

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS DE TÉCNICAS HIDROLÓGICAS FÍSICAS PARA
LA ESTIMACIÓN DE RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
LA ZONA DE MULALÓ**

PROYECTO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

DIANA BELEN ESPINOSA SIMBAÑA

Director: ING. XAVIER ZAPATA RIOS PhD.

Quito, agosto 2022

CERTIFICACIONES

Yo, DIANA BELEN ESPINOSA SIMBAÑA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

DIANA BELEN ESPINOSA SIMBAÑA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DIANA BELEN ESPINOSA SIMBAÑA, bajo mi supervisión.

ING. XAVIER ZAPATA RIOS PhD.
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DIANA BELEN ESPINOSA SIMBAÑA

ING. XAVIER ZAPATA RIOS PhD.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres Nelson y Yolita, por siempre apoyarme para alcanzar mis metas. Y a mi hermano Ramirito por siempre estar conmigo en las buenas y malas.

AGRADECIMIENTO

Primero quiero dar gracias a Dios y a mi familia: Nelson, Yolita y Ramirito por acompañarme en los momentos más difíciles, darme todo su cariño y ayudarme a ser mejor persona cada día, son mi ejemplo.

A mi director el Dr. Xavier Zapata Ríos por brindarme su conocimiento y el tiempo dedicado al proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.Objetivo General	2
1.2.Objetivos Específicos	2
1.3.Alcance	2
1.4.Marco teórico	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
3. METODOLOGÍA	7
4. PROCEDIMIENTO	11
5. RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	14
5.1. Resultados	14
5.2. Discusión.....	26
5.3. Conclusiones.....	27
5.4. Recomendaciones	28
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
7. ANEXOS	33

RESUMEN

El agua subterránea juega un papel importante en el ciclo hidrológico y sirven como abastecimiento de comunidades rurales porque complementan a las aguas superficiales. Por lo tanto, es primordial realizar estudios sobre los recursos hídricos que poseen los países para saber cómo determinar una adecuada gestión de este medio, pero los estudios previos realizados en el Ecuador sobre las aguas subterráneas son muy limitados.

Esta investigación tiene como objetivo la estimación de la recarga de aguas subterráneas en la zona de Mulaló ubicada en la provincia del Cotopaxi. El acuífero analizado comprende una extensión de 200 km².

Se realizó la estimación de la recarga del acuífero de Mulaló mediante el método del balance hídrico superficial sobre la cuenca del río Cutuchi que abarca la mayor área de nuestra zona de estudio. Para la información de datos se tomó como referencia la base de datos satelitales de CHIRPS para la precipitación y MODIS para la evapotranspiración.

También se realizó la separación de caudales a través del modelo HYSEP. Los datos utilizados para este método corresponden a tres estaciones hidrológicas: Cutuchi en Caspi (H0854), Pansachi en Hda.Baños (H797) y Illuchi Aj Cutuchi (Cva Ambato) (H857). Para los valores del método del balance hídrico superficial se obtuvo los valores máximos de recarga de 201, 2 mm/año y valores de déficit de -81,2 mm/año. Para el método de separación de caudales se obtuvo valores de recarga de 3744, 4 mm/año para la estación H0854, 474,0 mm/año para la estación H797 y 20,5mm/año para la estación H857. La variabilidad de resultados entre los dos métodos aplicados para el proyecto propone que se debe a la sobre y subestimación de la información presentada por datos satelitales.

Este estudio aporta de manera primordial a la información que se tiene sobre las aguas subterráneas en la zona de Mulaló debido a que en el Ecuador los análisis para determinar si existen fuentes de agua subterránea son pocos, de igual manera los estudios para definir la ubicación de las zonas de recarga y sus valores son escasos.

PALABRAS CLAVE: Acuífero, Mulaló, balance hídrico, separación de caudales

ABSTRACT

Groundwater plays an important role in the hydrological cycle and serves as a supply for rural communities because it complements surface water. Therefore, it is essential to carry out studies on the water resources that countries have in order to know how to determine an adequate management of this medium, but previous studies carried out in Ecuador on groundwater are very limited.

The objective of this research is to estimate groundwater recharge in the Mulaló area located in the Cotopaxi province. The aquifer analyzed covers an area of 200 km².

The estimation of the recharge of the Mulaló aquifer was carried out using the surface water balance method on the Cutuchi river basin, which covers the largest area of our study zone. The CHIRPS satellite database for precipitation and MODIS for evapotranspiration were used as reference data.

Flow separation was also performed using the HYSEP model. The data used for this method correspond to three hydrological stations: Cutuchi in Caspi (H0854), Pansachi in Hda.Baños (H797) and Illuchi Aj Cutuchi (Cva Ambato) (H857). For the surface water balance method, maximum recharge values of 201.2 mm/year and deficit values of -81.2 mm/year were obtained. For the flow separation method, recharge values of 3744.4 mm/year were obtained for station H0854, 474.0 mm/year for station H797 and 20.5 mm/year for station H857. The variability of results between the two methods applied for the project is proposed to be due to the over- and underestimation of the information presented by satellite data.

This study makes a major contribution to the information available on groundwater in the Mulaló area because in Ecuador there are few analyses to determine if there are groundwater sources, and studies to define the location of recharge zones and their values are scarce.

KEYWORDS: Aquifer, Mulaló, water balance, flow separation

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso sustancial para la permanencia y desarrollo del ser humano como también de las diferentes estructuras de vida en el planeta [1]. Según datos a nivel mundial se deduce que un porcentaje mayor a la mitad de la población es decir cerca de 4 200 millones de habitantes no poseen servicios de saneamiento seguros. De manera similar, una gran parte de la población padece estrés hídrico y en los próximos años el agua potable escaseara [2]. De todas las reservas existenciales globales de agua, el agua subterránea se destina para el riego de un tercio de los cultivos. Consecuentemente, en los últimos años ha crecido su demanda a nivel mundial. Esta reserva de agua sub-superficial desarrolla un papel ambiental importante en la naturaleza por su aportación a los caudales de ríos, estuarios, lagos, humedales y manantiales. Además, el recurso de agua participa en procesos geológicos, y es tomado como un solvente por lo tanto reacciona como medio para el transporte de algunos contaminantes y también participa en el control de la entrada de aguas salinas a los continentes [3].

En el caso del Ecuador, el aprovechamiento de las aguas subterráneas ha incrementado en los últimos 20 años por la demanda consecuente al crecimiento poblacional, el desarrollo industrial y agropecuario, deterioro de la calidad que poseen las aguas superficiales y los problemas de sequía en varias zonas del país [4]. Algunas comunidades únicamente cuentan con el agua subterránea para satisfacer sus principales necesidades de consumo y en otros casos también es usada para la irrigación de cultivos [5]. Sin embargo, en las regiones semiáridas, ubicadas en el sur y a lo largo de la costa del país, se puede evidenciar la disminución de los acuíferos. Estas regiones están ubicadas principalmente cerca de la zona de transición del desierto del norte peruano, presentando vulnerabilidad a los procesos de desertificación y erosión del suelo causados por las condiciones climáticas cambiantes y las actividades antropogénicas como el cambio de uso de la tierra [6].

Dentro de la división del continente Sudamericano se encuentra La cordillera de los Andes y específicamente en el Ecuador, éste macizo presenta características topográficas y geológicas heterogéneas. Las formaciones de su superficie resultan de fenómenos geológicos recientes, se evidencia una fase de volcanismo explosivo con acumulación de un importante material piroclástico. Estos sedimentos piroclástico son permeables y conforman acuíferos [7]. En el Ecuador, la Sierra central se encuentra conformada por varias cuencas interandinas deprimidas y a su vez distanciadas por elevaciones transversales cuya altura no superan los 3500 msnm. Las cuencas presentes son de origen tectónico que poseen sedimentos detríticos como también material volcánico como resultado de actividad volcánica

y fuertes erosiones. En esta área se localizan acuíferos locales y discontinuos con permeabilidad inestable, de bajo rendimiento. En el noroeste encontramos el denominado “Acuífero Otavalo Ibarra”, un sistema de acuíferos localizados en el valle de Machachi, Los Chillos, Quito y Cayambe. En la provincial del Cotopaxi tenemos el acuífero de la unidad Latacunga – Ambato, en el cual se encuentra el acuífero de Mulaló. Este acuífero tiene contiene rocas fluvio lacustres y sedimentos de origen laharítico, son de tipo locales con permeabilidad media. Las formaciones de origen volcánico se descargan por los ejes de drenaje del Callejón Interandino guiados por manantiales de alto rendimiento [3].

1.1. Objetivo General

Estimar la recarga de aguas subterráneas del acuífero de Mulaló a través del balance hídrico superficial y la separación de caudales aplicando el programa USGS GW Toolbox.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar un balance hídrico superficial para toda el área de estudio que contiene los puntos de muestreo presentados en anteriores investigaciones.
- Obtener un análisis de la recarga por medio del método de separación de caudales con el programa USGS GW Toolbox y el uso de datos de caudal a nivel diario.
- Presentar resultados de buena calidad y de forma homogénea dentro de un periodo de años de manera continua.

1.3. Alcance

La explotación del agua subterránea se ha concentrado en localidades rurales, en la gran mayoría de los casos, muy reducidas, y a proyectos relativamente pequeños por la carencia de conocimientos sobre éste recurso. Consecuentemente existe la necesidad de estudiar los acuíferos en la zona Andina del Ecuador y estimar la recarga de aguas subterráneas. De esta forma, se contribuye mejorar los conocimientos de los acuíferos actualmente en explotación, sino, además, se implementa estrategias para ser parte de la evaluación de las reservas y la información de los mecanismos de recarga de los principales sistemas acuíferos del país [3].

El acuífero de Mulaló es una reserva de agua de buena calidad y por tanto importante para el abastecimiento de agua para el consumo humano y para riego. Sin embargo, no existe investigación ni evaluaciones sobre la extensión del acuífero, zonas de recarga, valores de recarga anual, etc. Por tanto, el presente trabajo está enfocado en analizar la recarga de los acuíferos en la zona de Mulaló mediante las técnicas hidrológicas físicas.

1.4. Marco teórico

Agua subterránea

Se refiere al agua que se almacena y transita en el subsuelo, desarrollando los acuíferos. Su principal fuente de aporte de agua se realiza mediante la infiltración de agua lluvia. Otras fuentes que sirven de aporte a los acuíferos son los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea cubre un volumen debajo del nivel freático y satura completamente los poros del terreno. El recurso de agua subterránea tiene contacto con la superficie terrestres a través de vertientes o manantiales fluviales. El movimiento del agua subterránea inicia en las zonas de recarga hasta lugares de descarga. Sus velocidades, van desde metro/año a cientos de m/día y cuenta con tiempos de residencia largos y en muchas ocasiones se puede concentrar en grandes volúmenes de almacenamiento [8].

Acuífero

Según las ciencias geológicas se denomina acuífero a la integración subterránea natural de roca que puede ser sedimento permeable que guarda y a la vez conduce el agua subterránea. El acceso a esta agua puede ser por medio de pozos y manantiales. Hay dos tipos de acuíferos: los acuíferos confinados y los acuíferos no confinados. Los acuíferos confinados se encuentran delimitados por capas impermeables y el agua en muchas ocasiones se encuentra presurizada. Por otro lado, los acuíferos no confinados brindan un libre acceso de agua al acuífero a través de la precipitación y la infiltración en las capas de suelo superiores [9].

Para la formación de un acuífero se parte de la infiltración al suelo de las lluvias tomando en cuenta el ciclo hidrológico del agua, estas pueden llegar al material rocoso que hay debajo que es más o menos permeable. En el caso de que sea permeable se abre paso al agua, pero si es impermeable el paso del agua quedará interrumpido y así se podría acumular [10].

