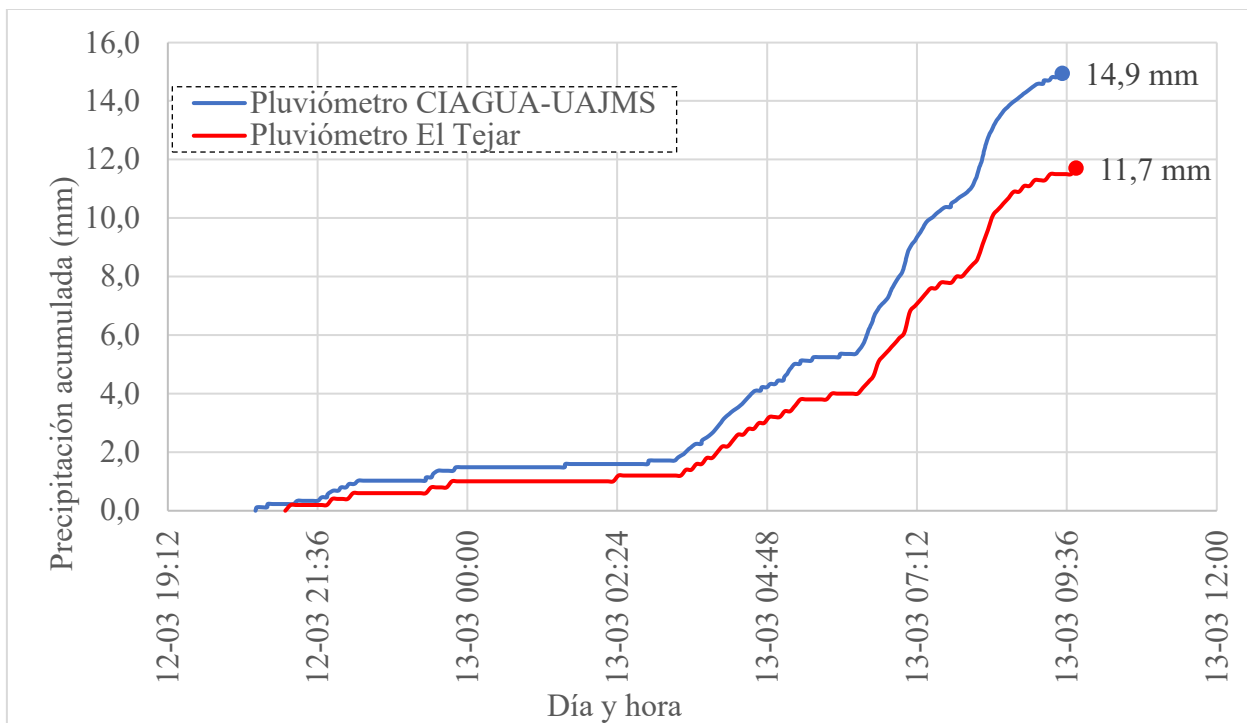


Figura 4.23 Comparación horaria 13-03-2025

Fuente: Elaboración propia

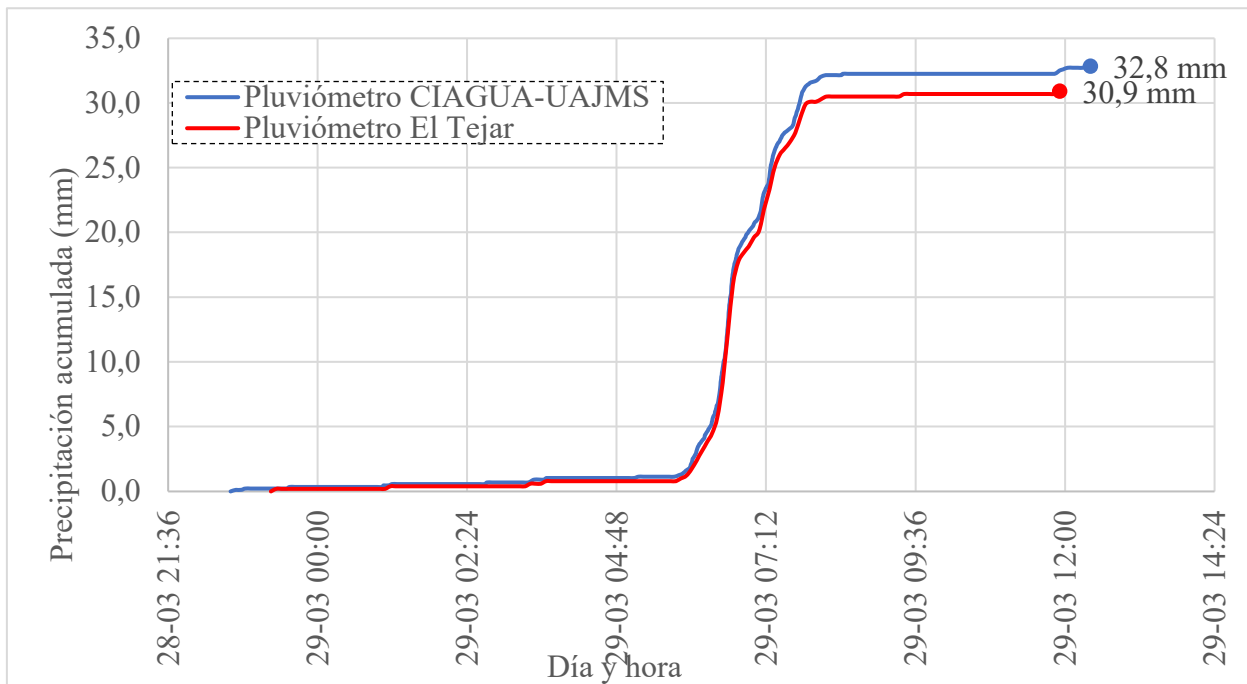


Figura 4.24 Comparación horaria 29-03-2025

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5.
ANÁLISIS TÉCNICO Y
ECONÓMICO

5.1 Contexto técnico

5.1.1 Diagnóstico de la red existente

Para entender cómo está funcionando actualmente la red de pluviómetros en Tarija, se hizo un análisis geoespacial y sistemática considerando tanto los equipos tradicionales como los automáticos. Se utilizaron los datos más actuales obtenidos directamente del sistema de información digital del SENAMHI, el área de influencia que se utilizó para evaluar la cobertura existente corresponde a un radio de cobertura de 12,5 km por pluviómetro, lo cual permitió identificar visualmente si los pluviómetros alcanzan un positivo grado de cobertura en el departamento.

Estaciones Convencionales

Actualmente 46 pluviómetros convencionales mostradas en la tabla 5.1 se encuentran activos dentro del departamento de acuerdo a los datos que se encuentran en la página oficial del SENAMHI, estos pluviómetros instalados que cubren alrededor 35% del departamento, de su extensión de 37 623 km². Aunque abarcan buena parte del territorio, tienen una gran limitación: los datos deben ser recolectados manualmente. Esto hace que la información no siempre esté disponible de inmediato ni sea constante.

