



Comparación de mediciones de niveles de agua en la estación hidrológica Pisac del río Vilcanota utilizando datos de un sensor Lidar

Max Josemar Gutierrez Reynaga
Waldo Sven Lavado Casimiro
Miguel Arestegui Matutti



Dirección de Hidrología
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Enero 2025

Comparación de mediciones de niveles de agua en la estación hidrológica Pisac del río Vilcanota utilizando datos de un sensor Lidar

Max Josemar Gutierrez Reynaga
Waldo Sven Lavado Casimiro
Miguel Arestegui Matutti



Comparación de mediciones de niveles de agua en la estación hidrológica Pisac del río Vilcanota utilizando datos de un sensor Lidar

Presidente Ejecutivo

MSc. Gabriela Teofila Rosas Benancio

Director de Hidrología

Ing. Oscar G. Felipe Obando

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

PhD. Waldo Lavado Casimiro

Autores:

Max Josemar Gutierrez Reynaga

Waldo Sven Lavado Casimiro

Miguel Arestegui Matutti

Diseño y diagramación por:

Max Josemar Gutierrez Reynaga

DHI – SENAMHI

Primera edición: enero de 2025

Depósito Legal N° 2025-00359

Estudio disponible en:

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3822>

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide N°785, Jesús María, Lima – Perú. Teléfono: (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso

Referencia sugerida:

Gutiérrez, M.J., Lavado, W.S. y Arestegui, M. (2025), *Comparación de mediciones de niveles de agua en la estación hidrológica Pisac del río Vilcanota utilizando datos de un sensor LIDAR*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3822>

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
Caso de estudio	4
2. DATOS Y MÉTODOS	5
2.1 Datos	5
2.1.1 Estación Hidrométrica Pisac (EHP)	5
2.1.2 Sensor Lidar Distance Sensing	5
2.1.3 Calibración de los datos de EPH y Lidar	6
2.2 Métodos	7
2.2.1 Análisis comparativo	7
3. RESULTADOS	8
3.1 Comparación basada en Eventos	9
3.2 Comparación a largo Plazo	11
3.2.1 Wilcoxon Signed-Rank Test	11
3.2.2 Loess Seasonal Decomposition (LSD)	12
4. CONCLUSIONES	16
5. RECOMENDACIONES	17
6. REFERENCIAS	18
ANEXOS	19

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa de Ubicación de la estación Pisac	4
Figura 2: En color rojo el sensor de la EHP en azul la estación LIDAR sobre el río Vilcanota	6
Figura 3: Datos Pisac y Lidar sin Calibración.....	6
Figura 4: Serie Pisac y Lidar calibrada.....	7
Figura 5: Comparación de hidrogramas de los eventos 9 (muy bueno) y 2(No satisfactorio).10	
Figura 6: Comparación de hidrogramas para el evento 7.....	10
Figura 7: Comparación de diagrama de caja de las diferencias entre los niveles de agua de Lidar y EHP	11
Figura 8: Comparación de los componentes de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD.....	12
Figura 9: Comparación de la Tendencia Estimada de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD.	13
Figura 10: Comparación de la componente Estacional de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD.	13
Figura 11: Comparación de la componente residual de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD ...	14
Figura 12: Cambio porcentual en la comparación de la profundidad entre los medidores.	15

Lista de Tablas

Tabla 1: Métricas de comparación y criterios de evaluación,.....	8
Tabla 2 : Eventos seleccionados de tormenta para el análisis.....	9
Tabla 3: Comparación y rendimiento basado en eventos.....	9

RESUMEN

El monitoreo de los niveles de agua de los ríos en las cuencas hidrográficas es de vital importancia para la gestión del agua, la planificación del desarrollo sostenible y la toma de decisiones en diversos sectores, como la agricultura y la conservación del medio ambiente. En el sur de Perú, la cuenca del río Vilcanota es una de las regiones clave en términos de recursos hídricos y su gestión adecuada es esencial para garantizar el bienestar de las comunidades locales y la protección de los ecosistemas acuáticos.

El presente estudio se centró en evaluar la precisión y confiabilidad de un sensor **Lidar** de gama media, comparado con la Estación Hidrológica Pisac (**EHP**), ambos ubicados en el mismo punto sobre el río Vilcanota. La EHP es una estación de monitoreo hidrológico automatizada que registra de manera continua los niveles de agua, mientras que el sensor **Lidar** utiliza tecnología láser para medir la distancia entre el sensor y la superficie del agua.

Para llevar a cabo el estudio comparativo, se recolectaron datos de la **EHP** y del sensor **Lidar**, durante el periodo de 01/01/2023 al 20/04/2023. Estos datos fueron analizados y contrastados para evaluar la concordancia entre ambos sensores y determinar la precisión del sensor **Lidar** en la medición de los niveles de agua.

Los resultados obtenidos indican que el sensor **Lidar** estima mediciones precisas y detalladas de los niveles de agua en la cuenca del río Vilcanota, en Pisac. La comparación con los datos de la **EHP** mostró una concordancia estadística significativa, lo que respalda la confiabilidad del sensor Lidar como herramienta eficaz para el monitoreo de los niveles de agua de ríos.

Palabras clave: río Vilcanota, Cusco, niveles de agua, hidrología, Lidar,

Comparación de mediciones de niveles de agua en la estación hidrológica Pisac del río Vilcanota utilizando datos de un sensor Lidar

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se centra en la cuenca del río Vilcanota, ubicada en la región andina del sur de Perú. Esta cuenca abarca una extensión de aproximadamente 15 730 km² y se caracteriza por su diversidad de ecosistemas, que van desde glaciares y picos nevados hasta cejas de selva tropicales. El río Vilcanota, principal curso de agua de la cuenca, nace en la Cordillera Vilcanota y fluye hacia el noreste hasta su confluencia con el río Urubamba, formando así el río Ucayali, uno de los afluentes más importantes del río Amazonas.

La cuenca del río Vilcanota desempeña un papel fundamental en el equilibrio ecológico y en la provisión de recursos hídricos para la región. Además, tiene una gran importancia para el sector agrícola, que depende en gran medida del agua proveniente de este río. Por lo tanto, es crucial contar con sistemas de monitoreo y medición precisos que permitan obtener información actualizada sobre los niveles de agua en el río Vilcanota. En este contexto, se llevó a cabo un estudio comparativo de los niveles de agua del río Vilcanota utilizando dos fuentes de datos: la **EHP**, una estación de monitoreo hidrológico automatizada del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y un sensor **Lidar** (Light Detection and Ranging). La EHP proporciona mediciones en tiempo real del nivel del agua del río Vilcanota, al igual que los sensores **Lidar** que utilizan pulsos láser para medir la distancia entre el sensor y la superficie del agua.

Las redes de sensores inalámbricos relacionadas y los sistemas de monitoreo de cuencas de bajo costo han sido ampliamente estudiados y aplicados en todo el mundo.

Zhang, D, et al. (2019) desarrollaron una red de sensores de bajo costo utilizando sensores de nivel de líquido de venta libre, para monitorear una cuenca cerca de Dublín, Irlanda. Recopilaron información sobre el nivel del agua dentro de la cuenca y compararon un período de un mes de datos con sensores comerciales en cuatro ubicaciones. Informaron una correlación de Spearman y Pearson muy alta entre las lecturas de las estaciones de monitoreo oficiales y sus sensores y los bajos errores absolutos medios, y concluyeron un rendimiento muy prometedor. Más recientemente, **Kerkez et al. (2018)** describe varias aplicaciones de sensores ultrasónicos para monitorear y controlar sistemas de aguas pluviales en áreas urbanas.

Mullapudi et al. 2018 desarrollaron un sistema inteligente de aguas pluviales que monitorea los niveles de agua en tiempo real utilizando sensores ultrasónicos de profundidad, y permite controlar de manera remota la infraestructura de aguas pluviales. Aunque este sistema se enfoca en sensores ultrasónicos, es comparable con tecnologías como el **Lidar**, que también se utilizan para medir niveles de agua, aunque con una mayor precisión en la detección de superficies. Ambos enfoques ofrecen soluciones avanzadas para el monitoreo y control de recursos hídricos, con la ventaja del **Lidar** en aplicaciones que requieren una mayor resolución espacial.

Zhang,Z et al. (2017) mostraron una red de sensores inalámbricos rentables desplegada en la región montañosa dominada por la nieve de la cuenca del río Americano superior en

California, EE. UU. Esta red de sensores monitoreó las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la cuenca en intervalos de 15 minutos. Informaron que la red de sensores inalámbricos redujo la incertidumbre en las mediciones del balance hídrico al, (i) mejorar la robustez de la estimación de la tasa de cambio de temperatura, (ii) capturar la variabilidad local debido a las mediciones distribuidas y restringir la incertidumbre en comparación con las estimaciones basadas en puntos, y (iii) caracterizar mejor las precipitaciones y la elevación de la transición lluvia/nieve.

