

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

CÁLCULO DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO DE TUMBACO

**CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA
HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE TUMBACO PARA
ESTIMAR LA RECARGA USANDO EL MODELO HYSEP,
ESTIMANDO LA EVAPOTRANSPIRACIÓN USANDO EL MÉTODO
DE PENMAN-MONTEITH**

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

MIREYA FERNANDA GUACHAMIN BARAJAS

DIRECTOR: ING. CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO PhD.

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, MIREYA FERNANDA GUACHAMIN BARAJAS 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.

MIREYA FERNANDA GUACHAMIN BARAJAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MIREYA FERNANDA GUACHAMIN BARAJAS, bajo mi supervisión.

ING. CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO 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.

MIREYA FERNANDA GUACHAMIN BARAJAS

ING. CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO PhD

DEDICATORIA

A mis amados padres Luis y Mery, este logro es gracias a ustedes.

A mis hermanos Jenny, Christian y Alex, por su apoyo y aliento para seguir adelante.

Mireya

AGRADECIMIENTO

A mis padres Luis y Mery, quienes con todo el amor del mundo me educaron y apoyaron incondicionalmente durante este largo camino. Gracias por ser mi fortaleza y mi guía en los momentos más difíciles de mi vida, por las risas, por enseñarme a valorar las pequeñas cosas de la vida y sobre todo, por enseñarme a luchar para cumplir mis sueños. Son mi más grande orgullo y mi ejemplo a seguir. Los amo infinitamente.

A mis hermanos Christian y Alexander, que con sus ocurrencias han llenado mis días de alegría. A mi chiquitina Jennifer, hermana, compañera de vida y confidente. Gracias por brindarme tu ayuda cuando más la necesité, por las madrugadas de estudio juntas, por enseñarme a ser mejor cada día y por ser la pequeña que llena de alegría mi vida entera. Juntas lo lograremos.

A mis amigos Sabi y Kevin, por aparecer en mi vida, por ser mis compañeros y por compartir todos esos momentos de risas escandalosas y llenas de felicidad cuando caminábamos por toda la Universidad. Gracias por esos helados que compartimos junto a largas conversaciones, y por los mejores consejos que pude recibir de su parte. Agradezco infinitamente su amistad pura, sincera e incondicional.

A mi directora Ing. Carla Manciatì, gracias infinitas por compartir conmigo todo el conocimiento y los recursos para el desarrollo de este trabajo. Por apoyarme y guiarme en cada paso de esta etapa. Por transmitir todas sus buenas energías, por toda la paciencia que tuvo en cada revisión y por su ayuda incondicional en la resolución de los problemas que surgieron en el camino.

A la Escuela Politécnica Nacional, mi segundo hogar, el cual me acogió y en donde me formé profesionalmente. El lugar donde aprendí, reí, lloré, conocí a personas maravillosas y disfruté cada momento de esta hermosa etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Zona de estudio	10
2.2 Datos.....	14
2.3 Procedimiento	19
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
3.1 Resultados	29
3.2 Conclusiones.....	35
3.3 Recomendaciones.....	36
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
5 ANEXOS.....	42

RESUMEN

El agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento de varios países del mundo y su disponibilidad depende fundamentalmente de los procesos del ciclo hidrológico tales como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración de agua en el suelo, entre otros. Por esta razón, se han desarrollado varios estudios para caracterizar el agua, estimar la recarga y gestionar el recurso. Sin embargo, en el Ecuador estos estudios son escasos.

Este proyecto de investigación tiene como finalidad la estimación de la recarga del acuífero de Tumbaco localizado en el Distrito Metropolitano de Quito y extendido sobre una superficie de 645 km². Para estimar la recarga del acuífero se realizó la separación de caudales a través del modelo HYSEP y se calculó un balance hídrico superficial. Los datos utilizados para la separación de caudales, corresponden a dos estaciones hidrológicas: Guayllabamba DJ Pisque (H0148) y San Pedro en Machachi (M0159). Los datos para el cálculo del balance hídrico fueron proporcionados por las estaciones meteorológicas: La Tola (M002) e Iñaquito (M024).

Para el método de separación de caudales se obtuvo valores de recarga de 284.72 mm/año para la estación H0148 y 303.68 mm/año para la estación H0159. Usando la ecuación del balance hídrico se obtuvo los valores máximos posibles de recarga siendo 707.2 mm/año para la estación de La Tola (M002) y 926.6 mm/año para la estación de Iñaquito (M024). La diferencia de los resultados obtenidos por los dos métodos sugiere que podrían existir otras fuentes de agua que alimentan al acuífero.

PALABRAS CLAVE: Acuífero, recarga, balance hídrico, HYSEP, evapotranspiración.

ABSTRACT

Groundwater is one of the main supply resources in several countries of the world and its availability depends mainly on the processes of the hydrological cycle such as precipitation, evapotranspiration, infiltration of water into the soil, among others. For this reason, several studies have been developed to characterize water, estimate recharge and manage the resource. However, in Ecuador these studies are scarce.

The purpose of this research project is to estimate the recharge of the Tumbaco aquifer located in the Distrito Metropolitano de Quito and extending over an area of 645 km². To estimate the recharge of the aquifer, the flow separation method was carried out using the HYSEP model and a surface water balance was calculated. The data used for the flow separation method correspond to two hydrological stations: Guayllabamba DJ Pisque (H0148) and San Pedro en Machachi (M0159). The data for the calculation of the water balance were provided comes from the meteorological stations: La Tola (M002) and Iñaquito (M024).

For the flow separation method, recharge values of 284.72 mm/year were obtained for station H0148 and 303.68 mm/year for station H0159. Using the water balance equation, the maximum possible recharge values were 707.2 mm/year for the La Tola station (M002) and 926.6 mm/year for the Iñaquito station (M024). The difference in the results obtained by the two methods suggests that there could be other sources of water feeding the aquifer.

KEYWORDS: Aquifer, recharge, water balance, HYSEP, evapotranspiration.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Se estima que del total de agua disponible en el planeta Tierra, el 97% es agua salada y tan solo el 3% corresponde al agua dulce. Del total de agua dulce, el 69% se encuentra congelada en Groenlandia y en la Antártida, el 1% corresponde al agua superficial disponible en ríos, lagos y arroyos; y el 30% restante es agua subterránea almacenada en acuíferos [1]. Debido al surgimiento de algunos problemas en estas fuentes de agua, se ha observado creciente interés en la investigación de estos temas [2].

Países como Rusia y España han presentado serios problemas de contaminación en sus reservas de agua subterránea, razón por la cual se han visto obligados a profundizar la investigación de la calidad del recurso. La sobreexplotación de acuíferos es otro de los problemas que ha generado gran interés, ya que en países como China, la India y Estados Unidos las tasas de explotación son relativamente altas [3]. Casos como estos han despertado la necesidad de estimar la recarga de acuíferos, es decir, el agua que a través de procesos naturales o artificiales volverá a formar parte del almacenamiento subterráneo. Es importante resaltar que la estimación de la recarga de los acuíferos es vital para la planificación y gestión del recurso hídrico [4]. Es necesario determinar la cantidad y calidad del agua que se va a explotar, el uso que se le va a dar, las posibles fuentes y áreas de recarga y descarga, así como los factores externos que pueden influir positiva o negativamente en este proceso [5].

Para este propósito se han desarrollado métodos que pueden ser aplicados apropiadamente dependiendo de las características de la zona de estudio y de los datos disponibles. Entre estos métodos se encuentra el método de trazadores, el balance hídrico y algunos modelos utilizados para identificar zonas de recarga como el modelo RAS, y otros para estimar tasas de recarga como HYSEP, SWAT e InVEST. El modelo HYSEP desarrollado por Sloto & Crouse se basa en la separación de hidrogramas y es el modelo que se va a emplear en este proyecto para la estimación de la recarga del acuífero de Tumbaco junto con un balance hídrico [6].

En el Ecuador se han realizado varias investigaciones referentes al estudio del agua subterránea almacenada en los acuíferos con la finalidad de aportar con soluciones relacionadas a problemas de disponibilidad del recurso. Uno de ellos es la investigación realizada por Saeteros, quien propone mecanismos para gestionar de manera sostenible el agua subterránea del acuífero Manglaralto [7]. En cuanto a los estudios relacionados a la estimación de tasas de recarga se presenta el trabajo realizado por Andrade en la sub-cuenca del Río Chambo en el cual se emplearon técnicas de hidrología física [8].

1.1 Objetivo general

Estimar la recarga del acuífero de Tumbaco a través del balance hídrico aplicando el modelo computacional HYSEP, de separación de caudales, y el cálculo de la evapotranspiración con el método de Penman-Monteith para proporcionar información relevante para la adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo.

1.2 Objetivos específicos

1. Calcular la evapotranspiración de la cuenca del acuífero de Tumbaco usando el método de Penman-Monteith para utilizar esta información en la ecuación del balance hídrico.
2. Realizar la separación de caudales utilizando el modelo HYSEP para conocer el caudal base de la cuenca.
3. Evaluar el balance hídrico en la cuenca hidrogeológica del acuífero de Tumbaco para determinar la recarga del mismo.

1.3 Alcance

Se estimará la recarga del acuífero de Tumbaco a través de la separación de hidrogramas y el cálculo del balance hídrico superficial a partir de datos hidrológicos y meteorológicos. Para la estimación de la recarga a través de la separación de hidrogramas, se utilizará el modelo HYSEP y los datos de caudal diario de dos estaciones hidrológicas localizadas cerca de la zona de estudio. El cálculo del balance hídrico se realizará a partir de datos de precipitación proporcionados por dos estaciones meteorológicas y el cálculo de parámetros como el escurrimiento superficial y evapotranspiración real. Los resultados obtenidos serán discutidos y comparados con los resultados obtenidos por otras investigaciones previas en la misma zona de estudio.

