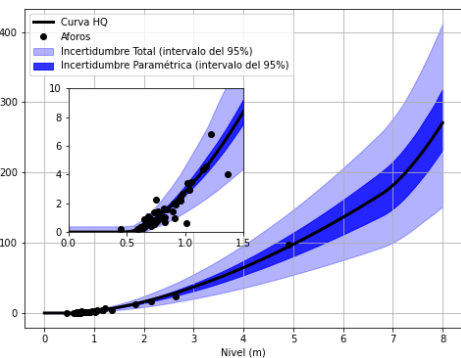


Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo

Informe 05

Elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)



Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica
Instituto Nacional del Agua

Proyecto INA 397
Informe LHA 05-397-21
Ezeiza, septiembre de 2021

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Pablo E. García | Ing. Santiago Guizzardi | Ing. Leandro D. Kazimierski | Ing. Marina Lagos | Mayra Morale | Lic. Nicolás Ortiz | Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Martín Sabarots Gerbec

Subgerencia Centro de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Carlos G. Catalini | Ing. Giuliana Elcano | Msc. Ing. Ana I. Heredia Ligorria | Geol. Nadia Mortarino

Informe realizado por:

Leandro D. Kazimierski

Pablo E. García

Nicolás Ortiz

Mayra Morale

Mariano Re

Tabla de contenido

1	Introducción.....	7
1.1	Informe de la elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)	8
2	Relaciones altura – caudal (curvas HQ).....	10
3	Metodología para la generación de las curvas altura – caudal (HQ).....	13
3.1	Estimación curva HQ a priori	14
3.1.1	Ecuación de la curva	14
3.1.2	Tipos de controles	15
3.1.2.1	Control por la sección	15
3.1.2.2	Control por el tramo de canal.....	17
3.1.3	Controles estándar	19
3.1.4	Análisis hidráulico	20
3.1.4.1	Nivel mínimo.....	20
3.1.4.2	Nivel máximo	20
3.1.4.3	Procedimiento	21
3.1.5	Generación curva HQ a priori	22
3.2	Selección de aforos.....	22
3.2.1	Incertidumbre de los caudales en los aforos	23
3.2.2	Incertidumbre de los niveles en los aforos	23
3.3	Estimación curva HQ a posteriori	24
3.3.1	Inferencia Bayesiana.....	24
3.3.2	Errores en la estimación del caudal	24
3.3.2.1	Error en los aforos	24
3.3.2.2	Error remanente (o error estructural)	25
3.3.2.3	Error total	25
3.3.3	Información provista por los aforos: la verosimilitud	26
3.3.4	Información provista por la hidráulica: la distribución a priori	26
3.3.5	El teorema de Bayes y la distribución a posteriori.....	27
3.3.6	Curva HQ a posteriori	27

4	Descripción y análisis de los datos disponibles.....	31
4.1	Geometría de cursos y secciones.....	31
4.1.1	Geometría de las secciones	31
4.1.2	Pendiente de los cauces	32
4.1.3	Manning de los cauces	32
4.2	Efectos hidrodinámicos	32
4.3	Aforos	32
4.4	Estaciones seleccionadas para determinar curvas HQ.....	38
5	Resultados	42
5.1	EM01	42
5.2	EM02	44
5.3	EM03	46
5.4	EM04	48
5.5	EM05	50
5.6	EM06	52
5.7	EM07	54
5.8	EM08	56
5.9	EM09	58
5.10	EM10	60
5.11	EM11	62
5.12	EM12	64
5.13	EM13	67
5.14	EM14	69
5.15	EM15	71
5.16	EM16	73
5.17	EM32	75
5.18	EM33	77
5.19	EM34	79
5.20	EM35	81
5.21	EM36	83
5.22	EM37	85
5.23	EM38	87
5.24	EM39	89
5.25	EM40	91

5.26	EM41	93
5.27	EM42	95
5.28	EM43	97
5.29	EM44	99
5.30	EM45	101
5.31	EM46	103
5.32	EM47	105
5.33	EM48	107
5.34	EM49	109
5.35	EM50	111
5.36	EM51	113
5.37	EM53	115
5.38	EM54	117
5.39	EM55	119
5.40	EM56	121
5.41	EM58	123
5.42	EM59	125
5.43	EM60	127
5.44	EM61	129
5.45	EM62	131
5.46	EM63	133
5.47	EM64	135
5.48	EM66	137
5.49	EM67	139
5.50	EM68	141
5.51	EM69	143
5.52	EM70	145
5.53	EM76	147
5.54	EM77	149
6	Conclusiones y recomendaciones	151
	Referencias	153
	Anexo A –Detalle de la metodología para la elaboración de las curvas HQ	154
A.1.	EM01	155
	Descripción de la sección	155

Configuración Hidráulica y curva HQ a priori.....	156
Propiedades del Control 1 (ver Figura A.4):.....	157
Propiedades del Control 2 (ver Figura A.5):.....	158
Propiedades del Control 3 (ver Figura A.6):.....	159
Aforos	160
Ajuste.....	161
Curva HQ.....	162

1 Introducción

El monitoreo de parámetros ambientales dentro de la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) es de suma importancia para la definición de acciones a realizar por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en búsqueda de cumplir los objetivos propuestos en el Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA).

Los estudios de la calidad de agua superficial y subterránea, sedimentos y aire, se llevan a cabo en la red de estaciones de monitoreo puntual y continuo extendidas a lo largo de toda la CMR. Toda la información obtenida a partir de dichos estudios constituye un conjunto de herramientas de gestión fundamental para evaluar el efecto que tienen las acciones planificadas en materia de reducción de las fuentes de contaminación en la calidad ambiental de la Cuenca.

Para monitorear la calidad del agua superficial, ACUMAR estableció una red que incluye puntos sobre el río principal Matanza Riachuelo, sus afluentes, distintos arroyos a lo largo de la extensión aguas arriba y hasta sus nacientes, involucrando a las 14 subcuencas que conforman la Cuenca Hídrica del Matanza Riachuelo.

El presente proyecto tiene por objetivo principal darle continuidad al monitoreo integrado y simultáneo de calidad de agua superficial y caudales que viene realizando la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en forma sistemática desde el año 2007. Para eso se plantean 3 Campañas de aforos en diferentes estaciones de la red.

Los aforos previstos para cada una de las Campañas se efectuarán utilizando diferentes técnicas, entre las que se destacan aquellas que utilizan tecnología Doppler como es el caso de ADV (*Acoustic Doppler Velocity*) y ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) y una nueva tecnología de medición indirecta de velocidades superficiales del agua, a partir de la utilización de cámaras terrestres, aéreas e incluso radares, que permiten estimar caudales líquidos mediante el postprocesamiento de los videos registrados. Para esta última tecnología, denominada velocimetría por imágenes, se usará como algoritmo de análisis el denominado '*Large Scale Particle Image Velocimetry*' (LSPIV).

Adicionalmente a las campañas mencionadas previamente, durante el Proyecto se realizará un análisis de datos de aforos y curvas H-Q en una serie de estaciones, con vistas a un diagnóstico de dichas curvas y optimización de las mismas cuando sea posible.

1.1 Informe de la elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)

En el presente informe se describe la metodología para elaborar relaciones altura – caudal y se presentan las curvas HQ obtenidas en diferentes secciones correspondientes a estaciones de la red de monitoreo de calidad y caudal del agua superficial de ACUMAR.

La metodología clásica para obtener una curva HQ consiste en ajustar una función matemática a una nube de puntos (que representan los diferentes aforos realizados en la sección de análisis). Esta metodología presenta una serie de desventajas que se enumeran a continuación:

- Esta metodología utilizada no tiene en cuenta el comportamiento hidráulico de la sección de análisis, pudiéndose obtener curvas HQ que solamente responden a un análisis matemático pero que no representan la física del problema.
- Las curvas ajustadas por tramos no suelen presentar continuidad.
- Los diferentes tramos definidos no están asociados a características geométricas de la sección.
- No contempla incertidumbres en las mediciones.
- No se debería extrapolar a situaciones donde no se tienen registros de mediciones.
- El ajuste tradicional tampoco permite inferir intervalos de confianza en las curvas. Esta limitación se observa luego al inferir un caudal (a partir de la curva HQ y un nivel observado) y no poder estimar el error o el grado de incertidumbre asociado al valor obtenido.
- Se puede estar interpolando con datos erróneos y la metodología no los detecta.

Para superar estas limitaciones, se debería buscar una metodología que tenga las siguientes características:

- Sea de base física utilizando las propiedades geométricas e hidráulicas del curso de agua.
- Permita tener distintos tramos de curvas según el nivel de agua.
- Logre que la curva generada por tramos sea continua.
- Estime rangos de incertidumbre de la curva generada.
- Permita extrapolar para caudales más altos y bajos que los aforados.

Siguiendo estos principios, se propone estimar las curvas HQ en las secciones hidrométricas correspondientes a las Estaciones de Monitoreo (EM) que posee ACUMAR en la cuenca Matanza-Riachuelo utilizando la técnica de inferencia Bayesiana propuesta por Le Coz (2014) mediante el software *BaRatinAGE* desarrollado por el INRAE (Institut National de Recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement) de Francia.

La inferencia Bayesiana propone un conocimiento previo de cómo podría ser la curva de ajuste sin utilizar los datos con los que realmente se van a ajustar. Esto quiere decir, generar una curva HQ sin los aforos (curva HQ a priori) y luego sí ajustar la curva obtenida previamente utilizando

los aforos (curva HQ a posteriori). La primera curva se genera en base a la geometría y la hidráulica de la sección. Se utilizan ecuaciones de la hidráulica (como la ecuación de Chézy-Manning para canales, o la descarga de vertederos y orificios) para proponer la curva HQ a priori.

A partir de la primera versión (curva HQ a priori), se utilizan distintas herramientas estadísticas para ajustar la nueva curva (curva HQ a posteriori) en base a los datos de aforos disponibles. La justificación de la metodología se basa en la idea de que no sean solamente los datos de aforos los que se utilicen para el ajuste sino también la física del problema. Sumado a todo esto, la inferencia bayesiana permite incluir incertezas de distinto grado y origen generando intervalos de incertidumbre de las curvas HQ generadas.

En los Capítulos 2 y 3 se presentan los conceptos teóricos que sustentan esta nueva metodología para la elaboración de curvas HQ. En el Capítulo 4 se hace un análisis de las campañas de aforos realizadas por ACUMAR y la consistencia de sus datos. Luego, en el Capítulo 5 se presentan las curvas HQ obtenidas en las diferentes estaciones analizadas. En el Capítulo 6 se presentan las Conclusiones del Informe. Por último, en el Anexo 1, se presenta un ejemplo de cálculo completo de curva HQ con la metodología empleada para una estación hidrométrica.

2 Relaciones altura – caudal (curvas HQ)

Los caudales de los cursos de agua se obtienen en muchas ocasiones convirtiendo niveles de la superficie del agua a partir de relaciones matemáticas. Estas relaciones, denominadas curvas altura-caudal se obtienen, se ajustan o se calibran a partir de relevamientos de caudales (denominados aforos) y alturas utilizando diferentes metodologías de medición.

Las curvas altura-caudal suelen representarse mediante simples funciones monótonas donde el caudal está dado en función de las alturas observadas en una sección (estas alturas observadas se obtienen con buena precisión, del orden del centímetro, utilizando generalmente reglas hidrométricas fijas). Las curvas utilizadas son en su mayoría del tipo potencial (Fenton 2001; Petersen-Øverleir y Reitan 2005; Reitan y Petersen-Øverleir, 2008) con un plano cero desplazado (o parámetro de locación) representando el nivel donde el caudal es nulo. Las curvas se suelen representar con la siguiente expresión:

$$Q(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h \leq h_0 \\ C(h - h_0)^b & \text{si } h > h_0 \end{cases} \quad 2.1$$

donde Q es el caudal y h el nivel hidrométrico. El parámetro h_0 es el nivel para el cual el caudal es nulo, mientras que b es un exponente que responde a las propiedades del tipo de control hidráulico de la sección y C es una constante relacionada con las características de la sección de control.

La teoría hidráulica provee valores para el exponente b : 5/3 para un canal rectangular, ancho y uniforme (derivado de la ecuación de Chézy-Manning), 3/2 para un vertedero rectangular y 5/2 para un vertedero triangular (derivado del cálculo del caudal crítico). El valor del exponente también puede obtenerse de forma experimental para algunas estructuras de control: 1,55 a 1,60 para vertederos tipo Parshall. El valor del exponente en general para situaciones no teóricas puede tener variaciones que rondan $\pm 0,1$ aproximadamente, debido a la complejidad de la geometría de la sección y los desbordes en las planicies de inundación.

Las características físicas del canal, las cuales gobiernan la relación entre la altura y el caudal en una sección determinada, constituyen el control hidráulico. Básicamente, existen dos tipos de controles hidráulicos: i) por la sección y ii) por el canal (WMO, 2010; ISO 1100, 2010). El control

por la sección se observa en caudales bajos y se debe a la geometría de la sección o la presencia de una obra hidráulica donde el flujo se vuelve supercrítico (número de Froude mayor a 1) por una caída o un estrangulamiento. El control por el canal suele darse en caudales medios y altos donde el flujo es controlado por la geometría y rugosidad general del canal, al menos en la zona cercana a la sección de aforo. Además de los controles previamente mencionados, en flujos no uniformes, la condición de aguas abajo puede tener influencia en la relación de altura-caudal debido a efectos de remanso (curso aguas abajo, obra de derivación, etc.).

En una misma sección, pueden existir varios controles hidráulicos. En general, existe uno en el fondo y al menos otro cuando el agua alcanza los niveles de la llanura de inundación. Pero en niveles intermedios pueden existir otros controles, debido a la presencia de estructuras (puentes, alcantarillas), producto de las condiciones del cauce para caudales bajos (macrorugosidades) o cambios en la sección.

Las curvas altura-caudal (en adelante curvas HQ) se ajustan clásicamente realizando una regresión lineal minimizando el error cuadrático entre la función de ajuste y los pares de datos de altura y caudal obtenidos en campañas de aforo. El primer problema de esta metodología es que resulta complejo construir una curva continua si el análisis se hace segmentando los datos disponibles (por ejemplo, ajustando por tramos). A su vez, esta metodología utilizada no tiene en cuenta en su construcción el comportamiento hidráulico de la sección de análisis, pudiéndose obtener parámetros que solamente responden a un análisis matemático pero que no representan la física del problema. Adicionalmente la extrapolación de estas curvas a valores superiores e inferiores a los aforados no se considera una buena práctica, pudiendo introducir importantes errores en la estimación de los caudales.

Otro condicionamiento que presenta esta metodología para obtener las curvas HQ es no incluir en el análisis los errores sistemáticos en los aforos. Esta situación (que podría ser salvada mediante la experiencia del aforador o del profesional que controla los datos de base), podría derivar en el uso de datos de baja calidad para el ajuste de las curvas HQ afectando la calidad de las mismas. El ajuste tradicional tampoco permite inferir intervalos de confianza en las curvas. Esta limitación se observa luego al inferir un caudal (a partir de la curva HQ y un nivel observado) y no poder estimar el error o el grado de incertidumbre asociado al valor obtenido. Esto resulta fundamental a la hora de ejecutar modelaciones numéricas hidrodinámicas y de calidad de agua superficial o al momento de realizar análisis hidráulicos, pues contar con rangos de incertidumbre permitiría obtener mejores modelos y realizar con mayor precisión el análisis de los resultados obtenidos.

Se desea, entonces, que el método de cálculo de las curvas HQ tenga las siguientes propiedades:

- Sea de base física utilizando las propiedades geométricas e hidráulicas del curso de agua.
- Permita tener distintos tramos de curvas según el nivel de agua.
- Logre que la curva generada por tramos sea continua.
- Estime rangos de incertidumbre de la curva generada.

Siguiendo estos principios, se propone estimar las curvas HQ en las secciones hidrométricas correspondientes a las Estaciones de Monitoreo (EM) que posee la ACUMAR en la cuenca Matanza-Riachuelo utilizando la técnica de inferencia Bayesiana propuesta por Le Coz et al. (2014) mediante el software *BaRatinAGE* desarrollado por el INRAE (Institut National de Recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement) de Francia.

La inferencia Bayesiana propone un conocimiento previo de cómo podría ser la curva de ajuste sin utilizar los datos con los que realmente se van a ajustar. Esto quiere decir, generar una curva HQ sin los aforos (curva HQ a priori) y luego sí ajustar la curva obtenida previamente utilizando los aforos (curva HQ a posteriori). La primera curva se genera en base a la geometría y la hidráulica de la sección. Se utilizan ecuaciones de la hidráulica (como la ecuación de Chézy-Manning para canales, o la descarga de vertederos y orificios) para proponer la curva HQ a priori.

A partir de la primera versión (curva HQ a priori), se utilizan distintas herramientas estadísticas para ajustar la nueva curva (curva HQ a posteriori) en base a los datos de aforos disponibles. La justificación de la metodología se basa en la idea de que no sean solamente los datos de aforos los que se utilicen para el ajuste sino también la física del problema. Sumado a todo esto, la inferencia bayesiana permite incluir incertezas de distinto grado y origen generando intervalos de incertidumbre de las curvas HQ generadas.

En el siguiente capítulo se detalla la metodología empleada por el software *BaRatinAGE* (incluyendo conceptos teóricos asociados) para la generación de las curvas HQ.

3 Metodología para la generación de las curvas altura – caudal (HQ)

La metodología seleccionada para la construcción de curvas HQ combina conocimientos hidráulicos y una aproximación estadística. A continuación se resume el procedimiento y posteriormente se detalla cada paso:

- En primer lugar se definen las características hidráulicas y geométricas de la sección para los distintos niveles que alcanza la superficie del agua. A partir de estos datos se obtiene una curva HQ basada en propiedades físicas del sistema. Esta curva se denomina curva HQ a priori y tiene una incertidumbre asociada a los parámetros geométricos y físicos del sistema. Esta curva no contempla datos ni otro tipo de información proveniente de los aforos en la sección de análisis.
- Luego se seleccionan los aforos a utilizar para el ajuste y se les asigna una incertidumbre (que puede estar asociada a la observación de los niveles, a la estimación de los caudales o ambas mediciones). En el presente estudio no se incluyen incertidumbres en la determinación de los niveles. La incertidumbre en la estimación de los caudales se asocia al tipo de instrumento con el que se realizó el aforo.
- Por último se determina la curva HQ mediante inferencia Bayesiana (Gelman et al., 2004) y la metodología de Cadena de Markov - Monte Carlo (MCMC) (Renard et al., 2006) incluyendo las incertidumbres definidas en el paso anterior.

Para determinar las curvas HQ y sus respectivos intervalos de confianza se utilizó el software *BaRatinAGE* (BAYesian RATING curve Advanced Graphical Environment). El software, como se mencionó anteriormente, se basa en el análisis de la hidrodinámica de la estación hidrométrica y en la estimación bayesiana de la relación altura-caudal.

3.1 Estimación curva HQ a priori

3.1.1 Ecuación de la curva

Las curvas HQ están determinadas por segmentos donde para cada uno existe un control hidráulico. En el software *BaRatinAGE* la ecuación general de la curva HQ se obtiene a partir de una combinación lineal de funciones potenciales que se representa con la siguiente ecuación:

$$Q(h) = \sum_{r=1}^{Nsegmentos} \left(\mathbf{1}_{[k_{r-1}; k_r]}(h) \cdot \sum_{j=1}^{Ncontrol} M(r, j) \cdot a_j (h - b_j)^{c_j} \right) \quad 3.1$$

donde $M(r, j)$ es la matriz de control (valiendo 1 si el control hidráulico j está activo en el rango r ; y 0 en caso contrario). La función $\mathbf{1}_{[k_{r-1}; k_r]}(h)$ es igual a 1 si $k_{r-1} \leq h \leq k_r$ y 0 en caso contrario. k_r es el nivel de agua de transición entre los segmentos r y $r+1$. Dichos niveles de transición deben definirse previamente con sus valores modales y su incertidumbre. Las incógnitas de esta ecuación son los parámetros a_j , b_j , y c_j . Para los segmentos siguientes al primero, se calculará el valor del parámetro b_j de manera de mantener continuidad de la curva HQ en cada nivel de transición. $Nsegmentos$ es el número de intervalos en los que se divide la curva HQ. $Ncontrol$ es el número de controles hidráulicos.

Esta ecuación muestra que la relación altura-caudal es una combinación de funciones potenciales y la matriz de control es utilizada para especificar cómo estas combinaciones operan (sucesión o adición de controles).

Para asegurar la continuidad de la curva, los parámetros b_j son deducidos directamente de otros parámetros resolviendo la ecuación de continuidad en cada nivel de transición $Q(k_r) = Q(k_{r-1})$ lo que lleva a la siguiente relación:

$$b_1 = k_0 \quad 3.2$$

$$b_j = k_{j-1} - \left(\frac{1}{a_j} \sum_{i=1}^{j-1} (M(j-1, i) - M(j, i)) \cdot a_i (k_{j-1} - b_i)^{c_i} \right)^{1/c_j} \quad 3.3$$

A modo de ejemplo se presenta en la Figura 3.1 una matriz de control $M(r, j)$ que presenta 4 controles. Los primeros dos controles se corresponden a dos secciones de control para bajos caudales, el tercer control está asociado al canal y el último control que incluye al canal más la planicie de inundación.

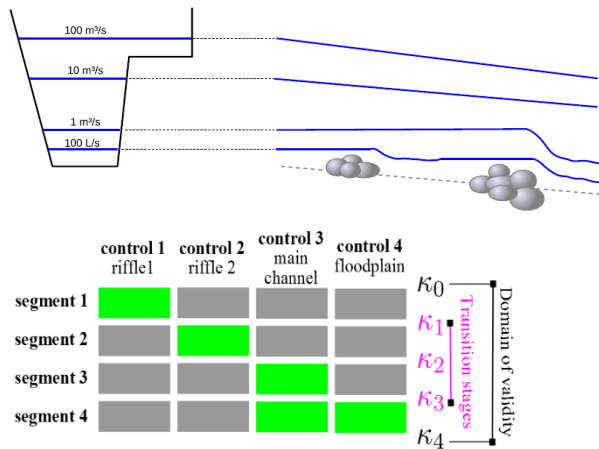


Figura 3.1. Ejemplo de matriz de control (tomada de Le Coz et al., 2014).

3.1.2 Tipos de controles

Los controles hidráulicos se definen como la altura para la cual el nivel de agua en determinadas condiciones hidrodinámicas sigue alguna ley hidráulica. Se pueden definir dos tipos de controles: por la sección y por el tramo de canal cercano a la sección (aguas arriba o aguas abajo). A continuación se detallan ambos tipos de controles.

3.1.2.1 Control por la sección

La relación altura-caudal está determinada principalmente por la geometría de los controles de la sección donde el flujo se vuelve crítico, lo cual puede ser materializado por un resalto aguas abajo del control y un perfil del pelo de agua casi horizontal aguas arriba (ver Figura 3.2). Típicamente: vertederos rectangulares o triangulares y orificios presurizados.

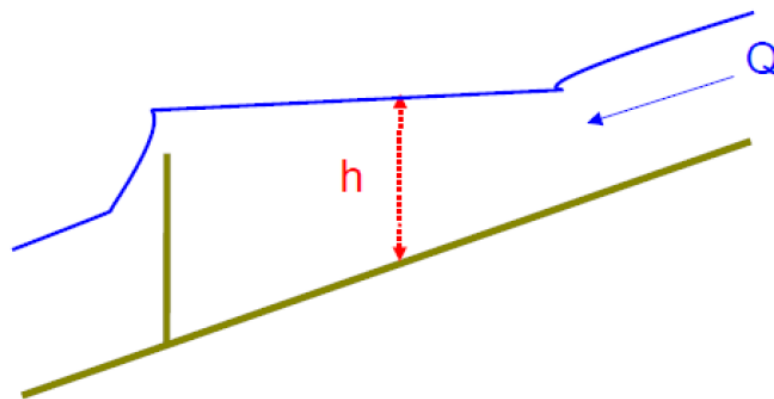


Figura 3.2. Diagrama de la sección de control (el nivel de agua H está influenciado por la caída posterior).

En la Figura 3.3 y en la Figura 3.4 se aprecian ejemplos de secciones de control en las Estaciones de Monitoreo 01 y 04 de ACUMAR donde por efecto de las macrorugosidades del fondo se produce en períodos de aguas bajas un remanso aguas arriba donde se encuentra la sección de aforo y una caída aguas abajo caracterizando al control como un vertedero rectangular.



Figura 3.3. Sección de control (señalada en rojo) en la Estación de Monitoreo 01 de ACUMAR (foto tomada el 26/02/2021).



Figura 3.4. Sección de control (señalada en amarillo) en la Estación de Monitoreo 04 de ACUMAR (foto tomada el 01/03/2021).

3.1.2.2 Control por el tramo de canal

En este tipo de controles el flujo se asume uniforme. No hay caídas que controlen el nivel de agua. El flujo es enteramente gobernado por la geometría del canal y la resistencia al flujo (normalmente llamado rugosidad) sobre la sección homogénea que se extiende tanto hacia aguas abajo como aguas arriba (ver Figura 3.5).

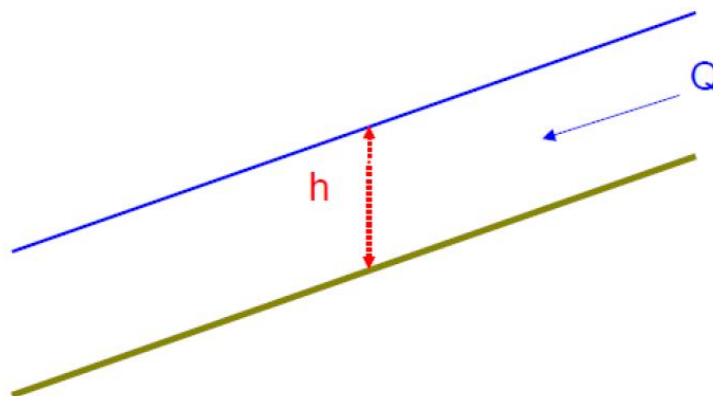


Figura 3.5. Diagrama del control por el tramo de canal (la línea roja representa la estación hidrométrica).

En la Figura 3.6 y en la Figura 3.7 se presentan cursos de agua tanto naturales como intervenidos donde el control para el nivel de agua al momento de la toma de la fotografía se produce por las propiedades del canal y no hay elementos particulares en la zona de influencia que alteran la uniformidad del flujo.



Figura 3.6. Control por tramo del canal en la Estación de Monitoreo 08 de ACUMAR (foto tomada el 25/02/2021).



Figura 3.7. Control por tramo del canal en la Estación de Monitoreo 16 de ACUMAR (foto tomada el 04/03/2021).

3.1.3 Controles estándar

Los controles por sección o por tramo pueden ser asociados a diferentes controles denominados controles estándares (alguno de ellos son: vertederos rectangulares y triangulares, orificios y secciones rectangulares anchas). Para los controles estándares existen numerosas formulaciones que relacionan la altura con el caudal.

En el análisis hidráulico de las secciones a estudiar se debe asociar cada control observado con un control estándar, o dividirlo en varios controles estándar. Para realizar esta acción, el diagrama que se presenta en la Figura 3.8 resume cómo es el árbol de decisión para asignar controles estándares.

En el caso de puentes aguas abajo de la sección de estudio que no llegan a entrar en carga no existe el desarrollo de un control estándar con una fórmula clásica, por ello el signo de pregunta en el bloque de la Figura 3.8. Estos casos son siempre únicos y solamente una modelación hidráulica puede ayudar a representar el comportamiento hidráulico de la sección.

Los parámetros geométricos de los controles estándares (como pueden ser el ancho del canal o del vertedero, el nivel hidrométrico del control, la rugosidad descrita por el coeficiente de rugosidad n de Manning, la pendiente del curso de agua, el ángulo de un vertedero triangular, etc.) tienen asociada una incertidumbre que debe ser tenida en cuenta en el ajuste de la curva HQ. Estas incertidumbres dependen del conocimiento de la sección, de sus irregularidades o diferencias respecto de la geometría de la sección estándar. Esta variabilidad de los factores entra en juego posteriormente en el cálculo de la incertidumbre de la curva HQ a priori.

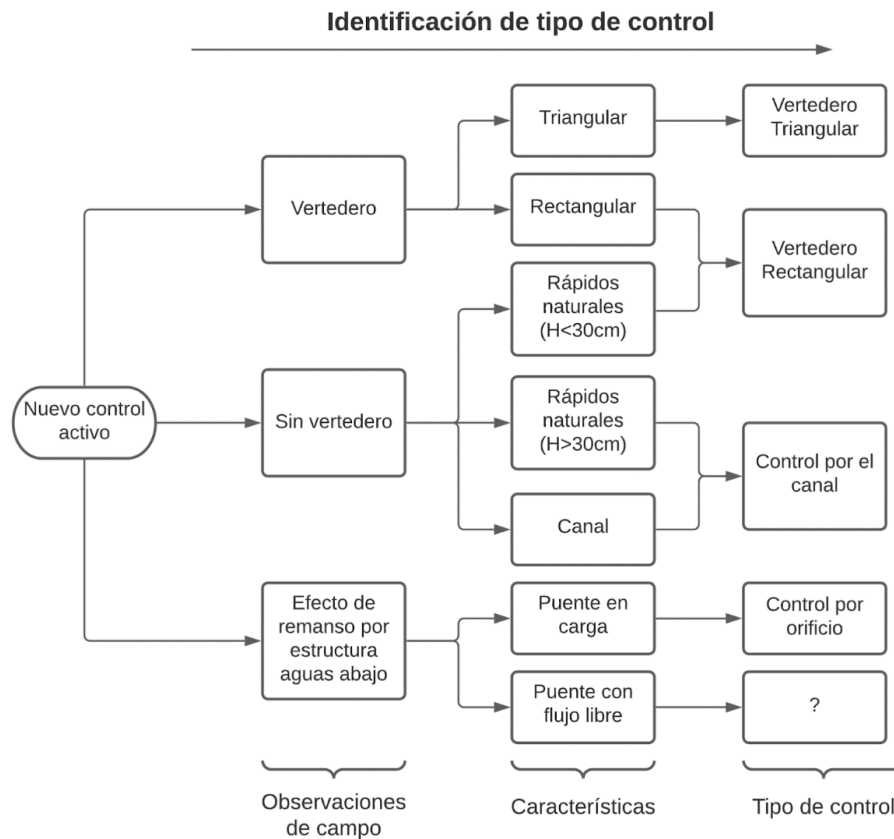


Figura 3.8. Diagrama para seleccionar un control estándar para representar un control real.

3.1.4 Análisis hidráulico

El análisis hidráulico es un paso fundamental para comprender la dinámica del flujo en la sección de estudio. Parte de este análisis consiste en determinar el rango de niveles donde la curva es válida. Luego, se procede a la identificación sistemática de los controles hidráulicos que influyen en el nivel en todo el rango válido. Cada control identificado está modelado por un control estándar con una fórmula $Q(h)$.

3.1.4.1 Nivel mínimo

La curva HQ comienza en un nivel mínimo de agua que debe estimarse. En concreto, es el nivel mínimo en el que es válido el modelo elegido para el primer control. En la práctica, es apropiado que este nivel sea menor que la altura mínima de referencia que se puede registrar en el sitio.

3.1.4.2 Nivel máximo

También es importante estimar la altura máxima de la curva HQ definiendo un rango de aplicabilidad. Esta altura suele ser la elevación por encima de la cual el nivel medido ya no es representativo del flujo (por ejemplo, la estación se desvía a través de un canal lateral). También puede ser el nivel más allá de la cual no es posible predecir la relación HQ.

Desafortunadamente, el nivel máximo aplicable para la curva puede ser menor que el nivel máximo registrado en la estación.

3.1.4.3 Procedimiento

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.9 se explica el procedimiento para generar el análisis hidráulico indicando el tipo de control, sus propiedades geométricas y físicas, las alturas de activación y, finalmente, la construcción de la matriz de control mencionada al comienzo del capítulo.

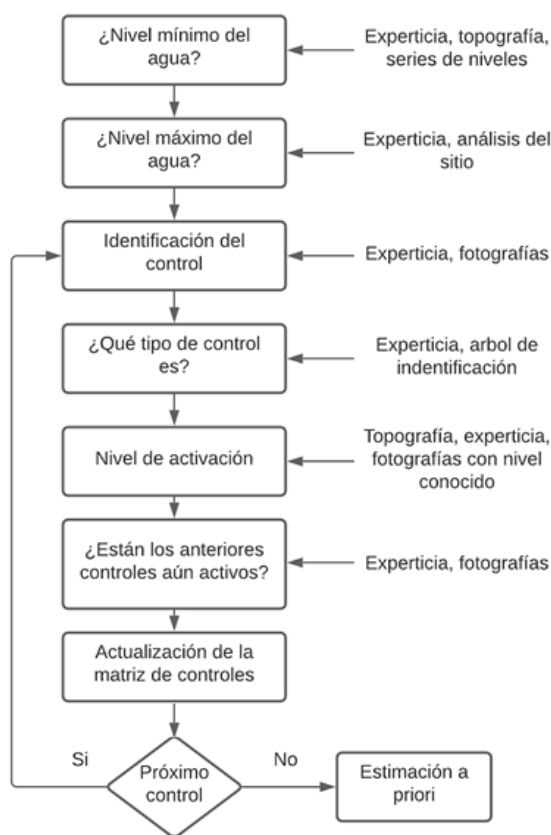


Figura 3.9. Diagrama general del análisis hidráulico.

Una vez realizado esto para todos los controles, se generan los parámetros correspondientes de la curva HQ a priori $(k_r, a_j, b_j, y c_j)$.

3.1.5 Generación curva HQ a priori

Una vez que se definen los valores a priori para todos los controles, se puede trazar una primera curva HQ (con incertidumbres). Esta curva llamada curva HQ a priori, porque se logra sin realizar ninguna calibración con los aforos, solo depende de las características físicas y geométricas de la sección y del curso de agua. La curva HQ a priori se calcula usando un enfoque de Monte Carlo: los parámetros k , a y c de todos los controles se muestrean aleatoriamente usando las incertidumbres definidas en el paso anterior. Al muestrear un gran número de parámetros, obtenemos una familia de posibles curvas que se utilizan para calcular un intervalo de incertidumbre a un nivel de confianza dado (95% en *BaRatinAGE*).

En la Figura 3.10 se presenta a modo de ejemplo una curva HQ a priori (curva negra) y el intervalo de confianza del 95% asociado a la curva (violeta). En la misma figura se puede ver la altura de los 3 controles adoptados a priori (líneas verde oscuro) y el intervalo de confianza de la altura de los controles (en verde claro).

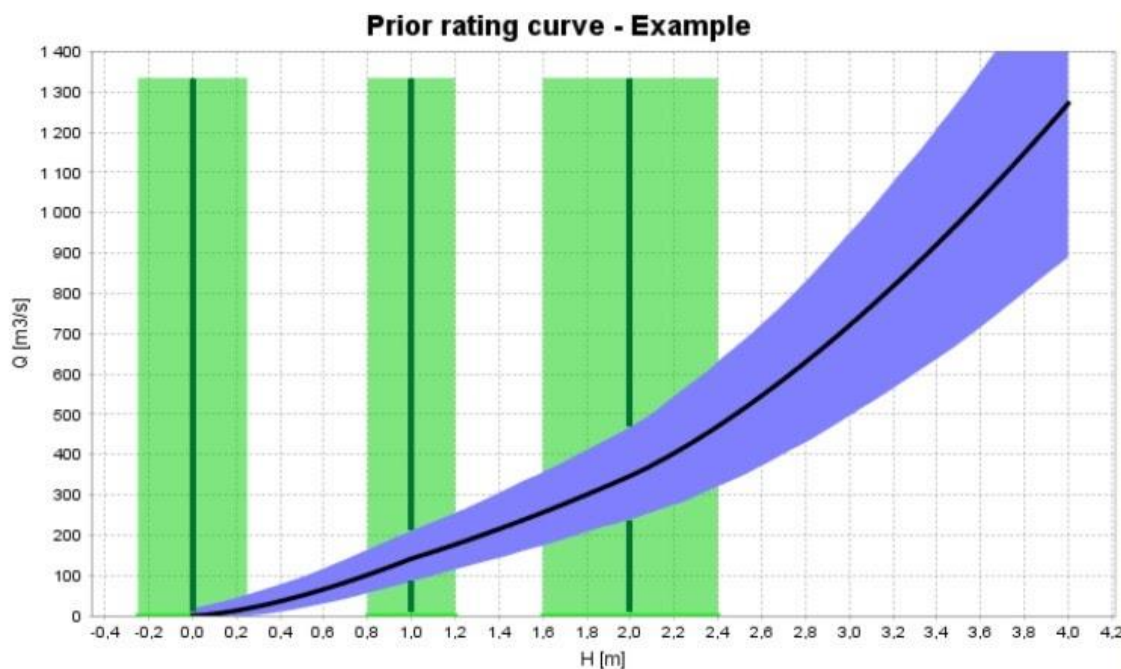


Figura 3.10. Curva HQ a priori (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

3.2 Selección de aforos

Para el análisis de una curva HQ, se debe proporcionar un conjunto de aforos representativos de la relación altura-caudal para el período de estudio. La validez de estos aforos debe ser verificada previamente (control de calidad) para evitar valores atípicos, asegurar la continuidad de la altura con respecto al cero de la estación y controlar y documentar los errores de medición. Es especialmente importante considerar:

- La técnica de medición y el procedimiento de aforo;

- La fecha y las condiciones hidráulicas en el momento de la medición, incluidos: vegetación, inundaciones, perfilamientos del cauce, nuevas construcciones, etc.;
- El nivel de referencia de las escalas hidrométricas, particularmente cuando las reglas de la estación hidrométrica han sufrido cambios o desplazamientos, o si se utilizaron varias reglas simultáneamente.

3.2.1 Incertidumbre de los caudales en los aforos

La incertidumbre asociada a los aforos puede estimarse a partir de la información disponible sobre las mediciones de caudal o calcularse mediante métodos de propagación de la incertidumbre.

De acuerdo con la técnica utilizada y las condiciones de observación, los caudales registrados tienen una incertidumbre asociada. Esta incertidumbre se toma típicamente en $\pm 7\%$ para caudales medidos usando un correntómetro o molinete con al menos una docena de perfiles verticales muestreando correctamente el campo de flujo, y $\pm 5\%$ para una medición por ADCP en buenas condiciones ($\pm 10\%$ en condiciones regulares) (Le Coz et al., 2014).

La Tabla 3.1 proporciona valores típicos de incertidumbre de caudal (expandidos al nivel del 95%) para las principales técnicas de medición (Le Coz et al., 2014; Manual BaRatinAGE). Aunque debe realizarse un análisis más detallado de las mediciones llevadas a cabo para asignar incertidumbre acordes a la medición realizada.

Tabla 3.1. Incertidumbres asociadas a mediciones con diferentes técnicas.

Condiciones	Técnica de medición						
	Volumétricas	Métodos de área-velocidad				Trazadores por dilución	Fórmulas hidráulicas
		ADCP	Molinete – ADV	Flotadores	Radar, LSPIV		
Óptimas	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 7\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$
Pobres	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 50\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 40\%$

3.2.2 Incertidumbre de los niveles en los aforos

Además de la incertidumbre en los caudales aforados, también existe la incertidumbre de los niveles aforados. Sin embargo, como primer enfoque y de forma rutinaria, se recomienda ignorarlo.

A diferencia de la incertidumbre de los caudales, la incertidumbre de los niveles nunca se expresa en términos relativos (en %) sino siempre en metros. Las principales fuentes de error en los niveles incluyen la lectura de la regla, la resolución de la regla, las olas en el curso de agua, la deformación de la superficie libre cerca de la regla, y lo que es más importante, la variación en el nivel del agua durante las operaciones de medición, particularmente en situaciones de aumento o recesión de crecidas.

3.3 Estimación curva HQ a posteriori

El tercer paso del análisis es el cálculo mediante modelos estadísticos de la curva HQ a posteriori. En este punto se utilizan como datos de entrada la curva HQ a priori y los aforos realizados, ambos con sus incertezas asociadas. A continuación, se detallan los fundamentos teóricos y la aplicación de los métodos para obtener la curva HQ a posteriori.

3.3.1 Inferencia Bayesiana

La inferencia estadística refiere a la utilización de datos observados para estimar algunas propiedades de un modelo probabilístico, normalmente los parámetros desconocidos del modelo. Los métodos inferenciales principales son dos: el método de máxima verosimilitud y el método de inferencia bayesiana. En este trabajo se utilizará la inferencia bayesiana para la determinación de función de densidad de probabilidad (o distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua; PDF por sus siglas en inglés) de la distribución de parámetros de la curva a posteriori.

3.3.2 Errores en la estimación del caudal

3.3.2.1 Error en los aforos

El modelo de cálculo de las curvas HQ asume que las mediciones de nivel y caudal $(\tilde{H}_i, \tilde{Q}_i)_{i=1:N}$ están afectados por errores gaussianos de media cero (no sesgados, sin bias) y un desvío estándar conocido (σ_{H_i} y σ_{Q_i}). En particular, los errores debido a los niveles no se tienen en cuenta en este trabajo. Por lo tanto, el siguiente modelo estadístico es el utilizado:

$$\tilde{H}_i = H_i \quad 3.4$$

$$\tilde{Q}_i = Q_i + \varepsilon_i^Q \quad \varepsilon_i^Q \sim N(0, \sigma_{Q_i}) \quad 3.5$$

donde H_i y Q_i indican los verdaderos valores de nivel y caudal y ε_i^Q representa el error en el caudal. N hace referencia a la distribución normal o gaussiana.

3.3.2.2 Error remanente (o error estructural)

Con frecuencia se observa que las incertidumbres de las mediciones y la incertidumbre en la estimación de los parámetros de la curva HQ no son suficientes para explicar la dispersión de las mediciones de caudal alrededor de la misma. Por lo tanto, existe otra fuente de error que tiene muchas causas posibles entre las que se destacan las siguientes:

- error estructural de la curva ya sea porque la ecuación utilizada es una aproximación de la relación física real entre nivel y caudal,
- cambios leves no detectados,
- histéresis ignorada,
- subestimación de las incertidumbres en las mediciones.

Para abordar este problema, se introduce el concepto de error remanente, que se utiliza para agregar la incertidumbre que falta para explicar la dispersión de los indicadores alrededor de la curva, sin evaluar realmente el origen de tal incertidumbre faltante.

Se asume que el error remanente es independiente de los aforos y sigue una distribución gaussiana con media cero y desviación estándar desconocida, σ . Esta desviación estándar se estimará junto con los parámetros de la curva HQ. Se asume que σ es una función lineal de la descarga calculada con la curva HQ: $\sigma = g_1 + g_2 \cdot Q$. En este caso, hay dos parámetros a estimar, g_1 y g_2 .

La curva se formaliza como una función $f(H; \theta)$ donde h es el nivel en la regla hidrométrica y $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_m)$ es el vector conteniendo los m parámetros de la curva HQ. Se asume, por lo tanto, que la diferencia entre el caudal verdadero y su simplificación matemática f tiene la forma de una distribución Gaussiana con media cero y desvío estándar $\sigma_f(H)$. Este último puede variar en función del nivel.

$$Q_i = f(H_i; \theta) + \varepsilon_i^f \quad \varepsilon_i^f \sim N(0, \sigma_f(H_i)) \quad 3.6$$

La variación del desvío estándar $\sigma_f(H)$ con el nivel se parametriza como una función del caudal computado desde la curva HQ mediante una función lineal como fue explicado previamente.

3.3.2.3 Error total

Asumiendo que el error remanente y el error de los aforos son independientes, el error total se puede escribir combinando las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6:

$$\tilde{Q}_i = f(\tilde{H}_i; \theta) + \varepsilon_i^f + \varepsilon_i^Q \quad \varepsilon_i^f + \varepsilon_i^Q \sim N\left(0, \sqrt{\sigma_f^2(\tilde{H}_i; \gamma) + u_{Q_i}^2}\right) \quad 3.7$$

donde \tilde{H}_i y \tilde{Q}_i son los niveles y caudales aforados, y ε_i^f y ε_i^Q son los errores con distribución Gaussiana remanentes y de los aforos respectivamente. La Ecuación 3.7 indica entonces que el caudal aforado es igual al caudal calculado con la curva HQ, más un error debido a las incertidumbres en los aforos, más un error debido a la formulación imperfecta de la curva HQ.

En la ecuación 4 aparecen varios parámetros desconocidos: Los parámetros θ de la curva HQ y los parámetros γ que describen la desviación estándar de los errores remanentes. La inferencia de estos valores está basada en un enfoque Bayesiano. Esto requiere derivar la función de verosimilitud y especificar una distribución previa (proveniente de la curva HQ a priori).

3.3.3 Información provista por los aforos: la verosimilitud

De la Ecuación 3.7, el caudal aforado \tilde{Q}_i está basado en una distribución Gaussiana con media $f(\tilde{H}_i; \theta)$ (la curva HQ) y un desvío estándar $\sqrt{\sigma_f^2(\tilde{H}_i; \gamma) + u_{Q_i}^2}$. Asumiendo que todos los caudales aforados son mutuamente independientes, la función de verosimilitud se puede escribir como:

$$p(\tilde{Q} | \theta, \gamma, \tilde{H}) = \prod_{i=1}^N p_{norm}\left(\tilde{Q}_i | f(\tilde{H}_i; \theta), \sqrt{\sigma_f^2(\tilde{H}_i; \gamma) + u_{Q_i}^2}\right) \quad 3.8$$

donde $\tilde{Q} = (\tilde{Q}_1, \dots, \tilde{Q}_N)$ muestra los N aforos realizados y $p_{norm}(z | m, s)$ indica la distribución de densidad de probabilidades (PDF) de una distribución Gaussiana con media m y desvío estándar s evaluado en un punto z .

3.3.4 Información provista por la hidráulica: la distribución a priori

La distribución a priori ofrece la posibilidad de incluir conocimiento sobre el comportamiento hidráulico de la sección. Para cada parámetro inferido, el análisis se basa en el uso de distribuciones a priori independientes, obteniendo la distribución a priori conjunta:

$$p(\theta, \gamma) = p(\gamma_1) p(\gamma_2) \prod_{i=1}^m p(\theta_i) \quad 3.9$$

3.3.5 El teorema de Bayes y la distribución a posteriori

El teorema de Bayes se utiliza para el cómputo de la PDF de la distribución a posteriori (salvo una constante de proporcionalidad).

$$p(\theta, \gamma | \tilde{Q}, \tilde{H}) \propto p(\tilde{Q} | \theta, \gamma, \tilde{H}) p(\theta, \gamma) \quad 3.10$$

En este paso se utiliza la técnica de Cadenas de Markov (Markov Chain en inglés) y simulaciones de Monte Carlo (MCMC) para realizar múltiples simulaciones explorando la distribución a posteriori. Esto resulta en un gran número de juego de parámetros $(\theta^{(j)}, \gamma^{(j)})_{j=1:M}$ de la distribución a posteriori. Cada simulación está asociada con una curva HQ con parámetros $\theta^{(j)}$ que producen un conjunto de curvas que son plausibles dados los aforos y las condiciones hidráulicas previamente expuestas.

3.3.6 Curva HQ a posteriori

La curva HQ a posteriori hallada se diferencia de la curva a priori al utilizar los datos de los caudales aforados. En la Figura 3.11 se presenta una curva HQ a posteriori representativa con todos los controles hidráulicos y las incertidumbres asociadas. La curva en dicha figura se presenta en color negro como la curva más probable llamada usualmente curva *maxpost*. Alrededor de la curva *maxpost* se encuentra una zona en color rojo claro que representa el área dada por la incertidumbre de los parámetros. El intervalo rojo alrededor representa la incertidumbre total, o sea, la incertidumbre dada por los parámetros sumada a la incertidumbre generada por el error remanente o error estructural. Luego, en verde oscuro y verde claro se presentan los niveles dados por los controles hidráulicos y su incertidumbre, respectivamente.

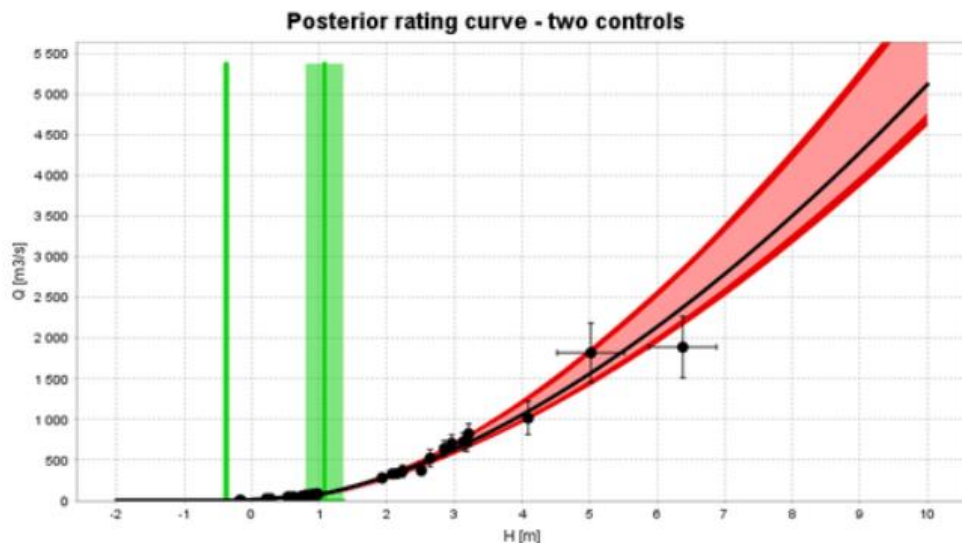


Figura 3.11. Curva HQ a posteriori (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Es particularmente importante revisar que los parámetros estimados a posteriori sean consistentes con los parámetros asumidos en el análisis a priori. Un conflicto entre los parámetros a priori y a posteriori debería ser interpretado como un alerta en la validez de la curva HQ, es decir, en la configuración hidráulica especificada. Puede suceder que un control se haya omitido forzando a los parámetros a ajustar a los datos más allá de límites físicos razonables.

La Figura 3.12 muestra como los parámetros estimados a priori (línea azul) son transformados en los parámetros a posteriori (en barras rojas) generado a partir de la simulación de MCMC con la información provista por los aforos.

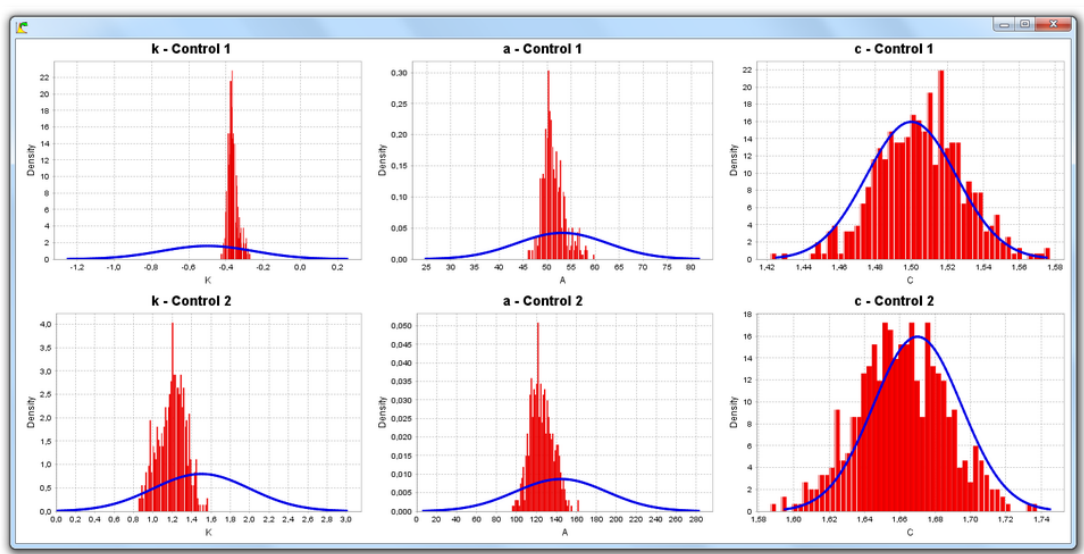


Figura 3.12. Distribución de los parámetros k , a y c para dos controles. Parámetros estimados a priori (línea azul) y a posteriori (barras rojas). Captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*.