Castillo-Effer et al. (2004) presentaron un concepto de un sistema de alerta de inundaciones repentinas para la región andina de Venezuela utilizando una red de sensores inalámbricos para monitorear áreas propensas a inundaciones y rastrear el evento a medida que este se daba. Aunque no se incluyó un análisis comparativo del rendimiento de la red en ese estudio, los autores argumentaron los beneficios potenciales de estas soluciones de bajo costo para países y regiones que carecen de infraestructura y recursos.

El avance en hardware, electrónica y tecnologías de software para el procesamiento y almacenamiento de datos, como se ha evidenciado en estudios anteriores, ofrece una proyección prometedora para soluciones de bajo costo en el monitoreo del flujo de agua. Estas soluciones rentables para el monitoreo de los caudales facilitan la inclusión de más estaciones de medición con una alta resolución espacial, lo que puede ser extremadamente valioso para mejorar otras aplicaciones de la gestión hídrica de cuencas, como el análisis del suministro de agua, la restauración de humedales y el monitoreo ecológico de hábitats sensibles.

El objetivo principal de este estudio fue determinar la precisión y confiabilidad de los sensores **Lidar** utilizados para el monitoreo de los niveles de agua en el río Vilcanota.

En la metodología utilizada, se realizaron mediciones de los niveles de agua utilizando la **EHP** y el sensor **Lidar** en un mismo punto del río Vilcanota. Posteriormente, se compararon los datos obtenidos por ambos métodos y se realizaron análisis estadísticos para evaluar la concordancia estadística entre ellos.

Los resultados de este estudio proporcionan información valiosa sobre la precisión de los sensores utilizados y permiten establecer recomendaciones para mejorar los sistemas de monitoreo de los niveles de agua del río Vilcanota. Estos resultados son fundamentales para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región y para la mitigación de posibles impactos relacionados con eventos climáticos extremos, como inundaciones.

Caso de estudio

La cuenca del río Vilcanota abarca una superficie de aproximadamente 15,730 km² y se encuentra en la región andina del sur de Perú. El río Vilcanota nace en la Cordillera Vilcanota y fluye hacia el noreste hasta su confluencia con el río Urubamba, donde se forma el río Ucayali, uno de los principales afluentes del río Amazonas. En la figura 1, podemos apreciar la delimitación del distrito de Pisac y la ubicación de la estación Pisac.

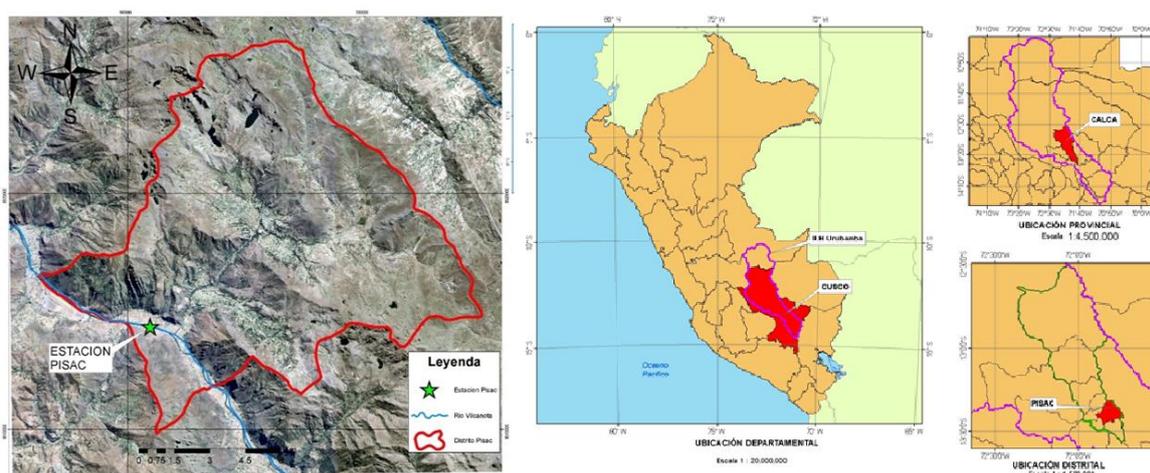


Figura 1: Mapa de Ubicación de la estación Pisac
Elaboración Propia

El río Vilcanota es un importante afluente del río Amazonas y se encuentra en el departamento de Cusco, Perú. En el distrito de Pisac, el río Vilcanota tiene la EHP del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Esta estación se encuentra en la cuenca media del río Vilcanota, en la ciudad de Pisac.

La estación Pisac es de tipo Hidrométrica, y sus datos obtenidos de niveles de agua se envían automáticamente al sistema central del SENAMHI, donde se procesan y se utilizan para el monitoreo y pronóstico hidrológico.

Los datos de medición de niveles de agua para este caso de estudio, será proporcionado por la EHP y se hará una comparación con los datos obtenidos por un sensor **Lidar** (Light Detection and Ranging), que es un dispositivo que utiliza pulsos láser para medir la distancia entre el sensor y un objeto. Para la comparación de los datos de niveles de agua, se utilizó el sensor **Lidar** localizado junto a la **EHP**.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Datos

El estudio se realizó en la cuenca del río Vilcanota y se dividió en dos fases principales. En la primera fase, se centró en la evaluación de los niveles de agua en la localidad de Pisac. Para ello, se utilizaron sensores de nivel de agua de Senamhi en la **EHP** y se compararon con mediciones de **Lidar**.

La segunda fase del estudio implicó la recopilación y análisis de los datos obtenidos de cada sensor. Se realizaron análisis estadísticos para comparar los datos y determinar si los diferentes sensores proporcionaban resultados similares.

2.1.1 Estación Hidrométrica Pisac (EHP)

La EHP se encuentra a 2791 m.s.n.m., está ubicada en la provincia de Calca, distrito de Pisac, establecida con coordenadas de latitud 13.428°S y longitud 71.841°O. Esta estación del SENAMHI realiza el control hidrométrico de la parte media de la cuenca.

2.1.2 Sensor Lidar Distance Sensing

El **Lidar** (Light Detection and Ranging) es una tecnología utilizada comúnmente en la medición de distancias mediante la emisión de pulsos de luz láser. En el contexto de la medición de niveles de agua en ríos, **Lidar Distance Sensing** aprovecha la rugosidad de la superficie del agua para generar una reflexión no especular que permite medir el tiempo de vuelo del pulso láser. Este método es similar al radar, pero utiliza ondas de mayor frecuencia para obtener intensidades de pulso más elevadas. En el caso de los sensores Lidar que operan en el rango de infrarrojo cercano (900–1,100 nm), el costo es relativamente bajo y se puede obtener una precisión adecuada para el monitoreo de niveles de agua (Paul et al., 2020).

La precisión del Lidar depende de la **anchura del pulso** y la **precisión del temporizador** que mide el tiempo entre la emisión y recepción del pulso láser. El estrechamiento de la anchura del pulso mejora la precisión de la medición, aunque requiere mayor potencia de pulso. Las mejoras recientes en el micro-osciladores y el conversor de tiempo a digital han aumentado la precisión de las mediciones de tiempo de vuelo, alcanzando precisiones en el rango de picosegundos.

Aunque el uso de **Lidar** para medir niveles de agua es menos común que su aplicación en topografía, las investigaciones recientes sugieren que es posible emplear este sensor en la monitorización hidrológica (Paul et al., 2020). El desafío principal radica en la baja reflectividad de las superficies de agua para la radiación infrarroja, que puede producir reflexiones especulares y, en algunos casos, interferir con la recepción del pulso reflejado. Sin embargo, las superficies rugosas del agua tienden a dispersar mejor los pulsos, lo que abre la posibilidad de utilizar **Lidar** de forma eficaz para medir los niveles de agua y sus variaciones. En la **Figura 2** se puede ver la instalación de un sensor Lidar con el sensor de la EHP.



Figura 2: En color Azul el sensor LIDAR en rojo de la EPH sobre el río Vilcanota en Pisac.

2.1.3 Calibración de los datos de EPH y Lidar

El sensor de la EHP está ajustado para medir directamente el nivel del agua sin considerar el borde libre del río. Por otro lado, el sensor **Lidar** incluye en su medición tanto el borde libre del terreno como el nivel del agua, lo que genera discrepancias entre ambos conjuntos de datos. Como se puede observar en la Figura 3, los datos de la **EHP** (línea azul) y del **Lidar** (línea naranja) muestran una relación inversa.