1.4 Marco teórico

Ciclo hidrológico y balance hídrico

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un sistema recirculatorio en el cual, el agua permanece en movimiento a través de una serie de etapas entre la atmósfera y la tierra. Este movimiento se debe a dos causas principales: el sol que aporta energía a todo el sistema y la gravedad que es el factor que permite el descenso del agua (precipitación y escurrimiento) [9]. La etapa inicial del ciclo hidrológico es incierto, pero autores como Maderey & Jiménez [10], suponen que todo comienza con las nubes ya que de estas salen las distintas formas de precipitación. Por otro lado, Campos [9] supone que todo comienza con la evaporación de los cuerpos de agua como los mares y océanos.

El vapor es transportado hacia el continente y condensado para formar nubes de las cuales se origina la precipitación. En esta etapa, no toda la precipitación llega al suelo, una parte se evapora y otra parte es interceptada por plantas, carreteras, etc. Parte del agua que llega al suelo se evapora, otra parte se acumula en surcos para formar parte de arroyos o ríos y el restante de agua se infiltra para formar parte de reservas subterráneas (Figura 1).

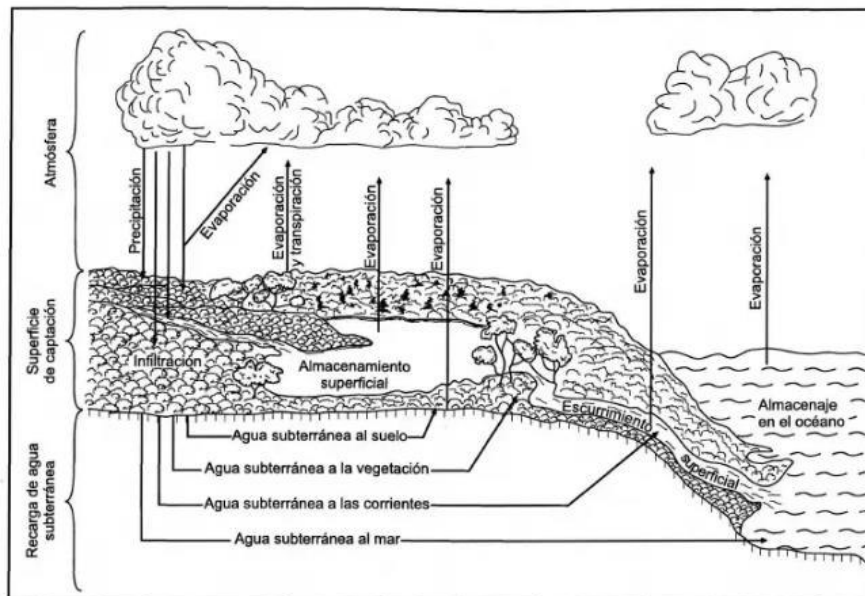


Figura 1. Ciclo Hidrológico y sus componentes [10]

Componentes del ciclo hidrológico

Precipitación

Se denomina precipitación a las partículas de agua que, gracias a los cambios de temperatura o presión en la atmósfera [11], caen hacia la superficie en estado líquido (lluvia) o en estado sólido (nieve o granizo) para dar origen a las corrientes superficiales y subterráneas [10].

Evaporación

Se conoce a la evaporación como el proceso físico en el cual el agua, presente en las capas del suelo cercanas a la superficie, cambia de estado líquido a estado gaseoso y esta se transporta a la atmósfera [12].

Transpiración

El proceso de transpiración es aquel en el cual las raíces de las plantas transportan el agua presente en el suelo hacia los poros de las hojas. Aquí el agua se evapora para luego regresar a la atmósfera [11].

Infiltración

Se define como infiltración al movimiento del agua desde las capas superiores hacia las capas inferiores del suelo [10].

Escorrentía superficial

Este componente del ciclo hidrológico se refiere a la porción de agua efímera que no se infiltra al interior del suelo, es decir, corresponde al agua que escurre sobre la superficie del suelo [10].

Evapotranspiración con el método de Penman-Monteith

La evapotranspiración (ETP), después de la precipitación, es el proceso más representativo en un balance hídrico y su estimación es de suma importancia en estudios de carácter hidrológico [13]. La ETP es un proceso combinado en el cual se pierde agua a través de la evaporación en la superficie del suelo y de la transpiración de la vegetación a medida que el dosel crece [14]. Para que este proceso se lleve a cabo es necesaria una fuente de energía como la que proporciona la radiación solar y la temperatura ambiente del aire. Además se tiene la intervención de factores como la humedad atmosférica y la velocidad del viento [15].

La evapotranspiración abarca dos definiciones importantes: evapotranspiración real y evapotranspiración de referencia. La evapotranspiración real es aquella que se obtiene de un cultivo bajo las condiciones ambientales existentes, es decir, las condiciones propias del área de estudio [16]. Por otro lado, la evapotranspiración de referencia (ET_o) es aquella que toma en cuenta las siguientes condiciones hipotéticas de cultivo: 0.12 cm de altura del pasto, resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23 [15].

Existen varios métodos para estimar la ETP, entre ellos se tienen los experimentales en los que es primordial el uso de aparatos específicos y personal experto con amplio conocimiento en la medición y determinación de los parámetros físicos que intervienen en este proceso [15]. Otro de los métodos para estimar la evapotranspiración es aquel en el cual se utilizan datos meteorológicos para emplearlos en fórmulas desarrolladas por investigadores para su aplicación en zonas con características determinadas. Es por esto que resulta muy difícil adaptarlas a otros lugares y obtener resultados precisos.

Sin embargo, el método FAO Penman-Monteith es utilizado y recomendado por varios investigadores para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o). Esto debido a que se ha demostrado que esta ecuación se puede aplicar a las condiciones de varias zonas del mundo [17], [18]. Tan sólo se necesita una base de datos meteorológicos como temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento [15].

Balance hídrico

Un balance hídrico es el método basado en el principio de la conservación de la masa en una región con un volumen de control conocido, definida por condiciones de contorno determinadas, y en un período de tiempo específico [5]. Para realizar un balance hídrico es importante conocer los flujos de entrada, salida y la variación en el almacenamiento del agua dentro del volumen de control [19], tal y como se establece en la ecuación de la continuidad [5]:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Variación en el almacenamiento}$$

La ecuación del balance hídrico no es única ya que esta puede ser modificada al agregar o eliminar elementos, los cuales dependen del sistema hidrológico que se estudia [19]. Para la estimación de la recarga del acuífero se realiza comúnmente el balance hídrico en el suelo edáfico, en la zona no saturada, o en el acuífero [20].

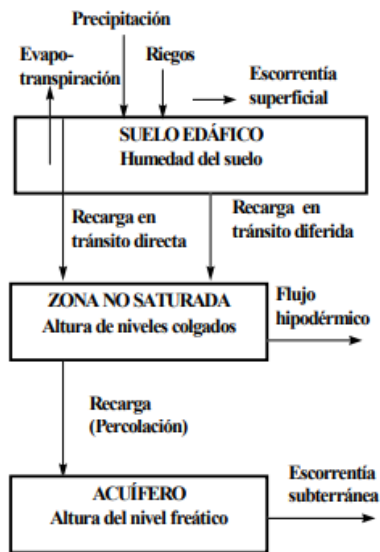


Figura 2. Principales procesos que intervienen en el balance hídrico en el suelo edáfico, zona no saturada y acuífero [21].

De acuerdo a Samper, en el suelo edáfico la precipitación da paso a los procesos de infiltración y escorrentía superficial [21]. Una parte del agua infiltrada regresa a la atmósfera a través de la evapotranspiración y la parte restante pasa a la zona no saturada constituyendo la recarga en tránsito. En esta parte el agua puede salir a la atmósfera o percolar para recargar el acuífero y formar parte de las reservas de agua subterránea. El acuífero puede presentar salidas como la escorrentía subterránea, la cual descarga el agua almacenada hacia los cuerpos de agua superficial (Figura 2).

Para realizar un balance hídrico es importante seleccionar el volumen de control, este puede ser una columna de suelo, un lago, una cuenca o un acuífero. Para estimar la recarga es importante que el volumen de control seleccionado cumpla con ciertas condiciones tales como la disponibilidad de datos, localización de zonas y posibles fuentes de recarga [19].

Recarga de un acuífero

Se denomina acuíferos a las grandes formaciones geológicas que poseen la capacidad de almacenar y transportar agua subterránea, es decir, agua subsuperficial localizada bajo el nivel freático del suelo [22]. El agua subterránea llega a los acuíferos gracias a los procesos fundamentales del ciclo hidrológico [23]. El agua subterránea, debido a su excelente calidad general, es aprovechada para distintas actividades tales como

agricultura, industria y abastecimiento de agua potable, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde las fuentes de agua superficial son escasas.

La creciente demanda de agua almacenada en los acuíferos genera la necesidad de estimar su recarga con la finalidad de garantizar una explotación sostenible y una adecuada gestión [24]. Sin embargo, varios acuíferos se encuentran contaminados por distintas razones y su explotación no es posible, especialmente si los contaminantes no pueden ser removidos y el agua está destinada al consumo humano.

La recarga de un acuífero se define como el ingreso de agua a la zona saturada y la adición de la misma a los depósitos de agua subterránea [25]. Este ingreso se puede dar por varios mecanismos, entre ellos, el descenso vertical del agua través de la zona no saturada hacia el nivel freático. Este mecanismo se conoce como infiltración y ocurre gracias a las fuerzas de gravedad [26]. El proceso de recarga de un acuífero depende de la intervención de varios factores importantes, entre los cuales se puede mencionar: el tipo de suelo, la permeabilidad, los coeficientes de escurrimiento e infiltración y las condiciones climáticas de la zona [24].

