



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

“Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingenieros Ambientales.

Modalidad: Proyecto de investigación.

Autores:

Christian Andrés Quezada Ochoa - CI: 0105904866

Correo Electrónico: chris121395@gmail.com

María del Carmen Quizhpi Calle - CI: 0104405220

Correo Electrónico: mariadelcarmenq20@gmail.com

Director:

Ing. Aleksandr Khachatryan MSc.

CI: 1750967182

Asesor:

Ing. Pablo Guzmán PhD.

CI: 0102260106

Cuenca - Ecuador

02-enero-2020



RESUMEN

El estiaje es un fenómeno natural que se manifiesta a través de precipitaciones por debajo de los límites normales con duración, frecuencia y severidad difícil de predecir (Pacheco, Parra, & Avilés, 2017). Durante las épocas de estiaje, el caudal de los ríos proviene principalmente del flujo de aguas subterráneas (caudal base). En el periodo 2009 a 2011 Ecuador atravesó diferentes épocas secas críticas, afectando la generación de energía eléctrica del país. El Complejo Hidroeléctrico Paute también se vio afectado debido al bajo nivel que presentó su embalse, cuyo principal afluente es el río Paute y con ello el aporte hídrico de las subcuencas que confluyen en éste. Por lo cual, los objetivos de este estudio son conocer cómo en dicho periodo el caudal base del río Paute fue influenciado por la subcuenca del río Machángara con regulación artificial en relación a las subcuencas de los ríos Tarquí y Yanuncay en las que sólo existe regulación natural y realizar un análisis comparativo de las características asociadas al caudal base entre éstas, mediante el empleo de análisis de recesión no lineal y filtros digitales.

La subcuenca del río Machángara durante el periodo de análisis aportó con el 15% de caudal base a la cuenca media del río Paute, en relación a las subcuencas de los ríos Tarquí y Yanuncay con el 6% y 12% respectivamente. Asimismo, su capacidad de almacenamiento fue superior frente a las otras subcuencas, condición que puede deberse a los embalses existentes en la zona. Este estudio constituye una herramienta de análisis hidrológico para la gestión y manejo adecuado del recurso hídrico a través del entendimiento de las características físicas asociadas al caudal base en subcuencas con regulación natural y artificial en la región andina del Ecuador, especialmente en la cuenca del río Paute.

Palabras clave: Estiaje. Caudal base. río Paute. Subcuenca del río Machángara. Regulación artificial. Subcuenca del río Tarquí. Subcuenca del río Yanuncay. Regulación natural. Análisis de recesión no lineal. Filtros digitales.



ABSTRACT

Drying is a natural phenomenon that is manifest through rainfall below normal limits with duration, frequency and severity difficult to predict (Pacheco, Parra, & Avilés, 2017). During the dry season, the flow of the rivers comes mainly from the flow of groundwater (base flow). In the period 2009 to 2011 Ecuador went through different critical dry seasons, affecting the country's electricity generation. The Paute Hydroelectric Complex was also affected due to the low level of its reservoir, whose main tributary is the Paute river; and with it the water supply of the sub-basins that converge in it. Therefore, the objectives of this study are to know how in that period the base flow of the Paute river was influenced by the sub-basin of the Machángara river with artificial regulation in relation to the sub-basins of the Tarqui and Yanuncay rivers in which there is only natural regulation, and to carry out a comparative analysis of the characteristics associated with the base flow rate between them, through the use of non-linear recession analysis and digital filters.

The sub-basin of the Machángara river during the analysis period contributed with 15% of base flow to the middle basin of the Paute river, in relation to the sub-basins of the Tarqui and Yanuncay rivers with 6% and 12% respectively. Also, its storage capacity was higher compared to the other sub-basins, a condition that may be due to existing reservoirs in the area. This study constitutes a hydrological analysis tool for the adequate arrangement and management of the water resource through the understanding of the physical characteristics associated with the base flow in sub-basins with natural and artificial regulation in the Andean region of Ecuador, especially in the Paute river basin.

Keywords: Drying, base flow, Paute river. Sub-basin of the Machángara river. Artificial regulation. Sub-basin of the Tarqui river. Sub-basin of the Yanuncay river. Natural regulation. Non-linear recession analysis. Digital filters.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
DEDICATORIA	11
AGRADECIMIENTOS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo General.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	17
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Área de estudio	20
3.2. Modelos Perceptuales	23
3.3. Procesamiento de la información.....	26
3.3.1. Análisis visual - determinación de datos faltantes.....	27
3.3.2. Análisis de curva de doble masa.....	27
3.3.3. Media Móvil	28
3.4. Precipitación media de la subcuenca alta del río Machángara	28
3.5. Determinación de cobertura de páramo en la subcuenca del río Machángara.	30
3.6. Evaluación de caudal base	30
3.6.1. Filtros Digitales	30
3.6.2. Análisis de recesión no lineal	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1. Cobertura de páramo de la subcuenca del río Machángara	39
4.2. Determinación de caudal base	40
4.2.1. Análisis de recesión no lineal	40
4.2.2. Filtros Digitales	42
4.3. Aporte de las subcuencas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo 01/01/2009 a 14/08/2011	44
5. CONCLUSIONES	47
	4



6. RECOMENDACIONES	48
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
8. ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipo y ubicación de estaciones en la subcuenca del río Machángara y la cuenca media del río Paute	27
Tabla 2: Superficie total y superficie de páramo en las subcuencas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara y subcuenca alta del río Machángara	40
Tabla 3: Variación del parámetro " a " ($m^{3-3b}s^b$) de Recesión no lineal en función de $b = 0.5$ para las subcuencas altas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara	41
Tabla 4: Variación de la relación $a/\text{Área}$ ($m^{3-3b}s^b m^{-2}$) en función de " b " para la subcuenca alta y baja de los ríos Tarqui, Yanuncay y la subcuenca alta del río Machángara $a/\text{Área}$	41
Tabla 5: Caudal base específico acumulado en el periodo 01/01/2009 - 14/08/2011 para las subcuencas de los ríos Tarqui, Yanuncay y Machángara	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de las subcuencas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca del río Paute.....	20
Figura 2: Elevación de la subcuenca del río Machángara, ubicación del Complejo Hidroeléctrico Machángara y de las estaciones meteorológicas e hidrológicas.....	22
Figura 3: Modelo perceptual A.....	24
Figura 4: Modelo perceptual B	24
Figura 5: Modelo perceptual C.....	25
Figura 6: Modelo perceptual propuesto para la subcuenca alta del río Machángara	26
Figura 7: Áreas de influencia para la determinación de la precipitación media diaria a través de polígonos de Thiessen en la subcuenca alta del río Machángara.....	29
Figura 8: Proyección de caudal base a la salida de las subcuencas en estudio a través de filtros digitales	34
Figura 9: Subcuencas altas consideradas en el análisis de recesión no lineal	38
Figura 10: Cobertura de páramo en la subcuenca del río Machángara	39



Figura 11: Esquema del proceso de recarga en una cuenca con regulación natural.....	43
Figura 12: Esquema del proceso de recarga en una cuenca con regulación artificial	44
Figura 13: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo 2009 a 2011	44
Figura 14: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo crítico 1 (12/07/2009 a 26/11/2009).....	45
Figura 15: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo crítico 2 (18/09/2010 a 12/10/2010).....	46



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Christian Andrés Quezada Ochoa en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, enero de 2020.

Christian Andrés Quezada Ochoa

C.I: 0105904866



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

María del Carmen Quizhpi Calle en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, enero de 2020.

María del Carmen Quizhpi Calle

C.I: 0104405220



Cláusula de Propiedad Intelectual

Christian Andrés Quezada Ochoa, autor del trabajo de titulación “Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, enero de 2020.

Christian Andrés Quezada Ochoa

C.I: 0105904866



Cláusula de Propiedad Intelectual

María del Carmen Quizhpi Calle, autora del trabajo de titulación “Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, enero de 2020.

María del Carmen Quizhpi Calle

C.I: 0104405220



DEDICATORIA

Al ser omnipotente que dirige mi vida; Dios.

A mis padres Mónica y Fausto por estar siempre de manera incondicional, agradezco las pequeñas y grandes luchas que han realizado por mí y conmigo desde pequeña. Tal vez el camino no ha sido sencillo, pero les aseguro que todo ha valido completamente la pena. Gracias por el amor, cuidado y enseñanzas dirigidas a nosotros sus hijos, en busca de formar seres humanos llenos de valores; espero estar cumpliendo sus expectativas. Gracias por siempre creer en mí y por recordármelo en todo momento.

A mis hermanos Mónica y Carlos; compañeros de vida, quienes han sabido llenar mi existencia con su cariño, humor y bromas. Sueñen mucho y nunca duden de ustedes. A mi sobrinita Anabel, que sepas que cada una de tus metas pueden cumplirse con esfuerzo y dedicación, recuerda que creer es crear.

A mis amigos, por las risas, chistes y experiencias compartidas a lo largo de esta trayectoria universitaria. El camino es ameno junto a ustedes, gracias por estar.

A mi compañero de tesis y gran amigo Christian, sin duda una de las aventuras más gratas de mi vida ha sido junto a ti en este proyecto de investigación.

María del Carmen.



DEDICATORIA

Al rey celestial que me da la oportunidad de vivir cada día con intensidad y con su luz.

A mis padres Manuel y Alexandra, quienes con basto amor y ternura me apoyaron en cada paso de mi vida y éste es uno de ellos. Nadie como ellos para darme el ejemplo de lucha y valentía para seguir adelante.

A mis hermanos Marcelo y Camila por los momentos compartidos y los sentimientos de hermandad que han depositado en mí. Ustedes son mi ejemplo y mis compañeros de vida.

A mi gran amigo Pancho por los consejos, apoyo y amistad verdadera, de la misma manera a Leo por tu valiosa compañía. A Caio por los momentos divertidos y la comida. A mis amigas queridas Jossy, Joha, Caro, Tanya, Gabi, Iri, Magy, quienes han compartido conmigo momentos inolvidables y me han enseñado mucho en este caminar de la U.

A mis amigos de mi querido Nabón; Al padre Fabián González por sus enseñanzas y testimonio, a Edwin, Jhefferson y Pauli amigos del coro que con la música fue todo más llevadero.

A Maqui, la compañera ideal para este trabajo de titulación. Tu carácter y amistad me demostraron que con perseverancia y el esfuerzo se llega a grandes cosas. Cada momento contigo valió la pena vivirlo.

Christian



AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos al tutor de este proyecto, el Ing. Aleksandr Khachatryan, por los altos estándares de exigencia, paciencia y tiempo dedicado hacia nosotros.

Al Ing. Pablo Guzmán Cárdenas por habernos transferido tan valiosos conocimientos, los cuales fueron vitales para la ejecución y desarrollo de esta tesis. Asimismo, por la información brindada para el presente estudio. Gracias por las enseñanzas, por dar oportunidades y creer en nosotros.

A las instituciones involucradas y sus respectivos representantes, quienes facilitaron información relevante para llevar a cabo este estudio: a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), a la Empresa Electro Generadora del Austro (ELECAUSTRO S.A.) y a la Secretaría del Agua (SENAGUA).

Finalmente queremos agradecer al Programa de Manejo de Agua y Suelo de la Universidad de Cuenca (PROMAS) por la disposición de sus instalaciones y asesoría en la realización de este proyecto de investigación.

Christian y María del Carmen.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El agua es el recurso que sostiene la vida en el planeta, cuya disponibilidad y calidad cada vez es más crítica por factores climáticos y antrópicos, llevando a conflictos por la producción de los principales servicios al ser humano como la potabilización, riego y generación de energía eléctrica (Quintero, 2010).

Estas calamidades son un reflejo de fenómenos naturales como la sequía, caracterizada por precipitaciones debajo de los límites normales con frecuencia, duración y severidad incierta (Pacheco et al., 2017). No obstante, en dichos periodos ocurre un proceso hidrológico importante, donde los ríos y cauces son abastecidos por el flujo de aguas almacenadas en el subsuelo o flujo base (Cadier, Gómez, & Calvez, 1997).

Alrededor del mundo se ha estudiado el caudal base con distintos enfoques y diferentes metodologías empleadas en su estimación: filtros digitales (Eckhardt, 2005; Lyne & Hollick, 1979; Nathan & McMahon, 1990), filtros físicos (Furey & Gupta, 2001), análisis de recesión no lineal (Wittenberg, 1994, 1999) y trazadores experimentales (Chapman & Maxwell, 1996). En función de estos métodos, se han realizado comparaciones y además se ha logrado establecer relaciones entre los procesos de caudal base y características de cuencas hidrográficas, tales como la capacidad de retención y almacenamiento de aguas subterráneas, recarga en acuíferos y condiciones hidrogeológicas de la cuenca.

Estudios realizados por diferentes autores en la región altoandina sostienen que el ecosistema páramo es el contribuyente principal de caudal base (Buytaert, De Bièvre, Wyseure, & Deckersm, 2004; Buytaert et al. 2006c; Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, 2007; Aksoy & Wittenberg, 2011). Cabe mencionar que dichos estudios se han aplicado a cuencas pequeñas de cobertura homogénea. A su vez, Guzmán, Batelaan, Huysmans, & Wyseure (2015) en su estudio investigaron las características de flujo base en las cuencas andinas heterogéneas e identificaron las relaciones entre las características físicas asociadas a éste como el almacenamiento y la recarga. La investigación se realizó en las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay, las cuales cuentan con regulación natural y son de mayor tamaño.

Por otra parte, en cuencas con regulación artificial como la del río Machángara, Carchi (2015) realizó un estudio sobre el balance hídrico en el periodo 1998-2011. Asimismo,



Avilés (2017) en su estudio pronosticó eventos de sequías y evaluó el riesgo en la gestión de sistemas hídricos. Sin embargo, no existen estudios enfocados al proceso de caudal base a nivel de esta subcuenca.

1.2. Justificación

Durante los años 2009 y 2010 varios países andinos atravesaron uno de los periodos de estiaje más severos. Ecuador por su parte se vio afectado por pérdidas en el sector agro ganadero y energético, lo que dio lugar al Decreto Ejecutivo N°124 emitido el 6 de noviembre del 2009 por el presidente de la República de aquel periodo, declarando al país en estado de Excepción Eléctrica.

El complejo hidroeléctrico Paute (uno de los más importantes de la región Andina) ubicado en la cuenca del mismo nombre también se vio afectado debido al bajo nivel que presentaron sus embalses, cuyo principal afluente es el río Paute y con ello el aporte hídrico de las subcuencas que confluyen en éste. Ante esto, resulta de especial interés conocer cómo en dicho periodo el caudal base del río Paute fue influenciado por la subcuenca del río Machángara con regulación artificial en relación a las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay en las que sólo existe regulación natural de sus caudales. Asimismo, se pretende identificar las relaciones entre el caudal base y las características del medio físico para establecer comparaciones entre las subcuencas mencionadas.

Por lo tanto, este estudio constituye una herramienta de análisis hidrológico para la caracterización del flujo base en cuencas andinas del Ecuador y a su vez busca proporcionar información que será útil para el entendimiento de las características físicas asociadas a éste en subcuencas reguladas y no reguladas, especialmente en la cuenca del río Paute.



1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Estimar y analizar la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo 2009 - 2011.

1.3.2. Objetivos Específicos

- i. Estimar el caudal base de la subcuenca del río Machángara y del río Paute en el periodo 2009 – 2011.
- ii. Analizar la relación entre el caudal base y las características del medio físico de la subcuenca del río Machángara.
- iii. Comparar el caudal base de la subcuenca del río Machángara frente al de las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay respecto al caudal base del río Paute en el periodo 2009 – 2011.
- iv. Valorar el aporte del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay al caudal base del río Paute en el periodo 2009 – 2011.

2. MARCO TEÓRICO

El agua en la naturaleza no permanece estática, más bien responde a un ciclo; el cual abarca diferentes etapas o fases en las que se muestra el movimiento que atraviesa al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera nuevamente (Campos, 1998; Maderey & Jiménez, 2005).

Por tanto, se puede considerar que el ciclo inicia con la evaporación del agua de toda superficie evaporante y se eleva hacia la atmósfera hasta cierta altura, en donde bajo condiciones meteorológicas adecuadas se condensa formando nubes, las cuales darán lugar a precipitaciones ya sea en forma líquida (lluvia), sólida (granizo o nieve) y gaseosa (rocío). No toda la precipitación llega a la superficie ya que una parte se evapora durante su caída, mientras que otra es interceptada por la vegetación y después de un corto periodo de tiempo se evapora, regresando nuevamente a la atmósfera (Campos, 1998; Jiménez, 1994; Maderey & Jiménez, 2005).

De la precipitación que llega a la superficie una parte puede caer directamente sobre superficies líquidas (ríos, lagos, lagunas, etc.) y otra se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales desembocan en los cauces de los ríos (escorrentía superficial) desde donde se evapora o bien se infiltra (Campos, 1998; Maderey & Jiménez, 2005).