Recarga de un acuífero

Existe maneras naturales para recargar al acuífero por medio de la infiltración a través de los poros de la roca y de los sedimentos. Los cambios en la cubierta vegetal y la erosión de suelo hacen que la tasa de infiltración baje. Para facilitar el proceso de infiltración se puede realizar construcciones de estructuras que mantengan la recarga artificialmente. Esto se denomina gestión de la recarga de acuíferos [11].

Balance hidrológico superficial

La diferencia entre precipitación menos evapotranspiración real nos proporciona una estimación del balance hídrico superficial y de la precipitación que efectivamente llega a la superficie terrestre. En este punto, el agua puede básicamente infiltrarse o puede escurrir. Por tanto el balance hidrológico superficial nos permite cuantificar la cantidad máxima posible de agua que puede infiltrarse en el suelo y contribuir a la recarga de un acuífero [12]. Es un indicador de un máximo umbral de recarga.

Separación del caudal base

La magnitud del flujo base representa el agua almacenada en los acuíferos en contacto con el río que representa el potencial de agua subterránea que se encuentra en la cuenca de estudio, el flujo base representa un indicador de sostenibilidad del recurso hídrico. El caudal base se considera como el caudal mínimo para mantener en circulación el cauce superficial [13].

Para la cuantificación de la recarga en un acuífero se utilizan múltiples técnicas de diferente índole. A continuación, se resume las principales metodologías que han sido utilizadas para la estimación de recarga de aguas subterráneas.

Hidrograma

Es un gráfico que representa la variación del caudal en relación con el tiempo en un punto específico de una Cuenca Hidrográfica. Se refleja la relación existente entre las condiciones fisiográficas de esta Cuenca y la relación lluvia-escorrentía. La forma del hidrograma representa el reflejo de las precipitaciones que han desarrollado escorrentía directa. El área ubicada debajo del hidrograma representa al volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo considerado [14].

2. ESTADO DEL ARTE

Los métodos físicos para la determinación de la recarga de aguas subterráneas son los que pueden ser aplicados con mayor facilidad en la región Andina del Ecuador debido al tipo de datos necesarios para su análisis, datos que son más comúnmente medidos en el país.

Balance hídrico superficial

Según un estudio realizado por Loor en el año 2017 [15] en la provincia del Azuay, en el Bosque de Vegetación Protector Aguarongo, se determinó el balance hídrico superficial mediante el uso de programas de información geográfica. Se encontró la diferencia entre precipitación y evapotranspiración. Se analizó 30 estaciones hidrológicas y meteorológicas de la red de información del INMAHI, de las cuales solo se usó 4 estaciones en estado activo e inactivo. Para datos de precipitación se hizo un relleno de datos mediante correlación lineal, con datos completos de estaciones. La metodología contempla un periodo de 30 años consecutivos. Según los resultados del estudio nos indica los meses del año en donde las microcuencas Huayrapungu y Quillosisa presentan déficit en el balance y los meses en que sus precipitaciones son mucho más altas.

En la investigación realizada por Rosales [16] sobre el balance hídrico superficial realizado en la cuenca del Usumacinta ubicada al sureste de México, se determina que en la metodología es fundamental estimar la precipitación y evapotranspiración en una escala temporal mensual. En donde la precipitación representa la entrada y la evapotranspiración indica la salida. Por lo tanto, se aplica la ecuación principal de un balance que viene siendo entradas menos salidas igual a la recarga o déficit del recurso hídrico. El estudio fue realizado a nivel mensual en los años 2008, 2009 y 2010. Se pudo determinar los meses de mayor sequía es decir existe déficit, así mismo se logró determinar los meses de mayor presencia de agua en la cuenca.

En la investigación realizada por Murillo [17] menciona que este balance inicia con plantear la hipótesis de que un acuífero capta como entrada específica de agua o recarga al mismo la procedente del área no saturada. Se plantea la descarga al exterior de este en base al volumen de agua que tiene almacenado. Este estudio fue realizado en el acuífero de Bajo Guadalquivir en Europa, España. Se lleva a cabo el balance mediante el uso del principio de conservación de la masa para un tiempo determinado, este estudio se puede expandir a lo largo de la cuenca o sobre subdivisiones de esta. Se expresa ventajas sobre este método porque se trabaja con datos iniciales que son de fácil obtención. Un inconveniente se encuentra en el uso de datos de escorrentía superficial y evaporación potencial porque son más complejos. Murillo (2001) determina que la evaporación real puede ser igual a la evaporación potencial pero si se presenta suficiente reserva de agua en el suelo, o bien si la precipitación es mayor o igual que la evaporación porque son parámetros que no son muy fáciles de medir y una de sus recomendaciones es verificar que las estaciones utilizadas en el proyecto estén ubicadas bajo criterios hidrológicos debido a que se toma datos en puntos

concretos de la red fluvial de las descargas naturales del acuífero.

En el estudio realizado por Falcon et al., (2013) [18] en la ciudad de La Paz ubicada en México, se desarrolló un estudio del balance hidrológico del acuífero. Su objetivo analiza cómo se puede regular la extracción de agua subterránea tomando en cuenta el uso racional del mismo. Primero se realiza una caracterización del recurso hídrico para poder ajustar la extracción de agua y administrar de mejor manera el agua subterránea. El principal fundamento es la recarga de forma natural porque se prioriza el volumen que mantiene en equilibrio y puede asegurar la conservación de acuífero. El método de balance hidrológico utiliza la ecuación general de balance hidrológico e incluye factores de entrada y salida de este sistema acuífero, al final se usó para estimar el cambio de almacenamiento.

Rodríguez [19] aclara que el balance hídrico es un análisis tridimensional entre las entradas y las salidas, en un volumen del suelo definido. Se utiliza para analizar el ordenamiento hídrico de una región porque puede servir de ayuda para el estudio de otras áreas como las ciencias agronómicas, en donde se usa para determinar las características del suelo y aportar a la minimización de los riesgos en el proceso de producción de cultivos.

Separación del caudal base

En la investigación realizada por Umuhire [20], en la ciudad de Québec en Canadá. La separación de hidrogramas se considera el primer paso en el análisis del balance hídrico a escala de cuenca. Para poder separar los hidrogramas se utilizó el método de filtrado automático que es uno de los más simple para series temporales de caudales. Para llevar a cabo su comparación entre los filtros se utilizó el método geoquímico. En este estudio se proporciona una buena interpretación del funcionamiento hidrológico que sufre la cuenca a base de la utilización de un trazador geoquímico como la conductividad eléctrica que es un método de referencia, para la separación hidrográfica y la evaluación de métodos de filtrado.

En un estudio en la cuenca de la Cordillera de la Costa en Chile realizado por Bustamante, Rutherford y García [21], se realizó la separación de caudal base del hidrograma. Por medio de los métodos de la separación gráfica y los métodos de filtrado. Se utilizó tres filtros de separación de flujo base llamados algoritmos de Lyne & Hollick, Chapman y Eckhardt. Uno de los parámetros es que todos los filtros comparten y son definidos a través de la Curva de Recesión Maestra. Se pudo representar el comportamiento del caudal base en función de caudal de escorrentía y momento hidrológico reflejado por el régimen de precipitaciones en el periodo de 2009 a 2014. No se pudieron conocer los verdaderos valores del caudal base, pero si su relativa similitud con el método gráfico. El filtro de Lyne y Hollick identificó los cambios en el rendimiento de la cuenca y cómo se almacena.

Según Andrade en el año 2020 [22] en la cuenca del río Chambo se utilizó la separación de hidrogramas con el uso del software HYSEP. Este método pudo determinar la recarga de las aguas subterráneas basándose en datos de caudal diario. Ground Water Toolbox presenta una estimación del caudal base y determina el comportamiento de los sistemas hidrológicos. Este estudio ayuda a desarrollar un indicador de la sostenibilidad en el almacenamiento de agua en cuencas. Dentro de los parámetros que utiliza el programa es el índice de caudal base (BFI) como también la caracterización del acuífero que sirvió para determinar el valor de los coeficientes principales.

3. METODOLOGÍA

Área de estudio

Mulaló pertenece al cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi y es una de las 10 parroquias principales de esta área, se localiza a 19 km por la parte norte de la ciudad de Latacunga y cuenta con sus límites al norte con el cantón Mejía, al sur con las parroquias Joseguango Bajo y Aláquez, al este con la provincia del Napo, al oeste con las parroquias de Pastocalle, Tanicuchí y Guaytacama. Su territorio comprende de 436 km², por su altitud varía entre los 10 y 17 °C tomando en cuenta que la cabecera parroquial está a 3000 msnm. La zona de estudio se encuentra entre -78.5667 ° de longitud y -0.783333 ° de latitud [23]. Se ubica en la cresta de la cordillera Oriental que parte del macizo colombiano hasta la depresión de Huancabamba, se localizan los denominados valles ínter - montañosos en la hoya de Latacunga – Ambato. El volcán Cotopaxi es su principal elevación que cuenta con 5.897 msnm de altura, al norte esta Tiopullo a 4.000msnm, y al este la cordillera Central.

El área de estudio se abastece de una importante fuente de agua como lo es el acuífero Mulaló ubicado a unos 80 Km al sur de Quito entre la Cordillera Real y Occidental, corresponde a un graben vinculado al colapso de bloques andinos centrales. La precipitación anual es de alrededor de 900 mm y la temperatura entre 12° y 20° C. La formación Latacunga del Pleistoceno superior contiene el acuífero, que tiene 250 m de ancho máximo. Esta formación está compuesta por depósitos fluviolacustres, piedra pómez y cenizas volcánicas que le dan un alto potencial hídrico a esta formación. El acuífero es parcialmente freático pero la presencia de un depósito del Holoceno cuaternario (cenizas y lahar) en el área central, posiblemente hace que el acuífero esté semi-confinado. La investigación inicial denota que el acuífero tiene alrededor de 200 Km². Hay alrededor de 50 puntos de agua entre perforaciones, pozos y manantiales. La dirección del flujo es de norte a sur. Esta agua subterránea se utiliza para el abastecimiento de agua doméstica, riego de huertas e

invernaderos donde se cultivan rosas, que es la principal actividad económica de esta región [24].

Mulaló se encuentra geológicamente ubicada en zonas con características de cangahuas que están conformados por depósitos de lahares, coluviales y lacustres, cuentan con materiales de cenizas, tobas vulcano-sedimentadas y conglomerados irregulares. Esta zona está cubierta por estratos de piedra pómez de varias granulometrías. El tipo de suelo se denomina Entisoles, Histosoles, Inceptisol y de tipo volcánicos. El uso y cobertura del suelo en la parroquia es principalmente compuesto por algunos ecosistemas de páramo que poseen características de tipo: páramo herbáceo, páramo seco, páramo arbustivo y páramo de almohadillas. En la zona suroeste encontramos cultivos y pastos de ciclo corto dentro de los ejemplares tenemos: maíz, papas, habas, fréjol, zanahoria, chocho. La hidrografía está compuesta por vertientes naturales de agua, que dan origen a varios ríos, entre ellos el río Cutuchi, el cual es originario de los deshielos del Cotopaxi. La parroquia cuenta con páramos extensos que sirven de colchón de agua y se puede aprovechar para el riego de cultivos [25]. El clima, en Mulaló se evidencia tres tipos: el ecuatorial meso térmico semi-húmedo, la zona nival y ecuatorial de alta montaña. En la parte baja posee clima templado, y en la alta se caracteriza por los páramos fríos. La altura y la exposición son los factores que condicionan los valores de las temperaturas y las lluvias [23].