Un acuífero se puede recargar a través de fuentes naturales y fuentes artificiales. Las fuentes de recarga natural pueden ser la precipitación, ríos, lagos, estanques e incluso por el aporte de otros acuíferos. Por otro lado, entre las fuentes de recarga artificial se encuentran las alcantarillas, fuga de agua de las tuberías, agua utilizada en actividades de riego y la fuga de agua de tanques sépticos [25].

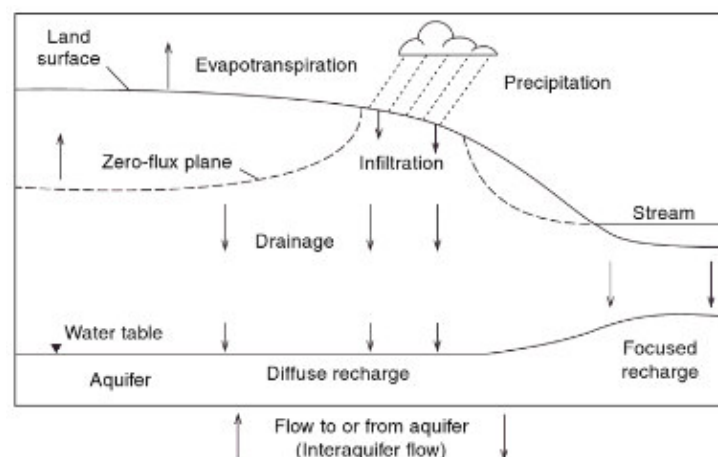


Figura 3. Recarga directa e indirecta de un acuífero [19].

Separación de hidrogramas

Un hidrograma es la representación gráfica de la variación del caudal de un cuerpo hídrico en el tiempo [27]. En la Figura 4 se observa la curva de un hidrograma y sus componentes, los cuales se van a describir a continuación.

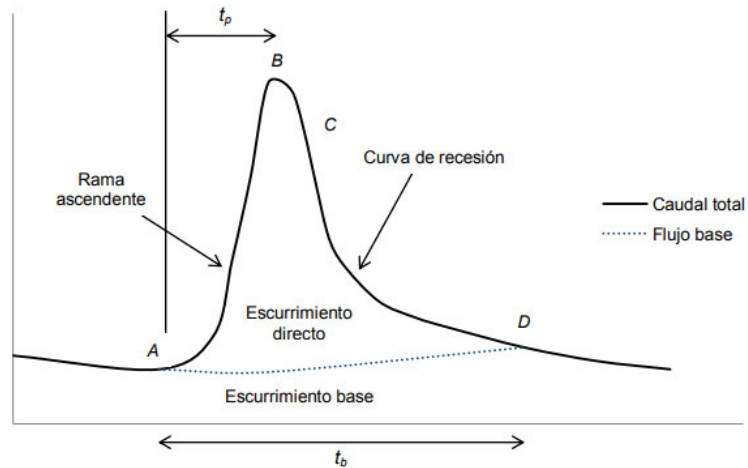


Figura 4. Representación gráfica de un hidrograma y sus partes [28].

La rama ascendente hace referencia al agua que proviene de la precipitación que cae sobre la cuenca de estudio y por tanto genera el crecimiento de la curva [28]. El punto B, que es el punto máximo de la curva, representa el caudal máximo que se ha producido debido a las precipitaciones [28], este se conoce como cresta o crecida. En el punto C se presenta la curva de recesión, en este punto el agua comienza un proceso de escurrimiento ya sea superficial o subterráneo. Finalmente el punto D hace referencia únicamente al escurrimiento subterráneo, es decir, el agua que llega a formar parte del almacenamiento subterráneo [28].

Modelo Hysep (Software GW Toolbox)

HYSEP es un programa computacional que ofrece una serie de herramientas, entre ellas, la separación de hidrogramas en componentes de flujo base y componentes de escorrentía superficial. El componente de flujo base hace referencia a la descarga del agua subterránea y el componente de escorrentía se asocia a la precipitación [6]. Este programa presenta tres métodos para la separación de hidrogramas: intervalo fijo, intervalo deslizante e intervalo mínimo local [19].

En el intervalo fijo los periodos de registro de datos están divididos en tiempos de una longitud igual a $2N$ y la tasa de descarga diaria más baja de este intervalo resulta igual al flujo base. En el intervalo de deslizamiento el rango es $0,5*(2N-1)$ días antes y $0,5*(2N-1)$ días después del periodo, dentro de este rango el valor de descarga más bajo es igual al flujo base. En el intervalo mínimo local, se identifican los días en los cuales la descarga es muy inferior en comparación a los otros días del periodo analizado y estos son catalogados como mínimos locales [19].

Además de la separación de caudales, HYSEP ofrece otras opciones que se pueden obtener con la misma base de datos. Entre estas opciones consta: la distribución del flujo base anual acumulada, la duración del flujo y la distribución de flujo estacional [6].

Estudios previos en la zona de estudio

El cálculo de la recarga de acuíferos es un tema de investigación que se ha desarrollado en varias regiones del mundo. Es así que se tienen estudios como el realizado en el acuífero de North Lincolnshire y South Humberside cuyo objetivo principal fue hallar un modelo que permita estimar la recarga del acuífero de una manera más precisa [29]. Otro de los estudios sobre el tema de recarga es el trabajo realizado en el acuífero de Calgary localizado en Canadá [30]. En esta investigación se realizó principalmente la separación de hidrogramas a través de un método logarítmico que resultó ser bastante conveniente para la evaluación de un balance hídrico de aguas subterráneas [30].

En América del Sur se presenta un estudio realizado en Brasil, donde se realiza la comparación de tres métodos aplicados a la estimación de la recarga [31]. Entre los métodos utilizados se encuentran: la separación hidrográfica empleando el filtro Eckhardt y diferentes formas de obtener el parámetro BFI_{max} [31]. Los resultados de este estudio fueron consistentes por parte de los tres métodos, sin embargo se presentaron varias observaciones como resultados dispares que podían ser atribuidos a los datos utilizados y errores en su medición [31].

En el Ecuador se han tenido proyectos de investigación similares, uno de ellos es la estimación de la recarga en la cuenca del río Chambo. En este proyecto se realizó la comparación de tres métodos, entre ellos, la separación de hidrogramas a través de la aplicación del modelo HYSEP [8]. En cuanto a estudios previos realizados en la zona de estudio de este proyecto, se tiene un análisis hidrodinámico y geoquímico [32] el cual se ha tomado como una referencia importante para el desarrollo del presente trabajo.

2 METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio

El acuífero de Tumbaco es un acuífero sedimentario localizado al nororiente del Distrito Metropolitano de Quito. El acuífero se extiende sobre una superficie de 645 km² atravesando varios poblados, entre ellos, Tumbaco, Cumbayá, San Rafael, Conocoto, Pintag y Alangasí [32]. La zona de estudio se ubica en la parte norte, tiene un área de 92 km² y se encuentra limitado hidráulicamente al norte por el recorrido de los ríos Chiche y San Pedro, al sur con el volcán Ilaló, al este limita con el río Chiche y al oeste con el río San Pedro hasta el cruce con el río Machángara (Figura 5) [32].

Este depósito de agua subterránea, años atrás, fue explotado con la finalidad de obtener agua potable para abastecer a la población. Sin embargo, en el año 2006 se detectaron concentraciones de arsénico en el agua que sobrepasaban los límites máximos permisibles establecidos en la norma técnica. Por esta razón, ese mismo año, la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) decidió suspender el bombeo y cerrar la fuente temporalmente.

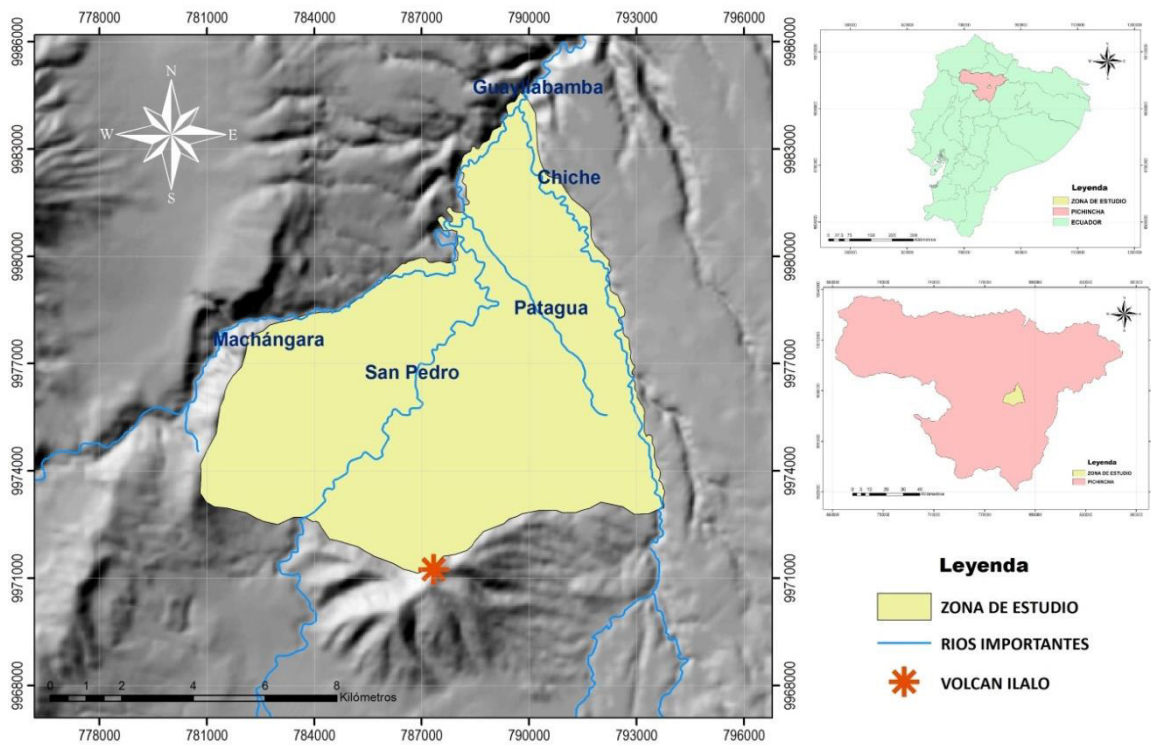


Figura 5. Localización de la zona de estudio.