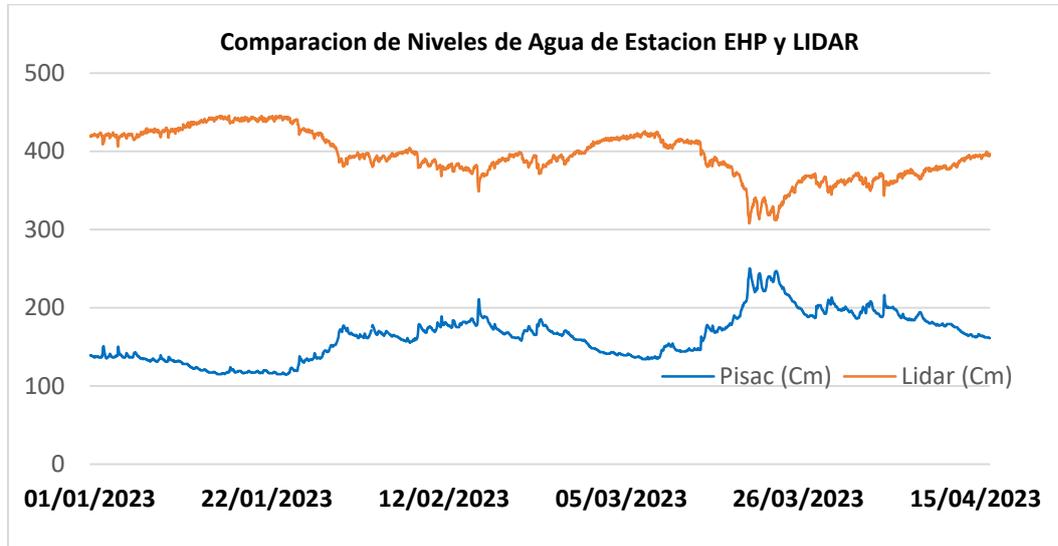


Figura 3: Datos Pisac (EHP) y Lidar sin Calibración

Debe tenerse en cuenta que los dispositivos **Lidar** son dispositivos sin contacto que miden las elevaciones de la superficie del agua, así como la distancia desde el sensor hasta la superficie del agua. La ecuación (1) explica cómo se convierte la elevación de la superficie del agua (WSE) en la profundidad del agua:

Nivel del agua = Elevación de la superficie del agua (Sensor Lidar) - Elevación del fondo
Ecuación (1)

Haciendo la corrección correspondiente se obtuvo datos Lidar y Pisac calibrados, tal como se muestra en la Figura 4:



Figura 4: Serie EHP y Lidar compensada

2.2 Métodos

2.2.1 Análisis comparativo

Los niveles de agua a paso horario correspondiente al sensor **Lidar**, se compararon con las mediciones de niveles de agua de la **EHP**. La comparación se realizó en dos etapas:

(i) Comparación basada en eventos y (ii) comparación a largo plazo. Para la comparación basada en eventos, se identificarán algunos eventos de crecidas del período de registro y se compararán los conjuntos de datos de los dos sensores utilizando las siguientes métricas estadísticas: Coeficiente de Determinación (R^2), Eficiencia de Nash-Suttcliffe (NSE), Sesgo porcentual (PBIAS). Los criterios de evaluación del rendimiento para las métricas R^2 , NSE y PBIAS se presentan en la **Tabla 1**, adaptada de Moriasi et al. (2015).

Tabla 1: Métricas de comparación y criterios de evaluación, basado en Moriasi et al. (2015).

Medidas Estadísticas	Criterios de evaluación del rendimiento			
	MUY BUENO	BUENO	SATISFACTORIO	NO SATISFACTORIO
Coefficiente de determinación (R²)	R ² >0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
Nash-Suttcliffe Efficiency (NSE)	NSE>0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
PBIAS (%)	PBIAS < ±5	±5 < PBIAS ≤ ±10	±10 < PBIAS ≤ ±15	PBIAS ≥ ±15

La comparación a largo plazo se realizó utilizando dos análisis estadísticos: la Prueba de Rango con Signo de Wilcoxon (Wilcoxon Signed-Rank Test) (Rosner, Glynn, & Lee, 2006) y la Descomposición Estacional Loess (Loess Seasonal Decomposition por el método STL) (Cleveland et al., 1990).

La prueba de Rango con Signo de Wilcoxon (**Wilcoxon Signed-Rank Test**) es un método estadístico no paramétrico que compara dos conjuntos de datos emparejados para identificar diferencias significativas. Desarrollada por Frank Wilcoxon en 1945, esta prueba no requiere que los datos sigan una distribución normal, lo que la hace útil cuando las pruebas paramétricas, como la t de Student, no son adecuadas. Es especialmente útil para analizar mediciones repetidas o muestras emparejadas, como mediciones de dos sensores en las mismas condiciones. Al aplicar la prueba, se evalúa si la mediana de las diferencias es significativamente distinta de cero, permitiendo determinar si existen diferencias sistemáticas entre ambos conjuntos.

La **Descomposición Estacional Loess** permite separar una serie temporal en tres componentes principales: tendencia, variación estacional y residual. Este método, también conocido como **Loess Seasonal Decomposition**, divide cada serie temporal en dichos componentes de manera eficiente. Fue desarrollado por Cleveland et al. (1990) con el propósito de crear un enfoque sencillo y flexible para descomponer series temporales y suavizarlas. Este análisis no solo facilita la comparación de las tendencias observadas en los datos, sino que también permite evaluar si las variaciones a largo plazo, como las causadas por la estacionalidad, son consistentes entre diferentes sensores.

3. RESULTADOS

En esta sección, se describe los resultados del análisis comparativo de los niveles de agua a paso horario observados por la **EHP** con los datos de niveles de agua medidos por el **Lidar**. El período de análisis fue de 01/01/2023 al 17/04/2023, y se realizó en dos niveles: (i) comparación basada en eventos y (ii) comparación a largo plazo. Para la comparación basada en eventos, se identificaron 10 eventos de crecidas durante el período de registro, como se enumeran en la Tabla 2.

Tabla 2 : Eventos seleccionados de tormenta para el análisis.

Evento	Periodo de tiempo	
	Evento 1	2/01/2023 06:00
Evento 2	17/01/2023 00:00	19/01/2023 23:00
Evento 3	25/01/2023 00:00	2/02/2023 00:00
Evento 4	2/02/2023 01:00	6/02/2023 16:00
Evento 5	8/02/2023 08:00	20/02/2023 00:00
Evento 6	21/02/2023 00:00	28/02/2023 14:00
Evento 7	9/03/2023 13:00	12/03/2023 13:00
Evento 8	13/03/2023 15:00	17/03/2023 18:00
Evento 9	18/03/2023 20:00	27/03/2023 09:00
Evento 10	27/03/2023 21:00	10/04/2023 05:00

3.1 Comparación basada en Eventos

Los resultados de la comparación basada en eventos se presentan en la Tabla 3. Es evidente a partir de estas métricas que el sensor **Lidar** funciono muy bien en función a los datos del sensor Pisac, para casi todos los diez eventos. Los valores de R2 se consideraron "Muy buenos" para 8 eventos y 2 satisfactorios, los eventos de NSE se consideraron 8 "muy Buenos", 1 "satisfactorio y 1 "No Satisfactorio", mientras que los valores de PBIAS se consideraron "Muy buenos" para los 10 eventos.

Estos resultados están confirmados por la comparación de hidrogramas de los diez eventos presentados en la Tabla 3:

Tabla 3: Comparación y rendimiento basado en eventos.

Evento	R ²		NSE		PBIAS	
	Valor	Resultado	Valor	Resultado	Valor	Resultado
Evento 1	0.64	SATISFACTORIO	0.59	SATISFACTORIA	0.010128976	MUY BUENO
Evento 2	0.64	SATISFACTORIO	0.41	NO ES SATISFACTORIA	-0.62	MUY BUENO
Evento 3	0.99	ES MUY BUENO	0.99	ES MUY BUENA	-0.28	MUY BUENO
Evento 4	0.87	ES MUY BUENO	0.84	ES MUY BUENA	-0.021	MUY BUENO
Evento 5	0.953	ES MUY BUENO	0.952	ES MUY BUENA	0.156	MUY BUENO
Evento 6	0.929	ES MUY BUENO	0.921	ES MUY BUENA	0.2511	MUY BUENO
Evento 7	0.896	ES MUY BUENO	0.887	ES MUY BUENA	0.296	MUY BUENO
Evento 8	0.971	ES MUY BUENO	0.971	ES MUY BUENA	0.1605	MUY BUENO
Evento 9	0.985	ES MUY BUENO	0.982	ES MUY BUENA	-0.496	MUY BUENO
Evento 10	0.921	ES MUY BUENO	0.911	ES MUY BUENA	-0.367	MUY BUENO

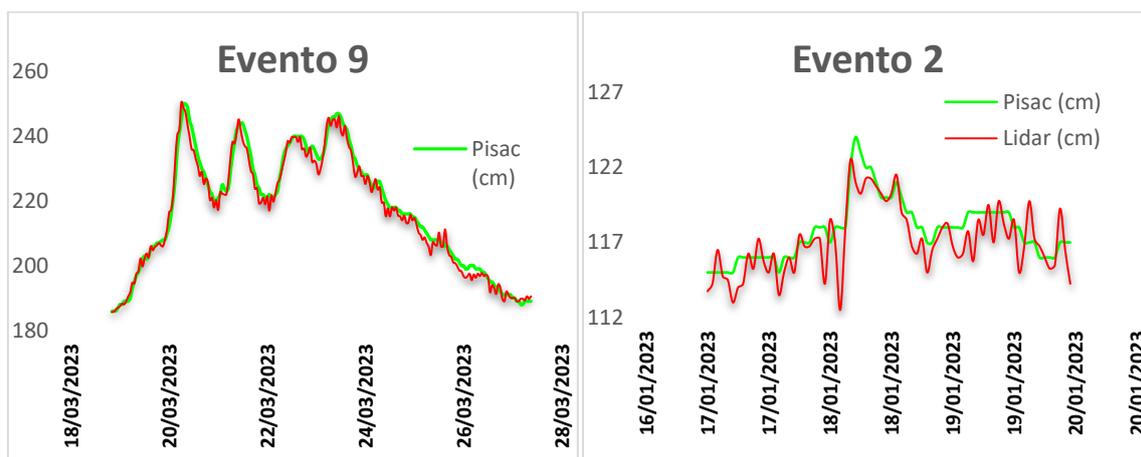


Figura 5: Comparación de hidrogramas de los eventos 9 (muy bueno) y 2(No satisfactorio).