La parte de la precipitación que se infiltra tiende a satisfacer las condiciones de humedad del suelo y posteriormente puede llegar a saturarlo, de manera que el agua se desplaza en un corto recorrido lateral sobre el nivel freático y sale hacia los cauces (escorrentía subsuperficial) (Campos, 1998; Llambí et al., 2012). Sin embargo, existe una parte del agua infiltrada que percola hacia el agua subterránea, esta fracción de agua añadida se denomina “recarga de agua subterránea”. Este proceso determina una respuesta lenta en el que el flujo subterráneo se escurre hacia los cauces como caudal base (Millares, Polo, Losada, Aguilar, & Herrero, 2009). Smakhtin (2001) señala que el caudal base está relacionado o proviene también de fuentes retardadas como glaciares, lagos y humedales; siendo un proceso natural que permite mantener el flujo durante periodos de escasa precipitación o estiaje.

De las tres escorrentías descritas, la más rápida es la superficial seguida de la subsuperficial con una velocidad de respuesta de minutos y horas, mientras que la escorrentía subterránea al permanecer por un tiempo prolongado (semanas, años e incluso décadas) hasta salir hacia los cauces es la más lenta (Llambí et al., 2012) .

A lo largo del tiempo, ha surgido la necesidad de estimar cuantitativamente los elementos del ciclo hidrológico centrándose en el funcionamiento de las cuencas hidrográficas; donde ocurren diferentes procesos hidrológicos interactivos que pueden ser determinados en el balance hídrico, el cual puede ser definido a través de la ecuación de conservación de masa, la misma que indica los valores relativos de entrada (I), salida (O) y la variación de agua almacenada en la cuenca (ΔS) en un periodo de tiempo (Llambí et al., 2012) , como se muestra:

$$I - O = \Delta S \quad (1)$$

Los volúmenes de entrada a la cuenca comprenden la precipitación (P), mientras que los volúmenes de salida en la ecuación incluyen la evapotranspiración (ET), el caudal del río (Q) y el flujo neto de agua subterránea que sale del límite de la cuenca sin pasar por la salida (G) (Guzmán et al., 2015), es decir:

$$P - Q - ET - G = \Delta S \quad (2)$$

En las zonas montañosas de los Andes, como las cuencas hidrográficas en Ecuador, existe gran heterogeneidad de relieve, lo cual es óptimo para la producción de energía hidroeléctrica (Buytaert et al., 2006c). Además, dicha heterogeneidad en combinación con los diferentes sistemas climáticos influye en la alta variabilidad espacial de la precipitación y temperatura (Buytaert et al., 2006c ; Celleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007). De igual manera, existe diversidad de ecosistemas y por lo tanto diferentes patrones de respuesta hidrológica (Guzmán et al., 2015). Generalmente, en estas zonas resulta común encontrar el ecosistema páramo, el cual es caracterizado por pastizales neotropicales y se ubica a partir de los 3500 m s.n.m. (Buytaert et al., 2006b).

Además, presenta un clima húmedo, frío y baja evapotranspiración, su geomorfología se compone de valles de los glaciares formados por una mezcla de laderas y llanuras de alta pendiente y el suelo posee un alto contenido de materia orgánica (generalmente

andosoles) (Buytaert & Beven, 2011). Por su parte, la vegetación se conforma principalmente de pastizales y especies leñosas como *Polylepis* sp. y *Gynoxys* sp. (Buytaert et al., 2006a). Otro aspecto importante, es la capacidad de almacenar agua durante periodos húmedos para su posterior liberación durante periodos secos (a través del caudal base) (Llambí et al., 2012); proceso conocido como regulación. Buytaert et al. (2004) manifiesta que en las épocas secas este flujo puede ser suministrado hasta en un 100% por el páramo.

Generalmente en este ecosistema, se asume que el caudal base es producido a través de escorrentía subsuperficial por la dificultad que representa la separación entre flujos (lateral subsuperficial y el flujo base) (Crespo et al., 2009; Ochoa & Rodas, 2009) debido a que el suelo es relativamente poroso y se encuentra sobre un lecho impermeable (roca). Una de las principales características de los páramos es que en las cuencas hidrográficas andinas, los ríos que descienden de este ecosistema son provistos de un caudal base alto (debido su régimen hidrológico, el cual es dominado por una respuesta de flujo lenta (Buytaert et al., 2007)) y continuo (por la elevada capacidad de regulación hidrológica (Buytaert et al., 2006b; Buytaert et al., 2006c).

La combinación entre el caudal base y la topografía en cuencas andinas garantizan la generación de energía hidroeléctrica de manera constante y eficiente (Buytaert et al., 2006c). En Ecuador, la cuenca del río Paute es de gran importancia, pues es el hogar del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral conformado por algunas de las centrales más grandes de la región andina, las cuales aprovechan el agua de la cuenca del río Paute para generar energía.

Por otra parte, en esta misma cuenca y a menor escala existen plantas hidroeléctricas pequeñas y multifuncionales, en donde sus embalses son utilizados para sistemas de riego, producción de agua potable y regulación de los caudales. Esta última hace referencia a la regulación del régimen de precipitaciones, cuya finalidad es ofrecer protección a las poblaciones y a los recursos naturales ante inundaciones y asimismo durante las épocas secas regulan los caudales en los cauces mediante la descarga del agua almacenada (Mujeriego, 2005). Tal es el caso del Complejo Hidroeléctrico Machángara, conformado por las presas “El Labrado” y “Chanlud” y de las centrales “Saucay” y “Saymirín”.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en la subcuenca del río Machángara e involucró los resultados obtenidos por Guzmán et al. (2015) de las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay; todas subcuencas hidrográficas pertenecientes a la cuenca del río Paute.

La siguiente figura indica el mapa correspondiente al área de estudio:

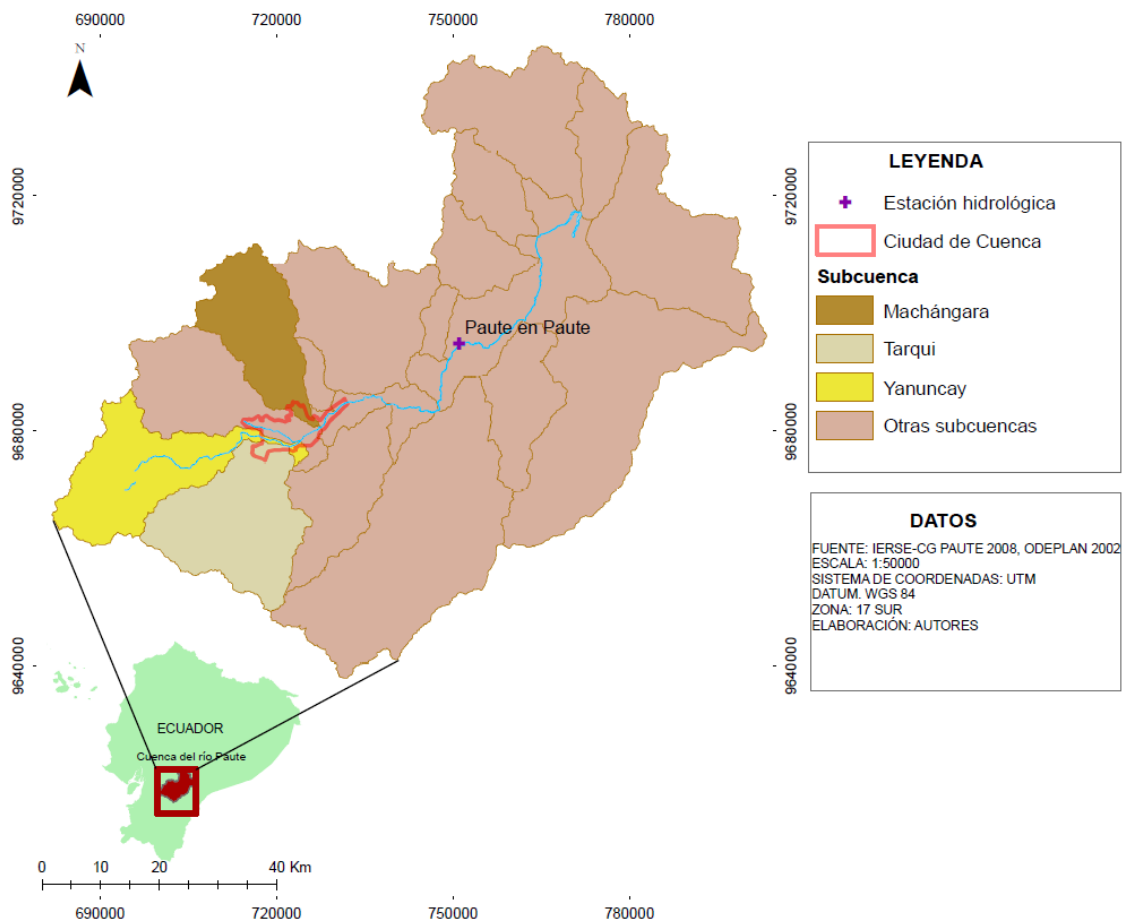


Figura 1: Ubicación de las subcuencas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca del río Paute.

Cuenca del río Paute

La cuenca del río Paute está ubicada en la región austral del Ecuador en las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago; cubre una superficie aproximada de 6439 km² (Pombosa, Roura, García, & Tejada, 2000). Esta cuenca comprende un rango altitudinal que va desde 500 m s.n.m. hasta 4600 m s.n.m. y dentro de ésta se hallan 19 subcuencas hidrográficas. Esquemáticamente puede dividirse en 2 zonas características:

La región oriental. - constituida en su parte alta por páramo y a menor altitud por bosque primario tropical. Presenta características muy similares a las cuencas amazónicas (vegetación exuberante, difícil acceso y poco poblada) (Pombosa et al., 2000).

La región occidental y central de la cuenca. - compuestas en su parte alta por páramo y/o bosque primario con gran superficie de relieves atenuados. Asimismo, se identifican valles con pendientes muy pronunciadas (alrededor del 60% del área presenta pendientes mayores al 30%) cuyas laderas se encuentran arborizadas por pinos o eucaliptos y en las regiones de baja pendiente (menores al 10%) como en las terrazas aluviales se encuentran zonas agrícolas: cultivos o pastizales (Pombosa et al., 2000; Vanacker, Molina, Govers, Poesen, & Deckers, 2007). Por otro lado, la parte baja y central corresponde a zonas pobladas o desarrollo urbano de la ciudad de Cuenca.

En este estudio se consideró la cuenca media en función de la longitud del río principal (Paute) y el punto de medición de la descarga (estación Paute en Paute) correspondiente al nivel medio de ésta (Figura 1).

Subcuenca del río Machángara

La subcuenca del río Machángara se ubica en las provincias de Azuay y Cañar, al noreste de la ciudad de Cuenca; abarca una superficie de 325.45 km² (Díaz & Dominguez, 2015). Para una adecuada gestión del recurso hídrico en esta subcuenca se creó el Complejo Hidroeléctrico Machángara, el cual consta de dos represas: “Chanlud” y “El Labrado” a 3440 m s.n.m. y 3420 m s.n.m. mismas que fueron construidas en los años 1972 y 1992 respectivamente (Electro Generadora del Austro ELECAUSTRO S.A., 2019).

Las actividades agrícolas y ganaderas se encuentran restringidas en el área superior de esta subcuenca, debido a que en 1985 fue declarada “bosque protector” (ETAPA EP, 2019). Por otra parte, para mejorar la gestión del recurso hídrico y el manejo de los recursos naturales se instauró el “Consejo de Cuenca del Río Machángara” a través de un convenio interinstitucional cuya finalidad es la coordinación entre instituciones y los usuarios de la cuenca del Machángara vinculados en el desarrollo sustentable (Díaz, 2015).

Las estaciones hidrológicas y meteorológicas utilizadas en este estudio se ubican en la subcuenca alta del río Machángara, como se muestra en la siguiente figura:

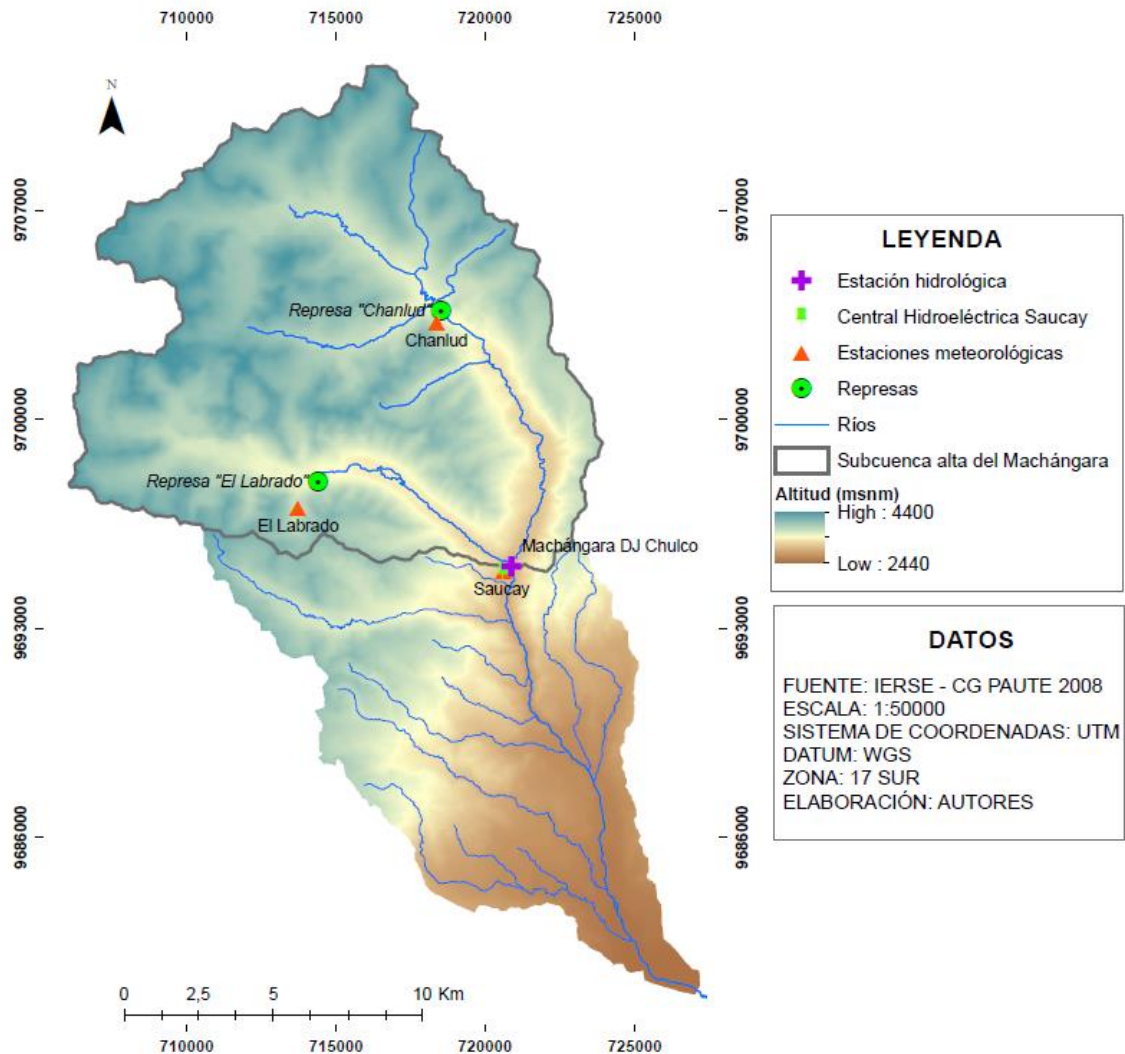


Figura 2: Elevación de la subcuenca del río Machángara, ubicación del Complejo Hidroeléctrico Machángara y de las estaciones meteorológicas e hidrológicas

Subcuenca del río Yanuncay

La subcuenca del río Yanuncay se sitúa en la provincia del Azuay al oeste de la ciudad de Cuenca, limita al norte con la subcuenca del río Tomebamba, al sur con la subcuenca del río Tarqui y al este con la subcuenca del río Jadán. Comprende un área aproximada de 418.8 km² y un rango altitudinal que va desde 2480 m s.n.m. hasta 4340 m s.n.m. (Cordero & Dominguez, 2013).

Subcuenca del río Tarqui

La subcuenca del río Tarqui se encuentra al suroeste de la ciudad de Cuenca en la provincia del Azuay. Abarca un área aproximada de 476.2 km², la variabilidad de relieve está definida en un rango altitudinal que va desde 2600 m s.n.m. hasta 3700 m s.n.m., donde drena la subcuenca a través del río Tarqui (Barbecho & Calle, 2012).

3.2. Modelos Perceptuales

El modelo perceptual resume las percepciones acerca del comportamiento de una cuenca frente a eventos como la precipitación bajo diversas condiciones (Beven, 2012). Además, permite identificar los posibles caminos que recorren los flujos superficiales y subsuperficiales, lo cual puede ser de gran utilidad para análisis hidrológicos.

En la región andina, Guzmán et al. (2015) a partir de observaciones de campo, análisis de datos y estudios previos desarrolló la hipótesis de tres modelos perceptuales (A, B y C) en subcuencas con regulación natural. El modelo A correspondiente al páramo, establece que la respuesta hidrológica se compone de flujo subsuperficial lateral (Q_{ss}) y superficial (Q_{sup}); en este tipo de ecosistemas la recarga profunda de aguas subterráneas es menos probable debido al lecho impermeable a poca profundidad (Guzmán et al., 2015; Llambí et al., 2012), como se muestra en la Figura 3. Sin embargo, la combinación de una alta capacidad de retención de agua en el suelo y una baja evapotranspiración (ET) de la vegetación generan una respuesta lenta en el flujo de aguas subsuperficiales o subterráneas (Guzmán et al., 2015).