Relieve

El relieve de Tumbaco corresponde al relieve montañoso característico de la región Andina. Este a su vez se divide en macrorrelieve (incluye conceptos de cordillera, valles y llanura) y mesorelieve (comprende edificios volcánicos, relieves montañosos, colinas, entre otros) [33].

En cuanto a las pendientes se tienen cuatro grupos, el primer grupo comprende pendientes de 2080 hasta 2290 msnm; el segundo grupo pendientes de 2290 hasta 2500 msnm; el tercero con pendientes de 2500 hasta 2755 y finalmente el cuarto grupo con pendientes de 2755 hasta 3160 msnm [33].

Geología

La geología consiste de rocas volcánicas y volcanoclásticas del periodo cuaternario correspondiente a la cangahua. Se tienen pendientes fuertes en los flancos del volcán Ilaló y pendientes suaves y medias en el norte de la parroquia [33]. En Tumbaco se encuentran la formación geológica Ilaló, Guayllabamba, Chiche, y Cangahua.

La formación Ilaló está formada por lava andesítica fracturada y constituye un acuífero geotérmico que se mantiene en contacto con la cámara magmática del Ilaló de profundidad desconocida [32]. Mientras que la formación Guayllabamba presenta características similares a la formación del Chiche. Está compuesta principalmente por bloques de lava fracturada, arena, sedimentos piroclásticos y aglomerados volcánicos [32].

La formación Chiche del cuaternario está conformada por piroclastos, cangahua, escombros, lahares y sedimentos aluviales, fluviales, deltaicos y lacustres [34]. Esta formación contiene capas de grava y arena media a gruesa [32]. La formación Cangahua es el más reciente depósito de origen volcánico. Proviene de varias fuentes de ceniza volcánica local y regional. La formación cubre casi 20 km² del corredor interandino y presenta una textura consolidada que se compone de toba, ceniza volcánica endurecida con textura limo arenosa [32].

Uso de suelo y cobertura

La parroquia de Tumbaco comprende cuatro zonas con mayor extensión: la antrópica y la agropecuaria, así como también una parte de vegetación arbustiva y cobertura de bosque [33]. En la zona agropecuaria, la agricultura que se realiza es del tipo tradicional y se tienen cultivos de fréjol, papa y cereales. En cuanto a los bosques, estos son

principalmente de eucalipto. En la zona aledaña al Ilaló se han hallado plantas como cactáceas y bosques arbustivos y las zonas que se encuentran sin cobertura vegetal están vinculadas a procesos erosivos [32].

Los diferentes usos de suelo y cobertura vegetal de la parroquia de Tumbaco se pueden apreciar en la Tabla 1. En la Figura 6 se observa la distribución espacial de los mismos.

Tabla 1. Usos y cobertura de suelo de la zona de estudio con áreas y porcentajes respectivos.

USOS DE SUELO	ÁREA (km ²)	% ÁREA UTILIZADA
Tierra Agropecuaria	15.21	16.53
Tierra arbustiva y herbácea	20.32	22.08
Tierra forestal	10.43	11.34
Tierra sin cobertura vegetal	0.02	0.02
Zona Antrópica	45.30	49.23
Cuerpo de agua	0.73	0.78
TOTAL	92.00	100%

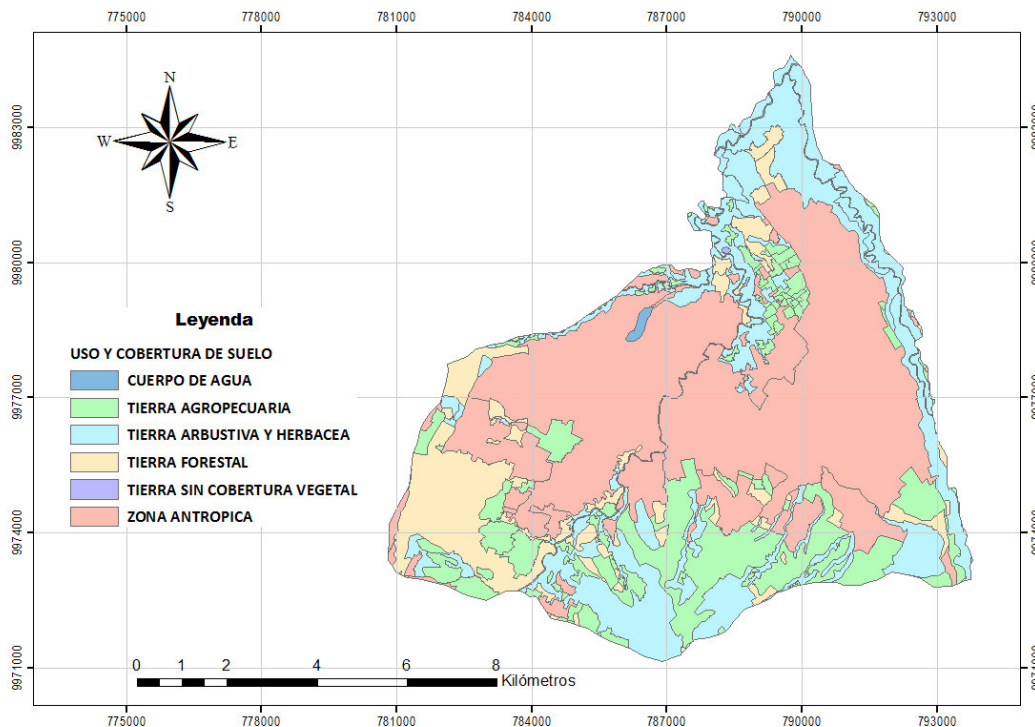


Figura 6. Mapa de usos y cobertura del suelo de la zona de estudio.

Clima

La zona se caracteriza por un clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo correspondiente a la región Andina. El cual presenta características como temperatura media anual de entre 12 y 20°C. Las lluvias anuales varían entre 500 y 2000 mm. La insolación tiene una duración que está comprendida entre 1000 y 2000 horas al año y la humedad relativa se halla entre 65 y 85% [35].

Hidrografía

Como se detalla en el proyecto AguAndes [36], existen pequeños ríos que atraviesan la zona de estudio y alimentan a los grandes ríos San Pedro, Pita, Chiche y Machángara. El río San Pedro con una longitud de 80 km, nace del volcán Iliniza al sur de la zona de estudio. El río es principalmente utilizado para actividades de riego en los valles y a medida que atraviesa los poblados, recoge las aguas residuales generadas.

El río Pita nace del deshielo del glaciar del volcán Cotopaxi alcanzando una longitud de 50 km y recorriendo una dirección sur-norte en la parte alta y luego de sureste a noroeste en medio del valle de Los Chillos. El río es utilizado principalmente para actividades de riego. El río Chiche por su lado, es el resultado de la unión de varios afluentes que nacen de la Cordillera Real. Este cuerpo de agua mantiene una longitud de 40 km recorriendo una dirección norte-sur y luego de sureste a noroeste cuando está cerca del volcán Ilaló.

El río Machángara con una longitud de 33 km nace del volcán Atacazo y atraviesa la ciudad de Quito recogiendo aguas residuales domésticas e industriales, muchas de ellas sin previo tratamiento, hasta finalmente unirse al río San Pedro. Debido a que este cuerpo hídrico ha sido utilizado como vertedero de aguas residuales, se presenta un alto grado de contaminación (Figura 7).

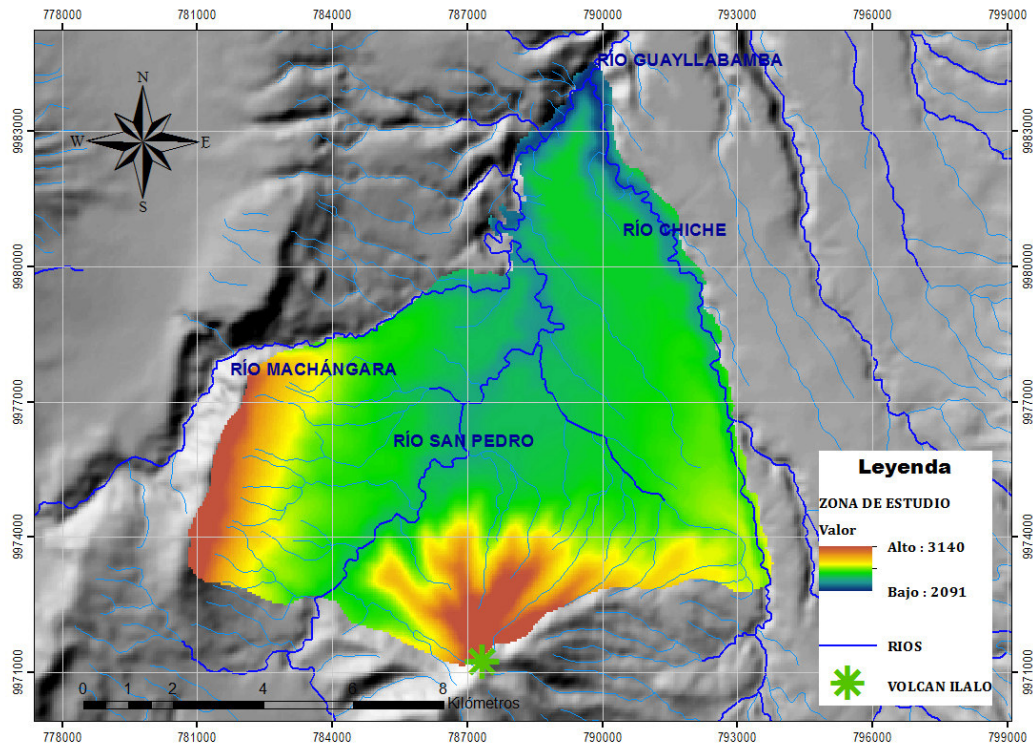


Figura 7. Mapa de hidrografía correspondiente a la zona de estudio.

