



**Facultad de Ciencia y Tecnología**

**Escuela de Ingeniería Ambiental**

**Análisis y verificación de las curvas de descarga y cálculo de la incertidumbre  
en las mediciones de nivel y caudal en la cuenca del río Matadero en Cuenca,  
Azuay**

**Trabajo previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Ambiental**

**Autor**

**Carlos Adrián Tacuri Villa**

**Directora**

**Ing. Ana Elizabeth Ochoa Sánchez, Ph.D.**

**Cuenca - Ecuador**

**2023-2024**

## DEDICATORIA

Lleno de regocijo de amor y esperanza, dedico esta tesis a cada uno de las personas que me apoyaron en todo mi trayecto de vida estudiantil, los cuales formaron pilares fundamentales en mi vida.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles a ellos este trabajo, que con mucho esfuerzo, esmero y dedicación he ganado.

A mis padres Rosa y Carlos por darme la vida y la oportunidad de poder salir adelante y ser alguien importante en la vida ya que ellos me enseñaron que nunca es malo volver a iniciar desde cero, y que con esta nueva meta podré demostrar que valió la pena el sacrificio y la confianza. Y en especial a mis abuelos que están el cielo y que siempre me cuidan y protegen a cada paso que doy. A la Ing. Ana Elizabeth Ochoa Sánchez, Ph.D. que me dio la oportunidad de poder realizar este trabajo dentro de un gran proyecto SWACH el cual puede tener una gran acogida, con todos los docentes que están dentro de todo el proyecto, al Ing. Santiago Núñez quien fue un gran cotutor y me supo guiar en cada momento de realizar mi tesis, a mis compañeros de clase que pudimos demostrar que con mucho esfuerzo se puede lograr lo que cada uno de nosotros nos proponíamos, este nuevo logro es gran parte a todos ellos; gracias a todos ellos he podido concluir con éxito un proyecto que un principio pareció una tarea técnica e interminable, ya que he pasado por muchas circunstancias de tristeza, las cuales en cierto punto me quisieron ganar y dejar todo ahí. Todas estas personas fueron dedicadas y siempre confiaron en mí.

**Muchas gracias de corazón.**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, doy gracias a Dios por permitirme tener una buena experiencia dentro de mi universidad, a mis padres por darme la vida y guiarme en el camino de la vida y ser los pilares fundamentales en mi vida, a mis hermanos quienes me apoyaron en los buenos y malos momentos que atravesé en mi vida, siempre me aconsejaron y me dieron alientos para que siga adelante. A mis compañeros de clase que más que compañeros son amigos de la vida con los cuales compartí 4 años y medio dentro de las aulas, y que conjuntamente pudimos pasar ciclo a ciclo sin que nadie nos diga que no podemos. Gracias a cada maestro que hizo parte de este proceso integral de formación, que deja un producto terminado este grupo de graduados, y como recuerdo y prueba viviente en la historia; esta tesis, que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo para las demás generaciones que estén por llegar. A la Universidad de Cuenca por facilitarme los equipos para poder realizar esta importante Tesis, Universidad del Azuay por brindarme las unidades de transporte para así poder movilizarme en todo este tiempo del trabajo de titulación.

Finalmente agradezco a quien lee este apartado y más de mi tesis, por permitirme a más experiencias, investigaciones y conocimiento, incurrir dentro de su repertorio de información mental.

## Índice

Resumen .....	vi
Abstract .....	vii
1. Introducción.....	1
2. Metodología.....	4
2.1. Sitio de estudio .....	4
2.2. Revisión de calidad de curvas de descarga .....	6
Datos previos .....	6
2.3. Recolección de datos en campo: aforos in-situ .....	8
2.4. Análisis de las curvas de descarga .....	10
2.5. Procesamiento de datos .....	11
3. Resultados y discusión .....	12
4. Conclusiones.....	23
5. Referencias .....	25
6. Anexos.....	28

## Índice de Figuras

Figura 1. Sitios de estudio donde se realizaron los aforos. a) Localización de las estaciones de aforo en la cuenca hidrográfica del río Tomebamba, b) sección transversal de la estación Virgen y c) sección transversal de la estación Chirimachay.....	5
Figura 2. Curvas de caudales. a) Estación Virgen y b) Estación Chirimachay .....	7
Figura 3. Aforos mediante el método de trazador de sal: a) verter una determinada cantidad de sal en una cantidad determinada de agua, b) mezclar la sal y agua para obtener una mezcla homogénea, c) verter la solución en el río y d) medir la conductividad aguas abajo.....	10
Figura 4. Regresión lineal entre la cantidad de sal (S) y la conductividad eléctrica (CE) para encontrar el coeficiente de sal que permite calibrar el equipo de medición de conductividad eléctrica a) Primer lote de sal y b) Segundo lote de sal.....	12
Figura 5. Comparación de regresiones lineales, de la calibración de sal con dos equipos diferentes el cual nos muestra una variación del 5% una de la otra.....	14
Figura 6. Comparación de datos con los equipos: iDRHiCA y MACCARD.....	14
Figura 7. Ejemplos de curvas de conductividad eléctrica de las estaciones a) Virgen y b) Chirimachay usadas para calcular cada punto de la curva de descarga.....	16
Figura 8. Curvas de descarga de las estaciones a) Virgen y b) Chirimachay. ....	17
Figura 9. Curvas de descargas actualizadas de la estación Chirimachay, con sus diferentes años 2014-2023 .....	18
Figura 10. Curvas de descarga 2014, curva actual 2014-2023, y curva nueva 2023 en adelante .	19
Figura 11. Comparación de métodos: Trazador de sal y método de molinete.....	20
Figura 12. Comparación de caudales bajos entre la curva actual y la anterior.....	22

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Caudales mínimos, promedio y máximo de las estaciones Virgen y Chirimachay .....	7
Tabla 2. Tabla de aforos actuales .....	15
Tabla 3. Comparación de aforos medidos en la misma sección entre Método molinete y el Método trazador de sal .....	21

## **Resumen**

El suministro de agua potable en la ciudad de Cuenca depende del agua disponible en sus ríos, y por ello, es importante un adecuado monitoreo de sus caudales. Los caudales se estiman midiendo el nivel de agua en los ríos. Las curvas de descarga, a su vez, relacionan los caudales con los niveles de agua, pero es necesario actualizarlas periódicamente. Para ello, se emplea el método de trazador de sal, que mide la conductividad eléctrica en el río al verter solución salina, para así medir el caudal. El objetivo principal de este estudio, fue verificar y actualizar las curvas de descarga de dos estaciones localizadas en el río Tomebamba, para obtener estimaciones confiables de caudales. Los resultados permitieron la validación y actualización de las curvas de descarga durante periodos secos al medir caudales del período de estiaje entre agosto y diciembre del año 2023.

**Palabras clave:** caudales, recursos hídricos, trazador de sal, curvas de descarga, agua y saneamiento.

## **Abstract**

Drinking water supply in the city of Cuenca relies on water available in its rivers; and therefore, an adequate discharge monitoring is necessary. Discharge is estimated from water level measurements in rivers. Discharge curves then, relate discharge and water levels, but they need to be updated. For this objective, the salt tracer method is used, which measures electrical conductivity in the river by pouring saline solution, allowing discharge estimation. The main objective of this study was to verify and update the discharge curves of two stations located in the Tomebamba River, to obtain reliable discharge measurements. The results allowed the validation and update of the discharge curves during dry periods, by collecting information during the dry event between August and December, 2023.