Estaciones Automáticas

En contraste, los pluviómetros automáticos cuentan con una cifra 13 mostradas en la tabla 5.2 que se encuentran en estado activo según los datos que se encuentran en la página oficial del SENAMHI que cubren cerca del 15% del territorio, que representa muy poco con respecto a su superficie que es de 37 623 km², su número y distribución son menos, su principal ventaja es que generan datos en tiempo real, con más frecuencia y sin necesidad de que alguien esté presente para tomar lecturas. Esto las hace clave para una red moderna.

Tabla 5.1 Estaciones convencionales

Nro.	Estación	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
1	Cañas	308794,79	7576845,76	2078
2	Juntas	314153,52	7587101,08	1882
3	Yesera Norte	339212,23	7635863,49	2267

4	Itau	410153,95	7599665,15	970
5	Puente Aruma_H	384423,27	7686792,89	636
6	San Andres	312140,42	7607767,12	1987
7	San Jacinto Sud	321959,53	7609324,37	1820
8	Río Negro	401524,95	7569896,91	707
9	Aguaraycito	457270,26	7634632,94	396
10	Palmar Grande	454233,48	7618975,46	464
11	Pinos Sud	305732,93	7595355,64	2118
12	Entre Rios (TJA)	378751,58	7621722,08	1260
13	Narvaez	367385,52	7632150,08	18723
14	Saykan Perulas	386686,83	7598224,93	1356
15	El Puente	271697,86	7648594,63	2345
16	Puente Aruma	384424,38	7686797,77	636
17	Bermejo Aeropuerto	365344,22	7481251,95	385
18	Sella Quebrada	325726,68	7634168,50	2080
19	El Obispo	288398,52	7641743,14	2734
20	La Merced	326937,33	7563494,04	1509
21	Trancas	311674,10	7642746,45	2198
22	Coimata	314679,92	7621558,64	2027
23	El Común Caraparí	424561,06	7585890,68	825
24	Palos Blancos	419015,91	7631720,41	763
25	El Tejar (Tarija)	321686,95	7616483,30	1859
26	Emborozu	339836,90	7536802,21	881
27	Sanandita-PitagorasSRL	433908,04	7605336,30	1345
28	Gobernacion Yacuiba	430928,23	7566714,44	632
29	La Mamora	328392,61	7546523,42	1233
30	Ibibobo	500287,66	7617902,67	398
31	Yesera Sur	338538,99	7625338,50	2092
32	Campanario	295362,00	7619836,79	3460
33	Sachapera	443036,25	7604642,94	619
34	Turumayo	315852,17	7615192,23	1978

35	Yacuiba Aeropuerto (F)	432430,37	7570841,15	580
36	Puente Asloca_H	261914,20	7594861,92	2544
37	Pananti	436481,04	7596359,01	718
38	Villamontes Aeropuerto (F)	457721,01	7649606,65	360
39	Tarija Aeropuerto (F)	322831,26	7616377,64	1875
40	Villamontes Aeropuerto	457721,01	7649606,65	360
41	Tarija Aeropuerto	323170,19	7616096,66	1875
42	Yacuiba Aeropuerto	432430,37	7570841,15	580
43	Villa Montes (Bombeo)	447780,22	7648870,87	383
44	Tucumillas	310261,61	7625709,01	2557
45	San Josecito	372257,52	7660185,96	822
46	Villa Montes-Río Pilcomayo_H	447942,90	7649329,61	392

Fuente: Elaboración propia

Nota: Extraída página oficial del SENAMHI

Tabla 5.2 Estaciones Automáticas

Nro.	Estación	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
1	Lajas HCA (GPRS)	318944,16	7634546,05	2030
2	Yacuiba	432881,71	7572564,90	646
3	Presa Itavicia_EN (SAT)	432860,44	7588156,82	750
4	Tarija	323173,50	7616096,26	1854
5	Villamontes	458014,57	7649672,71	402
6	Villamontes_H (GPRS)	442428,18	7628864,90	370
7	Huacata_M (GPRS)	312854,85	7650987,25	2813
8	Villamontes (AJAYU)	455973,90	7666645,27	800
9	Presa San Jacinto_H (GPRS)	321347,14	7610389,36	1897
10	San Jacinto_M (GPRS)	321353,22	7610400,83	1892
11	Rio San Juan-El Puente (GPRS)	271672,43	7650444,05	2330
12	Carapari (AJAYU)	422888,36	7585920,75	818