2.2 Datos

Recopilación de información

Para aplicar el método de separación de hidrogramas es necesario tener una base de datos de caudal diario. Estos fueron obtenidos de la base de datos disponible en los anuarios hidrológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). En la Tabla 2 se observa una lista de estaciones hidrológicas ubicadas dentro y cerca del área de estudio. Entre ellas se tienen estaciones activas e inactivas. Es importante mencionar que algunas de las estaciones hidrológicas activas no presentan series de datos completas lo cual se convierte en una limitante para este estudio. En cuanto a la base de datos de las estaciones automáticas pertenecientes al INAMHI, no fue posible la entrega de la información por parte de la institución, razón por la cual no han sido incluidas en este estudio.

Tabla 2. Estaciones hidrológicas analizadas para la obtención de datos de caudal diario que serán utilizados para el modelo de separación del caudal base.

No.	CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA	COORDENADAS		ESTADO
			X	Y	
1	H0137	MACHANGARA EN GUAPULO	780997.2	9976950.4	INACTIVA
2	H0148	GUAYLLABAMBA DJ PISQUE	788765.1	10000922.0	ACTIVA
3	H0157	SAN PEDRO EN AMAGUAÑA	776599.5	9957897.3	INACTIVA
4	H0158	PITA AJ SALTO	786727.4	9936823.1	INACTIVA
5	H0159	SAN PEDRO EN MACHACHI	772683.0	9948975.0	ACTIVA
6	H0189	MACHANGARA EN DOS PUENTES	782296.8	9978025.8	INACTIVA
7	H0190	MONJAS EN EL COLEGIO	780129.3	9968652.7	INACTIVA
8	H0193	SAN PEDRO EN BAT.CHIMBORAZO	781705.4	9961307.2	INACTIVA
9	H0194	SAN PEDRO EN S.P.TOBOADO	783006.3	9967023.2	INACTIVA
10	H0195	SAN PEDRO EN P.CA TUMBACO	787092.5	9977318.2	INACTIVA
11	H0196	SANTA CLARA AJ S.PEDRO	786532.2	9961982.0	INACTIVA
12	H0197	CAPELO AJ S.PEDRO	782696.9	9966900.4	INACTIVA
13	H0198	PITA EN TR.AL SAN PEDRO	783779.8	9966869.4	INACTIVA
14	H0199	SAN PEDRO EN P.HOLIDAY	782635.0	9967084.8	INACTIVA
15	H0200	GUAYLLABAMBA EN P.CARRETERA	792663.7	9992777.2	INACTIVA

Al realizar la revisión de datos disponibles de cada estación, se determinó el uso de las dos estaciones que se observan en la Tabla 3. Los datos de las estaciones corresponden a un intervalo de tiempo de 24 años comprendido en un periodo desde 1990 hasta 2013. En la figura 8 se observa un inventario de los años con datos disponibles para las dos estaciones seleccionadas. La estación H0148 tiene un 54.16% de datos faltantes y la estación H0159 presenta los datos completos. Con la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica se delimitó las sub-cuencas que se observan en la Figura 9. De éstas se obtuvo el dato de áreas de drenaje superficial.

Tabla 3. Estaciones hidrológicas seleccionadas para la obtención de datos diarios de caudal que serán empleados en el modelo de separación de caudal base.

No.	CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PERÍODO DE DATOS DISPONIBLES	COORDENADAS	
				X	Y
1	H0148	GUAYLLABAMBA DJ PISQUE	1994 & 1996-1998 & 2007-2013	788765.1	10000922.0
2	H0159	SAN PEDRO EN MACHACHI	1990-2013	772683.0	9948975.0

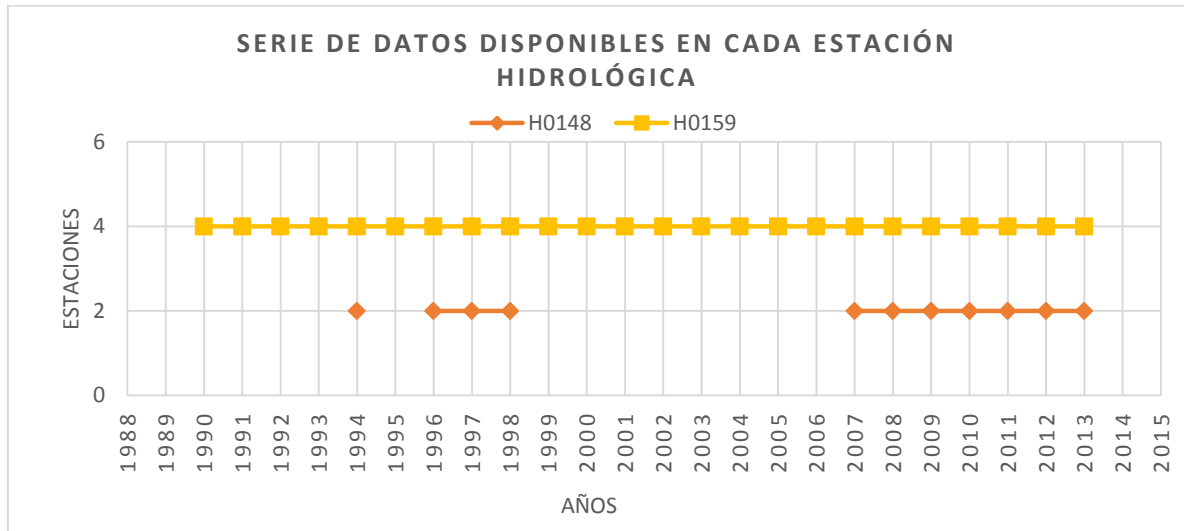


Figura 8. Representación de datos disponibles y datos faltantes de las estaciones seleccionadas.

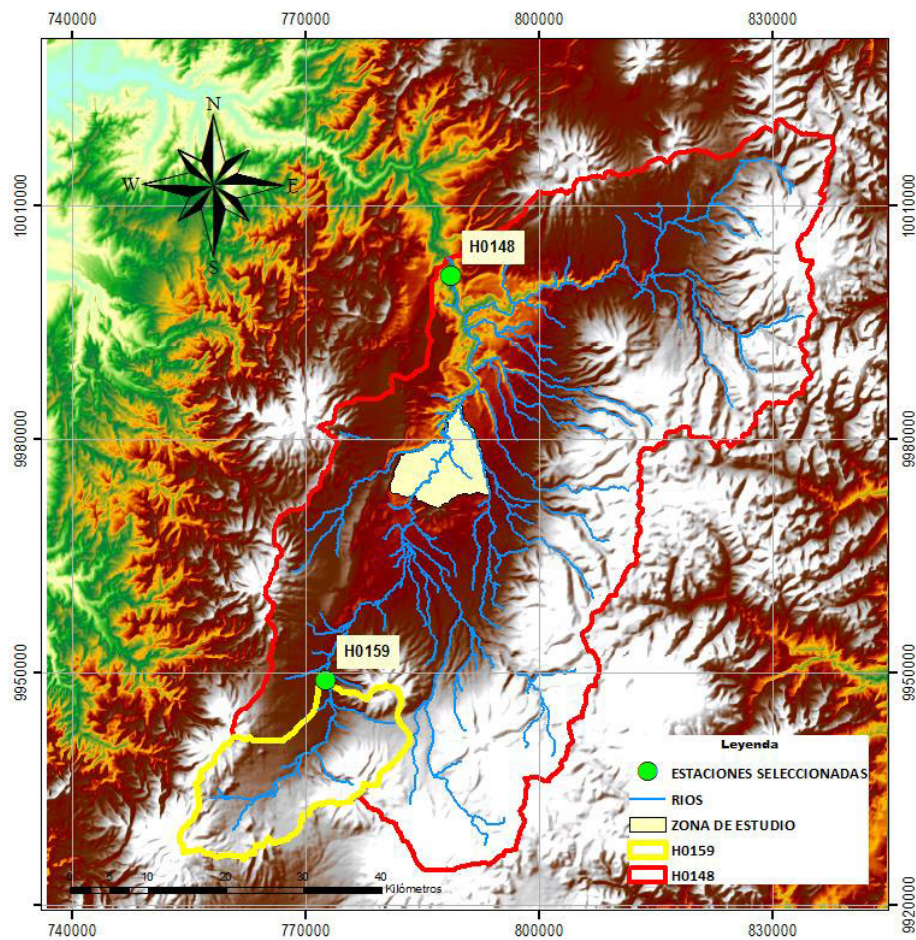


Figura 9. Mapa de las sub-cuencas delimitadas a partir de las estaciones seleccionadas.

Además del método de la separación de hidrogramas se realizó un balance hídrico con la finalidad de comparar los resultados obtenidos. Para el cálculo del balance hídrico y la determinación de la evapotranspiración con el método de Penman-Monteith, se necesita información de parámetros como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y heliofanía. Algunos detalles sobre estos datos se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros necesarios para el cálculo del balance hídrico y unidades de medida correspondiente.