**Keywords:** discharge, water resources, salt tracer method, discharge curve, water and sanitation.



## 1. Introducción

El cambio climático ha aumentado desde la revolución industrial (1800) y ha causado incrementos en la temperatura, cambios en la precipitación y consecuentes impactos en sistemas naturales y humanos (IPCC, 2023). Uno de los sistemas en donde más evidencia existe sobre los impactos del cambio climático es el agua, donde se han observado cambios en la cantidad y calidad de agua de los ríos y se proyectan cambios aún más severos a futuro (IPCC, 2022). En las tres regiones del Ecuador, los cambios en el clima pueden causar grandes riesgos debido a la alta vulnerabilidad de la región, la gran exposición y amenazas que sufren (Stúbli A. et al., 2018). Por ejemplo, existen variaciones continuas en las precipitaciones que han disminuido y aumentado drásticamente los caudales en cada época del año, lo que ha provocado problemáticas en la disponibilidad de agua (Molina, 2015; Paerregaard, 2018; Carmona, 2014). La disponibilidad de agua no solo podría estar afectada por el cambio climático, sino también por el incremento poblacional de las ciudades más grandes del Ecuador como: Guayaquil, Quito y Cuenca que ha tenido un incremento de 1.2% en las zonas urbanas (Banca Mundial, 2023).

El proyecto “Manejo sostenible del agua bajo escenarios de cambio climático”, SWACH (por sus siglas en inglés de “Sustainable Water Management under Climate Change Scenarios in Southern Ecuador”) llevado a cabo entre las Universidades de Azuay, Cuenca y KULeuven, en conjunto con ETAPA EP, tiene como objetivos reducir la incertidumbre de proyecciones de disponibilidad de agua futura y desarrollar estrategias de respuesta que ayuden a Cuenca y otras ciudades andinas a adaptarse mejor al cambio climático, asegurando un suministro de agua sostenible hacia el 2100. Su enfoque específico es generar proyecciones de disponibilidad y demanda de agua, la cual se contrasta con la percepción del consumo y hábitos de las personas en sus

hogares, para así proponer y desarrollar estrategias de gestión del agua, que contribuya a la seguridad hídrica de las ciudades andinas (SWACH, 2023).

Para analizar la disponibilidad de agua, es necesario monitorear los caudales de los ríos y conocer los impactos del cambio climático a futuro. Este monitoreo es especialmente importante en zonas altas de montaña, donde se origina el agua. En nuestro medio, estos puntos se encuentran en el ecosistema de páramo. A nivel nacional, se ha propuesto incrementar el estudio, conservación y manejo adecuado de los páramos mediante diferentes estrategias, ya que proveen de servicios ecosistémicos, como el almacenamiento de agua en épocas de sequías o estiaje (Hofstede et al. 2023; MAATE, 2023). Para una gestión integral de recursos hídricos, es necesario monitorear las variables del ciclo hidrológico, por ello, medir los caudales es de gran importancia. En este sentido, el observatorio eco-hidrológico Quinuas mantiene estaciones hidrológicas en la cuenca del río Tomebamba desde el año 2013 (Mosquera Giovanni M, 2016), que miden nivel de agua en los ríos con una resolución temporal diaria, las mismas que necesitan una actualización de sus curvas de descarga para estimar el caudal de forma precisa.

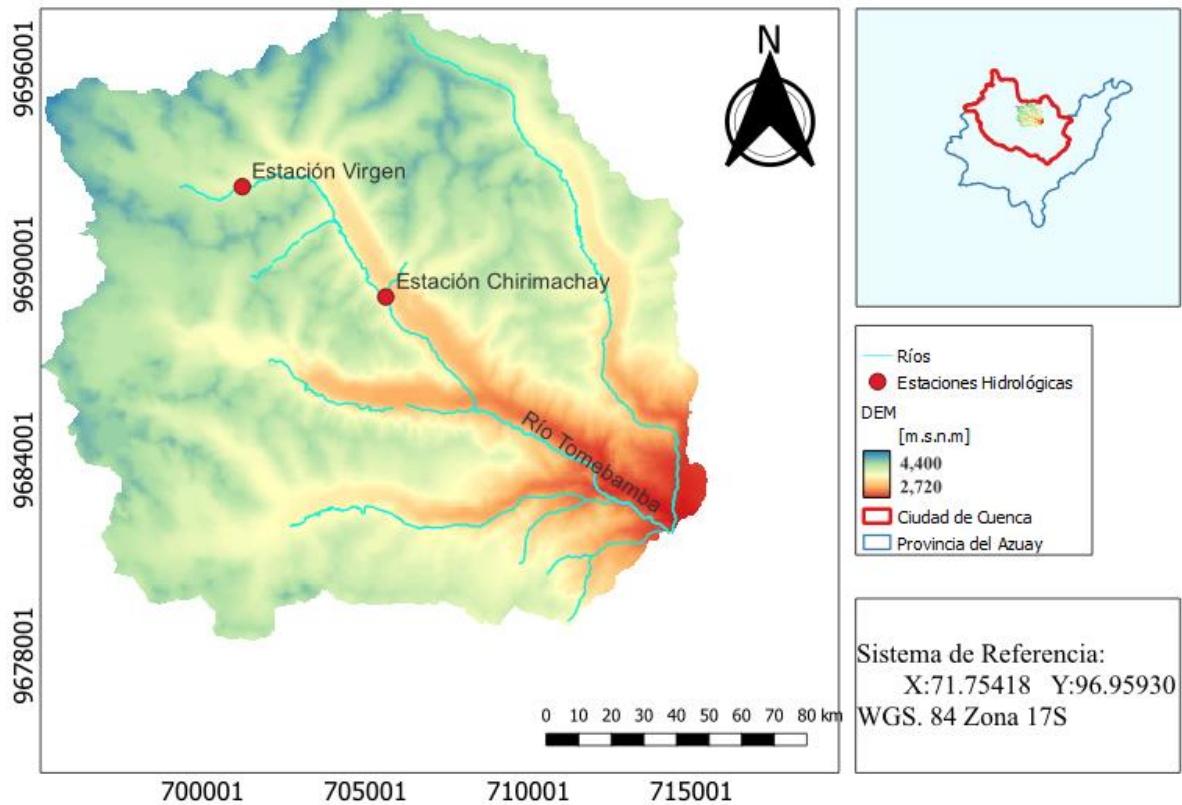
El incremento o disminución de los caudales depende de varios factores, entre ellos el cambio climático y la intervención directa en los ecosistemas como el cambio de uso de suelo y el manejo de los recursos (Molina, 2015; Carmona, 2014). En este sentido, la gestión integrada de los recursos hídricos debe proponer estrategias que contribuyan al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. Este criterio ayuda a regular las actividades humanas para mantener la calidad y cantidad de los recursos hídricos (seguridad hídrica) que, a su vez, asegure servicios ecosistémicos necesarios como el uso del agua para actividades domésticas, agricultura, turismo, entre otras (Heredia, 2015).

Parte fundamental de la gestión de recursos hídricos consiste en el monitoreo continuo de los componentes del ciclo hidrológico, incluyendo la medición de caudales. La curva de descarga relaciona los niveles de agua (medidos en campo) y los caudales. Esta curva suele sufrir variaciones y cambios debido a alteraciones en la morfología del río, influencia de sedimentos, crecidas de los niveles de agua en el río y/o intervenciones antrópicas, que afectan la estructura de las secciones transversales donde se miden los niveles de agua. Entonces, es necesario medir suficientes puntos en el campo (i.e. niveles de agua bajos, medios y altos) y realizar verificaciones continuas a lo largo del tiempo de monitoreo de caudales para que la curva de descarga incluya todo el rango de datos posibles, y que por consecuencia el cálculo de caudales promedios, máximos y mínimos describan mejor el comportamiento del cauce (Walter, 2009). El objetivo de este trabajo es actualizar y estimar la incertidumbre de las curvas de descarga de dos estaciones de la cuenca del río Quinuas, mediante la revisión bibliográfica de los métodos de cálculo de las curvas, los aforos (medición de caudales) in-situ, el análisis de las curvas de descarga existentes, la determinación de los factores que influyen en el cálculo de las curvas y su actualización. Este estudio se centra en la cuenca hidrográfica del río Quinuas, que pertenece a la cuenca del río Tomebamba y está ubicada dentro del Parque Nacional El Cajas, el cual es considerado un área protegida a nivel nacional.