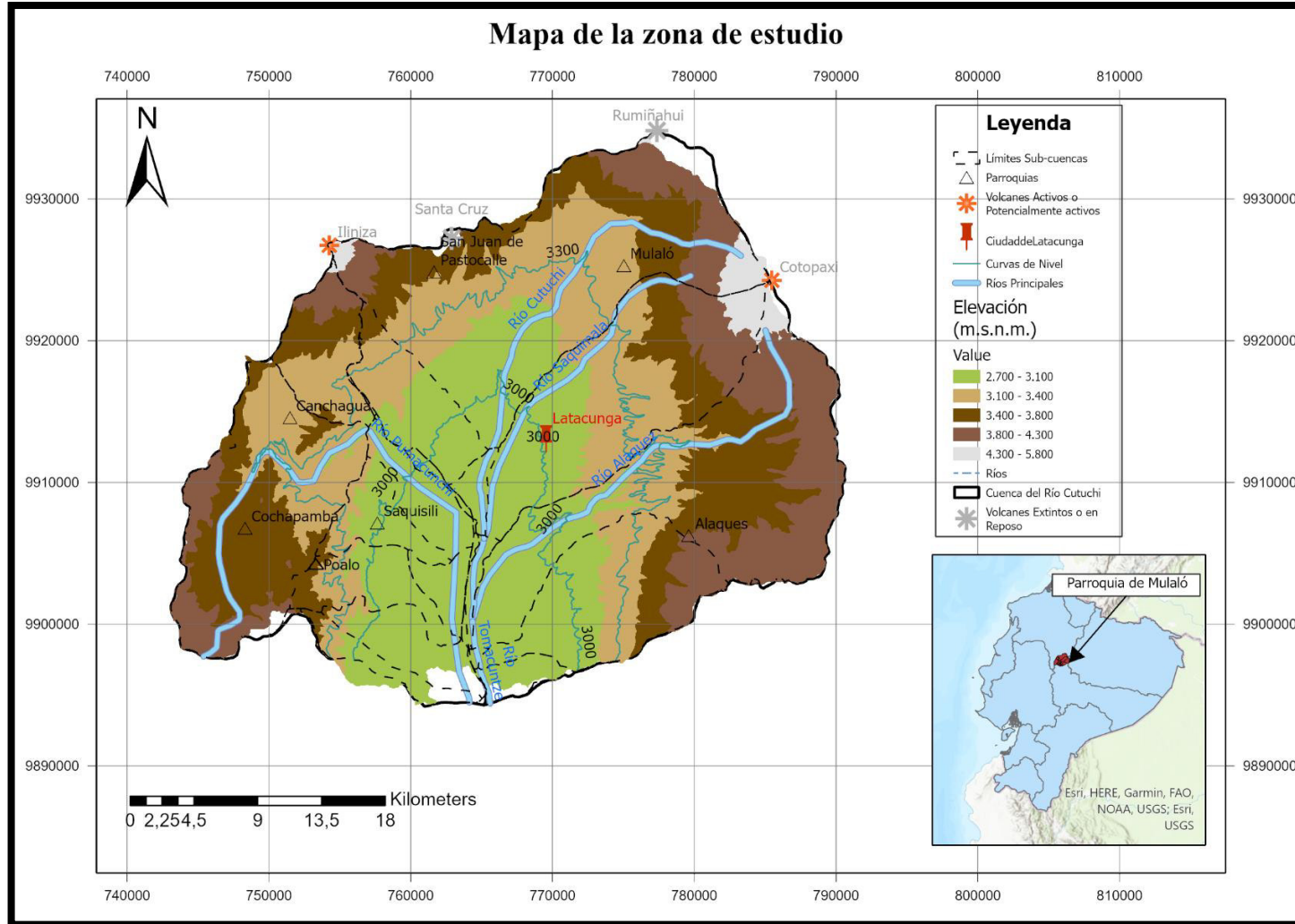


Figura 1. Área de estudio. Se presenta un mapa con los principales ríos, parroquias, volcanes y el modelo de elevación digital (DEM). La cuenca del río Cutuchi está localizada en la parroquia de Mulaló. La zona de estudio se encuentra ubicada en dicha parroquia.

Datos

Recopilación de información

Para la aplicación del método de separación de hidrogramas es fundamental el uso de una base de datos de caudal a nivel diario. Los valores serán obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se realizará un relleno de datos debido a que se necesita continuidad en la aplicación de las metodologías de estimación de caudales.

Precipitación

Datos de precipitación se obtuvieron por medio del producto de precipitación del Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (CHIRPS). Este producto es un conjunto de datos de precipitación cuasi global de más de 30 años. CHIRPS, abarca 50 ° S-50 ° N y todas las longitudes, desde 1981 hasta casi el presente, incorporan imágenes satelitales de resolución de 0.05 ° con datos de estaciones in situ para crear series de tiempo de lluvia cuadrículadas para análisis de tendencias y monitoreo de sequías estacionales. Se inició con la descarga de datos de la Universidad de California, Santa Bárbara <https://www.chc.ucsb.edu/data> . Los productos se encuentran de manera anual en formato TIF, localizados bajo el nombre de chirps-v2.0. [26]. Para validar los datos obtenidos en este programa la Universidad de California comparo los resultados con los datos de Institucionales Nacionales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en Colombia o la Autoridad Nacional del Agua en Perú. Estos resultados presentan correlaciones entre R= 0,97 para Colombia y R=0,82 para Perú.

Evapotranspiración

Para el método de balance hídrico correspondiente a la primera metodología, se trabajará con los parámetros obtenidos del producto de evapotranspiración efectiva MODIS16. Se puede iniciar con la descarga de datos de la página: <https://urs.earthdata.nasa.gov/home> , Earthdata trabaja bajo la ayuda del programa EOSDIS. De aquí se obtienen los datos de evapotranspiración efectiva en el período de tiempo de 2007 a 2021 con resolución temporal anual y resolución espacial de 500 m. El algoritmo que utiliza MODIS 16 se fundamenta bajo la obtención de datos que actúan con la lógica de la ecuación de Penman-Monteith. Las unidades que se encuentra son kg/m²/año y posee un factor de escala de 0.1.

El producto es Terra MODIS Net Evapotranspiration Gap-Filled (ET & LE), cuenta con tres subproductos con estimaciones a nivel anual y cada 8 días. El conjunto de datos se encuentra dividido de acuerdo a la grilla del satélite representado en la Figura 2. Para el área de estudio son aquellas que corresponden al recuadro $h=10$ $v=9$. Cada cuadro se llama tile y se localiza por un número de columna y línea (h y v) respectivamente [27].

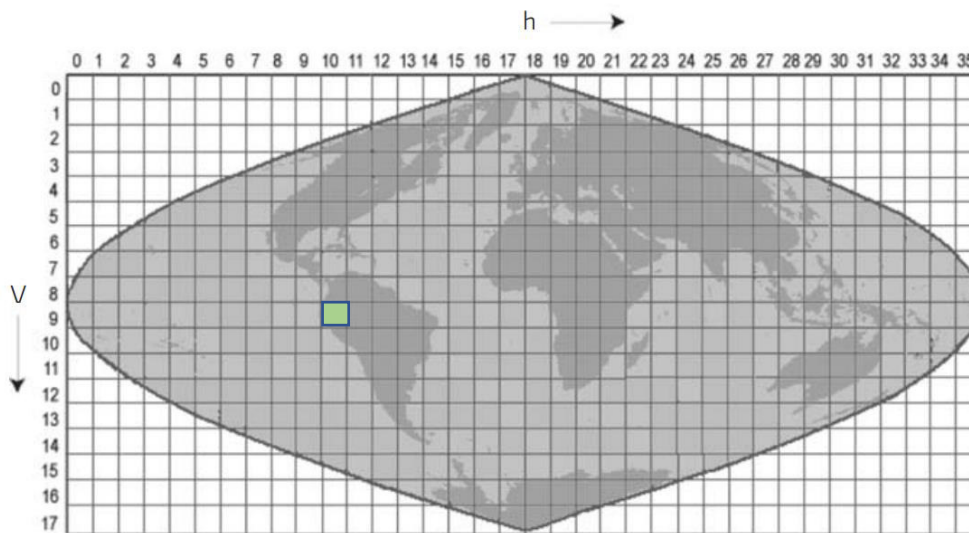


Figura 2. Organización espacial de la grilla de los productos MODIS

Fuente: [27]

4. PROCEDIMIENTO

Balance hídrico

Generación de Capa ráster de precipitación anual

Una vez descargado los datos de precipitación anual en el período de 2007-2021 se hace uso del sistema de información geográfica ArcGIS Pro. Se emplea las siguientes herramientas: Data Management Tools/Ráster/Ráster Processing/Clip Ráster. Se recorta el ráster de CHIRPS y se utiliza la geometría de recorte bajo el área de estudio en este caso de las tres cuencas: H854, H797 y H857. El Clip Ráster nos permite extraer una porción de un dataset ráster en función de un polígono. A continuación, se aplica las herramientas: Data Management Tools/Ráster/Ráster Processing/Resample para poder modificar el tamaño de celda del área de estudio.

Generación de Capa ráster de evapotranspiración anual

Una vez obtenidos los mapas de evapotranspiración anual en el periodo de 2007-2021 usando las imágenes satelitales de MODIS16A3GF Se aplicó la herramienta Resample para

redimensionar las celdas porque poseen un tamaño de 500x500 m. Se usó la herramienta Conversion Tools/From Ráster/ Ráster to Point para poder verificar los valores de cada celda del producto. Se identifican los valores que fueron rellenados, pertenecen a cuerpos de agua, vegetación árida, nieve, humedales y zonas urbanas para poder eliminarlos mediante la selección de atributos. Del mismo para poder obtener el valor real de la evapotranspiración se debe multiplicar los valores de la celda por un factor de escala en este caso es 0.1 este paso se lo realiza mediante la herramienta Calculate Field para obtener unidades de mm/año.

Capa ráster de precipitación y evapotranspiración real

Una vez obtenido la capa ráster de precipitación y de evapotranspiración con el redimensionamiento al tamaño de celda del área de estudio se usó la herramienta: Spatial Analyst Tools/ Map Algebra/ Ráster Calculador. Posteriormente, se restó la capa ráster de precipitación menos la capa de evapotranspiración real. La diferencia entre precipitación y evapotranspiración real nos permite determinar pixeles donde existe superávit o déficit de agua. El valor obtenido en caso positivo es decir de superávit nos indica un valor límite máximo posible de recarga.

Separación de hidrogramas

La separación de hidrogramas fue realizada por el programa Ground Water Toolbox desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS GW Toolbox 1.3.1). Este software analiza varios parámetros, uno de ellos es el cálculo de la estimación de caudal base a través de la aplicación de las siguientes ecuaciones como se puede observar en la en la Tabla 3.