PARÁMETROS	UNIDAD	FUENTE
Precipitación	mm	INAMHI
Temperatura media	°C	INAMHI
Humedad relativa	%	INAMHI
Velocidad del viento	Km/día	INAMHI
Heliofanía	horas	INAMHI

Con respecto a la obtención de la información, los datos necesarios fueron obtenidos de la base disponible en los anuarios meteorológicos del INAMHI. En la Tabla 5 se observa una lista de estaciones localizadas dentro y cerca de la zona de estudio. Sin embargo, para este fin se ha tomado los datos de solamente dos estaciones meteorológicas debido a que el resto de estaciones no presenta información completa. Así mismo, cerca de la zona de estudio se tiene una serie de estaciones automáticas de las cuales no fue posible la entrega de datos por parte del INAMHI, razón por la cual no han sido tomadas en cuenta para el presente estudio.

Tabla 5. Estaciones meteorológicas analizadas para la obtención de datos necesarios que serán empleados en el cálculo del balance hídrico.

No.	CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA	PARÁMETROS DISPONIBLES	COORDENADAS	
				X	Y
1	M002	LA TOLA	P, Tm, Hr, V, H	793088.5	9974661.7
2	M024	IÑAQUITO	P, Tm, Hr, V, H	780168.6	9981523.5
3	M055	QUITO AEROPUERTO-DAC	P, Tm	779946.2	9984510.8
4	M0347	PUEMBO	P	794333.7	9980525.8
5	M0352	SANGOLQUÍ	P	785697.5	9963119.8
6	M0353	RUMIPAMBA-PICHINCHA	P	787643.7	9952700
7	M0572	CUMBAYÁ	P	786412.5	9978732.3
8	M5035	COTOCOLLAO	P	779166.9	9988493.8
9	M5036	CARAPUNGO	P	781060.5	9989821.3
10	M5037	BELISARIO	P	779723	9980749.1
11	M5040	TUMBACO	P	789413.1	9977207.2
12	M5041	LOS CHILLOS	P	783173.3	9966808.1

Los datos de las estaciones seleccionadas que se presentan en la Tabla 6 y la ubicación de las mismas se observa en la Figura 10. Los datos corresponden a un intervalo de tiempo de alrededor de 24 años comprendido en un periodo desde 1990 hasta 2013.

Tabla 6. Estaciones meteorológicas seleccionadas para la obtención de datos que serán empleados en el balance hídrico.

No.	CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PERIODO DE DATOS DISPONIBLE	COORDENADAS	
				X	Y
1	M002	LA TOLA	1990-2013	793088.5	9974661.7
2	M024	IÑAQUITO	1990-2013	780168.6	9981523.5

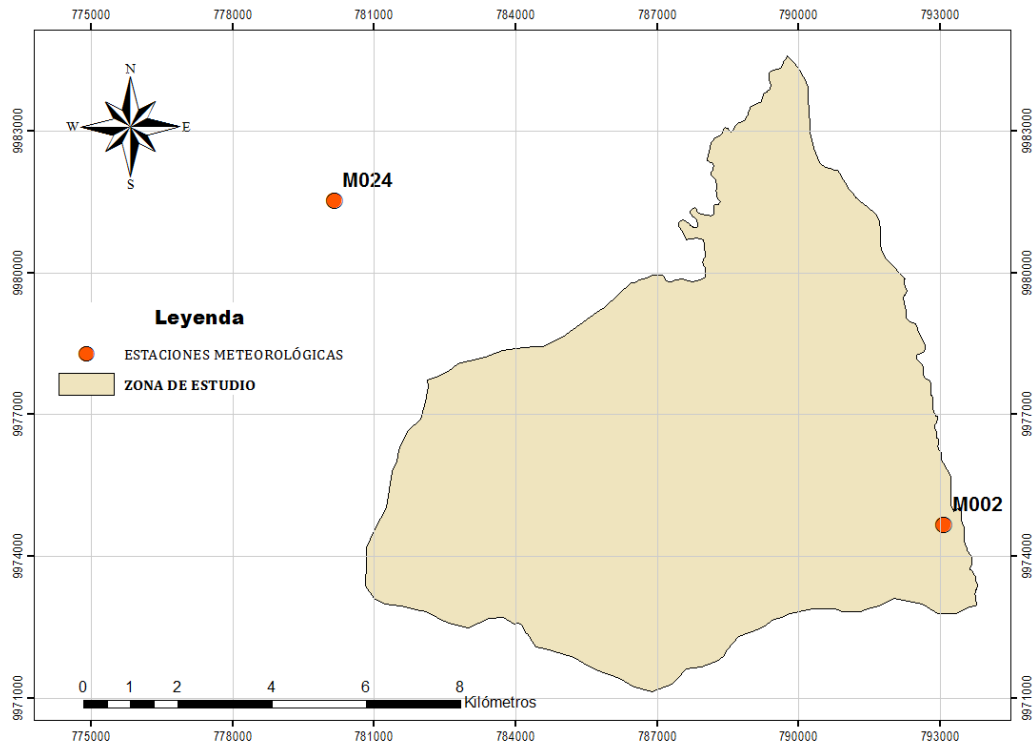


Figura 10. Ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

2.3 Procedimiento

Separación de hidrogramas

Para realizar la separación de hidrogramas se utilizó el software Ground Water Toolbox desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Este software presenta el cálculo de varios parámetros, entre ellos, la estimación de caudal base a través de la aplicación de las siguientes ecuaciones resumidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Ecuaciones que emplea el software GW Toolbox para la separación de hidrogramas y obtención de caudal base.

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

$U_{(i)} = Q_{i-1} + \frac{(1 - \alpha)}{2} (Q_i - Q_{i-1})$ <p>Ecuación 3. Flujo base</p>	$U_{(i)}$ =Flujo base en el tiempo i $Q_{(i)}$ = Flujo observado en el tiempo i α : Coeficiente de recesión
---	--

Los datos necesarios para la aplicación del método son: caudales diarios obtenidos de las estaciones hidrológicas seleccionadas, el área de drenaje de las sub-cuencas, el índice de caudal base máximo ($BFI_{m\acute{a}x}$, por sus siglas en inglés) y los valores de coeficiente de recesión.

El parámetro del índice de caudal base (BFI) denominado parámetro de filtro o coeficiente de recesión fue analizado en un estudio realizado por Nathan y McMahon [37], en el cual se determinó que el valor que más se acerca al valor óptimo y proporciona una mejor estimación del BFI es 0.925. Es importante resaltar que este valor es aplicable para filtros de uno y dos parámetros.

En cuanto al $BFI_{m\acute{a}x}$, es un parámetro que no se puede medir y por esta razón se han realizado varias pruebas en las cuales se demostró que es posible obtener valores típicos de acuerdo a las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca [38]. En la Tabla 8 se presentan los valores típicos de $BFI_{m\acute{a}x}$.

Tabla 8. Valores de $BFI_{m\acute{a}x}$ que se aplican de acuerdo a las características del acuífero en estudio.

CARACTERÍSTICAS		$BFI_{m\acute{a}x}$
CORRIENTE	ACUÍFERO	
Perenne	Poroso	0.80
Efímera	Poroso	0.50
Perenne	Roca dura	0.25

A continuación se presenta una breve explicación del proceso seguido para la obtención de caudal base. Este comienza con la creación de un nuevo proyecto en el software GW Toolbox. Al iniciar se tiene la ventana de bienvenida que se observa en la Figura 11.

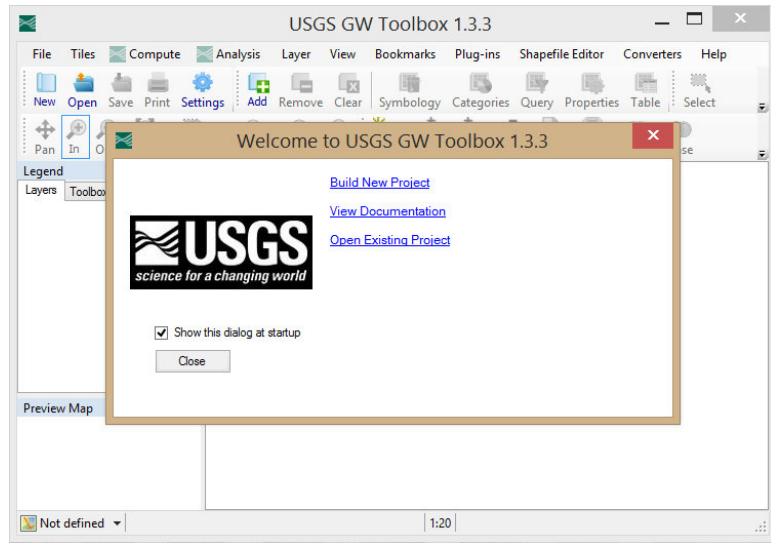


Figura 11. Ventana de bienvenida al software GW Toolbox.

Para ingresar los datos a GW Toolbox es importante que se almacenen en un archivo .csv el cual debe estar compuesto de dos columnas. La primera columna corresponde a la fecha en donde debe constar el año, mes y día. La segunda columna almacena los valores de caudal diario. En la Figura 12 se observa el formato de los datos que se van a ingresar. A continuación, se realiza el ingreso de los datos con la opción Open data tal y como se observa en la Figura 13.

DATE	Flow(feet3/s)
1990/1/1	100.65
1990/1/2	98.78
1990/1/3	91.82
1990/1/4	100.47
1990/1/5	100.47
1990/1/6	96.06
1990/1/7	100.47
1990/1/8	100.47
1990/1/9	100.47
1990/1/10	98.25
1990/1/11	115.13
1990/1/12	199.00
1990/1/13	200.70
1990/1/14	194.80
1990/1/15	187.77
1990/1/16	188.05
1990/1/17	212.70
1990/1/18	184.34
1990/1/19	184.20
1990/1/20	186.29
1990/1/21	180.95
1990/1/22	177.60
1990/1/23	164.67
1990/1/24	159.09
1990/1/25	167.85
1990/1/26	174.67
1990/1/27	171.07
1990/1/28	171.07
1990/1/29	172.90
1990/1/30	171.07

Figura 12. Formato de los datos en Excel para ser importados al software GW Toolbox.