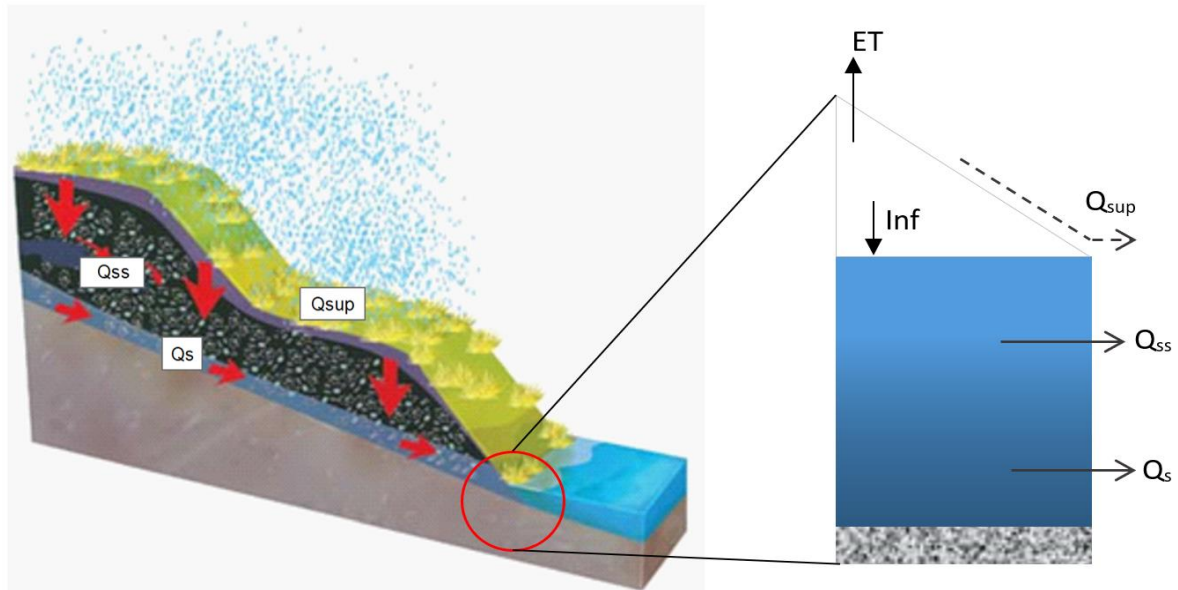


Figura 3: Modelo perceptual A

Fuente: Guzmán et al., 2015; Llambí et al., 2012

El modelo B representa la transición entre el ecosistema páramo y el valle aluvial, en el cual se espera la ocurrencia de procesos hidrológicos como: infiltración (Inf), la evapotranspiración (ET), recarga (R), variación del nivel freático (Nf) y el aporte del flujo subterráneo (Q_s) (Figura 4).

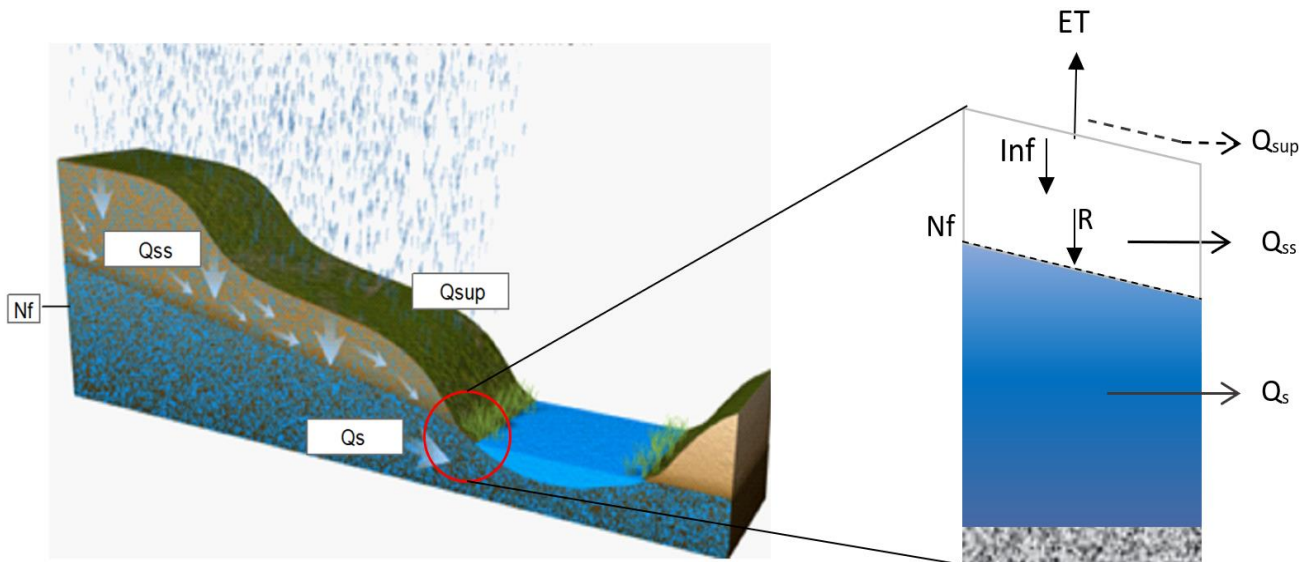


Figura 4: Modelo perceptual B

Fuente: Guzmán et al., 2015; The COMET program, 2019

Finalmente, el modelo C representado por el valle aluvial muestra principalmente la influencia del nivel freático (Nf) en la descarga de flujos subterráneos (Qs) tal como se muestra en la Figura 5; cabe señalar que en épocas secas el acuífero tiende a desconectarse de lecho del río, al bajar considerablemente su nivel freático. Además, este modelo indica la ocurrencia de otros procesos hidrológicos como la evapotranspiración (ET), infiltración (Inf) y recarga (R).

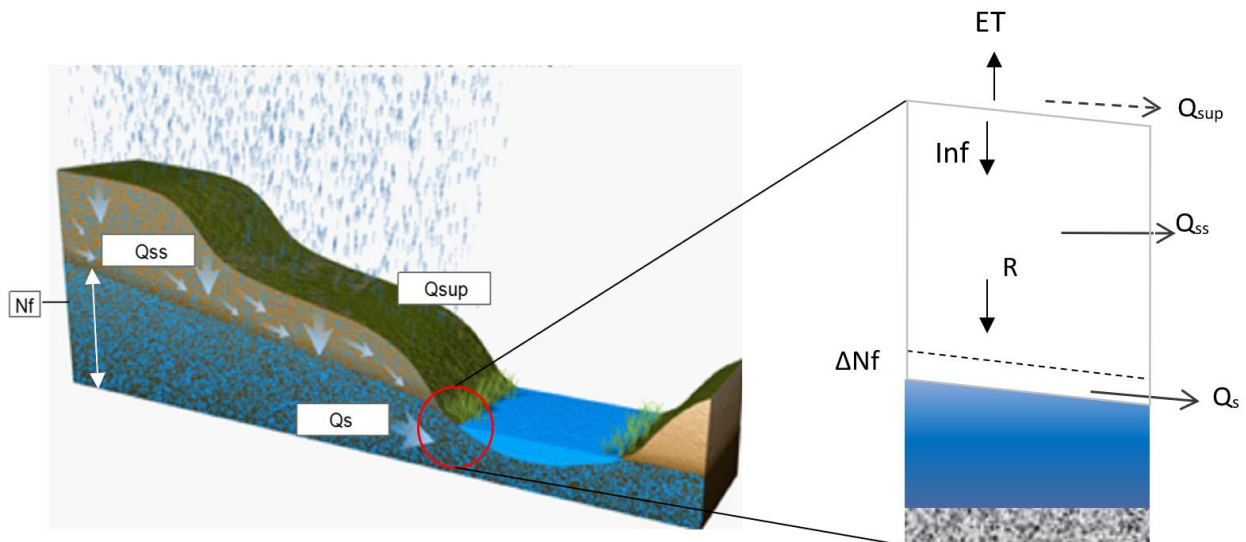


Figura 5: Modelo perceptual C

Fuente: Guzmán et al., 2015; The COMET program, 2019

De los tres modelos descritos, Guzmán et al. (2015) establece que la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Yanuncay obedece principalmente al modelo A y de manera secundaria al modelo B, mientras que la de Tarqui puede explicarse por los tres modelos (A, B y C) siendo el C predominante.

Para comprender las condiciones físicas en la subcuenca alta del río Machángara se elaboró un modelo perceptual distribuido, el cual es analizado en la zona antecedente y subsecuente a los embalses.

De manera que, el área antecedente a los embalses “Chanlud” y “El Labrado” cuya superficie predominante corresponde al ecosistema páramo está sujeta a la respuesta hidrológica del modelo A descrito por Guzmán et al. (2015). Mientras que la zona subsecuente a éstos, obedece a la respuesta hidrológica constituida principalmente por los flujos subsuperficial lateral (Qss), subterráneo (Qs), superficial ($Qsup$) y a la adición de

un flujo que es liberado de manera continua proveniente del almacenamiento artificial (Q_{art}) como resultado de la regulación de dichos embalses, tal como se indica en la siguiente figura.

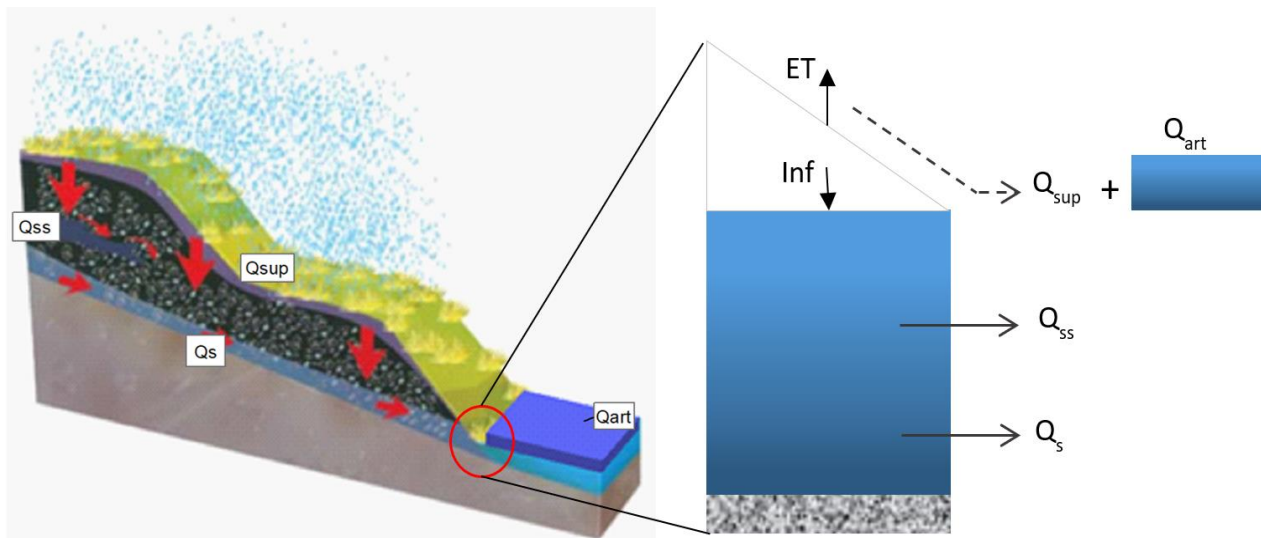


Figura 6: Modelo perceptual propuesto para la subcuenca alta del río Machángara

Fuente: Adaptado de Guzmán et al., 2015; Llambí et al., 2012

3.3. Procesamiento de la información

Para el análisis hidrológico y separación de caudal base de la zona de estudio, se requiere información hidro-meteorológica que comprende datos de descarga o caudal, precipitación e información cartográfica. Los datos de descarga y precipitación se obtuvieron a través de entidades públicas como la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA) y la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), las cuales disponen de estaciones hidrológicas y meteorológicas (Tabla 1).

Tabla 1: Tipo y ubicación de estaciones en la subcuenca del río Machángara y la cuenca media del río Paute

Nombre	Tipo	UTM X	UTM Y	Altitud (m s.n.m.)
Machángara DJ Chulco	Hidrológica	720877	9695101	2956
Paute en Paute	Hidrológica	759470	9691853	2160
El Labrado	Meteorológica	713978	9697404	3335
Chanlud	Meteorológica	718622	9703602	3336
Saucay	Meteorológica	720861	9695294	2977

Fuente: INAMHI, 2009

Cabe señalar que para cada serie obtenida se emplea un proceso determinado para la validación de los datos.

3.3.1. Análisis visual - determinación de datos faltantes

A través del análisis visual de las series en las estaciones hidrológicas y meteorológicas en estudio, se inspeccionó la existencia de datos faltantes o inexistentes en las mismas. Por una parte, la estación hidrológica Machángara DJ Chulco y las meteorológicas “Chanlud”, “El Labrado” y “Saucay” no presentaron vacíos de información durante el periodo 01/01/2009 a 31/12/2011. No obstante, en la serie de descarga de la estación Paute en Paute se observaron datos faltantes correspondientes al 6% del periodo en análisis, donde la mayoría de éstos se registran en el mes de octubre de 2011.

3.3.2. Análisis de curva de doble masa

Cualquier cambio en los métodos de recolección de información o de ubicación de los sitios de medición de precipitación pueden generar inconsistencias, las cuales pueden detectarse a través de las curvas de doble masa o doble acumuladas (Arumí, Jara, & Salgado, 2000). Éstas consisten en una representación gráfica de los valores acumulados de la estación en estudio o problema (eje y) frente a los valores acumulados de una estación base (eje x), la cual está en función del promedio de varias estaciones de referencia; sin embargo, cuando existe sólo una estación de referencia los datos acumulados de esta serie pueden servir como base de comparación. Finalmente, si los valores graficados están sobre una línea recta, los datos de la estación en estudio son válidos (Montealegre, 1990).

En el presente estudio, después de realizar una inspección visual en las series de datos de las estaciones meteorológicas “El Labrado”, “Chanlud” y “Saucay” se procedió a analizar la consistencia de las mismas a través del método descrito, donde se constató que las series empleadas no presentan datos inconsistentes.

Por otro lado, para el relleno de la serie de descarga de la estación Paute en Paute no fue posible aplicar los métodos de relleno más confiables como el análisis de curva de doble masa, debido a que no se hallaron estaciones cercanas o adyacentes disponibles. Por tanto, se procedió a emplear un método matemático, conocido como la media móvil.

3.3.3. Media Móvil

La media móvil dota de información de tendencias que son influenciadas por la media de datos previos o históricos, es decir, es un promedio de valores predefinidos en la serie que se desplazan de un extremo hacia otro, sustituyendo valores inválidos o faltantes. La cantidad de valores de la variable n previos a considerarse, denominados puntos o términos y coeficientes utilizados para ponderar dichos valores son los que definen el tipo de media móvil (Mauricio, 2007). En este caso para estimar los datos faltantes (Z_t) en un tiempo t se utiliza la media móvil simple que se representa en la Ecuación 3.

$$Z_t = \frac{Z_{t-n} + \dots + Z_{t-2} + Z_{t-1}}{n} \quad (3)$$

La serie de datos rellena se presenta en el Anexo 1.

3.4. Precipitación media de la subcuenca alta del río Machángara

Dado que en la subcuenca alta del río Machángara existe más de una estación meteorológica, el cálculo de su precipitación media diaria se realizó a través de polígonos de Thiessen. El cual trata de ponderar el valor de la precipitación de cada estación en función de su área efectiva o de influencia. Ésta se crea a partir del trazo de líneas que conectan las estaciones unas con otras, seguido de la proyección de perpendiculares bisectrices de éstas, las mismas que forman polígonos alrededor de cada estación. Los lados de cada polígono son los límites del área efectiva que se considera (Linsley, Kohler, & Paulus, 1997). Por lo tanto, la precipitación promedio sobre una cuenca se evalúa por (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A} \quad (4)$$

Donde:

\bar{P} = precipitación promedio sobre un área determinada, en mm.

A_i = área del polígono de cada una de las estaciones i asignadas en la cuenca, en km^2 o m^2 .

P_i = Precipitación registrada en la estación i para el periodo en estudio, en mm.

A = Área total de la cuenca, en km^2 o m^2 .

En este estudio, el método se aplicó con respecto a las estaciones de “Chanlud”, “El Labrado” y “Saucay”. En la Figura 7 se muestra el método de Thiessen con los límites de área efectiva para cada estación de análisis.