Tabla 1. Resumen de ecuaciones que usa el software USGS GW Toolbox para la separación de hidrogramas y obtención de caudal base

<i>Ecuación</i>	<i>Donde:</i>
$N = 0,83A^{0,2}$ <p>Ecuación 1. Duración del intervalo de tiempo</p>	<p>N: Duración del intervalo de tiempo (en días)</p> <p>A: Superficie de drenaje (<i>millas</i>²)</p>
$q_{b(i)} = \frac{(1-BFI_{m\acute{a}x})\alpha q_{b(i-1)} + (1-\alpha)BFI_{m\acute{a}x}q_i}{1-\alpha BFI_{m\acute{a}x}}$ <p>Ecuación 2. Flujo base</p>	<p>q_b: Flujo base en el tiempo i</p> <p>BFI_{máx}: Índice de flujo base</p> <p>α: coeficiente de recesión</p>

q_i : Flujo del hidrograma en el tiempo i

$$U_{(i)} = Q_{i-1} + \frac{(1 - \alpha)}{2} (Q_i - Q_{i-1})$$

$U_{(i)}$ =Flujo base en el tiempo i

$Q_{(i)}$ = Flujo observado en el tiempo i

α : Coeficiente de recesión

Ecuación 3. Flujo base

Los caudales a nivel diarios, el área de drenaje de las sub-cuencas, el índice de caudal base máximo y los valores de coeficiente de recesión son datos necesarios para la aplicación del método. El parámetro del índice de caudal base (BFI), es un parámetro de filtro o coeficiente de recesión que fue analizado en un estudio realizado por Nathan y McMahon en 1990 [28] donde se analizó que valor se acerca al valor óptimo y proporciona una mejor estimación dando como resultado que es 0.925 para filtros de uno y dos parámetros.

Para el BFI_{máx} se toma en cuenta las características de la corriente y el acuífero por lo tanto los valores de BFI son los siguientes (Ver Tabla 2):

Tabla 2. Valores de BFI_{máx} bajo las características de la corriente y del acuífero

CARACTERÍSTICAS		BFI _{máx}
Corriente	Acuífero	
Perenne	Poroso	0.80
Efímera	Poroso	0.50
Perenne	Roca dura	0.25

Para iniciar con el uso del software, es necesario crear un nuevo proyecto siguiendo los pasos del primer cuadro de bienvenida. Para poder cargar los datos en el software es necesario tener un archivo .csv, que consta de una tabla con dos entradas en donde colocaremos la fecha (año,mes y día) y el valor de caudal diario respectivamente.

A continuación se realiza la importación del archivo mediante la opción *File* en donde se desplazara varias pestañas y seleccionamos *Open Data*. Se abre un cuadro de dialogo en donde seleccionamos la opción *Read Data Script* y colocamos *OK*. Se debe modificar el script seleccionando las columnas y su lectura correcta, se puede guardar una copia de este paso y seleccionamos *Read Data*.

Se debe completar el proceso de importación de datos y se selecciona en la caja de herramientas del programa las opciones *Manage Data* y *Analysis*. A continuación, se desplaza las pestañas en donde colocamos *USGS Base Flow Separation*. Al escoger esta opción se extiende una ventana en la cual se visualizan los métodos que emplea el software y los datos necesarios como:

- Área De Drenaje
- La Constante N
- Factor F
- Índice Diario De Recesión K'
- Alpha Como La Constante De Recesión
- Índice BFI Máx.
- Periodo De Análisis

Una vez que se complete el proceso de importación de datos, se realiza la separación de caudal base y se guardan los resultados en la carpeta seleccionada por el autor.

5. RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Resultados

Datos

Luego de la revisión de información, en la Tabla 3 se destaca una lista de las estaciones hidrológicas ubicadas en la zona de estudio y sus alrededores. Se contó con estaciones activas e inactivas. Se analizó 20 estaciones hidrológicas, de las cuales se verificó tomando en cuenta el periodo de años y la mayor cantidad de datos.

Tabla 3. Estaciones hidrológicas analizadas para la obtención de datos de caudal diario bajo el método de separación de caudal base. Se indica el código, nombre, estado de la estación y su localización geográfica.

No.	Código	Nombre Estación Hidrológica	Estado	Coordenadas Sistema UTM 17 S	
				x	y
1	H0957	CUTUCHI AJ PUMACUNCHI	Inactiva	765462	9894690
2	H0799	CANAL MULALILLO	Activa	756514	9882128
3	H0859	PUMACUNCHI AJ CUTUCHI	Inactiva	765865	9894904
4	H0775	PUMACUNCHI EN LATACUNGA	Inactiva	764989	9895602
5	H793	NAGSICHE PLTA.ELEC.CUSUBAMBA	Activa	756824	9882251
6	H1075	DESFOGUE CIUDADELA RUMIPAMBA	Inactiva	765433	9896441
7	H1123	SALACHE EN U.TECNICA DE COTOPAXI	Activa	776162	9889519
8	H0774	CUTUCHI EN LATACUNGA	Inactiva	765464	9896503
9	H0866	CUTUCHI EN PTE.RUMIPAMBA	Inactiva	765433	9896564
10	H0955	YANAYACU EN LATACUNGA	Inactiva	765340	9897148
11	H797	PANSACHI EN HDA.BAÑOS	Activa	782209	9910352
12	H792	CUTUCHI AJ YANAYACU	Activa	766691	9882151
13	H0773	ALAQUEZ AJ CUTUCHI(COL.S.RODR)	Inactiva	764568	9898808
14	H0868	YANAYACU EN TQ.AG.PT(AJ CUTUCHI)	Inactiva	768157	9898959
15	H857	ILLUCHI AJ CUTUCHI (CVA AMBATO)	Activa	766790	9891308
16	H1065	AC.JULIO MOLINA TQ.AG.PTBL.	Inactiva	767106	9900435
17	H0854	CUTUCHI EN CASPI	Inactiva	766250	9917736
18	H1052	AC.BELLAVISTA EN BELLAVISTA	Inactiva	767107	9902279
19	H1066	AC.SAN BUENAVENTURA EN BELLAVISTA	Inactiva	767107	9902279
20	H0950	CUILCHE EN PASTOCALLE	Inactiva	765251	9902280

Se realizó la revisión de datos disponibles, se dispuso el uso de tres estaciones como se observa el Tabla 2. El período de datos comienza desde el año 2007 hasta el año 2014. Se analizó que exista secuencia en los años en cada estación mediante visualización de datos disponibles. Se adoptó el nombre de cada cuenca de acuerdo con el código de las estaciones hidrológicas ubicadas en el cierre de las mismas (figura 3).

Tabla 4. Estaciones hidrológicas seleccionadas para la obtención de la base de datos del método de separación de caudal y para el balance hidrológico.

Código	Nombre Estación Hidrológica	Estado	Período de datos	Coordenadas Sistema UTM 17 S	
				x	y
H0854	CUTUCHI EN CASPI	Inactiva	2008-2010	766250	9917736
H797	PANSACHI EN HDA.BAÑOS	Activa	2007-2011	782209	9910352
H857	ILLUCHI AJ CUTUCHI (CVA AMBATO)	Activa	2007-2014	766790	9891308

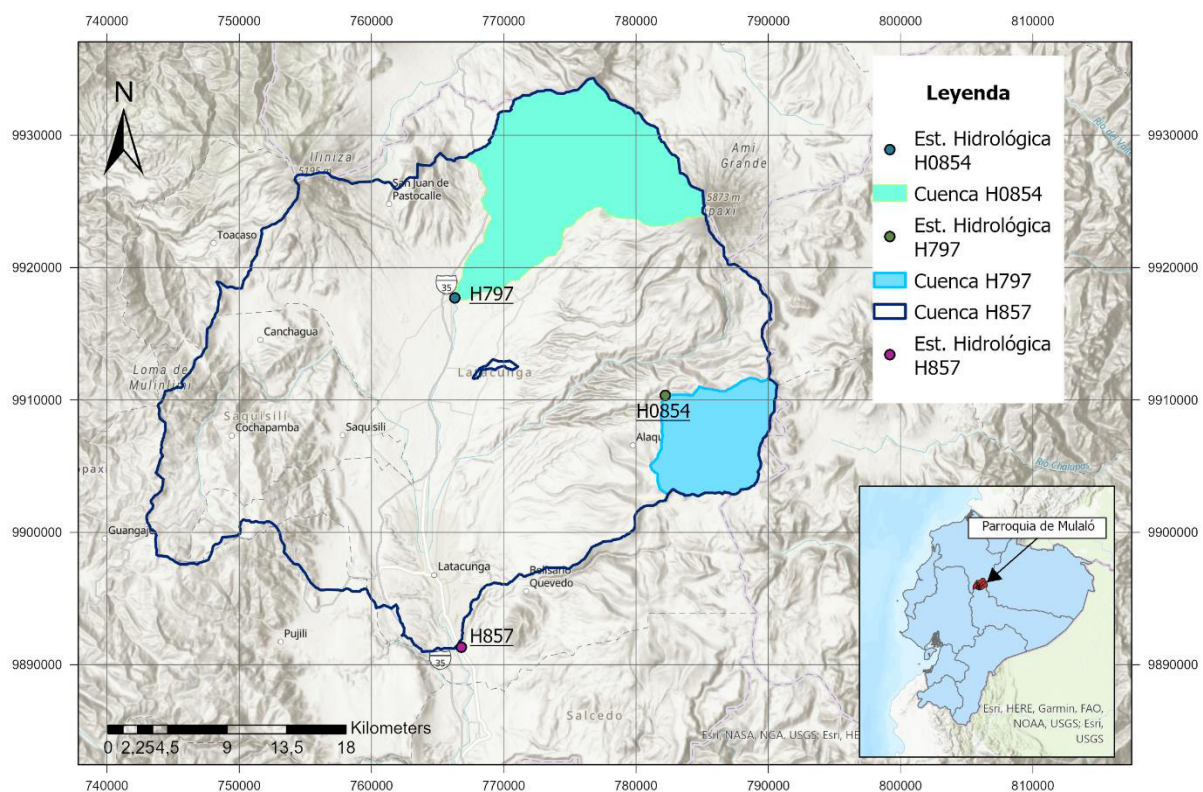


Figura 3. Mapa de sub-cuencas delimitadas con base a las estaciones seleccionadas

Balance Superficial

Se utilizó la precipitación y evapotranspiración mediante el tratamiento de datos satelitales como CHIRPS y MODIS respectivamente. En la figura 4 se visualiza gráficas de precipitación en mm/año con los datos de CHIRPS bajo el uso del programa ArcGIS en el periodo de año 2007 hasta el 2021. Se visualiza una distribución espacio temporal de la precipitación para la zona de Mulaló. Los resultados nos indican que existe precipitaciones desde 300 mm/año hasta 1100 mm/año aproximadamente.

Las zonas con mayor valor de precipitación son las zonas en donde encontramos los más altos picos andinos como el Cotopaxi porque con la altitud aumentan las precipitaciones debido a que las masas de aire llegan a ascender y se enfrían, favoreciendo la condensación del agua y la producción de lluvias. Estos valores se ubican alrededor de 600 a 1100 mm/año. Las zonas con menor precipitación se ubican en Saquisilí que es un cantón de la provincia del Cotopaxi (ver figura 1) y en la parte sureste de la cuenca principal H857, los valores de precipitación varían entre 300 a 500 mm/año.

Se puede observar (ver figura 4) que los años con mayores precipitaciones son 2008, 2010, 2011, 2014, 2017, 2019 y 2021. De acuerdo con la escala de colores los años con menor precipitación son 2007, 2009, 2012, 2015, 2016, 2018 y 2020. En el año más seco los valores de precipitación son menores a 654 mm/año en más de 30% del área de estudio y con precipitaciones de 800 mm/año presentes en el 70% del área restante. Para el año húmedo las precipitaciones anuales superan los 1000 mm/año en la parte noreste del área de estudio representando un 20% de esta zona.