## **2. Metodología**

### **2.1. Sitio de estudio**

Este estudio se lleva a cabo dentro del Parque Nacional Cajas ubicado en la Provincia del Azuay, cantón Cuenca, el cual tiene una extensión de 28.544 ha, su altitud varía entre los 3.152 msnm a 4.445 msnm, su temperatura promedio es de 18.5 grados Celsius en las mañanas y su temperatura mínima en promedio es de -2.6 grados Celsius en la noche, esto dentro de un año (Mosquera Giovanni M, 2016). Se encuentra dentro de las áreas protegidas más grandes del Ecuador que alberga 235 lagunas (MAE, 2007) y arroyos que luego forman parte de los ríos Tomebamba y Yanuncay, que son importantes fuentes de agua potable para la ciudad de Cuenca, además, de varios tipos de ecosistemas con flora y fauna endémicas (MAATE, 2018). La precipitación promedio anual en la zona de estudio fluctúa entre los 1.000 a 2.000 mm. La cuenca de Quinuas y Matadero forman parte importante de la cuenca del río Tomebamba, la cual tiene un área aproximada de 338.32 Km<sup>2</sup> y un caudal promedio de 21 m<sup>3</sup>/s de toda la cuenca (Quezada, 2015). El observatorio eco hidrológico de la cuenca de Quinuas es uno de los sitios mejor equipados en el Ecuador. Este incluye mediciones de variables climáticas, hidrológicas y de calidad del agua. La cuenca del río Quinuas tiene una extensión aproximada de 94.1 km<sup>2</sup> y está ubicada aproximadamente a 35 km al noroeste de la ciudad de Cuenca. El observatorio corresponde a un ecosistema de páramo que se extiende entre los 2700 y 4400 m s.n.m. Las estaciones en las que se realizó el presente estudio son: Virgen y Chirimachay (Figura 1), que se encuentran dentro del observatorio.



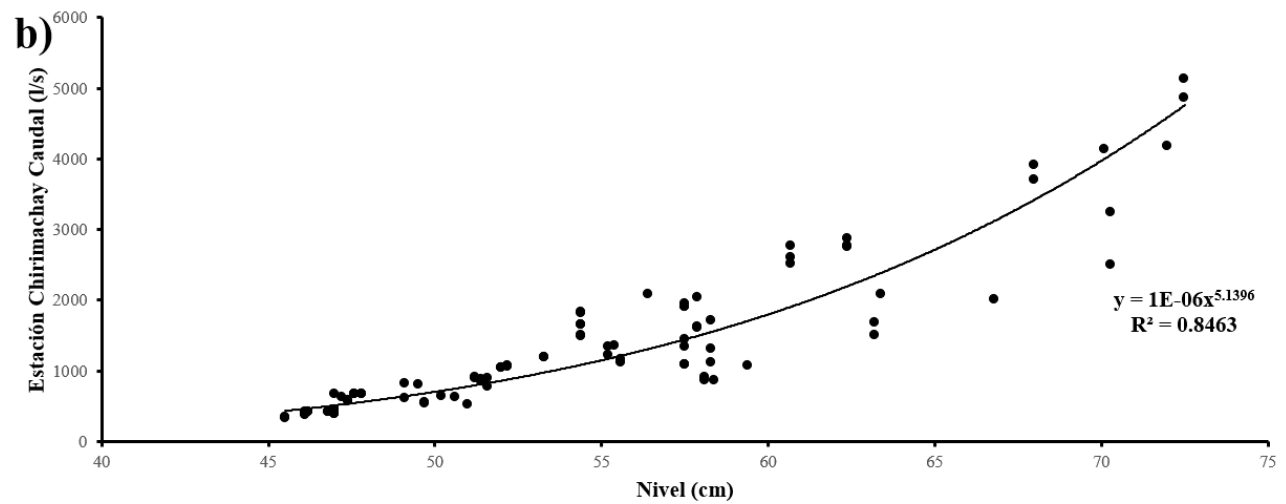
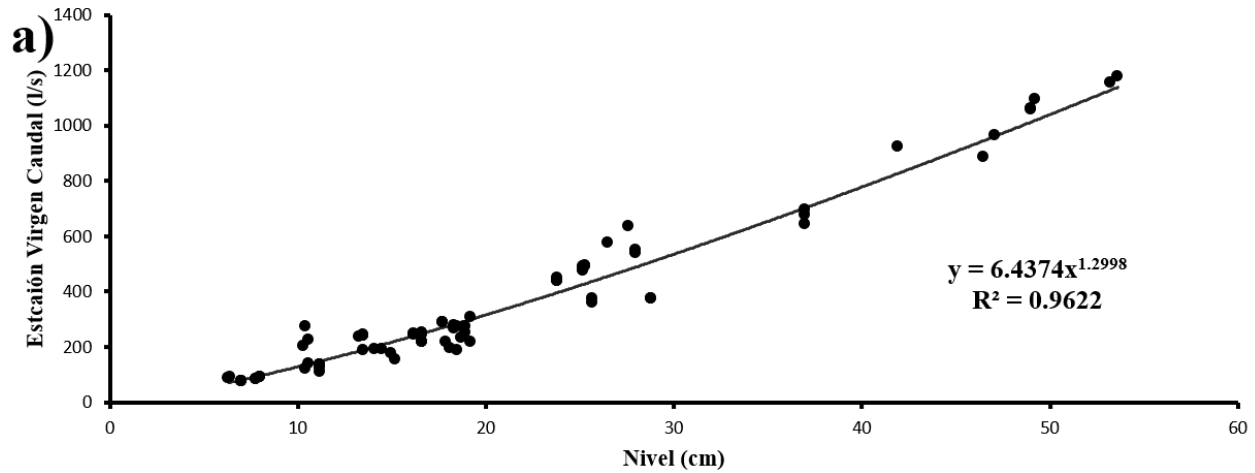
**Figura 1.** Sitios de estudio donde se realizaron los aforos. a) Localización de las estaciones de aforo en la cuenca hidrográfica del río Tomebamba, b) sección transversal de la estación Virgen y c) sección transversal de la estación Chirimachay

**Fuente:** Elaboración propia (Qgis)

## **2.2. Revisión de calidad de curvas de descarga**

### **Datos previos**

La información de datos hidrometeorológicos se obtuvo de estudios previos y datos de monitoreo realizados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA) de la Universidad de Cuenca, cuyos datos son compartidos con la Universidad del Azuay a través del proyecto SWACH (SWACH, 2023). Los datos han sido recopilados en dos estaciones hidrológicas: Virgen y Chirimachay. Es importante mencionar que ya existen curvas de descarga para estas estaciones, cuyos datos fueron considerados, sin embargo, esta información fue recopilada hace aproximadamente 15 años. En este estudio, se realiza la verificación y ajuste de cuánto han variado las relaciones entre caudales y nivel durante estos años. En la Figura 2 podemos observar las curvas de descarga realizadas a partir de información recopilada durante los años 2014 y 2018. Así mismo, la Tabla 2 muestra los caudales máximos, promedios y mínimos de las estaciones.



**Figura 2.** Curvas de caudales. a) Estación Virgen y b) Estación Chirimachay

**Fuente:** Elaboración a partir de datos levantados por iDRHiCA, Universidad de Cuenca

**Tabla 1.** Caudales mínimos, promedio y máximo de las estaciones Virgen y Chirimachay

Estaciones	Caudal (l/s)		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Virgen	74.34	373.58	1178
Chirimachay	333.34	1415.78	5128