13	Serranía Acheral	419635,90	7609084,56	1376
----	------------------	-----------	------------	------

Fuente: Elaboración propia

Nota: Extraída página oficial del SENAMHI

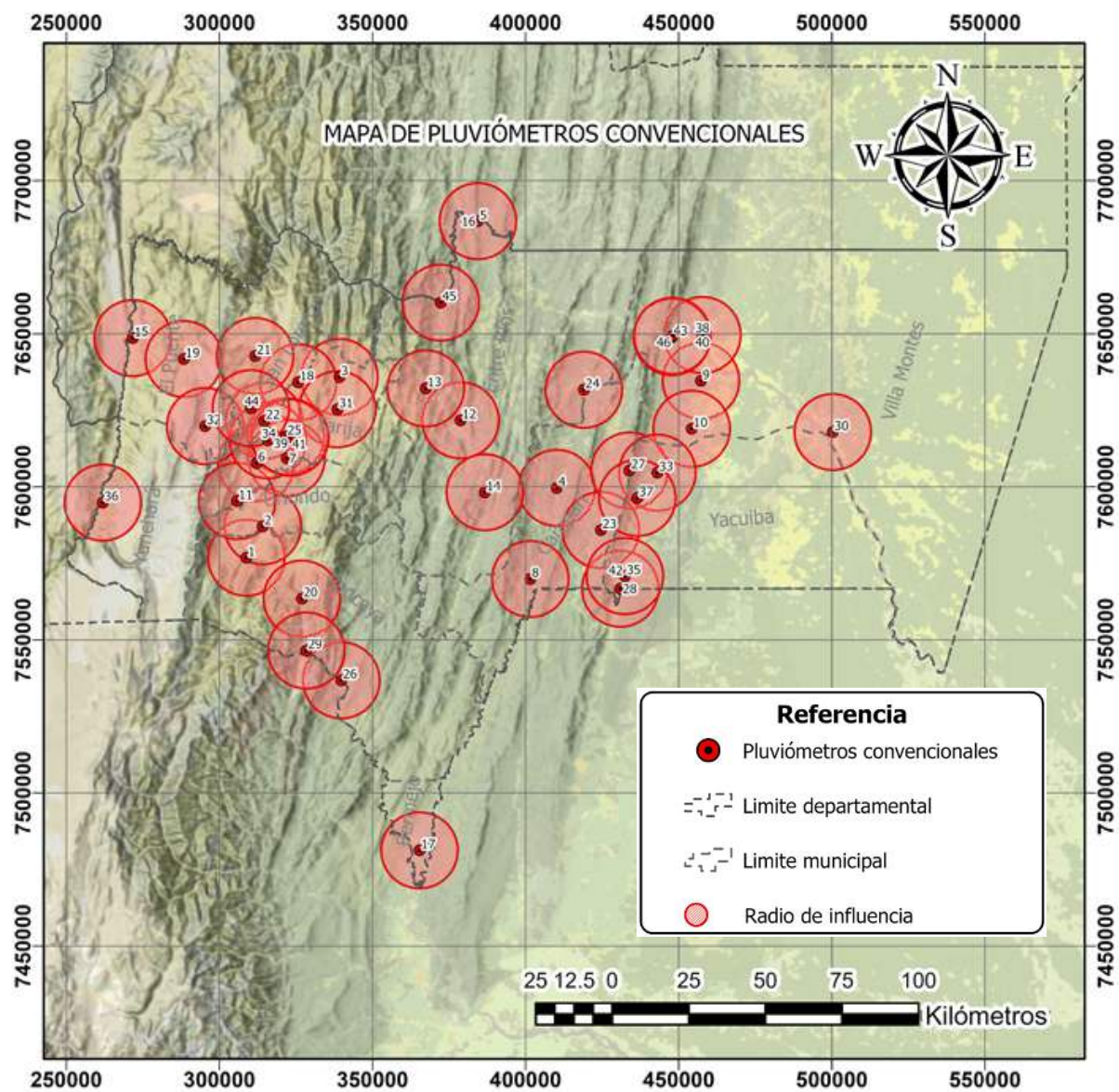


Figura 5.1 Distribución de pluviómetros convencionales

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

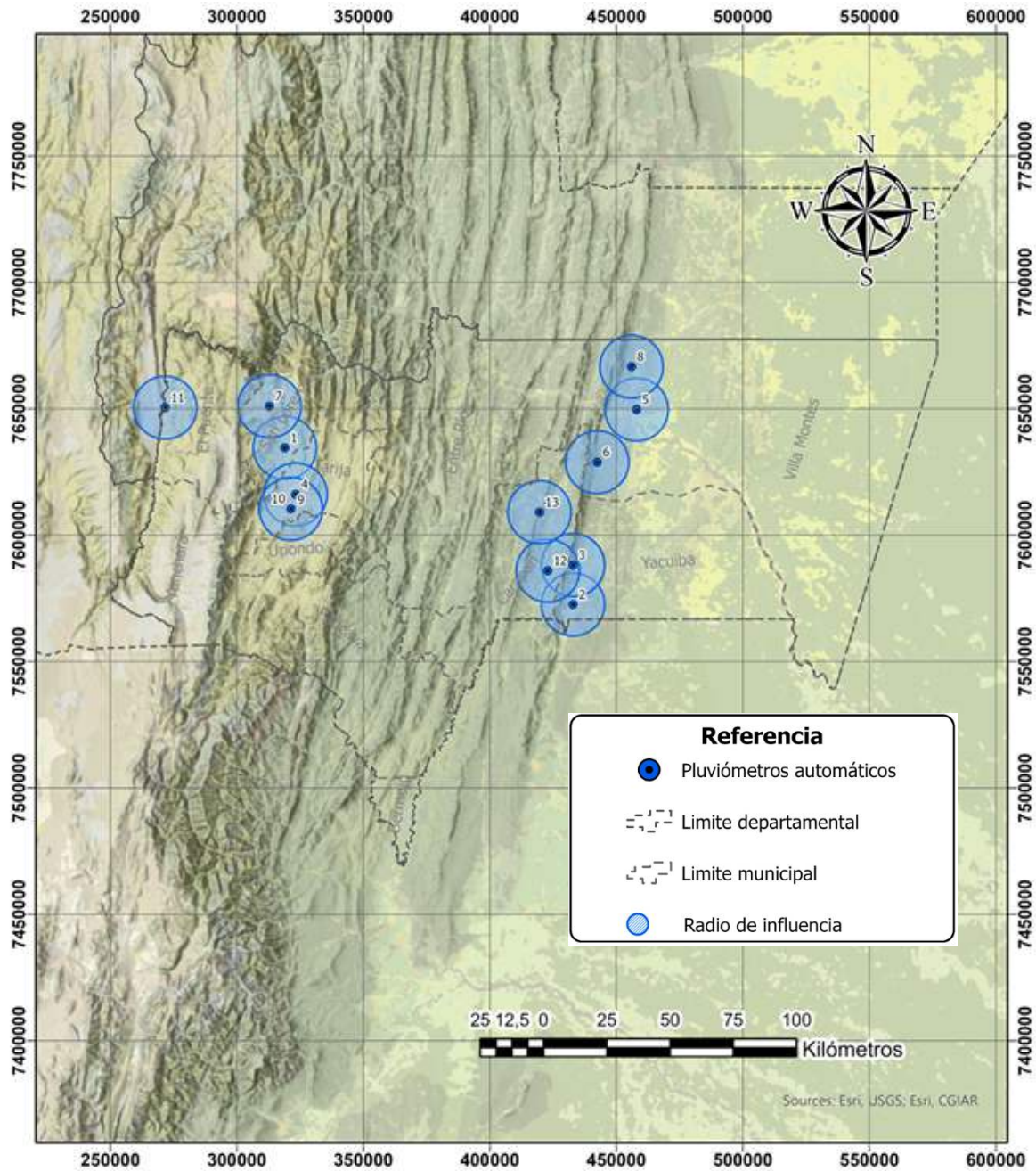


Figura 5.2 Distribución de pluviómetros automáticos

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

5.1.2 Análisis Multicriterio

El análisis fue enriquecido mediante la integración de variables fundamentales a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para tomar decisiones más acertadas, se integraron los mapas de:

- La red de drenaje superficial y la delimitación de cuencas hidrográficas a nivel 4 tal como se muestra en la tabla 5.3, con identificación específica de ríos principales y tributarios secundarios.
- La infraestructura vial existente, tanto caminos troncales como secundarios ver figura 5.4, que permitieron evaluar la accesibilidad a las zonas identificadas como críticas.
- La cercanía que existe a comunidades, consideradas importantes dado que garantiza el cuidado vigilancia y funcionamiento continuo, se muestra en la tabla 5.4 un recuento de las comunidades de acuerdo a cada municipio.

Esta información permitió superponer la red pluviométrica con los elementos geográficos clave, con el fin de detectar con mayor precisión aquellas regiones donde la cobertura actual resulta insuficiente o inexistente, evaluando al mismo tiempo su viabilidad logística para futuras intervenciones.

La superposición de las áreas de influencia de los pluviómetros con la red de ríos, se encontraron varias zonas importantes sin medición, especialmente en cuencas con mucha actividad hídrica. Estas áreas se priorizaron para la instalación de nuevas estaciones, tomando en cuenta también si se puede llegar fácilmente por carretera.