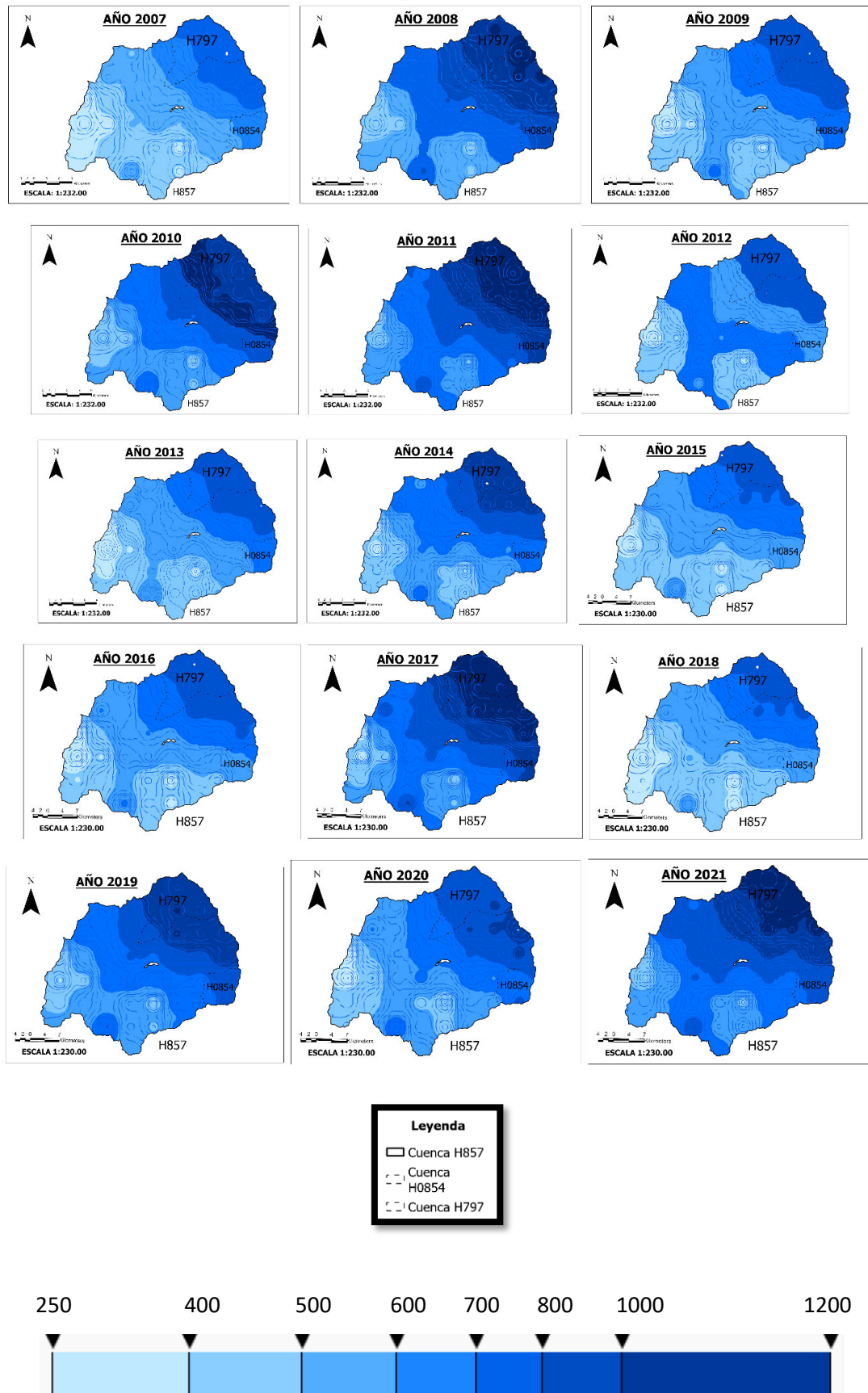


Figura 4. Mapas de Precipitación (mm/año) para el año 2007 al año 2021 desarrollados a partir del producto de precipitación de CHIRPS

A continuación, se evidencia la evapotranspiración media anual representada en imágenes MODIS en donde se obtuvieron valores entre 16 mm/año y 1200 mm/año para el periodo comprendido entre los años 2007 a 2021. La mayor evapotranspiración se produce en la zona baja del área de estudio cerca de la ciudad de la Latacunga, alcanzando valores entre 700 mm/año y 1200 mm/año. Para los años de 2008 y 2021 se presenta bajos valores de evapotranspiración representando un 87 % del área de la cuenca H857.

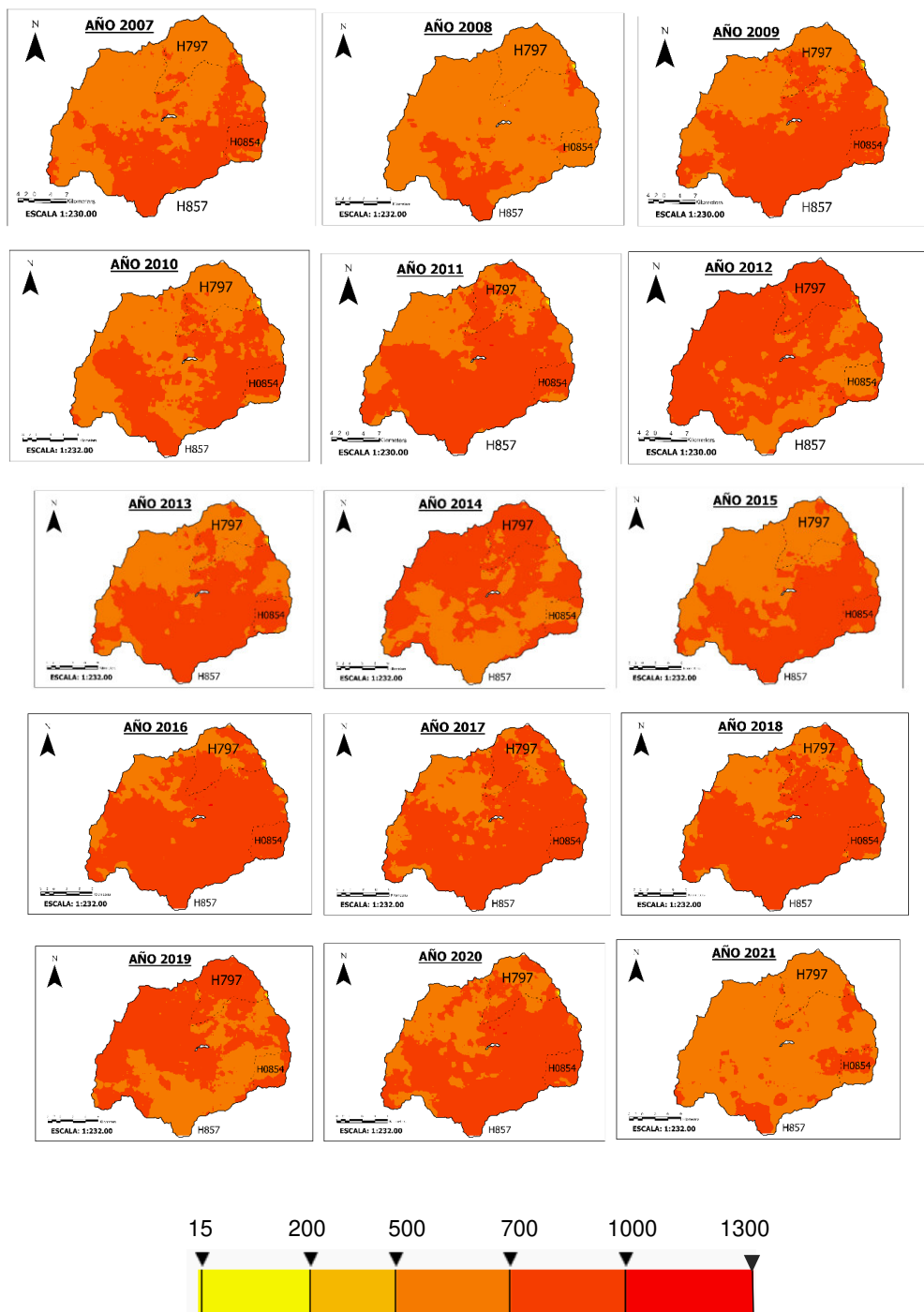


Figura 5. Mapas de evapotranspiración referencial MODIS (mm/año) para los años del 2007 al 2021

Las zonas potenciales de recarga se ubicaron en zonas altas cercanas a la cuenca H797 en donde las precipitaciones alcanzaron valores 1100 mm/año aproximadamente y la evapotranspiración valores entre 600 mm/año y 700 mm/año. Las zonas de déficit están hacia la parte sur oeste del área de estudio, cerca de Saquisilí. De los 15 años estudiados, 5 de ellos presentan recargas mayores a 250 mm/año mientras los 10 años restantes sufren déficit.

Comparado con las gráficas de la figura 4, los años que contienen precipitaciones mayores a 1000 mm/año son los mismos que presentan valores superiores de recarga. Para la evapotranspiración en estos mismos años es baja. Por otro lado, las gráficas de la figura 7 que presentan valores de déficit mayor a la recarga contienen valores bajos de precipitación y altos de evapotranspiración.

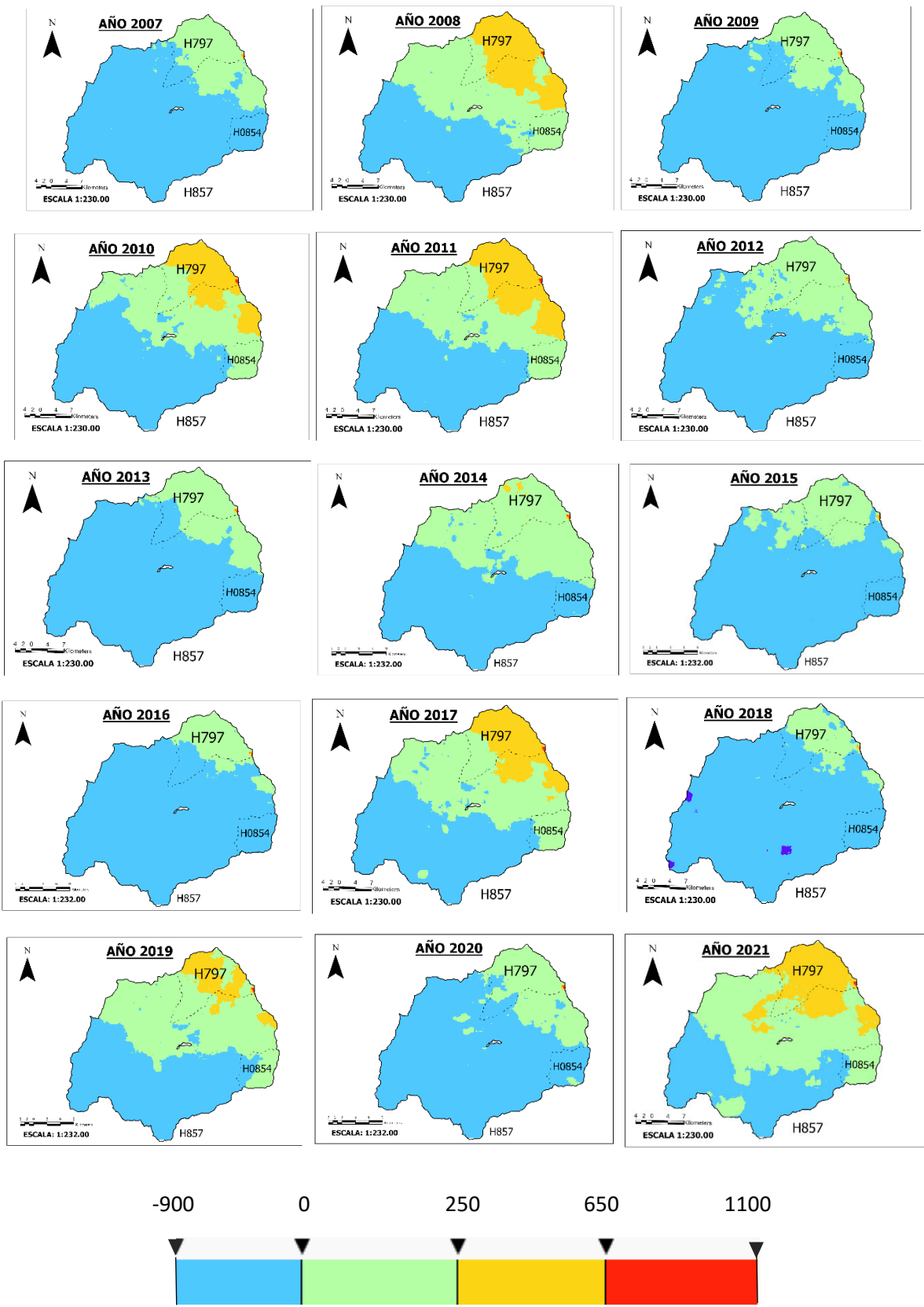


Figura 6. Mapa de recarga potencial y zonas con déficit de agua (mm/año) considerando únicamente la precipitación y la evapotranspiración dentro del área de estudio para el

periodo 2007-2021. Las zonas en color amarillo y verde son zonas con la mayor recarga potencial, las zonas con color celeste son las zonas con déficit de agua