### **2.3. Recolección de datos en campo: aforos in-situ**

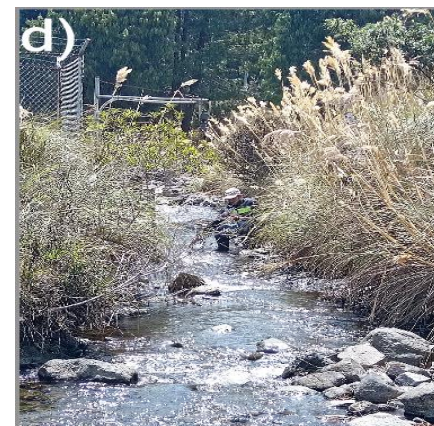
El método de trazador de sal se basa en la capacidad del flujo de agua para diluir uniformemente el marcador en el agua. Debido a que la pendiente media de los ríos y arroyos en las zonas montañosas es superior al 35% y el caudal de agua es rápido, la aplicación de este método es recomendable en el área de estudio (Mario Guallpa, 2022). Además, según Kite (1993), esta técnica debería aplicarse cuando los caudales son inferiores a  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la zona de estudio el caudal máximo medido en las estaciones fue de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por tanto, este método fue empleado adecuadamente en la medición caudales bajos, medios y altos de las estaciones Virgen y Chirimachay. Para encontrar las relaciones de caudal y nivel de agua se obtuvo datos de caudal en campo con el método de trazador de sal. Este método se utiliza en riachuelos, arroyos o quebradas que tienen caudales pequeños, como es el caso del presente sitio de estudio. En primer lugar, se debe obtener un coeficiente de sal, para lo cual se inicia vertiendo una medición exacta de gramos de sal en 6 litros de agua, diluyendo la sal completamente y posteriormente midiendo con el sensor de conductividad a cada segundo, para obtener así el coeficiente de 2,1804 que se pudo calcular para el presente estudio. A partir de esto se utilizó dos lotes de sal diferentes los cuales los rangos de coeficientes estuvieron entre 2.15 y 2.18. Este coeficiente servirá después para el cálculo de la curva de calibración y estimación del caudal. Para evaluar la incertidumbre en el cálculo del coeficiente de sal, se emplearon dos equipos que miden la conductividad eléctrica durante el cálculo del coeficiente. Las diferencias en el valor fueron de alrededor de 0.1 (Menos del 5%).

En segundo lugar, el método de trazadores de sal consiste en verter en un punto de la quebrada una cantidad de sal conocida disuelta en agua y aproximadamente 20 metros aguas abajo medir el cambio de conductividad en el agua de la corriente. La conductividad inicial del río cambiará,



elevándose hasta llegar a un pico, para posteriormente descender y llegar a su valor inicial. Al graficar los datos de tiempo y conductividad, se tendrá un área bajo esa curva que servirá para calcular el caudal (Crespo, 2023). Es necesario considerar que siempre se deben realizar dos o más repeticiones, para posteriormente obtener un promedio en las mediciones, y así, tener una mejor confiabilidad en los datos de los caudales. Además de esto las mediciones de descarga son muy precisas cuando las relaciones inicial-máxima de las conductividades eléctricas están entre 2.5 y 3 (us/cm).

A continuación, en la Figura 3, se puede observar el método de trazador de sal, representado en cada paso.



**Figura 3.** Aforos mediante el método de trazador de sal: a) verter una determinada cantidad de sal en una cantidad determinada de agua, b) mezclar la sal y agua para obtener una mezcla homogénea, c) verter la solución en el río y d) medir la conductividad aguas abajo.

**Fuente:** Elaboración Propia

#### **2.4. Análisis de las curvas de descarga**

El procedimiento para ajustar y calibrar una curva de descarga consiste en ajustar una función matemática que relaciona las mediciones del caudal con el nivel del agua medido en campo. Se pueden utilizar diferentes tipos de funciones, como lineales, polinómicas, logarítmicas o de potencia. La elección de la función depende del comportamiento hidráulico del tramo medido y del criterio propio.

Una función usada comúnmente para ajustar las curvas de caudal es la potencial que consiste en convertir los datos de caudal y nivel a sus logaritmos naturales y luego aplicar la regresión lineal (Bolaños, 2018).

De esta forma se obtiene una ecuación de la forma:

$$Q = a * hb$$

Donde, Q es el caudal, H es el nivel del agua, a y b son constantes determinadas por el método de mínimos cuadrados.

Esta ecuación permite estimar el caudal para cualquier valor de nivel de agua dentro del rango de datos medidos en campo. Con la aplicación del método se analizó cada una de las curvas de descarga que se obtuvieron en años anteriores para observar si existe algún tipo de cambio en la curva, o si se ajusta con los nuevos datos tomados en campo, en ambas estaciones hidrológicas.

## 2.5. Procesamiento de datos

Una vez descargados los datos de conductividad del sensor, se procede a organizarlos en una hoja de cálculo de Excel, en donde se realiza un análisis y verificación de los datos obtenidos por parte del equipo de conductividad, por lo que se genera las figuras de conductividad eléctrica.

Una vez realizado esto, en el mismo software, se realizó el cálculo de las curvas de descarga de datos nuevos y anteriores para compararlos. Para calcular la descarga, hay que construir la curva de tiempo-EC. El área bajo la curva corresponde al aumento de la EC debido a la sal inyectada.

El equivalente de sal atraviesa la sección en cada paso de tiempo se obtiene entonces mediante el factor de conservación (K). En este caso  $K=2.1804$  (l/mg\*us/cm). El área bajo la curva se determina mediante la Ecuación 1 y la descarga mediante la Ecuación 2.

Ecuación 1.

$$\int (EC(t) - EC_{bg}(t)) dt \approx \sum (EC(t) - EC_{bg}(t)) dt$$

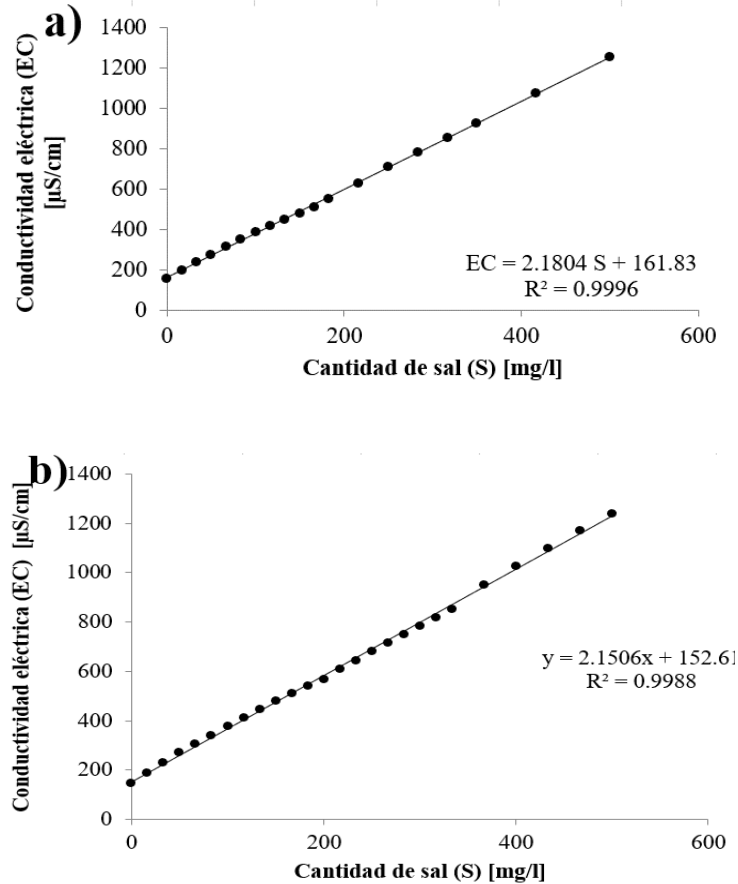
Ecuación 2.

$$Q = \frac{M}{A/K}$$

Ecuación 1 y 2. Donde A es el área bajo la curva de medición (us/cm\*s); EC es la conductividad eléctrica en el tiempo t (us/cm).  $EC_{bg}$  es la conductividad eléctrica inicial del río (us/cm); M es la cantidad de sal que se inyecta (mg); K es el factor de conversión: y Q es la descarga estimada.

### 3. Resultados y discusión

El presente estudio tuvo como finalidad analizar y actualizar las curvas de descarga de las estaciones Virgen y Chirimachay, que se encuentran en la cuenca del río Quinuas dentro del Parque Nacional El Cajas. A continuación, se muestra en la Figura 4 los coeficientes de sal que se necesitaban obtener, para la calibración del equipo de medición de conductividad eléctrica y previo a la medición de conductividad cuando se realizaron las curvas de descarga.