Tabla 5.3 Red de cuencas hidrográficas nivel 4

Cod_nivel	Nombre cuenca hidrográfica
8041	Parte Baja Qda. Vizcarra
8042	Parte Alta Qda. Vizcarra
8043	Parte Baja Qda. Vegas
8044	Parte Alta Qda. Vegas
8045	Parte Baja Mojon Aguada
8046	Qda. Toro Waykho
8047	Parte Alta Mojon Aguada

8048	Qda. Galeanes
8091	Parte Baja Qda. Cobre
8092	Parte Alta Remodana
8093	Parte Baja Remodana
8094	Río Puizara
8095	Laguna Pujzara
8096	Qda. Funcion
8097	El Cobre
8098	Qda. del Abra
8099	Qda. Palqui
8585	Intercuenca Río Bermejo-Naranjitos
8586	Río Orosas-Bermejo
8587	Desembocadura Río Grande de Tarija
8588	Río Itau
8589	Río Grande de Tarija
8619	Cañada Pozo El Indio
8629	Guayaparenda
8646	Río Zanja Honda
8649	Río Carapari
8651	Huasurenda
8652	Cañada Las Moras
8653	Intercuenca del Río Pilcomayo-Moras
8654	Qda. del Gritado
8655	Intercuenca del Río Pilcomayo-El Gringo
8656	Río Tati
8657	Intercuenca del Río Pilcomayo - Villamontes
8658	Río Huacaya
8659	Río Ingre
8673	Desembocadura del Río Pilaya
8674	Río Cajas
8675	Río Temporal

8677	Río Pilaya
8679	Río Camblaya
8691	Desembocadura del Río San Juan del Oro
8692	Desembocadura del Río Sococha
8729	Río Carandayti
S/C	Río Turcamarca

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4 Recuento de comunidades de acuerdo a municipios

Municipio	Recuento
Primera Sección - Entre Ríos	106
Primera Sección - Padcaya	85
Primera Sección - Tarija	68
Primera Sección - Uriondo	49
Primera Sección - Villa San Lorenzo	88
Primera Sección - Yacuiba	80
Segunda Sección - Bermejo	26
Segunda Sección - Caraparí	48
Segunda Sección - El Puente	69
Segunda Sección - Yunchará	51
Tercera Sección - Villamontes	66