Separación De Caudal Base

Lamentablemente los datos disponibles carecen de continuidad por lo tanto como paso preliminar a la utilización de los datos en el desarrollo de la metodología de separación de caudales fue necesario rellenar las series de tiempo. Se aplicó una correlación lineal porque es un método simple para la estimación de datos. Se realizaron autocorrelaciones que consisten en un procedimiento de selección de años completos en una misma estación y con estaciones vecinas. Dentro del tratamiento de datos el procedimiento se lo realizó entre datos de años completos como es el caso de la cuenca H0854, en donde el año base completo fue 2008 y los demás años se procedió a rellenar y también se aplicó el procedimiento entre las dos estaciones hidrológicas en donde una estación fue tomada como base para rellenar los datos de la otra estación. Los dos procedimientos tuvieron un coeficiente de correlación mayor a 0,7 [29]. De esta manera se tiene como fin obtener bases de datos completos para dar realismo y coherencia a los resultados.

Una vez separado los caudales por medio del programa USGS GW Toolbox y usando datos de tres estaciones hidrológicas Cutuchi En Caspi, Pansachi en Hda.Baños y Illuchi Aj Cutuchi. Se evaluó el caudal a nivel diario, en donde se obtuvo el área de drenaje de las cuencas de estudio (ver tabla 5) mediante ArcGIS Pro en los periodos mencionados y del mismo modo se obtuvo el porcentaje de aporte de las aguas subterráneas y su respectivo caudal base.

Se aplicó tres métodos en el programa de separación de caudales: intervalo fijo, intervalo de desplazamiento y mínimo local. También se utilizó el método BFI (Índice de caudal base) mediante uno y dos parámetros, en la tabla 4 se visualiza sus coeficientes. Las unidades de los resultados en la tabla 5 es de mm/año con el objetivo de poder comparar con los resultados del balance hidrológico superficial correspondientes a la primera metodología.

Tabla 5. Periodo de datos, área de drenaje, caudal base y porcentaje de aporte de las aguas subterráneas

Código	Nombre Estación Hidrológica	Período de datos	Área de drenaje	Caudal base	Porcentaje de aporte
			Km ²	mm/año	%
H0854	CUTUCHI EN CASPI	2008-2010	160,6	374,4	40,4
H797	PANSACHI EN HDA.BAÑOS	2007-2011	62,2	474,1	58,5

H857	ILLUCHI AJ CUTUCHI (CVA AMBATO)	2007-2014	1282,0	20,6	3,0
-------------	---------------------------------------	-----------	--------	------	-----

Al momento de aplicar para el filtro de un parámetro mediante la bibliografía el valor promedio para el coeficiente de recesión fue de 0,925 [30] . En el método de dos parámetros se usó los coeficientes de la tabla 4 y el coeficiente de recesión siguiendo las características de la corriente y el acuífero. El área de estudio está definida por corrientes perennes con acuíferos de porosidad primaria por ende el valor de BFI es de 0,80.

Según la tabla 5 la cuenca H797 posee un caudal base más alto que las otras dos cuencas de estudio, por lo tanto, presenta una mayor recarga al acuífero. El porcentaje de aporte de aguas subterráneas es de 3,02% para la cuenca H857, se analizó 7 años con un área de drenaje de 1282, 04 km². Para la cuenca H0854 se obtuvo un caudal base promedio de 374,44 mm/año y para la cuenca H797 se tuvo un caudal base de 474,08 mm/año.

El caudal base y su estudio representa un parámetro importante al momento de la caracterización y cuantificación de recursos hidrológicos en zonas montañosas [31]. Por lo tanto, es fundamental seguir desarrollando investigaciones similares en los acuíferos.

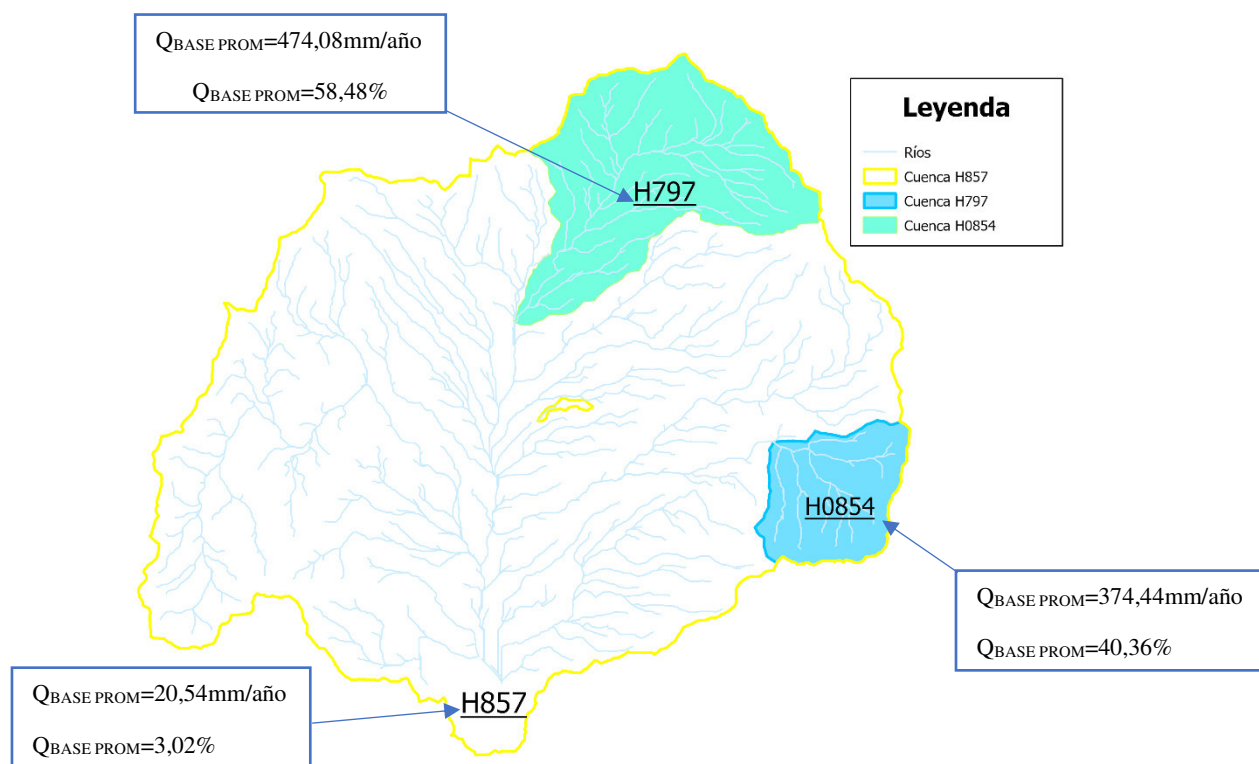


Figura 7. Resultados del porcentaje de aporte de las aguas subterráneas

Para la cuenca H0854 que presenta un caudal base de 374, 44 mm/año. En el periodo de estudio del año 2008 al 2010, se tiene precipitaciones mayores a los 1000 mm/año y la evapotranspiración entre 800 a 1100 mm/año por lo tanto se da déficit de recarga en el balance superficial a excepción del año 2010 que presenta un superávit.

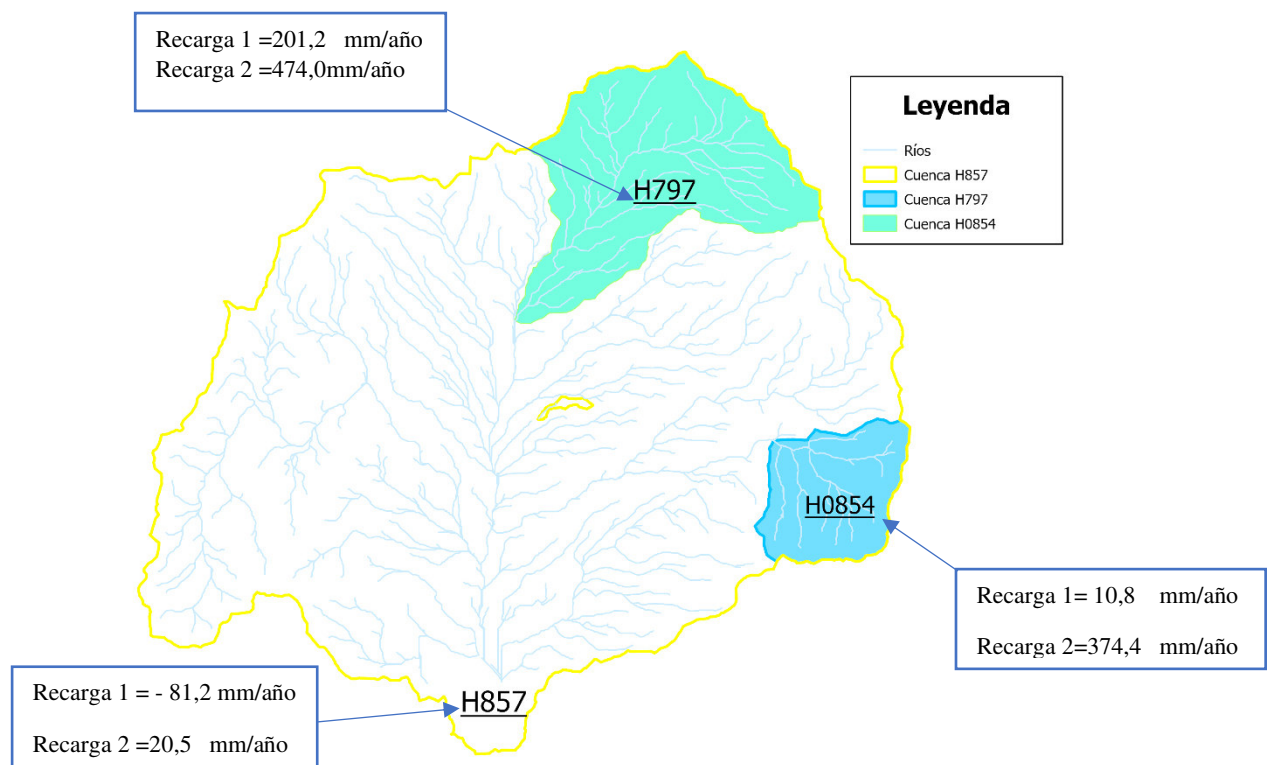
En la cuenca H707 se tiene un caudal base de 474, 08 mm/año. Para el periodo de 2007 al 2011 presenta precipitaciones entre 860 a 1144 mm/año y los valores de evapotranspiración se dan entre 888 a 1200 mm/año. Dando como resultado mayores zonas de recarga positiva del recurso hídrico.