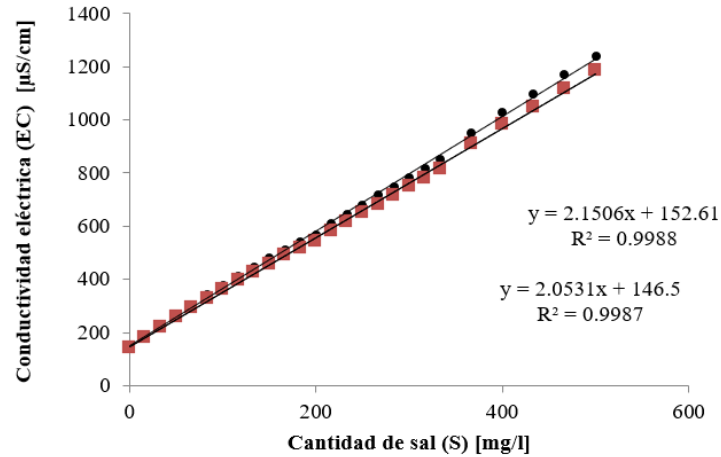


**Figura 4.** Regresión lineal entre la cantidad de sal (S) y la conductividad eléctrica (CE) para encontrar el coeficiente de sal que permite calibrar el equipo de medición de conductividad eléctrica a) Primer lote de sal y b) Segundo lote de sal

**Fuente:** Elaboración propia

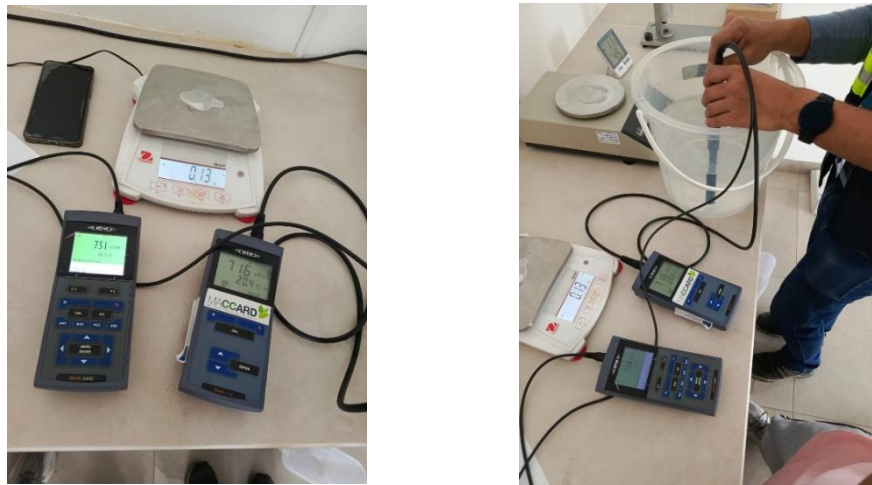
Como se puede observar en la Figura 4, hay una variación en las ecuaciones lineales, según los lotes de sal que se utilizaron en las salidas de campo para los aforos de caudal. Hay que tener en consideración que cada vez que se utilice un nuevo lote de sal, se debe realizar esta calibración para que, al utilizar el coeficiente de esta ecuación el caudal esté medido bajo las mismas condiciones en todos los aforos que se realizan al actualizar la curva de descarga.

En la Figura 5, se muestra la incertidumbre que existe para la regresión lineal, ya que se realizó una comparación de datos con dos sondas de conductividad eléctrica diferentes proporcionadas por iDRHiCA y la Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible – MACCARD de la Universidad del Azuay. Se puede observar un rango de error de 5%, el cual crea una variación al momento de calcular el caudal ya que este coeficiente es necesario para poder calibrar el equipo de conductividad eléctrica. En consecuencia, el coeficiente de la ecuación usando el primer equipo fue 2.1506 y usando el segundo equipo fue 2.0531. Es por ello, que, para realizar una curva de descarga, es necesario primero calibrar los equipos. En la Figura 6 se puede observar fotografías del uso de varios equipos que llevaron a este análisis de incertidumbre.



**Figura 5.** Comparación de regresiones lineales, de la calibración de sal con dos equipos diferentes el cual nos muestra una variación del 5%.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 6.** Comparación de datos con los equipos de iDRHiCA y MACCARD

**Fuente:** Elaboración propia

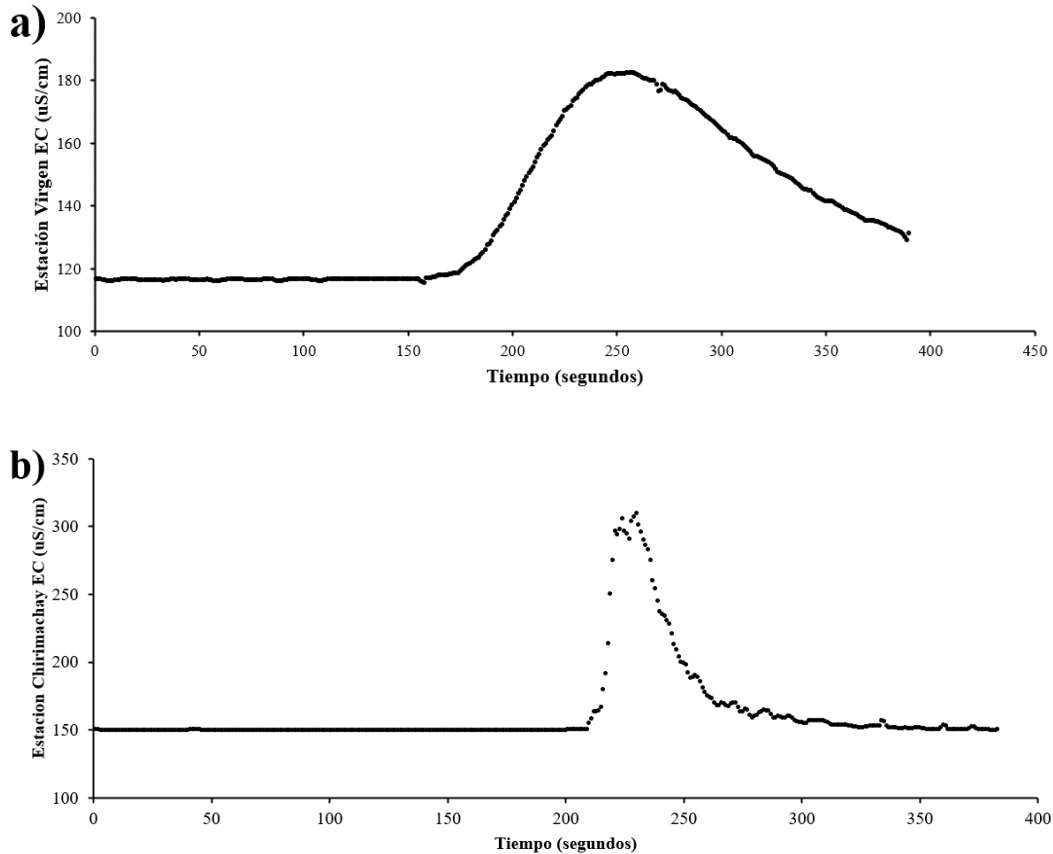
A continuación, en la Tabla 2 se puede observar el listado de los aforos realizados en cada estación hidrológica, organizados por fecha y los caudales que se midieron.

**Tabla 2.** *Tabla de aforos actuales*

**Fuente:** *Elaboración propia*

<b>Caudal (l/s)</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Virgen</b>	<b>Chirimachay</b>
10/8/2023	156.37	716.66
5/10/2023	40.93	446.00
1/11/2023	45.20	320.00
15/11/2023	30.68	354.00
24/11/2023	28.90	412.24

En cada aforo y en cada estación, se midieron las curvas de conductividad eléctrica. En la Figura 7, se encuentran ejemplos de estas curvas, con las cuales, se pudieron obtener los caudales en el instante en el que se realizó el método trazador de sal. Los datos de estas figuras fueron tomados en campo y usados para el cálculo de las curvas de descarga. Cada curva de conductividad eléctrica corresponde a un aforo en campo; y, por consecuencia, a un punto de la curva de descarga de una determinada estación.