Fuente: Elaboración propia

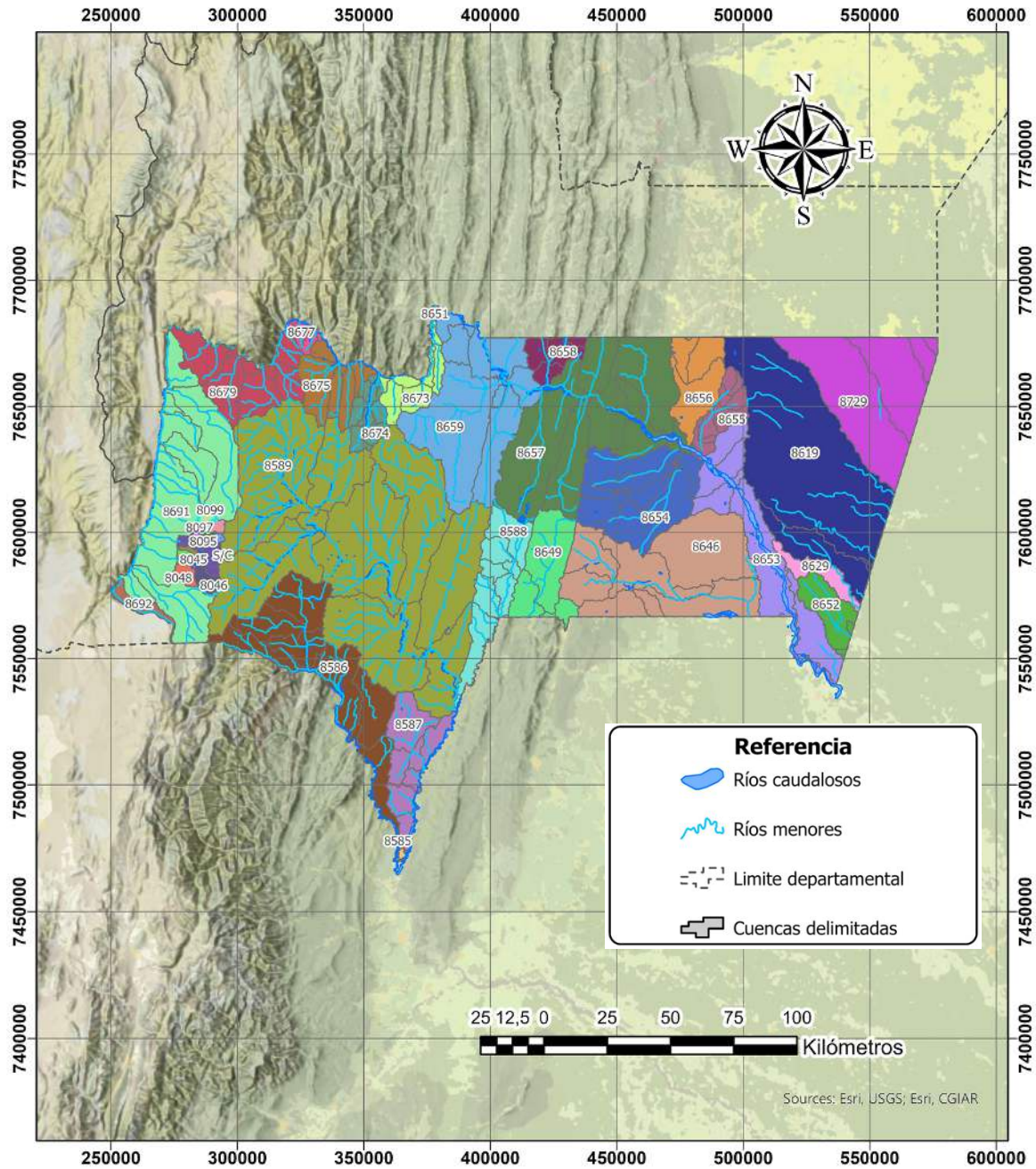


Figura 5.3 Cuencas y drenaje superficial

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

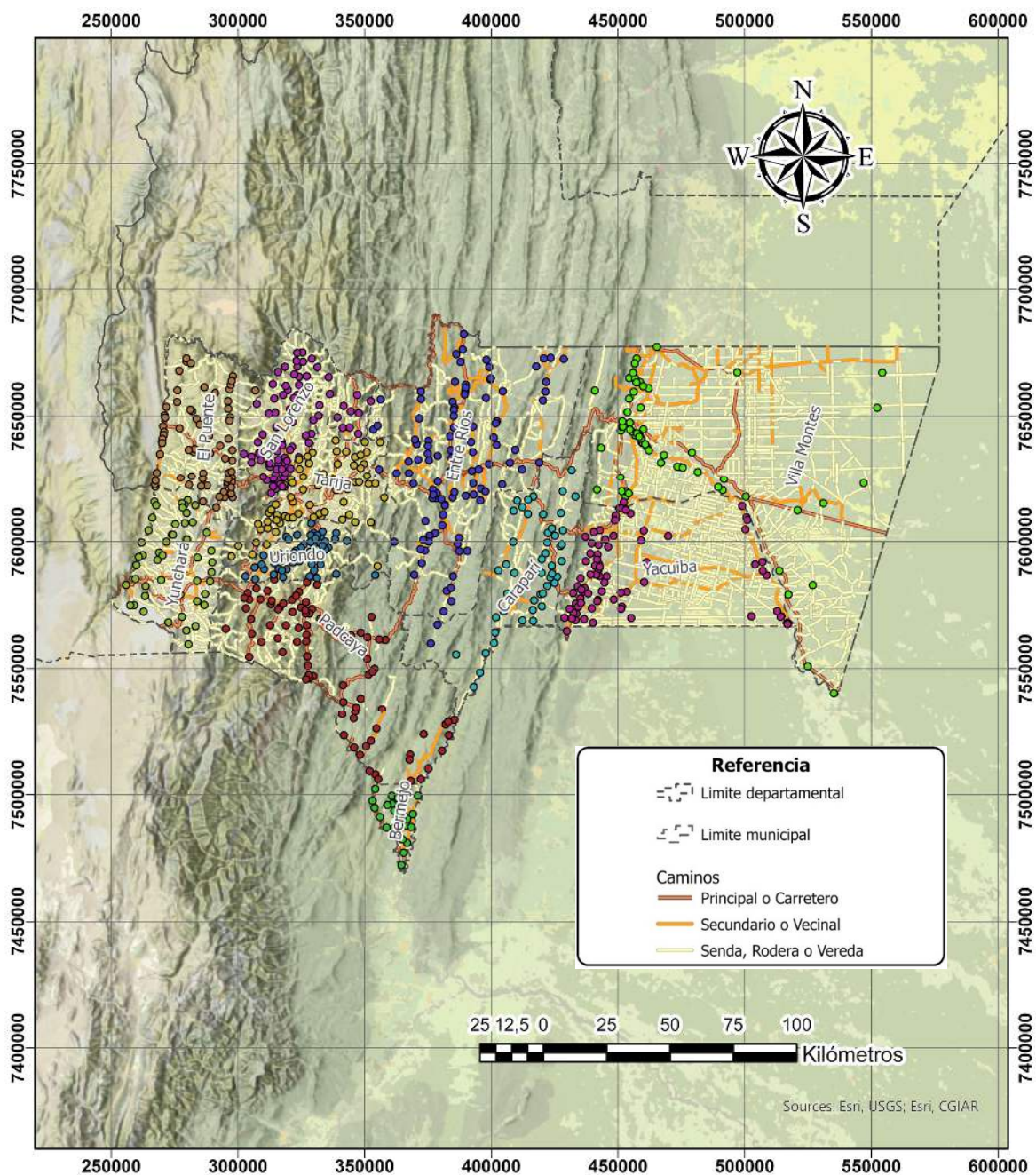


Figura 5.4 Vías de acceso y distribución de comunidades

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

Este análisis consistió en superponer mapas con diferentes tipos de información relevante y darle un peso específico a cada uno según su importancia generando un mapa final que nos indica con claridad cuáles son las zonas más convenientes para ampliar la red.

Se utilizó una escala para calificar cada área, considerando los siguientes cinco factores con sus respectivos pesos:

- Cercanía a pluviómetros convencionales (10%): Con el diagnóstico de pluviómetros convencionales se revisaron las zonas donde ya existen estaciones tradicionales dentro de un radio de 12,5 km. se buscó reforzar estas zonas, con pluviómetros automáticos, pero no es una prioridad.
- Acceso vial (10%): Se analizaron caminos troncales y secundarios para asegurar que las nuevas estaciones sean fácilmente accesibles, facilitando su instalación y mantenimiento.
- Cercanía a comunidades (30%): Este fue uno de los factores más importantes. Se priorizaron lugares donde haya apoyo comunitario de tal manera que se pueda revisar regularmente el estado del pluviómetro, el cual será menos propenso a ser dañado, robado o abandonado.
- Existencia de pluviómetros inactivos (50%): Aquí estuvo el mayor peso del análisis. Muchas estaciones ya están instaladas, pero no funcionan, por lo tanto, reactivarlas es una oportunidad valiosa para ahorrar recursos y mejorar la red rápidamente.
- Zonas ya cubiertas por pluviómetros automáticos (0%): No se consideraron áreas donde ya hay estaciones automáticas funcionando, para evitar duplicaciones innecesarias, evitando la redundancia innecesaria y promoviendo una distribución más equitativa y eficiente de los puntos de monitoreo.

La superposición ponderada permitió el cruce de información resultando en un mapa multicriterio con 6 zonas de puntaje máximo 5 que representa la zona más óptima, clasifica las zonas de acuerdo a la prioridad necesaria al igual que zonas nada recomendadas identificadas en la figura 5.5.