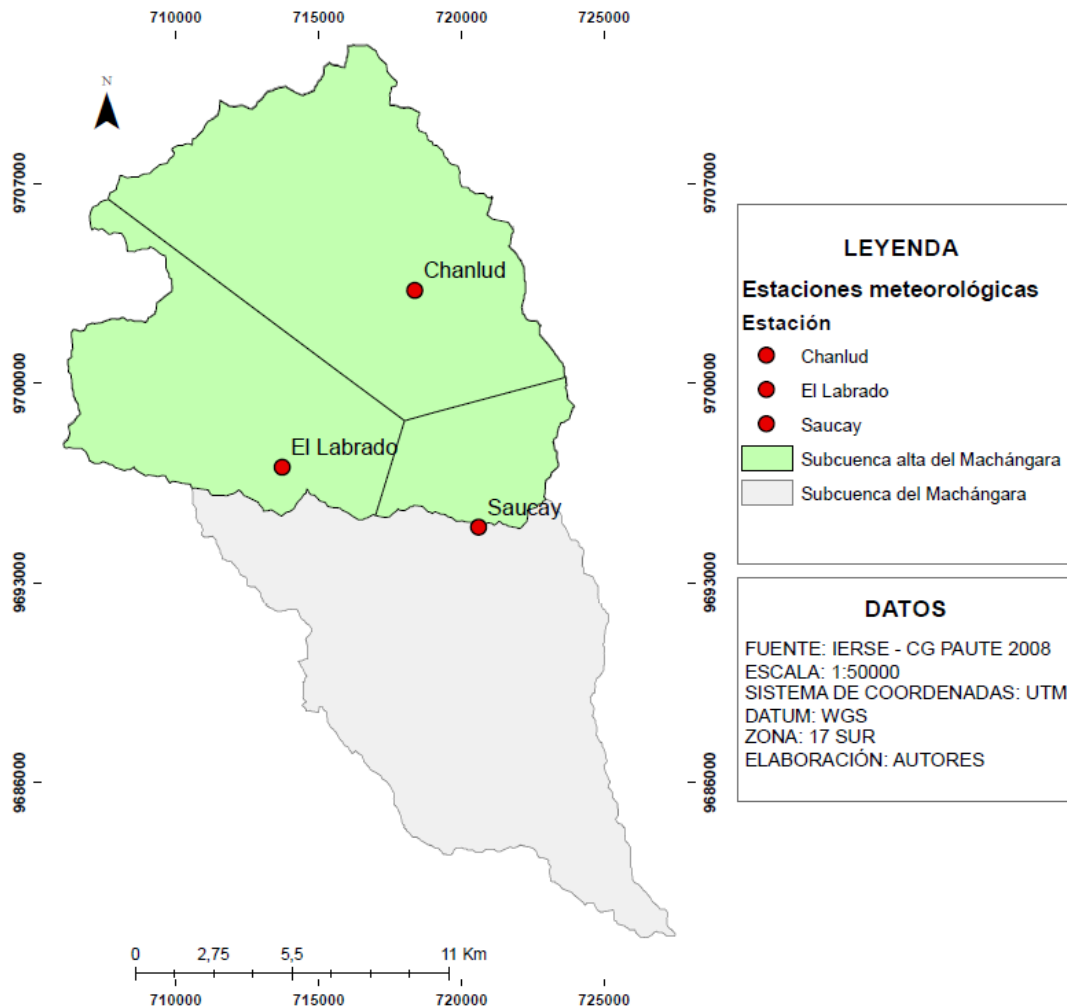


Figura 7: Áreas de influencia para la determinación de la precipitación media diaria a través de polígonos de Thiessen en la subcuenca alta del río Machángara

3.5. Determinación de cobertura de páramo en la subcuenca del río Machángara

La determinación de cobertura del páramo en la subcuenca del río Machángara se realizó a partir de la creación del modelo digital de elevación (MDE) tipo ráster con resolución espacial de 5 x 5 m, el cual fue creado a través del uso de información cartográfica disponible de la cuenca del río Paute, realizada por el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) y el Consejo de Gestión de aguas de la cuenca del río Paute en el año 2008 en el software ArcGIS 10.7.

Posteriormente, mediante el uso del mismo software se aplicó la herramienta “Evaluación condicional”, la cual permite establecer criterios de evaluación en cada una de las celdas de entrada de un ráster (ArcGis Desktop, 2019). El criterio que se empleó para la separación de la cobertura de páramo fue aplicado para valores iguales o mayores a 3500 m s.n.m. de altitud.

3.6. Evaluación de caudal base

No existe una forma directa de medir continuamente el caudal base en la corriente de un río (Furey & Gupta, 2001); únicamente durante largos periodos secos es posible observar el caudal base puro en fuentes superficiales, mientras que para otros periodos es necesario utilizar diversos métodos de separación del mismo (Guzmán et al., 2015).

El presente estudio se enfoca en estimar el caudal base de la cuenca media del río Paute (filtros digitales) y de la subcuenca del río Machángara (filtros digitales y análisis de recesión no lineal), con la finalidad de identificar las características físicas asociadas al caudal base (almacenamiento y recarga) y contrastar los resultados obtenidos con los correspondientes a los de las subcuencas Tarqui y Yanuncay presentados por Guzmán et al. (2015) en el mismo periodo de análisis. Finalmente, se pretende cuantificar el aporte del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay a la cuenca media del río Paute.

3.6.1. Filtros Digitales

Los métodos de separación de caudal base que no tienen una base física, es decir, que no se derivan de una ecuación de balance de masa o no toman en consideración todas las

condiciones de flujo, proporcionan una estimación objetiva y repetible (Arnold & Allen, 1999; Furey & Gupta, 2001) siendo éstos: la técnica de mínimos suavizados y los filtros digitales recursivos que comprenden el filtro Eckhardt y el filtro BFLOW. Dichos filtros parten de la idea en que el caudal total se conforma de dos componentes, el componente lento o de baja frecuencia y el componente rápido o de alta frecuencia; los cuales están asociados al caudal base y a la escorrentía directa, respectivamente (Lyne & Hollick, 1979). Como se muestra en la Ecuación 5.

$$Y_{B,j} = b_{B,j} + f_{B,j} \quad (5)$$

Donde los subíndices B y j indican la cuenca y el tiempo respectivamente, $Y_{B,j}$ es el caudal total, $b_{B,j}$ se lo interpreta como el caudal base y $f_{B,j}$ la escorrentía directa.

Sin embargo, aunque la técnica puede resultar poco realista físicamente, es importante destacar la estimación objetiva, repetible y su facilidad para automatizarse (Nathan & McMahon, 1990). Además, la estimación del caudal base por estos filtros tiene restricciones importantes para no producir caudales negativos o excedentes del caudal total, dando como resultado una mejor aproximación. Cabe mencionar que Lyne & Hollick (1979) fueron los pioneros en introducir el filtro para separar el caudal base del flujo total, siendo el filtro digital recursivo BFLOW:

$$qd_t = \alpha qd_{t-1} + \frac{(1+\alpha)}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (6)$$

Donde:

qd_t es la escorrentía directa filtrada en el paso de tiempo t (m^3/s)

qd_{t-1} es la escorrentía directa filtrada en el paso de tiempo $t - 1$ (m^3/s)

α es el parámetro de filtro

Q_t es el caudal total en el paso de tiempo t (m^3/s)

Q_{t-1} es el caudal total en el paso de tiempo $t - 1$ (m^3/s)

El valor asignado al parámetro del filtro recursivo influye en la naturaleza de la atenuación del hidrograma (Ladson, Brown, Neal, & Nathan, 2013). Diversos estudios sugieren adoptar un enfoque estándar, donde se pretende usar el parámetro α igual a 0.925

dado que los resultados se asemejan a una separación manual de caudal base (Nathan & McMahon, 1990).

Por otro lado, Eckhardt (2005) propone que el filtro digital considere un parámetro de filtro y el máximo valor de la relación de caudal base respecto al caudal total por un periodo de tiempo considerable (BFI_{max}). Este filtro emplea una separación del caudal base aplicando reglas simples de suavizado y a través de la separación del hidrograma del flujo total. No obstante, el componente de alta frecuencia puede representar sólo una parte de la escorrentía superficial en lugar de la escorrentía superficial total, de modo que la interpretación física del caudal base como componente de baja frecuencia y la escorrentía directa como componente de alta frecuencia puede ser incorrecta (Spongberg, 2000).

Sin embargo, se reduce la subjetividad de este filtro mediante el uso de BFI_{max} en la separación de caudal base al estimar los BFI_{max} representativos que infieren sobre las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.

El filtro recursivo Eckhardt responde a la ecuación:

$$qb_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha + qb_{t-1} + (1 - \alpha)BFI_{max} Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (7)$$

Donde, qb_t y qb_{t-1} son el caudal base (m^3/s) en el paso de tiempo t y $t - 1$, respectivamente. BFI_{max} se define como el valor máximo del índice de caudal base, α es el parámetro de filtro y Q_t es el caudal total en el paso t de tiempo.

Eckhardt (2005) plantea el uso de tres valores de BFI_{max} que van desde 0.25 a 0.80, donde el valor de 0.25 corresponde a arroyos perennes con acuíferos de roca dura, mientras que el valor de 0.50 representa a arroyos efímeros con acuíferos porosos y finalmente el valor de 0.80 es utilizado para arroyos perennes con acuíferos porosos. Este proceso fue aplicado y validado por Eckhardt (2005) en ciertas cuencas de diversas partes del mundo como: Pennsylvania, Illinois, Maryland y Alemania.

El BFI_{max} tiene la capacidad de restringir el caudal base máximo, es decir, que el BFI (*caudal base/caudal total*) alcanza al BFI_{max} cuando las ondas tienen una frecuencia predominantemente baja. Si BFI_{max} aumenta, se incrementa el número de ondas de alta frecuencia que se integran al hidrograma de caudales y por lo tanto BFI

resulta menor que BFI_{max} (Guzmán et al., 2015). Es por ello, que en este estudio se utiliza el valor de 0.80 para el BFI_{max} .

El Sistema de herramientas de análisis de hidrogramas basados en la web (WHAT) incorpora los filtros de: Lyne & Hollick (1979) (BFLOW) y el propuesto por Eckhardt (2005) (filtro Eckhardt). En este estudio, mediante la aplicación del filtro Eckhardt a través del software WHAT se realizó la separación de caudal base de las series de datos de descarga correspondientes a la estación Paute en Paute y Machángara DJ Chulco, para la cuenca media del río Paute y la subcuenca del río Machángara respectivamente (Anexo 2).

3.6.1.1. Estimación de caudal base a la salida de las subcuencas en estudio

Para el análisis comparativo de las subcuencas de los ríos Tarqui, Yanuncay y Machángara se requiere separar el caudal base a su salida. No obstante, para la subcuenca del río Machángara se restringe dicha separación debido a la inexistencia de datos de descarga en su zona baja durante el periodo de análisis. Frente a esto, al revisar los resultados de Guzmán et al. (2015) del filtro Eckhardt para la subcuenca del río Yanuncay se observa que los valores de BFI en la zona alta y baja corresponden a 0.64 y 0.63 respectivamente, expresando una diferencia del 1%; lo que demuestra las limitaciones de este filtro y corrobora la idea de Buytaert et al. (2006) que señala que en cuencas andinas la mayor parte de caudal base es proporcionado por el ecosistema páramo.

Por ello, se plantea la estimación de caudal base a la salida de la subcuenca del río Machángara (Qb_s) a partir de la separación de caudal base en la subcuenca alta cuya área está cubierta por páramo en un 86% y presenta la influencia de la regulación artificial ejercida por los embalses (Qb_{A2}) y la interpolación de caudal base del área de páramo externa a la subcuenca alta (Qb_{A1}) (Figura 8); es decir:

$$Qb_s = Qb_{A2} + Qb_{A1}$$

Cabe señalar que dicha interpolación se realizó en función del caudal base específico de la subcuenca alta del río Yanuncay cuya cobertura de páramo es predominante. A su vez, es importante mencionar que este proceso genera incertidumbres al no disponer de información hidrológica en la zona baja de la subcuenca.

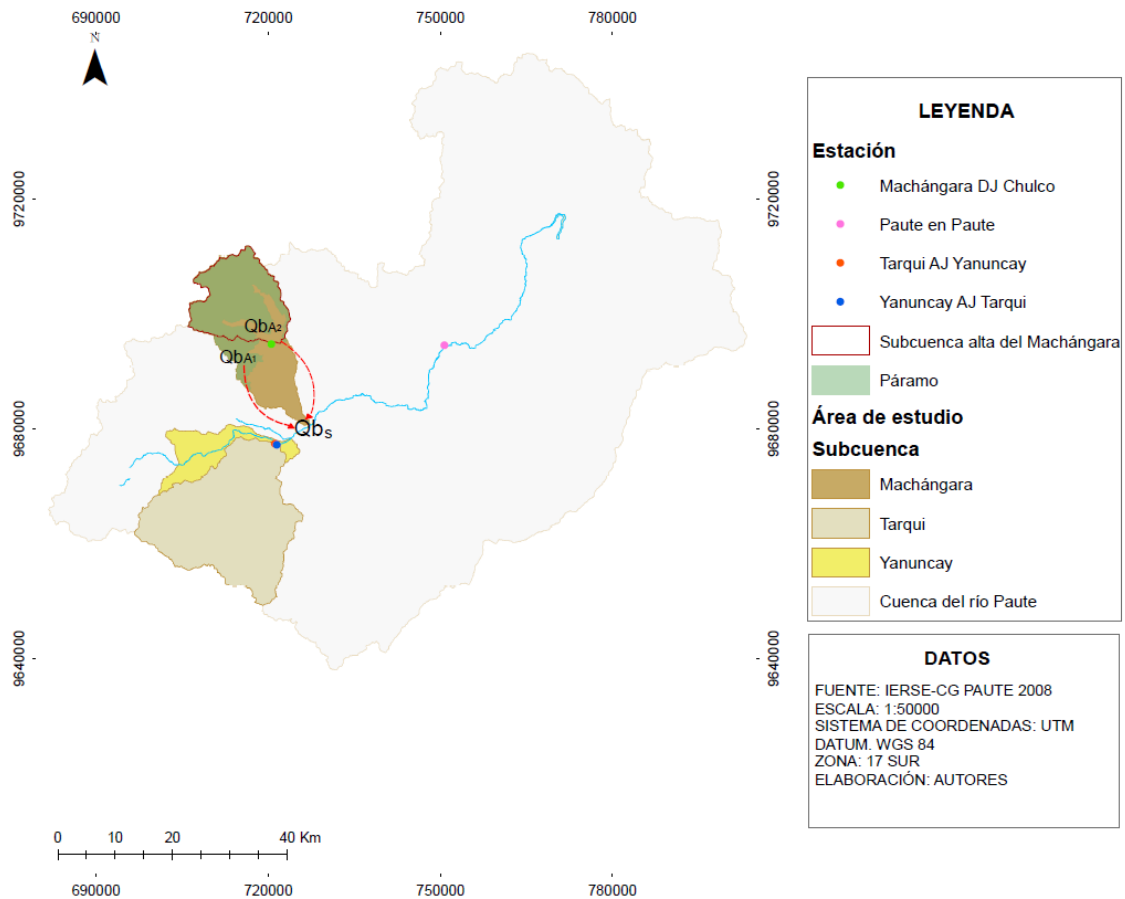


Figura 8: Proyección de caudal base a la salida de las subcuencas en estudio a través de filtros digitales

3.6.2. Análisis de recesión no lineal

Las curvas de recesión representan el hidrograma de descarga de la cuenca durante un período seco o sin lluvias y reflejan la relación entre el almacenamiento y la liberación de aguas subterráneas, además brindan información referente a las características de la cuenca (Wittenberg, 1994). En este estudio, para determinar el periodo de recesión de la subcuenca alta del río Machángara se utilizaron los resultados de precipitación media diaria obtenidos por polígonos de Thiessen y el criterio se estableció en 10 días con una precipitación media diaria menor a 0.5 mm/d, valor que es notablemente inferior al de evapotranspiración potencial según lo calculado por Carchi (2015) en su estudio “Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machángara”.

Generalmente, el análisis de las curvas de recesión responde al modelo de almacenamiento lineal, el cual establece que el almacenamiento de aguas subterráneas (S) es linealmente proporcional a la descarga o caudal de salida (Q), por lo tanto:

$$S = kQ \quad (9)$$

Donde k es la constante de recesión con unidades de tiempo, que representa la pendiente de la curva de caudales en escala semilogarítmica. Por otra parte, la función exponencial que responde a este modelo y que describe la recesión de flujo base viene dada por la ecuación:

$$Q_t = Q_0 \exp(-t/k) \quad (10)$$

Siendo Q_t la descarga en el tiempo t y Q_0 la descarga inicial; la gráfica resultante de dicha ecuación produce una línea recta. Este tipo de modelo responde a cuencas con acuíferos confinados y es empleado en múltiples investigaciones debido a su formulación matemática sencilla (Wittenberg, 1999).

No obstante, en la mayoría de cuencas donde existen acuíferos no confinados no es posible expresar el sistema con la ecuación de almacenamiento lineal, puesto que en la curva de recesión exponencial las representaciones semilogarítmicas de caudal de salida son cóncavas y el valor de k aumenta sistemáticamente con la disminución de la salida del flujo (Moore, 1997; Wittenberg, 1994), por lo que no se ajusta a un solo valor; demostrando un fuerte carácter no lineal de la recesión. Por lo tanto, Wittenberg (1999) propone la adición de un exponente b (adimensional) a la ecuación de reservorio lineal para indicar la relación no lineal entre el almacenamiento de aguas subterráneas y la descarga, además de la sustitución de la constante k por el coeficiente de almacenamiento a , expresándose como:

$$S = aQ^b \quad (11)$$

Donde S es el almacenamiento en m^3 y Q la descarga en m^3/s , a es el factor de almacenamiento en $m^{3-3b}s^b$. Si los volúmenes se expresan como alturas sobre un área y el intervalo de tiempo es un día, entonces: S en mm, Q en mm/d y a en $mm^{1-b}d^b$. El exponente b es adimensional, el reservorio lineal es un caso especial para $b = 1$.