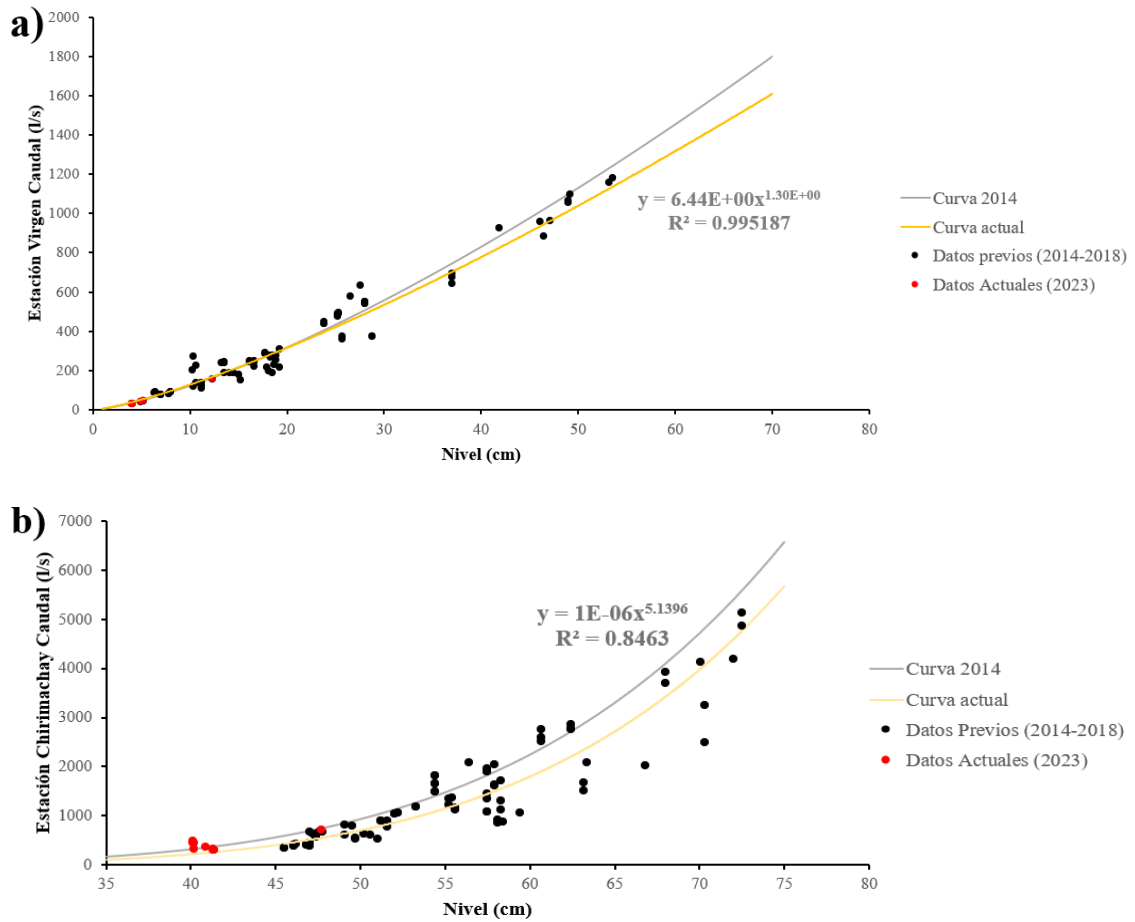
**Figura 7.** Ejemplos de curvas de conductividad eléctrica de las estaciones a) Virgen y b) Chirimachay usadas para calcular cada punto de la curva de descarga.

**Fuente:** Elaboración propia

A partir del cálculo bajo el área de las curvas de conductividad (p. ej. Figura 7), se encontraron los puntos de caudal y nivel expresados en las curvas de descarga mostradas en la Figura 8. Es necesario recalcar que las curvas tienen un valor inicial distinto en el eje X: la estación de Virgen inicia en 0 cm, mientras que la estación de Chirimachay inicia en 35 cm de nivel de agua. Las curvas de descarga relacionan los datos de los niveles de agua con los datos de los caudales. En la Figura 8 están incluidos los datos previos obtenidos durante los años 2014 y 2018 (puntos de color negro); así como los datos levantados en este estudio, durante los meses desde agosto hasta



diciembre del 2023 (puntos de color rojo). La Figura 8 también muestra las curvas de descarga ajustadas en el año 2014 (color gris) y las curvas de descarga ajustadas en este estudio (color amarillo).



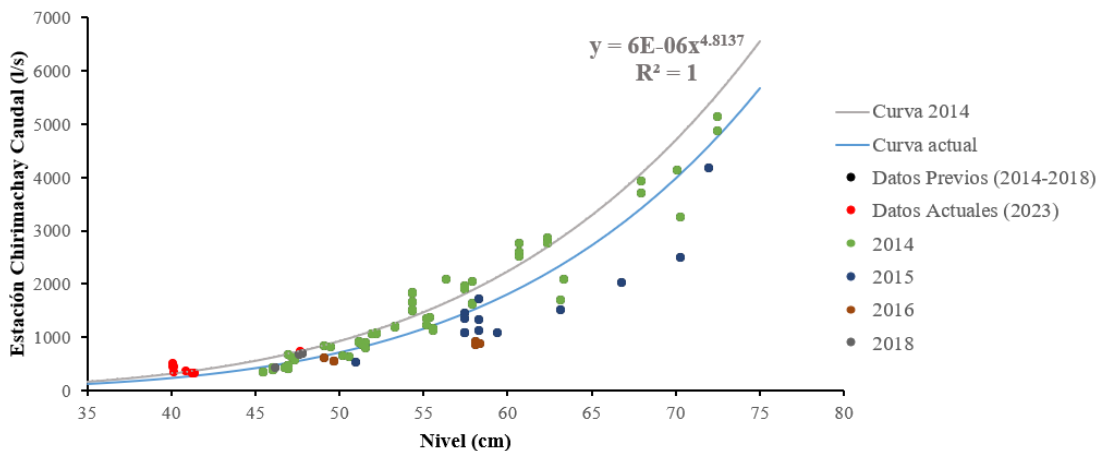
**Figura 8.** Curvas de descarga de las estaciones a) Virgen y b) Chirimachay.

**Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 8 se pueden comparar los aforos realizados entre los años 2014-2018 y los actuales 2023. Existe una semejanza en los datos. Sin embargo, debido a que los aforos de este año se realizaron durante los meses de estiaje, es necesario que se realicen aforos adicionales durante épocas lluviosas. Es primordial la toma de nuevos datos en épocas de precipitaciones intensas en

años posteriores, esto suele suceder en los meses entre enero y mayo, con el fin de actualizar las curvas de descarga en su totalidad. Sin embargo, el levantamiento de datos de la curva durante el periodo de estiaje actual, que fue el tercero más importante de los últimos 50 años y el más severo desde la instalación de los equipos de monitoreo en Quinuas, permite obtener datos en el extremo inferior izquierdo de las curvas y esto implica una contribución importante a reducir la incertidumbre en la estimación de caudales del río Tomebamba.