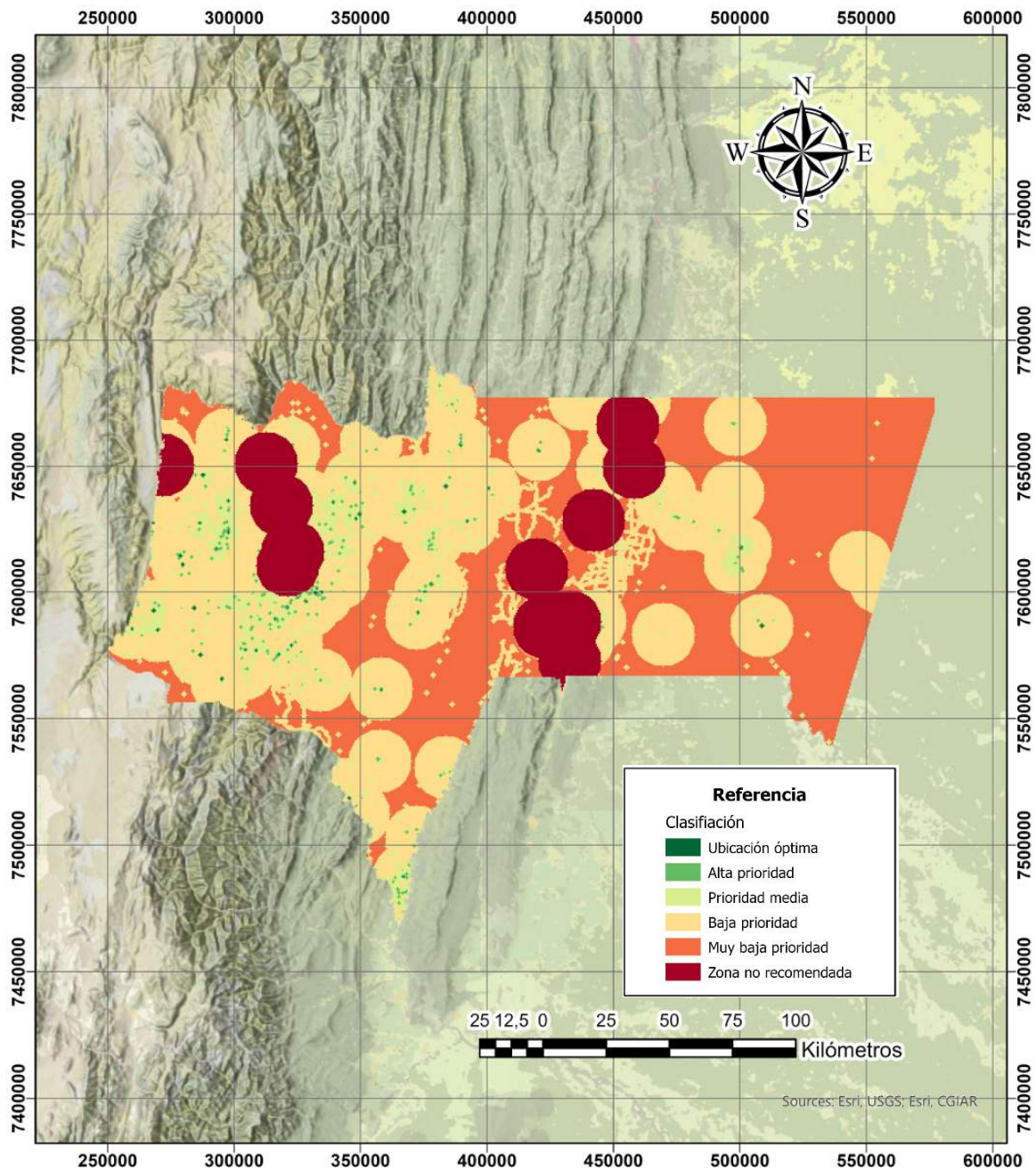


Figura 5.5 Análisis multicriterio de zonas optimas

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

Tabla 5.5 Pluviómetros propuestos

Nro.	Estación	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
1	San Telmo	372244,73	7506051,78	419
2	Yunchara	270004,28	7585347,11	3570
3	Calderillas	298340,03	7593572,15	2800
4	Capirenda	498268,97	7666784,93	701
5	Nogalitos	345630,94	7518436,65	698
6	Villa Nueva	297809,0	7636017,54	3410
7	Salinas	372828,993	7591939,60	1096
8	Pajonal	378751,58	7621722,08	1260
9	La Planchada	357503,55	7533313,81	840
10	San Bernardo	477980,66	7628986,43	343
11	Motovi	358164,80	7561430,54	974
12	Timboy	389295,77	7658204,47	770
13	Yuticancha	286658,51	7575079,32	3815
14	El Cajon	383853,15	7530549,91	505
15	Charaja_Tja	316290,9	7589451,34	1884
16	La Hondura	332512,15	7569648,48	2442
17	Turupayo	400963,07	7641244,59	786
18	Narvaez	367435,37	7632010,04	1718
19	Carrizal	267900,36	7627650,35	2447
20	Cañas	308789,75	7576851,68	2063
21	Presa El Molino	293153,90	7617106,48	3535
22	Rodeo TJA	279735,69	7610986,36	3391
23	Alto Cajas	347865,38	7643942,52	2980
24	Hito BR	555867,89	7603601,46	273
25	Calamuchita	332013,12	7599590,09	1696
26	Crevaux	508526,14	7586571,37	292
27	Tabasay	389117,72	7682307,72	615

28	Ibibobo	500295,11	7617893,48	398
29	Bermejo Aeropuerto	365344,21	7481251,95	385
30	Paicho Centro	297044,83	7660524,87	2570
31	Puerto Margarita	420968,88	7656572,95	495
32	Presa Calderas	336462,48	7627143,70	2162

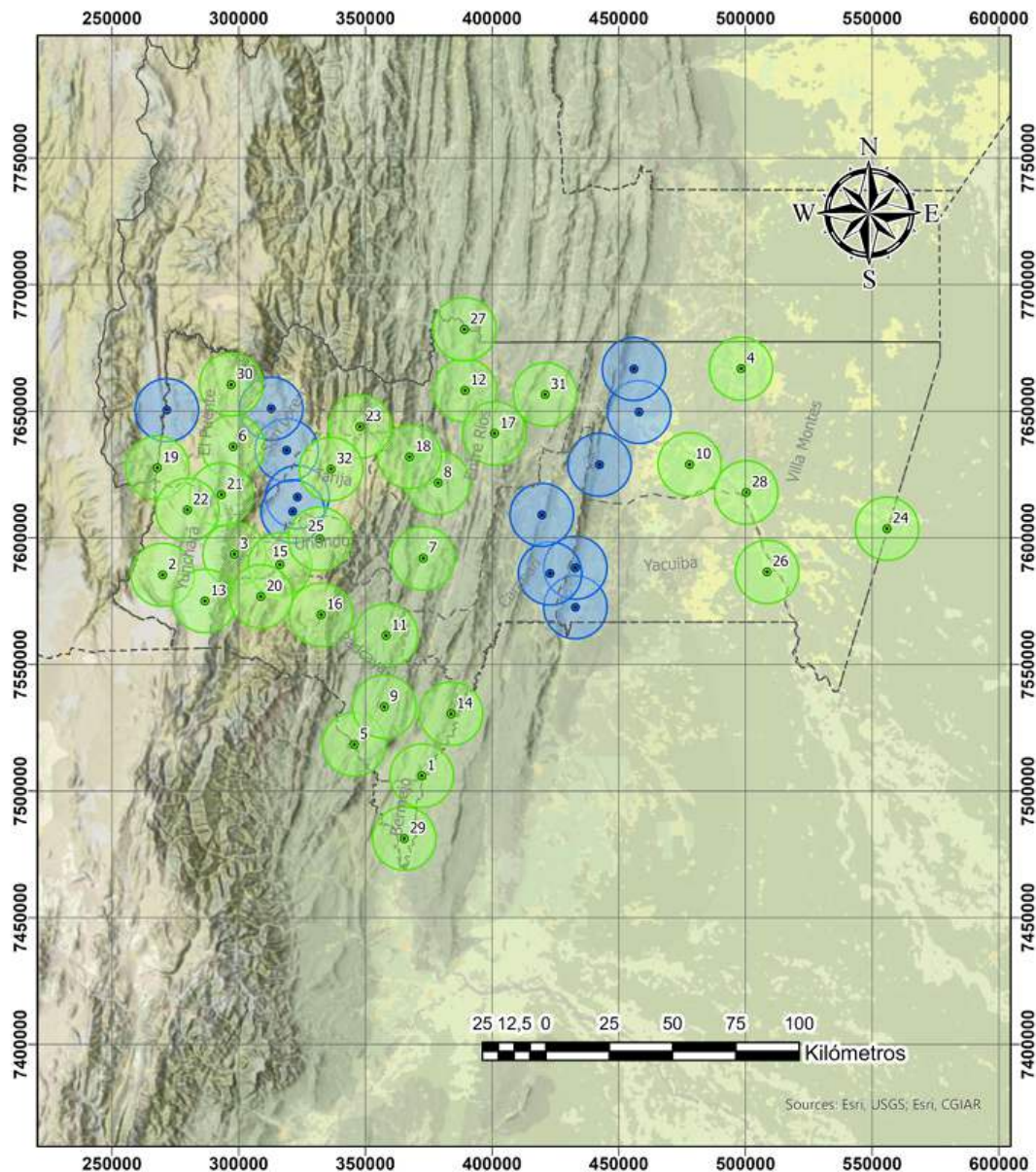


Figura 5.6 Distribución de pluviómetros propuestos

Fuente: Elaboración propia

Nota: Imagen extraída del software ArcGIS Pro

Tras la aplicación de los criterios técnicos mencionados y la evaluación integral de la red, se definió un conjunto de 32 ubicaciones estratégicas adicionales para la instalación de estaciones automáticas mostradas en la figura 5.5. De implementarse esta propuesta, la cobertura de la red se incrementaría el porcentaje actual hasta alcanzar aproximadamente un 50% del territorio departamental, considerando a una expansión estimada de más de 10000 km² en superficie cubierta.