Se puede observar en la figura 5, que durante los Eventos 9 y 2, el nivel de agua medido por el sensor de **Lidar** fue muy bueno y No satisfactorio respectivamente, esto se debe a que en el evento 9 los datos de **EPH** y **Lidar** fueron muy semejantes, mientras que en el evento 2 podemos observar que los datos **Lidar** no se asemejan a los de EPH, dando lugar a resultados No satisfactorios. En general, en la escala de eventos individuales, estas comparaciones indican claramente que los niveles de agua medidos por el **Lidar** y **EHP** son muy cercanos.

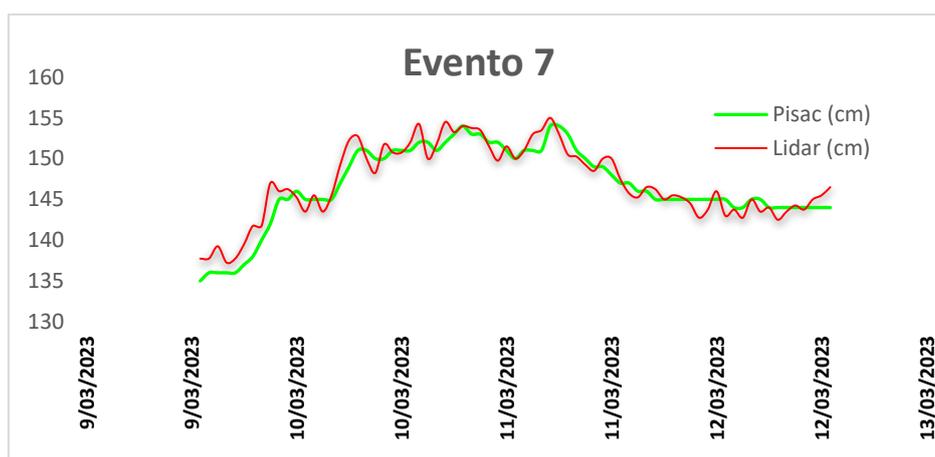


Figura 6: Comparación de hidrogramas para el evento 7.
Elaboración Propia

En la figura 6 podemos observar como en el Evento 7, el sensor **Lidar** ha tomado datos un poco elevados a comparación de la EHP, a su vez, presenta una buena relación gráfica.

En el contexto del estudio actual, este rango de error para el monitoreo del nivel de agua se considera aceptable. Sin embargo, puede ser necesario realizar pruebas adicionales de la precisión del **Lidar** para cálculos de niveles de los ríos en situaciones más extremas de avenidas y estiajes.

3.2 Comparación a largo Plazo

También se examinaron los dos conjuntos de datos durante un período de tiempo más largo (Enero-Abril de 2023) para verificar qué tan bien se comparan los datos **Lidar** y los de **EHP**:

3.2.1 Wilcoxon Signed-Rank Test

La prueba de Rango con Signo de Wilcoxon es una prueba de comparación estadística no paramétrica. La hipótesis nula de la prueba establece que la diferencia mediana entre los dos conjuntos de datos es 0 (**Wilcoxon, 1945**). Los resultados de la prueba de Rango con Signo de Wilcoxon que proporciona son los siguientes:

- Estadística de prueba: 1367417
- Valor p: 0.0125
- El estadístico de prueba está por encima del valor crítico. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula.

Esto significa que la diferencia mediana entre los dos conjuntos de datos es significativamente diferente de cero, ya que el valor p (0.0125) es menor que el nivel de significancia alfa es igual a 0.05. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, por lo que, no podemos concluir con certeza que no hay suficiente evidencia para decir que los sensores están produciendo mediciones significativamente diferentes. Se muestra un diagrama de caja de la diferencia entre los datos Lidar y de EHP en la Figura 7.

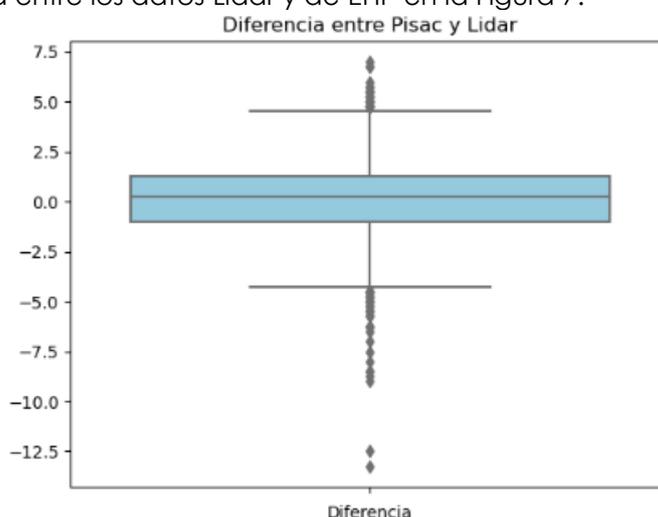


Figura 7: Comparación de diagrama de caja de las diferencias entre los niveles de agua de Lidar y EHP

En la Figura 7 se observa que, aunque la EHP tiende a medir niveles de agua más altos que el sensor Lidar, las diferencias entre ambos son estadísticamente significativas según los resultados de la prueba de Wilcoxon. Esto significa que, aunque visualmente las diferencias parecen pequeñas, el análisis estadístico indica que las mediciones entre los dos sensores no son equivalentes.

El valor p de 0.0125 confirma que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, las diferencias observadas no son lo suficientemente grandes como para invalidar el uso del sensor Lidar, que sigue siendo una herramienta útil y confiable para el monitoreo de los niveles de agua en el río Vilcanota. A pesar de ello, se sugiere realizar algunas calibraciones adicionales para mejorar su precisión.

Entre las calibraciones recomendadas, se puede ajustar el sensor Lidar en función de la altura de instalación sobre el cauce y las fluctuaciones en la superficie del agua, así como realizar ajustes para mejorar su respuesta ante diferentes niveles de turbiedad del agua. Además, podrían considerarse calibraciones temporales para corregir posibles variaciones a lo largo del tiempo. Los escenarios donde podrían surgir mayores diferencias incluyen condiciones de flujos extremadamente bajos o altos, la presencia de vegetación o escombros en la superficie del agua, y condiciones de luz ambiental extrema. Estas calibraciones ayudarían a asegurar la precisión del sensor en una variedad de contextos operativos.

3.2.2 Loess Seasonal Decomposition (LSD)

Para este análisis, cada serie temporal se dividió en sus componentes y se comparó con el componente correspondiente del otro conjunto de datos. Estos resultados se pueden ver en la Figura 8.

De esta figura, se puede observar que las líneas de tendencia del conjunto de datos de la **EHP** son similares a los de **Lidar**, constantemente siendo más altas que el medidor Pisac.