La Figura 3.13 muestra los parámetros simulados de la distribución a posteriori a través de la simulación de MCMC. A modo de ilustración, se presentan en el gráfico solo 500 valores simulados de los 10.000 valores generados.

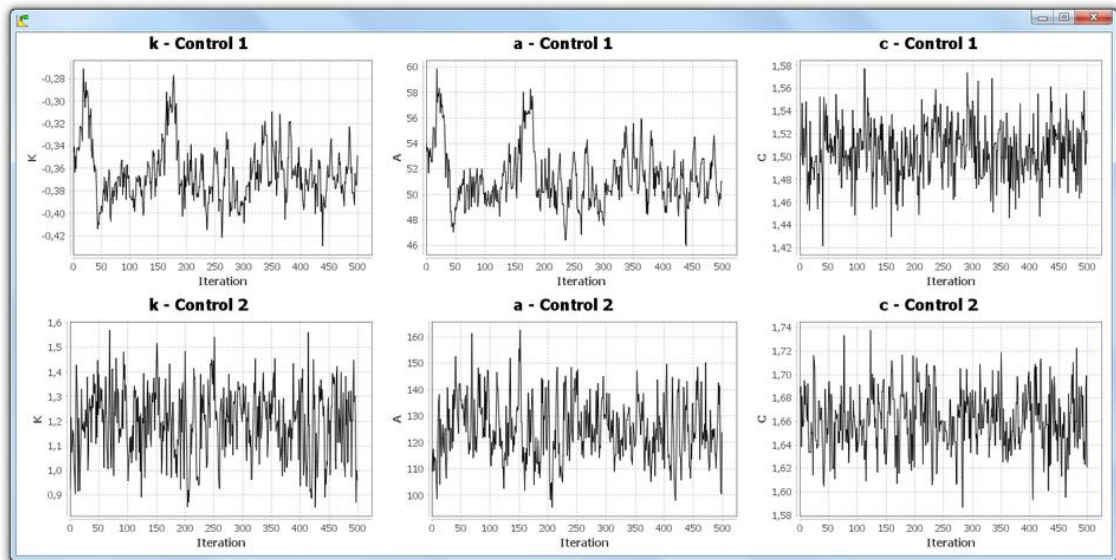


Figura 3.13. Parámetros k , a y c simulados para la distribución a posteriori. Captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*.

La Figura 3.14 muestra diferentes curvas HQ a posteriori; cada curva representa una simulación de MCMC de los parámetros k , a y c de cada control.

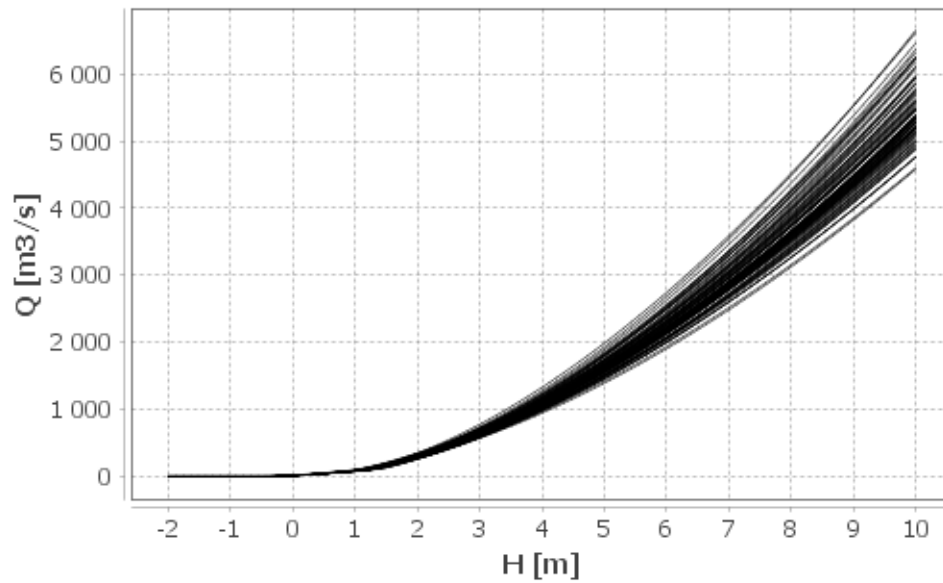


Figura 3.14. Diferentes curvas HQ a posteriori para diferentes parámetros k , a y c obtenidos de las simulaciones de MCMC. Captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*.

4 Descripción y análisis de los datos disponibles.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la metodología adoptada para establecer las relaciones altura-caudal requiere de tres elementos principales para su construcción:

- Características geométricas de los canales y las secciones
- Efectos hidrodinámicos existentes en las distintas secciones
- Aforos

A continuación se describen los datos disponibles para el conjunto de las estaciones de monitoreo de ACUMAR. Finalmente, en virtud del análisis de los datos y de las condiciones hidrodinámicas, se presenta el listado de estaciones que cumplen con todos requisitos para poder elaborar una relación entre alturas y caudales y cuentan con una cantidad razonable de aforos (es decir las estaciones donde se aplicará el software *BaRatinAGE* a fin de establecer las curvas HQ).

4.1 Geometría de cursos y secciones

La caracterización geométrica de las estaciones de monitoreo y de los cursos aguas arriba y aguas debajo de las mismas se realizó utilizando las monografías provistas por ACUMAR, imágenes satelitales, visitas a campo en ocasión de la campaña de aforos del presente convenio y fotografías de la zona.

4.1.1 Geometría de las secciones

Las características geométricas que permiten estimar las alturas en las cuales existen controles hidráulicos se analizaron principalmente a partir de los relevamientos topobatimétricos de las secciones que se encuentran en las monografías. También se utilizaron fotografías de la zona e imágenes satelitales para identificar las planicies de inundación y niveles en los cuales existen cambios en la hidrodinámica por estrechamientos, ensanchamientos o algún tipo de interferencia antrópica.

4.1.2 Pendiente de los cauces

La pendiente de los cursos se estableció utilizando el modelo hidrológico hidrodinámico desarrollado por UTN Fra - INA en el marco del proyecto “*Prosecución de la modelación de la calidad del agua superficial en la cuenca hídrica Matanza Riachuelo*” (2018) (en adelante Modelo UTN Fra – INA, 2018). Este modelo utilizó para su construcción la información topográfica LiDAR y las secciones batimétricas relevadas por EVARSA.

4.1.3 Manning de los cauces

El coeficiente de rugosidad de Manning se definió utilizando los valores definidos en el Modelo UTN Fra – INA (2018). El valor adoptado para todos los cursos es 0,04. En algunas secciones se modificó este valor, en particular en secciones donde se observó una gran cantidad de vegetación y en secciones correspondientes a canales revestidos o perfilados.

4.2 Efectos hidrodinámicos

Los niveles de los cursos de agua de la cuenca se ven afectados hidrodinámicamente por los niveles de agua en los cuerpos receptores (CR). Estos CR pueden ser otros cursos dentro de la cuenca o el propio Río de la Plata (RdP). La variación de los niveles de agua en los CR afectan significativamente los niveles de los cursos de agua afluentes generando lo que se denomina una curva de remanso. Este fenómeno puede ser estable en el tiempo o variable según la dinámica de cada cuerpo.

El RdP se ve afectado de forma periódica por la marea astronómica que genera ondas en los registros de niveles con dos picos y dos valles cada día, aproximadamente a lo que se suma la marea meteorológica que puede generar crecidas (llamadas comúnmente sudestadas) o bajantes. Esta variación en los niveles del RdP altera los niveles sobre toda la extensión del Riachuelo provocando incluso flujos de agua inverso al escurrimiento natural del río.

El Matanza-Riachuelo también produce un control en los niveles de agua sobre sus afluentes. Esta afectación depende de la pendiente de los cursos afluentes y del nivel del Matanza-Riachuelo. Por lo tanto, la afectación puede ser variable en el tiempo y depende de la dinámica hídrica.

4.3 Aforos

ACUMAR en su plan de caracterización hidrológica y de calidad de agua ha realizado campañas de aforos de forma sistemática desde 2012 con interrupciones en 2013, 2015 y 2019 (ver Figura 4.1). Las primeras campañas de aforos durante el año 2012 incluyeron mediciones en 26 estaciones de monitoreo (EM) y a partir del año 2014 se realizaron mediciones en 68 estaciones de monitoreo. Durante 2018 se realizaron aforos especiales en 8 estaciones durante eventos de crecidas debido a precipitaciones.

Los aforos se realizaron utilizando las técnicas de ADV y de ADCP. Desde el 2021 también se incorporó la medición de caudales mediante la técnica LSPIV.

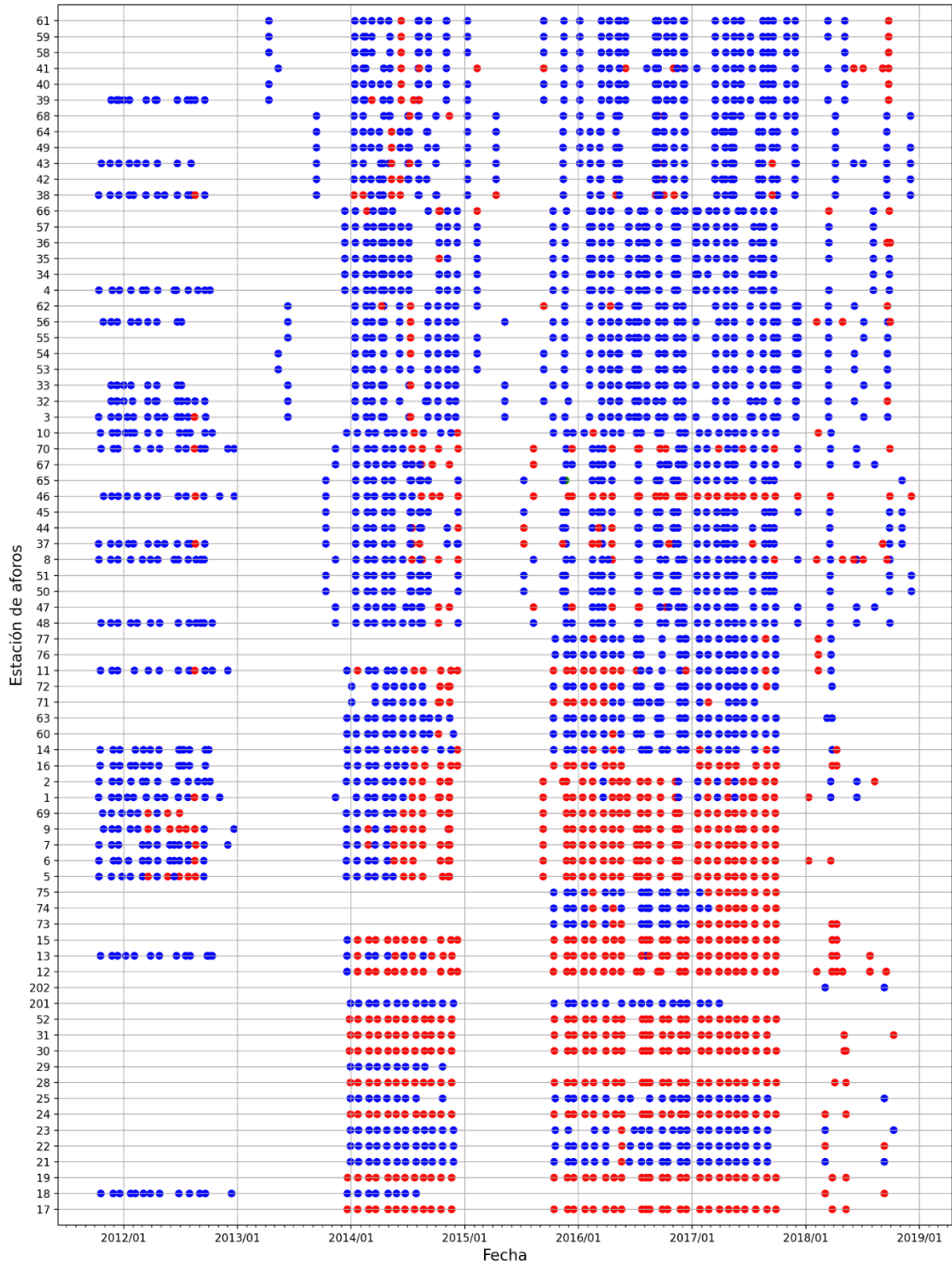


Figura 4.1. Aforos realizados por fecha y estación. En azul los aforos hechos con ADV y en rojo con ADCP

La mayor parte de los aforos se realizaron en circunstancias de aguas bajas con el objetivo de caracterizar la carga másica de contaminantes en condiciones medias. La dificultad de aforar en circunstancias de aguas bajas (sumado al error propio de los métodos de aforo) puede generar importantes incertidumbres en los valores obtenidos de caudales. A su vez, la poca (o nula) cantidad de aforos en aguas medias y altas dificulta la estimación de las curvas HQ.

La Figura 4.2 muestra la distribución espacial de las estaciones de monitoreo en las 14 subcuencas en las que se divide la cuenca Matanza-Riachuelo (según Res. ACUMAR 1113/2013). La subcuenca Cañuelas-Navarrete es la que más estaciones presenta (ocho), mientras que las subcuencas Aguirre, Del Rey y Santa Catalina solo tienen asociada una estación de monitoreo.

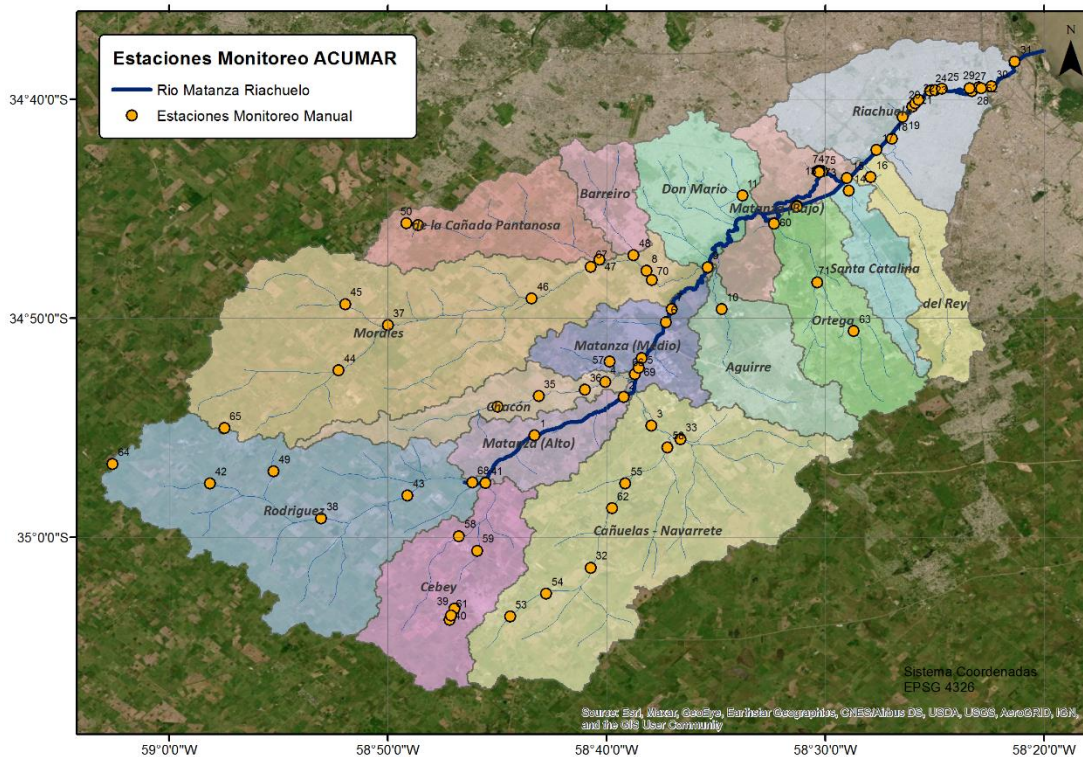


Figura 4.2. Mapa de subcuencas y estaciones de monitoreo en la cuenca Matanza-Riachuelo.

De los datos de aforos (Figura 4.3) se observa que en ciertos casos no se presenta la altura observada en la regla. Esto se entiende muchas veces por problemas para poder observar la regla instalada o por la ausencia de la misma.

La Figura 4.4 presenta la relación entre los caudales aforados y la profundidad media de la sección aforada. En la Figura 4.5 pueden observarse para las distintas estaciones la relación entre la altura limnimétrica (altura registrada en la escala) y la profundidad media. Esta última relación debe corresponderse con un ajuste lineal lo que permite establecer un primer criterio de calidad de los datos.

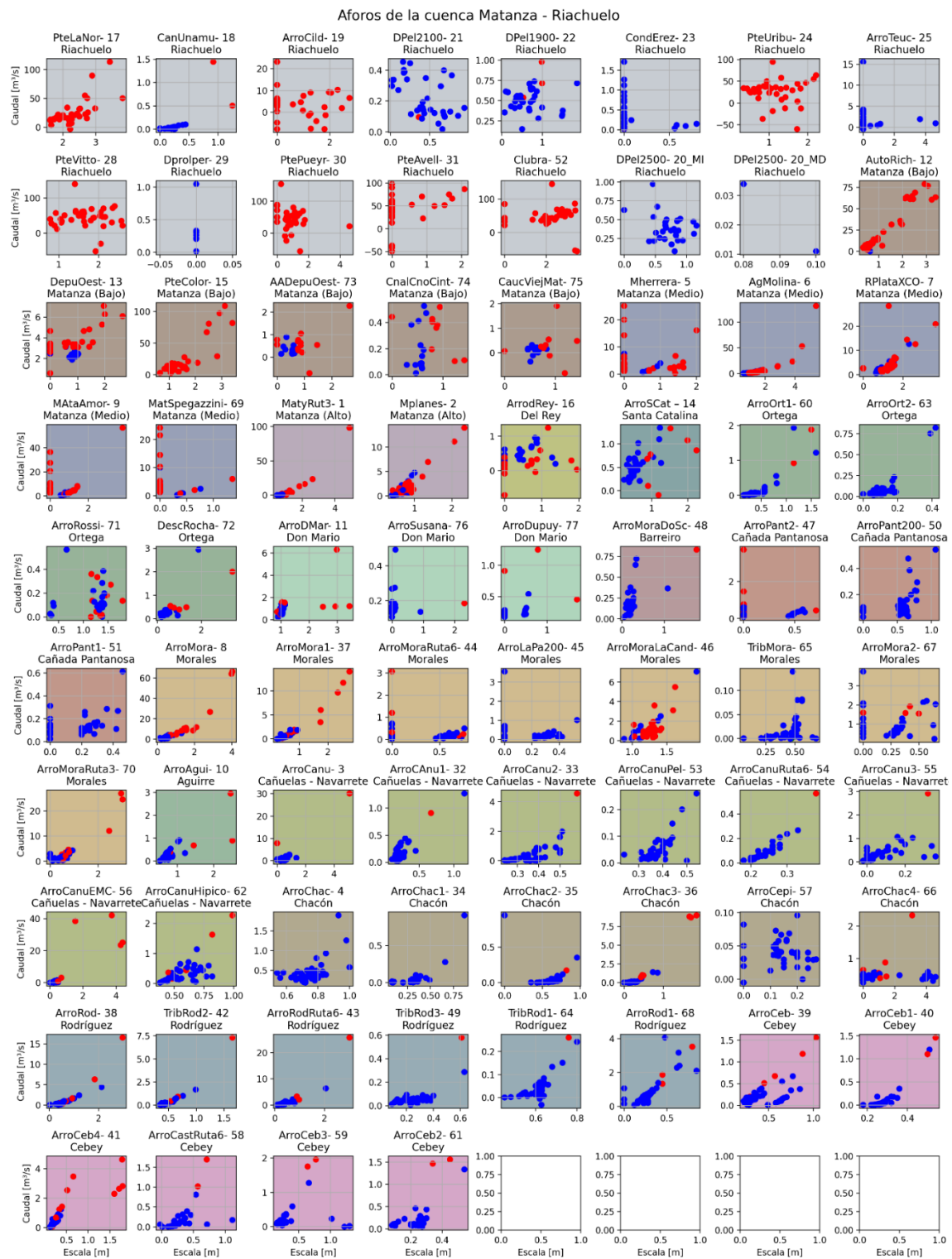


Figura 4.3. Aforos por estación (relación altura regla hidrométrica vs. caudal).

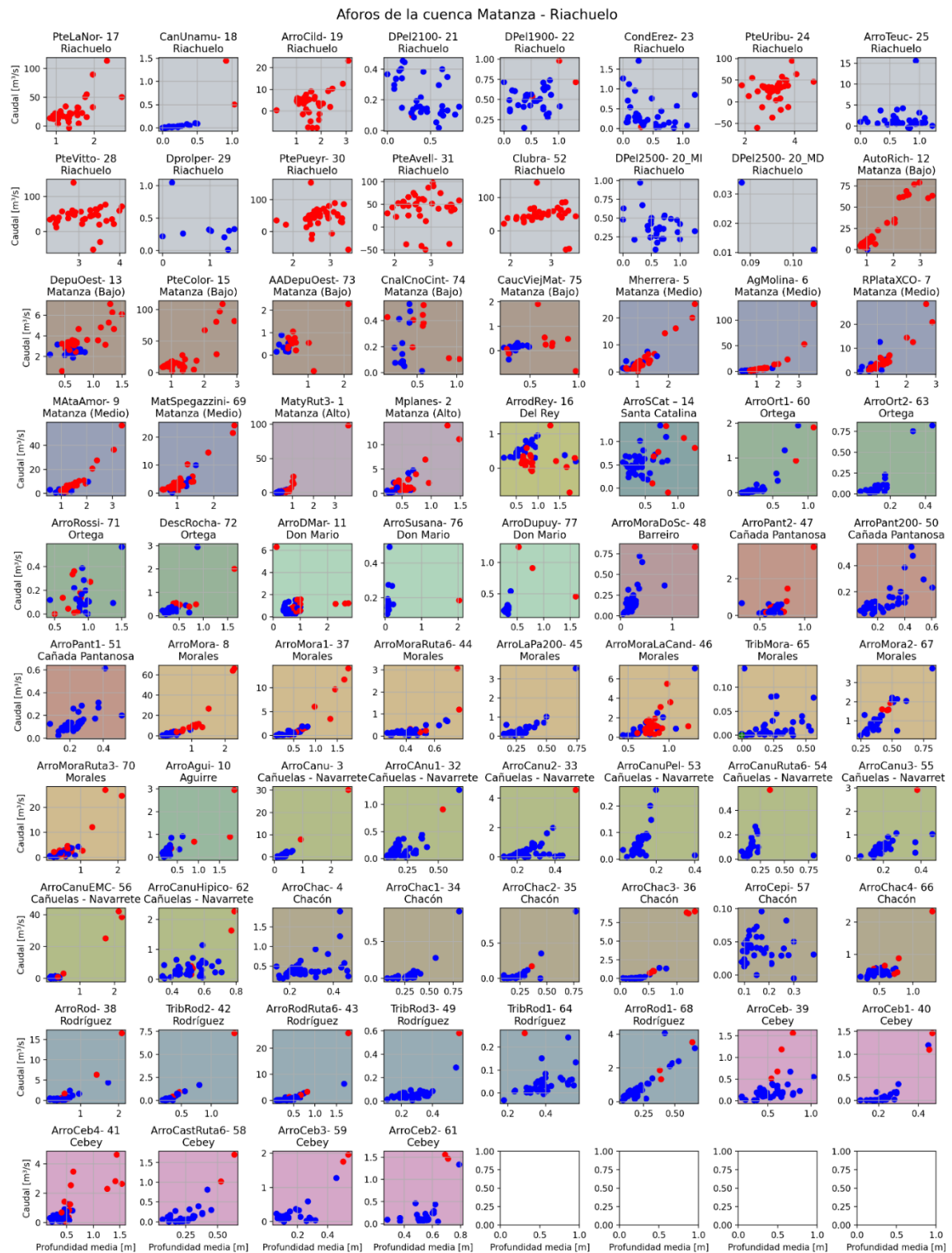


Figura 4.4. Aforos por estación (relación profundidad media vs. caudal).

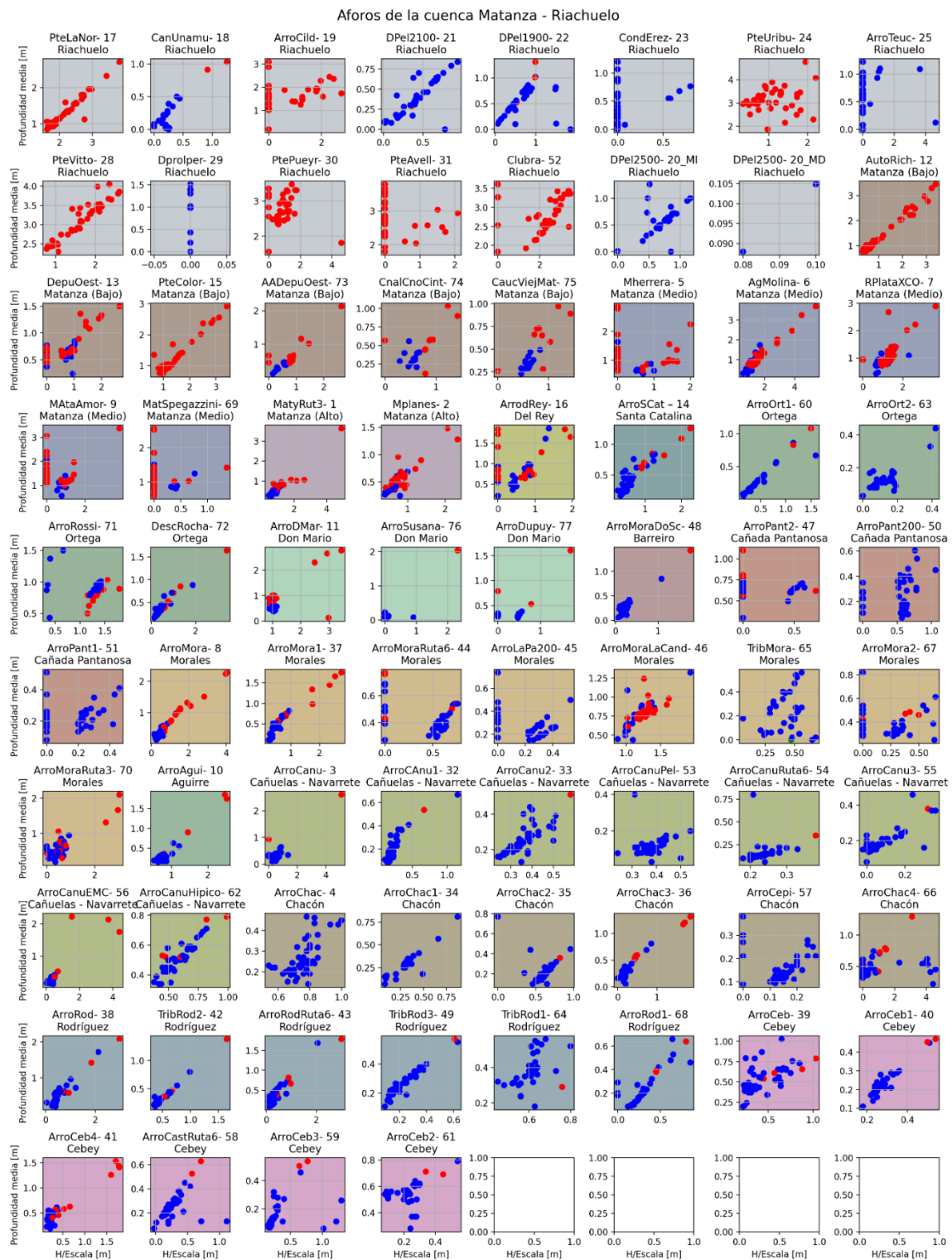


Figura 4.5. Relación profundidad media versus altura regla hidrométrica (o altura limnimétrica)

4.4 Estaciones seleccionadas para determinar curvas HQ

A partir del análisis de los condicionantes hidrodinámicas de las estaciones de monitoreo y de los aforos realizados en las mismas, se definieron en que estaciones se determinarían las curvas HQ.

La Tabla 4.1 muestra las 23 estaciones donde se desistió establecer relaciones entre alturas y caudales y el motivo que sustenta esta determinación. El resto de las estaciones (54) cumple con todos requisitos para poder elaborar una relación entre alturas y caudales y cuentan con una cantidad razonable de aforos.

Tabla 4.1. Detalle de las estaciones de monitoreo donde no se obtuvieron curvas HQ.

N°	Código	Justificación
17	PteLaNor- 17	Los niveles registrados en la sección de aforo están influenciados por los niveles del Río de la Plata (RdP) haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
18	CanUnamu- 18	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
19	ArroCild- 19	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
20 MD	DPel2500- 20_MD	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
20 MI	DPel2500- 20_MI	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
21	DPel2100- 21	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
22	DPel1900- 22	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
23	CondErez- 23	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
24	PteUribu- 24	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Río de la Plata (RdP) haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
25	ArroTeuc- 25	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.

28	PteVitto- 28	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Río de la Plata (RdP) haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
29	DProlder- 29	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
30	PtePueyr- 30	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Río de la Plata (RdP) haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
31	PteAvell- 31	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Río de la Plata (RdP) haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
52	ClubRA- 52	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
57	ArroCepi- 57	La sección de aforo no está asociada a un curso de agua sino a la descarga de una industria.
65	TribMora - 65	Esta sección está asociada a una descarga industrial
66	ArroChac4- 66	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del río Matanza haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
71	ArroRossi- 71	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles de la Laguna de Rocha haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
73	AADepuOest- 73	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del río Matanza Rectificado haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
74	CnalCnoCint- 74	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del río Matanza Rectificado haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
75	CauceViejoMat- 75	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del río Matanza Rectificado haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.
78	AlivCild - 78	Los niveles registrados en la sección de aforo están fuertemente influenciados por los niveles del Riachuelo haciendo que no exista una relación biunívoca entre alturas y caudales.

Definidas las estaciones donde se estimarán las curvas HQ, se procedió a analizar los aforos realizadas en las mismas. El detalle de los aforos utilizados en cada estación se presenta en la Tabla 4.2. En dicha tabla está indicado para cada estación la cantidad de tramos de cada escala (celdas sin sombreado naranja). En la Base de Datos de ACUMAR¹ igualmente se informan

¹ http://www.bdh.acumar.gov.ar/bdh3/index_contenido.php

lecturas mayores que la longitud de las escalas señaladas en las monografías de las estaciones (esos datos se indican con un asterisco en la Tabla 4.2).

En las 54 estaciones de monitoreo seleccionadas, se realizaron en total 2420 aforos, de los cuales 1953 (es decir el 81%) sirven para el armado de las curvas HQ. La mayor parte de los aforos descartados no cuentan con lectura del nivel en la escala o presentan valores poco consistentes por diversos motivos (cambios de escalas y crecidas en los cuerpos de agua receptores que generan efectos de remanso). Esto refuerza la importancia de relevar los niveles (por ejemplo con un equipo GPS diferencial) al momento de realizar el aforo independientemente de la presencia o no de la escala. De esta manera mayor cantidad de aforos servirán para caracterizar hidrológicamente la cuenca y se podrán utilizar en el ajuste de las curvas HQ.

La mayoría de los aforos se realizaron en conjunto con campañas de muestreo de calidad de agua superficial, las cuales suelen hacerse en situaciones de aguas bajas (el 94% de los aforos utilizados en el armado de las curvas HQ pertenecen a esta situación hidrológica). Para poder caracterizar con mayor certeza las relaciones entre niveles y caudales, es primordial realizar campañas de aforos adicionales en situaciones de aguas medias y altas.

Tabla 4.2. Detalle de los aforos utilizados en el armado de las curvas HQ.

EM	Aforos realizados en la sección	Aforos utilizados en el armado de la curva HQ					
		Totales	Primer tramo de la regla [0-1m]	Segundo tramo de la regla [1-2m]	Tercer tramo de la regla [2-3m]	Cuarto tramo de la regla [3-4m]	Quinto tramo de la regla [4-5m]
01	53	53	41	9	2	0	1*
02	53	53	49	2	2		
03	53	48	47	0	0	0	1*
04	53	53	53	0	0		
05	49	23	11	12	0		
06	50	50	9	36	2	1	2*
07	49	46	16	26	3*	1*	
08	63	60	50	8	1		1*
09	48	24	14	9	0	1*	
10	51	47	45	2	0		
11	51	47	19	28	0		
12	47	44	31	5	7	1	
13	54	15	9	6			
14	50	44	40	4			
15	38	27	10	13	3	1	
16	43	6	6	0	0		
32	50	50	49	1			

33	49	28	28	0	0	0	
34	37	37	37	0			
35	39	38	38	0			
36	47	46	43	3	0		
37	56	56	51	2	3	0	
38	53	52	48	3	1		
39	53	28	27	1	0		
40	39	39	39	0	0		
41	46	42	42	0			
42	40	40	39	1			
43	53	53	51	0	2		
44	40	26	26	0			
45	40	26	26	0			
46	53	53	5	48			
47	40	12	12	0			
48	53	51	51	0	0		
49	40	39	39	0			
50	40	26	25	1			
51	40	26	26	0			
53	40	39	39	0			
54	40	40	40	0	0		
55	40	28	28	0	0		
56	45	41	41				
58	39	36	36	0			
59	40	37	37	0			
60	36	34	32	2			
61	40	40	40				
62	40	40	40	0	0		
63	38	34	34	0			
64	38	36	36	0			
66	40	14	10	4			
67	39	23	23				
68	40	29	29				
69	45	9	8	1	0		
70	52	48	45	0	2	1*	
76	26	8	8				
77	29	9	9				

5 Resultados

A continuación se presentan las curvas HQ generadas para las diferentes estaciones de monitoreo (tanto el gráfico como la ecuación correspondiente). A modo de ejemplo, y para ver todo el proceso de generación de las curvas HQ, se incluye en el Anexo A, el detalle de la implementación del software *BaRatinAGE* en una estación (EM01).

5.1 EM01

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.1. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

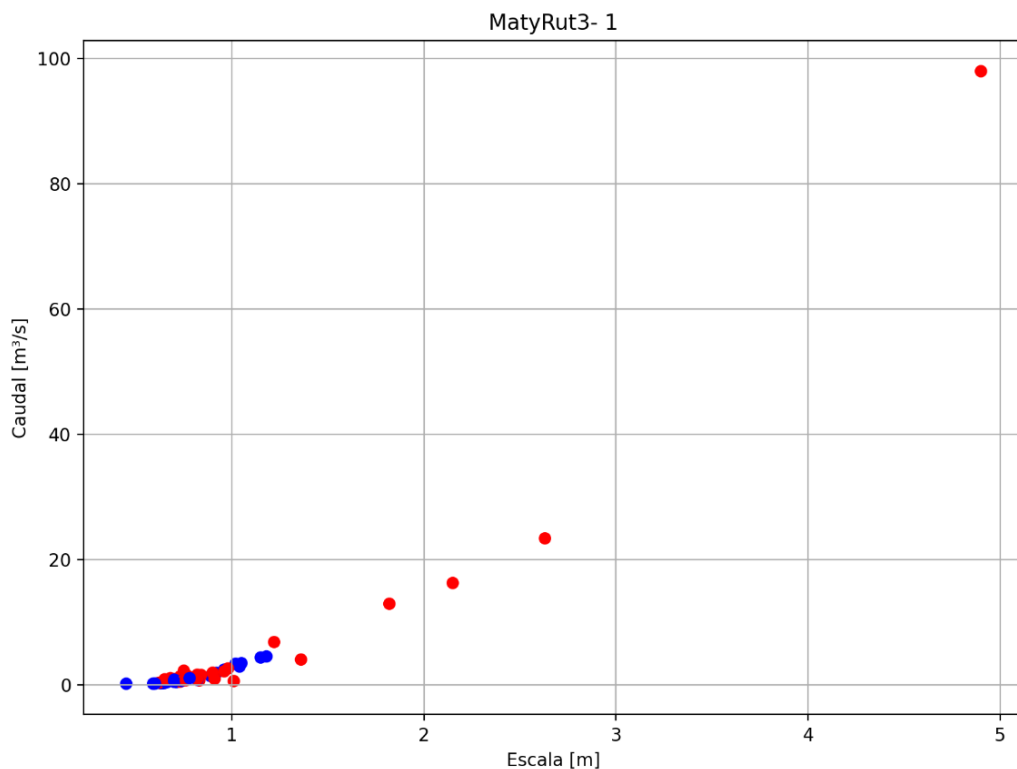


Figura 5.1. Aforos históricos realizados en EM01 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.1) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.2.

$$Q(h) = \begin{cases} 8,53855(h-0,51237)^{1,50081} & 0,51 \leq h \leq 1,19 \\ 6,83759(h-0,38185)^{1,69728} & 1,19 \leq h \leq 6,55 \\ 6,83759(h-0,38185)^{1,69728} + 29,5781(h-6,55117)^{1,67985} & 6,55 \leq h \leq 8,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.1. Curva HQ de la EM01

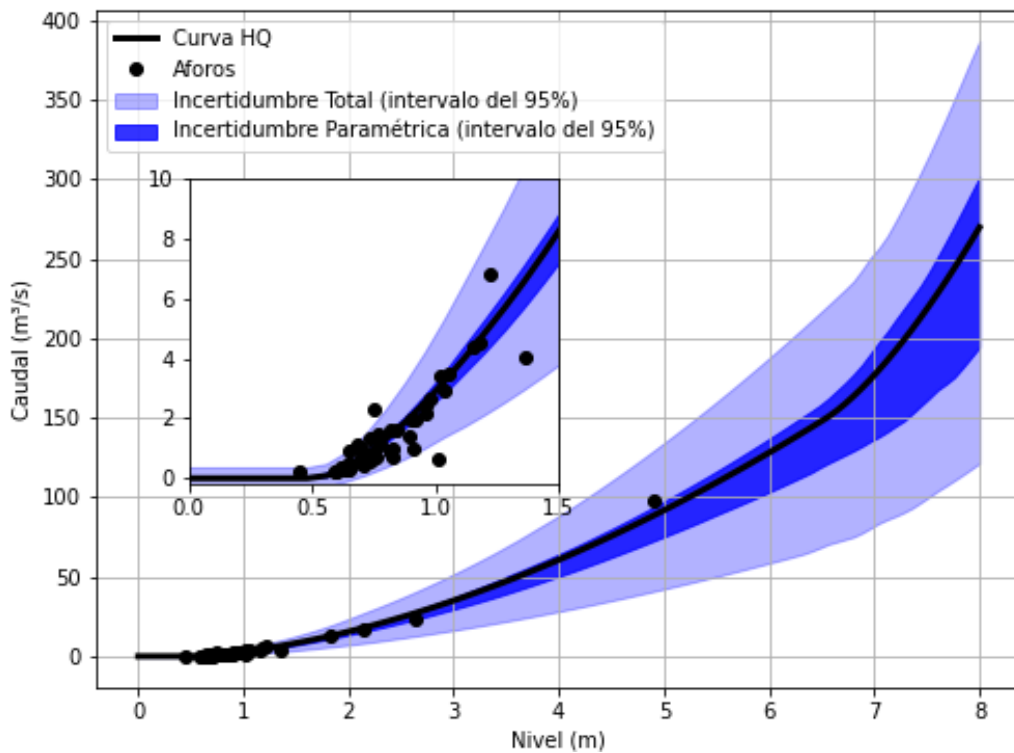


Figura 5.2. Curva HQ de la EM01.

5.2 EM02

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.3, no descartándose ninguno para la construcción de la curva HQ.

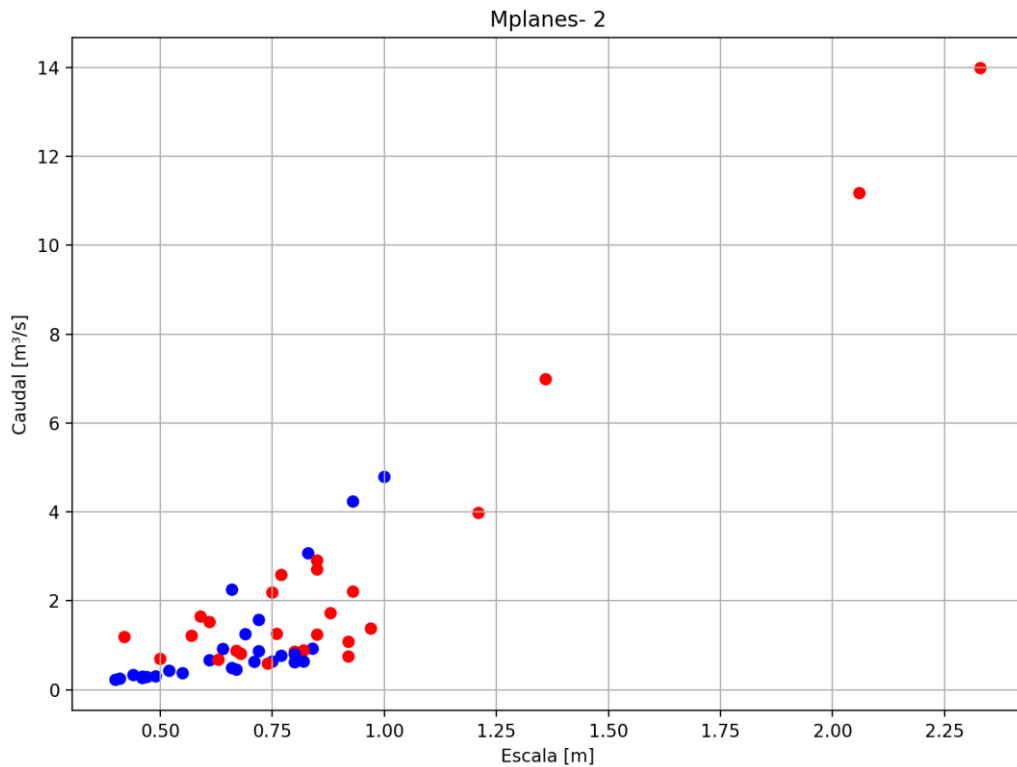


Figura 5.3. Aforos históricos realizados en EM02 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.2) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.4.

$$Q(h) = \begin{cases} 4,24352(h - 0,238836)^{1,66941} & 0,24 \leq h \leq 2,74 \\ 4,24352(h - 0,238836)^{1,66941} + 29,5819(h - 2,74703)^{1,66511} & 2,74 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.2. Curva HQ de la EM02.

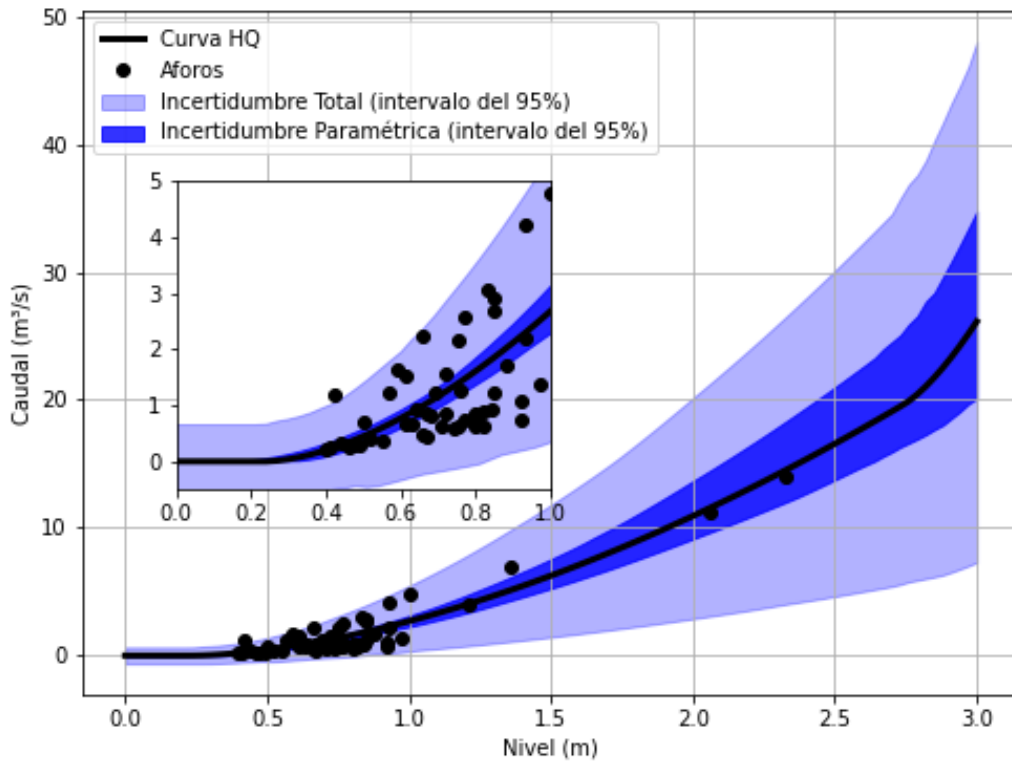


Figura 5.4. Curva HQ de la EM02 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.3 EM03

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.5. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica y un aforo por presentar un valor poco consistente.

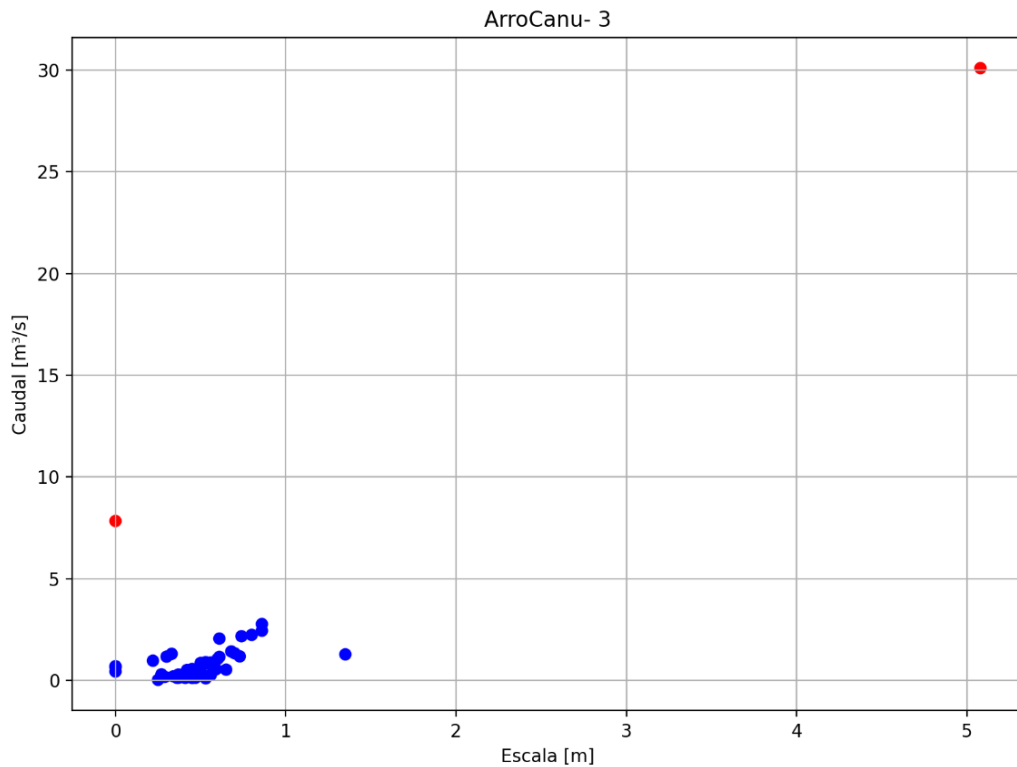


Figura 5.5. Aforos históricos realizados en EM03 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.3) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.6.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,80066(h+0,04156)^{1,66631} & -0,04 \leq h \leq 3,94 \\ 1,80066(h+0,04156)^{1,66631} + 2,56582(h-3,94218)^{2,56582} & 3,94 \leq h \leq 6,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.3. Curva HQ de la EM03.

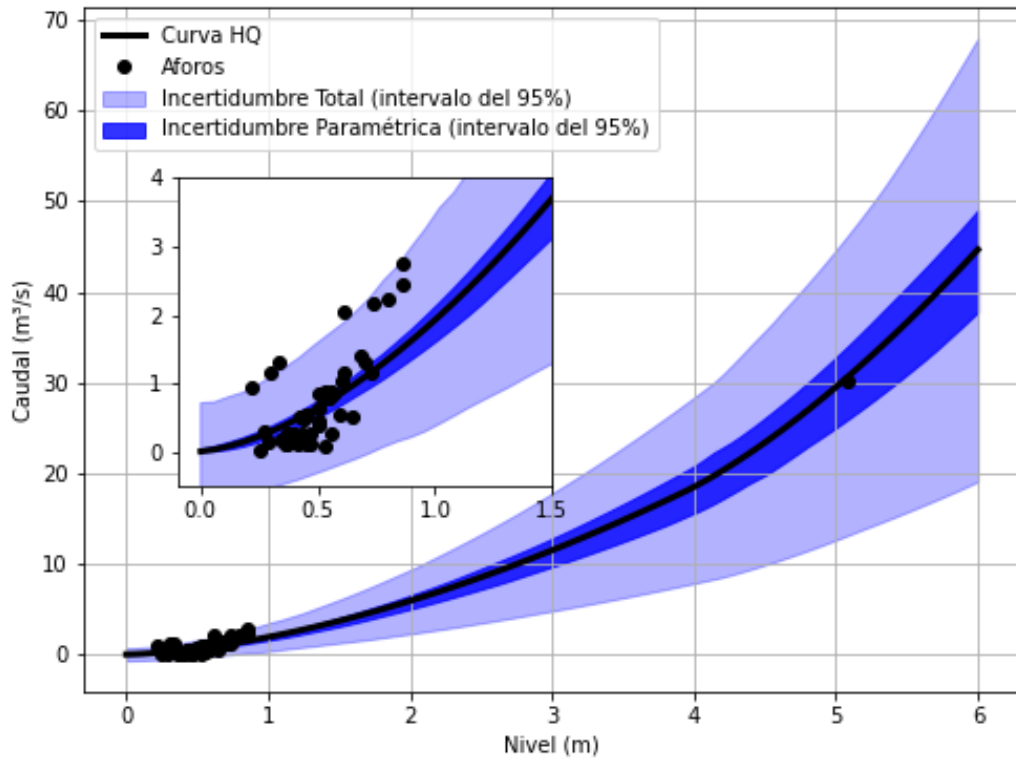


Figura 5.6. Curva HQ de la EM03.

5.4 EM04

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.7. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

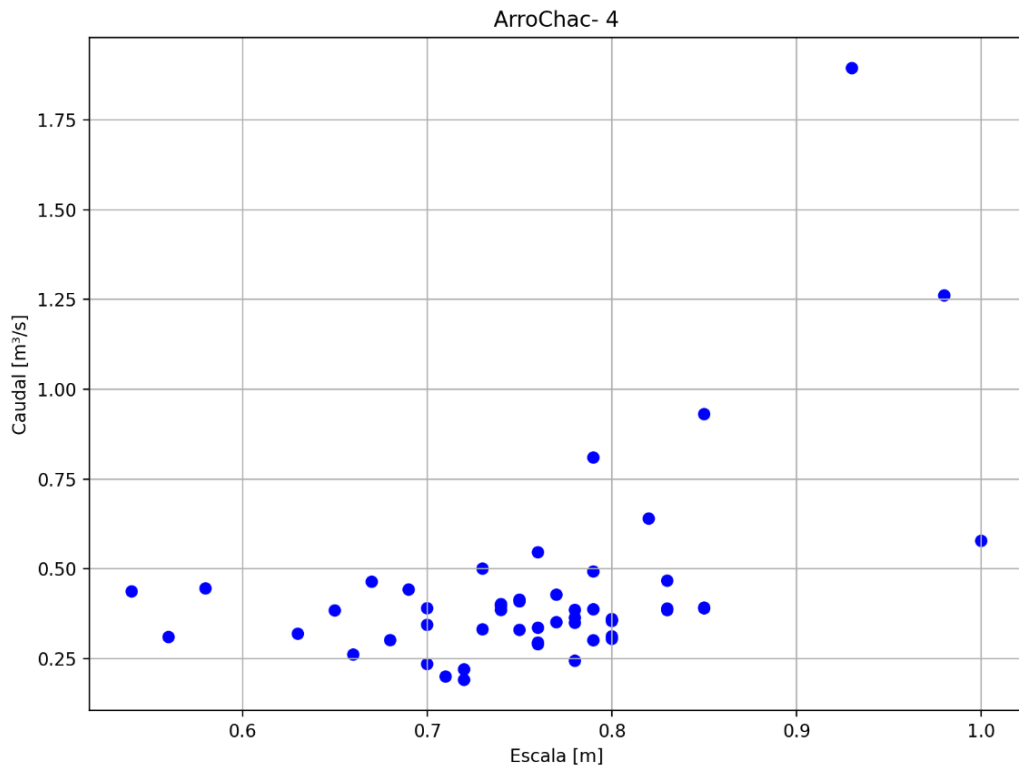


Figura 5.7. Aforos históricos realizados en EM04 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.4) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.8.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,91933(h - 0,33199)^{1,69073} & 0,33 \leq h \leq 0,85 \\ 7,69628(h - 0,62652)^{1,66442} & 0,85 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.4. Curva HQ de la EM04.