Esta ampliación tendrá efectos positivos notables en la capacidad de observación meteorológica del departamento, permitiendo una respuesta más ágil y basada en datos ante eventos hidrometeorológicos extremos, como lluvias intensas o sequías prolongadas.

Se mejorará la resolución espacial de los registros y se obtendrá información más precisa y representativa que podrá ser utilizada para modelos hidrológicos, sistemas de alerta temprana, planificación territorial, agricultura, y gestión de riesgo, esta propuesta contribuye no solo a la densificación de la red pluviométrica, sino a su transformación hacia un sistema moderno, confiable y alineado con los estándares actuales de monitoreo ambiental.

5.1.3 Modelos comerciales

Se examinan a continuación modelos de pluviómetros tipo cubeta basculante ampliamente utilizados en el mercado internacional. Para esta evaluación se consideraron únicamente variables técnicas claves, tales como la resolución mínima y el área del colector, ambas directamente relacionadas con la capacidad de captar eventos de precipitación ligera-extrema y garantizar lecturas precisas.

Los modelos seleccionados están diseñados para aplicaciones profesionales o semiprofesionales. Su resolución mínima de hasta 0,1 mm permite captar con gran exactitud lluvias de baja intensidad, lo cual es especialmente útil en contextos de investigación climática, monitoreo de cuencas o sistemas de alerta temprana. La diferencia en el área del colector también es relevante: un colector más grande permite obtener una mayor cantidad de datos con menor dispersión estadística.

Tabla 5.6 Comparativa técnica de pluviómetros comerciales

Marca y Modelo	Resolución (mm)	Área del Colector (cm ²)
Barani MeteoRain SEB200	0,2	200
EML ARG314	0,2	314
EML SBS314	0,1	314
Casella TBRG	0,1	400
Kisters TB4	0,2	200
Kisters TB3	0,1 / 0,2 / 0,5 / 1,0	200 – 282,8
Kisters TB7	0,2 / 0,5	200
Texas Electronics TR-525M	0,2	200
Delta Ohm HD2013	0,1 / 0,2 / 0,5	400
NiuBoL Acero Inoxidable	0,1	200

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Parámetros técnicos del pluviómetro propuesto

El prototipo de pluviómetro desarrollado en este proyecto posee una resolución mínima de 0,1 mm, lo cual es adecuado para aplicaciones académicas y monitoreos de carácter ambiental básico. El área del colector, de 560 cm², asegura un balance entre precisión y estabilidad estructural. En su construcción se emplearon materiales plásticos tales como polipropileno para el embudo con acabado liso, para el cuerpo PVC y la base de impresión 3d y componentes metálicos con tratamiento anticorrosivo.

Tabla 5.7 Parámetros técnicos del pluviómetro propuesto

Característica	Valor
Resolución mínima (mm)	0,1
Área del colector (cm ²)	560

Fuente: Elaboración propia

5.2 Contexto económico

5.2.1 Mercado actual

En el escenario actual de Bolivia, la adquisición de instrumentos de medición meteorológica, tales como pluviómetros, se encuentra profundamente condicionada por la necesidad de importarlos desde el extranjero. El mercado nacional no cuenta con fabricantes consolidados de este tipo de instrumentos, lo que obliga a recurrir a soluciones internacionales con elevados costos logísticos y de adquisición.

Se llevó a cabo un relevamiento de precios de pluviómetros tipo cubeta basculante disponibles en el mercado internacional. Estos dispositivos varían considerablemente en costo, según sus especificaciones técnicas clave como la resolución mínima de medición y el área del colector. Los precios fluctúan entre U\$S 200 y U\$S 1000, lo que refleja diferencias sustanciales en precisión, materiales de construcción, durabilidad y marca.

Muchos de estos equipos requieren sistemas de adquisición de datos complementarios, lo cual incrementa aún más su precio final. Esta situación limita su uso extendido en instituciones educativas, pequeñas organizaciones de monitoreo ambiental o proyectos rurales de bajo presupuesto, donde los costos iniciales son una barrera importante.

Tabla 5.8 Precios de pluviómetros internacionales

Marca y Modelo	Precio (\$us)
Barani MeteoRain SEB200	209
EML ARG314	410
EML SBS314	655
Casella TBRG	976
Kisters TB4	850
Kisters TB3	950
Kisters TB7	600
Texas Electronics TR-525M	250
Delta Ohm HD2013	895
NiuBoL Acero Inoxidable	200

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Pluviómetro propuesto

Como parte de una estrategia de desarrollo tecnológico nacional, se propuso y construyó un prototipo de estación meteorológica que incluye un pluviómetro tipo cubeta basculante. El diseño contempla además una unidad electrónica común para procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos, lo cual optimiza los recursos y reduce redundancias en la estructura del sistema.

Para la conversión de costos locales, se tomó como referencia el tipo de cambio oficial del 10 de abril de 2025, donde 100 \$us equivalían a 696 Bs. A partir de esta equivalencia se estimó que el costo total de producción del prototipo es de aproximadamente 157,68 \$us. Este valor abarca tanto componentes electrónicos como piezas mecánicas, incluyendo aquellas fabricadas mediante impresión 3D.

Es importante señalar que este cálculo no incluye los costos de mano de obra ni de calibración técnica en laboratorio, ya que el proyecto fue desarrollado en un contexto académico y de investigación. Aun así, el costo global de la estación meteorológica es competitivo en relación con productos importados, que muchas veces ofrecen funcionalidades similares a precios significativamente más altos. Esta propuesta permite avanzar en una solución adaptada al entorno local, con posibilidades de mejora y ampliación futura.