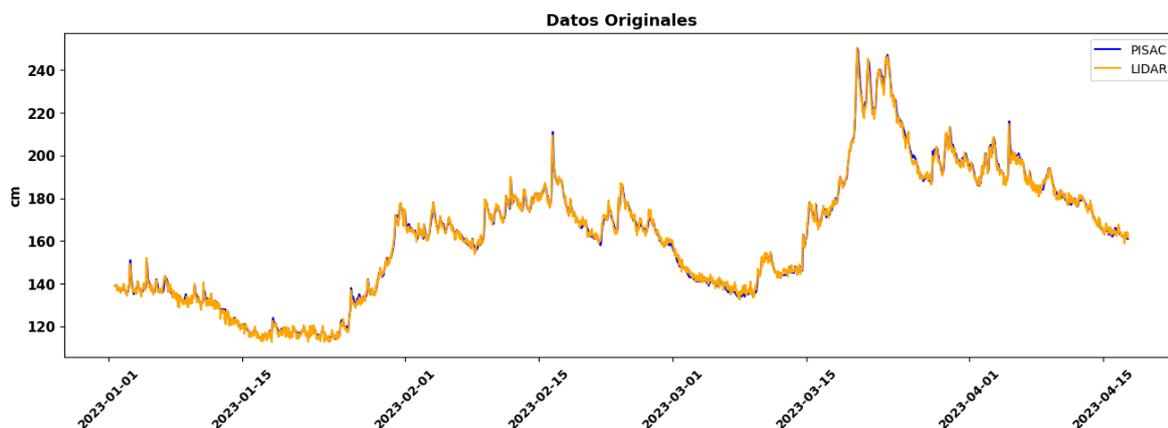


Figura 8: Comparación de los componentes de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD
Elaboración Propia

La tendencia estimada se refiere a la parte de la serie que muestra el comportamiento general a largo plazo, lo que permite identificar la dirección general en la que se mueve la serie, como se puede ver en la Figura 9:

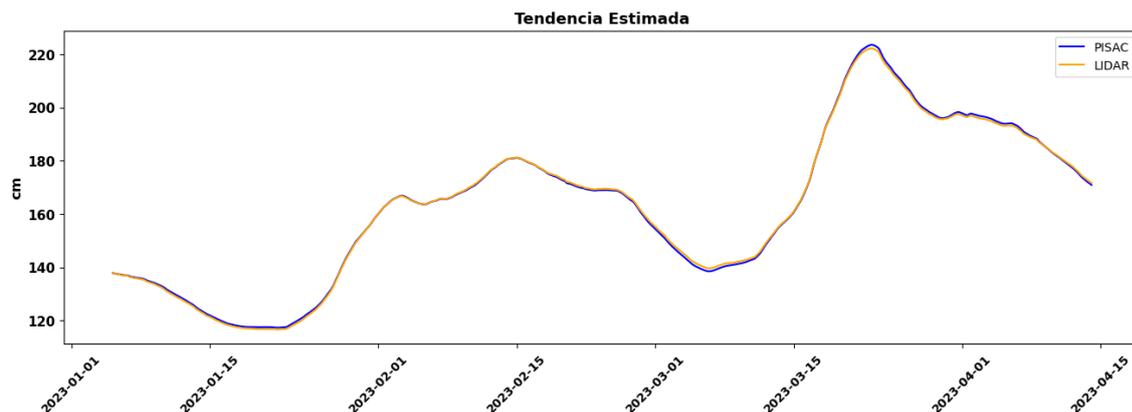


Figura 9: Comparación de la Tendencia Estimada de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD.
Elaboración Propia

La componente estacional (Figura 10), se refiere a los patrones repetitivos que se producen en los niveles de agua en intervalos regulares, como los patrones de crecimiento y disminución que se producen en diferentes estaciones del año. La técnica **Loes Seasonal Decomposition (LSD)** puede separar esta componente de la tendencia y los residuos de la serie de tiempo del nivel del agua, permitiendo así identificar patrones regulares en el comportamiento del nivel del agua y ayudando en la predicción de valores futuros.

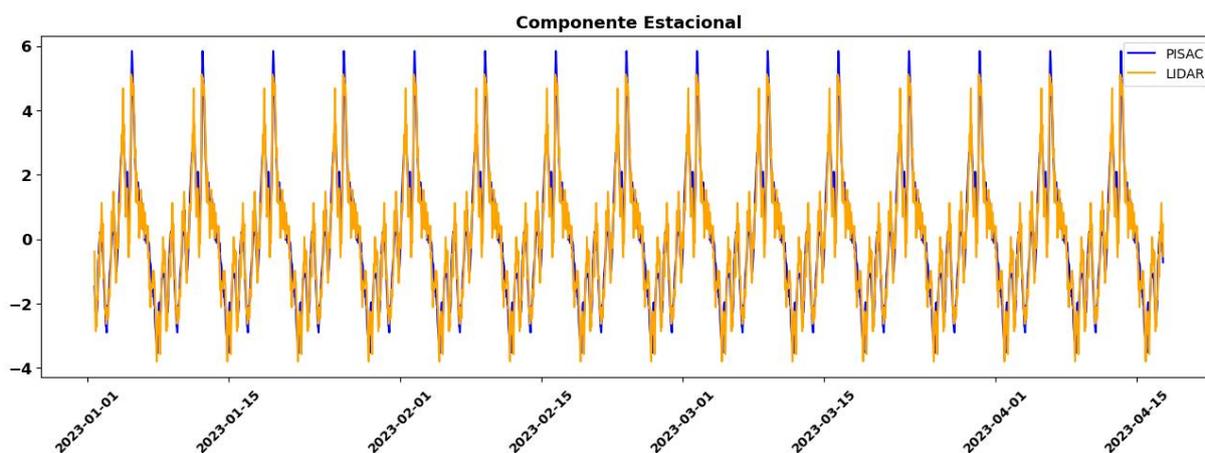


Figura 10: Comparación de la componente Estacional de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD.

La componente residual (Figura 11), se refiere a la variación aleatoria que no puede ser explicada por la tendencia o la componente estacional, es decir, cualquier fluctuación que no sigue un patrón regular y no se puede predecir fácilmente. La componente residual es importante porque contiene información sobre los cambios no sistemáticos en la serie de tiempo, lo que puede ayudar a detectar anomalías y a entender el comportamiento de la serie de tiempo.

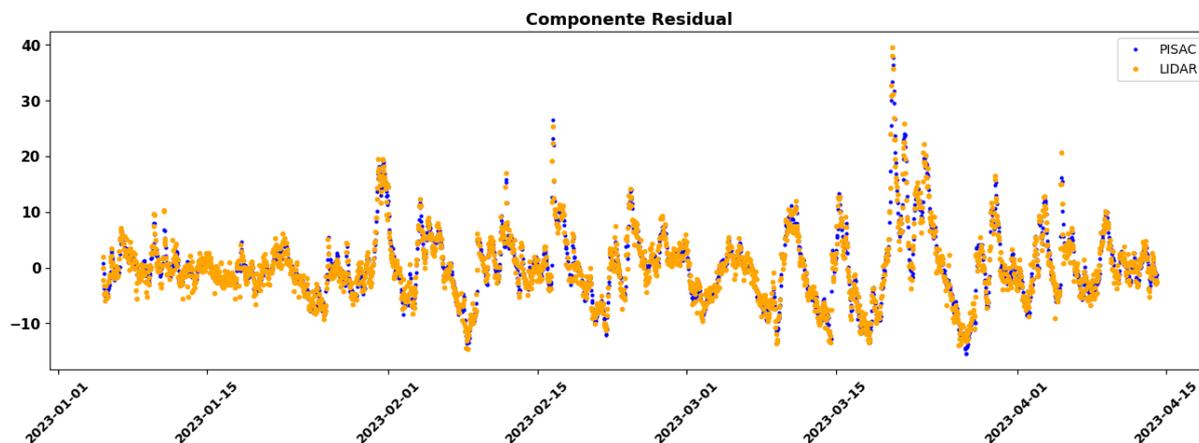


Figura 11: Comparación de la componente residual de la serie Pisac-Lidar utilizando LSD
Elaboración Propia

Como se puede ver en la comparación de la componente residual (Figura 11), a pesar de algunas desviaciones en las mediciones del nivel de agua, el **Lidar** siguió las mismas tendencias en todos los componentes (Tendencia y Estacional). **Lidar** puede haber presentado desviaciones sistemáticas en sus mediciones a lo largo del período de análisis, lo cual sugiere una diferencia constante respecto a **EHP**. Esta variación podría estar relacionada con la forma en que **Lidar** calcula la profundidad del agua, diferente a la metodología utilizada por **EHP**, lo que explica las discrepancias observadas. **Lidar** puede haber presentado desviaciones sistemáticas en sus mediciones a lo largo del período de análisis, lo cual sugiere una diferencia constante respecto a **EHP**. Esta variación podría estar relacionada con la forma en que **Lidar** calcula la profundidad del agua, diferente a la metodología utilizada por **EHP**, lo que explica las discrepancias observadas.

Los componentes de la serie temporal (tendencia, estacionalidad y residuales) muestran una buena correspondencia entre las mediciones de Lidar y EHP. Esto indica que ambos capturan los cambios en el nivel de agua de manera similar, con escalas de variación comparables entre las dos series.