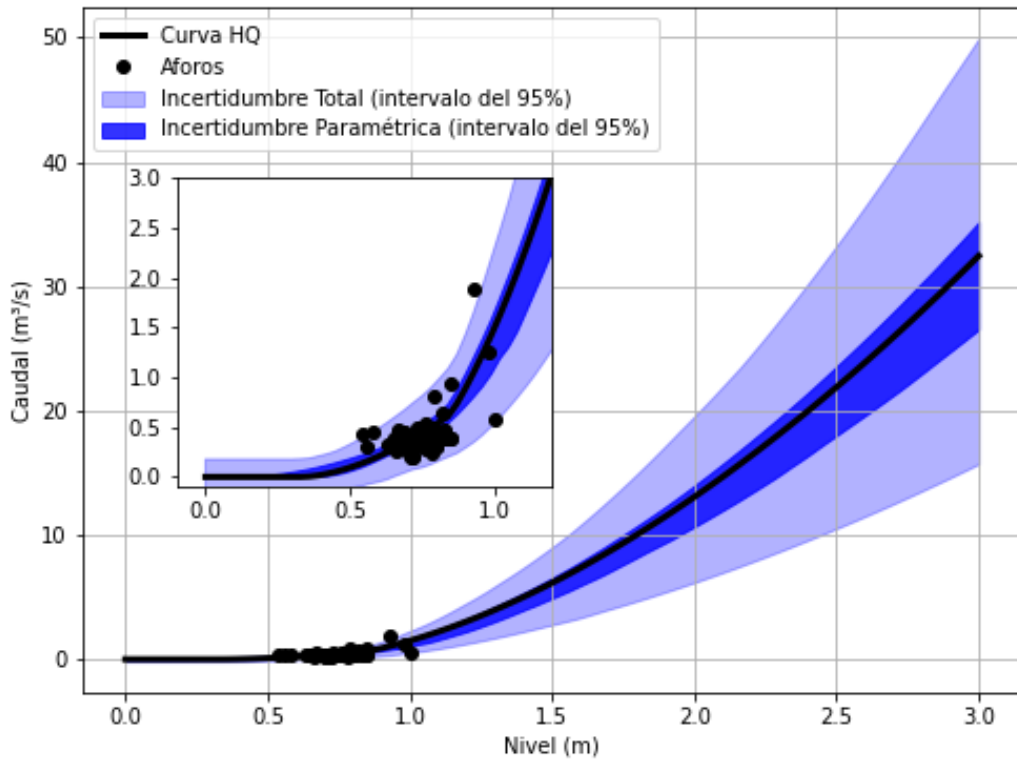


Figura 5.8. Curva HQ de la EM04.

5.5 EM05

En esta estación se realizaron 49 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.9. A partir del análisis de los mismos se descartaron 29 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartaron 13 aforos asociados a un posible cambio de escala en el año 2016.

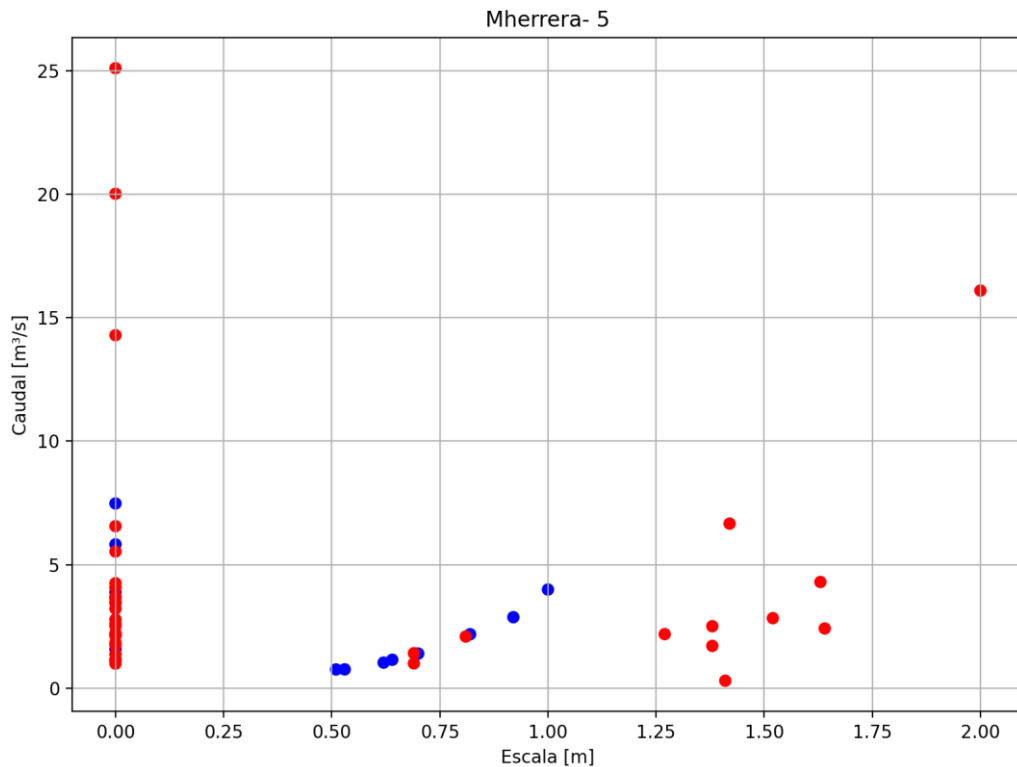


Figura 5.9. Aforos históricos realizados en EM05 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.5) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.10.

$$Q(h) = \begin{cases} 6,05706(h - 0,264717)^{1,68901} & 0,26 \leq h \leq 5,97 \\ 6,05706(h - 0,264717)^{1,68901} + 9,06217(h - 5,9725)^{1,67555} & 5,97 \leq h \leq 7,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.5. Curva HQ de la EM05.

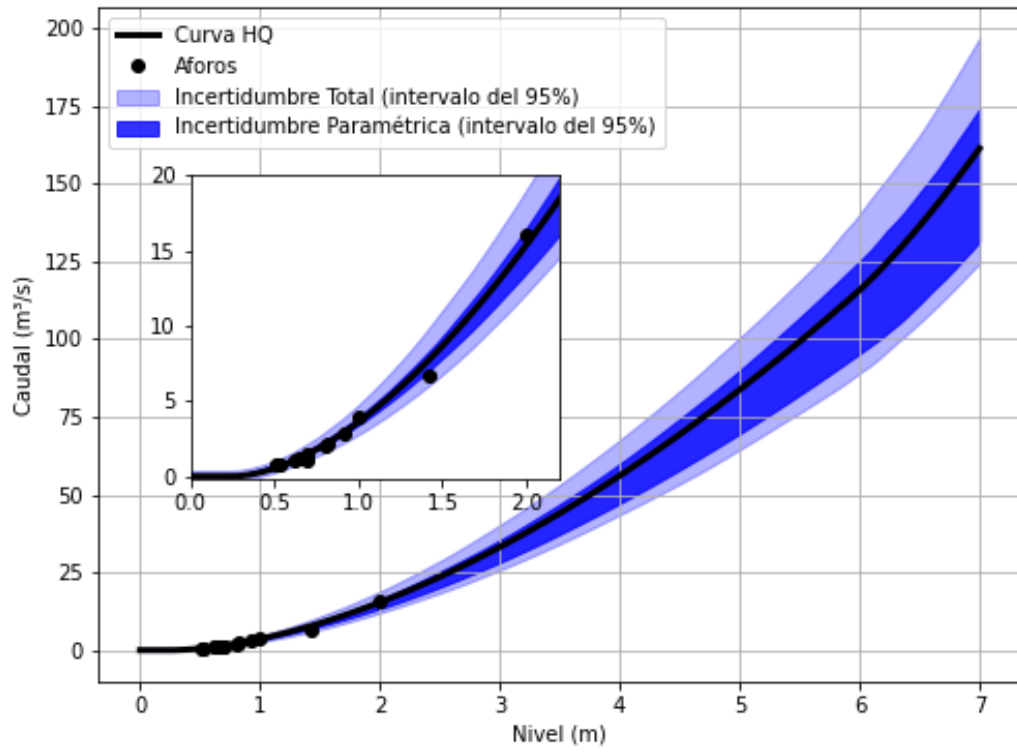


Figura 5.10. Curva HQ de la EM05 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.6 EM06

En esta estación se realizaron 50 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.11. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

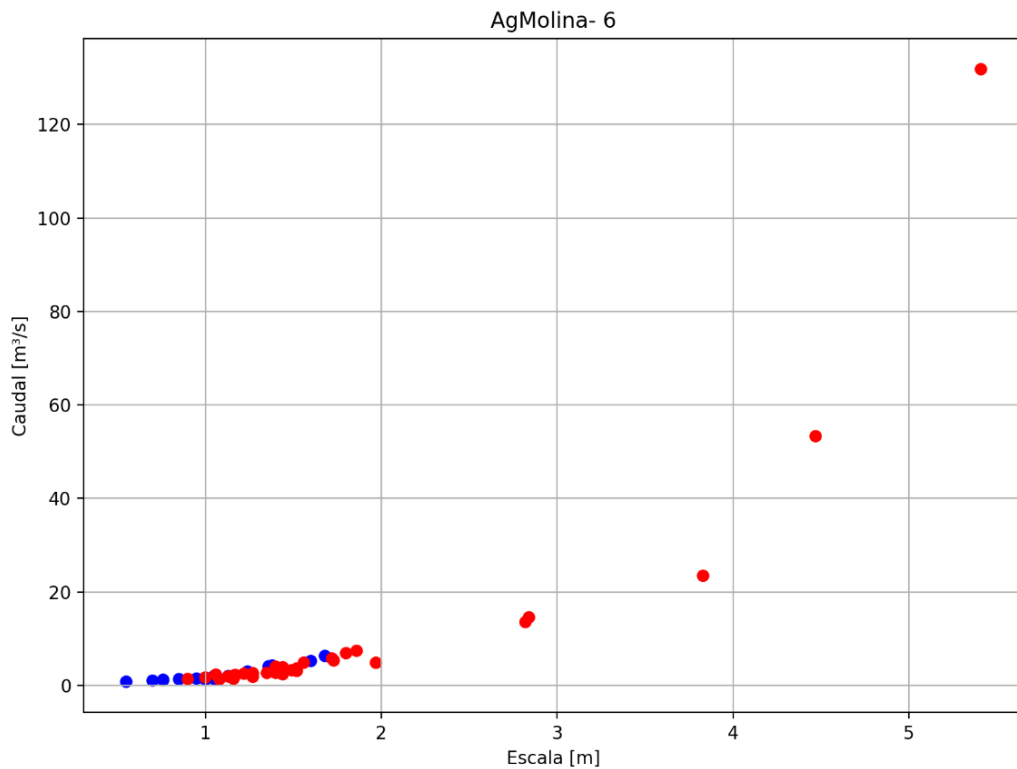


Figura 5.11. Aforos históricos realizados en EM06 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.6) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.12.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,66131(h-0,23462)^{1,67083} & 0,23 \leq h \leq 3,53 \\ 2,66131(h-0,23462)^{1,67083} + 25,11880(h-3,52532)^{1,65468} & 3,53 \leq h \leq 8,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.6. Curva HQ de la EM06.

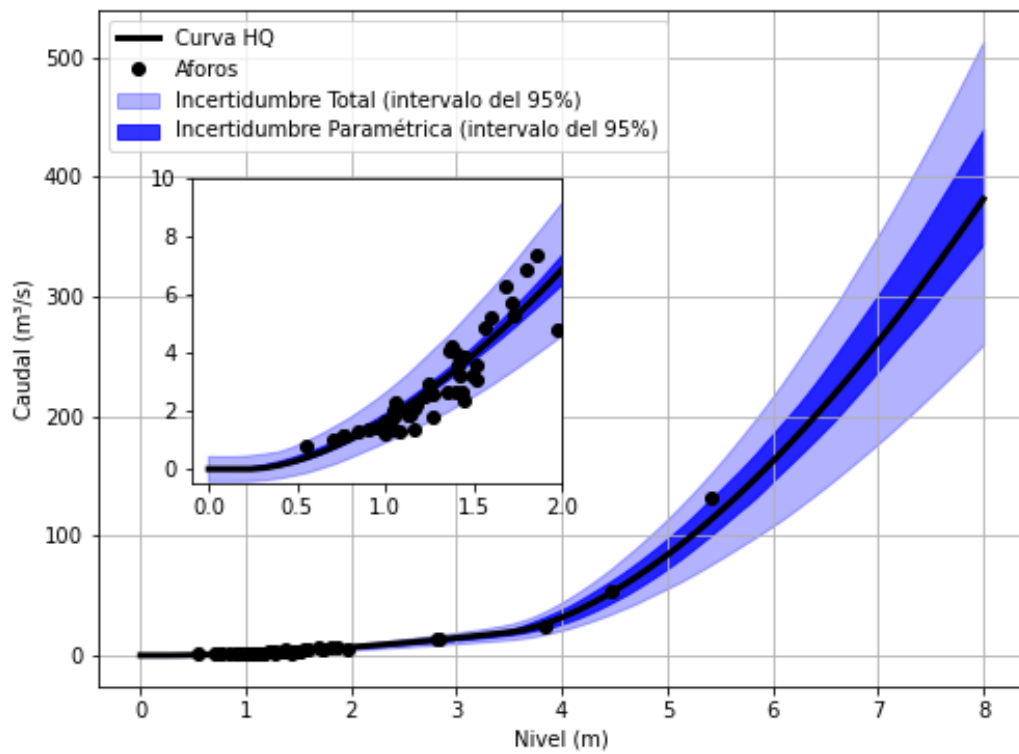


Figura 5.12. Curva HQ de la EM06 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.7 EM07

En esta estación se realizaron 49 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.13. A partir del análisis de los mismos se descartaron dos aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartó un aforo inconsistente con los aforos restantes.

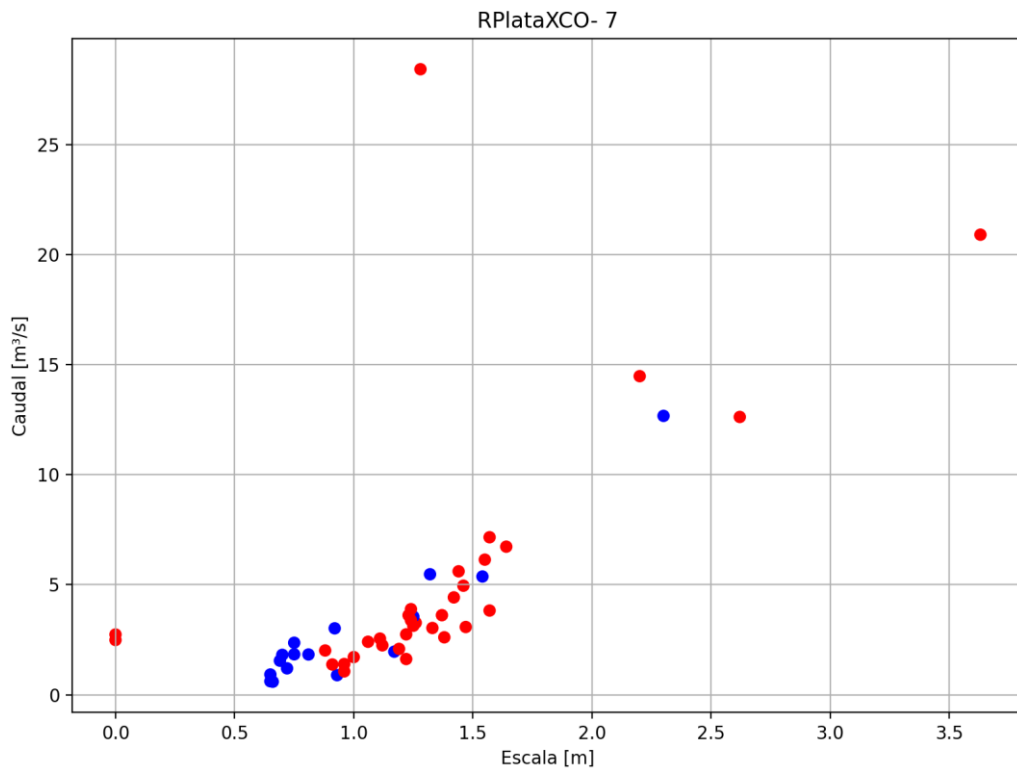


Figura 5.13. Aforos históricos realizados en EM07 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.7) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.14.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,72651(h - 0,328306)^{1,67355} & 0,32 \leq h \leq 3,95 \\ 3,72651(h - 0,328306)^{1,67355} + 9,72604(h - 3,9513)^{1,67122} & 1,18 \leq h \leq 7,02 \\ 9,72604(h - 3,9513)^{1,67122} + 17,9943(h - 4,40744)^{1,67492} & 7,02 \leq h \leq 8,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.7. Curva HQ de la EM07.

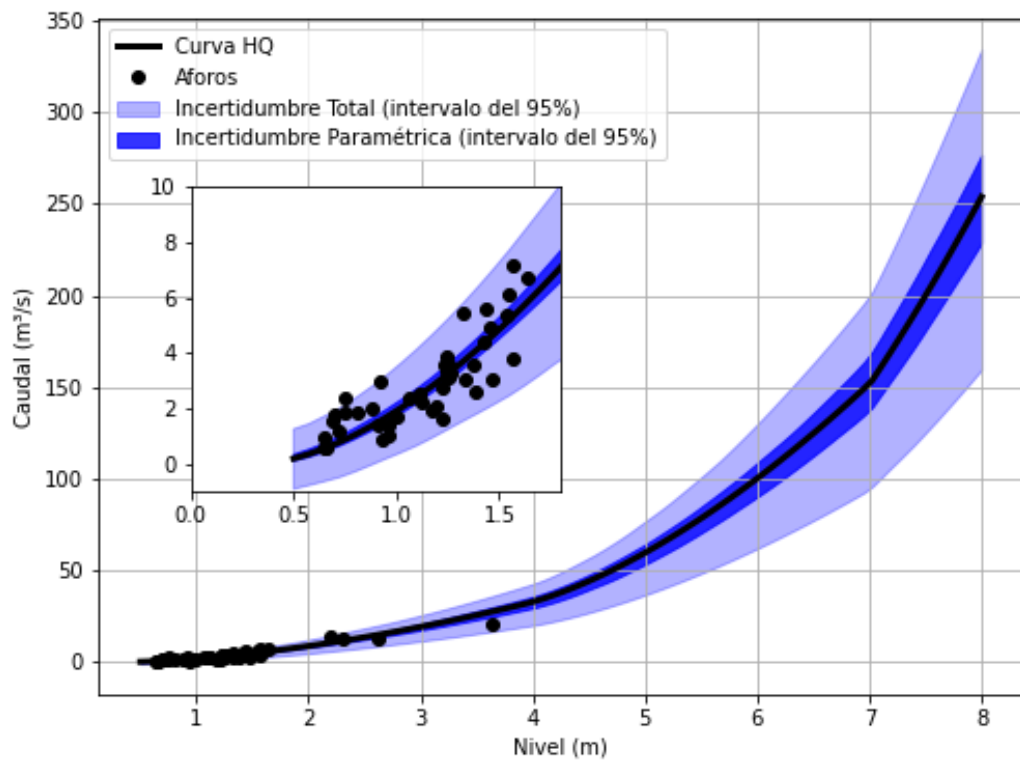


Figura 5.14. Curva HQ de la EM07 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.8 EM08

En esta estación se realizaron 63 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.15. A partir del análisis de los mismos se descartaron tres aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM08).

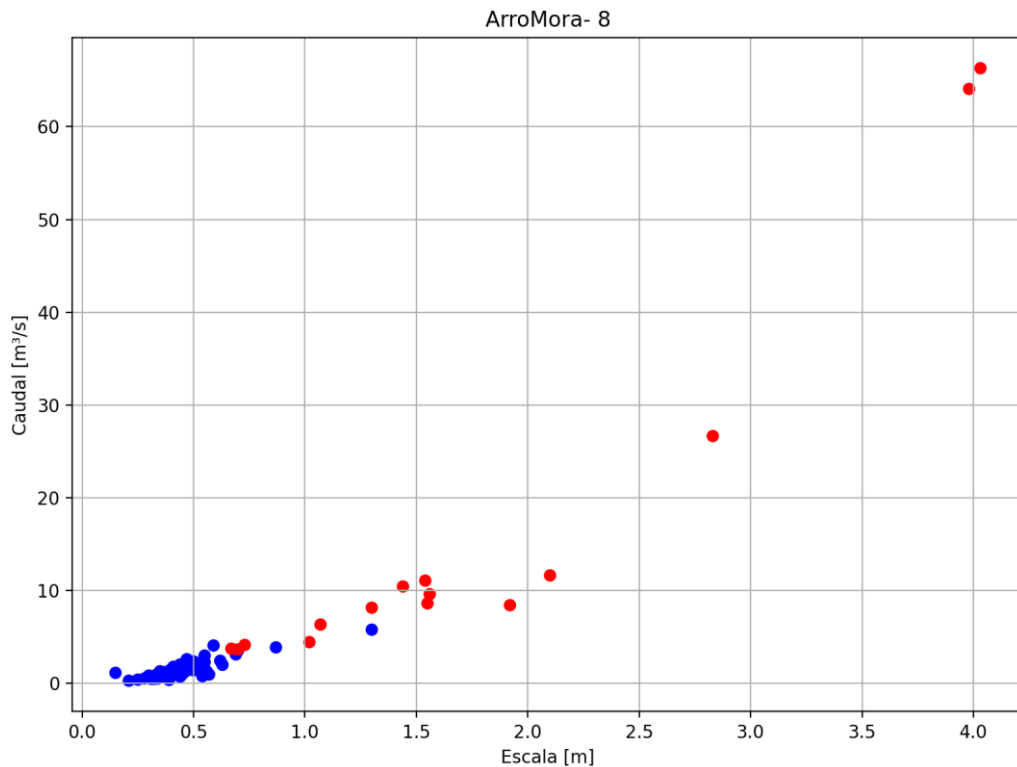


Figura 5.15. Aforos históricos realizados en EM08 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.8) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.16.

$$Q(h) = \begin{cases} 5,14750(h + 0,01302)^{1,66606} & -0,01 \leq h \leq 3,24 \\ 17,25100(h - 3,23885)^{1,67185} & 3,24 \leq h \leq 4,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.8. Curva HQ de la EM08.

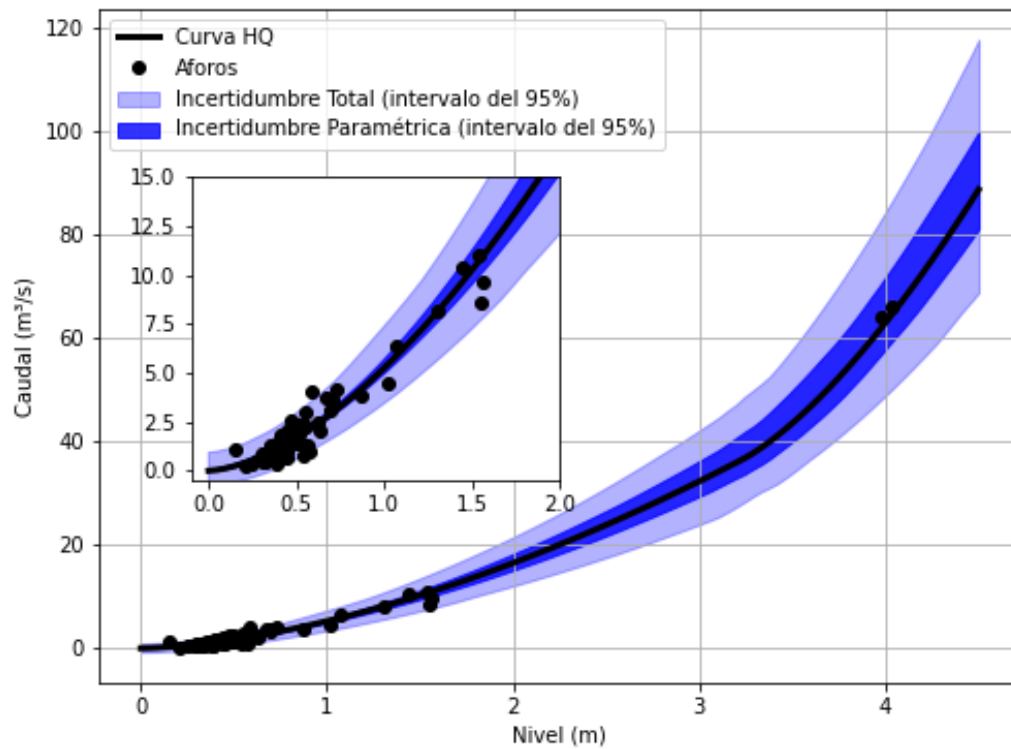


Figura 5.16. Curva HQ de la EM08 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.9 EM09

En esta estación se realizaron 48 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.17. A partir del análisis de los mismos se descartaron 24 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

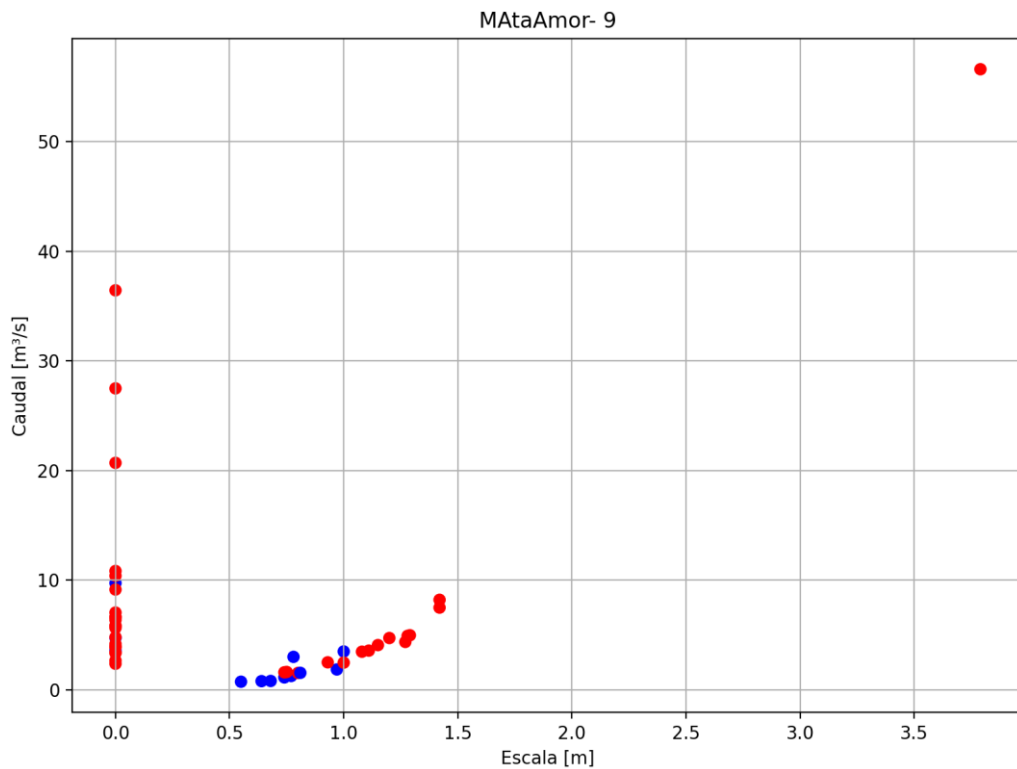


Figura 5.17. Aforos históricos realizados en EM09 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.9) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.18.

$$Q(h) = \begin{cases} 4,38946(h - 0,170239)^{1,69385} & 0,17 \leq h \leq 2,80 \\ 4,38946(h - 0,170239)^{1,69385} + 15,5582(h - 2,8044)^{1,66611} & 2,80 \leq h \leq 4,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.9. Curva HQ de la EM09.

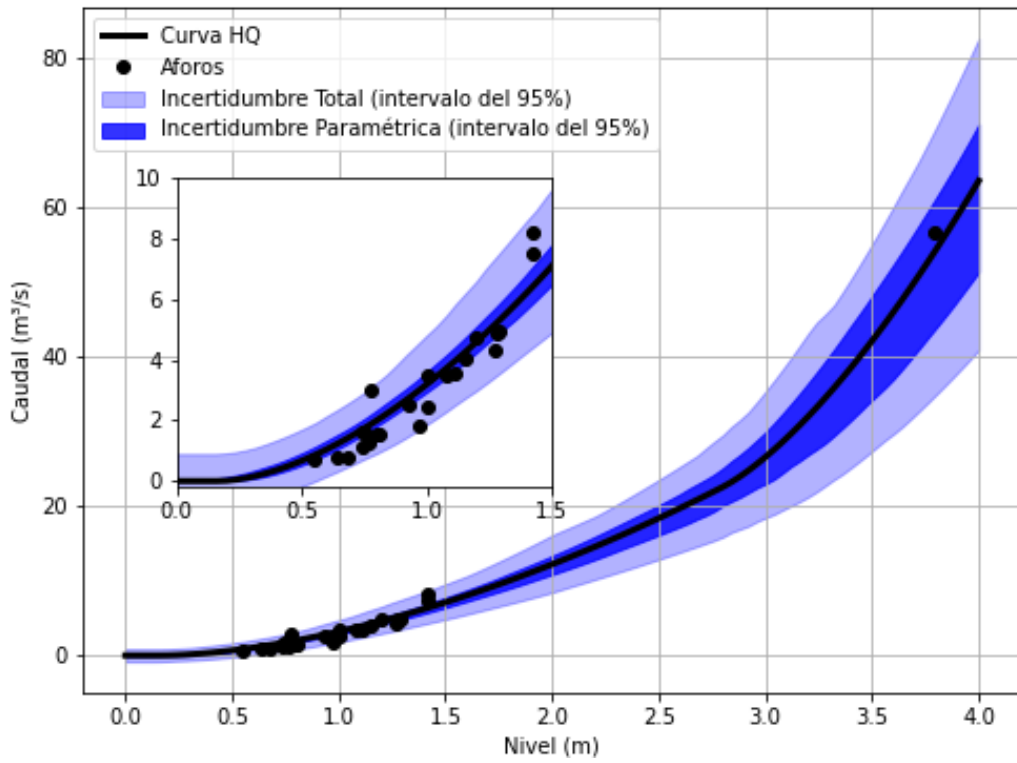


Figura 5.18. Curva HQ de la EM09 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.10 EM10

En esta estación se realizaron 51 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.19. A partir del análisis de los mismos se descartaron tres aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM10). Adicionalmente se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

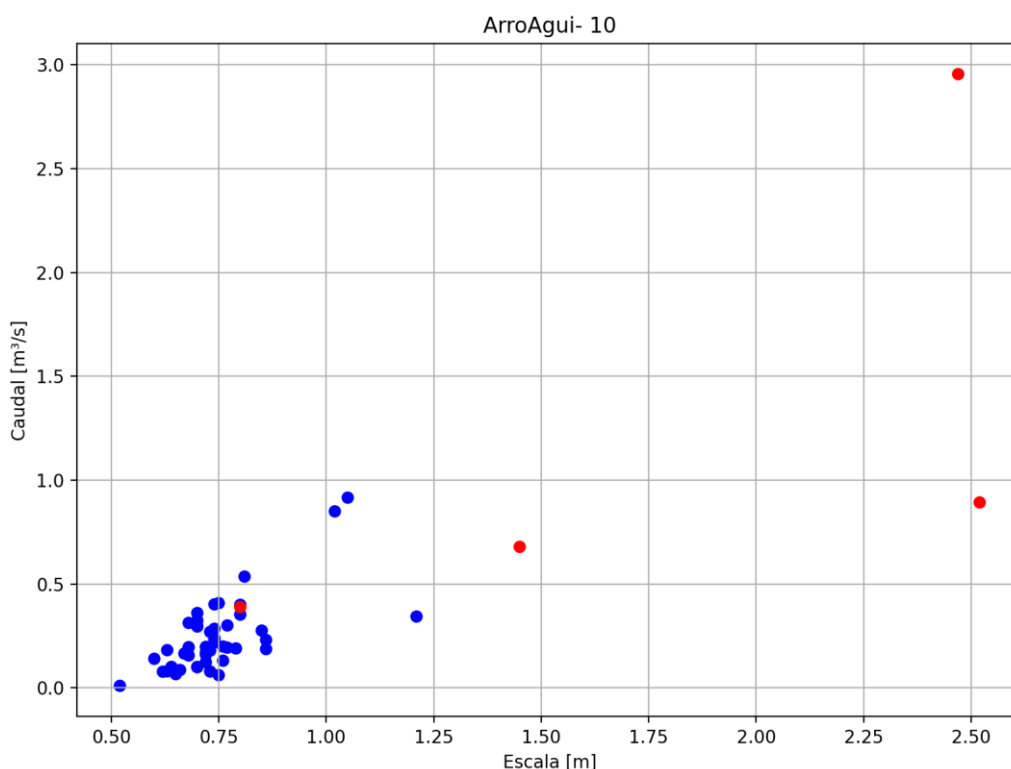


Figura 5.19. Aforos históricos realizados en EM10 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.10) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.20.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,40467(h-0,18969)^{1,64242} & 0,19 \leq h \leq 0,66 \\ 2,06095(h-0,47710)^{1,67926} & 0,66 \leq h \leq 1,86 \\ 2,06095(h-0,47710)^{1,67926} + 0,324271(h-1,86115)^{1,66382} & 1,86 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.10. Curva HQ de la EM10.

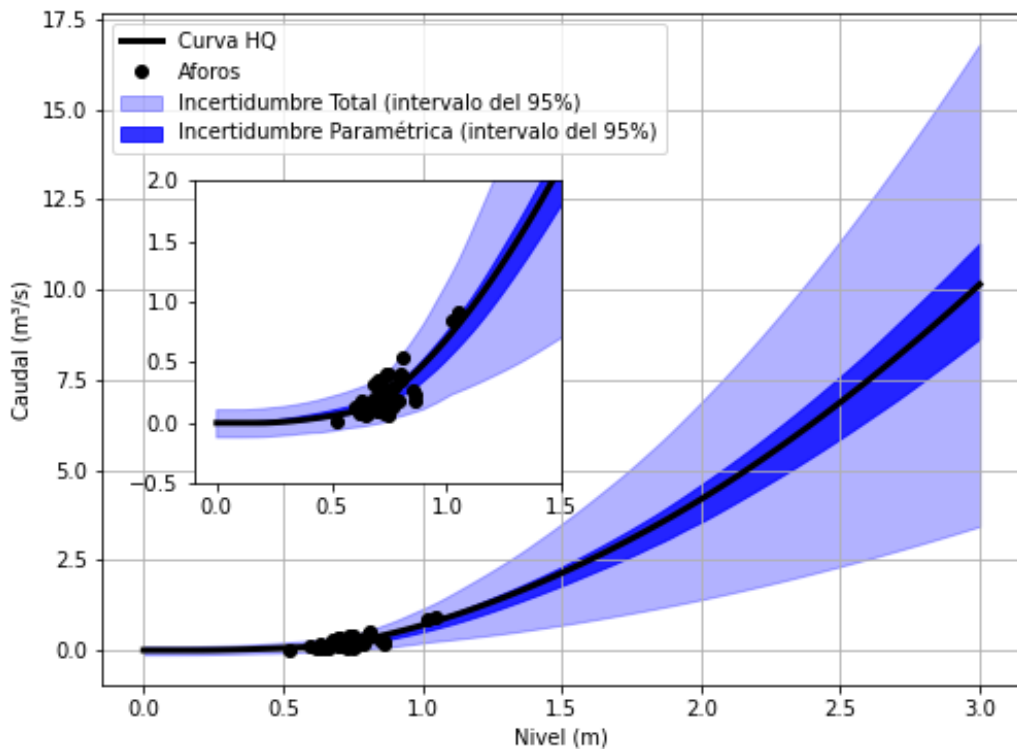


Figura 5.20. Curva HQ de la EM10 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.11 EM11

En esta estación se realizaron 51 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.21. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM11).

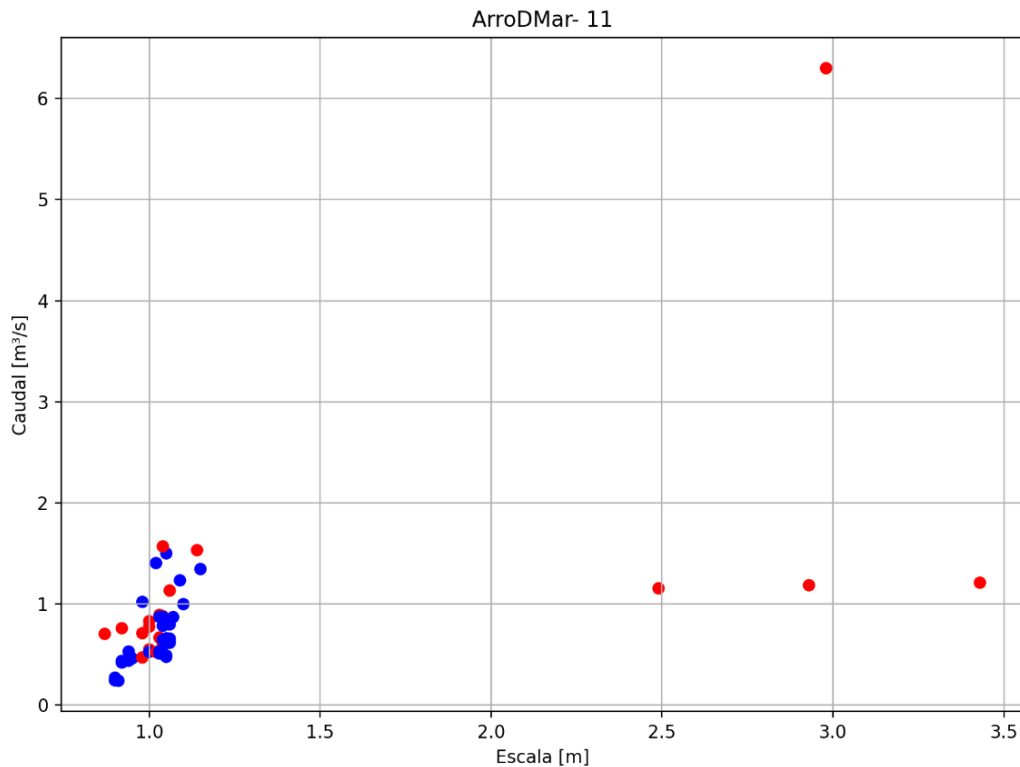


Figura 5.21. Aforos históricos realizados en EM11 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.11) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.22.

$$Q(h) = \{1,31584(h - 0,29924)^{1,67845} \quad 0,30 \leq h \leq 5,50$$

Ecuación 5.11. Curva HQ de la EM11.

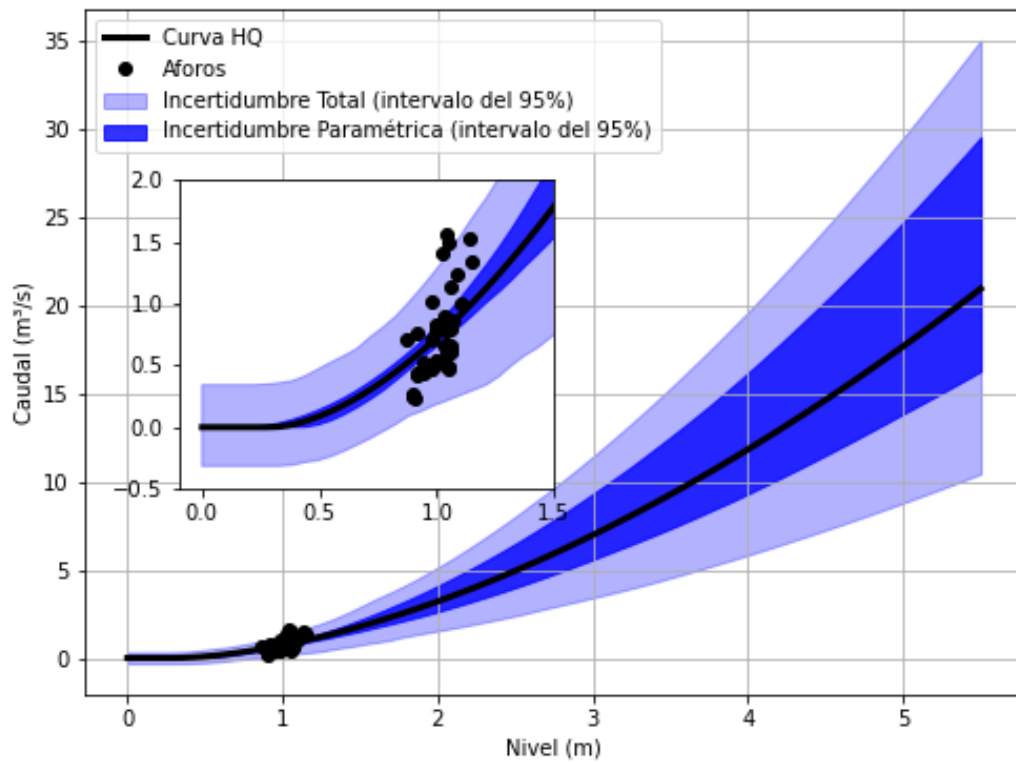


Figura 5.22. Curva HQ de la EM11 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.12 EM12

En esta estación se realizaron 47 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.23. A partir del análisis de los mismos se descartaron tres aforos pues las mediciones se realizaron durante eventos de Sudestada (en este caso los niveles del Río de la Plata generan un efecto de remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM12).

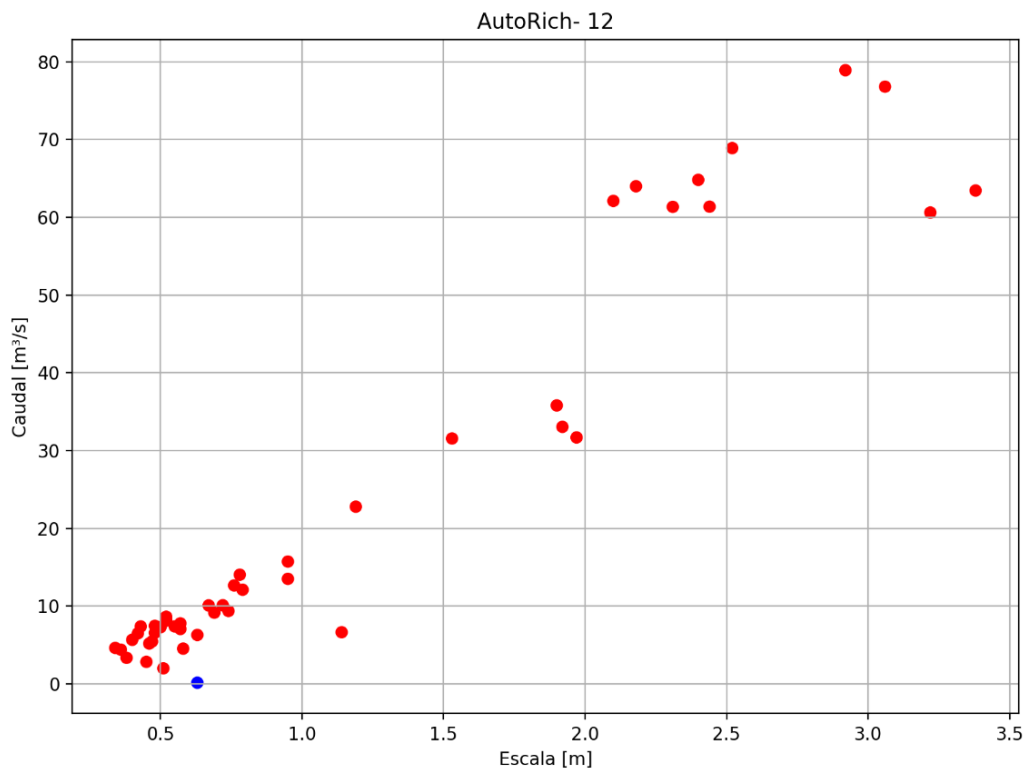


Figura 5.23. Aforos históricos realizados en EM12 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.12) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.24.

$$Q(h) = \begin{cases} 13,61190(h+0,09324)^{1,64608} & -0,09 \leq h \leq 4,00 \\ 13,61190(h+0,09324)^{1,64608} + 18,47390(h-3,99976)^{1,66431} & 4,00 \leq h \leq 5,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.12. Curva HQ de la EM12.

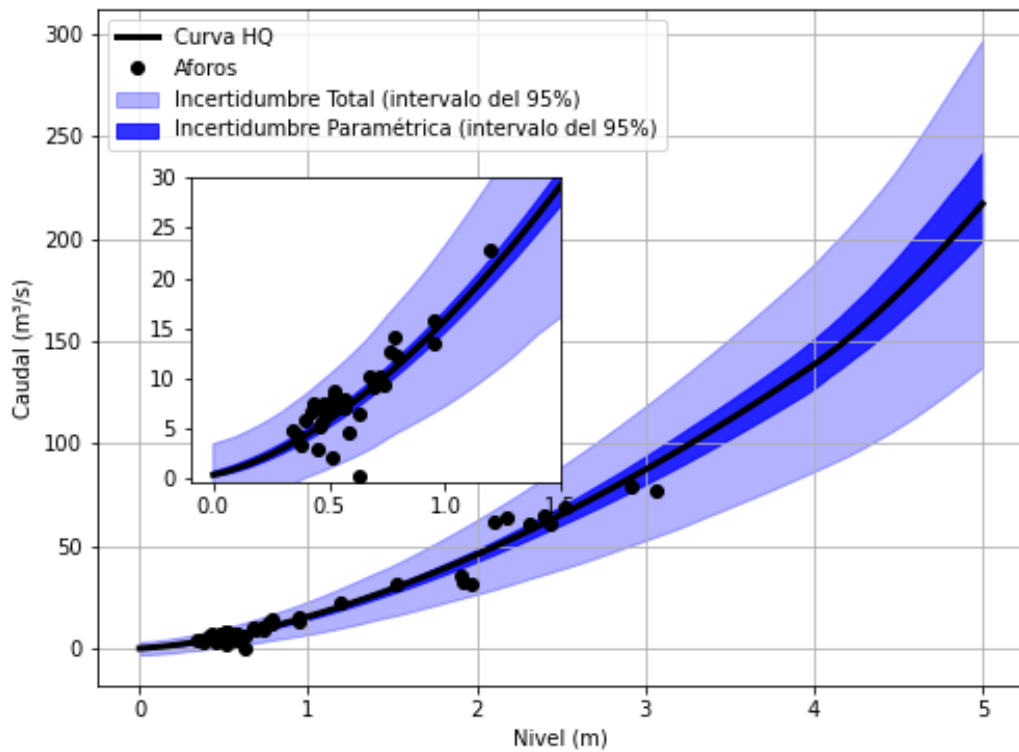


Figura 5.24. Curva HQ de la EM12 con sus respectivos intervalos de confianza.

Para esta sección en particular se contaban con aforos adicionales realizados por este grupo de trabajo en el marco de diversos proyectos de investigación. Para ver la consistencia de la relación altura – caudal obtenida, se presenta la superposición de la curva HQ obtenida (ver Figura 5.25) y los aforos realizados por este grupo de trabajo. Se puede observar un muy buen ajuste entre esos aforos y la curva.

Por último, se incorporaron estos aforos para generar una nueva curva HQ, que se presenta en la Figura 5.26. Puede observarse que la nueva curva generada presenta menores intervalos de incertidumbre, señalando la importancia de contar con mayor cantidad de aforos, especialmente en condiciones de aguas medias y altas.

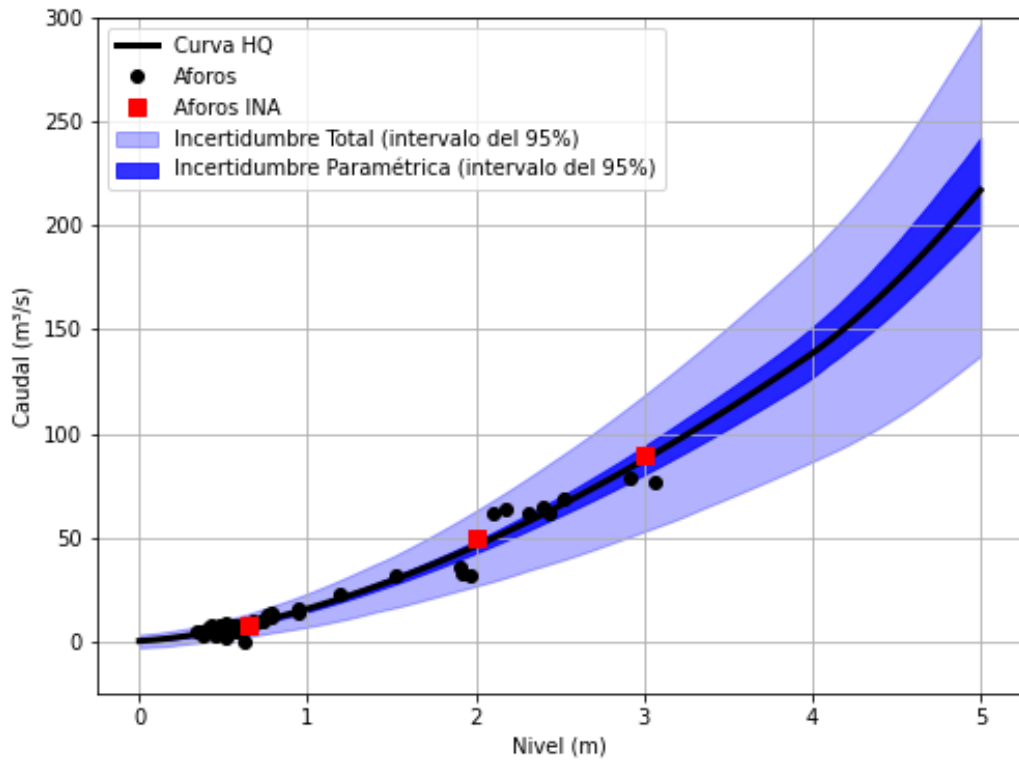


Figura 5.25. Comparación de la curva HQ de la EM12 obtenida en el presente estudio con aforos realizados por el INA en proyectos de investigación previos.

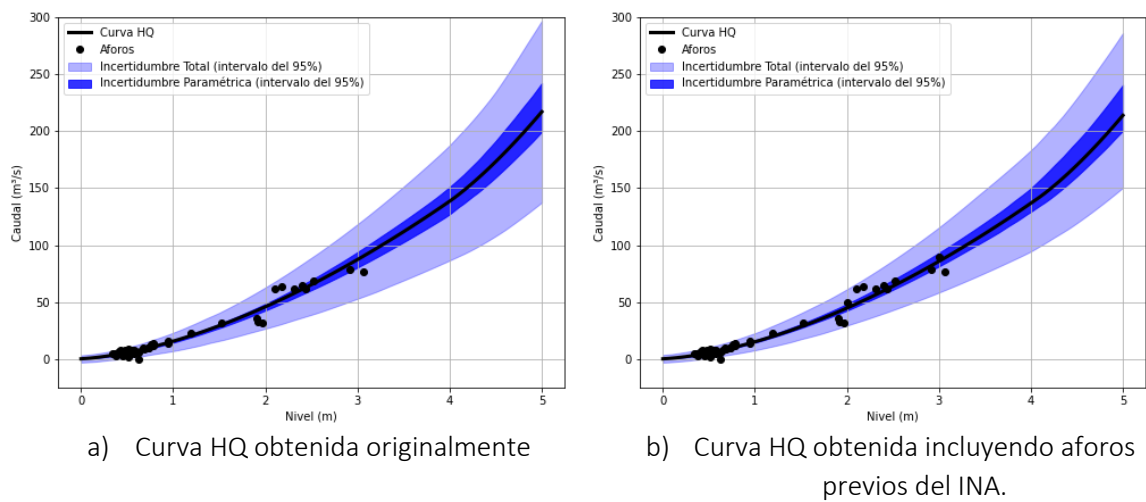


Figura 5.26. Comparación de curvas HQ en la EM12.