La combinación de la ecuación de almacenamiento no lineal (11) con la ecuación de continuidad en términos de flujo de salida de un reservorio $dS/dt = -Q$ produce la ecuación de la curva de recesión para el reservorio no lineal (12) que comienza en cualquier descarga inicial Q_0 y $b \neq 1$ (Coutagne, 1948).

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{1/(b-1)} \quad (12)$$

Considerando que:

El parámetro a puede ser calculado a través del método iterativo de mínimos cuadrados de una serie temporal de recesión (Wittenberg, 1994), para lo cual se considera la variación del almacenamiento que se traduce en la descarga media durante el intervalo de tiempo i e $i - 1$ ($\Delta S = -\frac{(Q_i + Q_{i-1})}{2} \Delta t$), la variación de descarga ($Q = Q_i - Q_{i-1}$) y la ecuación de continuidad, resultando:

$$a = \frac{\sum(Q_{i-1} + Q_i)\Delta t}{2\sum(Q_{i-1}^b + Q_i^b)} \quad (13)$$

Los parámetros a y b representan propiedades o condiciones de los acuíferos en contacto con el río.

Se han realizado estudios de análisis de la recesión en diversas cuencas hidrográficas con diferentes regímenes hidrológicos con el objetivo de establecer valores para el parámetro b y el posterior cálculo del parámetro a ; obteniendo valores de $b < 1$ con un valor promedio de $b = 0.5$ (Aksoy & Wittenberg, 2011). Wittenberg (1999) concluye que el valor de $b = 0.5$ parece ser un valor estándar para acuíferos no confinados, mientras que a puede estar relacionado con la porosidad, la conductividad hidráulica y las propiedades morfométricas de la cuenca. Además, Wittenberg & Sivapalan (1999) sugieren que, incluso si el valor "verdadero" de b no se reproduce exactamente, el supuesto de $b = 0.5$ sería más realista físicamente y probaría una mejor coincidencia para los valores de descarga observados que el enfoque de reservorio lineal. Por ello, en este estudio para el cálculo de caudal base de la subcuenca alta del río Machángara se utilizó el valor de $b = 0.5$.

Después de calculado el valor del parámetro a se procede al cómputo del caudal base, el cual empieza en el último valor de la recesión y avanza hacia atrás a lo largo del eje temporal del hidrograma (Wittenberg, 1999). El caudal base en el tiempo $t - \Delta t$ está dado por:

$$Q_{t-\Delta t} = \left[Q_t^{b-1} + \frac{t(b-1)}{ab} \right]^{1/(b-1)} \quad (14)$$



Esta expresión es la invertida de la ecuación de la curva de recesión para el reservorio no lineal. Considerando que el paso de tiempo Δt es normalmente un día.

En el presente estudio, se desarrolló la separación de caudal base por el método descrito y se calculó el parámetro a a través de Matlab, aplicado a la serie temporal de datos de descarga de la estación Machángara DJ Chulco. Además, se estimó la capacidad de almacenamiento por unidad de área en función de la relación $a/ \text{área}$.

3.6.2.1. Estimación de caudal base de las subcuencas altas en estudio

Para analizar la capacidad de almacenamiento y la relación de ésta por unidad de área de las subcuencas en estudio, se calculó el valor del parámetro a y la proporción $a/ \text{área}$ para la subcuenca alta del río Machángara y se lo contrastó con los valores de las subcuencas altas de los ríos Tarqui y Yanuncay obtenidos del estudio realizado por Guzmán et al. (2015) (Figura 9). Es importante mencionar que la comparación no se efectuó a nivel de las salidas de las subcuencas debido a la no disponibilidad de datos en la zona media y baja del río Machángara durante el periodo de análisis.

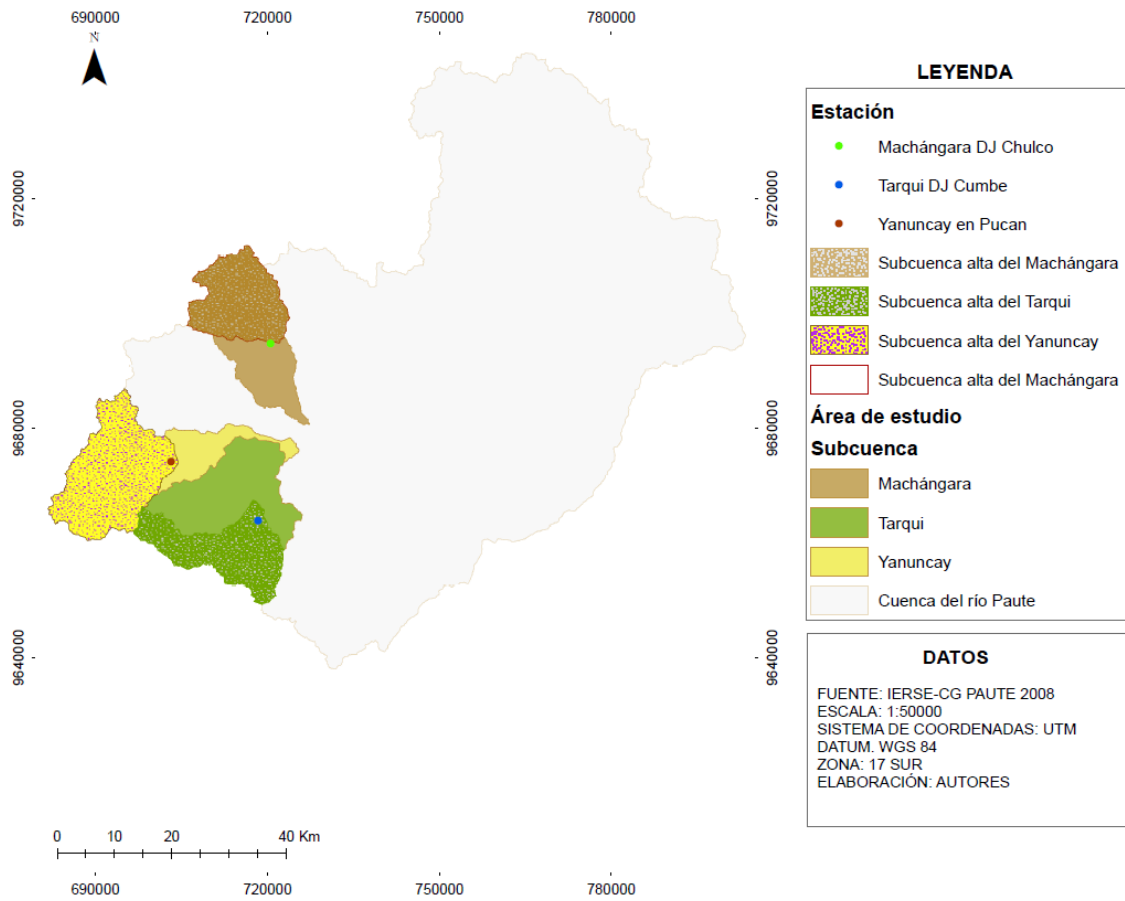


Figura 9: Subcuencas altas consideradas en el análisis de recesión no lineal

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cobertura de páramo de la subcuenca del río Machángara

A través de la metodología empleada se determinó que la superficie de páramo en la subcuenca alta del río Machángara es 170.35 km², valor que representa el 86% de la cobertura total de este ecosistema (206.3 km²) en toda la subcuenca, tal como se muestra en la Figura 10.

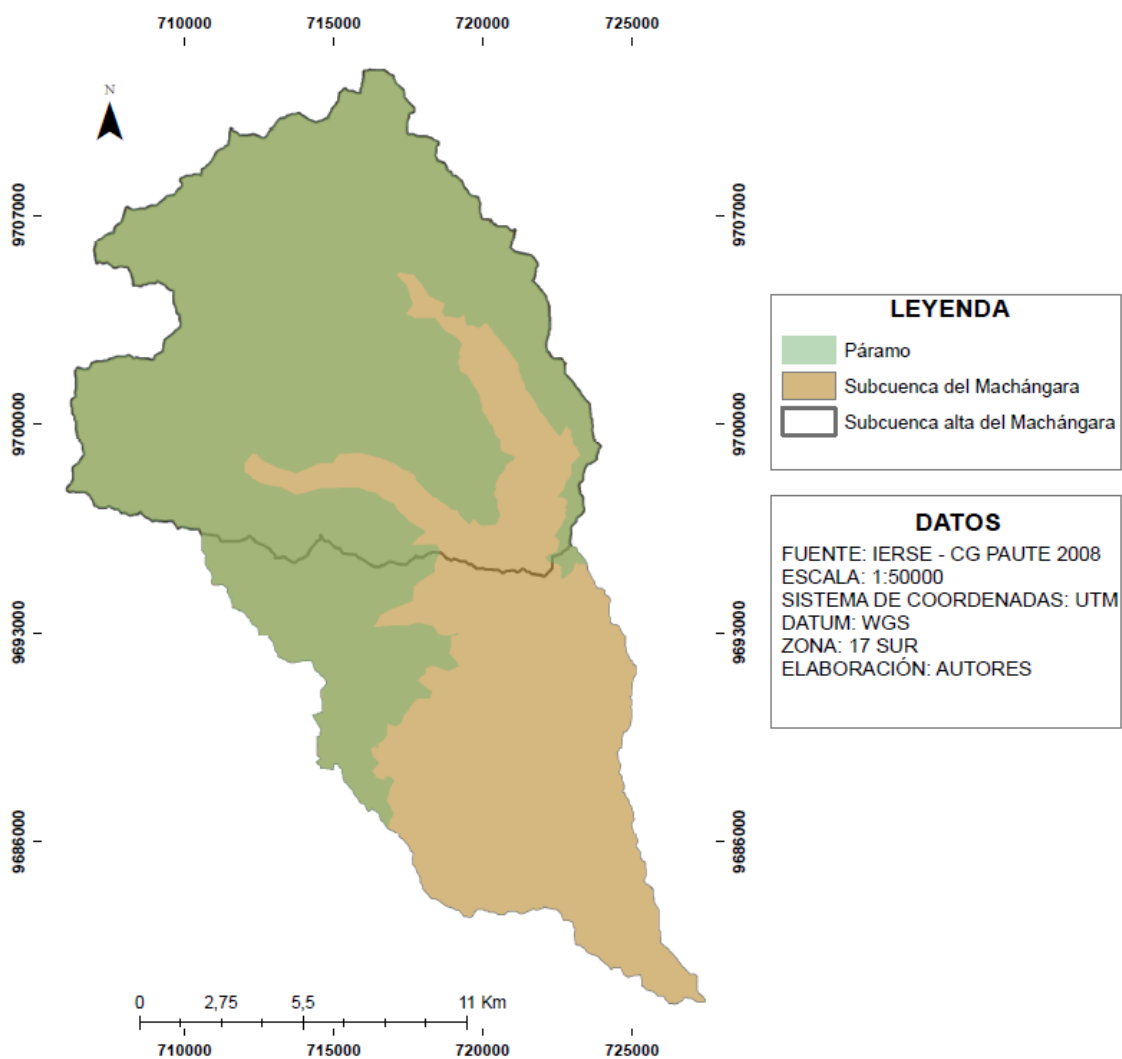


Figura 10: Cobertura de páramo en la subcuenca del río Machángara

Por otra parte, se comparó las superficies de páramo de las subcuencas altas en estudio; dando como resultado gran similitud entre los porcentajes de las subcuencas de los ríos Yanuncay y Machángara, a diferencia de la del río Tarqui cuyo porcentaje de páramo es considerablemente menor (Tabla 2).

Tabla 2: Superficie total y superficie de páramo en las subcuencas altas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara y subcuenca alta del río Machángara

	S. del Yanuncay	%P	S. alta del Yanuncay	% P	S. del Tarqui	%P	S. alta del Tarqui	% P	S. del Machángara	%P	S. alta del Machángara	%P
Superficie total (Km ²)	418.8	-	320.71	-	476.2	-	214.41	-	325.45	-	198.6	-
Superficie de páramo (Km ²)	322.5	77%	294.84	92%	52.4	11%	29.95	14%	206.3	63%	170.35	86%

Fuente: Adaptado de Guzmán et al., 2015

4.2. Determinación de caudal base

Los resultados analizados corresponden a la serie de caudal base obtenidos en el periodo 01/01/2009 a 14/08/2011, el cual fue previamente seleccionado debido a la disponibilidad de datos y a la comparabilidad de éstos con los presentados por Guzmán et. al 2015. Además, considerando que en periodos de sequía el caudal base se aproxima al caudal total, en el presente estudio se consideran dos periodos críticos, con valores de descarga consistentemente bajos, siendo así; el primer periodo crítico: 12/07/2009 a 26/11/2009 y el segundo: 18/09/2010 a 12/10/2010 (Anexo 3).

4.2.1. Análisis de recesión no lineal

La comparación del valor del parámetro a se realizó en función de $b = 0.5$ (valor sugerido por Wittenberg (1999); Wittenberg & Sivapalan (1999)); se evidencia que la capacidad de almacenamiento de la subcuenca alta del río Machángara es mayor en un 67% y 84% que las subcuencas altas de los ríos Yanuncay y Tarqui respectivamente.

Considerando que la subcuenca alta del río Machángara posee alrededor de 170.35 km² de páramo y tiene regulación artificial ejercida por los embalses “Chanlud” y “El Labrado”, mientras que, las subcuencas altas de los ríos Yanuncay y Tarqui abarcan 294.84 km² y 29.95 km² de páramo respectivamente y poseen regulación natural; Guzmán et al., (2015) señala que la capacidad de almacenamiento se ve influenciada por factores como: la composición y la proporción de los diferentes ecosistemas. A su vez, el tipo de regulación (natural o artificial) de las cuencas también podría ser un factor determinante en dicha característica, tal como se muestra en los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3: Variación del parámetro " a " ($m^{3-3b}s^b$) de Recesión no lineal en función de $b = 0.5$ para las subcuencas altas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara

b	Subcuenca alta del Yanuncay	Subcuenca alta del Tarqui	Subcuenca alta del Machángara
0,5	51	25	155

Fuente: Adaptado de Guzmán et al., 2015.

En consecuencia, la capacidad de almacenamiento (expresada a través del parámetro a) de la subcuenca alta del río Machángara está determinada por los factores antes mencionados, por lo que resulta importante evaluar el aporte de cada uno. Por consiguiente, se puede estimar la capacidad de almacenamiento del páramo en cuencas donde esta característica responde en su totalidad a dicho ecosistema, tal es el caso de la subcuenca alta del río Yanuncay cuyo a es de $51 m^{3-3b}s^b$ según el estudio de Guzmán et al. (2015). Por ende, se podría asumir que la capacidad de almacenamiento producida por el páramo en la subcuenca alta del río Machángara se aproxima a este valor.

En el Anexo 4 se muestra el valor obtenido para a y el gráfico de caudal base de la subcuenca alta del río Machángara efectuados mediante Matlab.

La comparación de la relación $a/\text{área}$ de la subcuenca alta del río Machángara frente a las otras subcuencas se observan en la Tabla 4.

Tabla 4: Variación de la relación $a/\text{Área}$ ($m^{3-3b}s^b m^{-2}$) en función de " b " para la subcuenca alta y baja de los ríos Tarqui, Yanuncay y la subcuenca alta del río Machángara $a/\text{Área}$

b	Subcuenca alta del Yanuncay	Subcuenca alta del Tarqui	Subcuenca alta del Machángara
0,5	1,65E-07	1,24E-07	7,80E-07

Fuente: Adaptado de Guzmán et al., 2015

La subcuenca alta del río Machángara tiene la capacidad de almacenamiento por unidad de área más alta de todas las analizadas, seguida de la subcuenca alta de los ríos Yanuncay y Tarqui respectivamente. Estos resultados corroboran la influencia de los diferentes ecosistemas y el tipo de regulación en su capacidad de almacenamiento.

No obstante, es importante mencionar que esta metodología no puede ser aplicada para la separación de caudal base en la cuenca media del río Paute, ya que considera periodos de recesión que se basan en la serie de precipitación media diaria de un área en particular, la cual debe ser estimada a través de un método de cálculo. Sin embargo, el cómputo de precipitación media para esta cuenca abarca varias incertidumbres debido a los diferentes regímenes de lluvia que se dan en toda su superficie, dado que la cuenca del río Paute es

particularmente heterogénea principalmente por la diversidad de influencias climáticas que la afectan (Pombosa et al., 2000). Frente a esto, una alternativa para la aplicabilidad de esta metodología consistiría entonces en la sectorización de la cuenca en subcuencas con regímenes hidrológicos similares.

4.2.2. Filtros Digitales

A partir de la serie de caudal base resultante a la salida de la subcuenca del río Machángara y el área total de ésta, se calcula el caudal base específico acumulado ($\sum \frac{Qb_s}{A}$) y se lo compara con los valores obtenidos del estudio de Guzmán et al. (2015) para las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay en los 956 días del periodo 2009 a 2011. A continuación, en la Tabla 5 se muestran los resultados.