Para la cuenca H857 que presenta un caudal base de 20,54 mm/año. En el periodo de estudio del año 2007 al 2014, se tiene precipitaciones mayores a los 1100 mm/año y la evapotranspiración entre 800 a 1200 mm/año por lo tanto se da en los años 2008, 2010, 2011 y 2014 superávit de recarga en el balance superficial y en los años 2007, 2009, 2012 y 2013 que presentan un déficit en más del 60% del área de estudio.

Código	Nombre Estación Hidrológica	Años	Evapotranspiración	Precipitación	Metodología 1	Metodología 2
			mm/año	mm/año	(figura 6) mm/año	Caudal base mm/año
H0854	CUTUCHI	2008	725,3	972,2	106,5	428,2
	EN CASPI	2009	812,9	812,6	-126,7	322,5
		2010	805,7	998,4	52,8	372,6
H797	PANSACHI	2007	705,0	690,3	78,2	402,3
		2008	652,9	850,6	317,5	675,2
	EN HDA.BAÑOS	2009	745,9	706,7	63,6	459,7
		2010	734,1	869,3	263,3	373,5
		2011	770,4	936,3	283,2	459,7
H857	ILLUCHI AJ	2007	749,2	590,4	-153,6	20,2
		2008	703,5	747,3	-49,9	30,6
	(CVA AMBATO)	2009	784,0	622,7	-156,1	17,4
		2010	764,6	757,0	-0,6	12,5
		2011	797,3	819,8	28,4	36,2
		2012	727,4	604,7	-90,4	27,2
		2013	777,0	604,7	-167,2	10,4
2014	748,7	680,2	-60,1	9,8		

Tabla 6. Resumen de las dos metodologías utilizadas en el análisis de las técnicas hidrológicas físicas para la estimación de recarga de aguas subterráneas en la zona de Mulaló

Se realiza un promedio de los años de análisis de cada una de las 3 estaciones en base a la Tabla 6 dando como resultado un esquema entre los valores de recarga obtenidos a través del balance superficial y la separación de caudales. En la figura 8 se observa que los valores obtenidos por el método de balance hídrico superficial son menores a los resultados obtenidos mediante el método de separación de caudales. Este resultado quizás se debe a que los valores de la primera metodología fueron realizados mediante modelos matemáticos basados en información de datos medidos por INAMHI. La recarga obtenida en la cuenca H797 ubicada en la zona más alta en el balance hídrico superficial y en la separación de caudales es igual de mayor que las demás cuencas de nuestro estudio.



Recarga 1: Balance hídrico superficial

Recarga 2: Separación de caudales

Figura 8. Resultados del porcentaje de aporte de las aguas subterráneas del balance superficial y la separación de caudales

5.2. Discusión

Balance hídrico superficial

Luego de obtener los resultados de precipitación y evapotranspiración real de tres cuencas ubicadas en la zona de estudio se determinó que el aporte de las aguas subterráneas al caudal total de los ríos en la zona de Mulaló es alto. El área con mayor recarga está ubicado al noreste de la cuenca principal en donde predominan valores desde 250 hasta 1100 mm/año, también la precipitación va desde 300 hasta 1100 mm/año y los valores de evapotranspiración van desde 16 hasta 1200 mm/año. Andrade (2020) [22] realizó un estudio para la cuenca del río Chambo ubicada en la provincia del Chimborazo en donde se determinó de igual manera que los valores de mayor recarga están en las zonas cercanas a las montañas es decir zonas altas. Para este estudio los valores de precipitación varían entre 500 a 2500 mm/año y para la evapotranspiración van desde 100 hasta 2000 mm/año. Y para la recarga por el método de balance hídrico superficial se obtuvo resultados entre 96 a 800 mm/año.

Según un estudio de Rosero (2017) [32] la zona presenta precipitaciones de 857 mm/año y ese valor está dentro del rango que se obtuvo mediante los datos de CHIRPS que varían entre 288 a 1100 mm/año. Para la evapotranspiración real del mismo modo se presentó valores entre 460 a 1026 mm/año en el estudio de Rosero y para nuestro estudio mediante MODIS 16 se obtuvo valores de 15 a 1200 mm/año, se puede deducir que los resultados están dentro del rango presentado en otros estudios de la zona de Mulaló.

Dentro de un estudio realizado por Guerra en el año 2019 [33], se determina la precipitación y evapotranspiración mediante el uso de CHIRPS y MODIS en los páramos de Ecuador. Una de las estaciones utilizadas es la H0793 ubicada en la provincia del Cotopaxi, en donde los valores son de 422,7 mm/año para la precipitación y 801,6 mm/año para la evapotranspiración. Son resultados que entran dentro de nuestro rango obtenidos por la primera metodología. Los datos de CHIRPS para estaciones meteorológicas ubicadas cerca de paramos presenta valores subestimados a esta altura como se menciona en este estudio. Pero para la precipitación en zonas de menor altura la precipitación es sobreestimada por el satélite.

Llor [15] realizó un estudio en las cuencas de San Juan y San Bartolomé ubicadas en la provincia del Azuay a 350 km aproximadamente al sur de la zona de Mulaló, en donde de igual manera las zonas con mayor recarga están presentes en la parte Noreste y las zonas en donde se observa déficit del recurso hídrico se ubican en áreas bajas al sur. Del mismo

modo la precipitación resulta ser mayor en las zonas altas y la evapotranspiración por otro lado es menor.

Separación De Caudales

Rutherford y García [21] expusieron que la separación de caudal base de aguas subterráneas mediante el método de filtros permite identificar variaciones en el comportamiento de la cuenca, de igual manera demuestra la forma de almacenar y liberar agua que posee el sistema hídrico. Al iniciar con el procedimiento se empleó valores del índice de BFI igual a 0,76 en el cual se mostró resultados anuales y mensuales tomando en cuenta las características de la corriente y el acuífero. Otro factor utilizado fue $\alpha = 0.9514$ a partir de la pendiente que representa el parámetro de filtro o también denominado coeficiente de recesión que fue determinado en este estudio mediante la curva de recesión. En nuestro estudio se utilizó el índice BFI igual a 0,8 y alfa igual a 0,957 porque en la zona de Mulaló tuvimos diferentes características de la cuenca y además se decidió utilizar un promedio entre los valores que recomendaba la bibliografía utilizada.

Los valores de caudal base están en un rango aproximado entre 9,8 mm/año y 675,2 mm/año para las tres cuencas de nuestro estudio. Estos valores de recarga coinciden con los determinados por Andrade [22]. En su estudio se determinó la recarga de aguas subterráneas para el sistema acuífero del río Chambo en la región Sierra al igual que nuestra zona de análisis, a través de la separación de caudal base usando el método de filtros del programa USGS GW Toolbox. Este programa arrojó valores de caudal base entre aproximadamente 58 mm/año y 550 mm/año, también se determinó que el porcentaje de aporte de esta área esta entre 19,8% a 53,3% del caudal total de los ríos para las sub-cuencas. Las características del acuífero del río Chambo son similares al acuífero de la zona de Mulaló. En nuestro caso tenemos un porcentaje de aporte de 3% a 58,5 % por tanto, se confirma lo expuesto en el estudio de Andrade en el año 2020 porque se concluye que se presentan mayor recarga en zonas altas en este caso acuíferos ubicados dentro de la Cordillera Oriental.

5.3. Conclusiones

Se deduce que el área cercana a volcanes activos como el Cotopaxi, volcanes potencialmente activos como el Illiniza y volcanes extintos como el Rumiñahui y Santa Cruz (ver figura 1) poseen precipitaciones hasta 1144 mm/año y la recarga potencial tienen valores hasta 1088 mm/año, dando como resultado valores mayores de precipitación y recarga hídrica en toda la zona de estudio. Esto se debe a la elevación de estas áreas, la altitud aumenta las precipitaciones y disminuye la evapotranspiración efectiva y por ende se da una zona de recarga potencial ubicadas al suroeste y sureste de Mulaló. Las zonas que sufren déficit de

recarga se ubican en menores altitudes en donde se encuentra localizado el cantón de Saquisilí, la parroquia de Poalo, la parroquia de Cochapamba y la ciudad de Latacunga en donde son zonas urbanas. Los cambios en el uso de suelo por el desarrollo de la urbanización provocan que se reduzca la infiltración de agua lluvia lo que afecta a la recarga de los acuíferos de este lugar.

Para el método de separación de caudales existe un aporte de aguas subterráneas entre 3 a 58% en un rango entre 20 a 474 mm/año. La cuenca con mayor aporte de aguas subterráneas es la cuenca H797 lo que se deduce que la mayor cantidad de agua subterránea aportante viene de la zona sureste de la parroquia de Mulaló. Al realizar el balance hídrico superficial se obtuvo valores menores a la separación de caudales debido a que los datos utilizados en la primera metodología pertenecen a una base de datos satelitales y por otro lado la segunda metodología se realiza mediante datos reales tomados de estaciones hidrológicas cercanas al área de estudio.

Al comparar con estudios realizados previamente con el uso de datos satelitales, Guerra en el año 2019 concluye que MODIS sobreestima el parámetro de evapotranspiración, apareciendo modificación en los resultados para lo cual se plantea una hipótesis que determina que MODIS es un producto que no define correctamente la evapotranspiración potencial en zonas de alta montaña como es el caso de nuestra área de estudio. Por lo tanto, este es uno de los motivos para que nuestros resultados presenten diferencias en el cálculo de la recarga, también por la subestimación y sobrestimación del satélite de CHIRPS con los datos de la precipitación en zonas de paramos y valle.

El estudio realizado permitió conocer más sobre la recarga del acuífero de la zona de Mulaló debido a que la información sobre este tema es muy escasa y la investigación fue de gran ayuda para conocer el aporte de los recursos hídricos.

5.4. Recomendaciones

Al realizar esta investigación es importante contar con una buena base de datos ya sea de Instituciones Nacionales o se puede hacer uso de datos satelitales. En este caso se obtuvo datos incompletos y fue necesario un relleno de datos para poder alcanzar los objetivos de estudio y brindar resultados concisos. La obtención de información presentó inconvenientes debido a las nuevas políticas que manejan las Instituciones dedicadas a brindar datos para investigaciones.