5.13 EM13

En esta estación se realizaron 54 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.27. A partir del análisis de los mismos se descartaron 17 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica y cuatro aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM13). Adicionalmente se descartaron 18 registros de caudales pues se realizaron antes de la ampliación de la Planta Sudoeste, cuya descarga se ubica inmediatamente aguas arriba de esta sección.

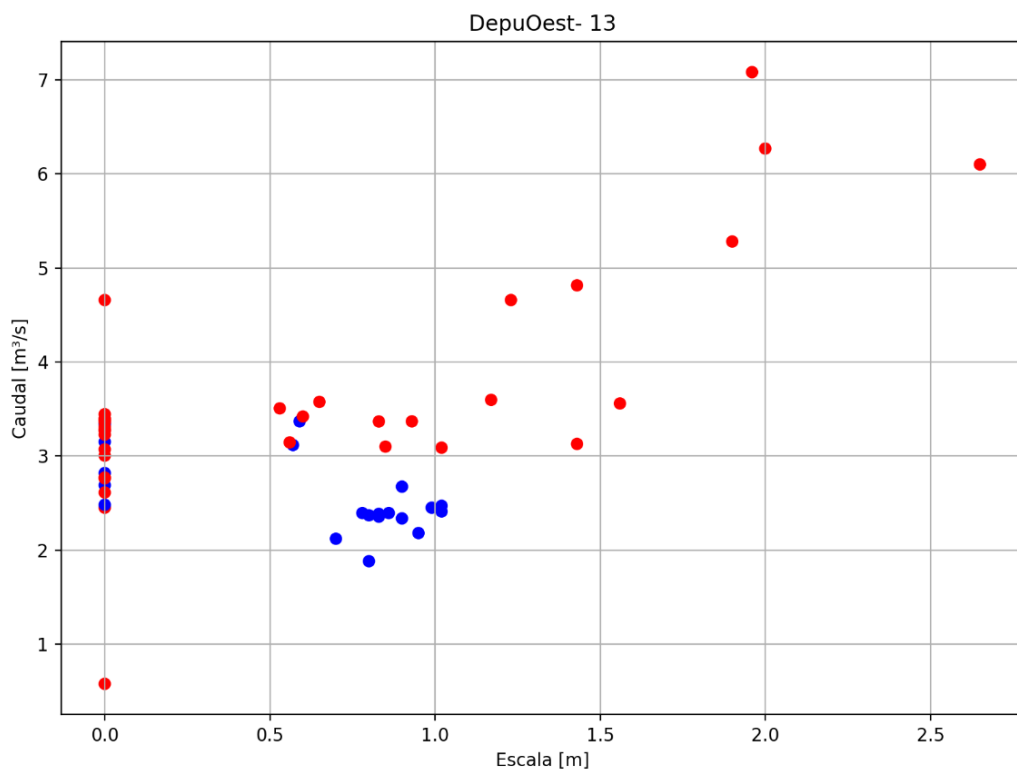


Figura 5.27. Aforos históricos realizados en EM13 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.13) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.28.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,01398(h+0,06001)^{1,66242} & -0,06 \leq h \leq 1,75 \\ 2,01398(h+0,06001)^{1,66242} + 3,68114(h-1,74601)^{1,67699} & 1,75 \leq h \leq 2,67 \\ 2,01398(h+0,06001)^{1,66242} + 3,68114(h-1,74601)^{1,67699} + 5,38381(h-2,67000)^{1,68109} & 2,67 \leq h \leq 4,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.13. Curva HQ de la EM13.

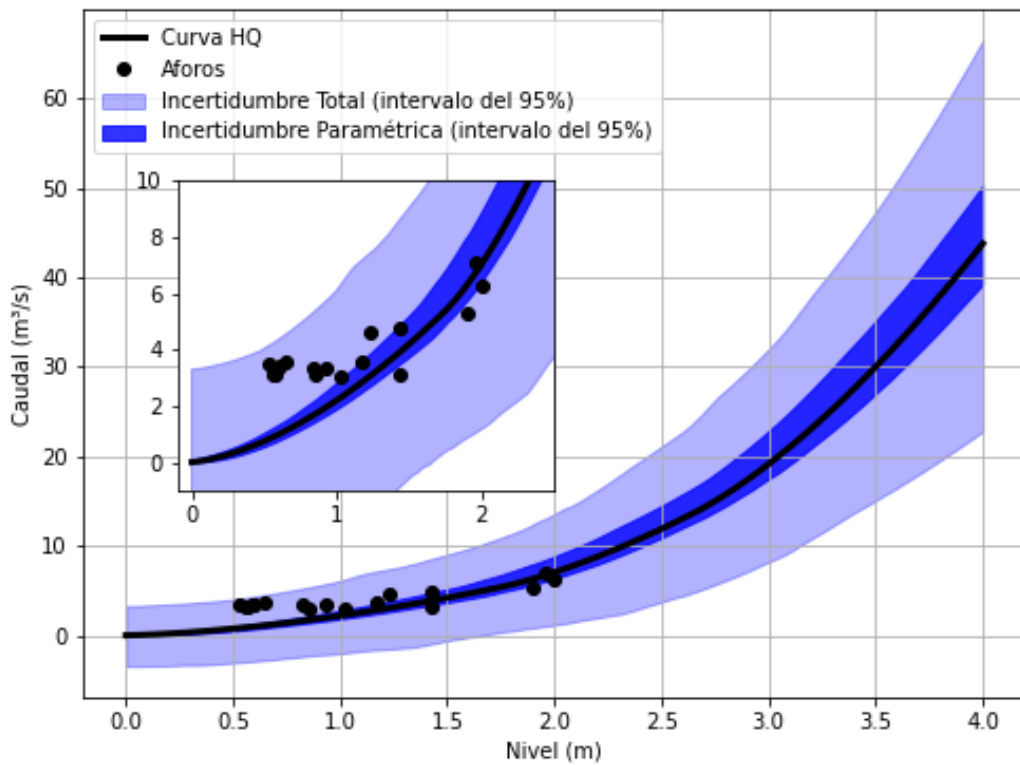


Figura 5.28. Curva HQ de la EM13 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.14 EM14

En esta estación se realizaron 50 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.29. A partir del análisis de los mismos se descartaron cinco aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del Riachuelo (el Riachuelo presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM14). Adicionalmente se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

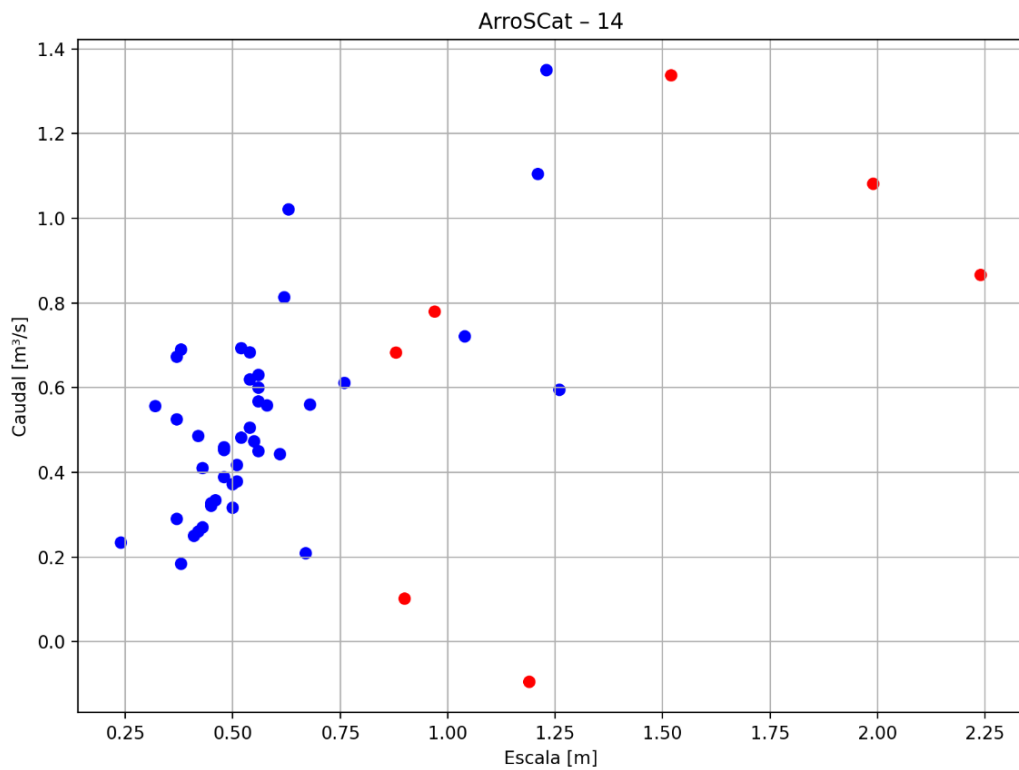


Figura 5.29. Aforos históricos realizados en EM14 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.14) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.30.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,06658(h - 0,08507)^{0,90180} & 0,09 \leq h \leq 3,00 \\ 1,06658(h - 0,08507)^{0,90180} + 2,22658(h - 2,99621)^{1,66132} & 3,00 \leq h \leq 4,20 \end{cases}$$

Ecuación 5.14. Curva HQ de la EM14.

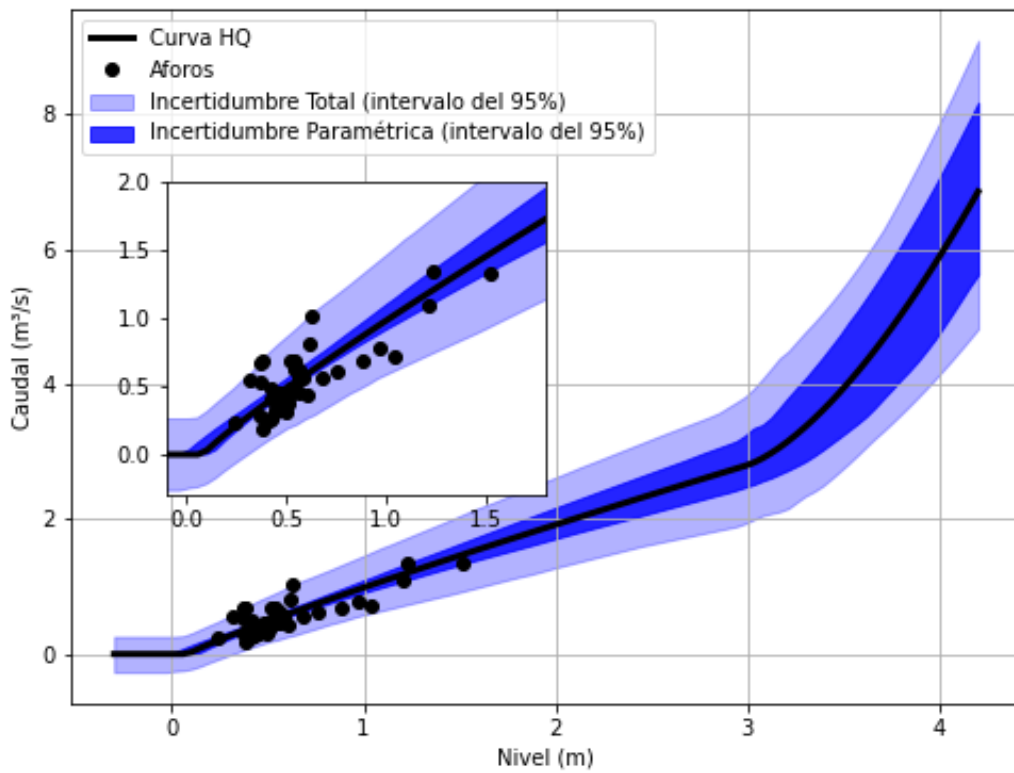


Figura 5.30. Curva HQ de la EM14 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.15 EM15

En esta estación se realizaron 38 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.31. A partir del análisis de los mismos se descartaron 11 aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del Río de la Plata (en este caso los niveles del Río de la Plata generan un efecto de remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM15).

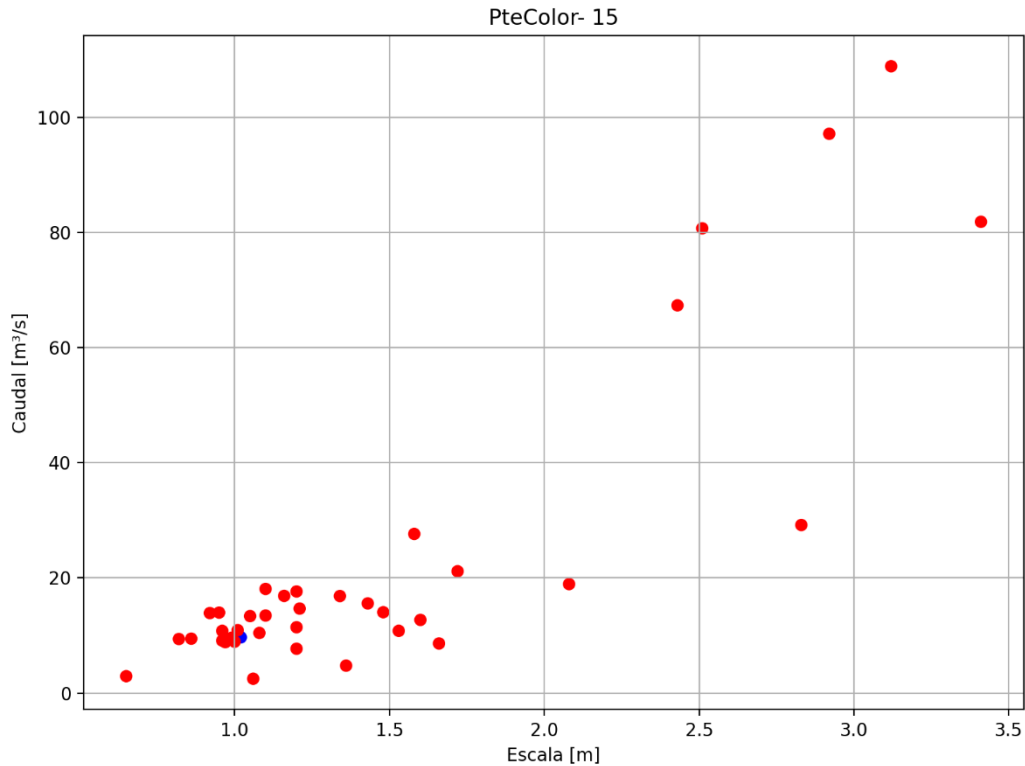


Figura 5.31. Aforos históricos realizados en EM15 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.15) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.32.

$$Q(h) = \begin{cases} 7,36161(h + 0,302583)^{1,67052} & -0,30 \leq h \leq 1,18 \\ 7,36161(h + 0,302583)^{1,67052} + 18,1539(h - 0,1,17732)^{1,66155} & 1,18 \leq h \leq 6,92 \\ 18,1539(h - 0,1,17732)^{1,66155} + 20,5334(h - 2,97909)^{1,66031} & 6,92 \leq h \leq 7,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.15. Curva HQ de la EM15.

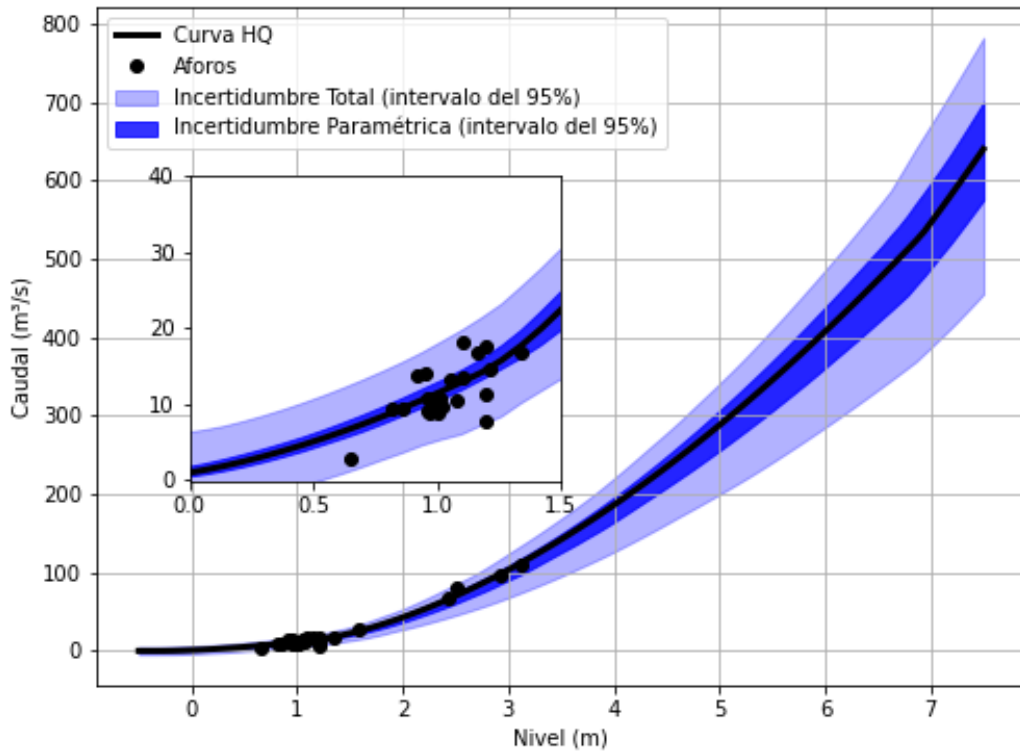


Figura 5.32. Curva HQ de la EM15 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.16 EM16

En esta estación se realizaron 43 aforos (ver Figura 5.33) de los cuales 26 pertenecen a la sección anterior donde se ubicaba la estación (que fueron dejados de lados en este análisis). A partir del análisis de los mismos se descartaron nueve aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica y 1 aforo por presentar un valor poco consistente. Adicionalmente se descartó un aforo pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del Riachuelo (el Riachuelo presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM16) y un aforo por presentar un valor poco consistente.

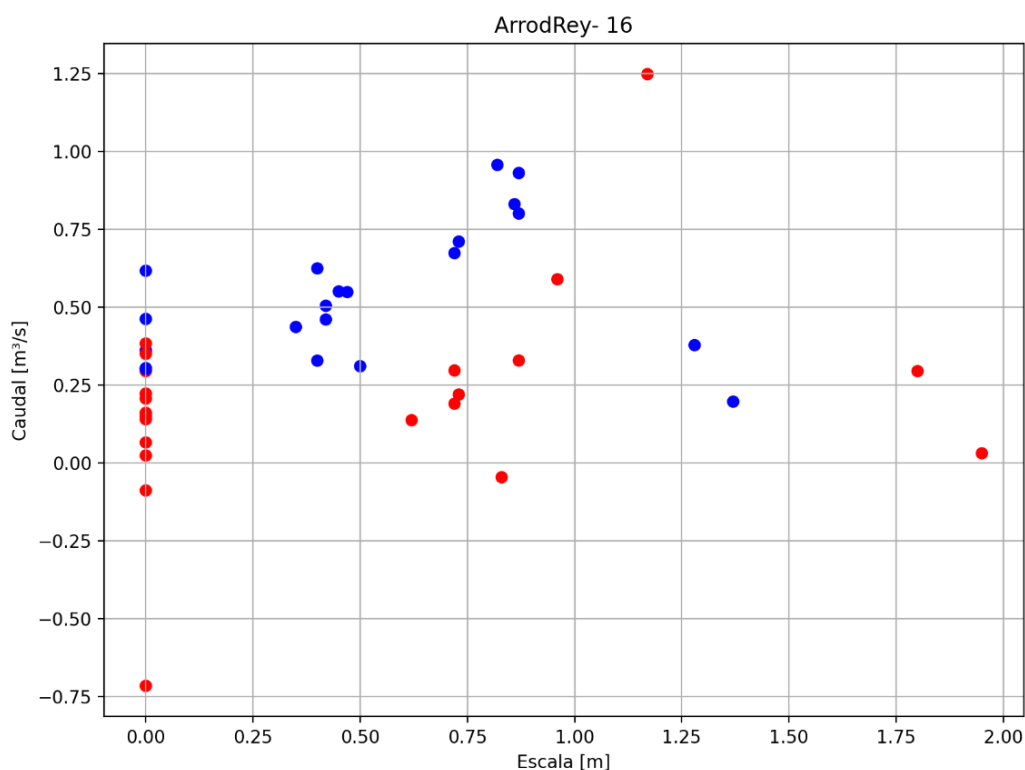


Figura 5.33. Aforos históricos realizados en EM16 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.16) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.34.

$$Q(h) = \left\{ 0,67518(h - 0,08441)^{1,66742} \quad 0,08 \leq h \leq 4,00 \right.$$

Ecuación 5.16. Curva HQ de la EM16.

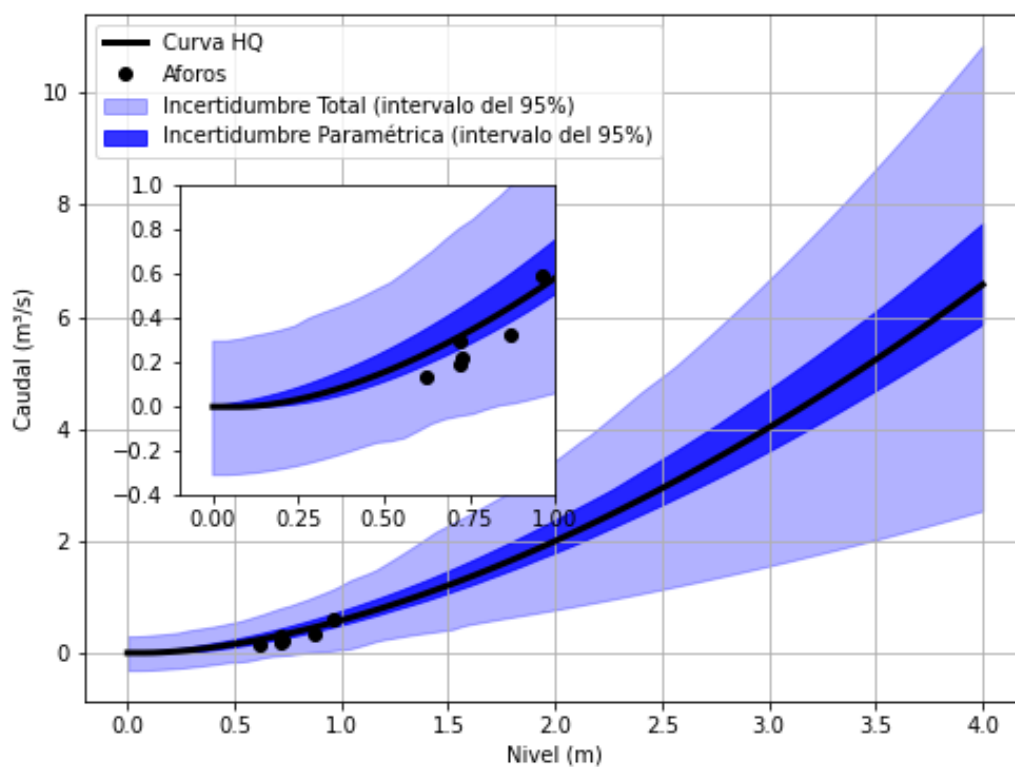


Figura 5.34. Curva HQ de la EM16 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.17 EM32

En esta estación se realizaron 50 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.35. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

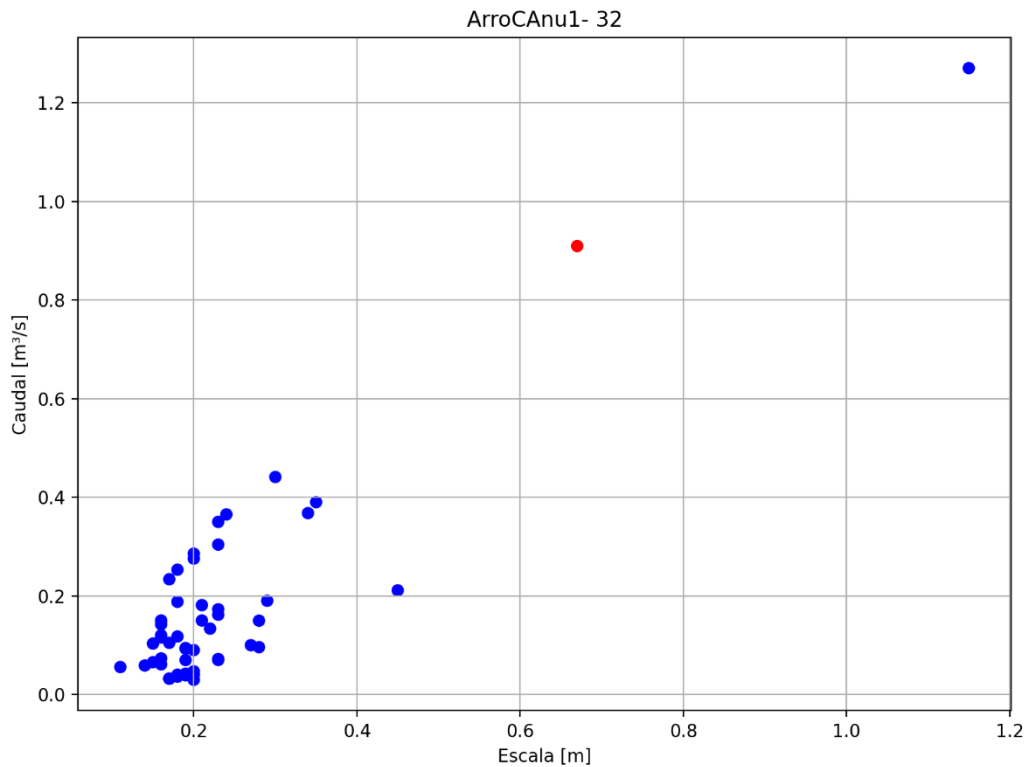


Figura 5.35. Aforos históricos realizados en EM32 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.17) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.36.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,41073(h-0,01253)^{1,69048} & 0,11 \leq h \leq 1,27 \\ 2,41073(h-0,01253)^{1,69048} + 17,49150(h-1,27498)^{1,66851} & 1,27 \leq h \leq 2,20 \end{cases}$$

Ecuación 5.17. Curva HQ de la EM32.

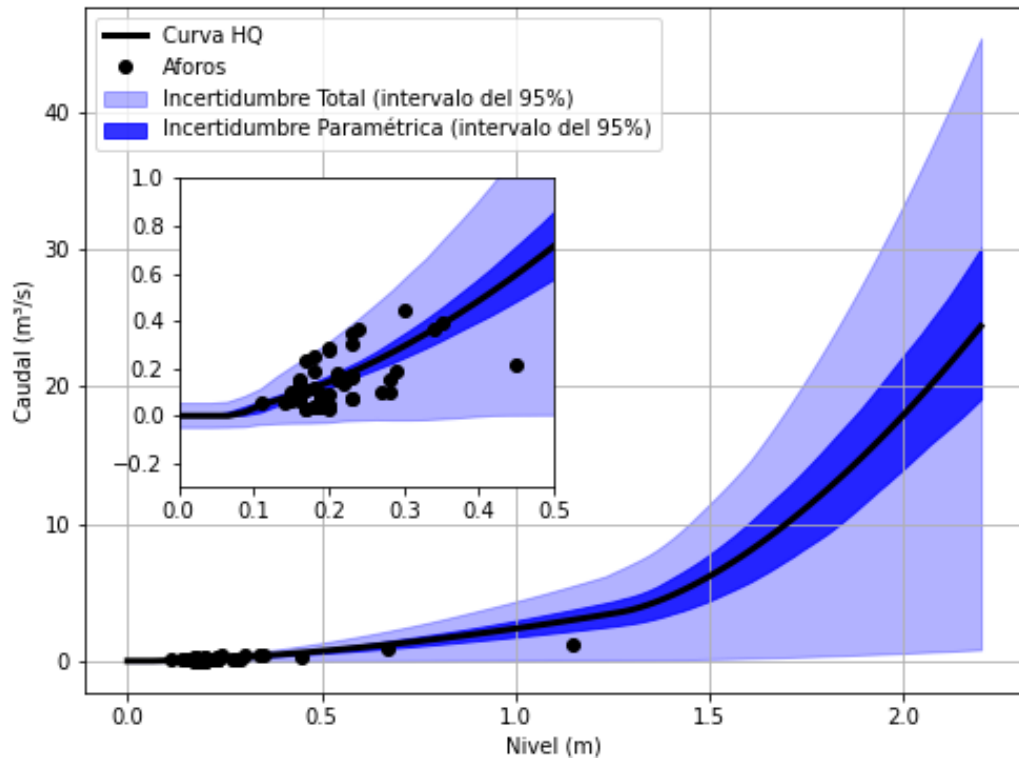


Figura 5.36. Curva HQ de la EM32 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.18 EM33

En esta estación se realizaron 49 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.37. En el año 2015 hubo un cambio en el tramo 1 de la escala hidrométrica de la estación de monitoreo, razón por la cual se descartaron todos los aforos previos a ese año (en total fueron 20 mediciones). Adicionalmente se descartó un aforo pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del A° Cañuelas (el A° Cañuelas presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM33).

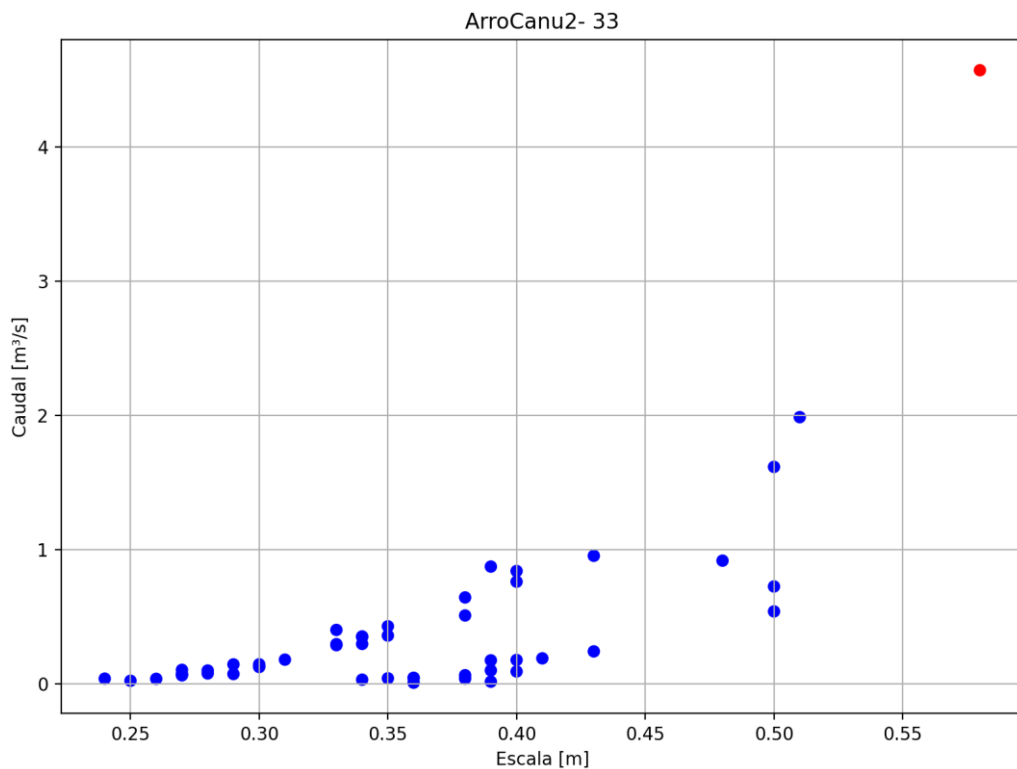


Figura 5.37. Aforos históricos realizados en EM33 con ADCP (círculo rojo) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.18) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.38.

$$Q(h) = \begin{cases} 10,68480(h-0,23624)^{1,50950} & 0,24 \leq h \leq 0,48 \\ 10,68480(h-0,23624)^{1,50950} + 57,27600(h-0,47503)^{1,51169} & 0,48 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.18. Curva HQ de la EM33.

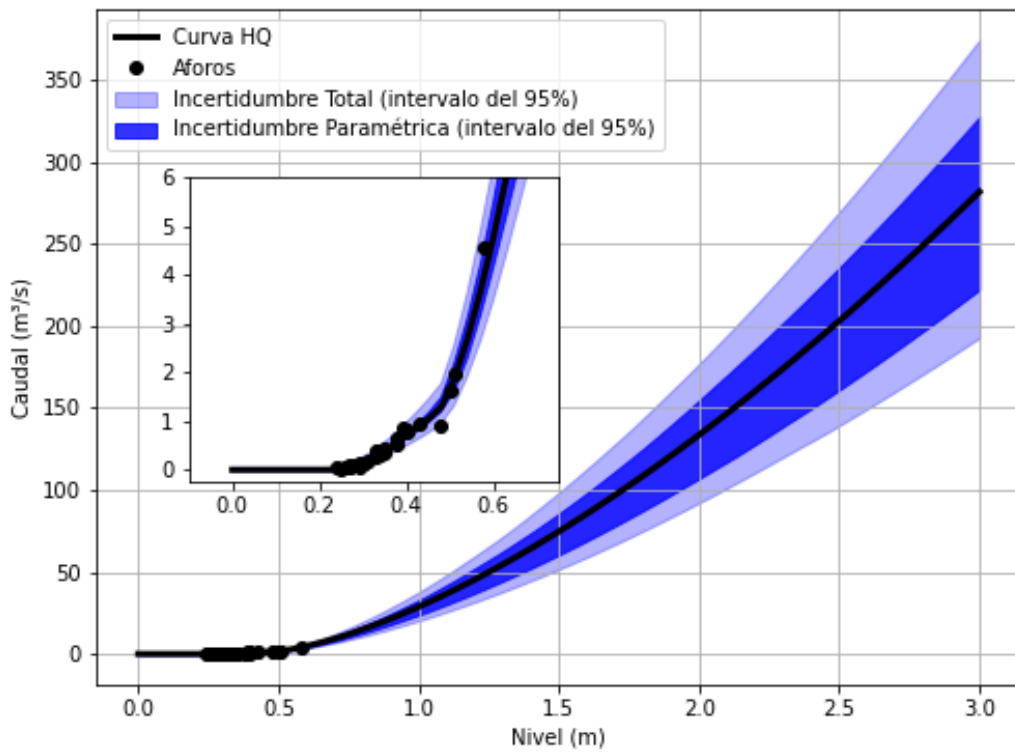


Figura 5.38. Curva HQ de la EM33 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.19 EM34

En esta estación se realizaron 37 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.39. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

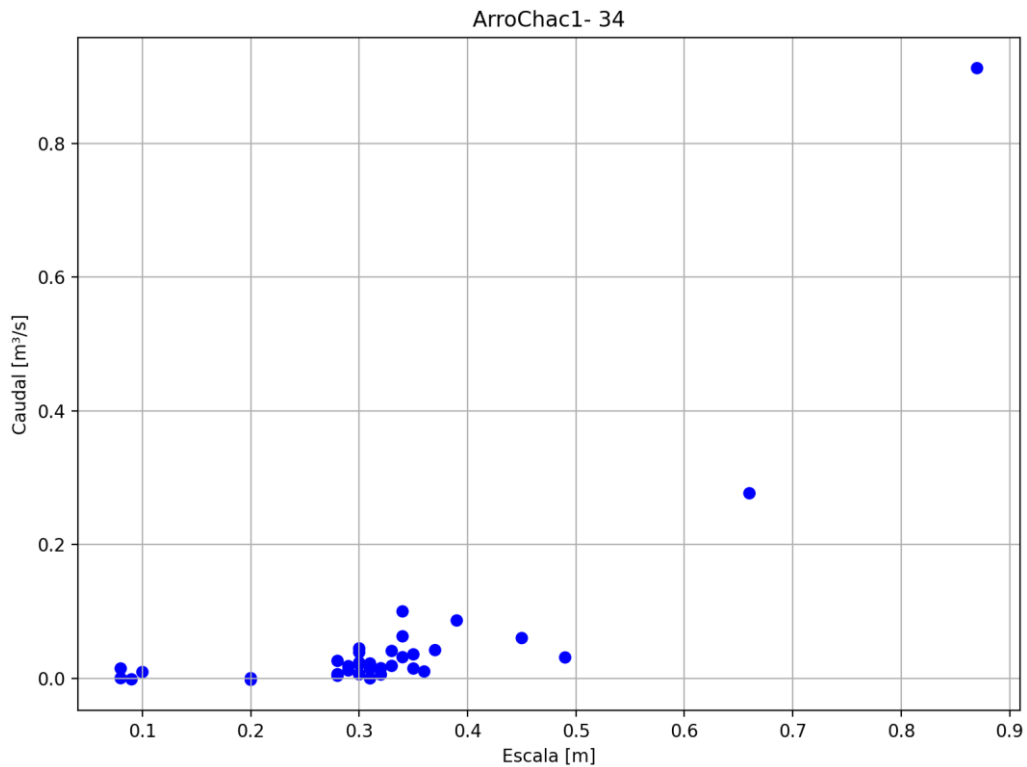


Figura 5.39. Aforos históricos realizados en EM34 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.19) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.40.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,00066(h + 0,09959)^{1,52054} & -0,10 \leq h \leq 0,23 \\ 0,00066(h + 0,09959)^{1,52054} + 1,89052(h - 0,23311)^{1,69779} & 0,23 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.19. Curva HQ de la EM34.

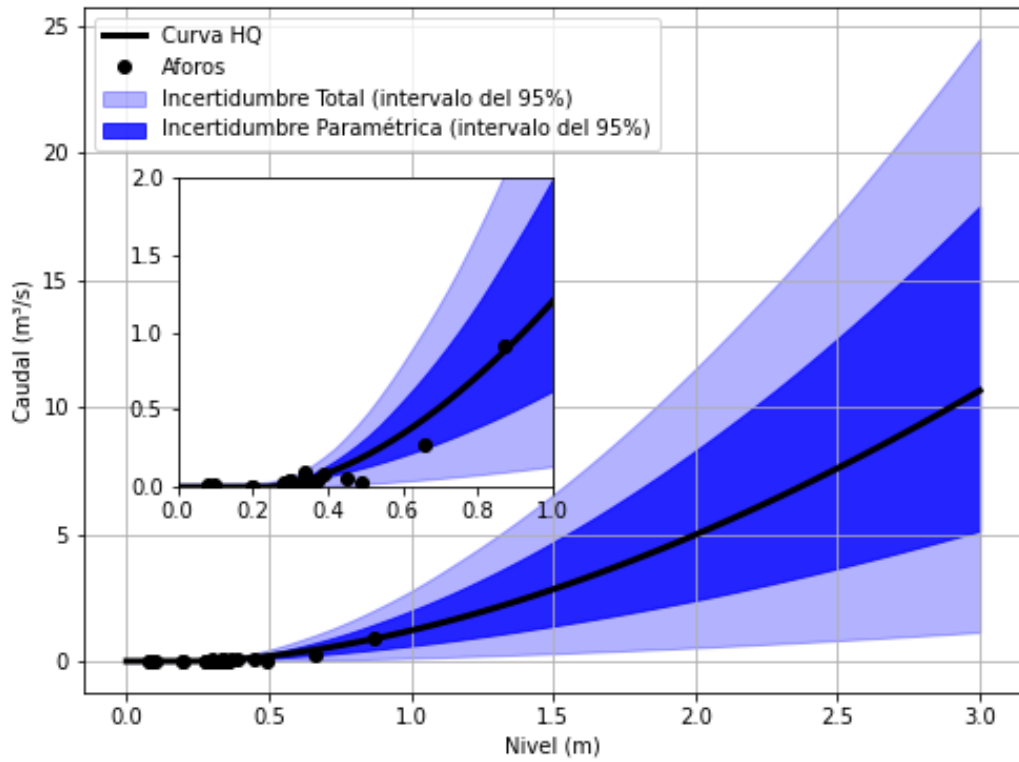


Figura 5.40. Curva HQ de la EM34 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.20 EM35

En esta estación se realizaron 39 aforos (ver Figura 5.41). A partir del análisis de los mismos se descartó un aforo por no tener asociado el nivel registrado en la regla hidrométrica.

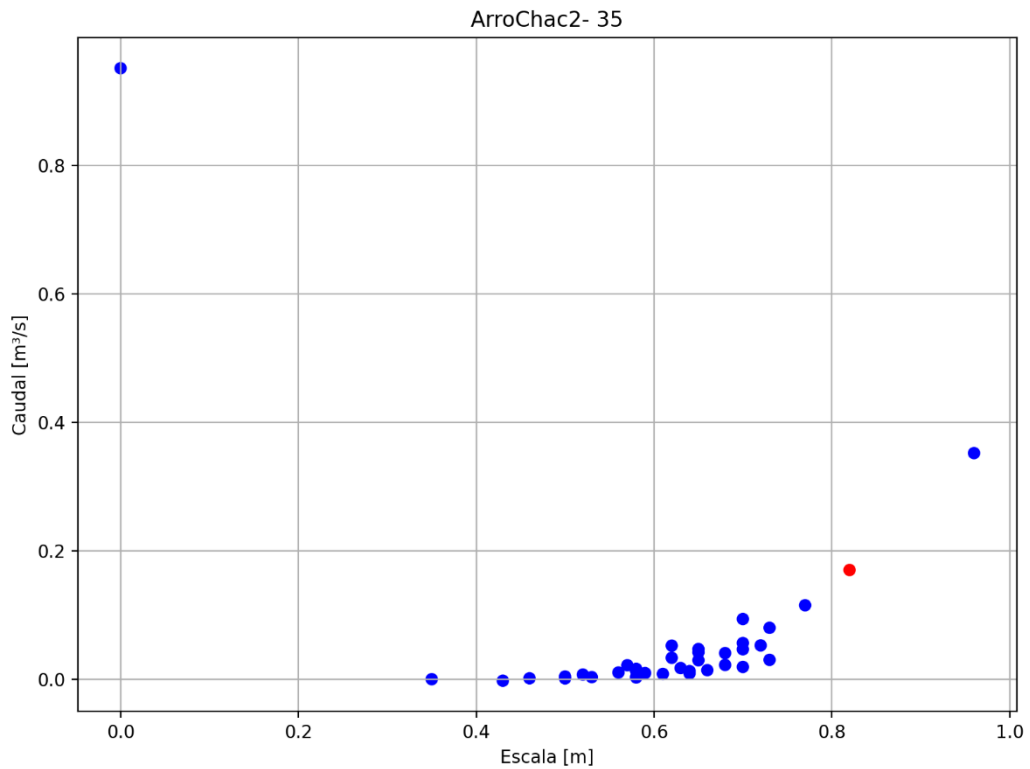


Figura 5.41. Aforos históricos realizados en EM35 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.20) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.42.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,00649(h + 0,00309)^{1,49640} & 0,00 \leq h \leq 0,52 \\ 0,00649(h + 0,00309)^{1,49640} + 1,06790(h - 0,49289)^{1,69775} & 0,52 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.20. Curva HQ de la EM35.

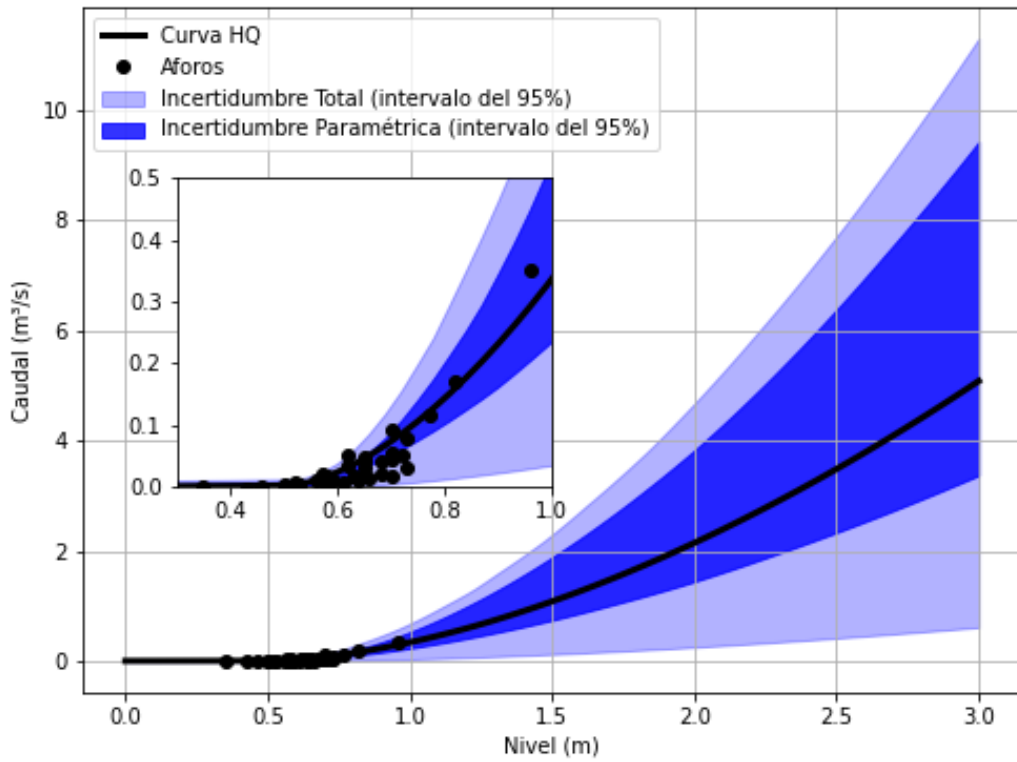


Figura 5.42. Curva HQ de la EM35 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.21 EM36

En esta estación se realizaron 47 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.43. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

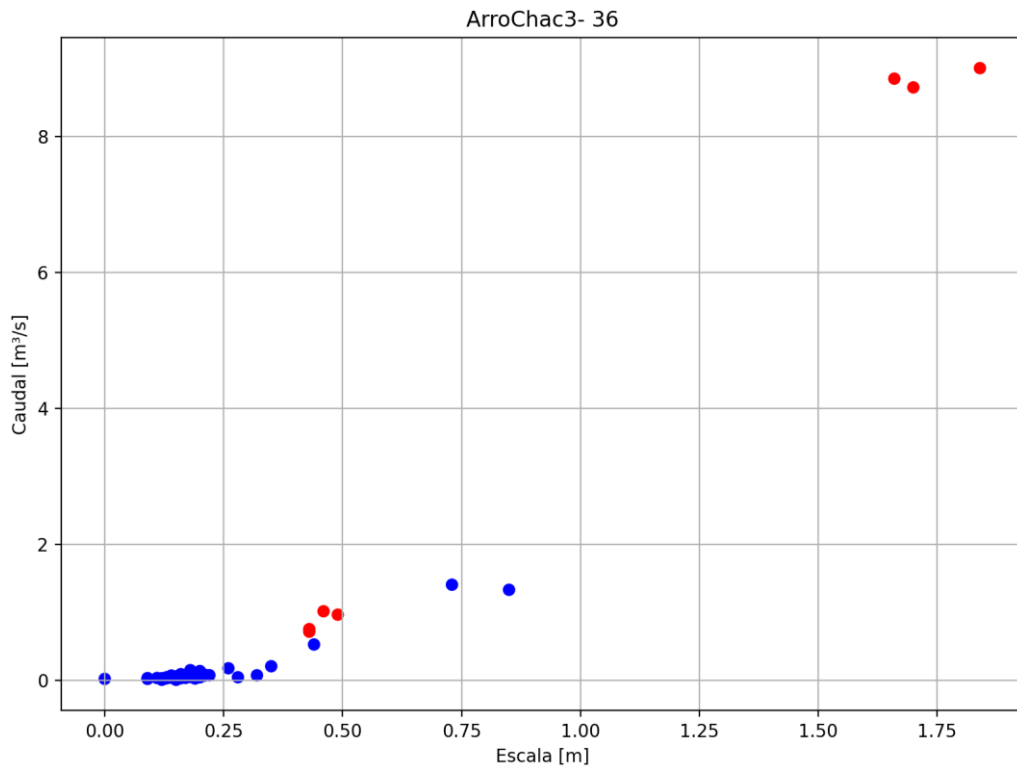


Figura 5.43. Aforos históricos realizados en EM36 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.21) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.44.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,9269(h - 0,10646)^{1,50974} & 0,11 \leq h \leq 0,36 \\ 0,882489(h + 0,44676)^{0,882489} & 0,36 \leq h \leq 1,68 \\ 11,4179(h - 0,94948)^{1,67359} & 1,68 \leq h \leq 2,80 \end{cases}$$

Ecuación 5.21. Curva HQ de la EM36.

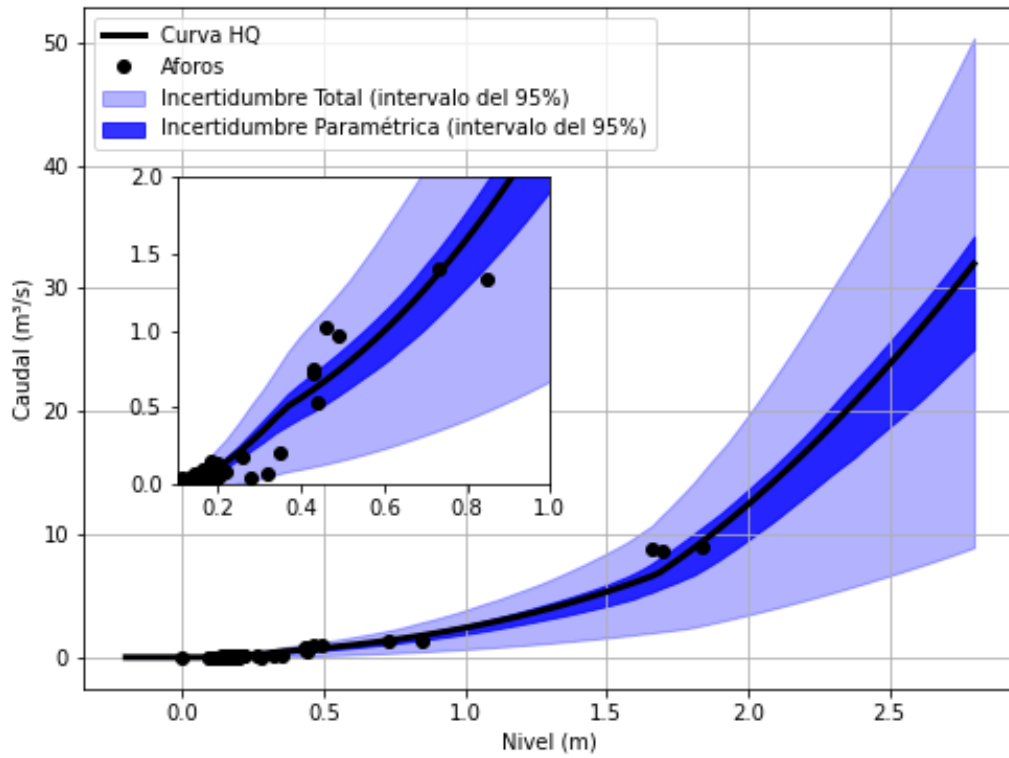


Figura 5.44. Curva HQ de la EM36 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.22 EM37

En esta estación se realizaron 56 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.45. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

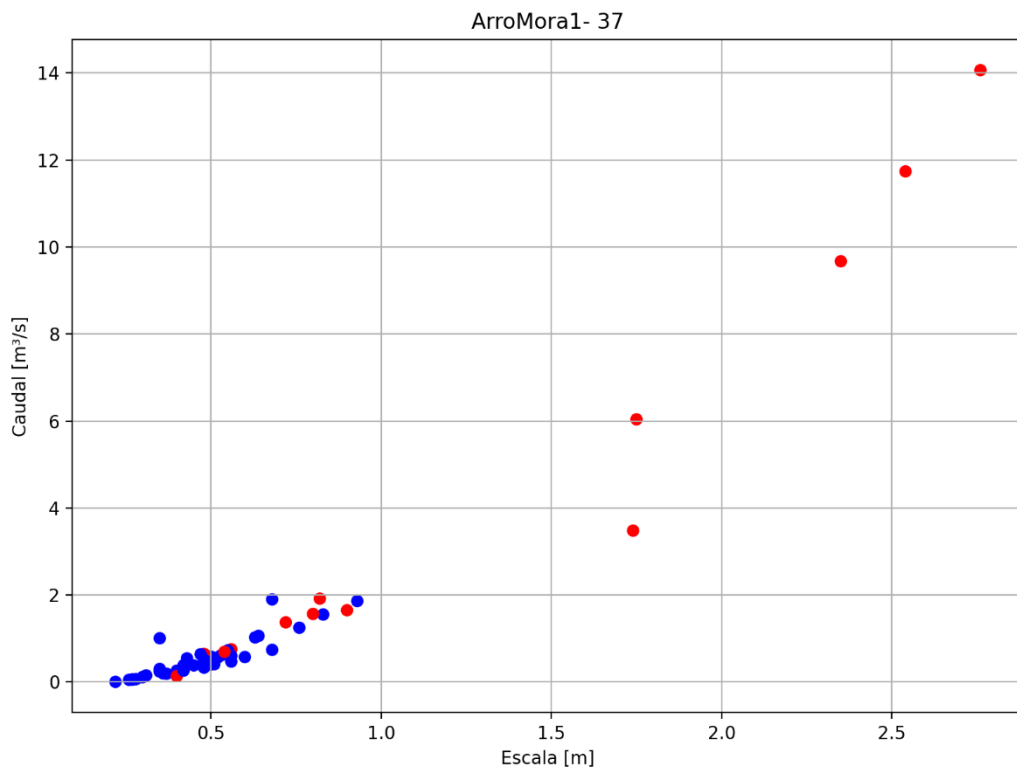


Figura 5.45. Aforos históricos realizados en EM37 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.22) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.46.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,15719(h-0,04748)^{1,67308} & 0,09 \leq h \leq 2,15 \\ 2,15719(h-0,04748)^{1,67308} + 28,71450(h-2,15575)^{1,66825} & 2,15 \leq h \leq 3,20 \end{cases}$$

Ecuación 5.22. Curva HQ de la EM37.