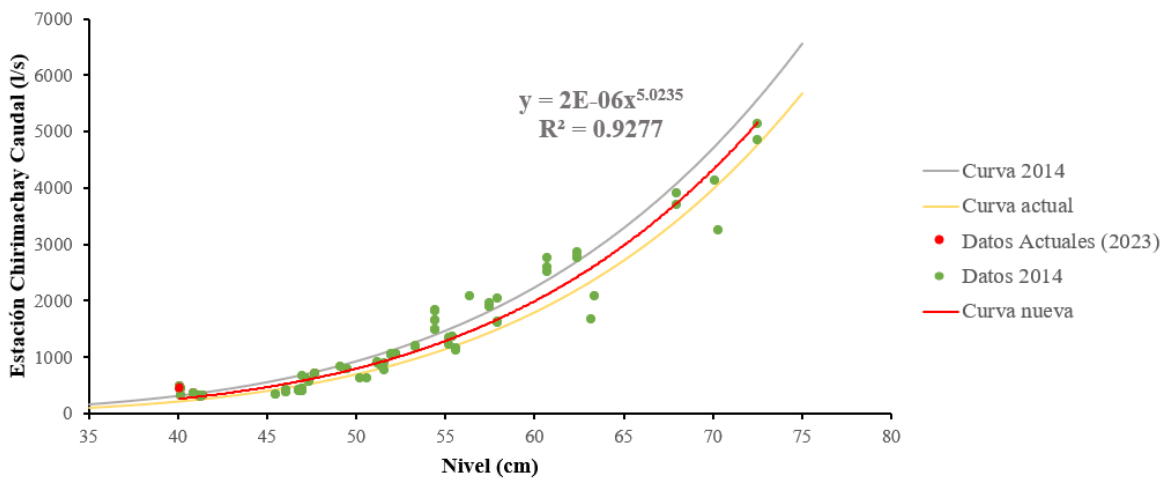
En la Figura 9 se muestra una comparación de aforos de los diferentes años entre el 2014 y 2023 y las curvas de descarga del 2014 y la curva actualizada, que será de utilidad para los aforos de ahora en adelante. Así, se puede ver que en la estación de Chirimachay las curvas de descarga varían año a año, mostrando una incertidumbre considerable. Se aprecia en la figura que durante la campaña de aforos de 2015 y 2016, los caudales se encuentran más bajos y han sufrido una variación en el tiempo. Lastimosamente, debido a la época seca, no se pudo realizar aforos en caudales altos para verificar el cambio en esta región de la curva, pero es una tarea pendiente para futuras investigaciones.



**Figura 9.** Curvas de descargas actualizadas de la estación Chirimachay, con sus diferentes años 2014-2023

**Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 10, se generó una nueva curva que se ajusta a los datos del 2014 y 2023 sin considerar los datos de los años 2015 al 2018 ya que son más similares a la curva de descarga anterior (Curva 2014 en la Figura 9).



**Figura 10.** Curvas de descarga 2014, curva actual 2014-2023, y curva nueva 2023 en adelante

**Fuente:** Elaboración propia

Para finalizar el análisis de los datos con los nuevos aforos, se realizó una comparación de métodos (trazador de sal vs método del molinete). En la Figura 11, se puede observar una variación en los datos en cuanto a caudal debido a la cantidad de agua que existió en las zonas de estudio, y debido al factor de estiaje el cual se debe en parte a la disminución en la precipitación. Los caudales fueron parecidos a los registrados por parte de iDRHiCA en los años 2014-2018, ya que estos se encuentran dentro de los caudales bajos y dentro de la curva de descarga. Los dos métodos sirven para verificar que cantidad de caudal existe en un área determinada y tiempo determinado, pero a comparación del método de sal utilizado en este estudio, el método del molinete registra la velocidad aproximada del río y multiplica ésta por el área de la sección del

río. Una de las observaciones que se pudo apreciar en campo del método molinete, es que al realizar la toma de datos cuando el nivel de agua en el río es muy bajo, las aspas del molinete pueden chocar en las rocas, ramas o sedimentos, impidiendo que giren y ocasionando mediciones erradas. Por otro lado, al realizar el método de trazador de sal, hay que tener en consideración el ingreso y salida de agua al sitio de estudio, verificar si existen acumulaciones de agua (piscinas) en donde se pueda estancar la sal diluida y no pueda mezclarse, lo que causaría errores en la medición de la conductividad eléctrica.



***Figura 11. Comparación de métodos: Trazador de sal y método de molinete***

***Fuente: Elaboración propia***

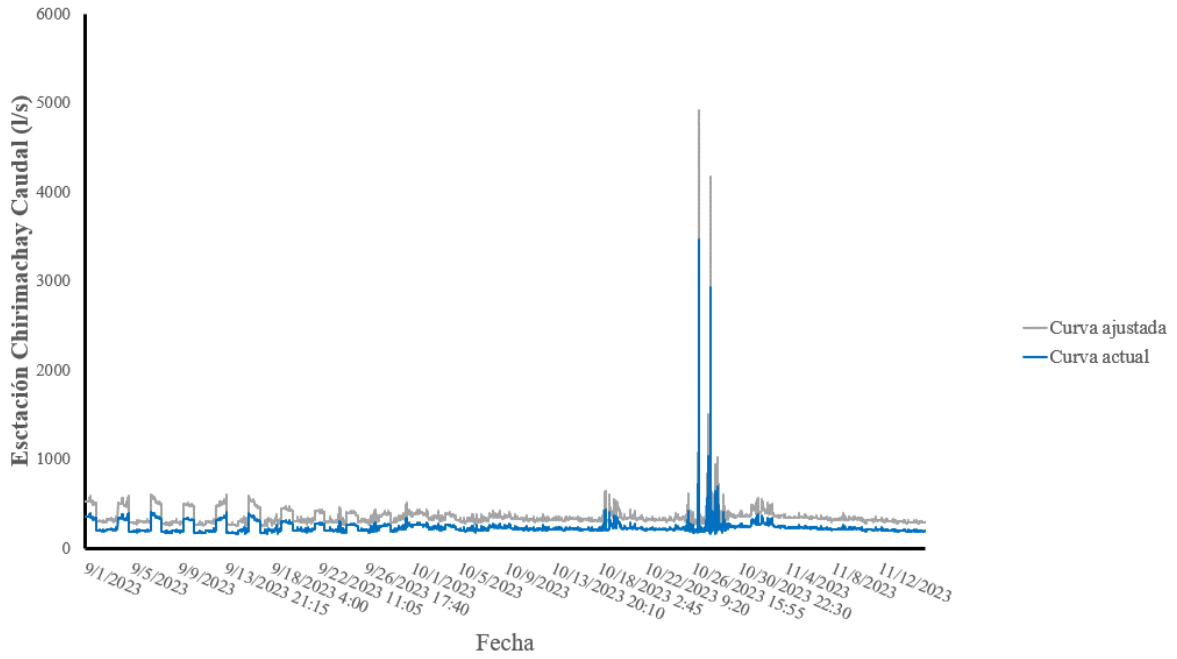
**Tabla 3.** Comparación de aforos medidos en la misma sección entre Método molinete y el Método trazador de sal

<b>Caudal (l/s)</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Estación</b>	<b>Trazador de sal</b>	<b>Molinete</b>
24/11/2023	10:20	Virgen	28.79	22.2
24/11/2023	10:35	Virgen	29.01	N/A
24/11/2023	11:28	Chirimachay	422.24	401.9
24/11/2023	11:47	Chirimachay	313.28	N/A

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 3 se puede comparar los caudales medidos en las mismas estaciones con los dos métodos (i.e. molinete y trazador de sal). Existe una variación de caudales considerable entre un 0.5 (5%) de cambio, lo que indica que el método de trazador de sal es más recomendable que el método de molinete, en caudales bajos.

La actualización de las curvas de descarga tiene grandes implicaciones en la toma de decisiones y en el monitoreo de ríos. Para representar esto, se muestran en la Figura 12 los hidrogramas del periodo Septiembre – Noviembre 2023, calculados a partir de las dos ecuaciones (curva actual y curva nueva de la Figura 10). Se pueden ver las diferencias importantes en los caudales bajos debido al empleo de determinada ecuación de curva de descarga.



**Figura 12.** Comparación de caudales bajos entre la curva actual y la ajustada

**Fuente:** Elaboración propia

## 4. Conclusiones

Durante este trabajo de titulación, se realizaron aforos nuevos y se analizaron cada uno de estos, desde agosto a diciembre, con el fin de analizar y verificar las relaciones entre niveles de agua y caudales en dos estaciones del río Quinuas y Matadero. En este trabajo, se pudo realizar prácticas en campo que permitieron ensayar y aprender el método de trazador de sal, que es muy usado en Ingeniería Hidráulica. Si bien este método es apropiado para ríos de montaña, hay que tener en consideración que puede llegar a tener errores y márgenes de incertidumbre según la dilución de la sal en el río, ya sea por factores como: ingreso de una fuente, mezcla inadecuada, depósito inadecuado de la sal en el río, por lo que se deben tener en cuenta estos aspectos para disminuir la incertidumbre en la aforación al mínimo. Si el método de trazador de sal se realiza correctamente, los errores porcentuales son muy bajos.