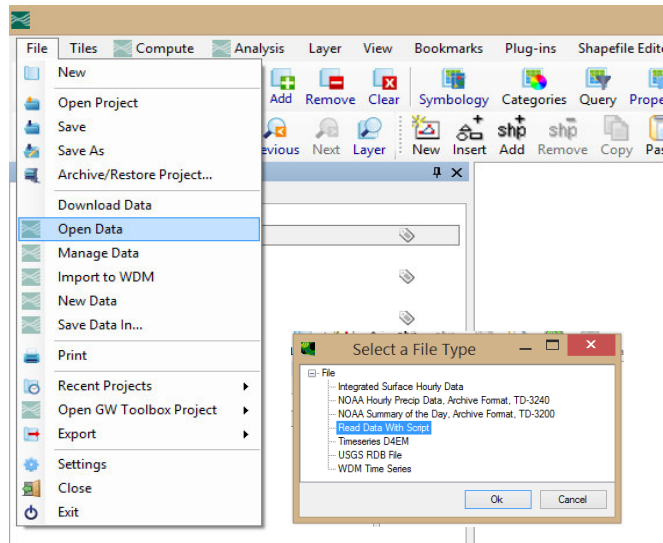


Figura 13. Ventana para la importación de datos los en formato .csv al software GW Toolbox.

Una vez que se complete el proceso de importación de datos, se realiza la separación de caudal base con la herramienta disponible en la opción Manage Data, Analysis, USGS Base Flow Separation. Al seleccionar esta opción se despliega una ventana (Figura 14) en la cual se observan los métodos que emplea el software y los datos necesarios como el área de drenaje. Para el Digital Filter (DF) se ingresa los parámetros como el coeficiente de recesión (α), y el $BFI_{m\acute{a}x}$, la carpeta de destino en donde se almacenan los resultados y otras de las opciones que presenta la herramienta.

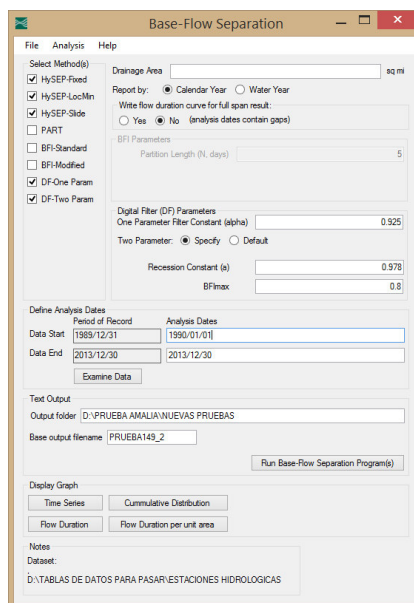


Figura 14. Ventana de la herramienta Base Flow Separation para la obtención del caudal base a partir de los datos importados.

Evapotranspiración

Para el cálculo de la ETP se utilizó el software CROPWAT-FAO 8.0, desarrollado por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés). Este método estima la ETP del cultivo de referencia (ET_o) a través de la ecuación de Penman-Monteith y otras ecuaciones que se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Ecuaciones que emplea el software CROPWAT-FAO 8.0 para el cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) con el método de Penman-Monteith.

ECUACIÓN	DÓNDE
$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T - 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$ <p>Ecuación 4. Evapotranspiración de referencia</p>	<p>ET_o: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).</p> <p>R_n: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)</p> <p>G: Flujo de calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)</p> <p>T: Temperatura media del aire a 2m de altura (°C)</p> <p>u₂: Velocidad del viento a 2m de altura (m s⁻¹)</p> <p>e_s: Presión de vapor de saturación (kPa)</p> <p>e_a: Presión real de vapor (kPa)</p> <p>Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)</p> <p>γ: Constante psicométrica (kPa °C⁻¹).</p>
$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3}$ <p>Ecuación 5. Constante psicométrica</p>	<p>γ: Constante psicométrica (kPa °C⁻¹).</p> <p>C_p: Calor específico a presión constante, 1.013x10⁻³ (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)</p> <p>P: Presión atmosférica (kPa).</p> <p>ε: Cociente del peso molecular de vapor de agua/aire seco=0.622</p> <p>λ: Calor latente de vaporización. (2.45MJ kg⁻¹)</p>
$\Delta = \frac{4098 * \left[0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$ <p>Ecuación 6. Pendiente de la curva de presión de vapor</p>	<p>Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)</p> <p>T: Temperatura del aire (°C).</p>

$e_a = \frac{e^o(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^o(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2}$ <p>Ecuación 7. Presión real de vapor</p>	<p>e_a: Presión real de vapor (kPa) $e^o(T_{min})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima (kPa) $e^o(T_{max})$: Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima (kPa) HR_{max}: Humedad relativa máxima (%) HR_{min}: Humedad relativa mínima (%)</p>
$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$ <p>Ecuación 8. Radiación solar</p>	<p>R_s: Radiación solar o de onda corta ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) $a_s + b_s$: Fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n=N$). n: Duración real de la insolación (horas). N: Duración máxima posible de la insolación (horas) R_a: Radiación extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$)</p>
$ET = ET_o * Kc$ <p>Ecuación 9. Evapotranspiración real</p>	<p>ET: Evapotranspiración real Kc: Coeficiente único de cultivo</p>

Los datos que se requieren para obtener la ETP de referencia, adicional a los señalados en la Tabla 4, son los correspondientes a la localización del sitio, tales como altitud, latitud y longitud en grados decimales. La latitud es un dato de suma importancia.

CROPWAT-FAO 8.0 presenta una ventana en donde se ingresan los datos de manera manual o utilizando la opción pegar tabla. Como se observa en la Figura 15, el uso del software y la obtención de resultados son sencillos.

País: ECUADOR Estación: INAQUITO
 Altitud: 2789 m. Latitud: 0.17 °S Longitud: 78.48 °W

Mes	Prom Temp °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	16.4	73	55	6.2	18.4	3.33
Febrero	14.8	78	41	3.3	14.5	2.69
Marzo	15.8	74	46	4.7	16.9	3.08
Abril	15.7	72	48	4.3	15.7	2.93
Mayo	14.9	78	43	3.9	14.3	2.57
Junio	16.1	65	60	6.5	17.4	3.08
Julio	15.8	62	72	6.5	17.7	3.18
Agosto	15.8	66	67	6.3	18.3	3.28
Septiembre	16.3	65	70	6.2	18.9	3.49
Octubre	15.2	75	50	4.5	16.3	3.00
Noviembre	14.8	77	46	4.6	16.1	2.86
Diciembre	15.3	76	60	5.7	17.4	3.04
Promedio	15.6	72	55	5.2	16.8	3.04

Figura 15. Ventana de datos y resultados de la Evapotranspiración de Referencia (ETo) en el software CROPWAT-FAO 8.0

La evapotranspiración real (ET) conocida también como la evapotranspiración de cultivo, se obtuvo con el producto de la evapotranspiración potencial (ETo) y el coeficiente único de cultivo (Kc) tal y como se observa en la Ecuación 9. Los valores de Kc empleados para la zona de estudio de este proyecto se presentan en la Tabla 10 [15]. Los valores de Kc dependen del uso de suelo de la zona de estudio, para esto, se identificó la ubicación de las estaciones meteorológicas como se muestra en la Figura 16.

Tabla 10. Valores de Kc para distintos usos de suelo y meses del año

DESCRIPCIÓN	Kc ₁	Kc ₂	Kc ₃	Kc ₄	Kc ₅	Kc ₆	Kc ₇	Kc ₈	Kc ₉	Kc ₁₀	Kc ₁₁	Kc ₁₂
AGRÍCOLA	0.6	0.6	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
AGUA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ANTRÓPICO	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
AGROPECUARIO	0.65	0.65	0.65	0.65	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.65	0.65	0.65
BOSQUE NATIVO	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5
PLANTACIÓN FORESTAL	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5

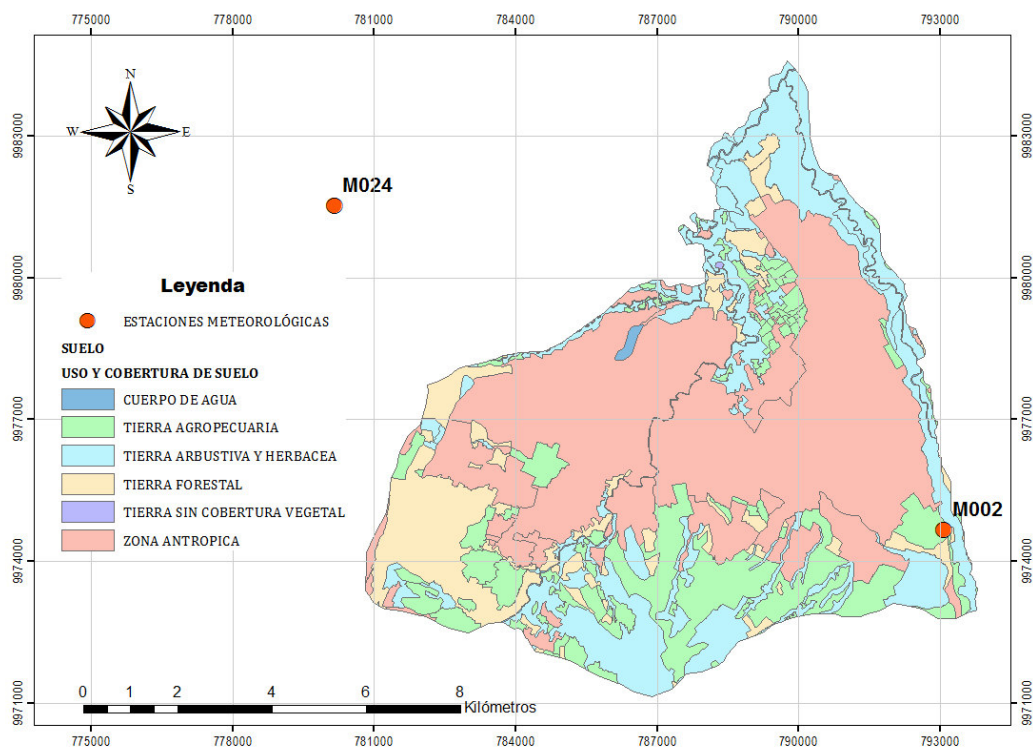


Figura 16. Ubicación de estaciones meteorológicas e identificación de uso de suelo para determinación de valores de Kc.