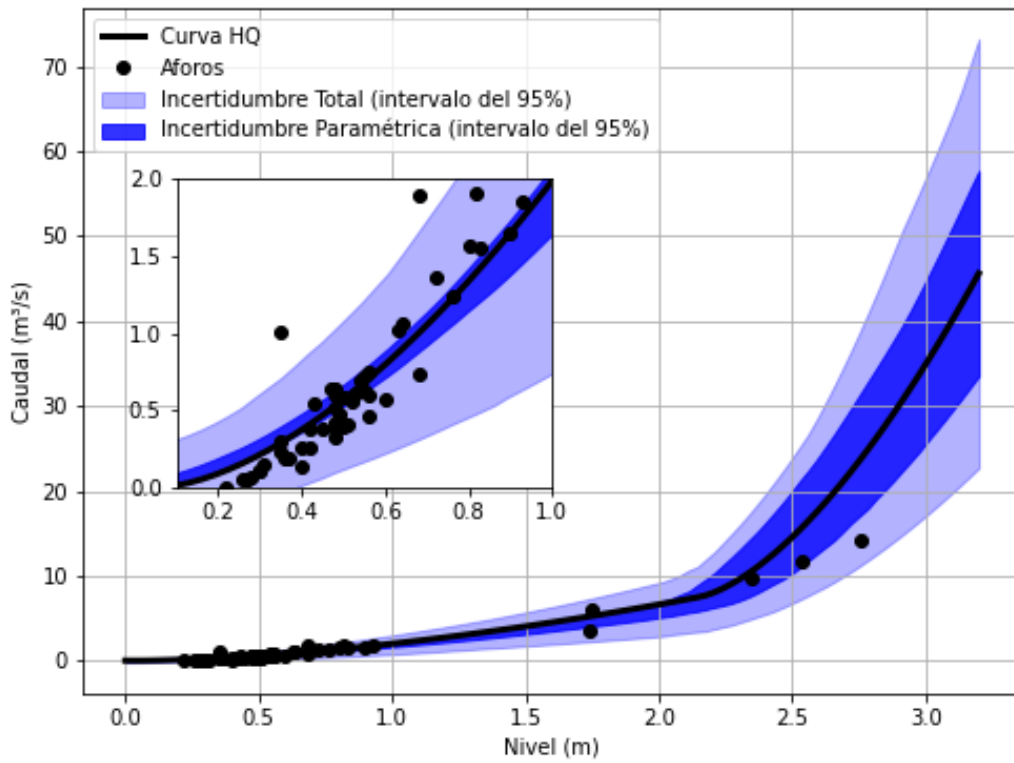


Figura 5.46. Curva HQ de la EM37 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.23 EM38

En esta estación se realizaron 54 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.47. A partir del análisis de los mismos se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

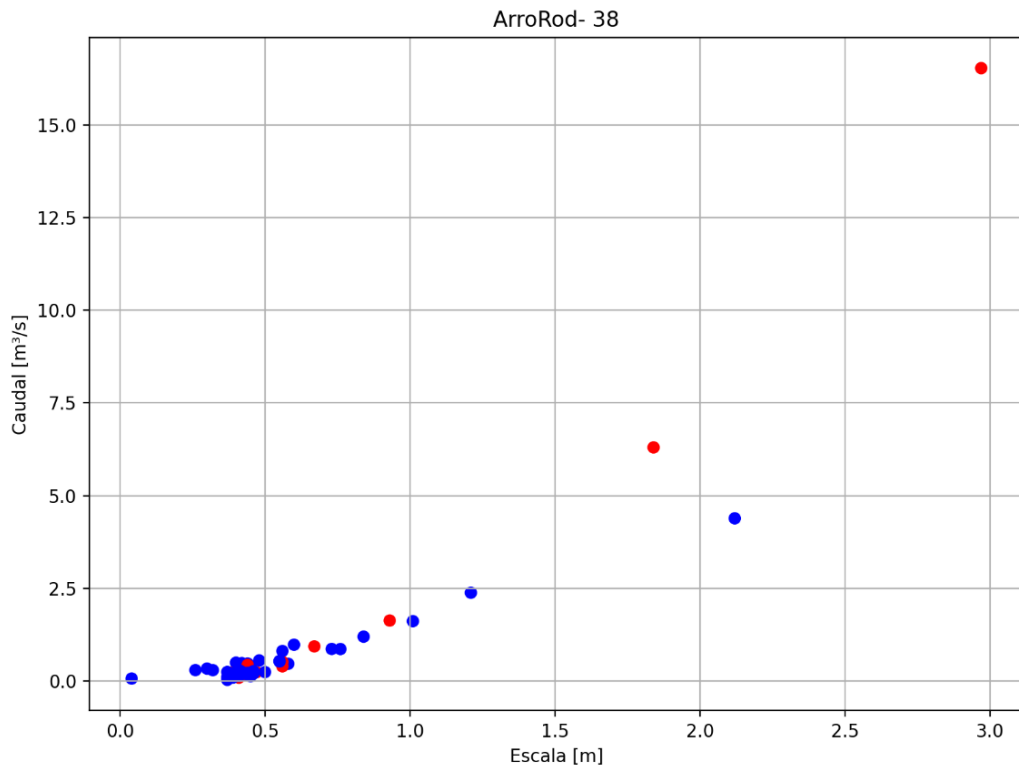


Figura 5.47. Aforos históricos realizados en EM38 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.23) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.48.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,81637(h+0,09927)^{1,42248} & -0,10 \leq h \leq 0,68 \\ 3,41886(h-0,33921)^{1,66665} & 0,68 \leq h \leq 3,03 \\ 3,41886(h-0,33921)^{1,66665} + 5,32995(h-3,03297)^{1,67053} & 3,03 \leq h \leq 3,40 \end{cases}$$

Ecuación 5.23. Curva HQ de la EM38.

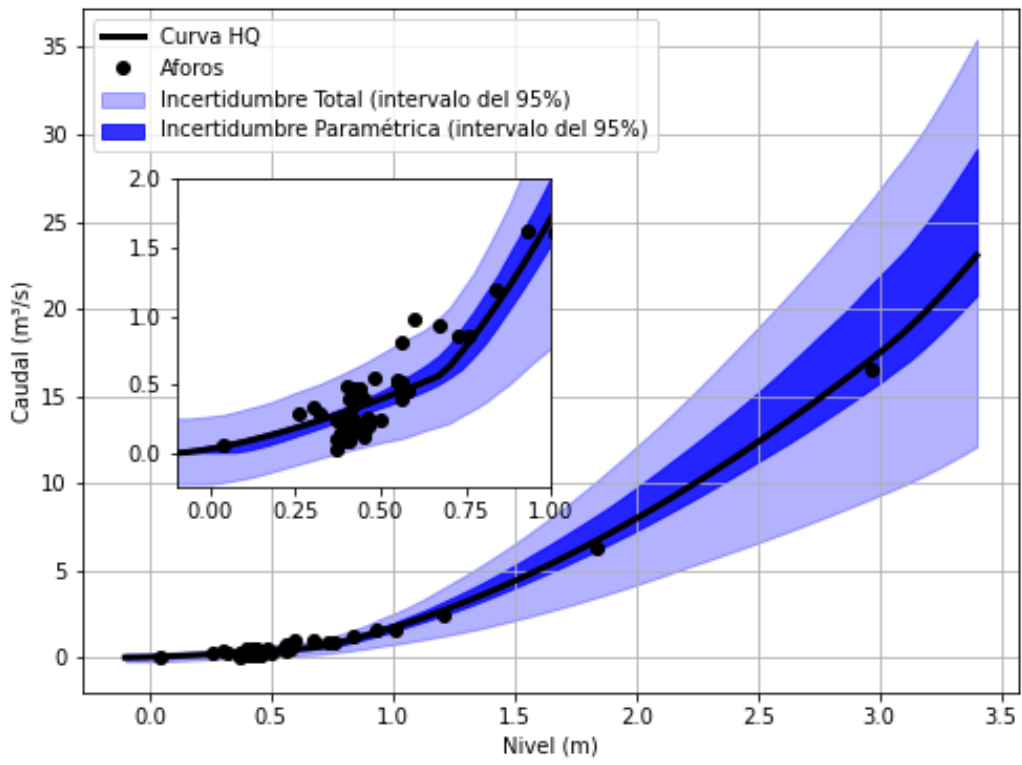


Figura 5.48. Curva HQ de la EM38 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.24 EM39

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.49. En el año 2015 hubo un cambio en el tramo 1 de la escala hidrométrica de la estación de monitoreo, razón por la cual se descartaron todos los aforos previos a ese año (en total fueron 24 mediciones). Además se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

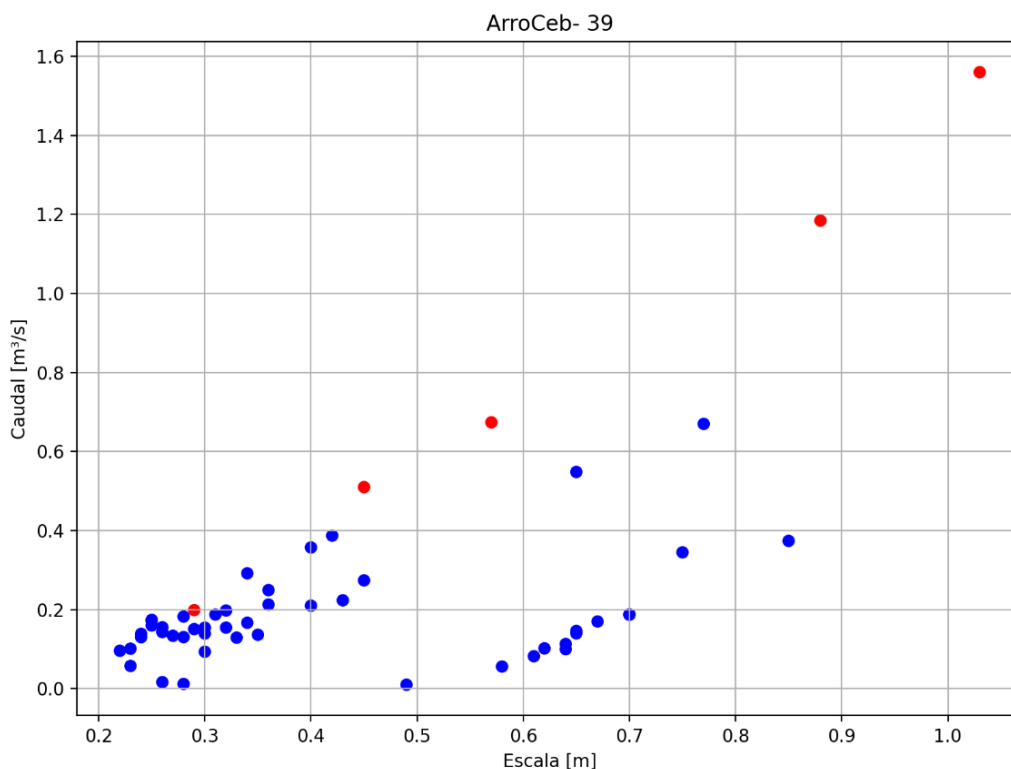


Figura 5.49. Aforos históricos realizados en EM39 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.24) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.50.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,61140(h - 0,03908)^{1,67401} & 0,04 \leq h \leq 1,01 \\ 1,61140(h - 0,03908)^{1,67401} + 5,67415(h - 1,01466)^{1,68247} & 1,01 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.24. Curva HQ de la EM39.

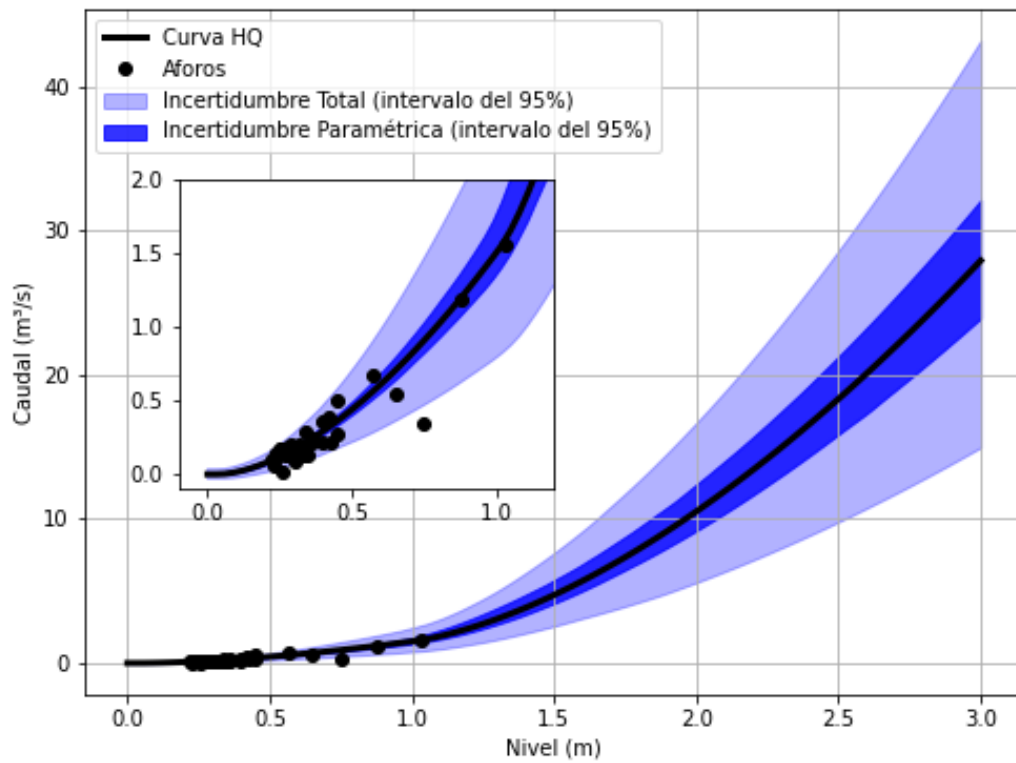


Figura 5.50. Curva HQ de la EM39 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.25 EM40

En esta estación se realizaron 39 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.51. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

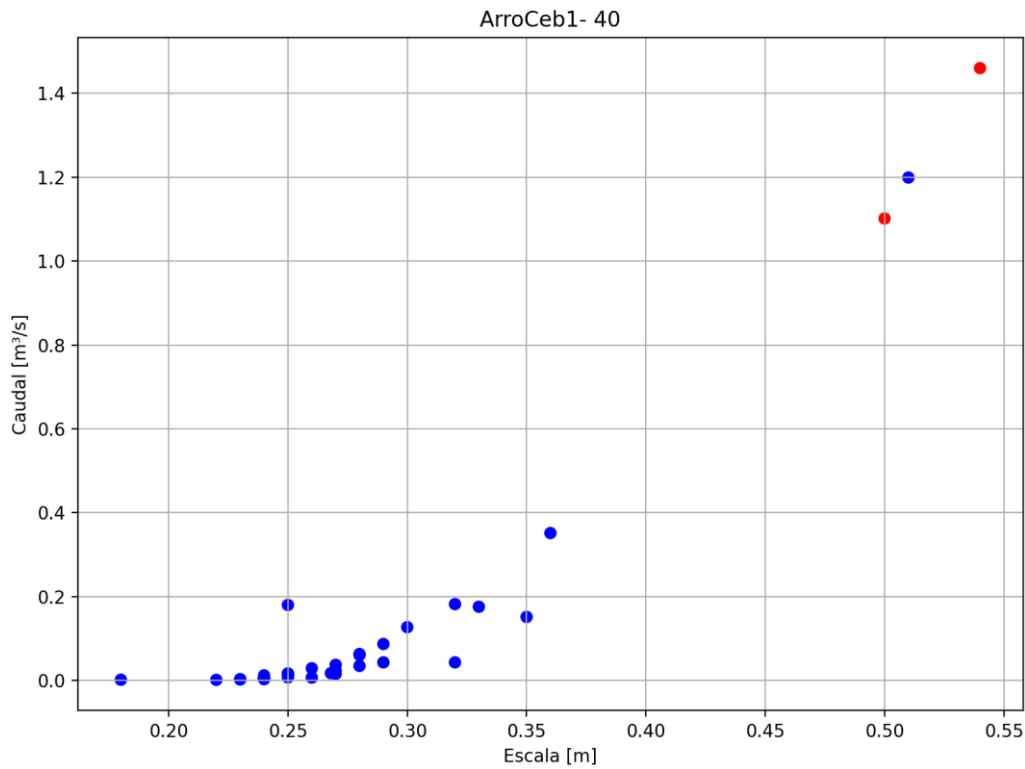


Figura 5.51. Aforos históricos realizados en EM40 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.25) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.52.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,62592(h-0,21179)^{1,50433} & 0,21 \leq h \leq 0,32 \\ 11,32020(h-0,25004)^{1,67269} & 0,32 \leq h \leq 2,30 \end{cases}$$

Ecuación 5.25. Curva HQ de la EM40.

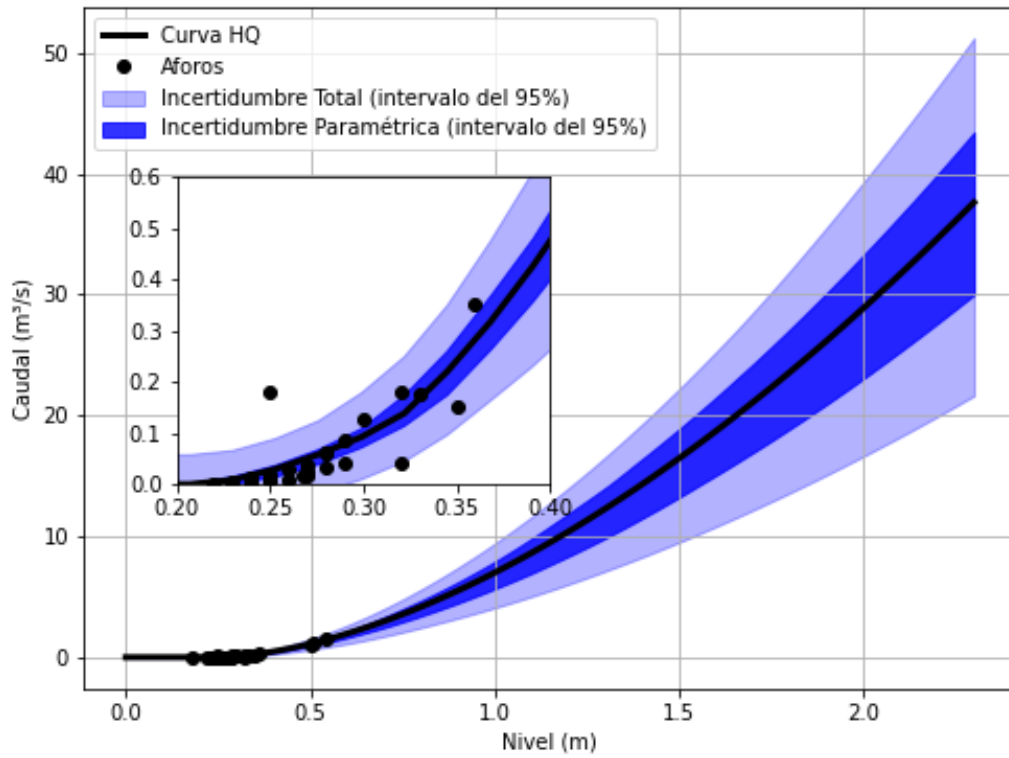


Figura 5.52. Curva HQ de la EM40 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.26 EM41

En esta estación se realizaron 46 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.53. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos por presentar valores poco consistentes.

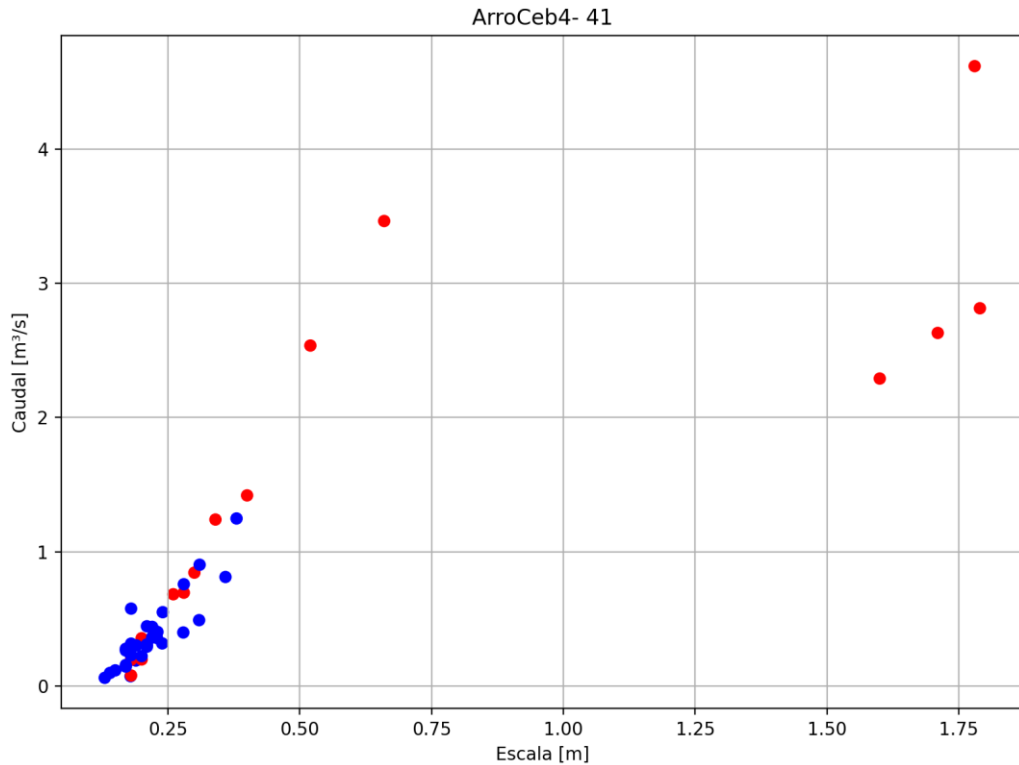


Figura 5.53. Aforos históricos realizados en EM41 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.26) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.54.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,61879(h+0,06593)^{1,69522} & -0,07 \leq h \leq 0,20 \\ 7,61791(h-0,06191)^{1,66266} & 0,20 \leq h \leq 2,44 \\ 7,61791(h-0,06191)^{1,66266} + 18,62170(h-2,43586)^{1,67786} & 2,44 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.26. Curva HQ de la EM41.

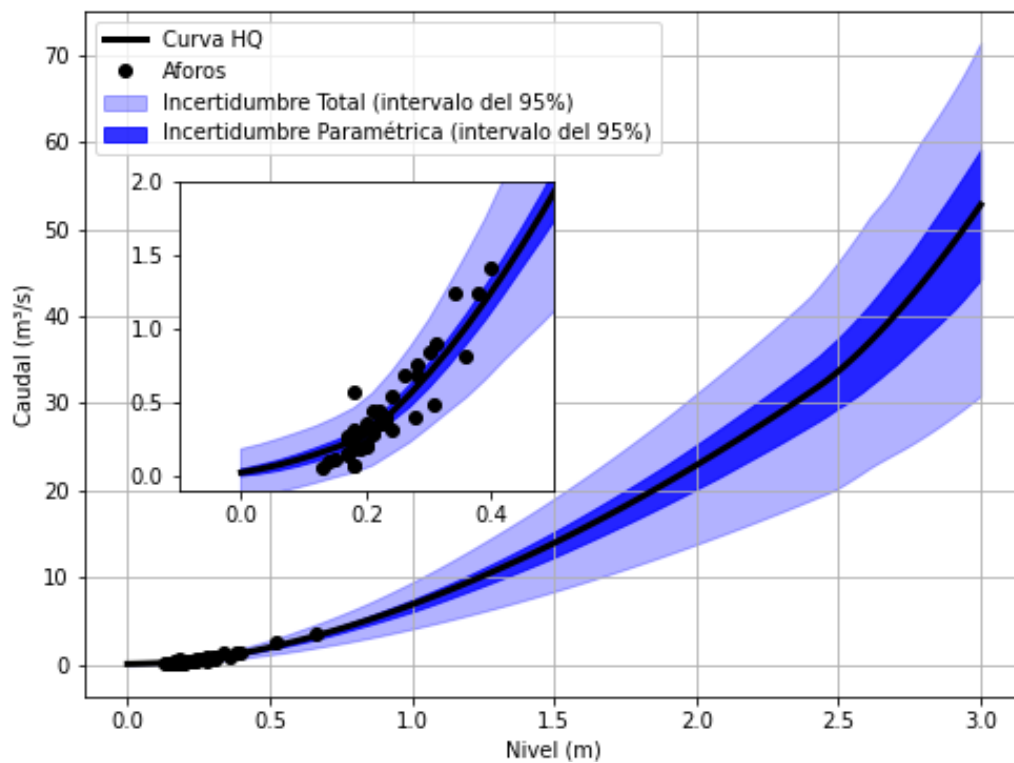


Figura 5.54. Curva HQ de la EM41 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.27 EM42

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.55. A partir del análisis de los mismos no hubo aforos descartados.

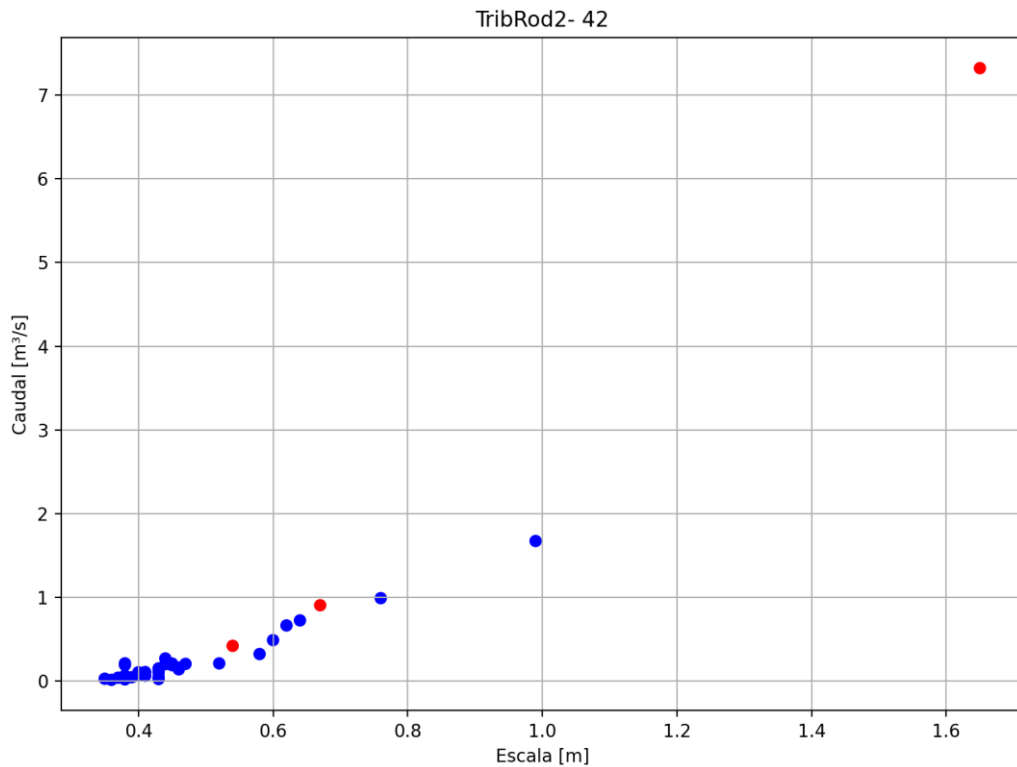


Figura 5.55. Aforos históricos realizados en EM42 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.27) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.56.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,64356(h - 0,293758)^{1,65939} & 0,29 \leq h \leq 1,28 \\ 3,64356(h - 0,293758)^{1,65939} + 9,38301(h - 1,28093)^{1,66844} & 1,28 \leq h \leq 2,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.27. Curva HQ de la EM42.

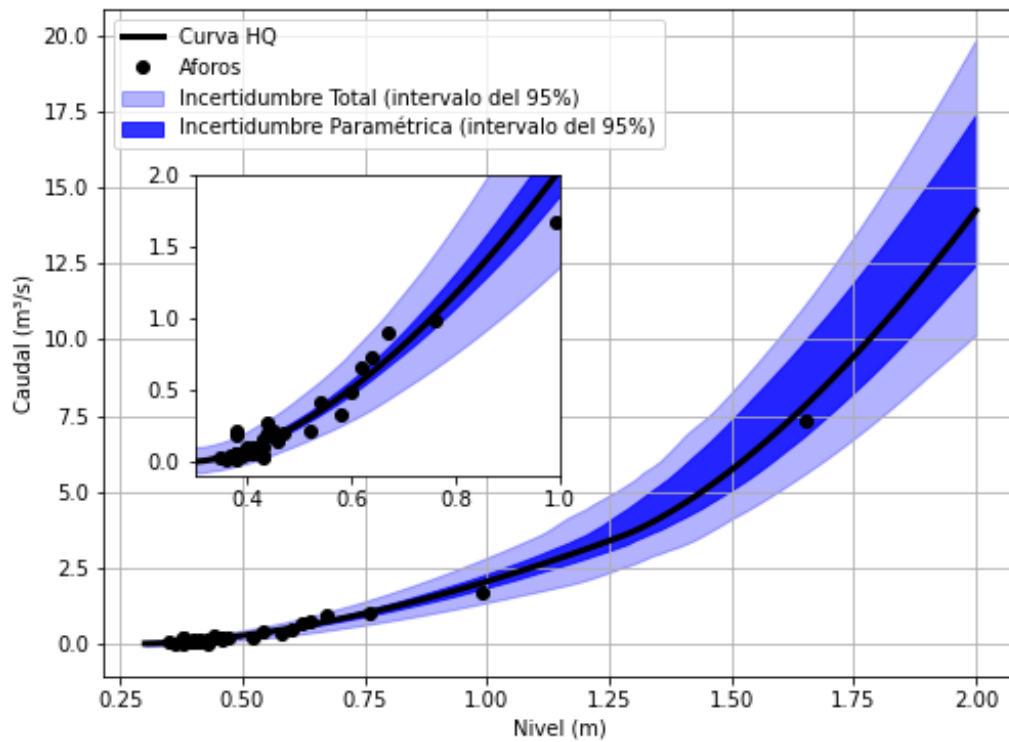


Figura 5.56. Curva HQ de la EM42 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.28 EM43

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.57. A partir del análisis de los mismos no hubo aforos descartados.

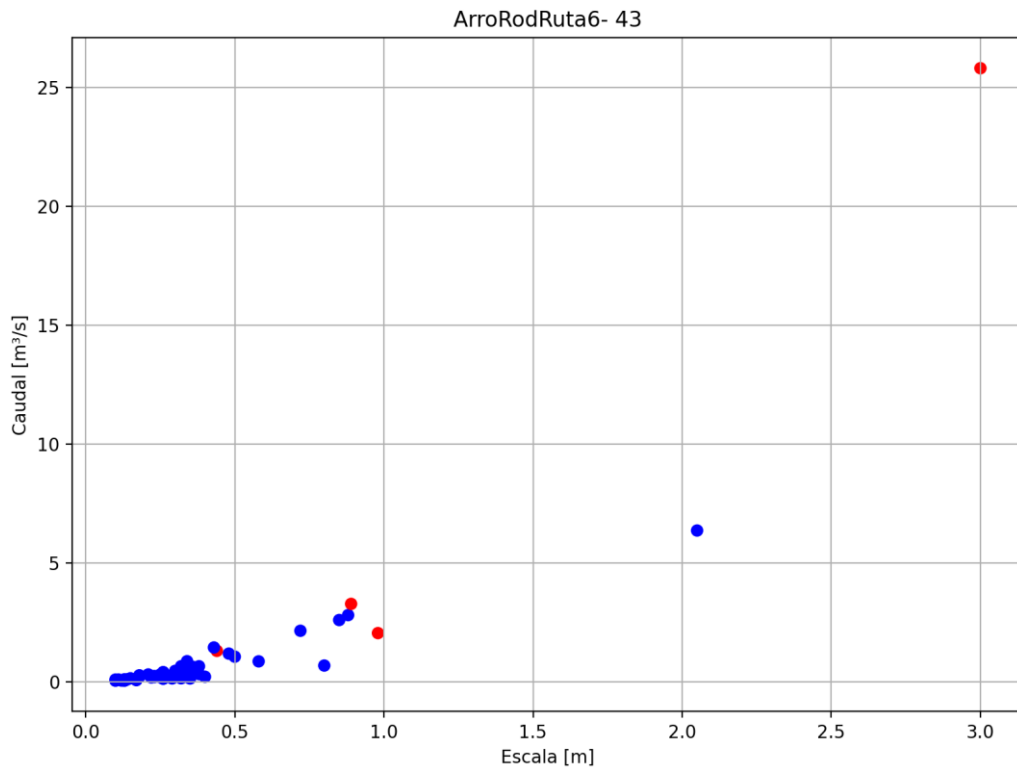


Figura 5.57. Aforos históricos realizados en EM43 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.28) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.58.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,926(h - 0,0014098)^{1,66879} & 0,00 \leq h \leq 2,05 \\ 2,926(h - 0,0014098)^{1,66879} + 8,54141(h - 2,04643)^{1,66613} & 2,05 \leq h \leq 3,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.28. Curva HQ de la EM43.

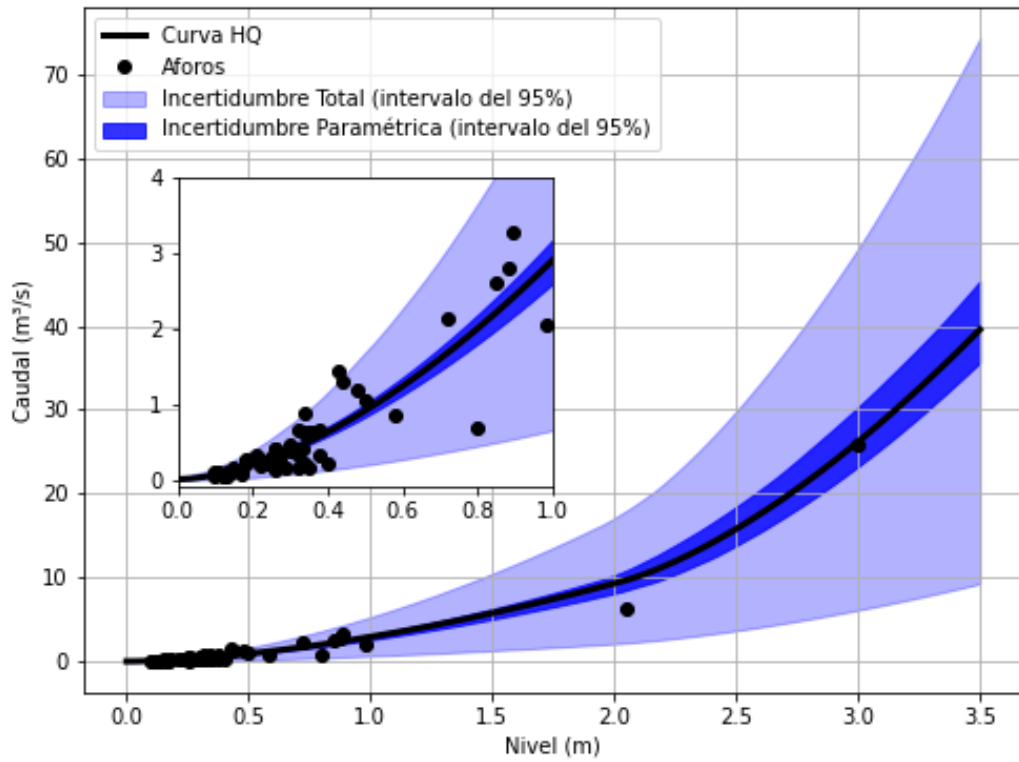


Figura 5.58. Curva HQ de la EM43 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.29 EM44

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.59). A partir del análisis de los mismos se descartaron 14 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

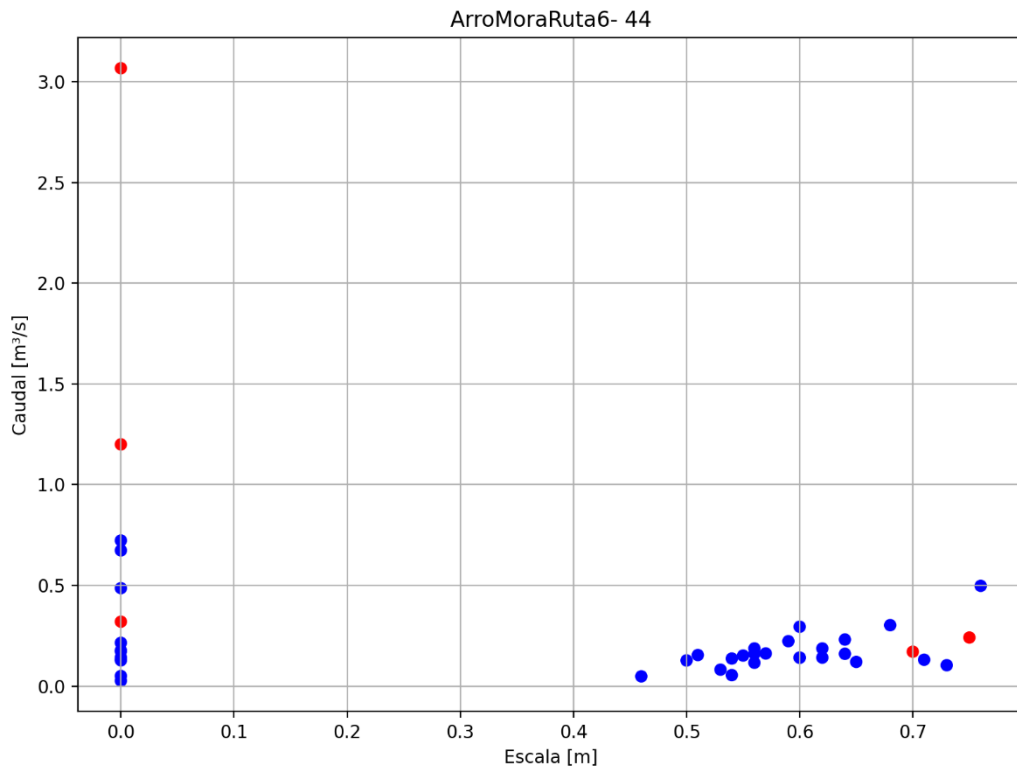


Figura 5.59. Aforos históricos realizados en EM44 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.29) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.60.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,16264(h + 0,41112)^{1,67813} & 0,11 \leq h \leq 0,70 \\ 0,16264(h + 0,41112)^{1,67813} + 20,69340(h - 0,70239)^{1,67288} & 0,70 \leq h \leq 1,65 \end{cases}$$

Ecuación 5.29. Curva HQ de la EM44.

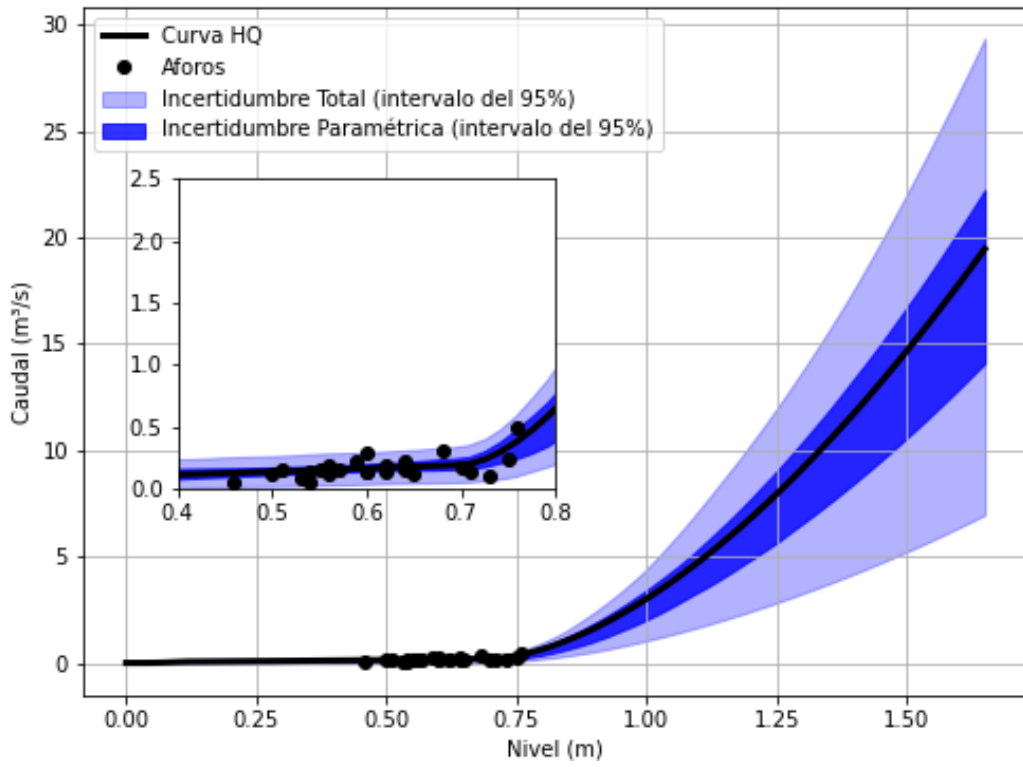


Figura 5.60. Curva HQ de la EM44 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.30 EM45

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.61). A partir del análisis de los mismos se descartaron 14 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

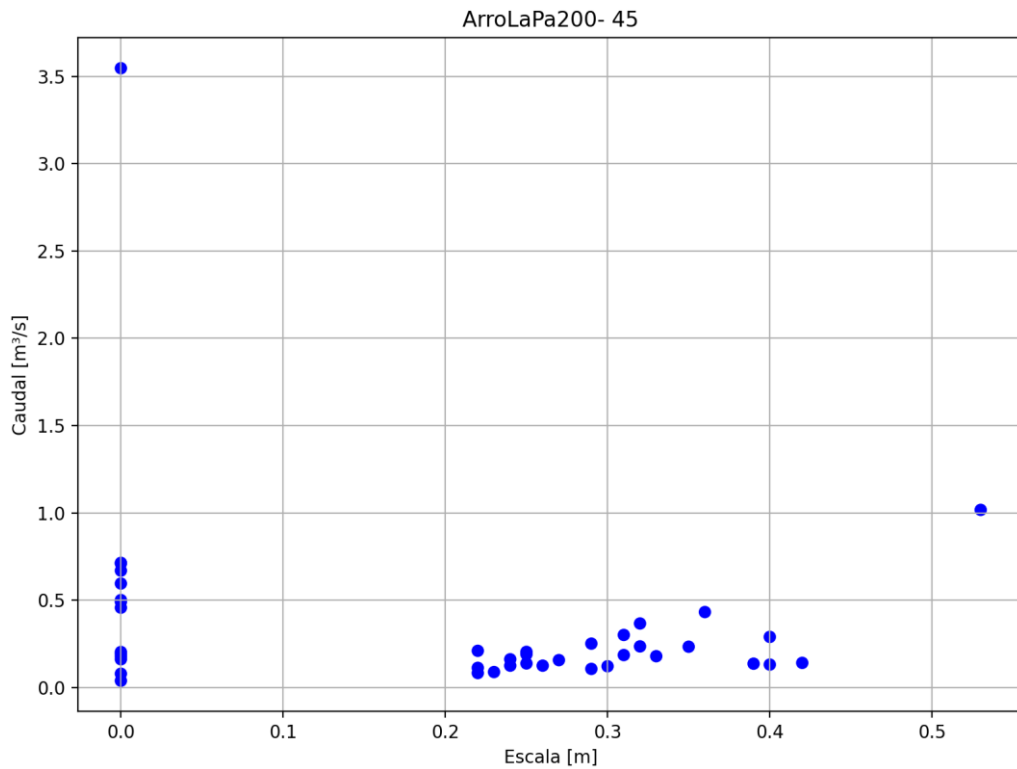


Figura 5.61. Aforos históricos realizados en EM45 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.30) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.62.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,49970(h - 0,06264)^{1,66861} & 0,06 \leq h \leq 0,31 \\ 2,49970(h - 0,06264)^{1,66861} + 11,73440(h - 0,30531)^{1,67107} & 0,31 \leq h \leq 3,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.30. Curva HQ de la EM45.

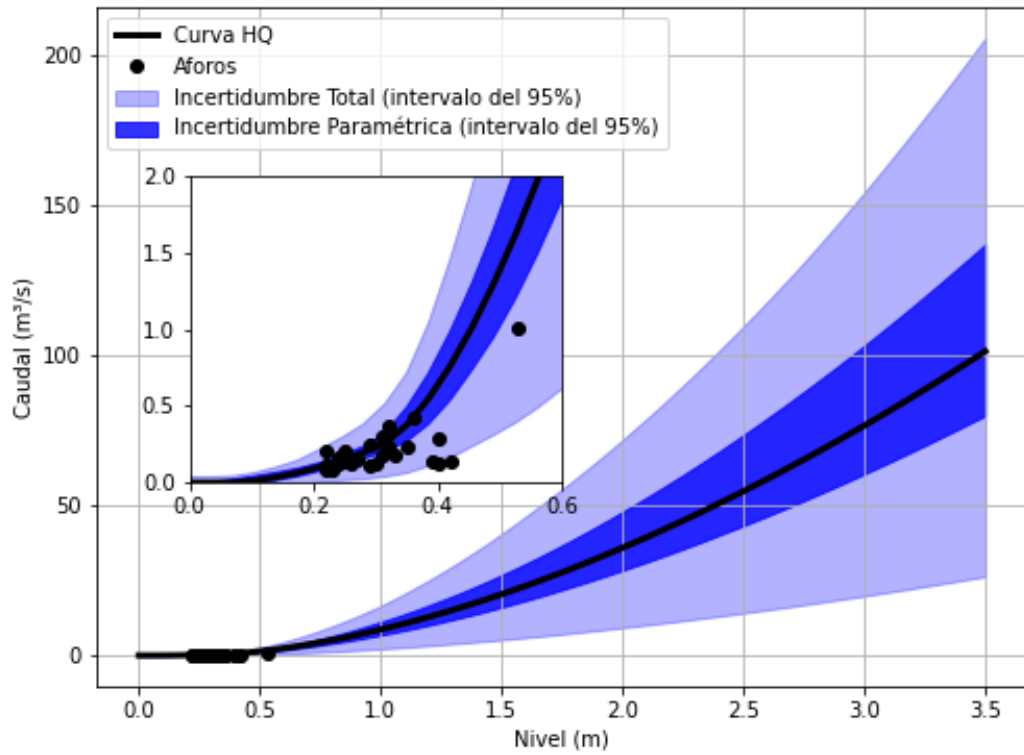


Figura 5.62. Curva HQ de la EM45 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.31 EM46

En esta estación se realizaron 53 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.63. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

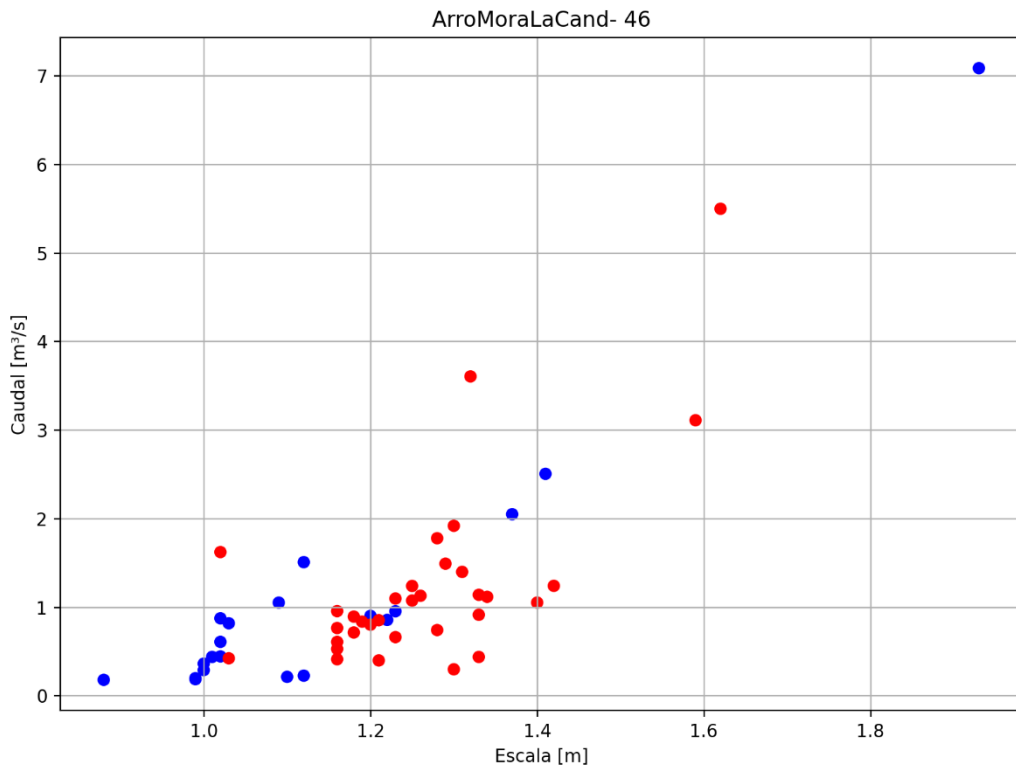


Figura 5.63. Aforos históricos realizados en EM46 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.31) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.64.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,02757(h + 0,01189)^{1,50269} & -0,01 \leq h \leq 0,80 \\ 4,13982(h - 0,76048)^{1,67782} & 0,80 \leq h \leq 2,80 \end{cases}$$

Ecuación 5.31. Curva HQ de la EM46.