Se compararon los cambios porcentuales en las profundidades del agua, medidos por dos conjuntos de datos, en pasos de tiempo sucesivos. La Figura 12 ilustra estas diferencias en un gráfico de dispersión. Cada punto representa una medición horaria, con el eje X mostrando el cambio porcentual en las mediciones del **Lidar** y el eje Y el cambio en las mediciones de **EHP**:

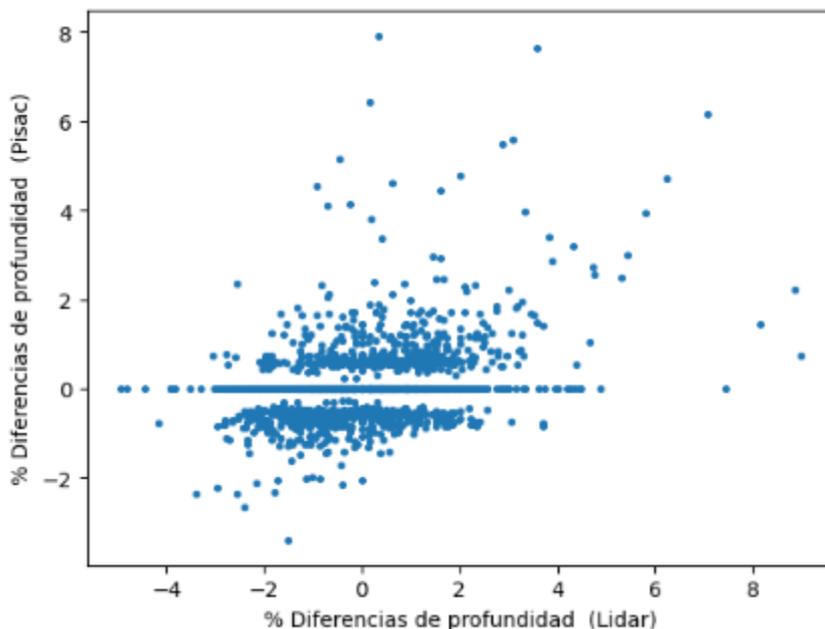


Figura 12: Cambio porcentual en la comparación de la profundidad entre los medidores.

La mayoría de los puntos se agrupan cerca del 0 en ambos ejes, indicando poca variación en la mayoría de las horas. Sin embargo, la dispersión a lo largo del eje X sugiere fluctuaciones significativas en algunas mediciones del **Lidar**.

Las lecturas del **Lidar**, aunque no coinciden perfectamente en magnitud con las de **EHP**, muestran un comportamiento consistente en cuanto a la detección de variaciones relativas en el nivel del agua. A pesar de posibles errores en la elevación o en la precisión del GPS, los cambios observados en ambos sensores siguen un patrón similar, lo que sugiere que las mediciones del **Lidar** son confiables para captar las fluctuaciones del nivel de agua.

4. CONCLUSIONES

- El análisis comparativo entre Lidar y la estación hidrológica EHP evidenció una buena correspondencia en la mayoría de los eventos evaluados. En el análisis de 10 eventos de crecidas del río, los resultados mostraron que Lidar y EHP proporcionaron datos similares en métricas como R^2 , NSE y PBIAS. Sin embargo, se identificaron diferencias significativas en el evento 2, donde los resultados de NSE no alcanzaron valores satisfactorios. Este hallazgo resalta la necesidad de analizar en profundidad los factores específicos que pueden afectar la precisión del Lidar en determinados eventos.
- Los resultados obtenidos confirman que el Lidar puede ser utilizado para monitorear niveles de agua en eventos similares, demostrando ser una herramienta práctica y accesible. No obstante, debido a su bajo costo y simplicidad, es importante enfatizar que el Lidar no debe ser empleado para cálculos precisos de caudales sin realizar ajustes adicionales. Los errores en la precisión, como los observados en casos específicos, podrían influir negativamente en estimaciones críticas, como las relacionadas con el diseño hidráulico o la gestión de riesgos de inundación.
- Para evaluar las diferencias a largo plazo, se implementó un análisis estadístico mediante la prueba de Wilcoxon Signed-Rank y un modelo de Descomposición Estacional Loess. Los resultados de estas pruebas no mostraron diferencias significativas entre los niveles registrados por Lidar y EHP durante el periodo de estudio, lo que indica que ambos dispositivos mantienen una correspondencia adecuada en intervalos prolongados de tiempo, incluyendo horas, días e incluso semanas. El análisis estacional también refuerza la robustez del Lidar al identificar patrones consistentes que respaldan su viabilidad como herramienta de monitoreo continuo.

5. RECOMENDACIONES

- Basado en los resultados obtenidos, se puede afirmar que el Lidar es un dispositivo confiable y versátil para monitorear niveles de agua en condiciones similares a las evaluadas en este estudio. Sin embargo, aunque estos resultados son prometedores, su implementación en escenarios más complejos y diversos requiere estudios adicionales que validen su desempeño en diferentes tipos de ríos con características hidrológicas contrastantes.
- Específicamente, se recomienda probar el Lidar en ríos costeros de alta pendiente y bajo caudal, donde la geometría del canal y las condiciones de flujo pueden afectar la precisión de las mediciones. Asimismo, es necesario evaluar su funcionalidad en grandes ríos de la Amazonía, caracterizados por caudales elevados y volúmenes de agua altamente variables. Estas pruebas adicionales permitirán analizar cómo factores como la heterogeneidad del terreno, la variabilidad climática y las particularidades de cada tipo de cuenca influyen en la capacidad del Lidar para registrar niveles de agua con precisión.
- Por lo tanto, aunque este estudio valida el uso del Lidar en eventos recurrentes y bajo condiciones controladas, su aplicación en contextos más diversos aún debe ser respaldada por investigaciones complementarias. Este avance representa un paso significativo hacia la implementación de tecnologías accesibles para el monitoreo hidrológico, pero la evidencia actual sugiere que su uso debe ajustarse a escenarios específicos mientras se desarrolla una validación más amplia.
- Además, los resultados obtenidos sientan las bases para futuros estudios dirigidos a integrar el Lidar en sistemas de alerta temprana y mejorar la predicción de inundaciones. Su potencial para monitorear niveles de agua de manera eficiente podría ser clave, especialmente en zonas vulnerables donde la disponibilidad de equipos convencionales es limitada, siempre y cuando su desempeño sea validado en los contextos hidrológicos mencionados.

6. REFERENCIAS

- Castillo-Effer, M., Quintela, D. H., Moreno, W., Jordan, R., & Westhoff, W. (2004). *Wireless sensor networks for flash-flood alerting*. *Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, 2004, Punta Cana, Dominican Republic*, 142–146. <https://doi.org/10.1109/ICCDCS.2004.1393370>
- Zhang, Z., Glaser, S. D., Bales, R. C., Conklin, M., Rice, R., & Marks, D. G. (2017). *Technical report: The design and evaluation of a basin-scale wireless sensor network for mountain hydrology*. *Water Resources Research*, 53(5), 4487–4498. <https://doi.org/10.1002/2016WR019619>
- Zhang, D., Heery, B., O'Neil, M., Little, S., O'Connor, N. E., & Regan, F. (2019). *A low-cost smart sensor network for catchment monitoring*. *Sensors*, 19(10), 2278. <https://doi.org/10.3390/s19102278>
- Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., Bedig, A., Kertesz, R., Braun, T., Cadwalader, O., Poresky, A., & Pak, C. (2016). *Smarter stormwater systems*. *Environmental Science & Technology*, 50(14), 7267–7273. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05870>
- Paul, J. D., Buytaert, W., & Sah, N. (2020). *A technical evaluation of lidar-based measurement of river water levels*. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR026810. <https://doi.org/10.1029/2019WR026810>
- Mullapudi, A., Bartos, M., Wong, B., & Kerkez, B. (2018). *Shaping streamflow using a real-time stormwater control network*. *Sensors*, 18(7), 2259. <https://doi.org/10.3390/s18072259>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). *Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria*. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Rosner, B., Glynn, R. J., & Lee, M. L. (2006). *The Wilcoxon signed rank test for paired comparisons of clustered data*. *Biometrics*, 62(1), 185–192. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00389.x>
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., & Terpenning, I. (1990). *STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on Loess*. *Journal of Official Statistics*, 6(1), 3–73. <https://www.proquest.com/docview/1266805989?sourcetype=Scholarly%20Journals>
- Wilcoxon, F. (1945). *Individual comparisons by ranking methods*. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>