Tabla 5: Caudal base específico acumulado en el periodo 01/01/2009 - 14/08/2011 para las subcuencas de los ríos Tarqui, Yanuncay y Machángara

	Subcuenca baja del Yanuncay	Subcuenca baja del Tarqui	Subcuenca baja del Machángara
Qb específico acumulado (mm)	785.70	352.48	1255.02

Fuente: Autores

Donde el mayor caudal base específico acumulado corresponde a la subcuenca del río Machángara, resultando ser un 72% y 37% superior a los de las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay respectivamente. La superioridad del caudal base específico encontrado para la subcuenca del río Machángara puede verse influenciado por dos aspectos: la regulación artificial en la zona alta y la cobertura de páramo. Sin embargo, la diferencia con el caudal base específico acumulado de la subcuenca del río Yanuncay radica principalmente en el tipo de regulación (natural) dado que igualmente ésta cuenta con un gran porcentaje de páramo (77%), mientras que para la subcuenca del río Tarqui el contraste se debe a los dos aspectos.

El método de filtros digitales para la separación de caudal base presenta ciertas restricciones por no tener una base física, es decir; no considera todas las condiciones de flujo. Sin embargo, es aplicable por la objetividad y reproducibilidad que éste presenta.

A partir del análisis del balance hídrico en una subcuenca con regulación natural, es posible caracterizar la recarga durante un periodo de tiempo prolongado, donde el flujo

proveniente del caudal base es equivalente a la recarga, debido a que cuando se promedia el balance hídrico durante un largo periodo de tiempo sin cambios significativos en el clima o influencias antropogénicas, se puede suponer que la variación del almacenamiento tiende a ser despreciable (Allan & Castillo, 2007). Por lo cual, existe una compensación entre los dos procesos (recarga y almacenamiento); ya que en épocas secas se liberan las aguas subterráneas que fueron almacenadas durante los periodos lluviosos (Guzmán et al., 2015).

En el siguiente esquema se ilustra el proceso de recarga en una cuenca con regulación natural.

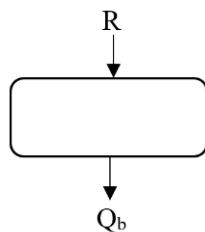


Figura 11: Esquema del proceso de recarga en una cuenca con regulación natural

Es decir:

$$R - Qb = S \quad (15)$$

Donde S es el almacenamiento, R la recarga y Qb el caudal base; entonces, al considerar un intervalo de tiempo Δt prolongado:

$$\Delta S \approx 0$$

$$\therefore R = Qb \quad (16)$$

No obstante, para la subcuenca del río Machángara la estimación de la recarga es compleja, debido a que en la zona alta existe almacenamiento artificial (Sa), determinada por la regulación de los embalses Chanlud y El Labrado. Por tanto, existe una fracción de dicho almacenamiento (f) que es liberada constantemente como se muestra en la siguiente figura:

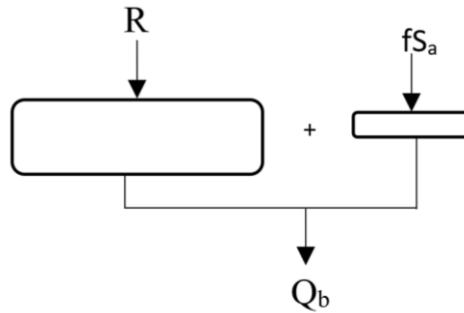


Figura 12: Esquema del proceso de recarga en una cuenca con regulación artificial

Fuente: Autores

Es decir;

$$\Delta S \neq 0$$

$$\therefore Q_b = R + fS_a \quad (17)$$

4.3. Aporte de las subcuencas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo 01/01/2009 a 14/08/2011

Con los resultados obtenidos por el método de filtros digitales (Eckhardt) se cuantificó el aporte de caudal base de las tres subcuencas analizadas a la cuenca media del río Paute (Anexo 5). Dichos aportes están representados en porcentajes para el periodo 01/01/2009 a 14/08/2011, resultando:

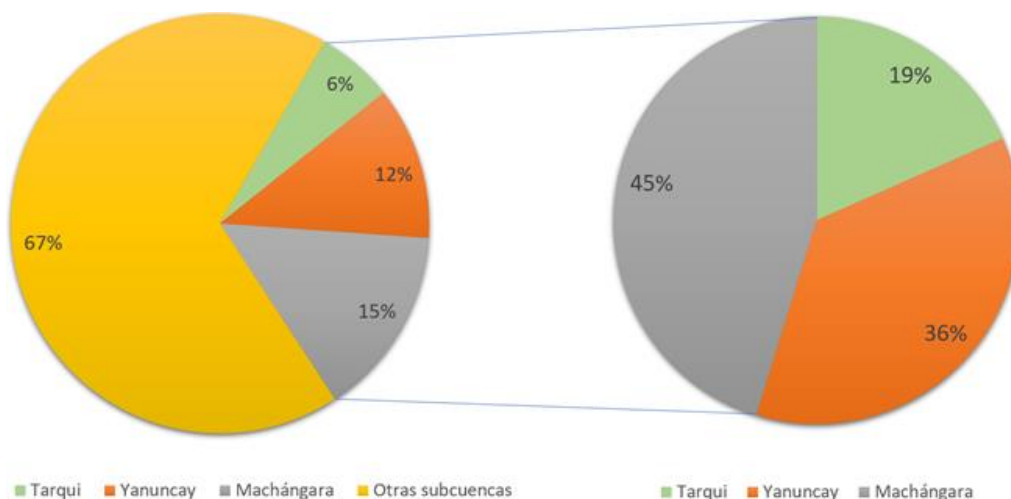


Figura 13: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo 2009 a 2011

Fuente: Autores

La contribución de caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay constituye el 33% y proviene de un área de 1220.45 km² en la cuenca media del río Paute (3598.44 km²). Siendo la de mayor aporte la subcuenca del río Machángara con el 15%, seguida de las subcuencas de los ríos Yanuncay y Tarqui con el 12% y 6% respectivamente. Considerando únicamente el aporte de las tres subcuencas se determina que el mayor aporte proviene de la subcuenca del río Machángara con el 45%, seguido de la subcuenca de los ríos Yanuncay y Tarqui con el 36% y 19% respectivamente.

Por otra parte, en el periodo crítico uno se observa que el aporte de las tres subcuencas en la cuenca media del río Paute se reduce al 27%, debido a la disminución del caudal base en las subcuencas con regulación natural de los ríos Tarqui y Yanuncay a un 3% y 8% respectivamente, mientras que la contribución de la subcuenca del río Machángara aumenta al 16%. De modo que, al considerar únicamente la contribución de las tres subcuencas, se observa que el aporte de la del río Machángara representa el 60% y el de los ríos Tarqui y Yanuncay el 12% y 28% respectivamente (Figura 14).

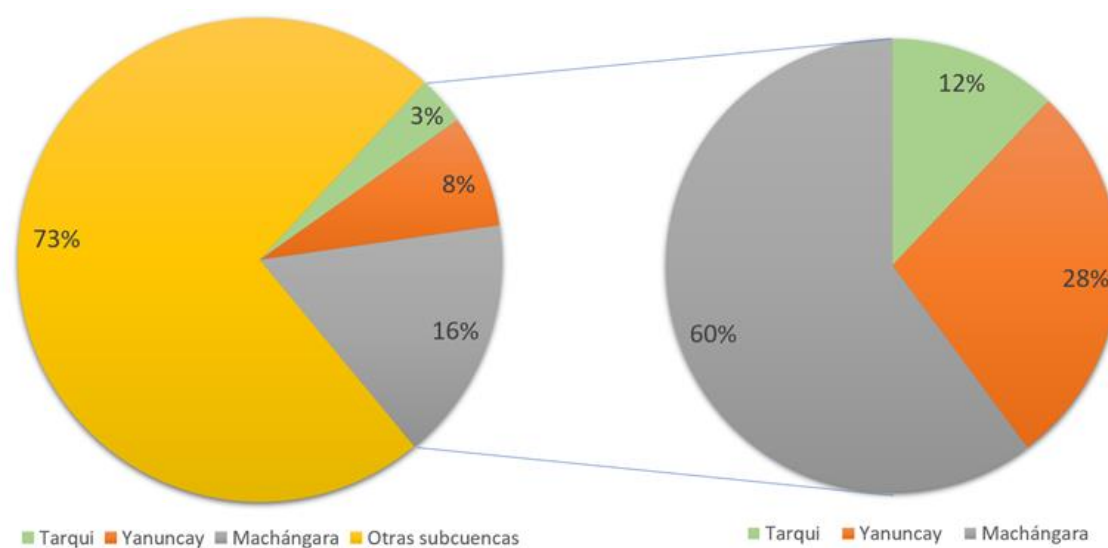


Figura 14: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo crítico 1 (12/07/2009 a 26/11/2009)

Fuente: Autores

Finalmente, al analizar el periodo crítico dos se observa que el aporte de caudal base de las tres subcuencas a la cuenca media del río Paute ha disminuido en un 2%; resultado de la disminución del aporte de la subcuenca del río Machángara. Además, se determina que las contribuciones de caudal base de las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay (3% y

8%) son iguales a las del periodo crítico uno, manteniendo una respuesta hidrológica similar frente a eventos de sequía. Por otra parte, al considerar exclusivamente el aporte de las tres subcuencas, se define que el de las subcuencas de los ríos Machángara (55%) y Yanuncay (32%) es sustancial, a diferencia de la del río Tarqui cuyo aporte es mínimo (13%). En la Figura 15 se ilustran dichos resultados:

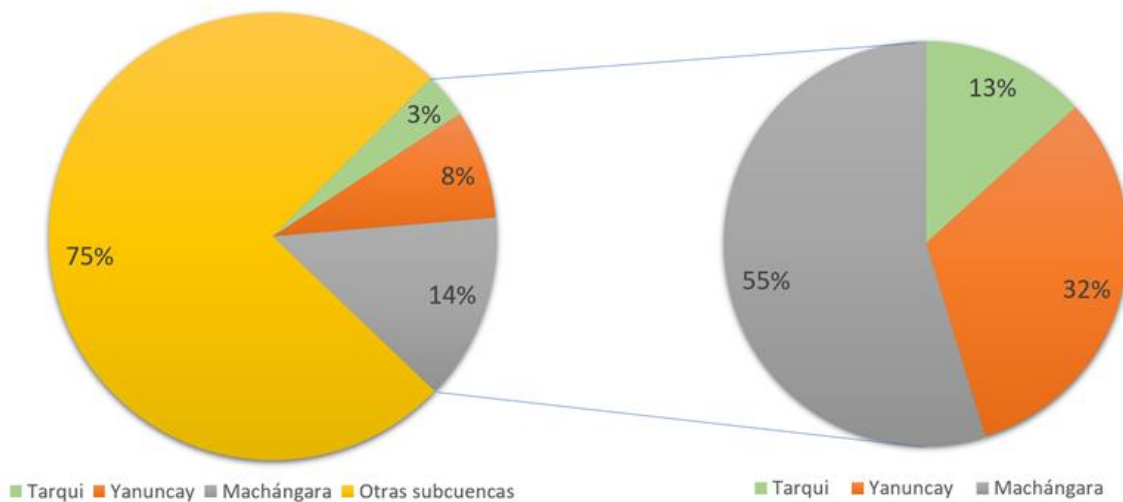


Figura 15: Aporte de las subcuencas Yanuncay, Tarqui y Machángara en la cuenca media del río Paute durante el periodo crítico 2 (18/09/2010 a 12/10/2010)

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

Se concluye que la capacidad de almacenamiento de la subcuenca alta del río Machángara analizada a través del parámetro a y de la relación $a/\text{área}$ mediante el método de separación de caudal base de análisis de recesión no lineal fue mayor que las subcuencas altas de los ríos Tarqui y Yanuncay. Esto se puede deber a los embalses existentes en la zona alta, cuya respuesta hidrológica se ve representada por el modelo perceptual distribuido, el cual se constituye del modelo perceptual A (páramo) y de la combinación de este ecosistema con la regulación artificial de los mismos.

Por otra parte, la estimación de la característica física de la recarga a través de la ecuación de balance hídrico ha sido aplicada en cuencas sin regulación artificial durante largos periodos de tiempo. Por consiguiente, el cálculo de este parámetro en la subcuenca del río Machángara presentó dificultades en su cómputo, debido a que ésta cuenta con regulación artificial de sus embalses.

En cuanto a los aportes de caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay se estableció que durante el periodo 01/01/2009 a 14/08/2011 el mayor aporte que recibió la cuenca media del río Paute provino de la subcuenca del río Machángara (15%), seguido de la subcuenca del río Yanuncay (12%) y el contribuyente más bajo fue la subcuenca del río Tarqui (6%). Cabe señalar que el aporte de caudal base de la subcuenca del río Yanuncay la cual posee alrededor del 77% de páramo y regulación natural fue aproximado al de la subcuenca del río Machángara, que está provista de un porcentaje similar de páramo (63%) y cuenta con regulación artificial; frente a esto, en función de un análisis de balance neto de regulación; sería importante cuestionarse si es mejor invertir en el cuidado del páramo o en la construcción de presas para la regulación.

Finalmente, en el caso de la subcuenca del río Machángara la regulación artificial ejercida a través de su capacidad de almacenamiento en los embalses fue un factor determinante para sostener los caudales principalmente en épocas de estiaje; lo cual se mostró en los periodos críticos analizados, donde el primero (12/07/2009 a 26/11/2009) como el segundo (18/09/2010 a 12/10/2010) presentaron un aporte superior de caudal base de la subcuenca del río Machángara (16% y 14% respectivamente). Además, se determinó que los aportes de caudal base de las subcuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay en el periodo



crítico uno (3% y 8% respectivamente) fueron iguales a los del periodo críticos dos; manteniendo una respuesta hidrológica similar frente a eventos de sequía.

6. RECOMENDACIONES



Para la construcción de embalses en zonas de páramo se recomienda analizar no sólo el aumento del almacenamiento, sino también la capacidad de regulación que éstos tendrían; ya que si con la construcción de los mismos se liberan cantidades similares de agua que las del páramo en condiciones naturales, entonces surge la necesidad de cuestionarse qué tanto amerita su implementación.

Para un análisis más detallado del aporte de caudal base en épocas de estiaje a la cuenca del río Paute, se recomienda extender la comparación de los aportes obtenidos en este estudio a otros periodos críticos. Asimismo, se recomienda ampliar el área de estudio para estimar el aporte de las otras subcuencas.

Para la obtención de resultados más realistas de caudal base, se recomienda el uso de metodologías basadas en la física como los filtros físicos, los cuales se derivan a partir de una ecuación de balance de masa y analizan ciertos parámetros (precipitación, recarga y evapotranspiración).

La subcuenca del río Machángara aporta caudal de forma continua, debido a la regulación artificial que posee. Por ello, se sugiere profundizar la investigación en la relación existente entre el caudal base y la regulación de los embalses. Lo cual facilitará el entendimiento de las características físicas asociadas a éste (almacenamiento y recarga).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksoy, H., & Wittenberg, H. (2011). Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 226–237. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.553614>
- Allan, J., & Castillo, M. (2007). *Stream ecology : structure and function of running waters*. Springer.
- ArcGis Desktop. (2019). Evaluación Condicional—Ayuda | ArcGIS Desktop. Retrieved July 29, 2019, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/con-.htm>
- Arnold, J., & Allen, P. (1999). AUTOMATED METHODS FOR ESTIMATING BASEFLOW AND GROUND WATER RECHARGE FROM STREAMFLOW RECORDS. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411–424. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x>
- Arumí, J., Jara, J., & Salgado, L. (2000). *Análisis Hidrológico*. Concepción - Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Avilés, A. (2017). *Pronóstico probabilístico de eventos de sequías y evaluación del riesgo en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Caso de estudio en una cuenca andina regulada* (Universitat Politècnica de València). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/78456>
- Barbecho, J., & Calle, J. (2012). *Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Río Tarqui* (Universidad de Cuenca). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/771>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: the primer* (2nd ed.). Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784–1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>



- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006a). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2006.06.002>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114. <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006b). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2005.06.012>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006c). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador. *Environmental Role of Wetlands in Headwaters*, 63, 271–281. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2007.06.035>
- Cadier, E., Gómez, G., & Calvez, R. (1997). INUNDACIONES Y SEQUÍAS EN EL ECUADOR. *Seminario Internacinal Sobre Las Consecuencias Climáticas Hidrológicas Del Evento El Niño a Escala Regional y Local*, 10. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-09/010006883.pdf
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (Tercera). México: Universitaria Potosina.
- Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machangara* (University de Cuenca). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23005>



- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Chapman, T. G., & Maxwell, I. A. (1996). Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments. *NATIONAL CONFERENCE PUBLICATION- INSTITUTION OF ENGINEERS AUSTRALIA NCP*, 2(5), 539–546. Retrieved from <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN031842507/Baseflow-separation-comparison-of-numerical-methods/>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Cordero, I., & Dominguez, J. (2013). *Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas* (Universidad de Cuenca). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3358>
- Coutagne, A. (1948). Meteorologie et hydrologie. (1948) Etude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent. 2 partie: les variations de débit en période non influencée par les précipitations. Le debit d'infiltration (corrélations fluviales i. *La Houille Blanche*, 416–436.
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2009). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins; Goslar-Hahnenklee*. UNESCO (Division of Water Sciences), Technical University of Braunschweig (TUBS), National IHP/HWRP Committee of Germany.
- Díaz, C. (2015). *CONSEJO DE CUENCA DEL RÍO MACHÁNGARA*.
- Díaz, L., & Dominguez, J. (2015). *Estimación de la contaminación generada por la actividad pecuaria en la cuenca del río Machángara en las provincias de Cañar y Azuay como complemento a la ejecución de su Plan de Manejo Ambiental* (Universidad del Azuay). Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4575>



- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507–515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Electro Generadora del Austro ELECAUSTRO S.A. (2019). Gestión Socio- Ambiental de ELECAUSTRO. Retrieved September 7, 2019, from http://www.elecaustro.com.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=155&Itemid=152
- ETAPA EP. (2019). Micpa. Retrieved September 7, 2019, from <https://www.etapa.net.ec/Información/Gestión-ambiental/Manejo-de-cuencas-hidrográficas/Micpa>
- Furey, P., & Gupta, V. (2001). A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research*, 37(11), 2709–2722. <https://doi.org/10.1029/2001WR000243>
- Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. *Hydrological Processes*, 29(14), 3051–3064. <https://doi.org/10.1002/hyp.10422>
- INAMHI. (2009). Estaciones meteorológicas e hidrológicas. Retrieved August 18, 2018, from www.serviciometeorologico.gob.ec
- Jiménez, F. (1994). *El Ciclo Hidrológico Y El Hombre: Hacia Un Uso Sostenible del Agua*. Retrieved from [https://books.google.com.ec/books?id=EdMOAQAIAAJ&printsec=frontcover&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiyur6VnbPkAhXnxlkKHUK1AewQ6AEIMzAC#v=onepage&q=ciclo hidrológico&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=EdMOAQAIAAJ&printsec=frontcover&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiyur6VnbPkAhXnxlkKHUK1AewQ6AEIMzAC#v=onepage&q=ciclo%20hidrológico&f=false)
- Ladson, A., Brown, R., Neal, B., & Nathan, R. (2013). A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australian Journal of Water Resources*, 17(1). <https://doi.org/10.7158/W12-028.2013.17.1>
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1997). *Hidrología para Ingenieros* (2nd ed.). Retrieved from https://www.academia.edu/37765494/Hidrología_para_Ingenieros-



LINSLEY_KOHLER_y_PAULHUS

- Llambí, L., Bièvre, B., Célleri, R., Ochoa, B., Borja, P., & Soto, A. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Retrieved from https://biblio.flacsoandes.edu.ec/shared/biblio_view.php?bibid=132917&tab=opac
- Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 89–93. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/272491803_Stochastic_Time-Variable_Rainfall-Runoff_Modeling
- Maderey, L., & Jiménez, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico* (Primera). Retrieved from [https://books.google.com.ec/books?id=0S3XDWsDzSAC&printsec=frontcover&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiyur6VnbPkAhXnxlkKHUK1AewQ6AEILjAB#v=onepage&q=ciclo hidrológico&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=0S3XDWsDzSAC&printsec=frontcover&dq=ciclo+hidrológico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiyur6VnbPkAhXnxlkKHUK1AewQ6AEILjAB#v=onepage&q=ciclo%20hidrológico&f=false)
- Mauricio, J. (2007). *Introducción al Análisis de Series Temporales*. España: Universidad Complutense de Madrid.
- Millares, A., Polo, M., Losada, Á., Aguilar, C., & Herrero, J. (2009). *CARACTERIZACIÓN DEL CAUDAL BASE EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA A PARTIR DE UN ANÁLISIS ESTACIONAL DE RECESIONES*. Retrieved from <https://docplayer.es/4039405-Characterizacion-del-caudal-base-en-zonas-de-alta-montana-a-partir-de-un-analisis-estacional-de-recesiones.html>
- Montealegre, J. (1990). *TÉCNICAS ESTADÍSTICAS APLICADAS EN EL MANEJO DE DATOS HIDROLÓGICOS Y METEOROLÓGICOS*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009198/009198.pdf>
- Moore, R. (1997). Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. *Journal of Hydrology*, 198(1–4), 260–270. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03287-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03287-8)
- Mujeriego, R. (2005). La reutilización, la regulación y la desalinización de agua”



- Ingeniería y Territorio^o 72, pp. 21-22. *Ingeniería y Territorio*.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473.
<https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Ochoa, A., & Rodas, M. (2009). *Variabilidad espacio temporal de la calidad de agua a escala de microcuenca en zonas de páramo* (University of Cuenca). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7515>
- Pacheco, J., Parra, N., & Avilés, A. (2017). Análisis de la sequía en la cuenca del Paute mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI). *Memorias Universidad Del Azuay*, XVI(May), 41–49.
- Pombosa, R., Roura, J., García, F., & Tejada, M. (2000). *MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE*. Quito: INAMHI, IRD.
- Quintero, M. (Ed.). (2010). *SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN LA REGIÓN ANDINA* (Agua y soc). Retrieved from https://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/files_mf/13599885926ServiciosambientaleshidrológicosenlaRegiónAndina.pdf
- Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3–4), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Spongberg, M. (2000). Spectral analysis of base flow separation with digital filters. *Water Resources Research*, 36(3), 745–752.
<https://doi.org/10.1029/1999WR900303>
- The COMET program. (2019). COMET. Retrieved September 23, 2019, from www.comet.ucar.edu
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., & Deckers, J. (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Geomorphology*, 87(1–2), 53–67.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2006.06.042>
- Wittenberg, H. (1994). Nonlinear Analysis of Flow Recession Curves. *IAHS*, 221.



Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/242234375_Nonlinear_Analysis_of_Flow_Recession_Curves

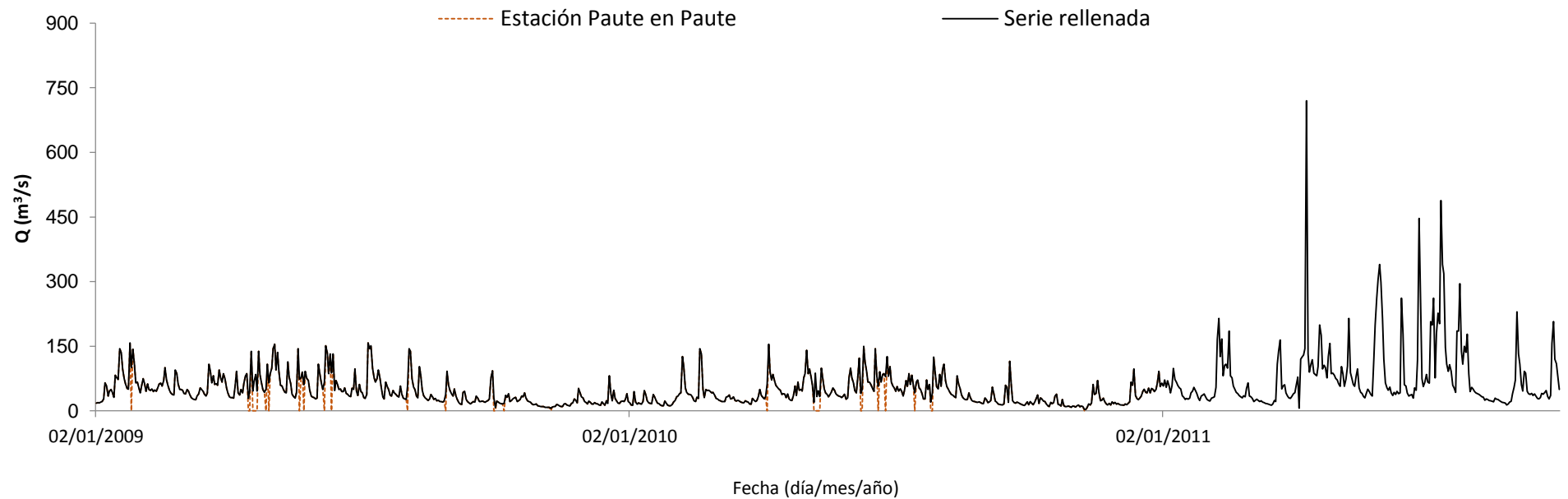
Wittenberg, H. (1999). Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes*, 13(5), 715–726.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<715::AID-HYP775>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<715::AID-HYP775>3.0.CO;2-N)

Wittenberg, H., & Sivapalan, M. (1999). Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology*, 219(1–2), 20–33. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00040-2)

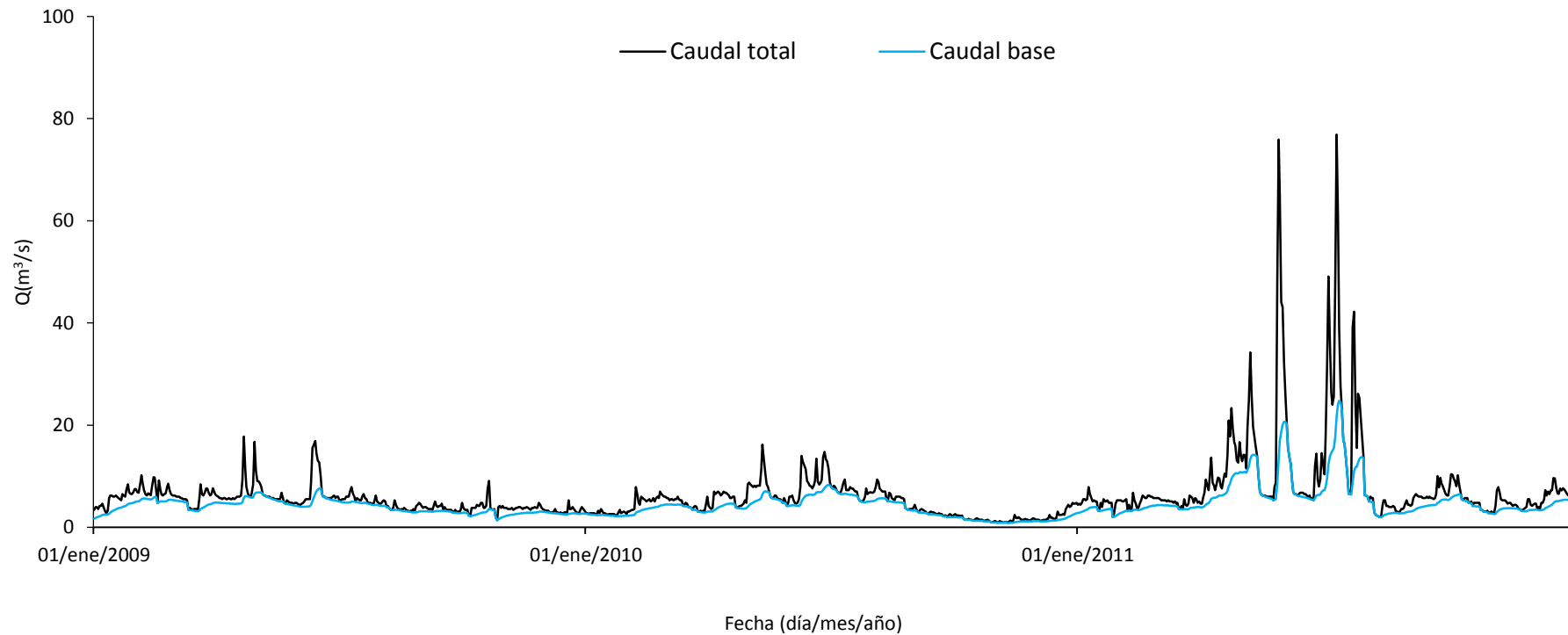
8. ANEXOS

ANEXO 1. Relleno de la serie de datos de descarga de la estación Paute en Paute durante el periodo 01/01/2009 a 31/12/2011.



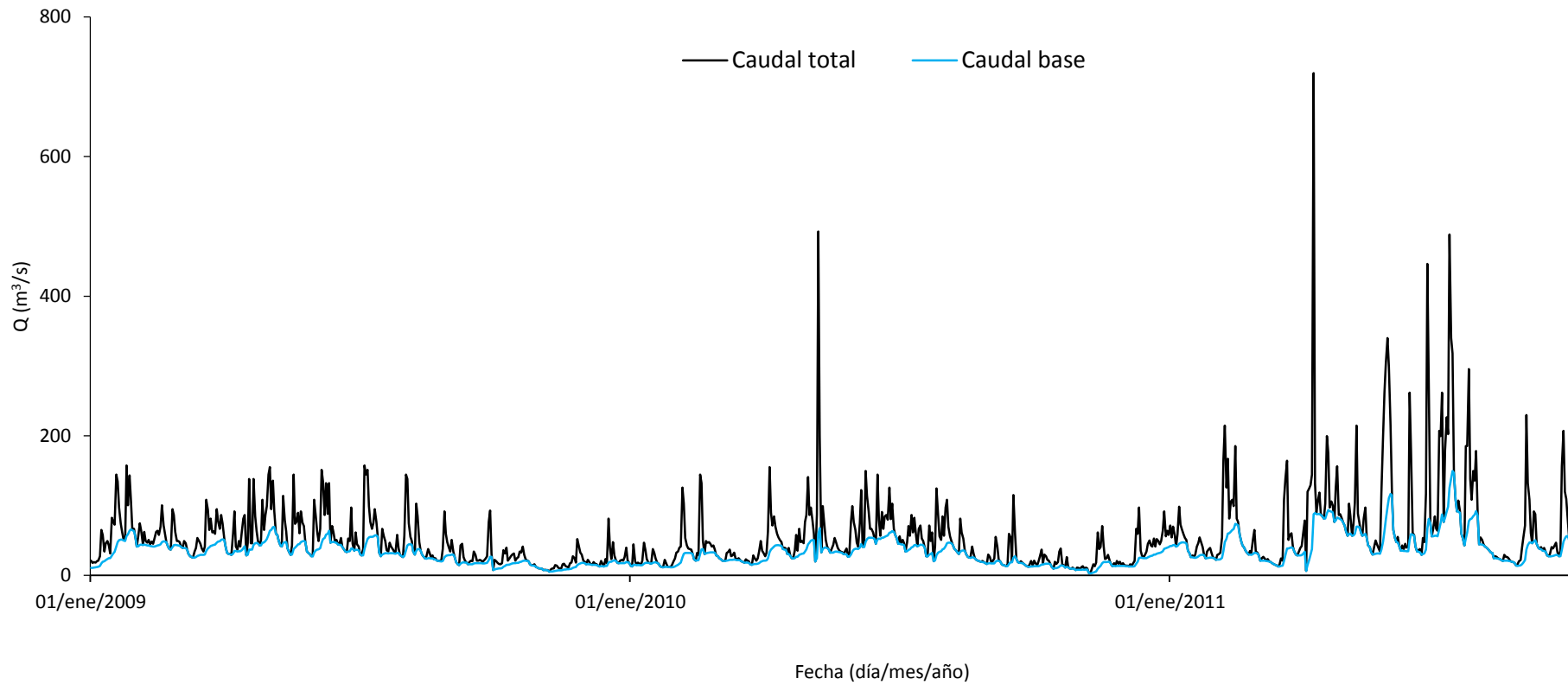
ANEXO 2. Separación de caudal base por Eckhardt $BFI_{max} = 0.8$ en la subcuenca alta del río Machángara y en la cuenca media del río Paute en el periodo 2009-2011.