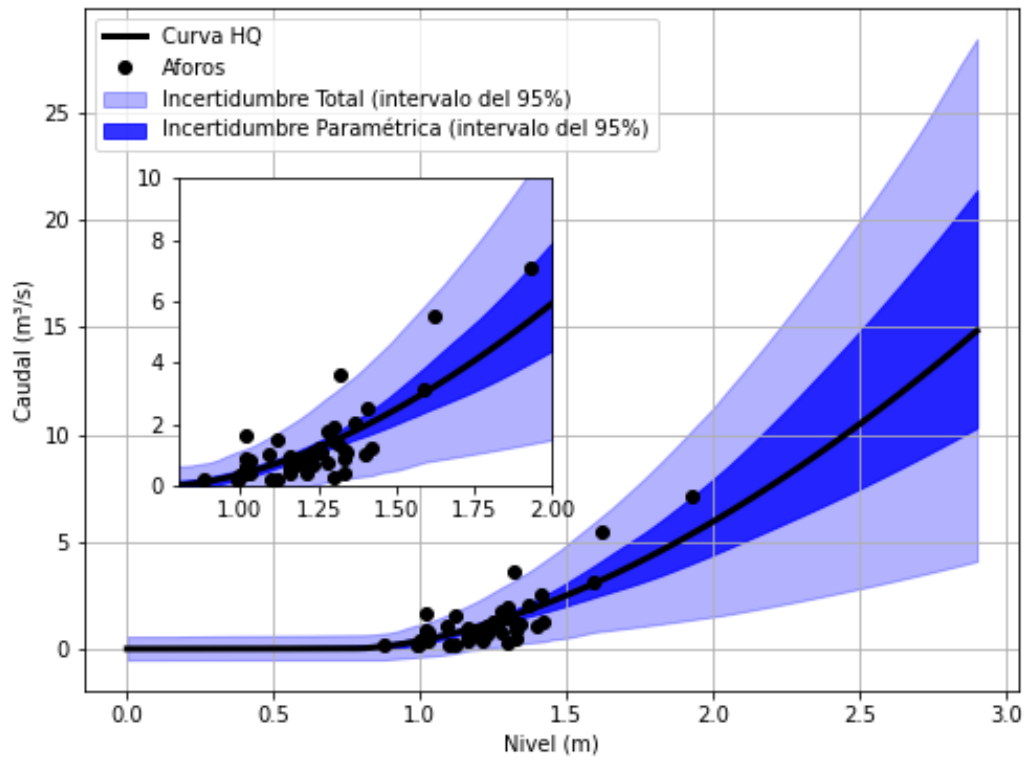


Figura 5.64. Curva HQ de la EM46 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.32 EM47

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.65) A partir del análisis de los mismos se descartaron 27 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartó un aforo pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM47).

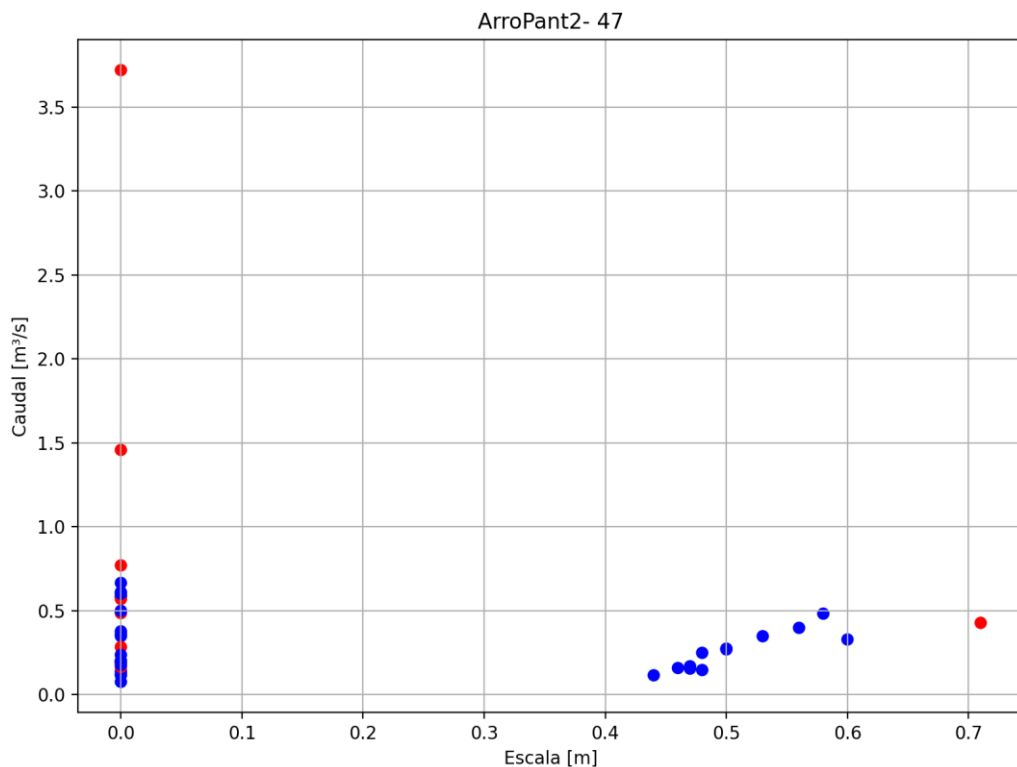


Figura 5.65. Aforos históricos realizados en EM47 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.32) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.66.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,62477(h-0,18567)^{1,67349} & 0,19 \leq h \leq 0,79 \\ 1,62477(h-0,18567)^{1,67349} + 11,85840(h-0,78655)^{1,67421} & 0,79 \leq h \leq 2,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.32. Curva HQ de la EM47.

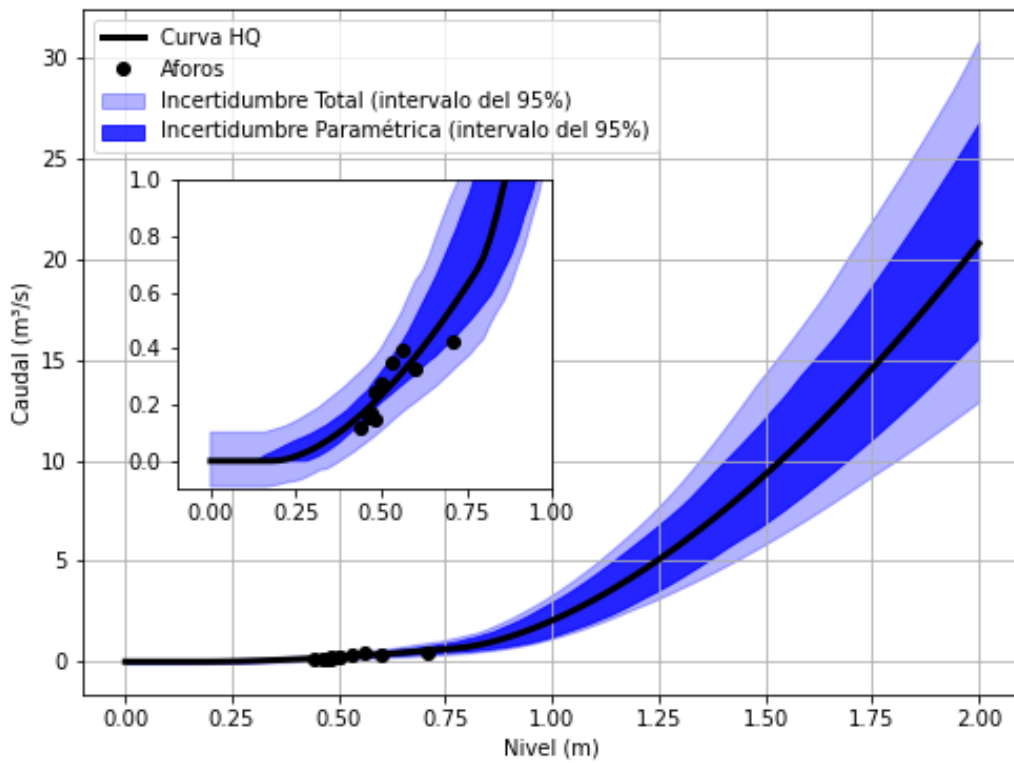


Figura 5.66. Curva HQ de la EM47 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.33 EM48

En esta estación se realizaron 53 aforos (ver Figura 5.67) A partir del análisis de los mismos se descartaron dos aforos pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del arroyo Morales (el arroyo Morales presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM48).

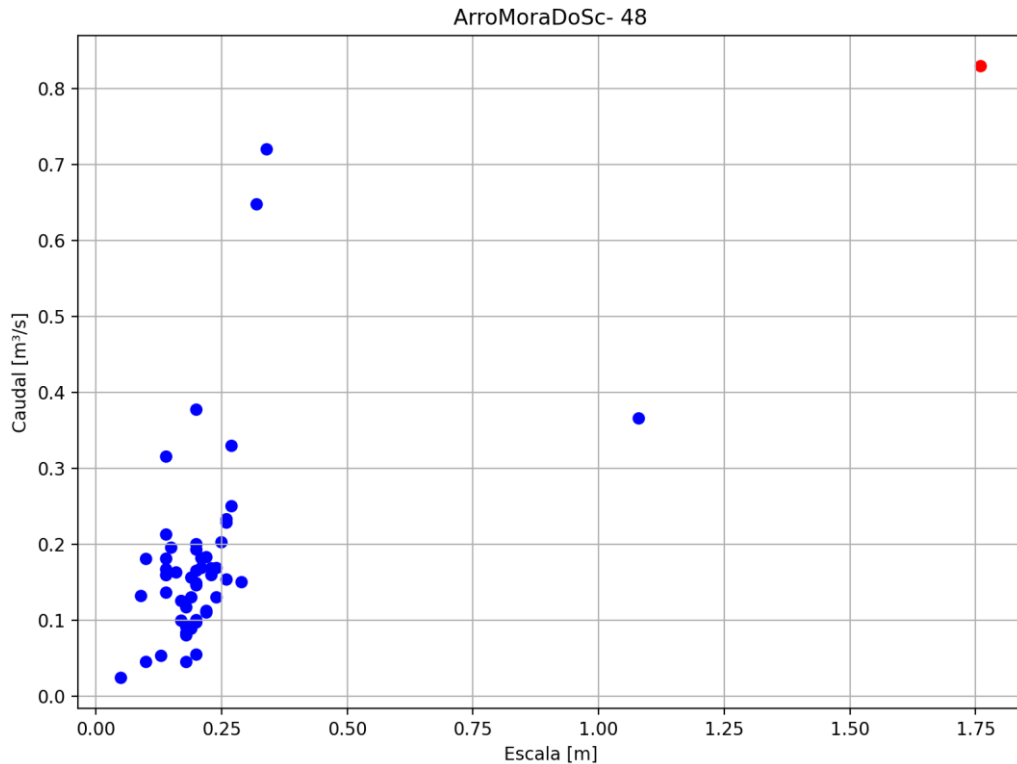


Figura 5.67. Aforos históricos realizados en EM48 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.33) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.68.

$$Q(h) = \begin{cases} 5,90110(h - 0,09249)^{1,68077} & 0,13 \leq h \leq 1,09 \\ 5,90110(h - 0,09249)^{1,68077} + 16,09890(h - 1,09091)^{1,65663} & 1,09 \leq h \leq 3,20 \end{cases}$$

Ecuación 5.33. Curva HQ de la EM48.

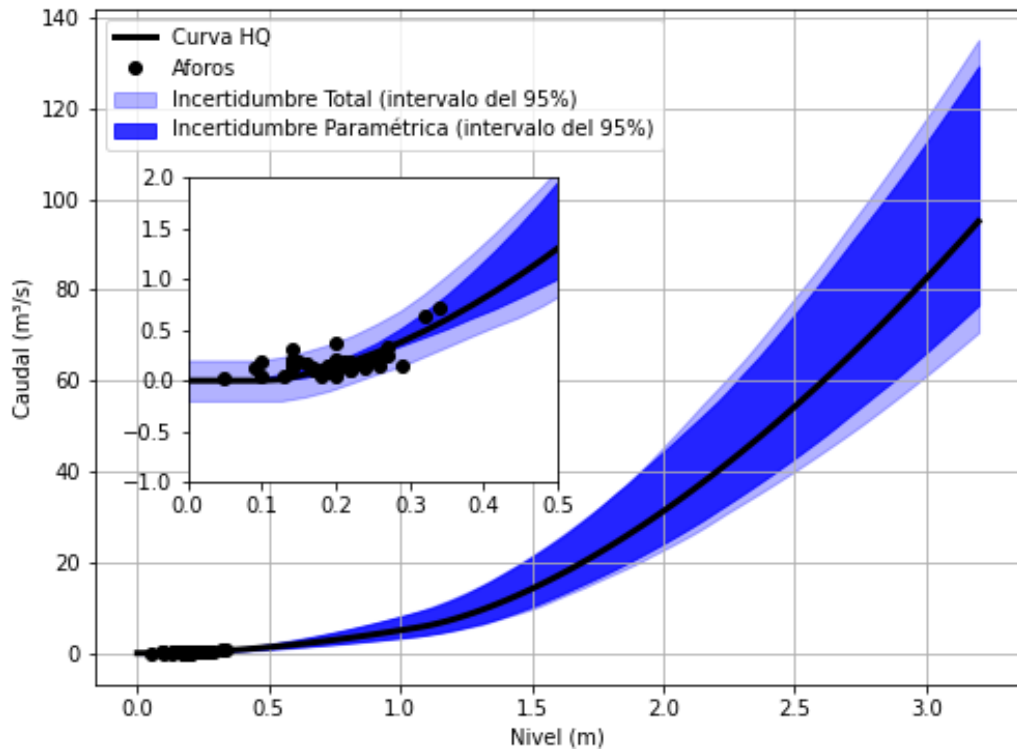


Figura 5.68. Curva HQ de la EM48 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.34 EM49

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.69. A partir del análisis de los mismos se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

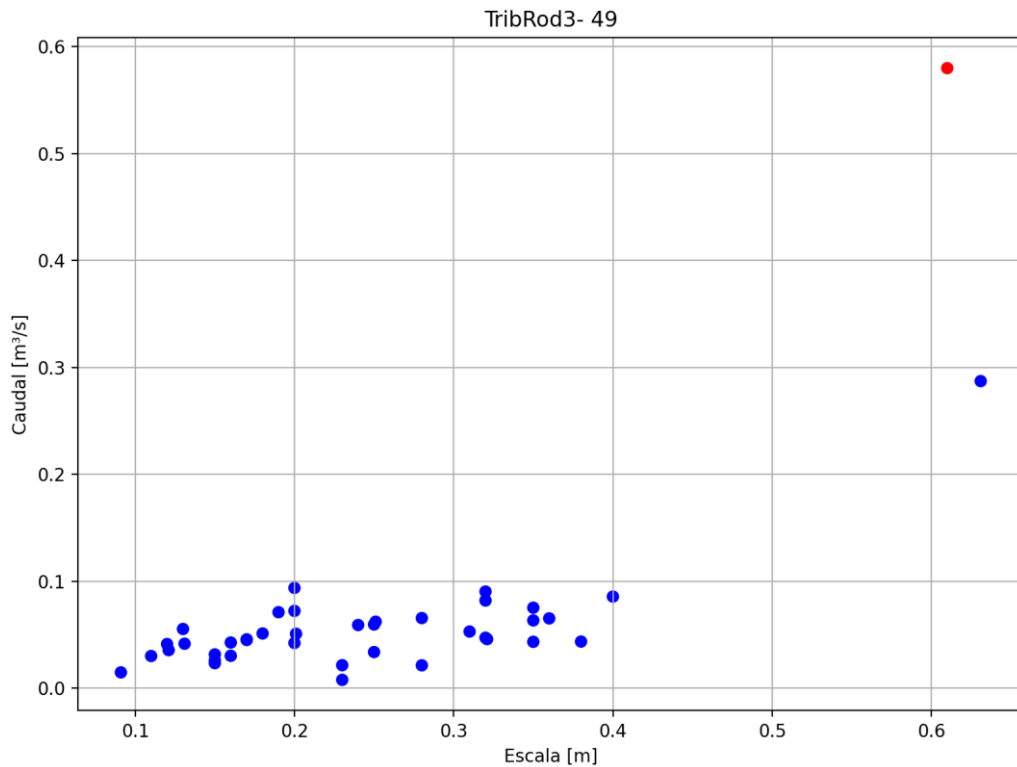


Figura 5.69. Aforos históricos realizados en EM49 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.34) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.70.

$$Q(h) = \{0,667145(h + 0,01318)^{1,67468} \quad 0,01 \leq h \leq 2,00$$

Ecuación 5.34. Curva HQ de la EM49.

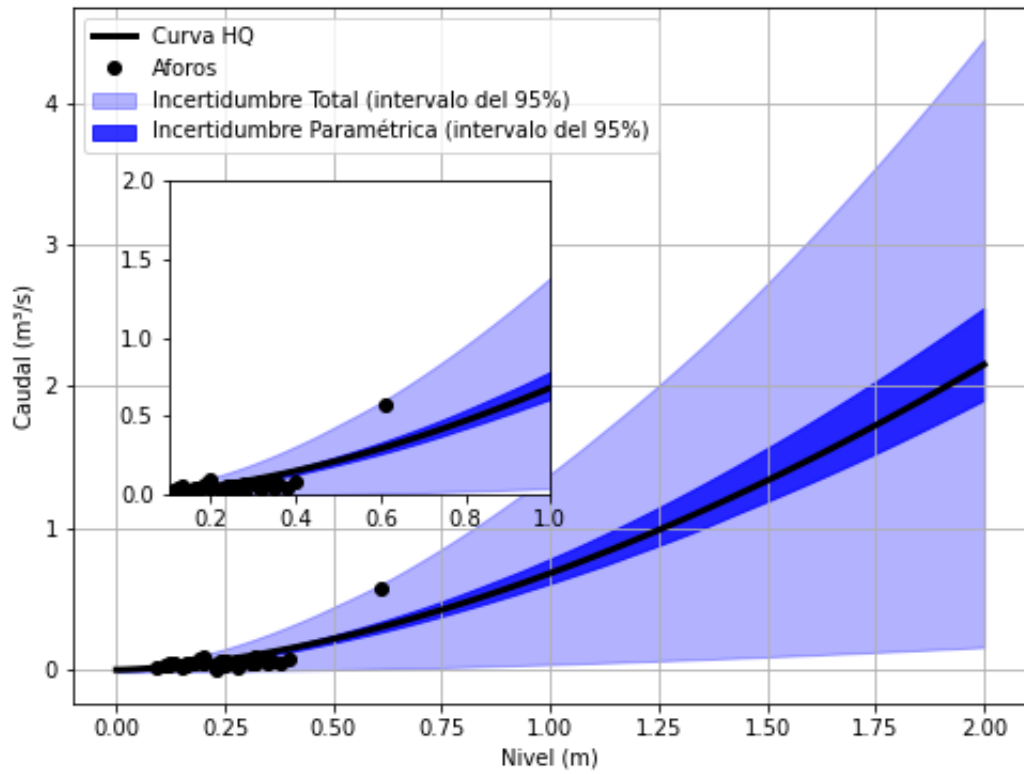


Figura 5.70. Curva HQ de la EM49 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.35 EM50

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.71) A partir del análisis de los mismos se descartaron siete aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartaron siete aforos realizados antes del año 2015, en donde hubo un cambio de regla.

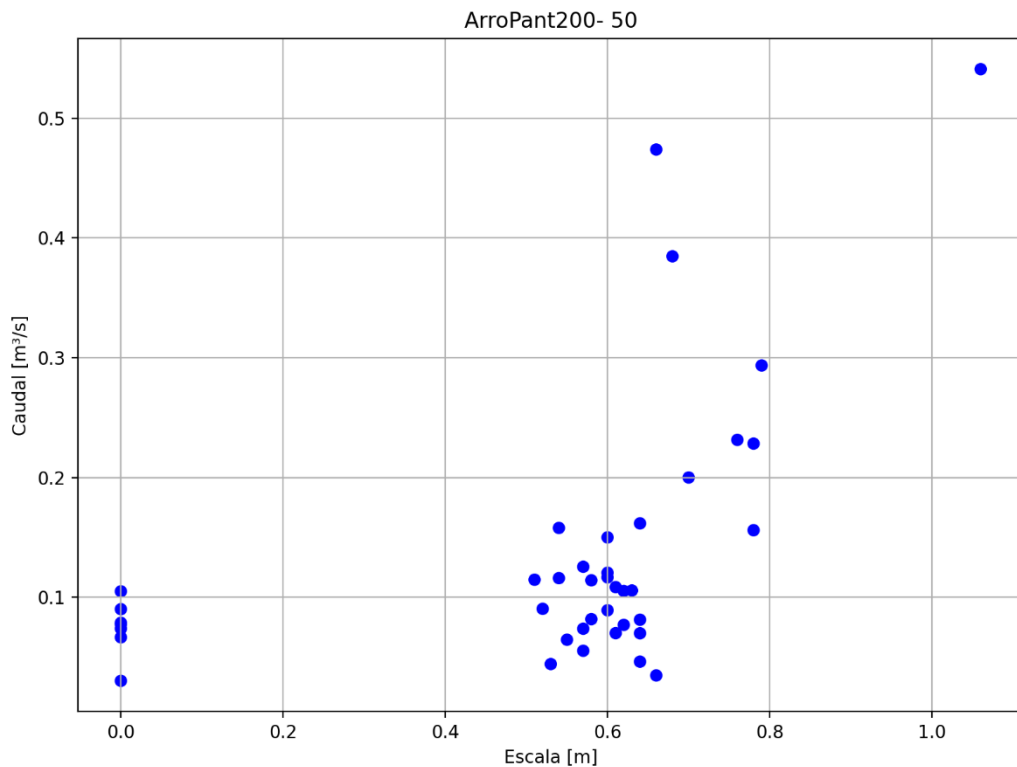


Figura 5.71. Aforos históricos realizados en EM50 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.35) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.72.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,36908(h-0,15229)^{1,51800} & 0,15 \leq h \leq 0,27 \\ 0,36908(h-0,15229)^{1,51800} + 0,02565(h-0,27281)^{1,68339} & 0,27 \leq h \leq 1,36 \\ 0,02565(h-0,27281)^{1,68339} + 13,37320(h-1,22056)^{1,66381} & 1,36 \leq h \leq 1,90 \end{cases}$$

Ecuación 5.35. Curva HQ de la EM50.

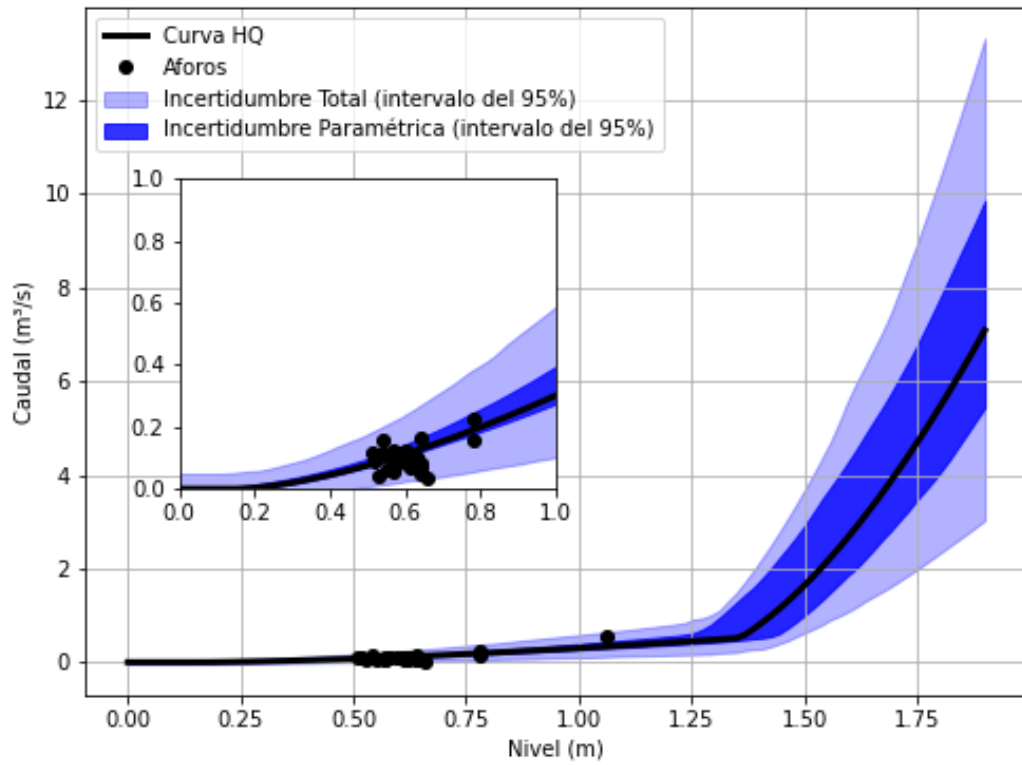


Figura 5.72. Curva HQ de la EM50 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.36 EM51

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.73) A partir del análisis de los mismos se descartaron 14 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

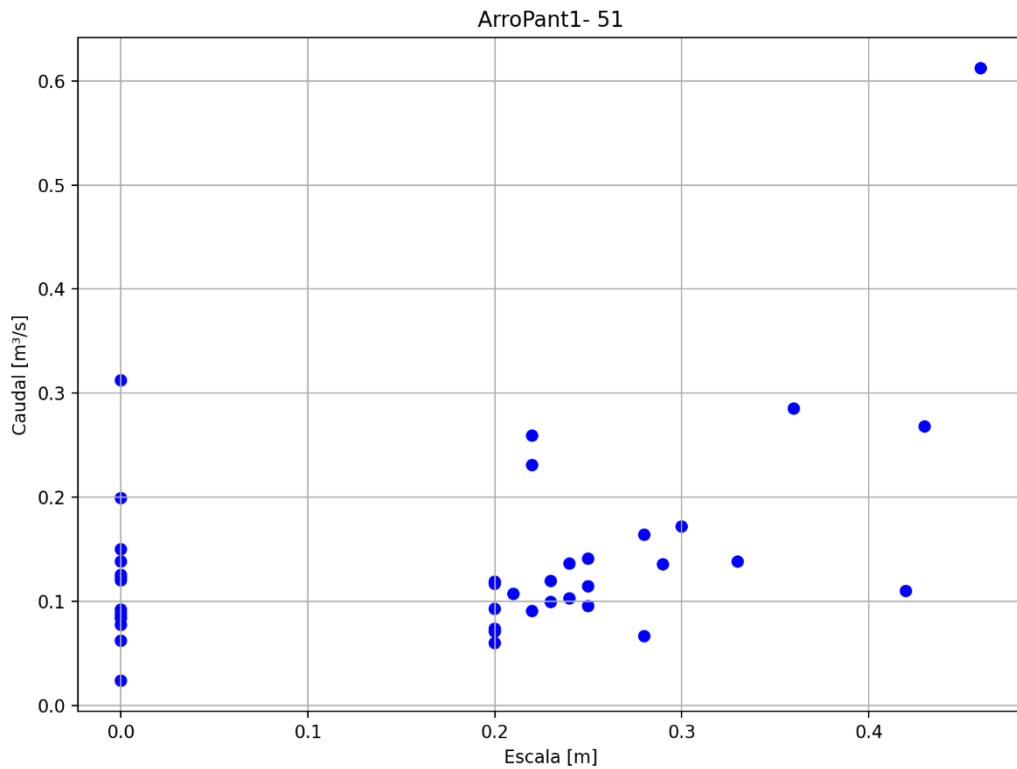


Figura 5.73. Aforos históricos realizados en EM51 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.36) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.74.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,39692(h - 0,08620)^{1,49188} & 0,09 \leq h \leq 0,21 \\ 3,11991(h - 0,07837)^{1,66835} & 0,21 \leq h \leq 1,80 \end{cases}$$

Ecuación 5.36. Curva HQ de la EM51.

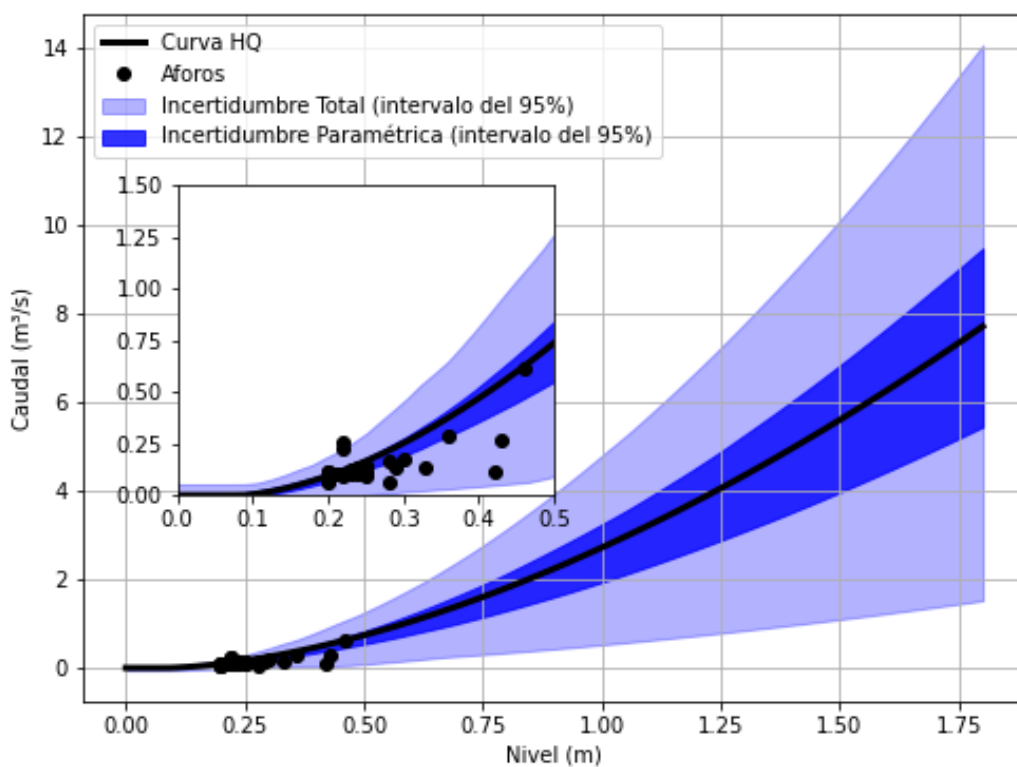


Figura 5.74. Curva HQ de la EM51 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.37 EM53

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.75. A partir del análisis de los mismos se descartó un aforo por presentar un valor poco consistente.

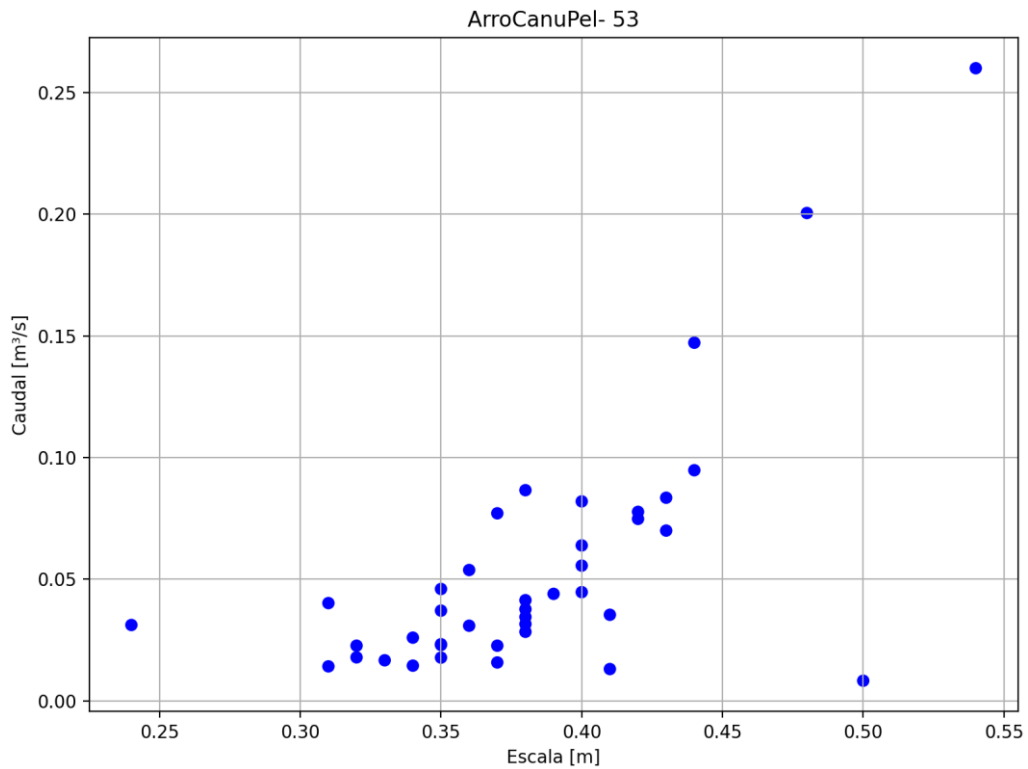


Figura 5.75. Aforos históricos realizados en EM53 con ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.37) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.76.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,05575(h + 0,00586)^{1,49198} & 0,00 \leq h \leq 0,25 \\ 0,05575(h + 0,00586)^{1,49198} + 1,14679(h - 0,24978)^{1,68577} & 0,25 \leq h \leq 2,94 \\ 1,14679(h - 0,24978)^{1,68577} + 2,93653(h - 2,59292)^{1,67800} & 2,94 \leq h \leq 3,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.37. Curva HQ de la EM53.

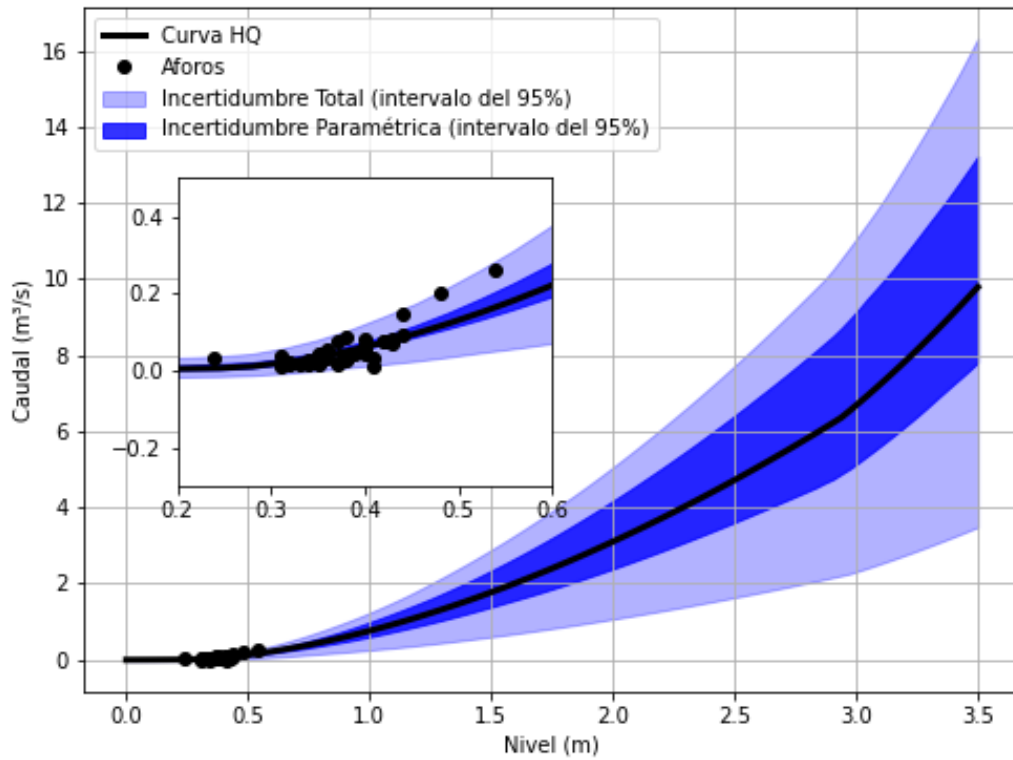


Figura 5.76. Curva HQ de la EM53 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.38 EM54

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.77. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

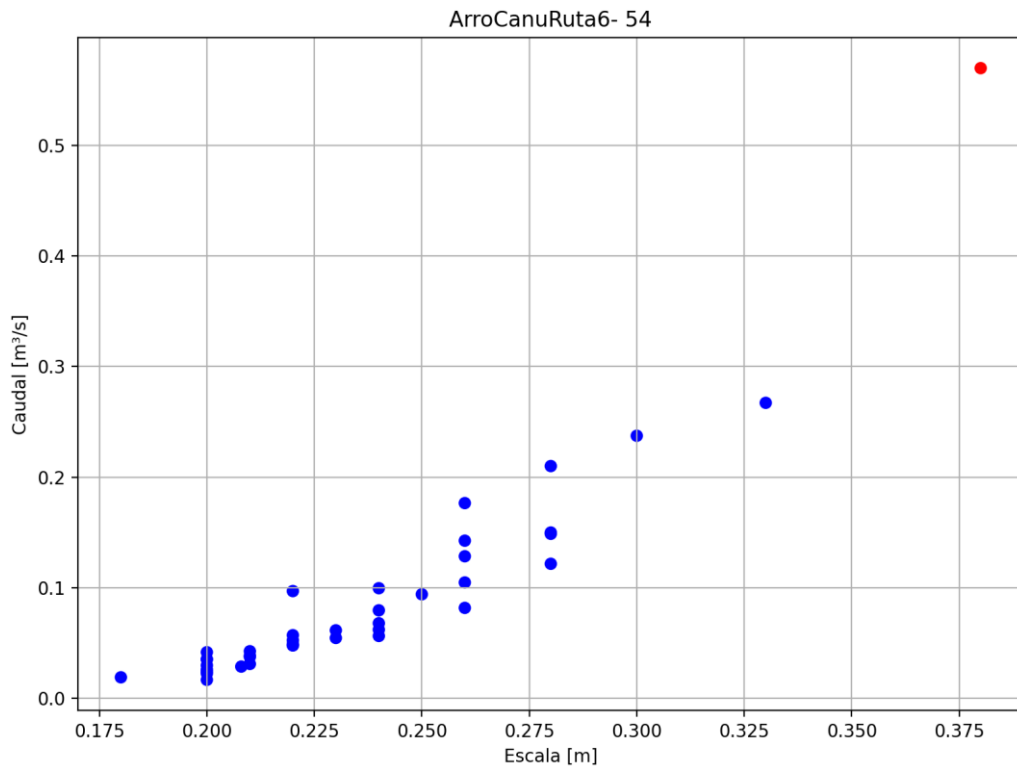


Figura 5.77. Aforos históricos realizados en EM54 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.38) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.78.

$$Q(h) = \begin{cases} 5,30190(h-0,17187)^{1,51719} & 0,17 \leq h \leq 0,48 \\ 5,30190(h-0,17187)^{1,51719} + 10,36850(h-0,48346)^{1,66799} & 0,48 \leq h \leq 1,58 \\ 10,36850(h-0,48346)^{1,66799} + 12,67790(h-0,76930)^{1,66850} & 1,58 \leq h \leq 3,04 \\ 12,67790(h-0,76930)^{1,66850} + 18,77680(h-1,24942)^{1,66674} & 3,04 \leq h \leq 3,25 \end{cases}$$

Ecuación 5.38. Curva HQ de la EM54.

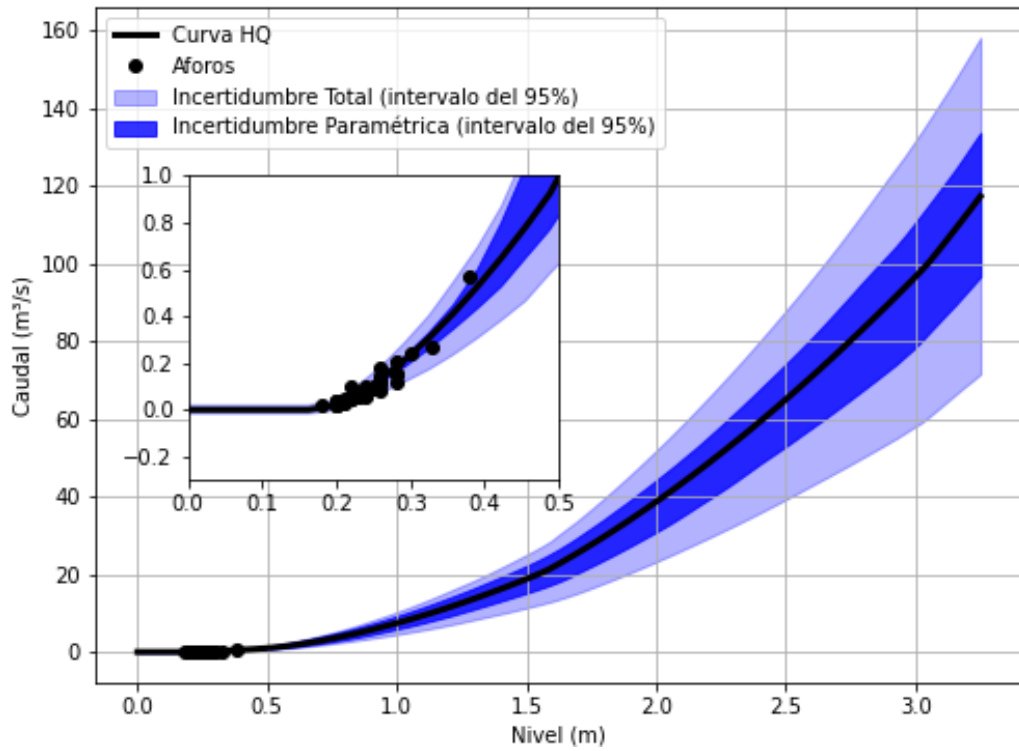
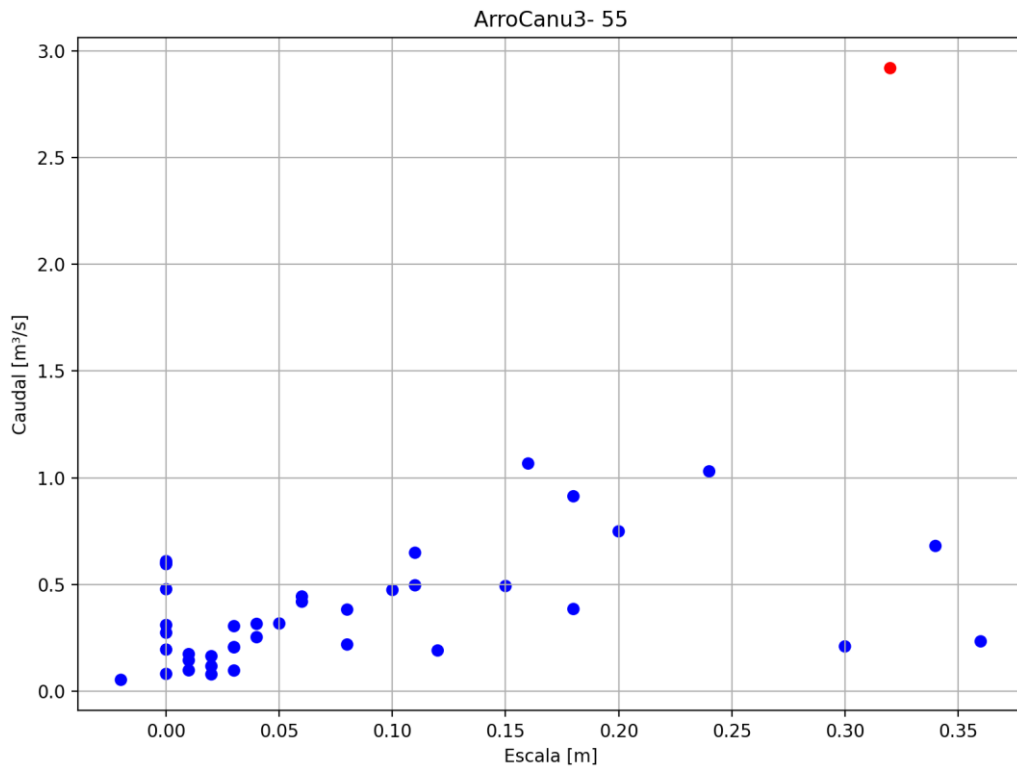


Figura 5.78. Curva HQ de la EM54 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.39 EM55

En esta estación se realizaron 40 aforos (ver Figura 5.79) A partir del análisis de los mismos se descartaron ocho aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartaron cuatro aforos por no presentar valores consistentes.



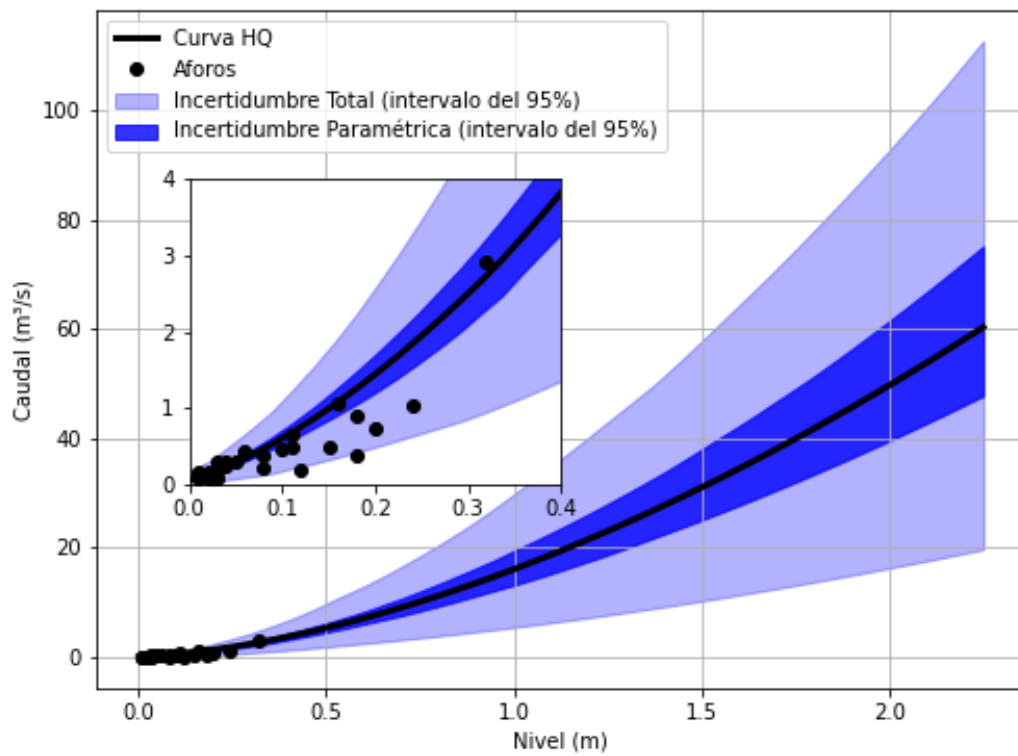


Figura 5.80. Curva HQ de la EM55 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.40 EM56

En esta estación se realizaron 54 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.81. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos que presentaban lecturas en la escala hidrométrica mayores a un metro (dado que la escala de esta estación solo tiene un tramo).

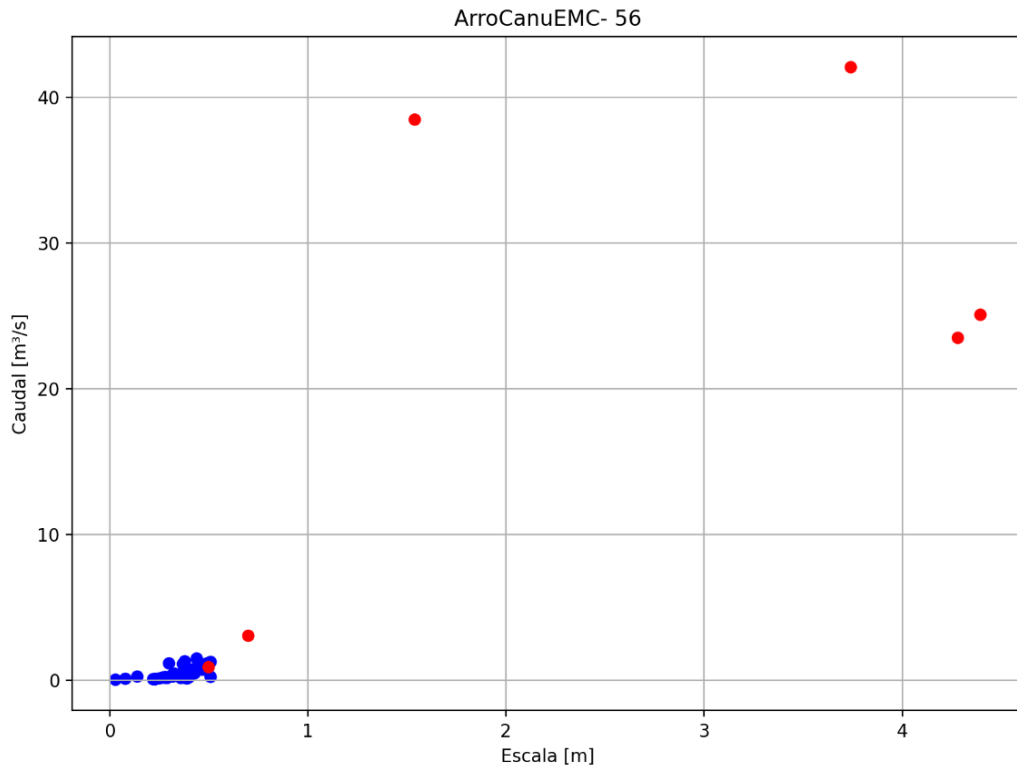


Figura 5.81. Aforos históricos realizados en EM56 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.40) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.82.

$$Q(h) = \begin{cases} 4,71028(h-0,16127)^{1,50515} & 0,16 \leq h \leq 0,31 \\ 4,61746(h-0,12682)^{1,67808} & 0,31 \leq h \leq 1,00 \\ 4,61746(h-0,12682)^{1,67808} + 6,87152(h-1,00684)^{1,67219} & 1,00 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.40. Curva HQ de la EM56.

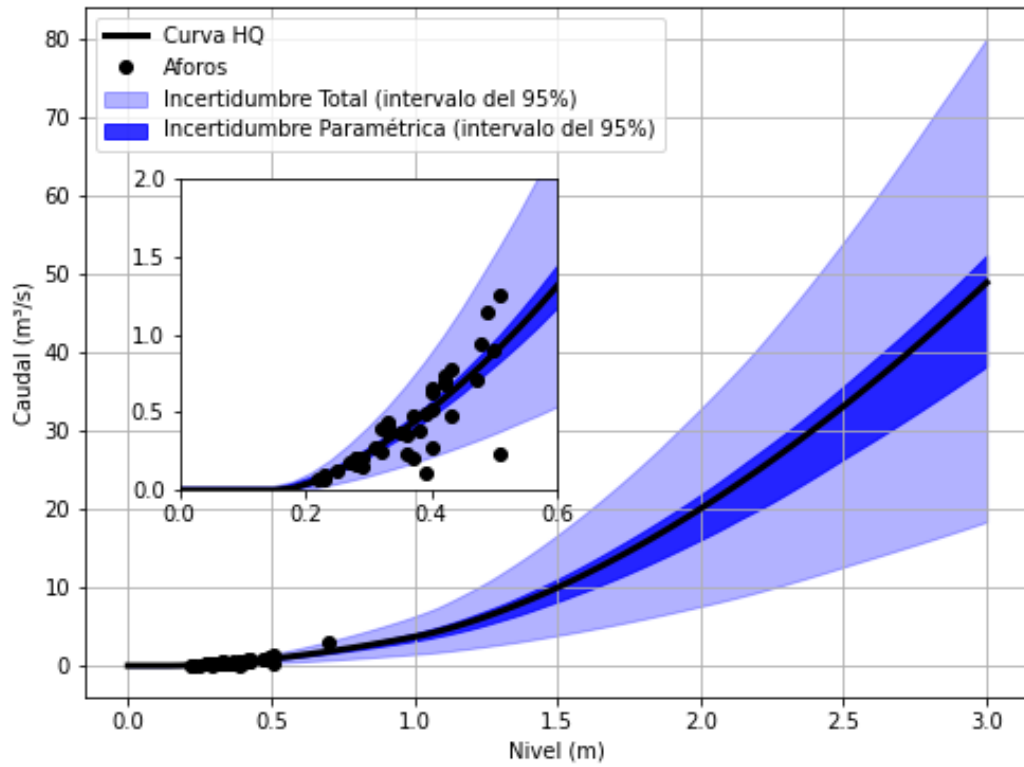


Figura 5.82. Curva HQ de la EM56 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.41 EM58

En esta estación se realizaron 39 aforos (ver Figura 5.83) A partir del análisis de los mismos se descartaron tres aforos por no presentar valores consistentes.