Tabla 5.9 Precio de pluviómetro propuesto

Componente	Cantidad	Unidad	Precio	
			Unitario (Bs)	Precio (Bs)
ESP32 Wifi Bluetooth 30pines	1	Pza.	85,00	85,00
Sensor Magnético Efecto Hall KY003	1	Pza.	15,00	15,00
Módulo Micro SD	1	Pza.	14,00	14,00
Módulo Clock DS3231	1	Pza.	30,00	30,00
Alimentación (Panel solar)	1	Pza.	271,00	271,00
Cable 22-26 AWG	1	Pza.	24,00	24,00

Colector de polipropileno	1	Pza.	35,00	35,00
Tubo de PVC	1	Pza.	25,00	25,00
Tornillo M5 x 15 mm	3	Pza.	1,50	4,50
Tornillo M3 x 40 mm	2	Pza.	3,50	7,00
Varilla 3 mm	1	Pza.	5,00	5,00
Impresión 3D Filamento	390,70	g	0,42	163,93
Impresión 3D Resina	29,10	ml	0,79	23,02
Pintura en aerosol	1	Pza.	25,00	25,00
Estructura metálica	1	Pza.	370,00	370,00
Total				1097,44

Fuente: Elaboración propia

5.3 Comparación técnica-económica general

La comparación entre los pluviómetros comerciales disponibles en el mercado internacional y el prototipo desarrollado localmente en Bolivia permite evidenciar ventajas y limitaciones desde una perspectiva técnica y económica. Esta evaluación es particularmente relevante para contextos educativos, comunitarios y de monitoreo ambiental, donde el acceso a equipos especializados puede estar restringido por factores económicos o logísticos.

Desde el punto de vista técnico, el pluviómetro nacional ofrece una resolución mínima de 0,1 mm y un área de captación de 560 cm². Estas especificaciones son comparables e incluso superiores a algunos modelos de gama media en el mercado internacional. La capacidad de detectar lluvias de baja intensidad con precisión lo hace adecuado para investigaciones hidrológicas, sistemas de alerta temprana y seguimiento climático en microcuencas. A pesar de no contar con certificaciones internacionales ni materiales de alta gama, su funcionalidad básica resulta suficiente para aplicaciones académicas y proyectos de investigación en etapas iniciales. Esto lo convierte en una herramienta útil para instituciones universitarias y centros de formación técnica que requieren soluciones prácticas para la toma de datos meteorológicos queda en evidencia en la tabla 5.3 y 5.4.

En el plano económico, el prototipo presenta una diferencia significativa respecto a los modelos importados. Con un costo total estimado de \$us 157,68, incluyendo tanto los

componentes electrónicos como las partes estructurales, el prototipo representa una opción altamente accesible. En comparación, los precios de pluviómetros comerciales oscilan entre los \$us 200 y los \$us 976, sin incluir, en muchos casos, los sistemas complementarios de adquisición de datos los cuales se observan en la tabla 5.5. Este aspecto económico resulta determinante para entidades educativas con presupuestos limitados, ONGs, gobiernos municipales y comunidades rurales que desean implementar soluciones de monitoreo sin incurrir en altos costos.

Una de las fortalezas más destacadas del prototipo es su diseño modular y abierto, que facilita su adaptación y mejora continua. Esta característica permite incorporar nuevos sensores, actualizar el sistema de comunicación digital, o adaptar su estructura para diferentes entornos físicos y climáticos. Esta flexibilidad también promueve el aprendizaje técnico y la innovación en el desarrollo de tecnologías locales, fortaleciendo la autonomía científica y tecnológica del país. Además, su bajo costo favorece la posibilidad de producirlo en serie o replicarlo en distintas regiones, ampliando su alcance y utilidad práctica.

Las principales observaciones de la comparación técnica-económica son:

- Resolución comparable a equipos profesionales.
- Área de recolección superior al promedio.
- Accesibilidad económica por su fabricación a bajo costo.
- Potencialmente reproducible uso de materiales accesibles.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La presente investigación demuestra que el diseño y la construcción de un pluviógrafo mediante tecnologías de impresión 3D y plataformas de hardware libre como Arduino no solo es técnica y operativamente viable, sino que representa una alternativa altamente económica frente a los dispositivos comerciales, reduciendo significativamente las barreras de acceso a instrumentos de monitoreo hidrometeorológico, aspecto particularmente relevante en Bolivia, país que presenta una cobertura desigual y deficiente de estaciones meteorológicas, especialmente en áreas rurales, y de difícil acceso.
- Las pruebas experimentales en laboratorio, que incluyeron calibraciones estáticas y dinámicas bajo condiciones controladas y simulación de eventos de precipitación, permitieron verificar la precisión volumétrica del sistema de cubeta basculante y la confiabilidad del sensor de efecto Hall, estos resultados evidenciaron una buena correlación entre los valores esperados y los medidos, confirmando la robustez del dispositivo y su capacidad para registrar eventos de lluvia con resolución suficiente para aplicaciones educativas, científicas y operativas, lo cual constituye un paso fundamental hacia la estandarización e implementación del dispositivo en condiciones reales de campo.
- El diseño modular, íntegramente fabricado mediante impresión 3D, constituye uno de los principales aportes del proyecto, su característica permite su rápida replicación, ensamblaje y mantenimiento, así como su adaptación a diversos contextos geográficos, climáticos y técnicos. El uso de software paramétrico como SolidWorks facilita la modificación de componentes según necesidades, lo que maximiza la aplicabilidad del dispositivo en distintas zonas del país.
- Durante la etapa de validación en campo, el prototipo fue instalado junto a un pluviómetro totalizador convencional y un pluviómetro automático comercial, los registros diarios y horarios obtenidos mostraron una alta similitud, confirmando la confiabilidad de los datos generados, además, su mayor resolución temporal permitió identificar con mayor precisión la duración efectiva de los eventos pluviales, lo cual resulta crucial para el análisis hidrológico, la planificación de obras hidráulicas y la gestión de emergencias ante lluvias intensas.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda avanzar hacia la estandarización de las especificaciones técnicas del pluviógrafo, de modo que se facilite su producción en serie y se garantice la interoperabilidad de los datos generados.
- Es necesario adaptar el diseño a diferentes condiciones altitudinales, tipos de precipitación y escenarios ambientales extremos presentes en las diversas regiones del país, es muy valioso probar el equipo en distintas regiones del país para asegurarse de que funciona correctamente bajo diferentes condiciones climáticas, estas pruebas permitirán ajustar detalles del diseño o del software para hacerlo aún más eficiente.
- Se plantea también la evolución hacia una estación meteorológica compacta e integral, que incorpore sensores adicionales para variables como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar y otros parámetros relevantes. Esto permitiría contar con una solución modular de bajo costo, capaz de proporcionar un monitoreo climático completo y continuo, fortaleciendo así las capacidades locales para la gestión ambiental y la respuesta ante eventos extremos.
- Se propone gestionar alianzas estratégicas con el SENAMHI, instituciones públicas, ONGs, a fin de escalar esta tecnología en el marco de políticas nacionales sobre cambio climático, gestión del agua y soberanía tecnológica.
- La solución propuesta tiene un alto potencial para contribuir a la descentralización de la recolección de datos meteorológicos en Bolivia, su bajo costo de producción, facilidad de replicación y autonomía frente a proveedores especializados permiten la creación de redes de monitoreo lideradas por universidades, centros de investigación, gobiernos locales y comunidades organizadas.