a. Subcuenca alta del río Machángara



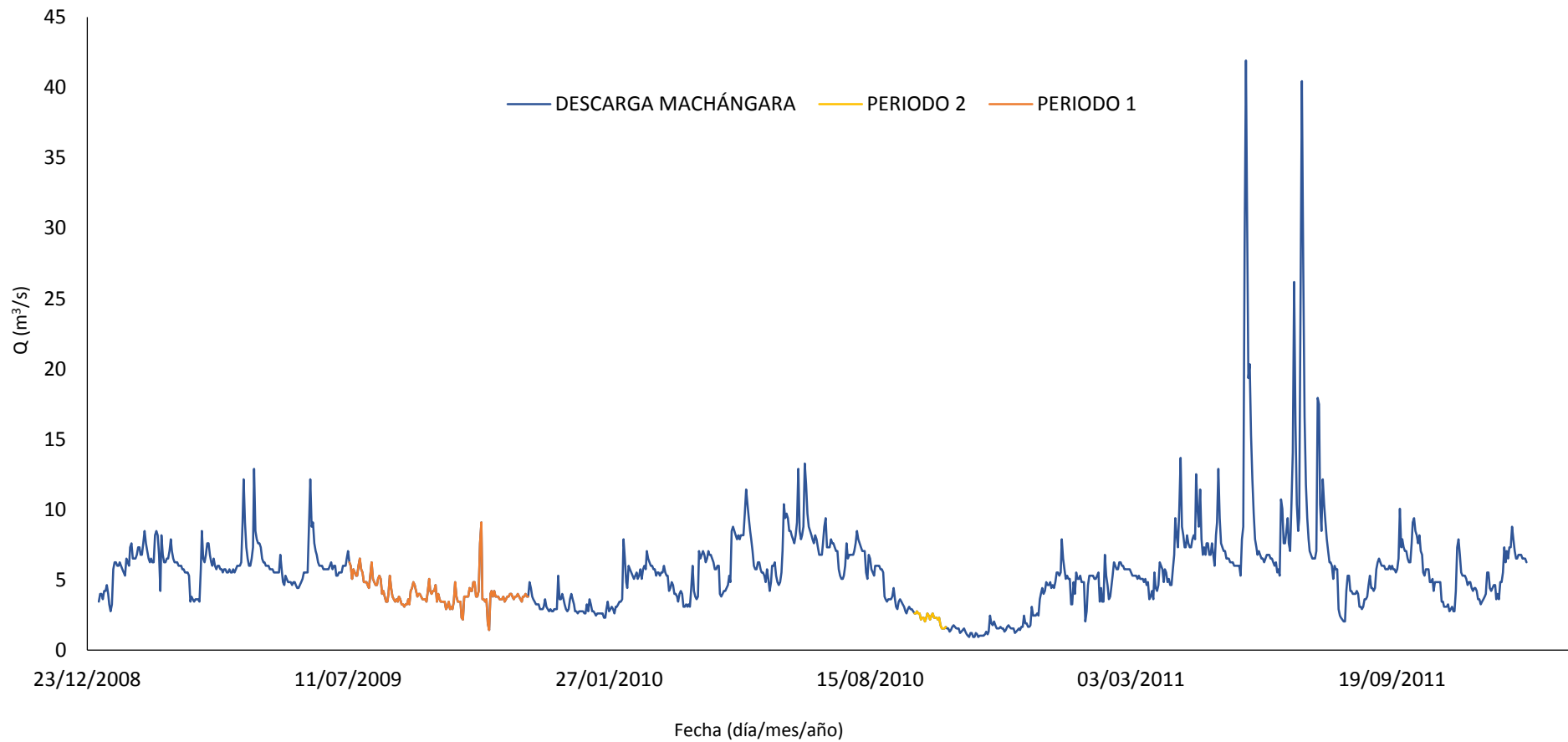


b. Cuenca media del río Paute

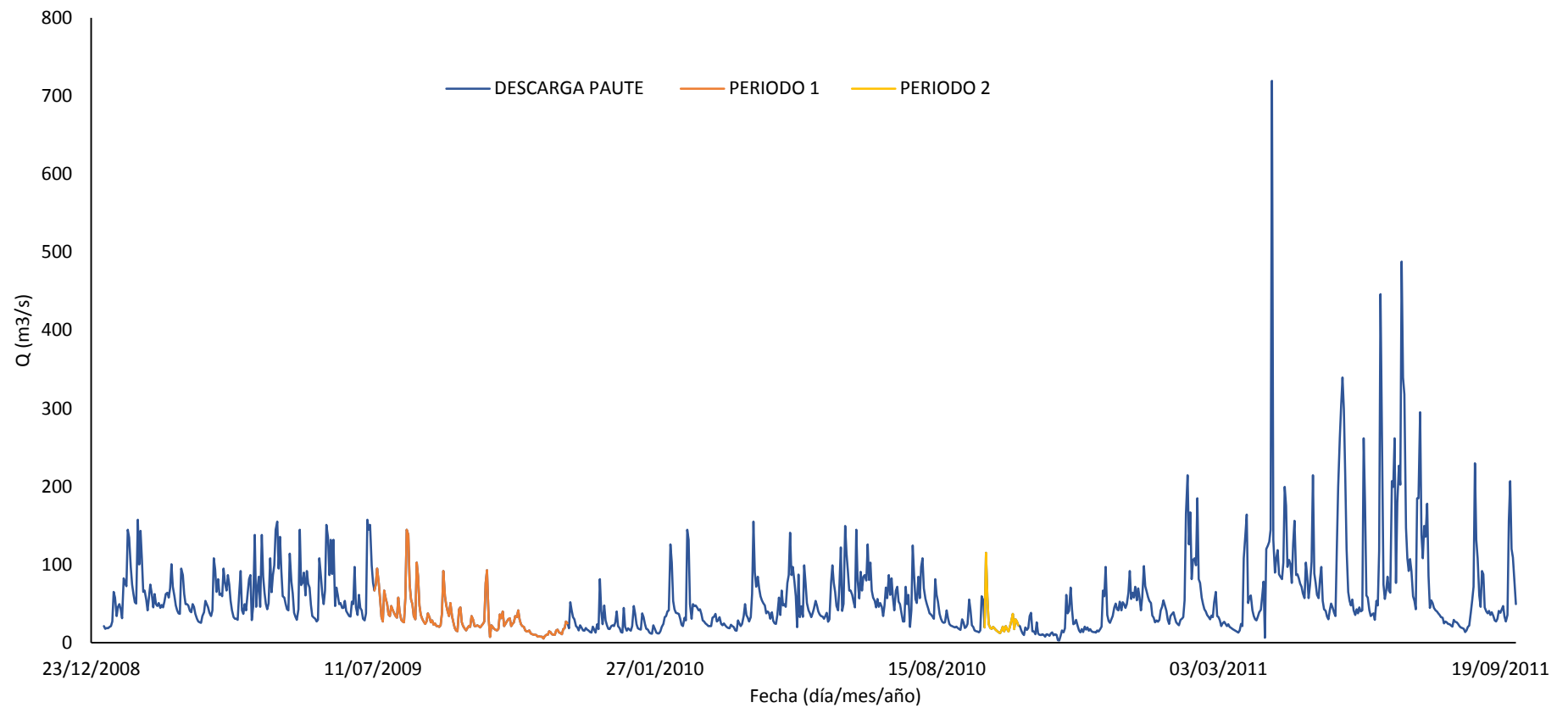


ANEXO 3. Periodos de estiaje en las series de descarga en el periodo 2009-2011.

a. Estación Machángara DJ. Chulco



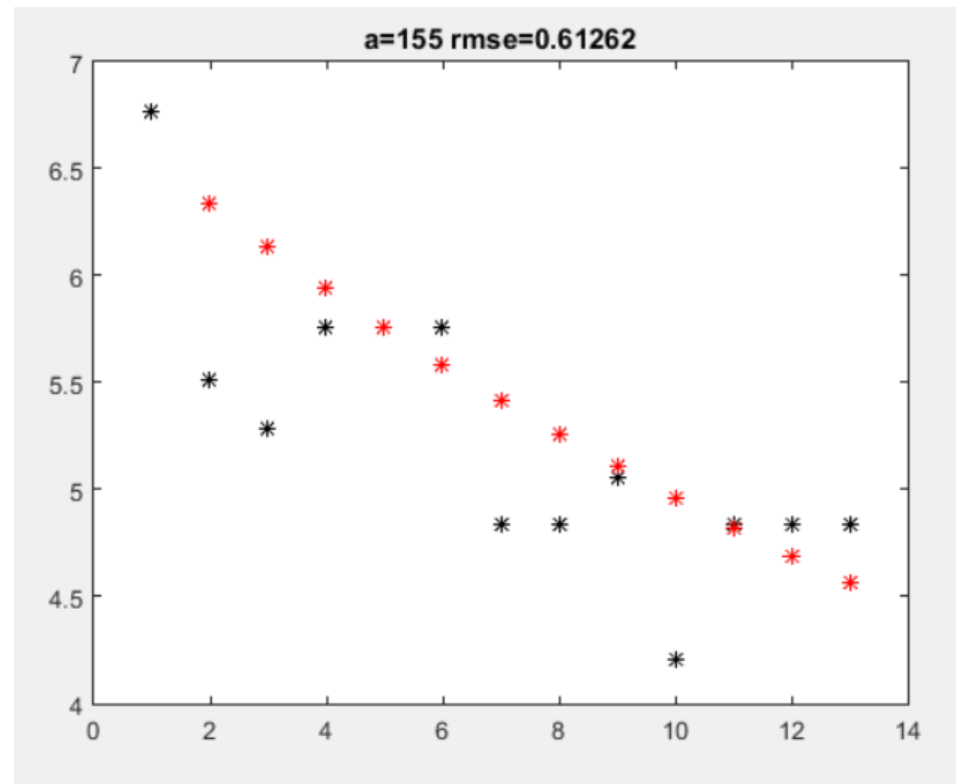
b. Estación Paute en Paute



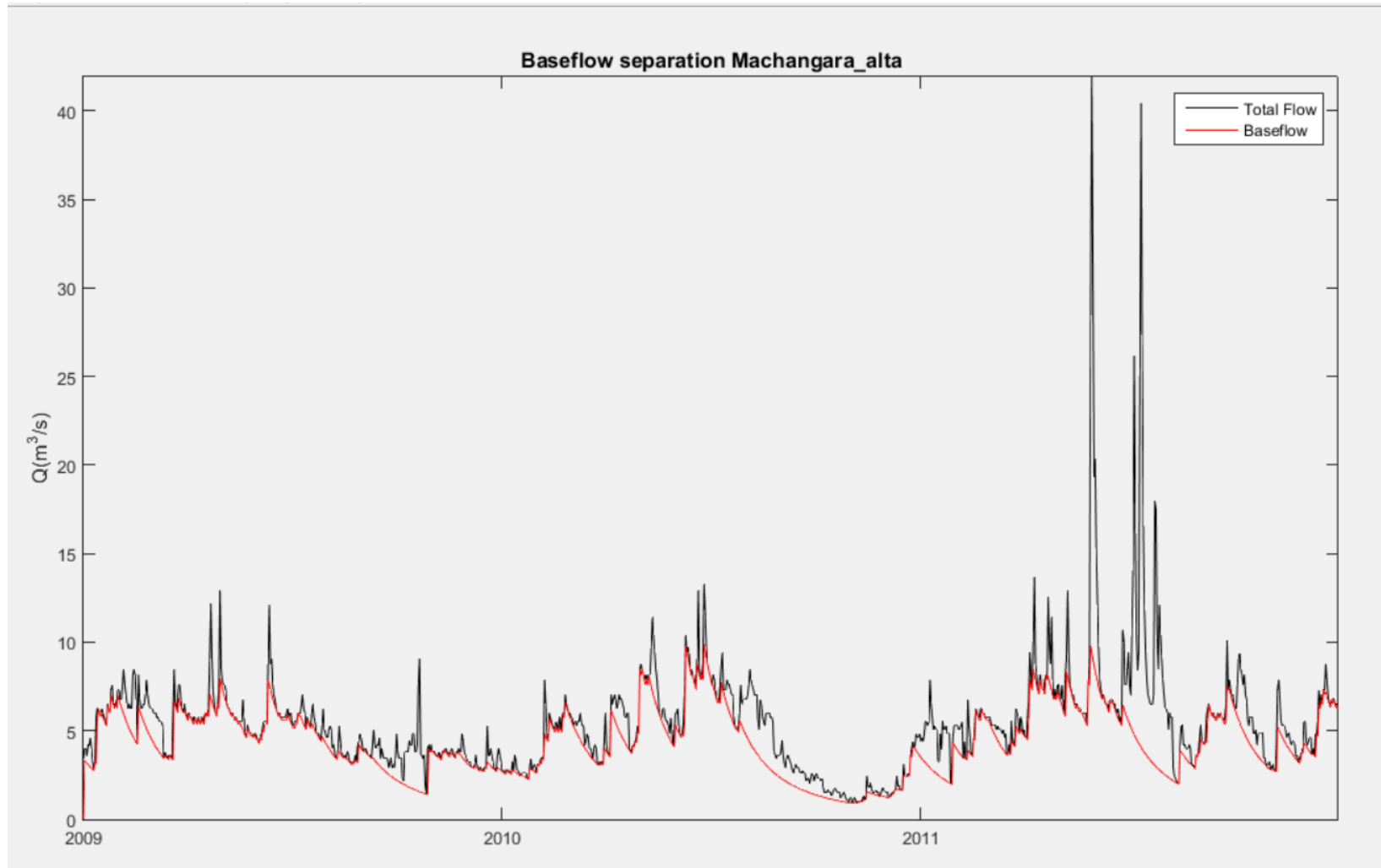
ANEXO 4. Separación de caudal base por análisis de recesión no lineal

a. Cálculo del parámetro a

Christian Andrés Quezada Ochoa
María del Carmen Quizhpi Calle

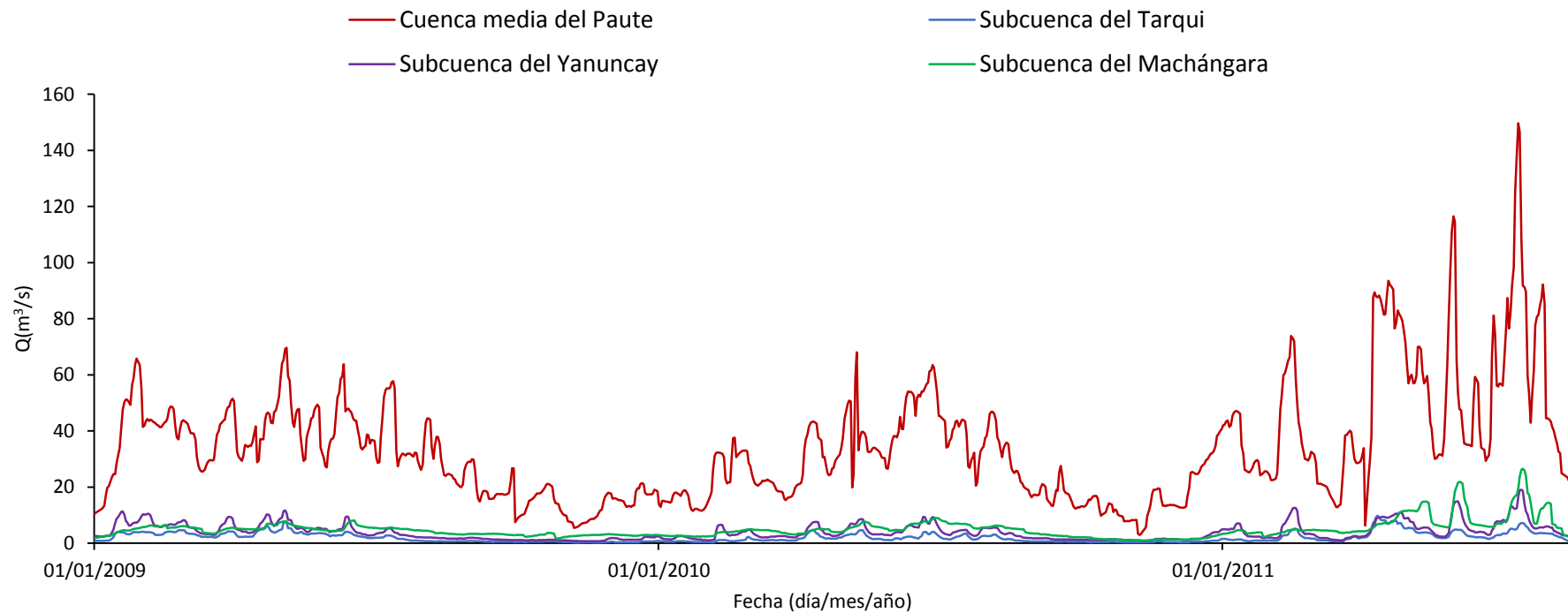


b. Gráfico de separación de caudal base



ANEXO 5. Aporte del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en la cuenca media del río Paute durante el periodo 2009 a 2011.

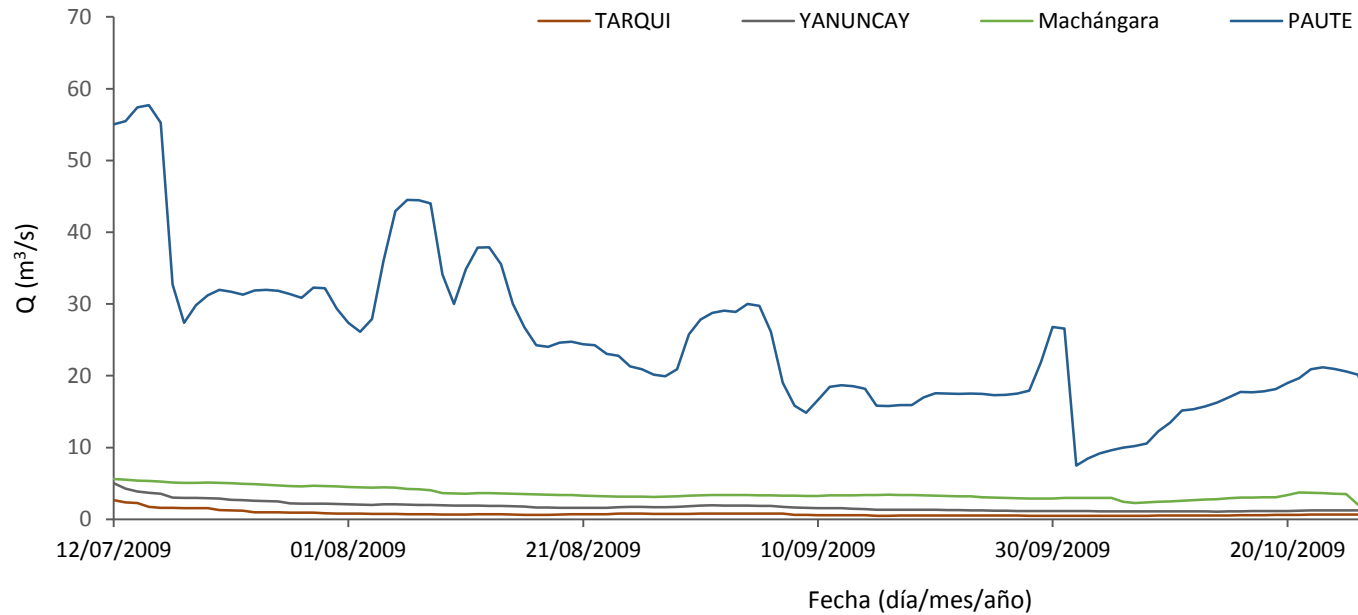
a. Comparación de caudal base por Eckhardt $BFI_{max} = 0.8$ durante el periodo 2009 a 2011.





b. Comparación de caudal base por Eckhardt $BFI_{max} = 0.8$ durante los periodos de estiaje.

Periodo 1





Periodo 2