ANEXOS

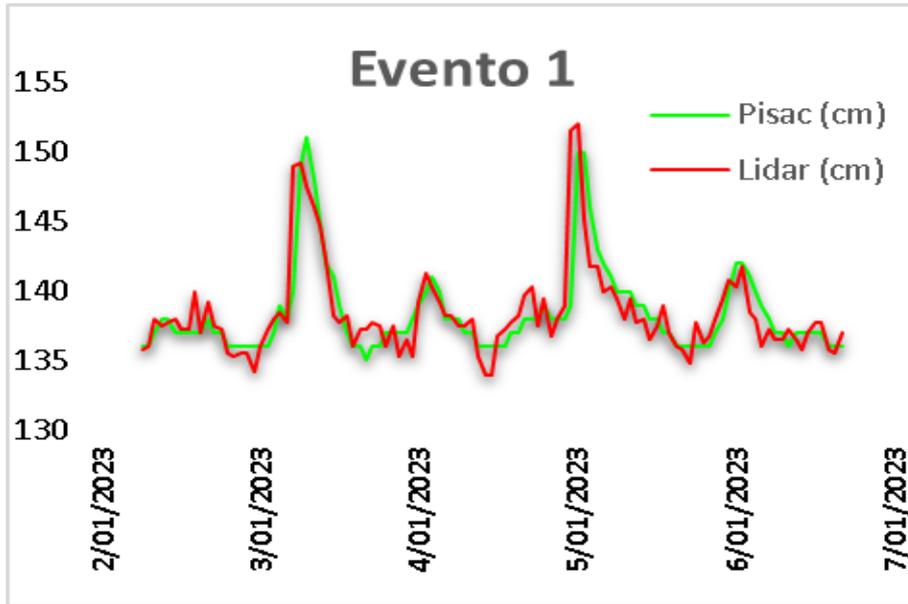


Figura A.1. Evento 1 Periodo de tiempo de 2/01/2023 a 6/01/2023

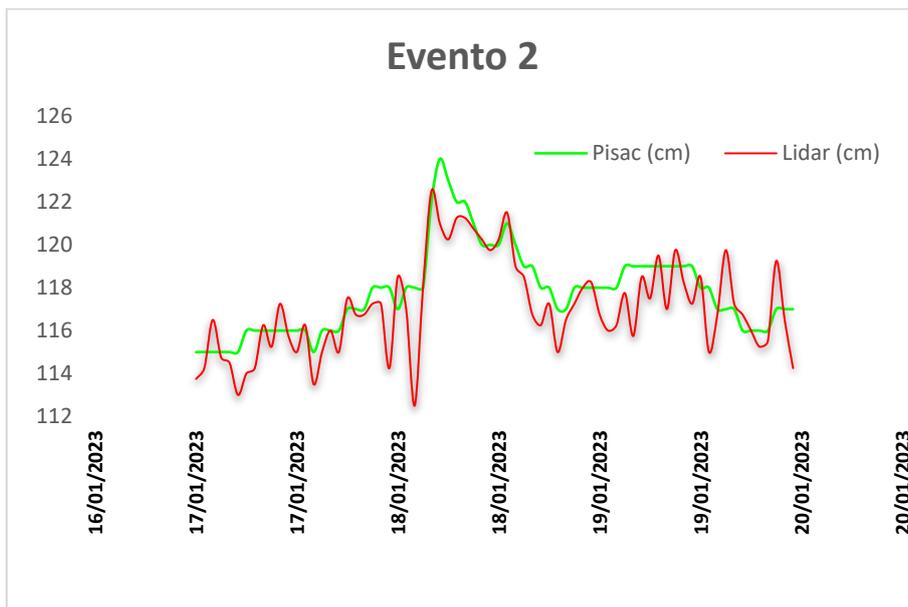


Figura A.2. Evento 2 Periodo de tiempo de 17/01/2023 a 19/01/2023

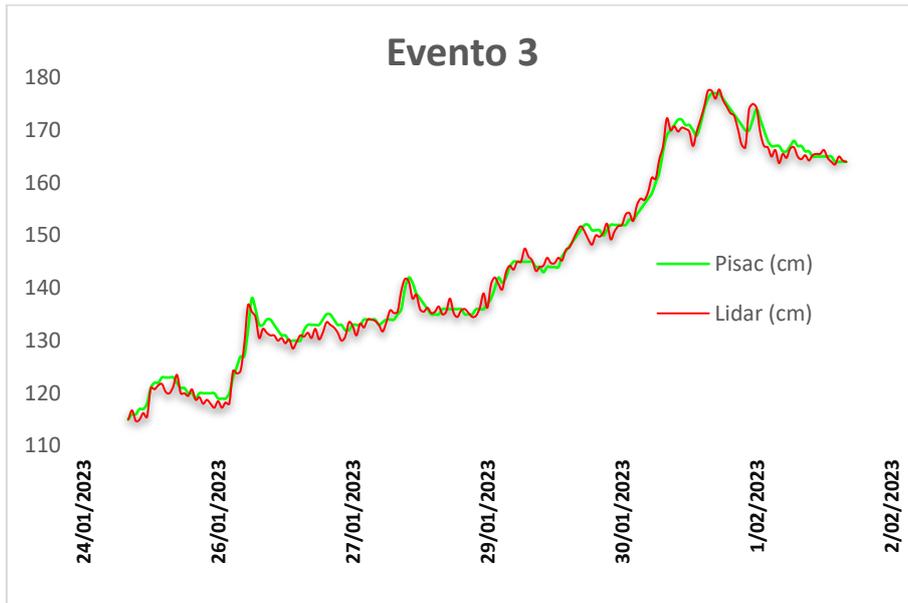


Figura A.3. Evento 3 Periodo de tiempo de 25/01/2023 a 2/02/2023

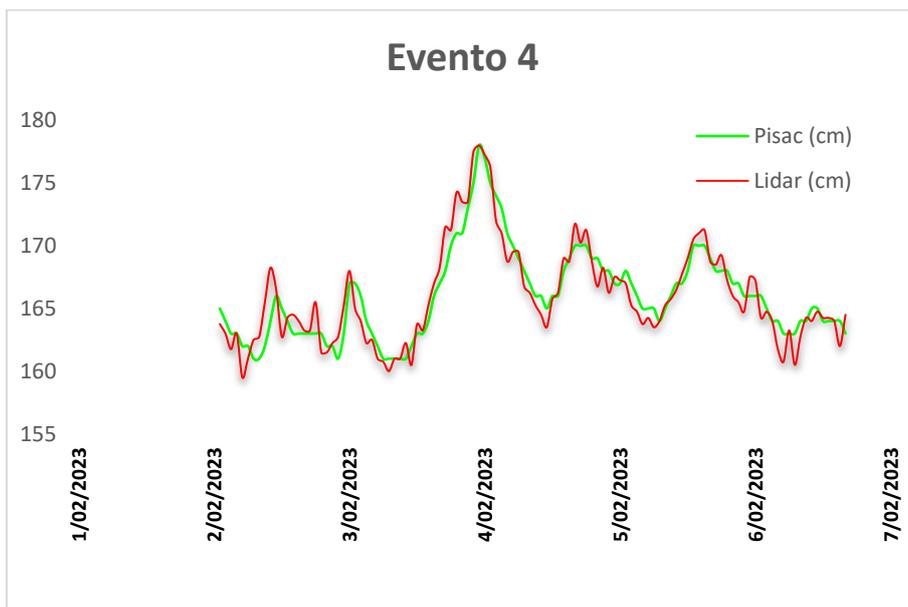


Figura A.4. Evento 4 Periodo de tiempo de 2/02/2023 a 6/02/2023

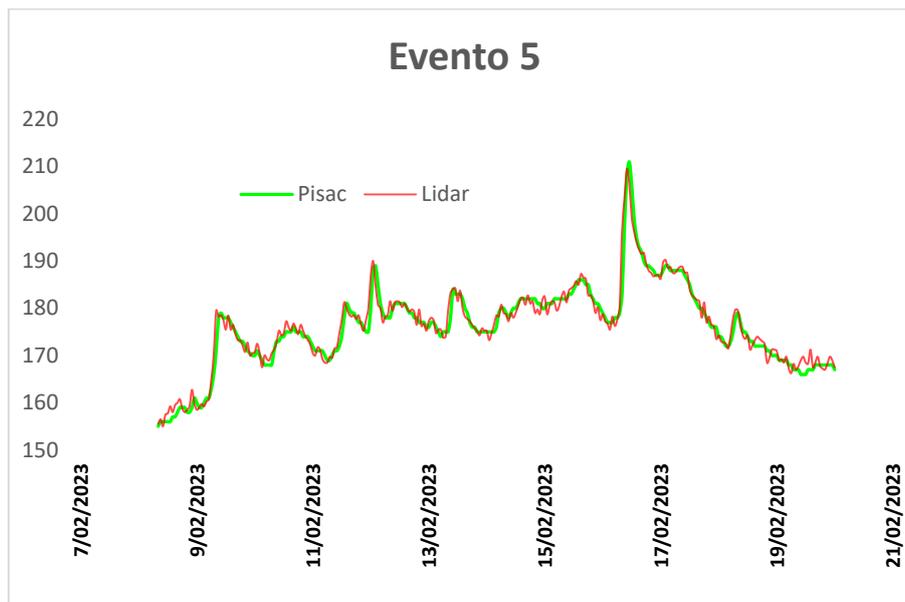


Figura A.5. Evento 5 Periodo de tiempo de 8/02/2023 a 20/02/2023