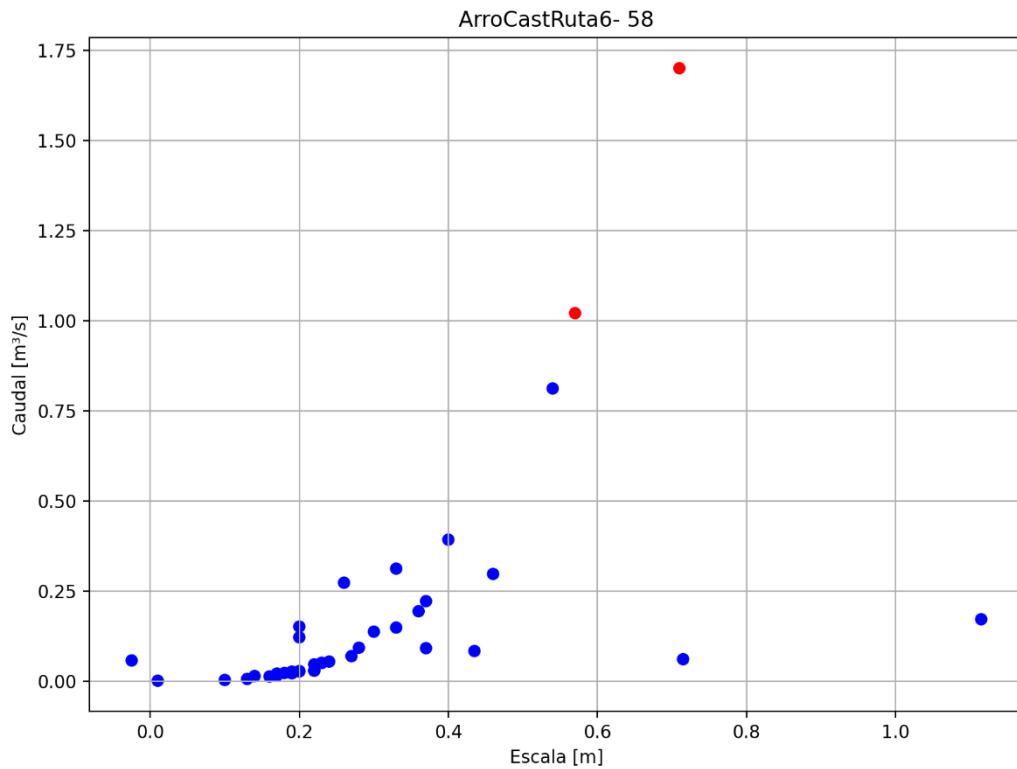


Figura 5.83. Aforos históricos realizados en EM58 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.41) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.84.

$$Q(h) = \begin{cases} 2,19747(h-0,11627)^{1,50133} & 0,12 \leq h \leq 0,32 \\ 8,60219(h-0,21496)^{1,65437} & 0,32 \leq h \leq 2,90 \end{cases}$$

Ecuación 5.41. Curva HQ de la EM58.

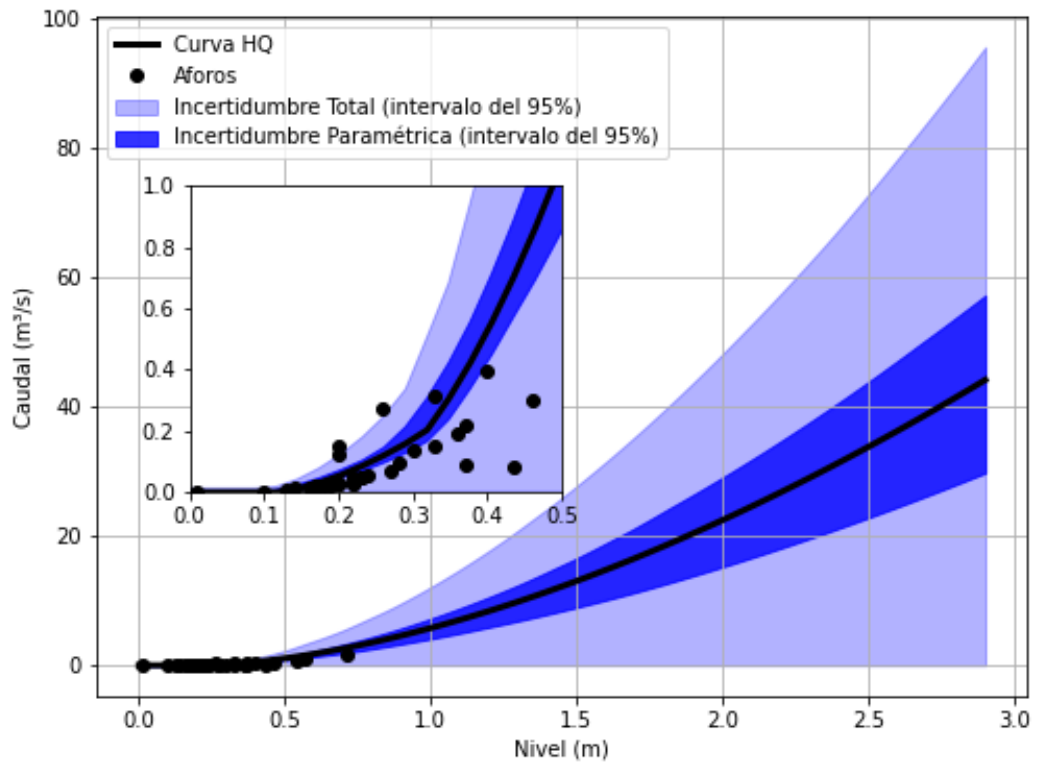


Figura 5.84. Curva HQ de la EM58 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.42 EM59

En esta estación se realizaron 39 aforos (ver Figura 5.85) A partir del análisis de los mismos se descartaron tres aforos por no presentar valores consistentes.

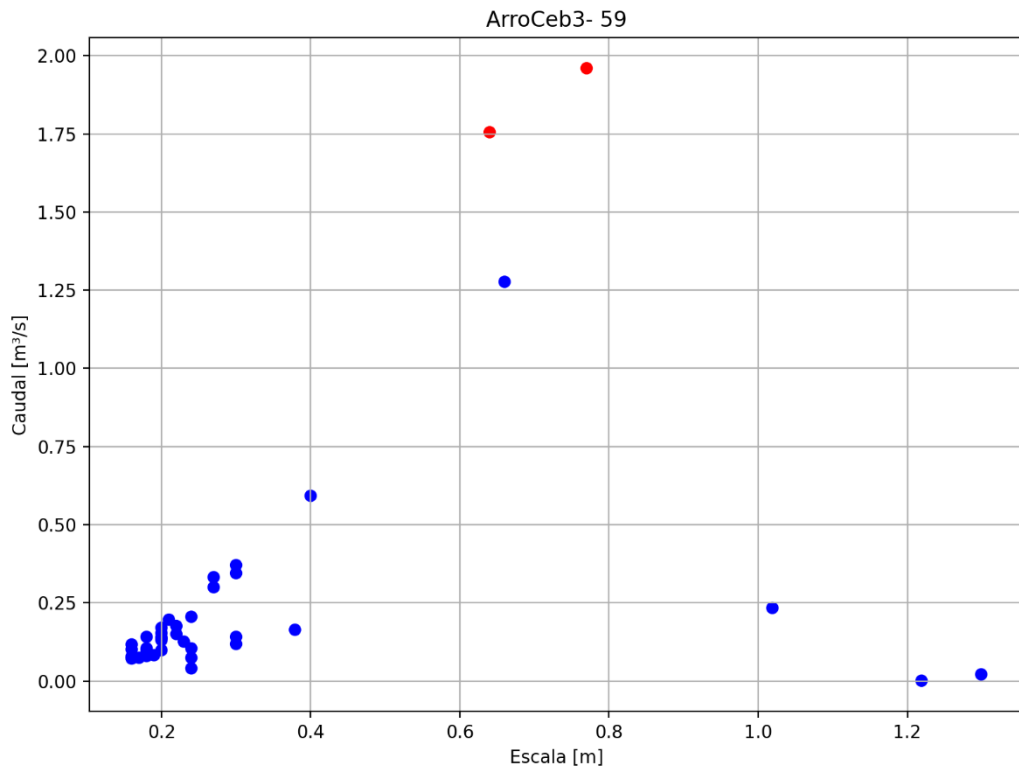


Figura 5.85. Aforos históricos realizados en EM59 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.42) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.86.

$$Q(h) = \begin{cases} 5,29358(h - 0,10534)^{1,54035} & 0,11 \leq h \leq 0,41 \\ 5,70978(h - 0,09223)^{1,66243} & 0,41 \leq h \leq 1,40 \\ 5,70978(h - 0,09223)^{1,66243} + 11,36840(h - 1,40380)^{1,66484} & 1,40 \leq h \leq 2,80 \end{cases}$$

Ecuación 5.42. Curva HQ de la EM59.

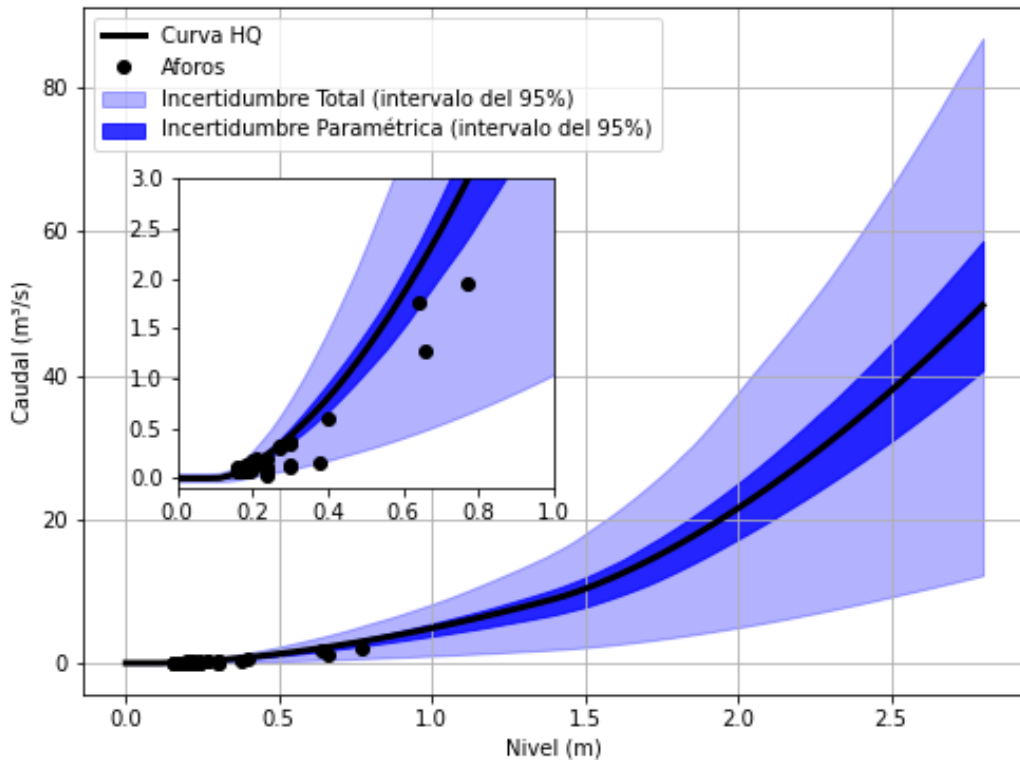


Figura 5.86. Curva HQ de la EM59 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.43 EM60

En esta estación se realizaron 36 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.87. A partir del análisis de los mismos se descartaron dos aforos pues los niveles registrados estaban influenciados por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM60).

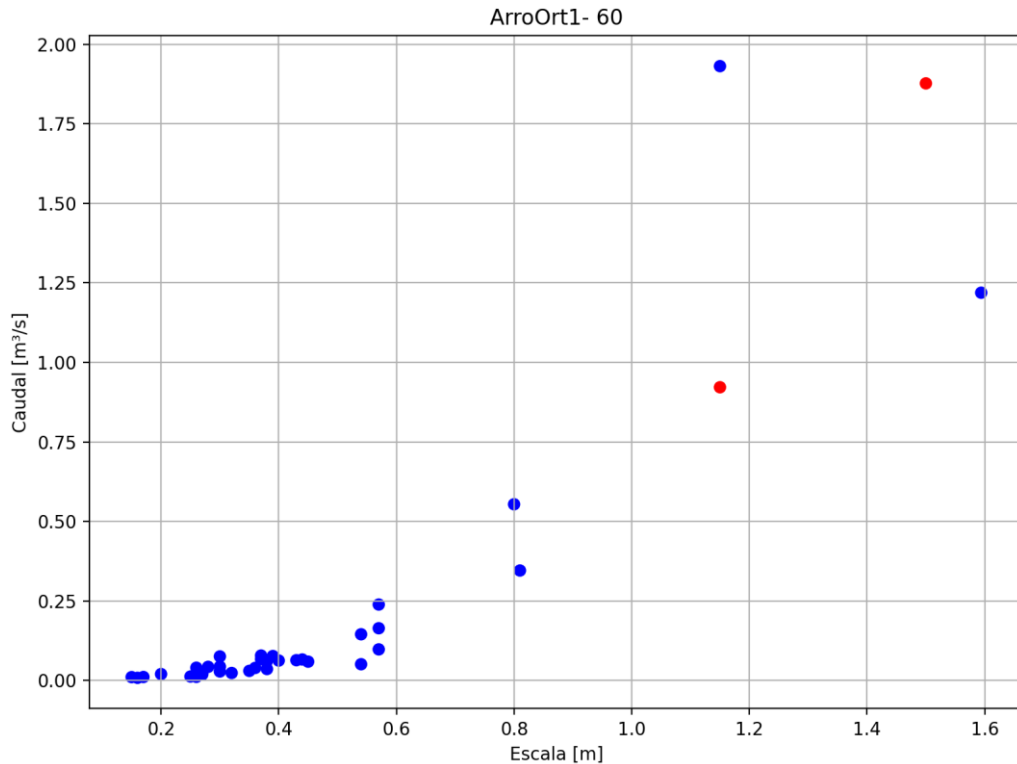


Figura 5.87. Aforos históricos realizados en EM60 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.43 Ecuación 5.42) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.88.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,98397(h - 0,17499)^{1,68936} & 0,17 \leq h \leq 2,98 \\ 6,81397(h - 2,97529)^{1,67357} & 2,98 \leq h \leq 3,50 \end{cases}$$

Ecuación 5.43. Curva HQ de la EM60.

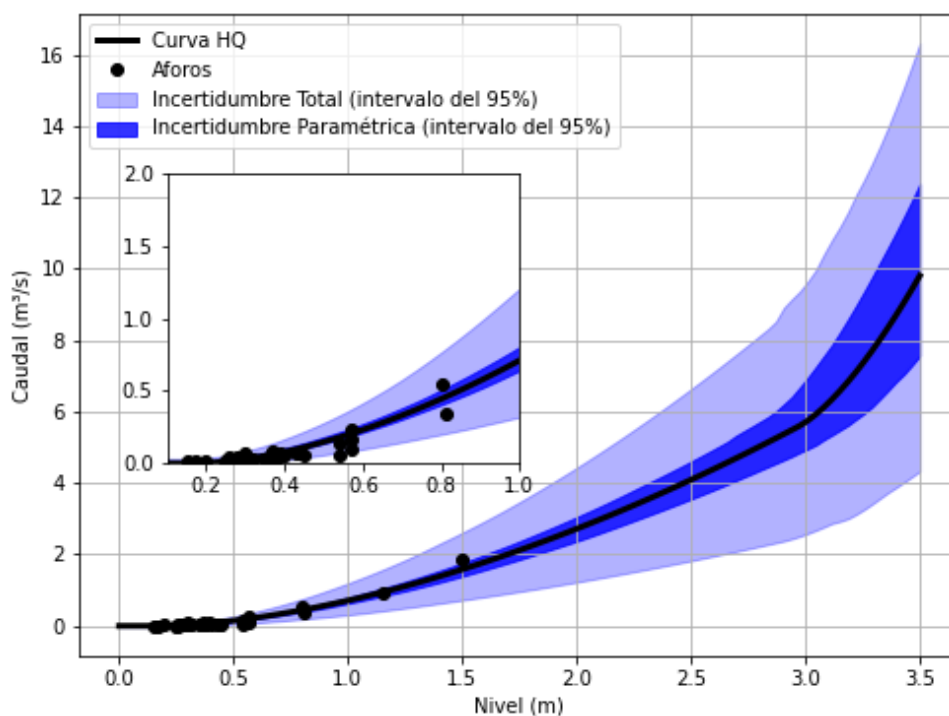


Figura 5.88. Curva HQ de la EM60 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.44 EM61

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.89. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

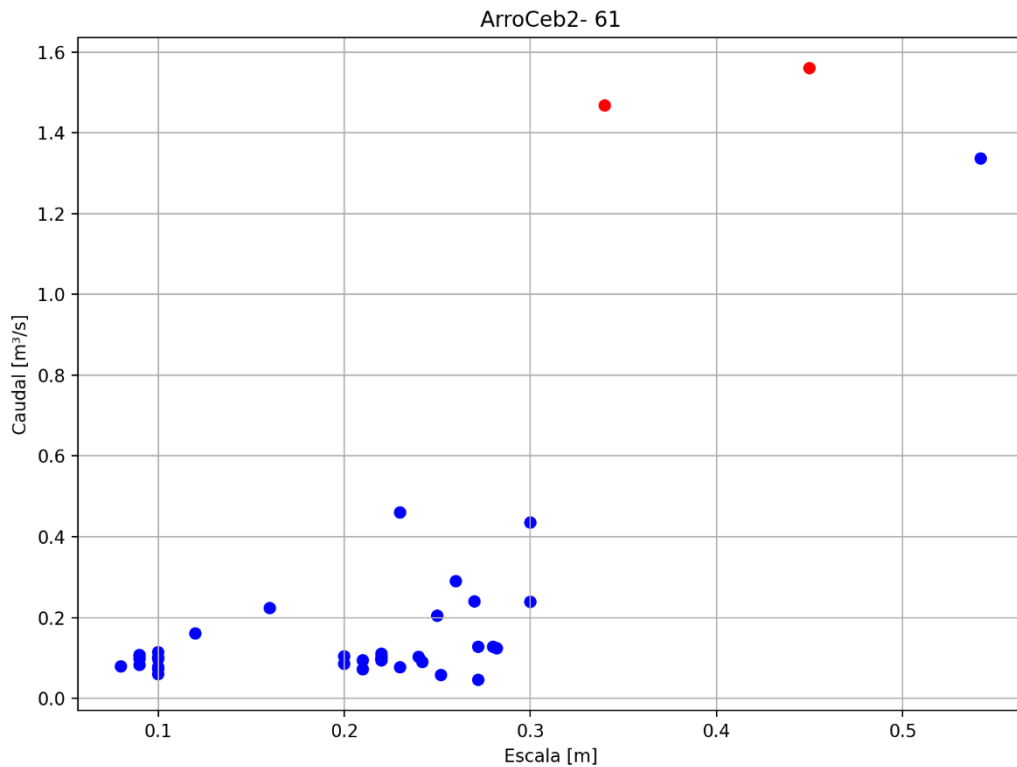


Figura 5.89. Aforos históricos realizados en EM61 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.44) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.90.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,05334(h + 0,00982)^{1,68968} & 0,10 \leq h \leq 1,13 \\ 3,05334(h + 0,00982)^{1,68968} + 15,49170(h - 1,13129)^{1,67879} & 1,13 \leq h \leq 3,45 \end{cases}$$

Ecuación 5.44. Curva HQ de la EM61.

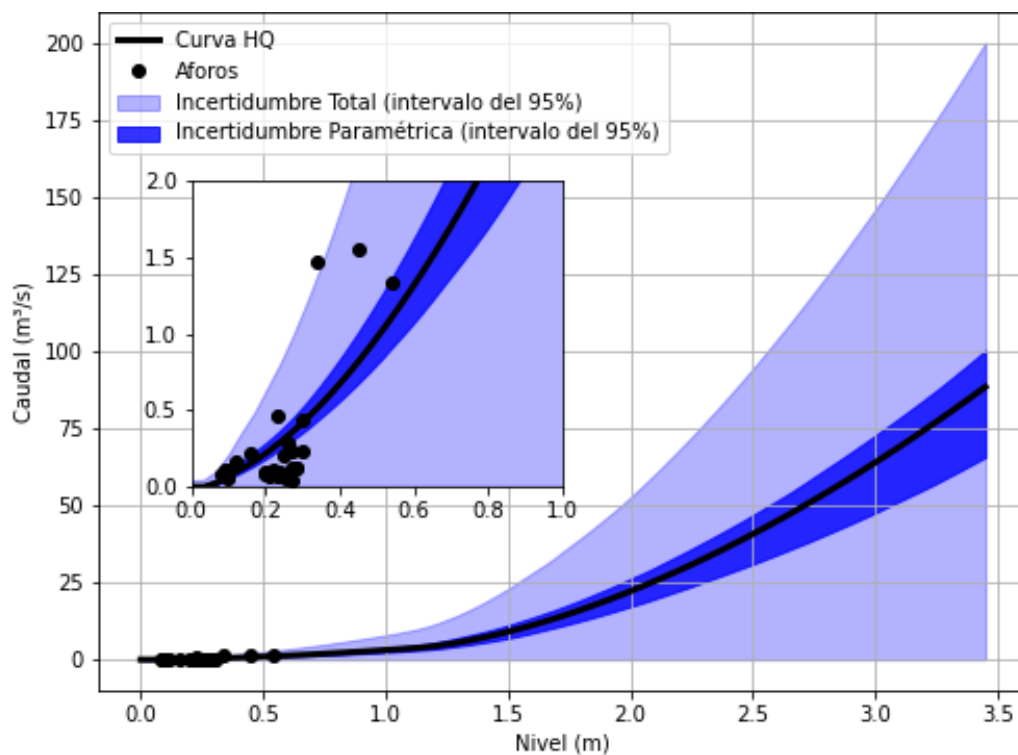


Figura 5.90. Curva HQ de la EM61 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.45 EM62

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.91. A partir del análisis de los mismos se decidió usar todos los registros de caudales en la construcción de la curva HQ.

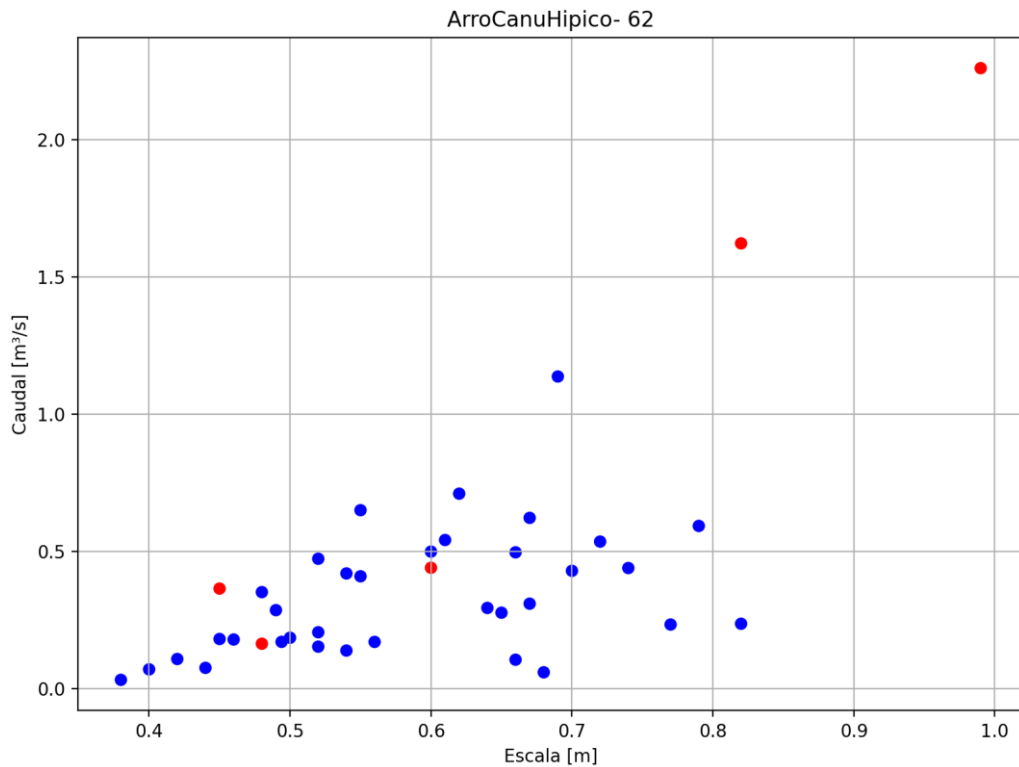


Figura 5.91. Aforos históricos realizados en EM62 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.45) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.92.

$$Q(h) = \begin{cases} 0,03342(h+0,04051)^{1,50396} & -0,04 \leq h \leq 0,18 \\ 0,03342(h+0,04051)^{1,50396} + 1,66233(h-0,17862)^{1,68143} & 0,18 \leq h \leq 0,77 \\ 1,66233(h-0,17862)^{1,68143} + 14,97090(h-0,74519)^{1,67264} & 0,77 \leq h \leq 4,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.45. Curva HQ de la EM62.

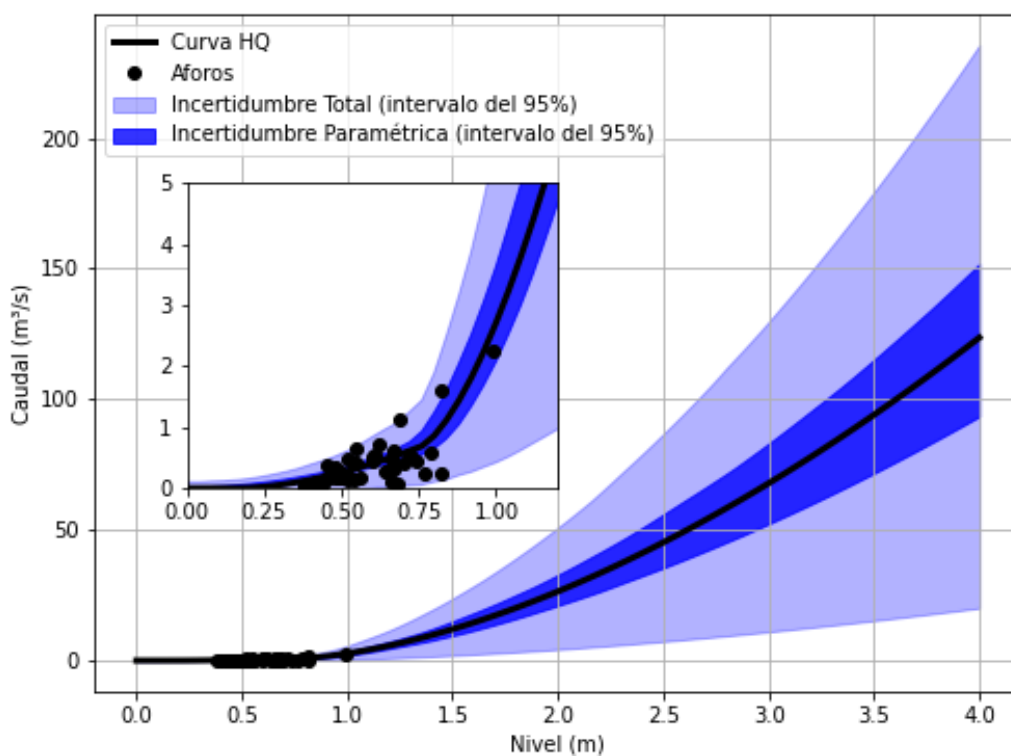


Figura 5.92. Curva HQ de la EM62 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.46 EM63

En esta estación se realizaron 38 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.93. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos que presentaban valores poco consistentes.

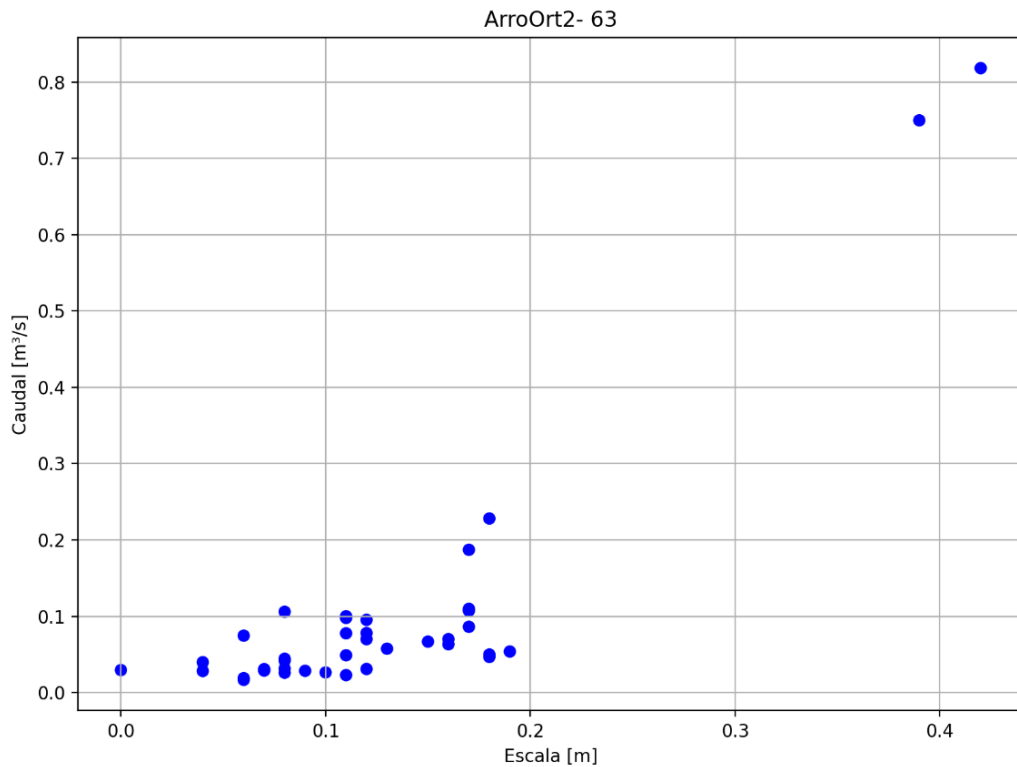


Figura 5.93. Aforos históricos realizados en EM63 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.46) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.94.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,23641(h-0,03652)^{1,52245} & 0,04 \leq h \leq 0,32 \\ 3,23641(h-0,03652)^{1,52245} + 5,25727(h-0,29282)^{1,66183} & 0,32 \leq h \leq 2,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.46. Curva HQ de la EM63.

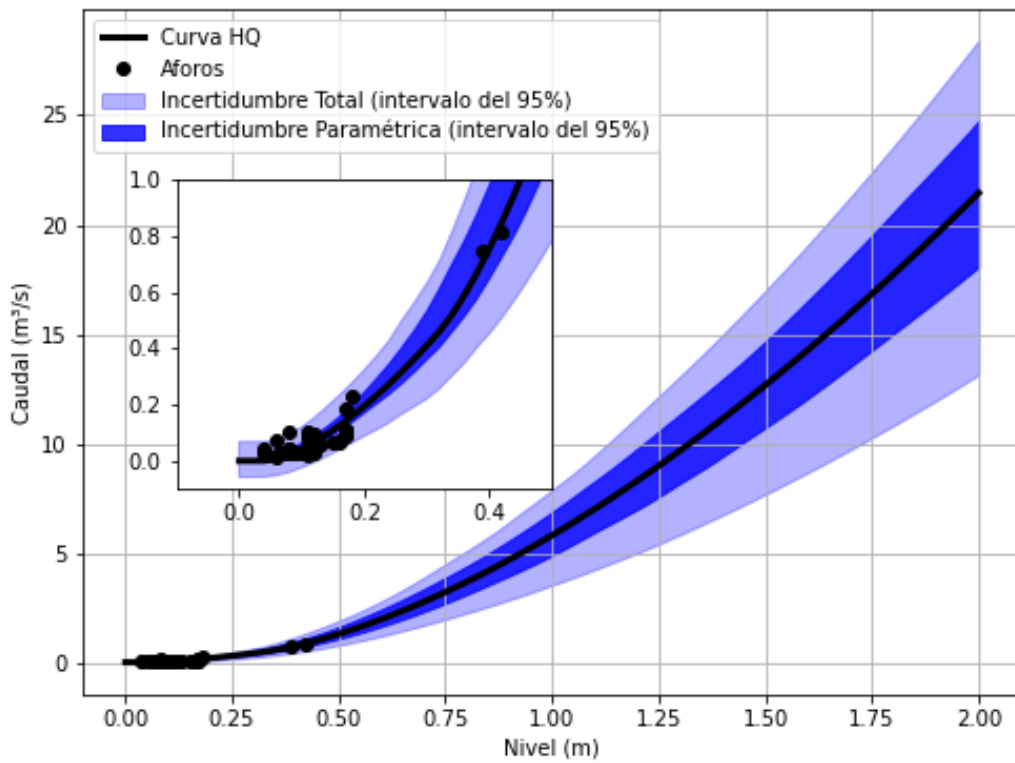


Figura 5.94. Curva HQ de la EM63 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.47 EM64

En esta estación se realizaron 38 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.95. A partir del análisis de los mismos se descartaron dos aforos por tener caudales negativos.

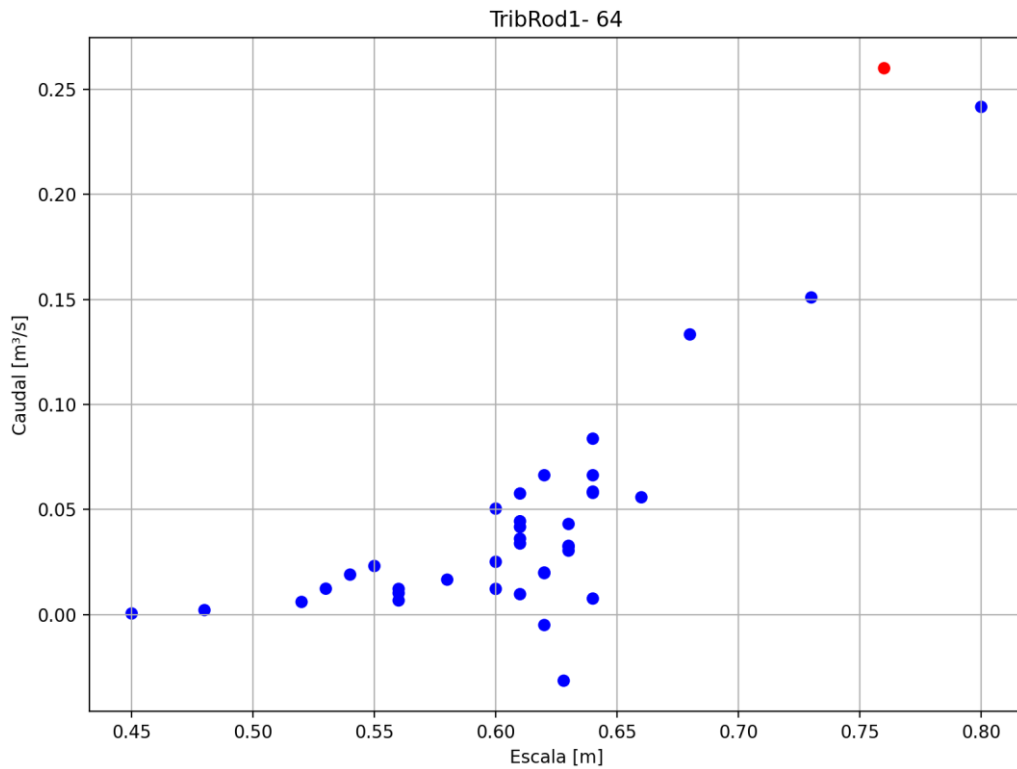


Figura 5.95. Aforos históricos realizados en EM64 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.47) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.96.

$$Q(h) = \{1,3479(h - 0,485677)\}^{1,67945} \quad 0,40 \leq h \leq 2,00$$

Ecuación 5.47. Curva HQ de la EM64.

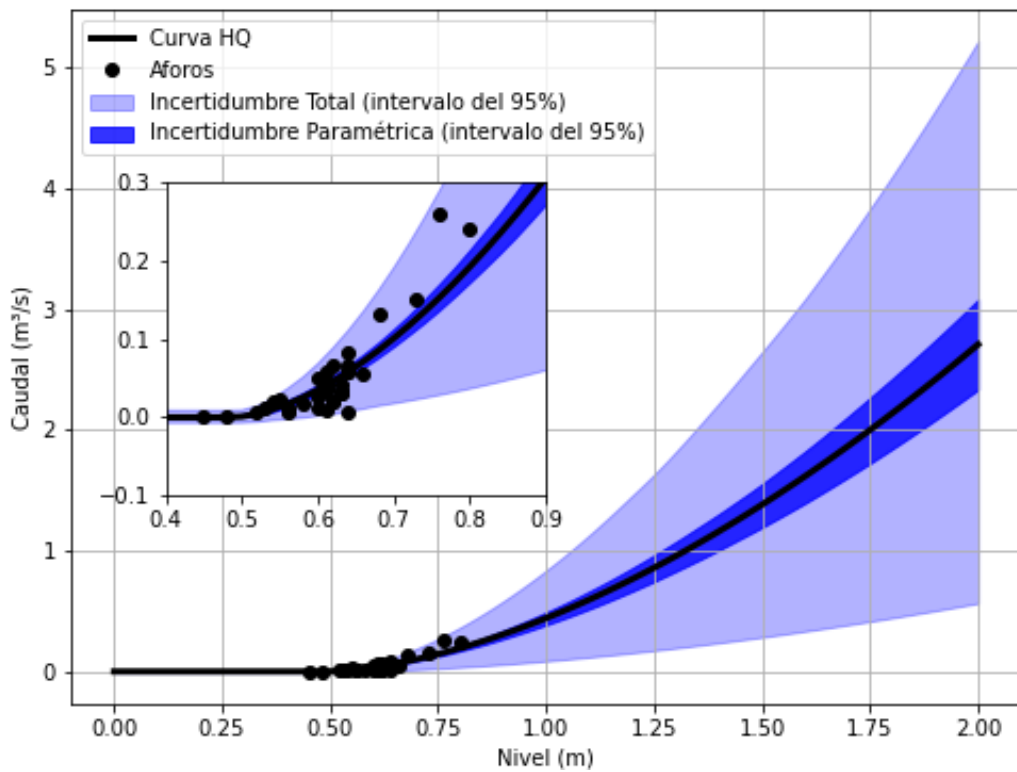


Figura 5.96. Curva HQ de la EM64 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.48 EM66

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.97. A partir del análisis de los mismos se descartaron 16 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartaron diez aforos que presentaban lecturas en la escala hidrométrica mayores a dos metros (dado que la escala de esta estación solo tiene dos tramos).

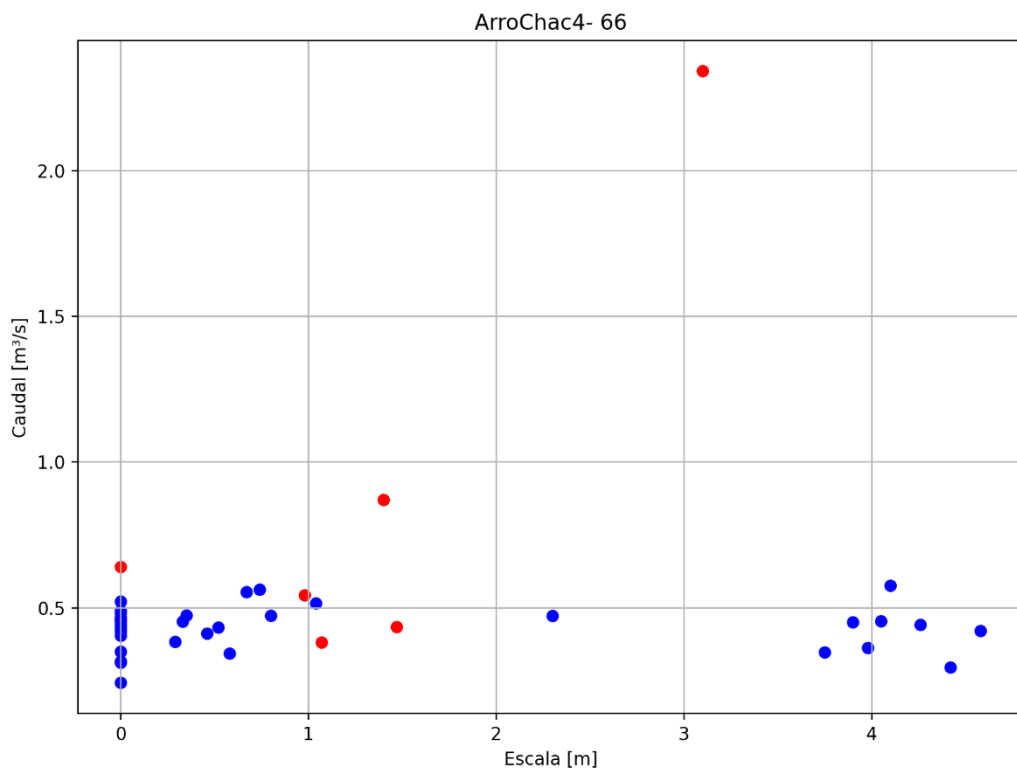


Figura 5.97. Aforos históricos realizados en EM66 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.48) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.98.

$$Q(h) = \begin{cases} 1,32798(h-0,01710)^{1,48031} & 0,02 \leq h \leq 0,14 \\ 1,29569(h+0,01574)^{1,65270} & 0,14 \leq h \leq 2,50 \\ 14,96360(h-1,92672)^{1,67697} & 2,50 \leq h \leq 3,75 \end{cases}$$

Ecuación 5.48. Curva HQ de la EM66.

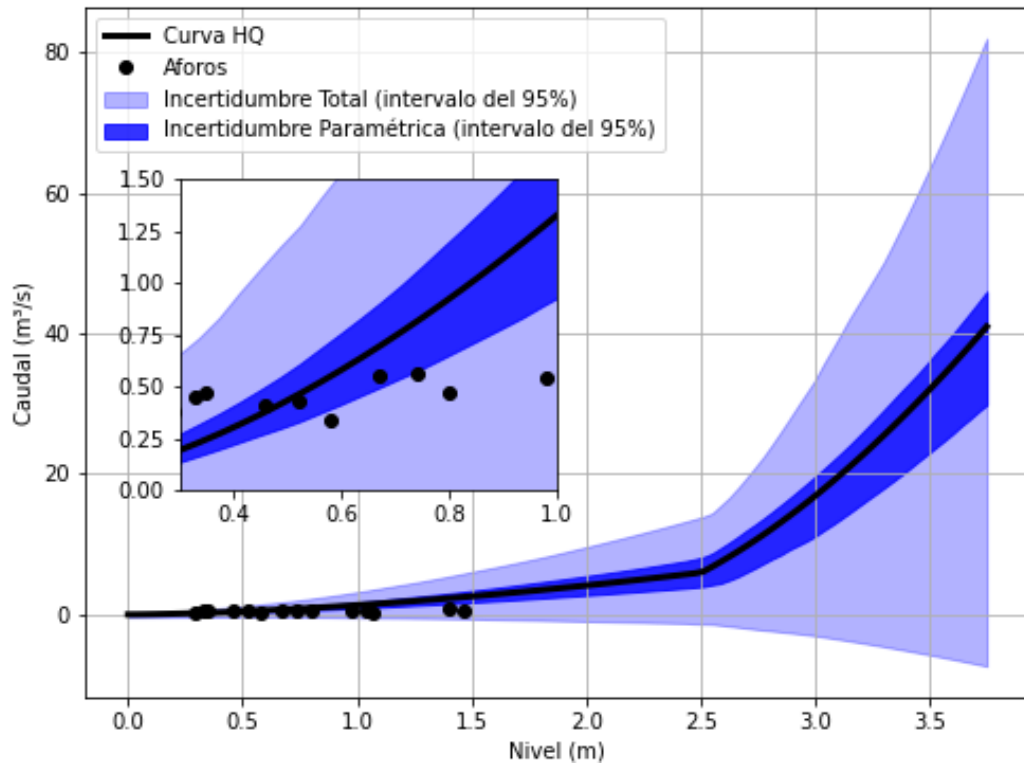


Figura 5.98. Curva HQ de la EM66 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.49 EM67

En esta estación se realizaron 39 aforos (ver Figura 5.99) de los cuales 26 pertenecen a la sección anterior donde se ubicaba la estación (que fueron dejados de lados en este análisis). A partir del análisis de los mismos se descartaron 15 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica y 1 aforo por presentar un valor poco consistente.

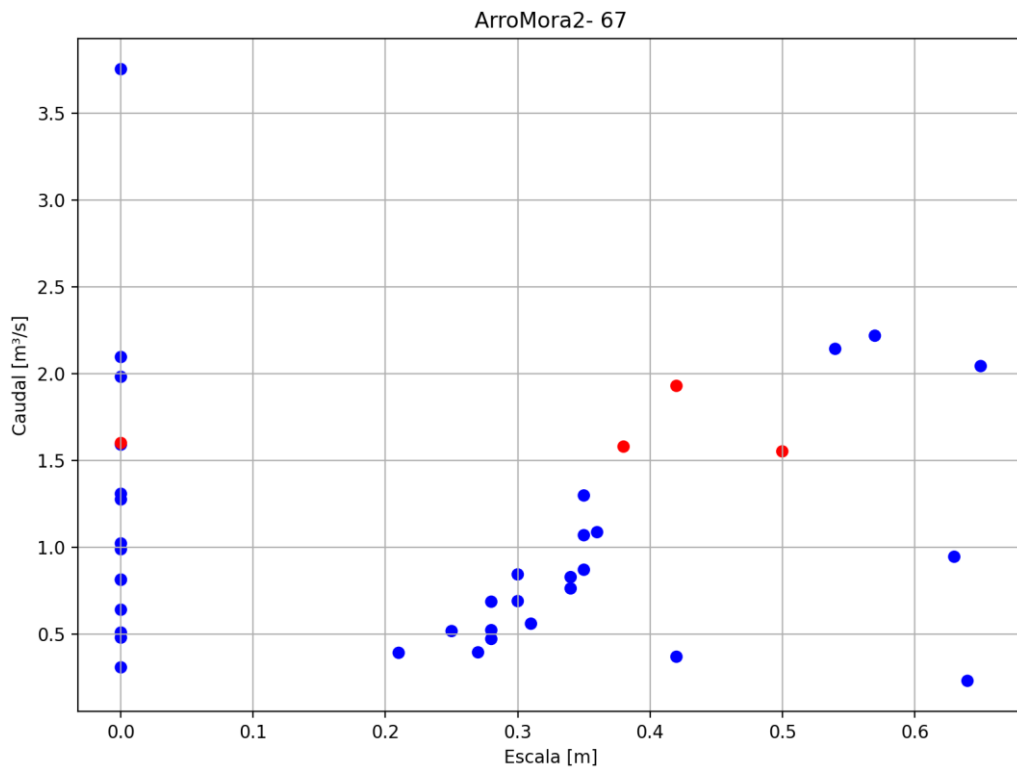


Figura 5.99. Aforos históricos realizados en EM67 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.49) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.100.

$$Q(h) = \begin{cases} 3,04730(h - 0,03264)^{1,51222} & 0,03 \leq h \leq 0,13 \\ 7,68095(h - 0,05805)^{1,67680} & 0,13 \leq h \leq 1,82 \\ 7,68095(h - 0,05805)^{1,67680} + 68,11120(h - 1,82321)^{1,67198} & 1,82 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.49. Curva HQ de la EM67.

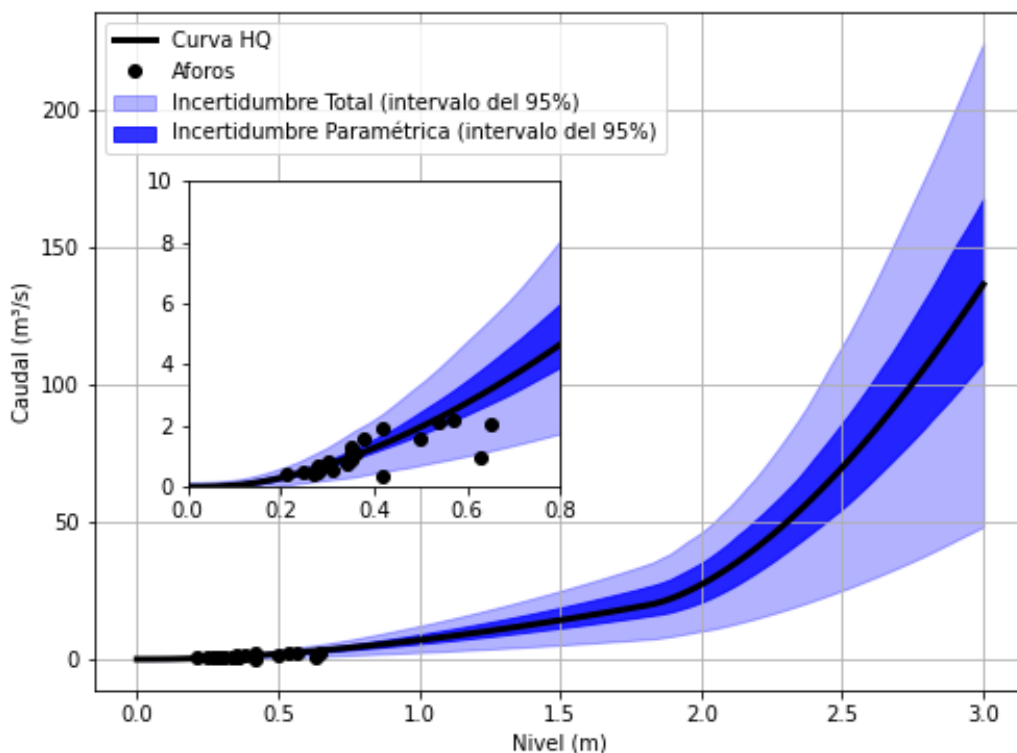


Figura 5.100. Curva HQ de la EM67 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.50 EM68

En esta estación se realizaron 40 aforos, los cuales se presentan en la Figura 5.101. En el año 2015 hubo un cambio en el tramo 1 de la escala hidrométrica de la estación de monitoreo, razón por la cual se descartaron todos los aforos previos a ese año (en total fueron ocho mediciones). Adicionalmente se descartó tres aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

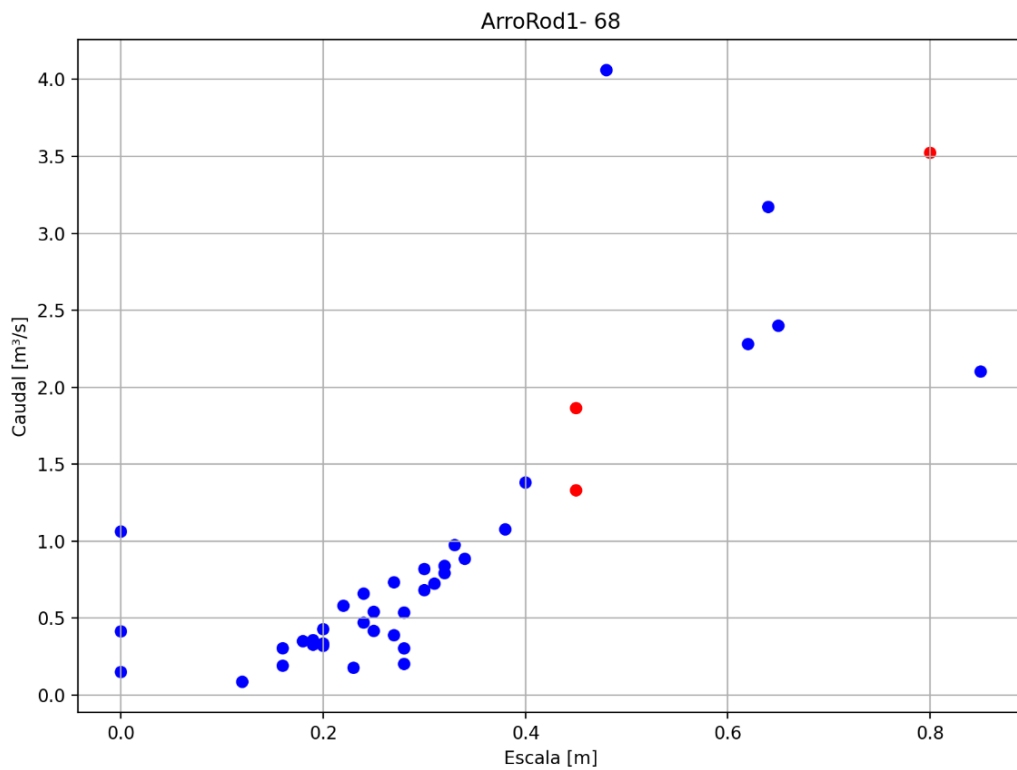


Figura 5.101. Aforos históricos realizados en EM68 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.50) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.102.

$$Q(h) = \{5,29016(h - 0,00559)^{1,67399} \quad 0,00 \leq h \leq 3,00$$

Ecuación 5.50. Curva HQ de la EM68.