Al realizar las curvas de descarga en el río Quinuas se pudo apreciar una variabilidad entre los datos de aforos previos y los datos actuales. Los aforos realizados en este estudio corresponden a los caudales más bajos desde que las estaciones están en funcionamiento. En el caso de la estación de Virgen, la curva tiene una ligera variación. Por otro lado, para la estación de Chirimachay, este estudio propone una actualización importante (Figura 10). En este caso, se recomienda realizar nuevos aforos durante periodos de lluvia intensa para comprobar que las curvas durante esos niveles de agua y caudales altos, aún son válidas o si necesitan ser actualizadas.

El aporte más importante de este trabajo es los nuevos aforos (puntos en color rojo en la Figura 8), que permiten describir la relación caudal vs. nivel para periodos de estiaje, que según las proyecciones de cambio climático regionales y globales, serán cada vez más frecuentes y de

mayor intensidad en el futuro (IPCC, 2022). Además, esta tesis ayuda a consolidar el uso apropiado de métodos de estimación de caudal para ríos de montaña. Si bien, en la literatura científica, se recomienda usar el método de trazador de sal para la magnitud de caudales como las que existen en el río Tomebamba, se ha podido verificar que en estaciones cercanas a Virgen y Chirimachay, otros métodos no apropiados se han utilizado (p. ej. molinete). De esta manera, este estudio permite concluir que el método de trazador de sal es el adecuado para las estaciones Virgen y Chirimachay y para estaciones de similares características (i.e. alta pendiente  $> 35\%$  y caudales bajos  $< 15 \text{ m}^3/\text{s}$ ). El método de disolución salina es el mejor para condiciones de descarga media y alta, pero para la descarga baja subestima un 10% en comparación con el método volumétrico, que es el más preciso para estas condiciones. El uso de este método es especialmente conveniente porque es de bajo costo, fácil de aplicar, tiene un bajo impacto ambiental y una alta precisión.

Este trabajo contribuye a calcular de forma más precisa los caudales (en este caso del río Tomebamba) con lo que se pueden generar mejores modelaciones hidrológicas y por consiguiente un mejor manejo de los recursos hídricos. En resumen, las mediciones de caudales realizadas aguas arriba del río Tomebamba proporcionan una base sólida para la gestión sostenible del recurso hídrico en la ciudad, incorporando metodologías apropiadas y destacando la importancia de realizar planes de adaptación a las condiciones climáticas cambiantes. Estos hallazgos contribuyen significativamente al conocimiento científico y ofrecen orientación para futuras investigaciones y políticas relacionadas con la gestión del agua, al ser parte del proyecto internacional SWACH.



## 5. Referencias

- Ambiente, M. d. (2015). *Sistema nacional de áreas protegidas del Ecuador*. Cuenca. Obtenido de <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/areas-protegidas/parque-nacional-cajas>
- Banca Mundial. (2023). *Crecimiento de la población (%) anual del Ecuador*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW?locations=EC>
- Bolaños, N. R. (2018). Funciones de regresiones para caudales extremos en la vertiente pacífica de costa rica. *vol. 8*(núm. 1-2), pp. 31-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/441/44170521002.pdf>
- Borer, A. (2021). *Medición de caudal*. Obtenido de <https://rittmeyer-brugg.com/wp-content/uploads/2021/04/rit-bro-flow-measurement-es-web.pdf>
- Carmona, A. P. (2014). Detection of long term trends in monthly hydro climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change 123*, 301–313. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3>
- Crespo, M. G. (2023). Efecto del coeficiente teórico de descarga de vertederos sobre la medición de caudales en pequeños ríos Andinos. *Life Sciences*, 26(3). Obtenido de <https://lagranja.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/3934>
- Española, R. A. (2023). *DEJ Panhispánico*. Obtenido de <https://dpej.rae.es/lema/caudal>
- Heredia, R. (2015). *Los recursos naturales y el manejo de las cuencas hídricas*. Quito: Pontificia Univesidad del Ecuador. Obtenido de [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8749/Los recursos naturales y el manejo de cuencas hidrograficas](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8749/Los%20recursos%20naturales%20y%20el%20manejo%20de%20cuencas%20hidrograficas)

- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- IPCC. (2023). *The IPCC finalized the Synthesis Report for the Sixth Assessment Report during the Panel's 58th Session held in Interlaken, Switzerland from 13 - 19 March 2023*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- MAATE. (2018). Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/rendicion-de-cuentas-2018/>
- MAATE. (2023). *Plan de acción nacional para la conservación, restauración y uso sostenible de los páramos*. Quito. Obtenido de <https://nextcloud.ambiente.gob.ec/index.php/s/GHDXCmb5RxByPHL?dir=undefined&openfile=3993124>
- MAE, E. (2007). *Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador*. Quito, Ecuador: ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Obtenido de <https://www.cuyabenolodge.com/national-parks/parque-nacional-cajas/parque-nacional-cajas.pdf>
- Mario Guallpa, R. C. (2022). Efecto del coeficiente teórico de decarga de vertederos sobre la medición de caudales en pequeños ríos Andinos. *La Granja: Revista de las Ciencias de la Vida*, 36, 75-87. Obtenido de <http://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.06>
- Molina, A. V. (2015). Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4201–4213. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/hess-19-4201-2015>, 2015

- Mosquera Giovanni M, C. M. (2016). *Observatorios ecohidrológicos en ecosistemas tropicales de alta elevación- guía de campo y resultados de la investigación*. Universidad de Cuenca. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/311680870\\_Ecohydrological\\_Observatories\\_in\\_High-elevation\\_Tropical\\_Ecosystems\\_Field\\_Guide\\_and\\_Research\\_Results](https://www.researchgate.net/publication/311680870_Ecohydrological_Observatories_in_High-elevation_Tropical_Ecosystems_Field_Guide_and_Research_Results)
- Mosquera Giovanni M, C. M. (2016). *Observatorios ecohidrológicos en ecosistemas tropicales de alta elevación-guía de campo y resultados de la investigación*. Universidad de Cuenca. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/311680870\\_Ecohydrological\\_Observatories\\_in\\_High-elevation\\_Tropical\\_Ecosystems\\_-\\_Field\\_Guide\\_and\\_Research\\_Results](https://www.researchgate.net/publication/311680870_Ecohydrological_Observatories_in_High-elevation_Tropical_Ecosystems_-_Field_Guide_and_Research_Results)
- Paerregaard, K. (2018). The climate-development nexus: using climate voices to prepare adaptation initiatives in the Peruvian Andes. *Climate and Development*, 10(4), 360-368. Obtenido de 10.1080/17565529.2017.1291400
- Quezada, B. J. (2015). Propuesta de modulo de la gestión de la subcuenca del río tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación. 17-75. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4576/1/11063.pdf>
- Robert Hofstede, P. M. (2023). *Los Paramos del Ecuador: Pasao, presente y futuro*. (D. F. Cisneros-Heredia, Ed.) Quito: Universidad San Francisco de Quito USFQ. Obtenido de <https://libros.usfq.edu.ec/index.php/usfqpress/catalog/view/32/67/177>
- Stúbli A. et al. (2018). Analysis of weather and climate related disasters in mountain regions using different disaster databases. *Sustainable Development Goals Series*. Springer. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2)

SWACH, O. R.-S. (2023). *Manejo sostenible del agua bajo escenarios de cambio climático en Cuenca*. Cuenca. Obtenido de [https://swach.uazuay.edu.ec/20230922\\_BoletinSequia](https://swach.uazuay.edu.ec/20230922_BoletinSequia)

Walter, D. (26 de 12 de 2009). *Hydrologia* . Obtenido de <http://walterbardalesrecursoshidricos.blogspot.com/2009/12/curva-de-calibracion-de-caudales.html>

## **6. Anexos**

Sin anexos