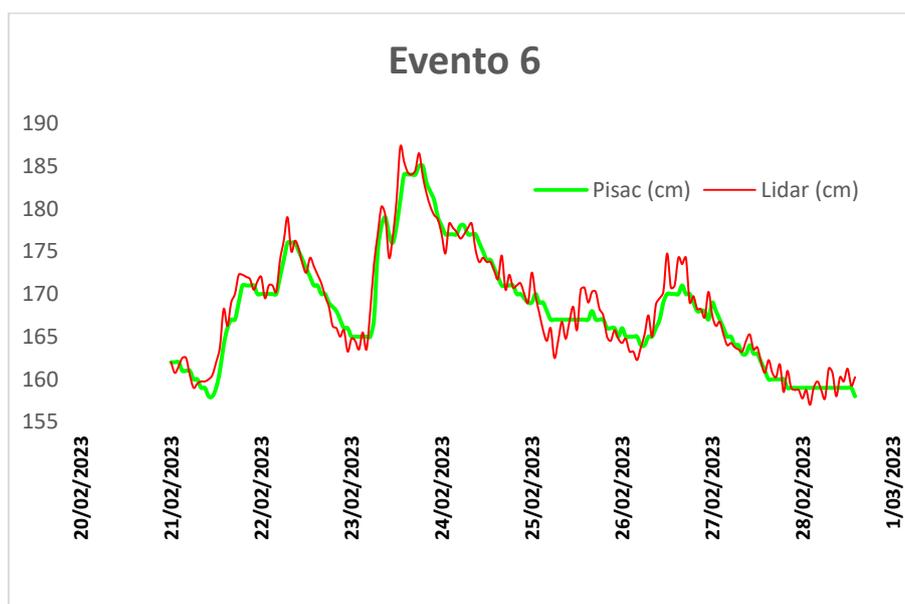


Figura A.6. Evento 6 Periodo de tiempo de 21/02/2023 a 28/02/2023

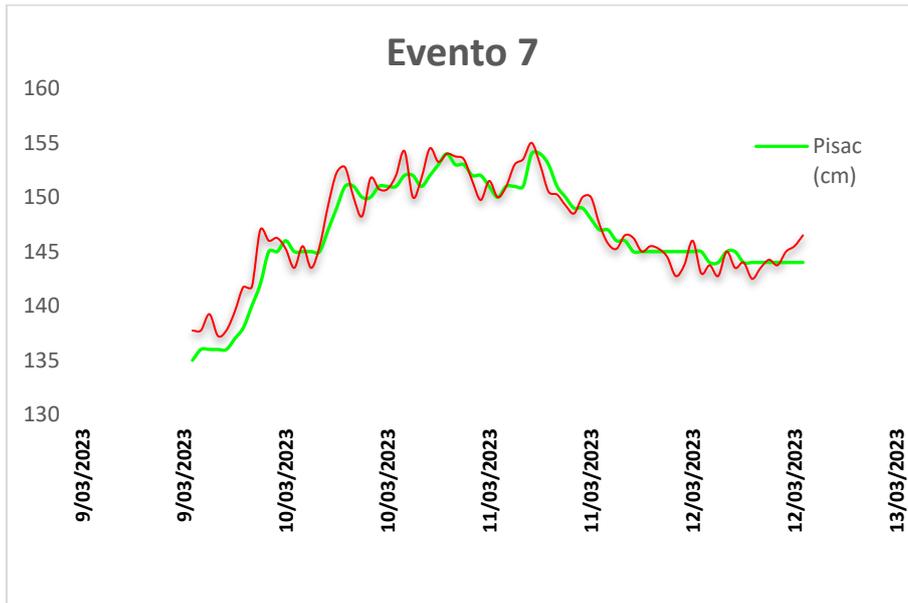


Figura A.7. Evento 7 Periodo de tiempo de 9/03/2023 a 12/03/2023

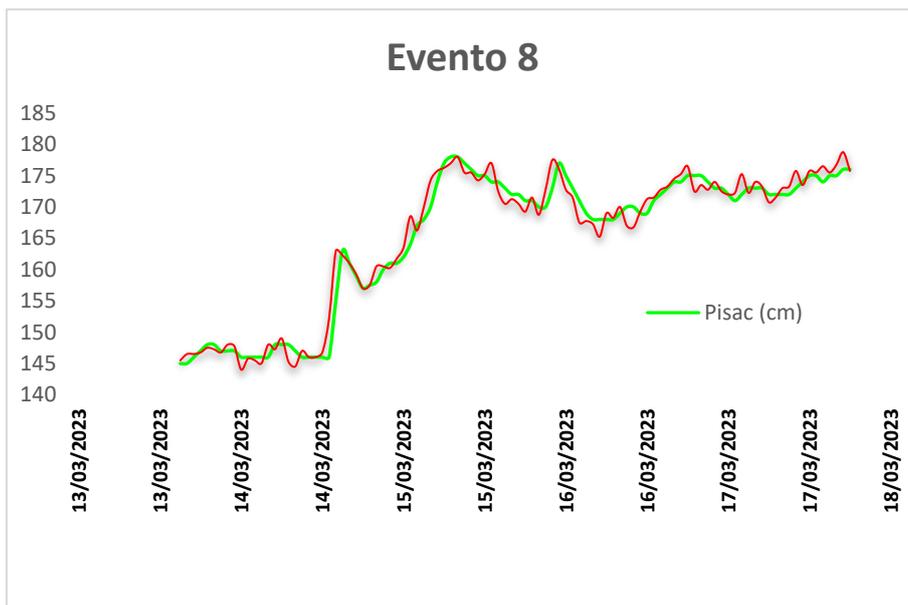


Figura A.8. Evento 8 Periodo de tiempo de 13/03/2023 a 17/03/2023

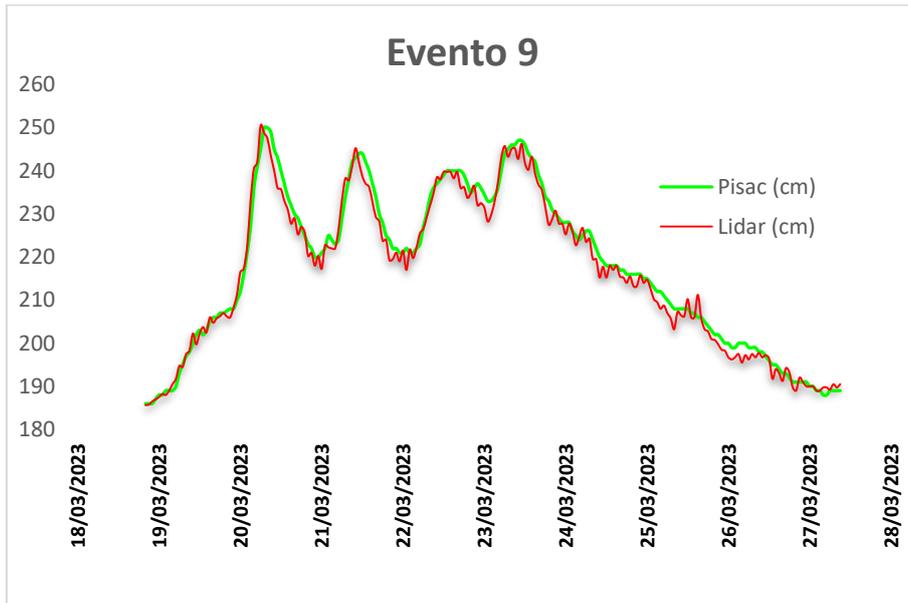


Figura A.9. Evento 9 Periodo de tiempo de 18/03/2023 a 27/03/2023

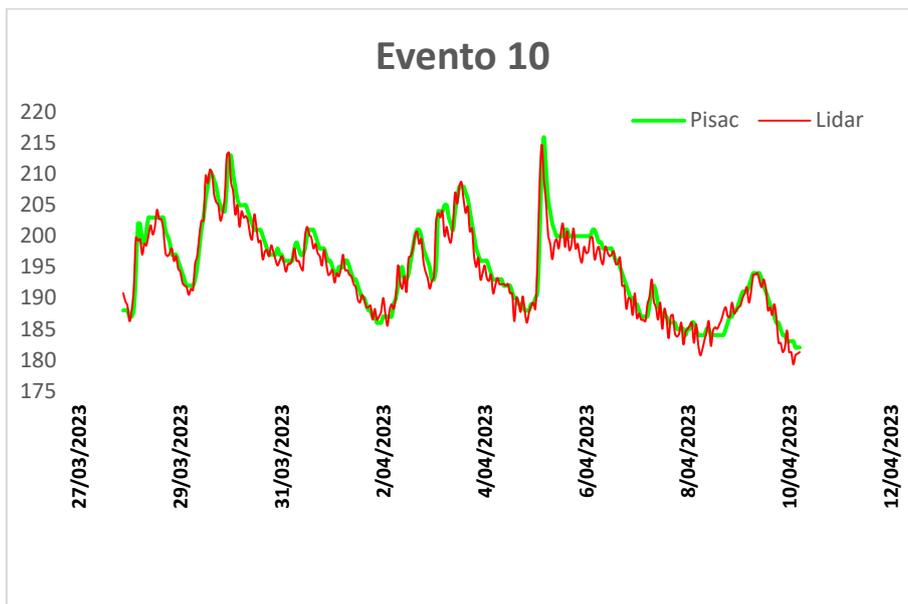


Figura A.10. Evento 10 Periodo de tiempo de 27/03/2023 a 10/04/2023