Para el balance hídrico es fundamental mantener un tamaño de celda uniforme para cada ráster de precipitación y evapotranspiración para que se pueda realizar los cálculos correspondientes. En la separación de caudales por el programa USGS GW Toolbox, es

necesario disponer de una base de datos de caudal diario de manera completa y con un periodo de años continuo. Al colocar los valores del índice BFI es importante conocer las características de la corriente y del acuífero en este caso se lo hizo mediante información del GAD de Mulaló.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Vargas, L. De La Fuente y J. L. Arumí, «Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso,» Scielo, Concepción, 2012.
- [2] UNICEF, «1 de cada 3 personas en el mundo no tiene acceso a agua potable. Comunicados-prensa.,» 18 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/1-de-cada-3-personas-en-el-mundo-no-tiene-acceso-a-agua-potable>. [Último acceso: 12 Octubre 2021].
- [3] S. Becerra, E. Pasquel y N. Burbano, «Introducción a la hidrogeología del Ecuador (segunda versión).,» Septiembre 2014. [En línea]. Available: https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/HIDROGEOLOGIA_2%20EDICION_2014.pdf. [Último acceso: 13 Octubre 2021].
- [4] INAMHI, «Conferencia hidrogeología en Ecuador [Conferencia]. Issuu. [Online]. Available:.,» 19 Noviembre 2011. [En línea]. Available: https://issuu.com/inamhi/docs/conferencihidrogeologia_en_ecuador. [Último acceso: 12 Diciembre 2021].
- [5] P. Carrión, X. Quiñonez, F. Morante, J. Montalván, G. Herrera y J. Plaza, «Geometric model of a coastal aquifer to promote the sustainable use of water. manglaralto, Ecuador,» MDPI, Guayaquil, 2021.
- [6] A. Fries, K. Silva, . F. Pucha, F. Oñate y P. Ochoa, «Water balance and soil moisture deficit of different vegetation units under semiarid conditions in the Andes of southern Ecuador,» MDPI, Loja, 2020.
- [7] MAGAP, «Mapa hidrogeológico del Ecuador memoria técnica,» Diciembre 1982. [En línea]. Available: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-05/15736.pdf. [Último acceso: 13 Diciembre 2021].
- [8] M. Collazo y J. Montaña, «Manual de Agua Subterránea,» Denad Internacional S.A., Montevideo, 2012.
- [9] Fluence Corporation Limited, «¿Qué Es un Acuífero? Fluencecorp.,» 6 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-un-acuifero/>. [Último acceso: 14 Diciembre 2021].
- [10] A. García-Astillero, «Qué es un acuífero: definición y cómo se forma. Ecologiaverde.com.,» 2019. [En línea]. Available: García-Astillero, A. (2019). Qué es un acuífero: definición y cómo se forma. Ecologiaverde.com. Available:

<https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-acuifero-definicion-y-como-se-forma-1646.html>. [Último acceso: 15 Diciembre 2021].

- [11] Team, Ruvival, «Recarga de Acuíferos,» 12 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.ruvival.de/es/recarga-de-acuiferos/>. [Último acceso: 15 Diciembre 2021].
- [12] A. Navarro, «Lección 5 Propiedades del suelo. Propiedades físicas. Dinámica del agua. Balance hídrico. Departamento de Biología y Producción de los Vegetales. Universidad de Extremadura,» Extremadura, 2005.
- [13] J. Alcázar, «Método del Caudal Básico para la Determinación de Caudales de Mantenimiento,» Universidad de Lleida, Lleida, 2007.
- [14] J. Sánchez, «Hidrología Superficial (II): Hidrogramas,» 2019. [En línea]. Available: https://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_2.pdf. [Último acceso: 12 Enero 2022].
- [15] J. Loor, «Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas sector San Juan y San Bartolomé en el área de interceptación con el bosque y vegetación protector Aguarongo,» Universidad Politécnica Salesiana , Cuenca, 2017.
- [16] E. Rosales, «Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta,» CENTROGEO, México, 2012.
- [17] J. Murillo, «Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero Aluvial Bajo Guadalquivir,» Universidad Politécnica de Madrid., Madrid, 2004.
- [18] A. C. Falcón, J. Ramírez-Hernández, R. Vázquez-González, E. Nava-Sánchez, E. Troyo y H. Cirilo , «Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del bajo Guadalquivir,» SCIELO, México, 2013.
- [19] R. Ortiz y Y. Y. Rodríguez Sánchez, «Determinación de fechas de siembra mediante el balance hídrico para los cultivos de haba, maíz y papa para Rumipamba,» Universidad Central del Ecuador, Quito, 2020.
- [20] F. Umuhire, F. Anctil, A. Michaud y J. Desjardins, «Evaluation of filtering methods for hydrograph separation in small agricultural watersheds in Québec, Canada.,» ASABE, Québec, 2020.
- [21] R. R. P. & G. A. Bustamante, «Determinación del caudal base por tres filtros de separación en una cuenca de la Cordillera de la Costa, región del Biobío, Chile.,» Scielo, Chile, 2021.
- [22] A. Andrade, «Recarga potencial del acuífero de la sub-cuenca del río Chambo bajo una perspectiva de la hidrología física,» Universidad Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.
- [23] GAD Mulaló, «Situación geográfica de la parroquia “Mulaló”. ILION SYSTEMS.,» 2020. [En línea]. Available: <https://mulalo.gob.ec/cotopaxi/situacion-geografica/>. [Último acceso: 12 Febrero 2022].

- [24] &. T. J. &. M. C. &. C. J. &. P. E. Cáceres B., «Hydrodynamic, geochemical and isotope preliminary results of andean groundwater in activ volcanic zone- Mulalo (Ecuador).», Quito, 2015.
- [25] GADPR MULALÓ, «ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PARROQUIA MULALÓ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI 2020 - 2023,» 2020. [En línea]. Available: https://mulalo.gob.ec/cotopaxi/wp-content/uploads/2020/09/ACTUALIZACION-PDOT-MULALO-2020_-2.pdf. [Último acceso: 14 Febrero 2022].
- [26] UCDB, «CHIRPS,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.chc.ucsb.edu/data>. [Último acceso: 16 Marzo 2022].
- [27] J. García-Mora y J. Mas, «Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Modland: los productos de superficie terrestre modis.,» INE-SEMARNAT, México, 2011.
- [28] R. J. Nathan y T. A. McMahon, «Evaluación de técnicas automatizadas para análisis de flujo base y recesión.,» Water Resour, Australia, 1990.
- [29] OMM, «Guía de prácticas climatológicas. Organización Meteorológica Mundial. Tiempo-Clima-Agua.,» METEOTERM, Genève, 2011.
- [30] R. y. M. T. Nathan, « Evaluación de técnicas automatizadas para análisis de flujo base y recesión. Water Resour. Res. 26, 1465-1473,» 1990. [En línea].
- [31] A. Millares, M. Polo, M. Losada, C. Aguilar y J. Herrero, «Caracterización del caudal base en zonas de alta montaña a partir de un análisis estacional de recesiones.,» Researchgate.net, Granada, 2009.
- [32] S. R. Bustillos, «Análisis del sistema de riego de la comuna San Ramón parroquia Mulaló para determinar la eficiencia del uso de agua de riego a nivel de UPA.,» Pontificia Universidad Católica Del Ecuador, Quito, 2017.
- [33] M. Guerra, «Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la escorrentía en microcuencas que drenan los páramos del Ecuador,» Universidad Politécnica Nacional, Quito, 2019.
- [34] E. Rosales, «Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta. Desarrollo de redes para la gestión territorial del corredor biológico mesoamericano, México D.F,» 2012. [En línea].
- [35] OMM, «Guía de prácticas climatológicas. Organización Meteorológica Mundial. Tiempo-Clima-Agua. OMM-N°100, 169 pp. [Edición 2018].,» 2011. [En línea].
- [36] A. P. M. L. M. A. C. H. J. Millares, «Caracterización del caudal base en zonas de alta montaña a partir de un análisis estacional de recesiones. Researchgate.net, Vol IX, Pp.8.,» 2009. [En línea].
- [37] S. A. Rosero Bustillos, «Análisis del sistema de riego de la comuna San Ramón parroquia Mulaló para determinar la eficiencia del uso de agua de riego a nivel de UPA. [Tesis de titulación]. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador.,» 2017. [En línea].

- [38] M. Guerra, «Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la esorrentía en microcuencas que drenan los páramos del Ecuador. [Tesis de titulación]. Universidad Politécnica Nacional,» 2019. [En línea].
- [39] A. Millares, M. Polo, M. Losada, C. Aguilar y J. Herrero, «Caracterización del caudal base en zonas de alta montaña a partir de un análisis estacional de recesiones.,» Researchgate.net, Granada, 2009.
- [40] S. R. Bustillos, «Análisis del sistema de riego de la comuna San Ramón parroquia Mulaló para determinar la eficiencia del uso de agua de riego a nivel de UPA.,» Pontificia Universidad Católica Del Ecuador., Quito, 2017.

7. ANEXOS

ANEXO I. Resultados del programa HYSEP

Tabla. Resultados de la cuenca H0854 con el uso del programa USGS GW Toolbox

Flujo de corriente	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI	Flujo base	Flujo base	BFP	BFI	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI
Año	CFS	In	CFS	In	CFS	In	(%)	(--)	CFS	In	CFS	In
2008	77	6	17	3	70	33	15	44	7	25	1	59
2009	58	5	12	80	53	80	11	78	4	65	1	2
2010	67	6	15	42	62	57	13	61	6	45	1	31

Tabla. Transformación de unidades

Año	CFS (pie3/s)	m3/s	m/s	mm/s	mm/año
2008	77	2,1803936	1,35782E-08	1,35782E-05	428,2
2009	58	1,6423744	1,02278E-08	1,02278E-05	322,5
2010	67	1,8972256	1,18148E-08	1,18148E-05	372,6
PROMEDIO					374,4

Tabla. Resultados de la cuenca H797 con el uso del programa USGS GW Toolbox

Flujo de corriente	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI	Flujo base	Flujo base	BFP	BFI	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI
Año	CFS	In	CFS	In	CFS	In	(%)	(--)	CFS	In	CFS	In
2007	28	0	15	81	19	9	10	80	8	86	5	1
2008	47	3	26	83	36	41	20	65	10	91	6	18
2009	32	0	18	9	25	62	14	49	6	37	3	60
2010	26	7	15	11	21	30	12	5	5	41	3	6
2011	32	3	19	46	25	36	14	50	7	64	4	21

Tabla. Transformación de unidades

Año	CFS (pie3/s)	m3/s	m/s	mm/s	mm/año
2007	28	0,7928704	1,27553E-08	1,27553E-05	402,2
2008	47	1,3308896	2,14107E-08	2,14107E-05	675,2
2009	32	0,9061376	1,45775E-08	1,45775E-05	459,7
2010	26	0,7362368	1,18442E-08	1,18442E-05	373,5
2011	32	0,9061376	1,45775E-08	1,45775E-05	459,7
PROMEDIO					474,1

Tabla. Resultados de la cuenca H857 con el uso del programa USGS GW Toolbox

Flujo de corriente	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI	Flujo base	Flujo base	BFP	BFI	Flujo base	Escorrentía	BFP	BFI
Año	CFS	In	CFS	In	CFS	In	(%)	(--)	CFS	In	CFS	In
2007	29	9	0	82	12	56	0	34	17	34	0	48
2008	44	6	1	23	22	19	0	61	22	42	0	62
2009	25	3	0	69	10	4	0	28	15	26	0	42
2010	18	1	0	50	6	81	0	19	11	33	0	31
2011	52	1	1	43	26	32	0	72	25	80	0	71
2012	39	0	1	7	24	97	0	69	14	4	0	39
2013	15	6	0	43	6	64	0	18	8	95	0	25
2014	14	5	1	42	5	63	0	17	7	94	0	24

Tabla. Transformación de unidades

Año	CFS (pie³/s)	m³/s	m/s	mm/s	mm/año
2007	29	0,8211872	6,40527E- 10	6,40527E- 07	20,2
2008	44	1,2459392	9,71834E- 10	9,71834E- 07	30,6
2009	25	0,70792	5,52178E- 10	5,52178E- 07	17,4
2010	18	0,5097024	3,97568E- 10	3,97568E- 07	12,5
2011	52	1,4724736	1,14853E- 09	1,14853E- 06	36,2
2012	39	1,1043552	8,61398E- 10	8,61398E- 07	27,2
2013	15	0,424752	3,31307E- 10	3,31307E- 07	10,4
2014	14	0,3964352	3,0922E- 10	3,0922E-07	9,8
PROMEDIO					20,6