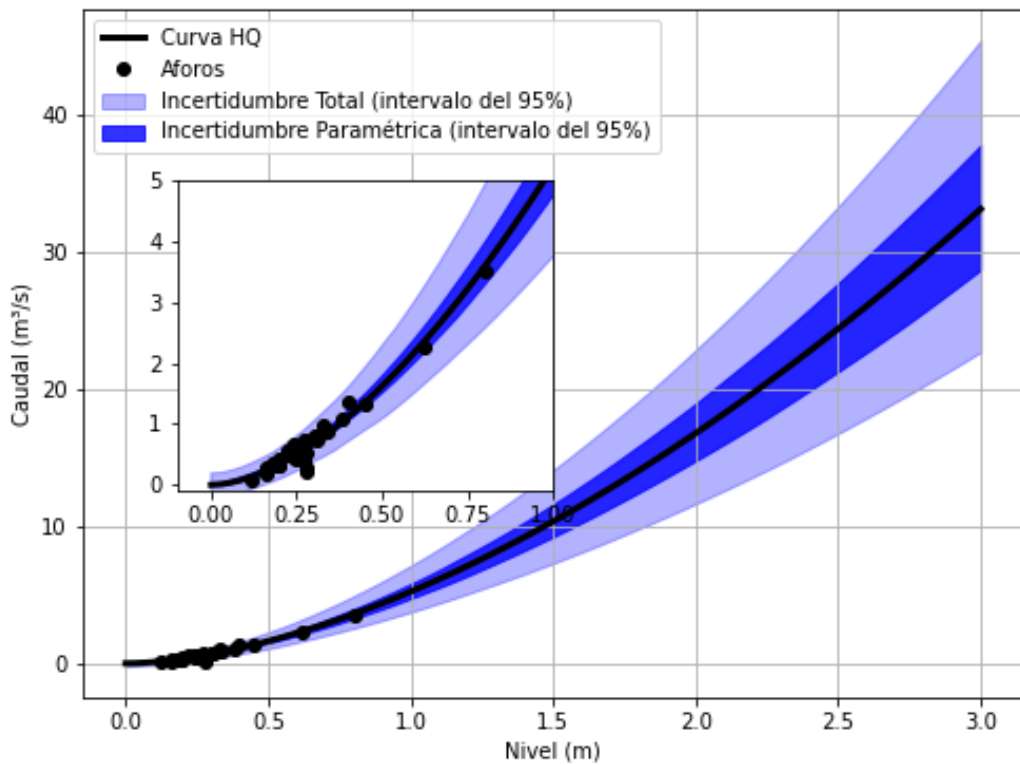


Figura 5.102. Curva HQ de la EM68 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.51 EM69

En esta estación se realizaron 45 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.103. A partir del análisis de los mismos se descartaron 36 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

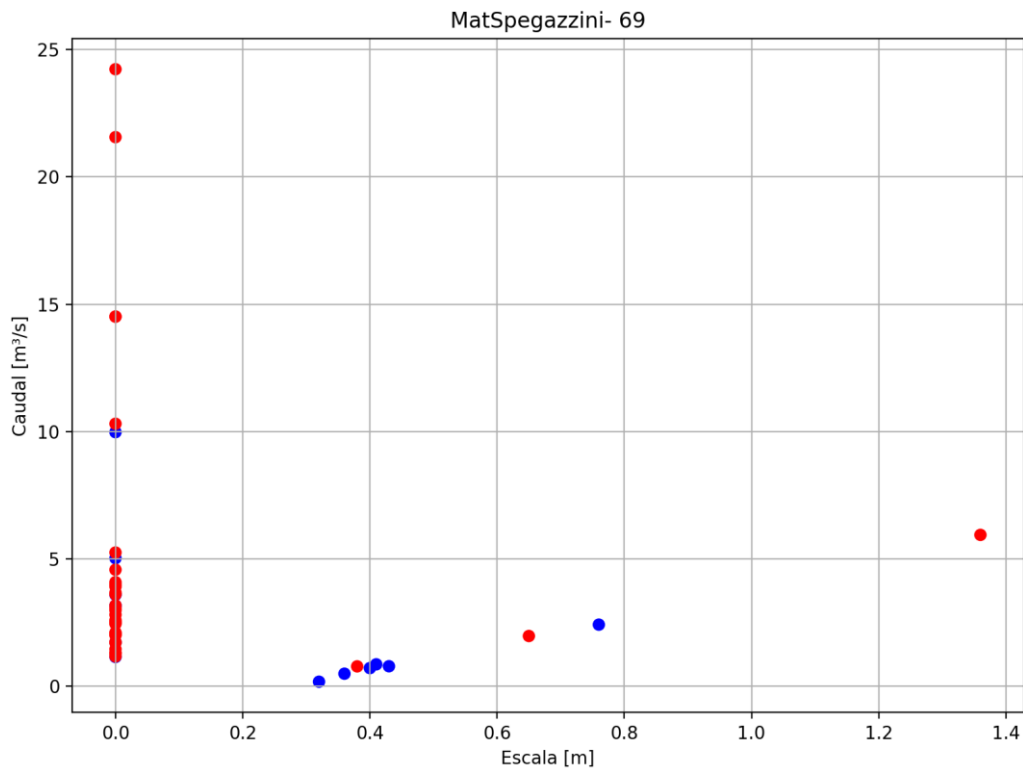


Figura 5.103. Aforos históricos realizados en EM69 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.51) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.104.

$$Q(h) = \begin{cases} 4,15243(h - 0,05433)^{1,66851} & 0,05 \leq h \leq 2,02 \\ 4,15243(h - 0,05433)^{1,66851} + 11,0255(h - 2,02475)^{1,68117} & 2,05 \leq h \leq 4,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.51. Curva HQ de la EM69.

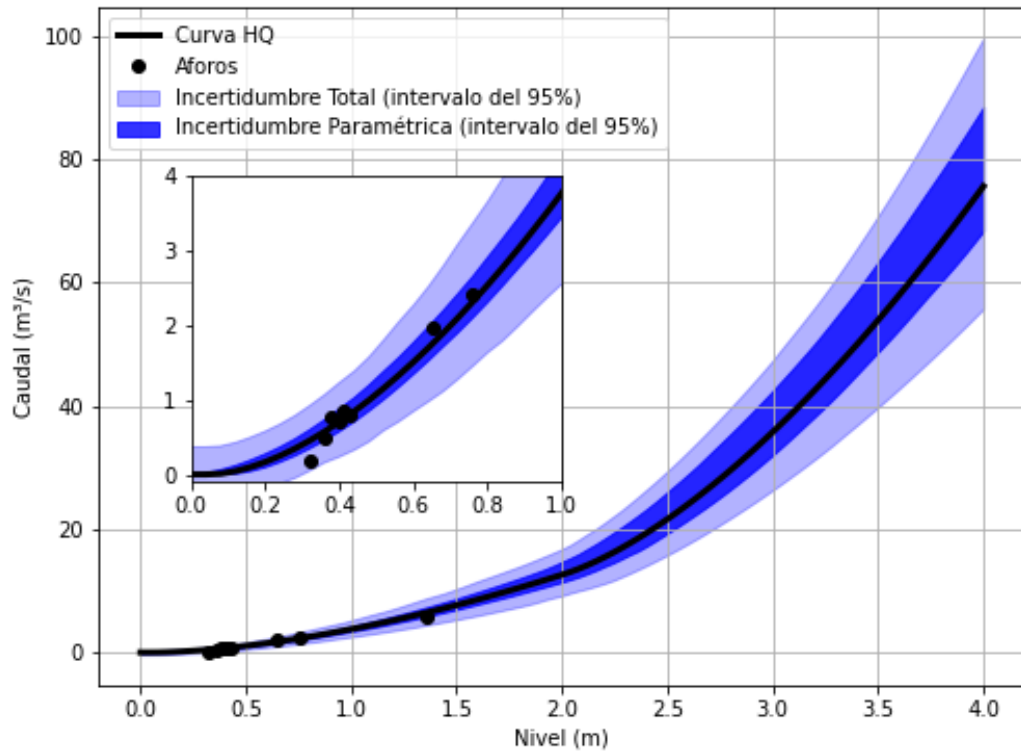


Figura 5.104. Curva HQ de la EM69 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.52 EM70

En esta estación se realizaron 52 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.105. A partir del análisis de los mismos se descartaron cuatro aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica.

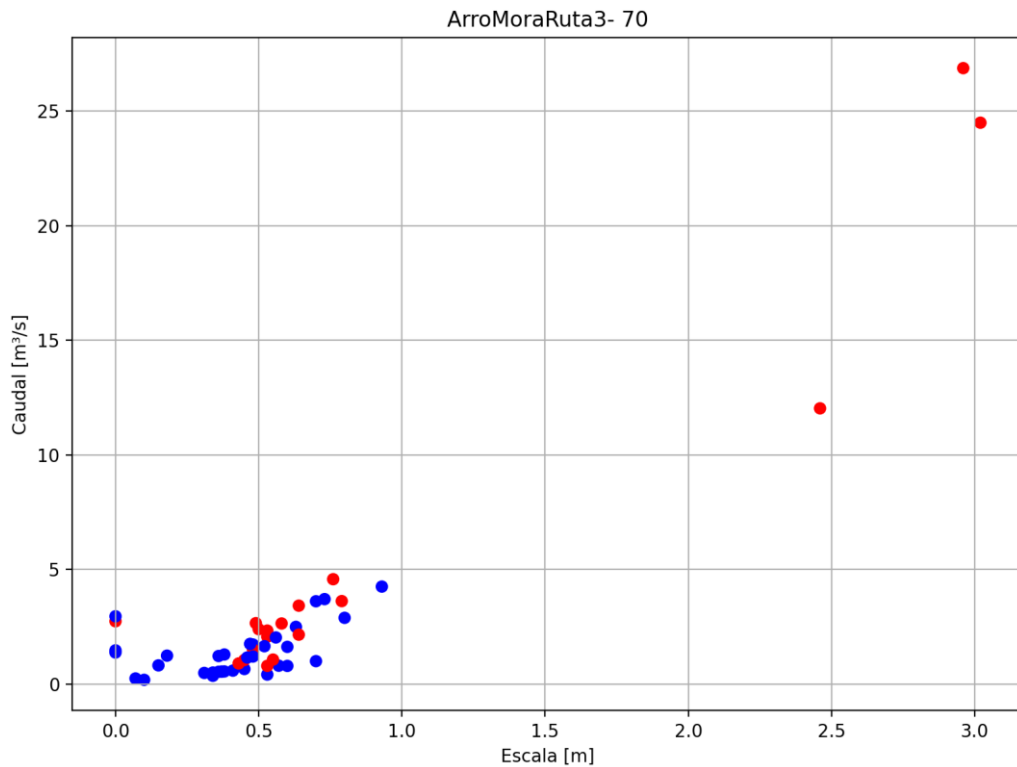


Figura 5.105. Aforos históricos realizados en EM70 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.52) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.106.

$$Q(h) = \begin{cases} 19,24770(h - 0,05481)^{1,51129} & 0,05 \leq h \leq 0,15 \\ 2,88020(h + 0,21191)^{1,67780} & 0,15 \leq h \leq 2,35 \\ 2,88020(h + 0,21191)^{1,67780} + 31,52060(h - 2,35331)^{1,67810} & 2,35 \leq h \leq 5,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.52. Curva HQ de la EM70.

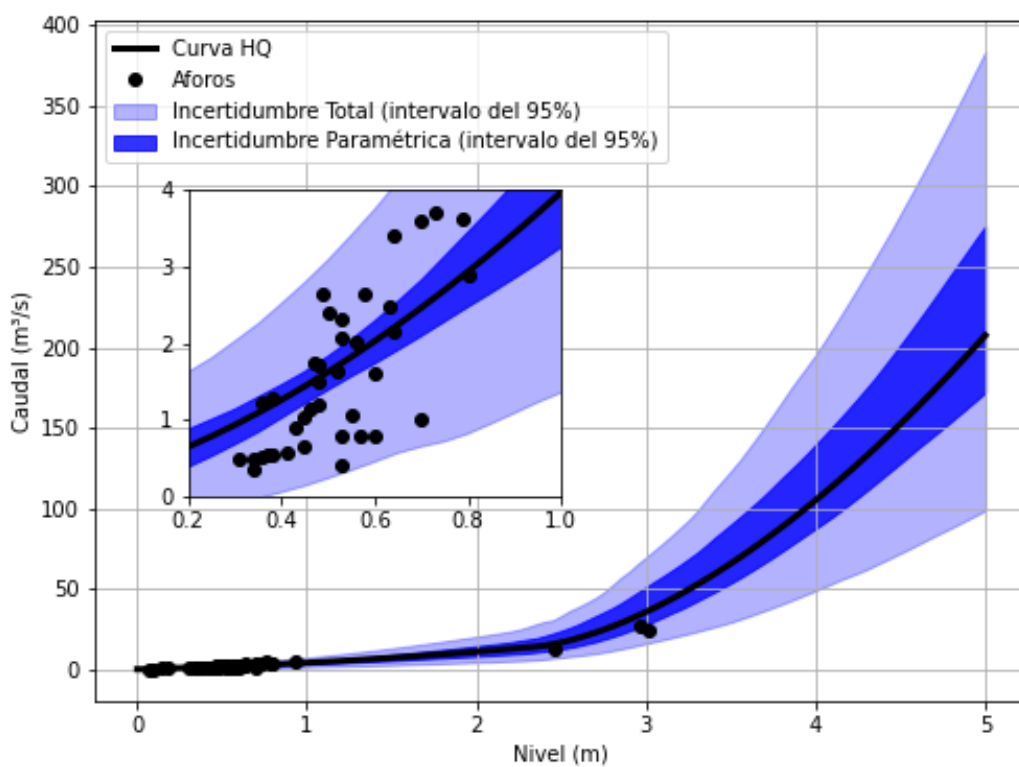


Figura 5.106. Curva HQ de la EM70 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.53 EM76

En esta estación se realizaron 26 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.107. A partir del análisis de los mismos se descartaron 16 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica y un aforo por presentar un valor poco consistente. Adicionalmente se descartó un aforo pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM76).

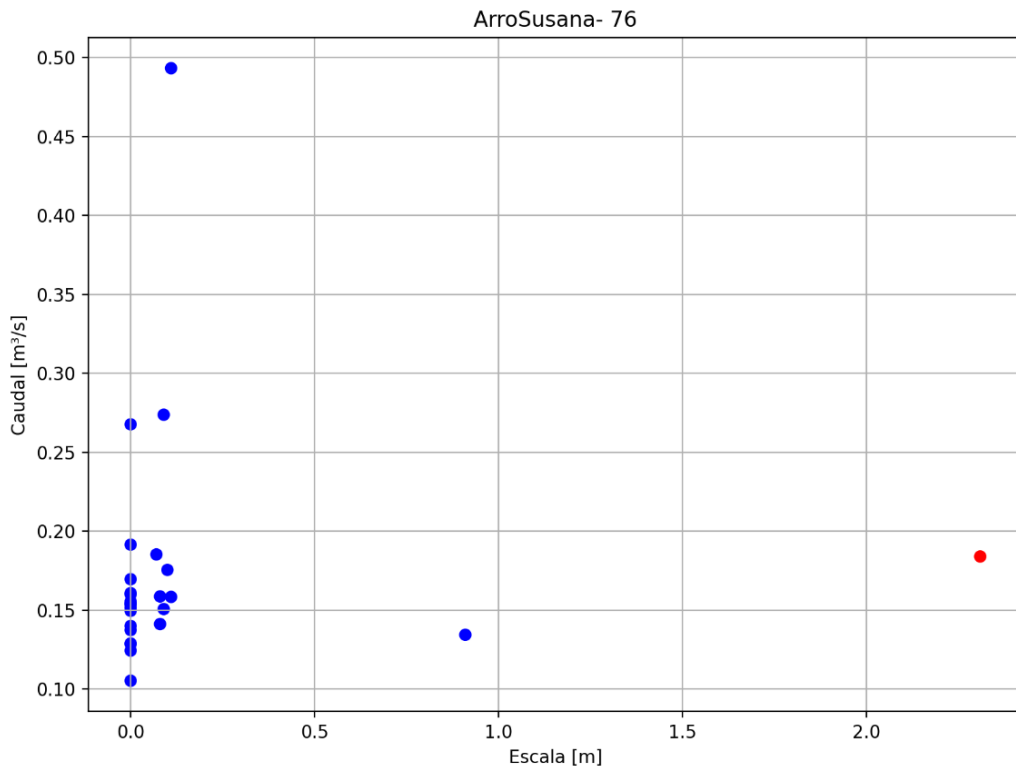


Figura 5.107. Aforos históricos realizados en EM76 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.53) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.108.

$$Q(h) = \begin{cases} 12,55240(h - 0,00586)^{1,67403} & 0,00 \leq h \leq 3,00 \end{cases}$$

Ecuación 5.53. Curva HQ de la EM76.

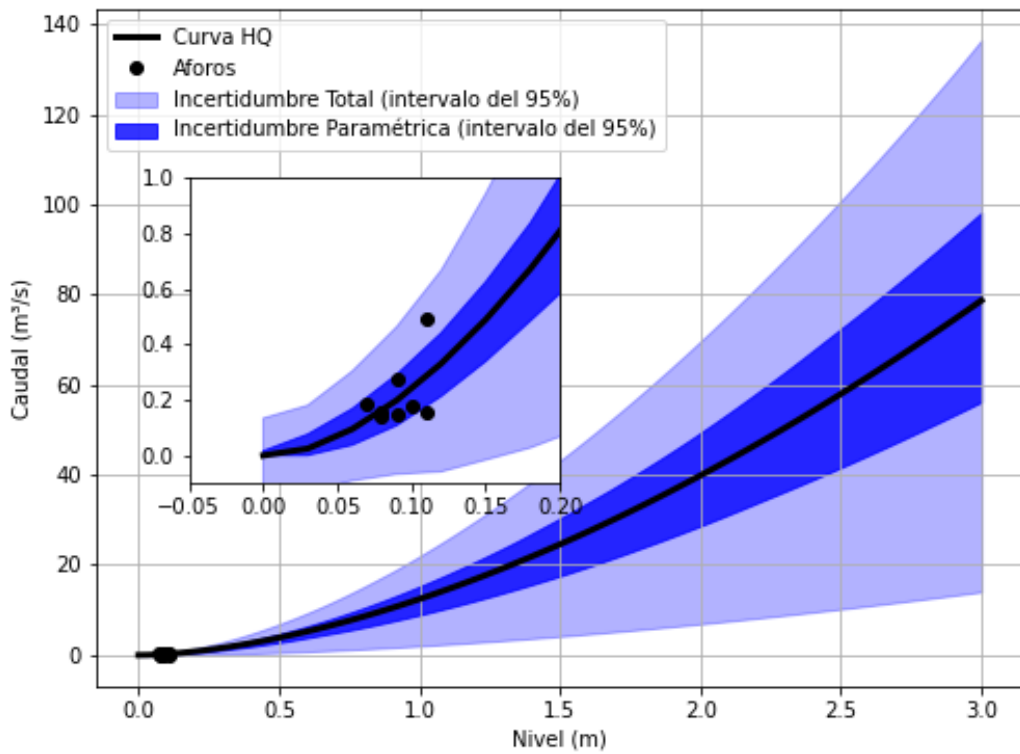


Figura 5.108. Curva HQ de la EM76 con sus respectivos intervalos de confianza.

5.54 EM77

En esta estación se realizaron 26 aforos, los cuales se pueden ver en la Figura 5.109. A partir del análisis de los mismos se descartaron 16 aforos por no tener asociados el nivel registrado en la regla hidrométrica. Adicionalmente se descartó un aforo pues el nivel registrado estaba influenciado por el nivel del río Matanza (el río Matanza presentaba condiciones de crecida, generando un remanso que afectaba los niveles en la sección de aforo de la EM77).

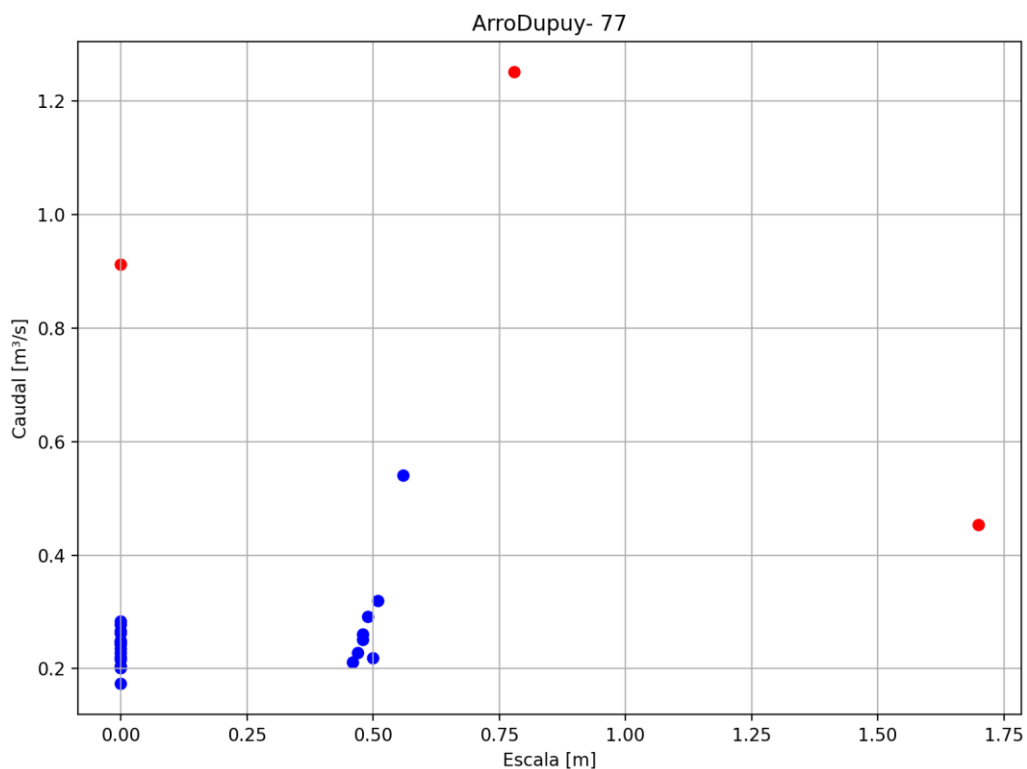


Figura 5.109. Aforos históricos realizados en EM77 con ADCP (círculos rojos) y ADV (círculos azules).

La curva HQ generada para la presente estación (ver Ecuación 5.54) junto con las bandas de incertidumbre asociada se presentan en la Figura 5.110.

$$Q(h) = \{3,81510(h - 0,28074)^{1,67888} \quad 0,28 \leq h \leq 2,00$$

Ecuación 5.54. Curva HQ de la EM77.

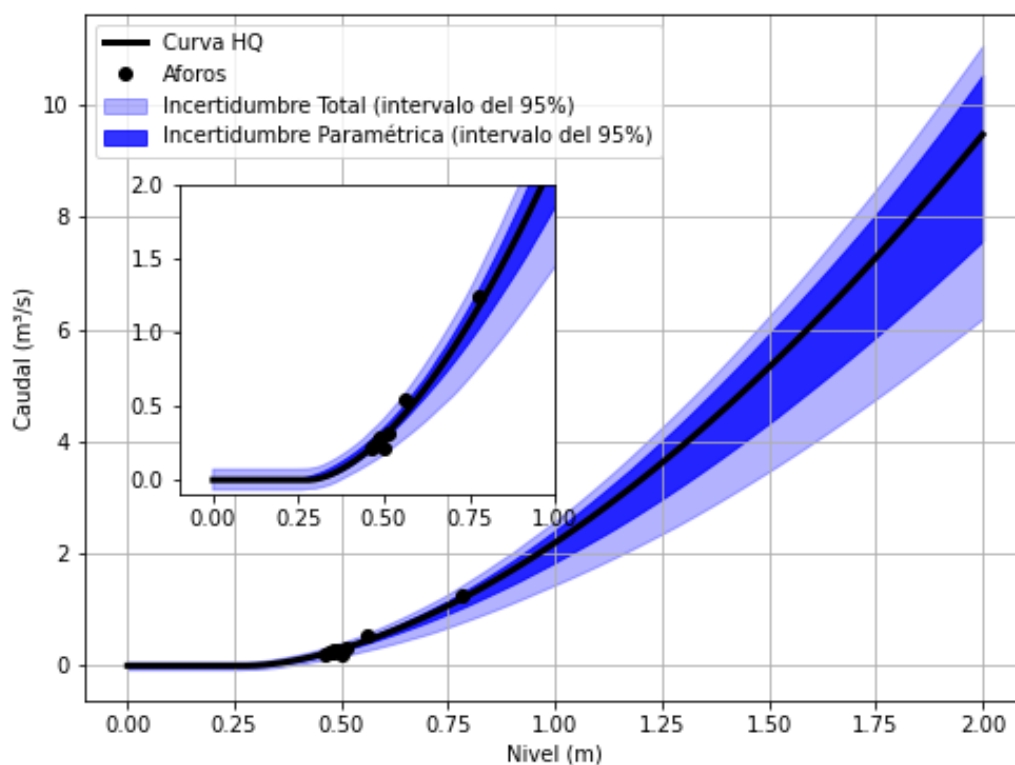


Figura 5.110. Curva HQ de la EM77 con sus respectivos intervalos de confianza.

6 Conclusiones y recomendaciones

Se obtuvieron relaciones entre alturas y caudales en diferentes estaciones de monitoreo de la red de ACUMAR. Las curvas HQ se generaron en las estaciones que cumplen con todos los requisitos para poder elaborar una relación entre alturas y caudales y cuentan con una cantidad razonable de aforos.

Se destaca la implementación de una novedosa metodología para obtener curvas HQ. Dicha metodología combina un análisis hidráulico de la estación y los aforos registrados en la misma utilizando la técnica de inferencia Bayesiana propuesta por Le Coz et al. (2014) mediante el software *BaRatinAGE* desarrollado por el INRAE (Institut National de Recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement) de Francia. Respecto a la metodología clásica de obtención de curvas HQ (que consiste en una regresión lineal minimizando el error cuadrático entre la función de ajuste y los pares de datos de altura y caudal obtenidos en campañas de aforo) este nuevo abordaje presenta una serie de ventajas que se detallan a continuación:

- Es de base física e incluye en el análisis las propiedades geométricas e hidráulicas del curso de agua.
- Permita tener distintos tramos de curvas según el nivel de agua.
- La curva generada por tramos es continua.
- Estima rangos de incertidumbre de la curva generada.
- Permita extrapolar para caudales más altos y bajos que los aforados.

La mayor cantidad de las campañas de aforos ejecutadas por ACUMAR tuvieron como objetivo caracterizar la calidad de los arroyos, es por eso que los mismos se realizaron en situación de aguas bajas (el 94% de los aforos se realizó en esta situación hidrológica). De lo visto en la elaboración de las curvas HQ surge la necesidad de contar con mayor cantidad de registros en situaciones de aguas medias o altas (como los aforos especiales realizados por ACUMAR en el año 2018). Esto es de suma importancia para verificar la performance de las curvas HQ generadas y, adicionalmente, sirve para ir disminuyendo los rangos de incertidumbres de las curvas (tal como se mostró para la curva HQ de la EM12, donde este grupo de trabajo tenía aforos previos en situaciones de aguas medias y medias-altas).

Algunas recomendaciones/sugerencias que surgen de este Informe:

- En futuras campañas de aforo, sería deseable informar todos los niveles registrados con una misma referencia (en particular en cotas IGN). Esto ayudaría a independizarse de cambios de escalas o referencias locales.
- En caso de que la estación de monitoreo no cuente con escala (o la misma tenga tramos faltantes o sea ilegible) se recomienda relevar la cota IGN del nivel del curso de agua al momento de realizar el aforo. De esta manera todos los aforos servirán para caracterizar hidrológicamente la cuenca y se podrán utilizar en el ajuste de las curvas HQ confeccionadas en este Informe. Un 15% de los aforos realizados no se pudo utilizar por este motivo.
- En algunas estaciones sería de suma utilidad contar con sensores automáticos de niveles. Además de caracterizar el nivel al momento de realizar un aforo, estos sensores tendrían múltiples usos, entre los que se destacan: caracterizar hidrológicamente la subcuenca asociada a esa sección, conocer los tiempos de crecidas y recesiones del cuerpo de agua y brindar información para mitigación de inundaciones.
- Actualizar periódicamente las monografías de las estaciones de monitoreo, indicando estado de las escalas, cambios en la sección (por trabajos de limpieza de margen), entorno, etc.
- Analizar si es necesario mantener todas las estaciones actuales. Desde el punto de vista hidrológico muchas no aportan información sustancial (pero si pueden ser de suma importancia para los muestreos de calidad de agua superficial).
- Verificar como se determinaron los niveles de escala informados en las campañas de aforos especiales realizadas en el 2018 (muchos de ellos son superiores a las longitudes de las escalas).

Referencias

- Fenton, J. D., and R. J. Keller (2001), The calculation of streamflow from measurements of stage, Tech. Rep. 01/6, Coop. Res. Cent. for Catchment
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Rubin, D.B., 2004. Bayesian Data Analysis. Texts in Statistical Science, second ed. Chapman & Hall.
- ISO 1100-2:2010 Hydrometry – measurement of liquid flow in open channels – Part 2: Determination of the stage-discharge relationship. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010, 28 p.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertainty gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587.
- Petersen-Overleir, A., Reitan, T., 2005. Objective segmentation in compound rating curves. *Journal of Hydrology* 311 (1–4), 188–201.
- Reitan, T., Petersen-Overleir, A., 2008. Bayesian power-law regression with a location parameter, with applications for construction of discharge rating curves. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 22 (3), 351–365.
- Renard, B., Garreta, V., & Lang, M. (2006). An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima. *Water Resources Research*, 42, W12422. <https://doi.org/10.1029/2005WR004591>
- UTN Fra – INA. (2018). Prosección de la modelación de la calidad del agua superficial en la cuenca hídrica Matanza Riachuelo.
- World Meteorological Organization, 2010. Manual on Stream Gauging. Computation of discharge WMO-No. 1044, vol. II, 195 p.

Anexo A –Detalle de la metodología para la elaboración de las curvas HQ

A.1. EM01

Descripción de la sección

La estación de monitoreo EM01 se encuentra sobre el río Matanza en el cruce con la Ruta Nacional N°3. El cauce del río se considera del tipo rectangular con controles para caudales bajos debido a formas de fondo que se encuentra a pocos metros aguas abajo de la sección de aforo (Figura A.1). Este control actúa como un vertedero elevando los niveles para caudales mínimos en la estación.

Una vez superado el nivel de la cresta del vertedero aguas abajo (vertedero ahogado), este pierde sus características y el río se comporta por las reglas de una sección rectangular. El río cuenta con una planicie en margen derecha en la sección de aforo hacia aguas abajo (Figura A.2) para caudales superiores. Esta planicie se encuentra a un nivel que se corresponde a 1,2 metros de altura en la regla hidrométrica.

El último control se encuentra en la planicie de inundación. Los caudales que sobrepasen esta altura son difícilmente aforados por lo que el error de la curva se incrementa fuertemente.



Figura A.1. Sección de control generada por estructuras en el fondo aguas abajo de la EM01.



Figura A.2. Planicie para caudales bajos en margen derecha (vista desde el puente hacia aguas abajo).

Configuración Hidráulica y curva HQ a priori

Como se mencionó en la descripción de la sección, para describir el funcionamiento de esta estación de monitoreo se emplean tres controles. El primer control representa la cresta del vertedero que es la altura mínima que debe alcanzar el agua para que exista un escurrimiento. Por debajo de ese nivel, no hay caudal pero si puede existir agua embalsada y medirse un nivel en la regla.

El segundo control representa a la terraza dentro del cauce y el tercero a la planicie de inundación. Estos últimos dos controles están asociados ya que hay una continuidad entre el escurrimiento antes y después de la planicie. Esto puede verse en la matriz que relaciona controles y segmentos (Figura A.3) donde queda claro que el control 2 actúa tanto para el segmento 2 como el 3.

Name	Number of controls		
MatyRut3 - 1	3		
Description			
	Control 1	Control 2	Control 3
Segment 1	<input checked="" type="checkbox"/>		
Segment 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Segment 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura A.3. Matriz de controles (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

A continuación se detallan los coeficientes seleccionados a priori de las ecuaciones que relacionan el nivel de agua con el caudal para para cada control:

Propiedades del Control 1 (ver Figura A.4):

El primer control está asociado a la estructura del fondo que se comporta como un vertedero rectangular ($H < 30$ cm).

- El coeficiente C_r indicador de las condiciones de escurrimiento del agua sobre el vertedero se impuso en 0,3, inferior al 0,4 de un vertedero ideal y con una incertidumbre de 0,05.
- El ancho de la sección B_w que se obtuvo del perfil batimétrico y se estableció en 7.5 metros y una incertidumbre de 1 metro.
- La gravedad es $9,81 \text{ m/s}^2$ con una incertidumbre de $0,01 \text{ m/s}^2$.
- El exponente c que para vertederos rectangulares adoptado es 1,5 con una incertidumbre de 0,05.
- El nivel del labio del vertedero se estableció en 0,5 metros en la escala local con una incertidumbre de 0,1 metros.

Prior assistant

$Q(h)=a(h-b)^c (h>k)$

$a=C_r B_w \sqrt{2g}$
 C_r : Coefficient ~ 0.4
 B_w : Weir width
 g : Gravity acceleration ~ 9.81
 c : Exponent ~ 1.5
 k : Control activation stage
 b : offset [deduced by continuity - no specification required]

Physical parameters **Rating curve parameters**

C_r [-]	0.3	+/- (uncertainty)	0.05	k (activation stage)	0.5	+/- (uncertainty)	0.1
B_w [m]	7.5	+/- (uncertainty)	1.0	a (coefficient)	9.966255565657546	+/- (uncertainty)	2.1271784839905408
g [m.s ⁻²]	9.81	+/- (uncertainty)	0.01	c (exponent)	1.5	+/- (uncertainty)	0.05
c [-]	1.5	+/- (uncertainty)	0.05	<input type="button" value="Compute"/>			
k [m]	0.5	+/- (uncertainty)	0.1	<input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/>			

Figura A.4. Propiedades del Control 1 (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Propiedades del Control 2 (ver Figura A.5):

El segundo control se manifiesta con la altura de la planicie para caudales bajos y se comporta como una sección rectangular.

- Se adoptó para el coeficiente de Manning un valor de 0,04. Este valor se obtuvo de la calibración del Modelo UTN Fra – INA (2018). La incertidumbre asociada es de 0,004.
- El ancho de la sección, al igual que en el control 1 se obtuvo de la topobatimetría, definiendo un ancho de 11 metros con una incertidumbre de 1 metro.
- La pendiente es de $6 \cdot 10^{-4}$ y una incertidumbre de $6 \cdot 10^{-5}$. El valor se obtuvo, como fue explicado previamente, de las secciones incorporadas al modelo hidrodinámico.
- Para el exponente c se adoptó un valor de 1,67 (valor teórico para secciones rectangulares) con una incertidumbre de 0,05.
- El nivel de inicio del control se estimó en 1,2 metros respecto al cero local con una incertidumbre de 0,2 metros. Este valor también se obtuvo de la topobatimetría.

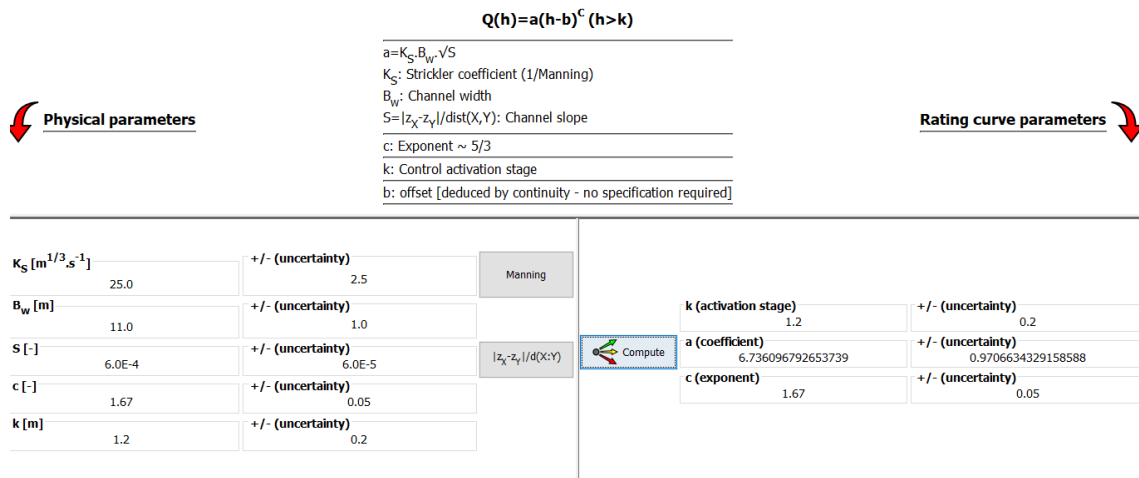


Figura A.5. Propiedades del Control 2 (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Propiedades del Control 3 (ver Figura A.6):

- El tercer control corresponde a la planicie de inundación para caudales extremos. También se comporta como un canal rectangular y está asociado al segundo control como se mostró en la matriz de la Figura A.3.
- La rugosidad mantiene el mismo valor que en el Control 2 (0,04 y una incertidumbre de 0,004).
- La pendiente también resulta igual al control 2.
- El exponente c se mantiene en 1,67.
- Finalmente el nivel de activación del control se establece en 6,8 metros según se infiere de la topobatimetría con una incertidumbre de 0,7 metros.

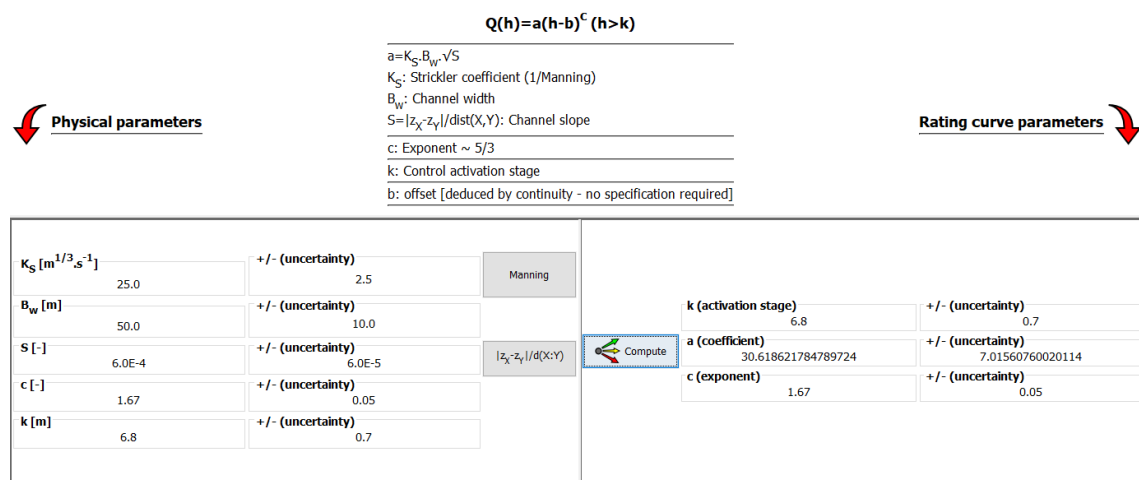


Figura A.6. Propiedades del Control 3 (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Se establecieron 1000 simulaciones de la curva a priori haciendo variar los valores de los coeficientes de las curvas de forma aleatoria. Se estableció una altura mínima del canal de 0 metros y una altura máxima de 8 metros. Como la activación del vertedero es a partir de los 0,5 metros, si este valor es correcto, recién a partir de este nivel se debería observar caudal escurriendo por el curso de agua.

La curva altura-caudal a priori obtenida se presenta en la Figura A.7. Se observa la curva en negro y el rango de incertidumbre en violeta. En línea verde oscuro se ven los niveles asociados a los tres controles (con su rango de incertidumbre en verde claro).

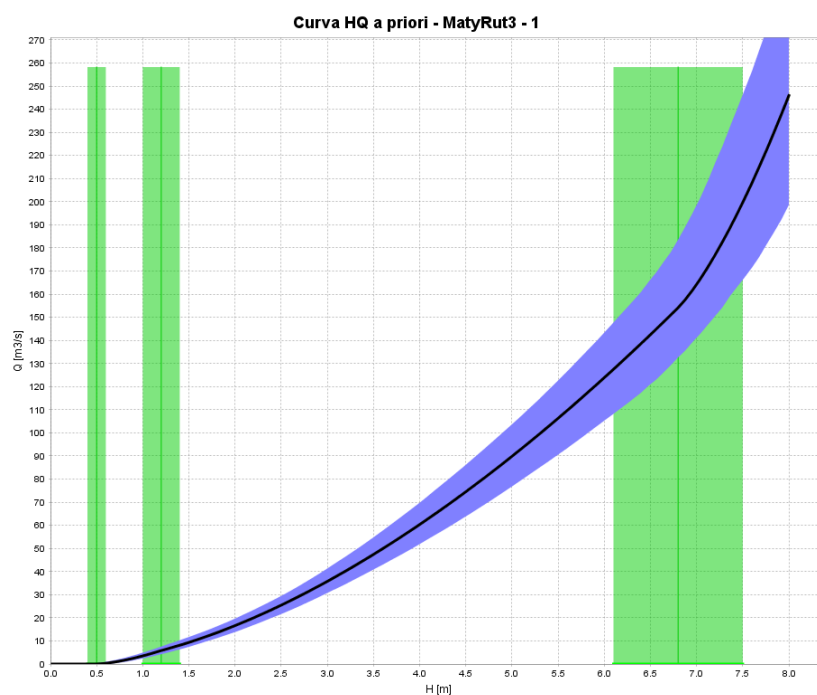


Figura A.7- Curva HQ a priori (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Aforos

Para la estimación de la curva HQ a posteriori se utilizaron 53 aforos (Figura A.8). 26 aforos fueron realizados con ADV (a los que se les asignó un error del 10%) y el resto (27 aforos) con ADCP (con un error del 5%).

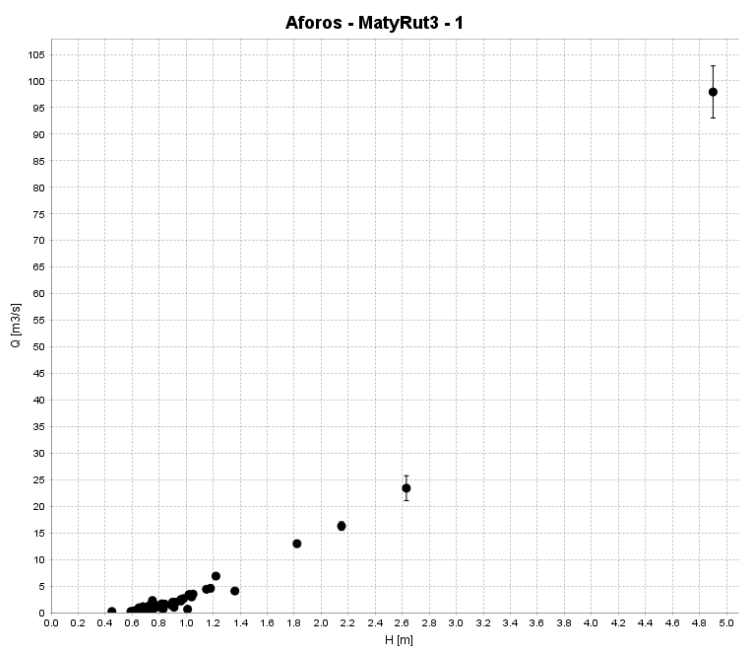


Figura A.8. Aforos utilizados para el ajuste (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Ajuste

El ajuste se genera con el método de Cadena de Markov - Monte Carlo (MCMC) y un error remanente con el método lineal, 1000 iteraciones y 101 pasos verticales.

Se presenta la comparación de las distribuciones a priori (en azul) y a posteriori (en rojo) para los diferentes parámetros (Figura A.9). Se observa un sesgo del parámetro a del Control 1 hacia valores inferiores a los estimados a priori. Los demás parámetros se infieren bien estimados a priori. Esta sobrestimación del parámetro a puede estar indicando que el ancho estimado de 7 metros es realmente menor o el coeficiente de vertedero es aún menor al 0,3 estimado.

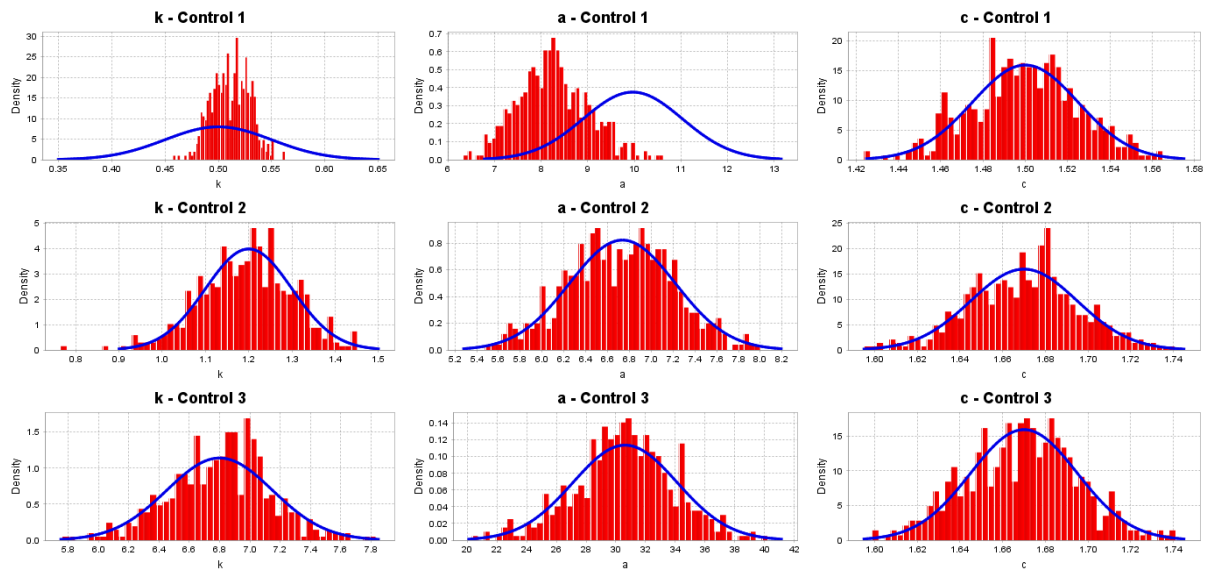


Figura A.9. Comparación de parámetros a priori y a posteriori (captura de pantalla obtenida del software *BaRatinAGE*).

Curva HQ

La curva HQ a posteriori generada se presenta en la siguiente ecuación (la misma tiene 3 intervalos de validez y el último tramo incluye 2 componentes producto de la construcción de la matriz de controles):

$$Q(h) = \begin{cases} 8,53855(h-0,51237)^{1,50081} & 0,51 \leq h \leq 1,19 \\ 6,83759(h-0,38185)^{1,69728} & 1,19 \leq h \leq 6,55 \\ 6,83759(h-0,38185)^{1,69728} + 29,5781(h-6,55117)^{1,67985} & 6,55 \leq h \leq 8,00 \end{cases}$$

Curva HQ de la EM01

En la Figura A.10 se puede ver la curva HQ a posteriori (línea negra) junto con los intervalos de confianza de los parámetros (azul oscuro) y el intervalo de confianza total (con un rango más amplio y un azul más claro)

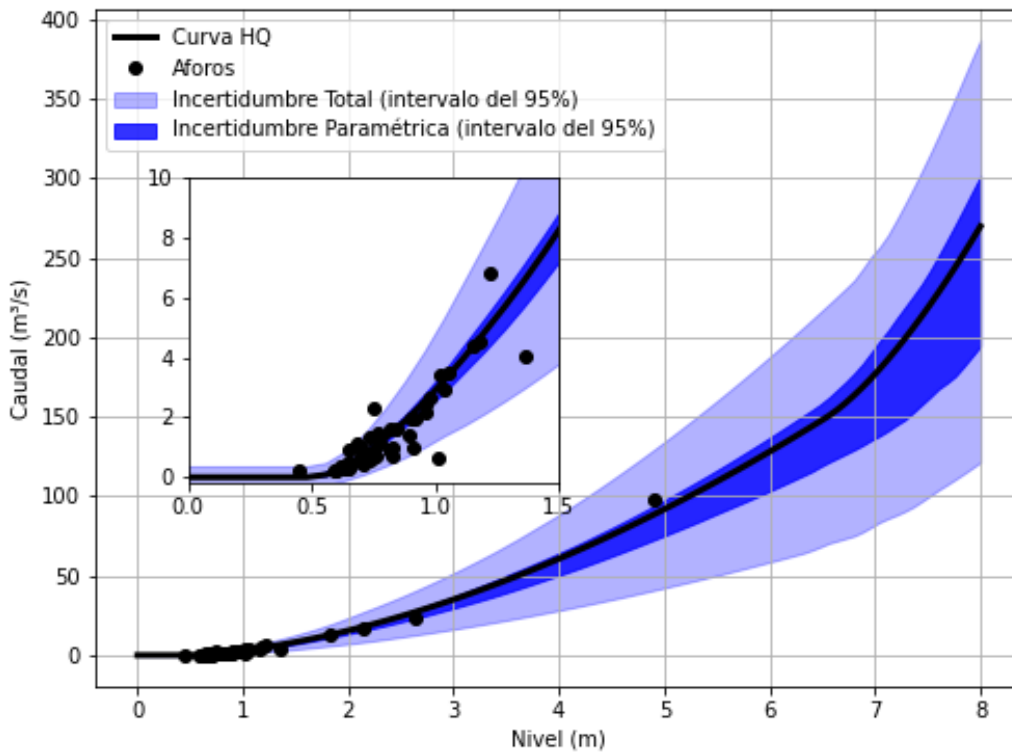


Figura A.10. Curva HQ generada a posteriori para la EM01.

La comparación entre las curvas a priori y a posteriori (Figura A.11) muestra la correcta aproximación de la construcción de la curva utilizando parámetros geométricos.

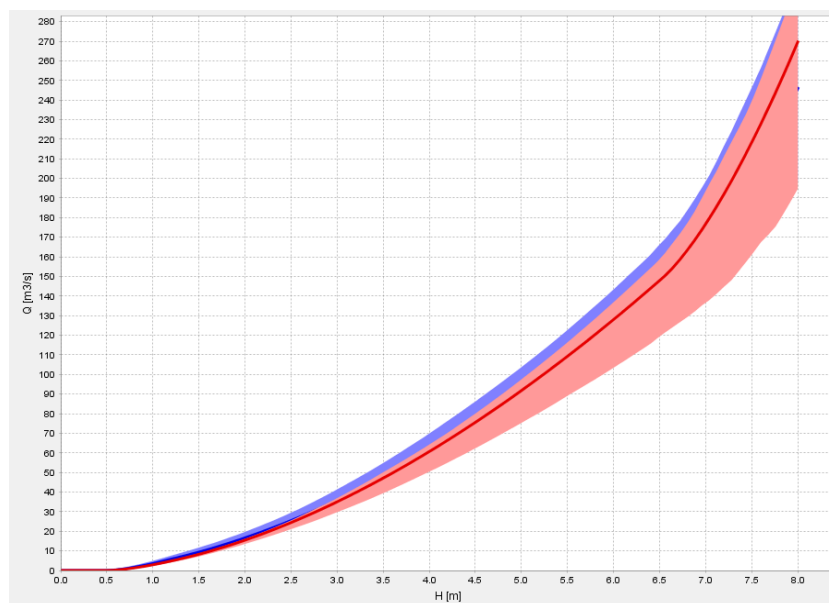


Figura A.11. Comparación de curvas a priori (azul) y a posteriori (rojo) con sus respectivos rangos de incertidumbre.