Balance Hídrico

La estimación de la recarga del acuífero se realizó a través de la ecuación del balance hídrico, en donde se tomó en cuenta aquellos parámetros cuyos datos se tienen disponibles. En la Tabla 11 se presentan las fórmulas empleadas en la estimación de la recarga, así como el cálculo de los parámetros que fueron calculados para esta finalidad.

Tabla 11. Ecuaciones empleadas para el balance hídrico y la obtención de la recarga del acuífero de Tumbaco.

ECUACIÓN	DÓNDE
$P = ESC + \Delta ARM + ET + R$ <p>Ecuación 10. Balance hídrico</p>	<p>P: Precipitación (mm) ESC: Esguerrimiento superficial (mm) ΔARM: Variación en el almacenamiento (mm) ET: Evapotranspiración real (mm) R: Recarga (mm)</p>

$ESC = C' * P$ Ecuación 11. Escurrimiento superficial	C' : Coeficiente de escurrimiento. P : Precipitación (mm)
$C' = \sigma * c$ Ecuación 12. Coeficiente de escurrimiento	σ : Constante determinada en función de la pendiente y la estación del año c : Coeficiente que determina el volumen de la precipitación que escurre sobre la superficie.

Para determinar el coeficiente C' se empleó la Tabla 12, en la cual se presentan las constantes de acuerdo al tipo de suelo, pendiente y estación del año. La Ecuación 10 presenta como componente la variación en el almacenamiento, es importante resaltar que se asume que el valor de este parámetro se acerca a cero debido a que se realizó un balance anual y por lo tanto el sistema se encuentra en equilibrio.

En la Figura 17 se observa la reclasificación de pendientes de la zona de estudio que se utilizó para la determinación de las constantes.

Tabla 12. Valores de c y σ en función del tipo de suelo, pendiente y estación del año.

TIPO DE SUELO	PENDIENTE	σ	
		ÉPOCA SECA	ÉPOCA LLUVIOSA
Arenoso C=0.30	0 a 2	0.17	0.34
	2 a 7	0.34	0.50
Arcilloso C=0.40	0 a 2	0.33	0.43
	2 a 7	0.45	0.55

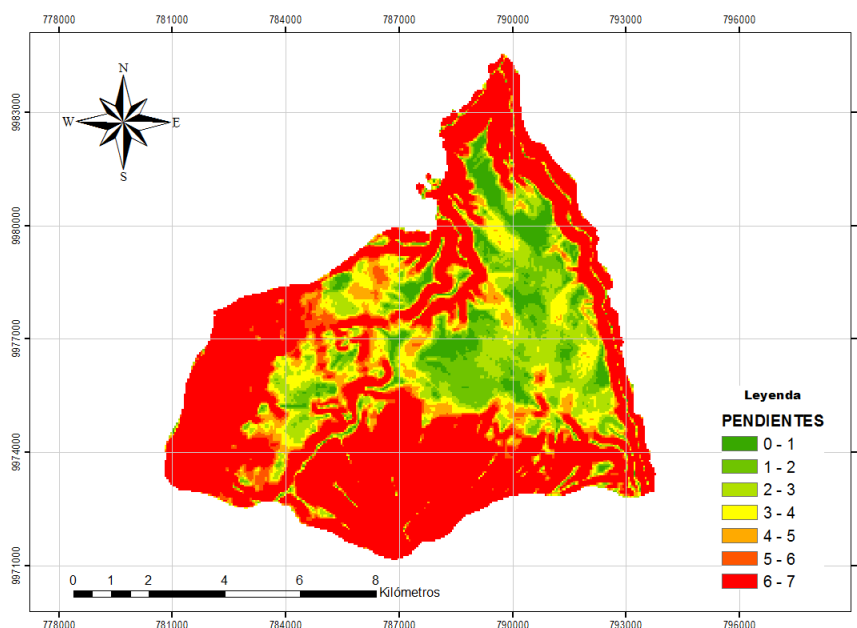


Figura 17. Mapa de pendientes correspondiente a la zona de estudio.

En la Tabla 13 se observa la clasificación del suelo de la zona de estudio con sus respectivas áreas y porcentajes. Los datos mostrados fueron obtenidos a través de ArcGis a partir del mapa de tipos de suelo, tal y como se muestra en la Figura 18. Se determinó que el tipo de suelo predominante en la zona es el suelo arenoso.

Tabla 13. Clasificación del tipo de suelo en la zona de estudio.

TIPO DE SUELO	ÁREA (km ²)	% ÁREA UTILIZADA
Arcillo arenoso	1.31	1.42
Arenosa (fina, media, gruesa)	2	2.17
Franco arcilloso arenoso	31.7	34.46
Franco arenoso	56.64	61.57
No aplicable	0.35	0.38
TOTAL	92	100

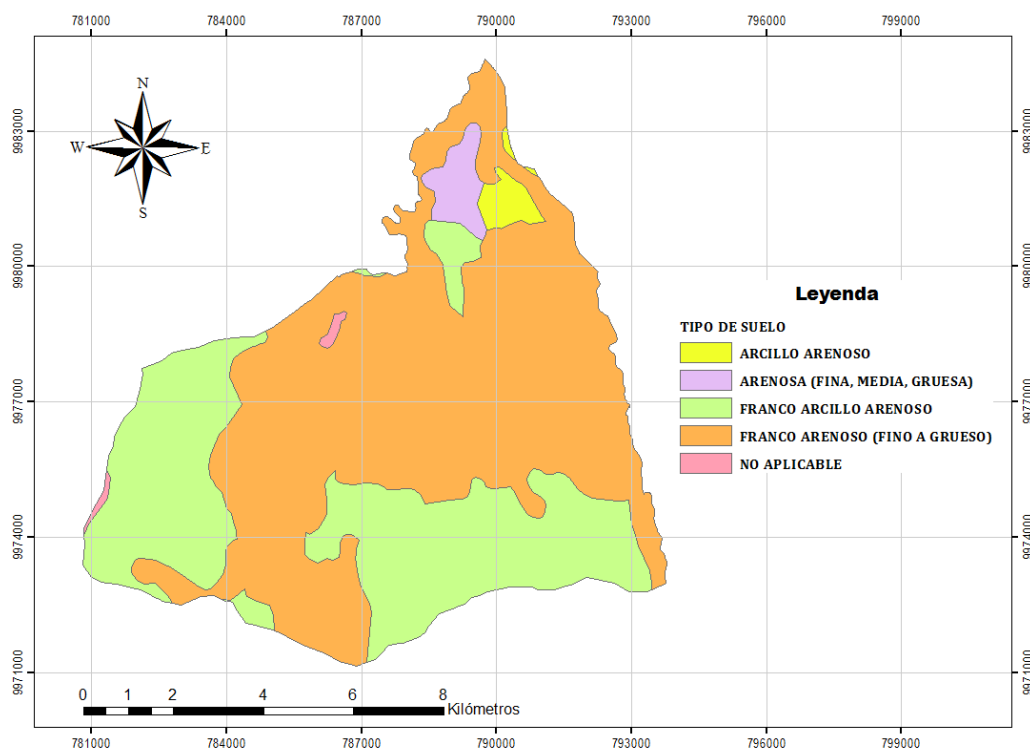


Figura 18. Mapa de tipos de suelo de la zona de estudio.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Separación de caudales

El procesamiento de los datos de caudal diario obtenidos de las estaciones hidrológicas Guayllabamba DJ Pisque (H0148) y San Pedro en Machachi (H0159), permitió obtener el caudal base a través de la aplicación de separación de caudales del programa HYSEP. Para esto fue necesario determinar previamente el área de drenaje de las sub-cuencas analizadas, las cuales se calcularon con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

La separación de caudales se realizó con la aplicación de los tres métodos que presenta el programa, intervalo fijo, intervalo de desplazamiento y mínimo local. Además, se aplicó el método BFI (Índice de caudal base) empleando los coeficientes que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 14. Caudales base y porcentajes de aporte de las aguas subterráneas respecto al caudal total de los ríos obtenidos de las sub-cuencas seleccionadas.

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ÁREA DE DRENAJE (km ²)	CAUDAL BASE (mm/año)	PORCENTAJE DE APOORTE
H0148	GUAYLLABAMBA DJ PISQUE	3891.22	284.72	75.5 %
H0159	SAN PEDRO EN MACHACHI	348.35	303.68	88.9%

En la Tabla 14 y en la Figura 19 se presentan los resultados de caudal base obtenidos para las sub-cuencas analizadas. Los resultados están expresados en mm/año. Para estimar la recarga de un acuífero con el uso del caudal base se deben tener en cuenta algunas consideraciones importantes: el sistema que se analiza está en equilibrio, por tanto el caudal base es igual al volumen de agua subterránea descargado y esta descarga es igual a la recarga [39].

Para la sub-cuenca de la estación H0148 se obtuvo un caudal base promedio de 284.72 mm/año el cual resulta menor si se lo compara con el caudal base promedio de 303.68 mm/año obtenido para la sub-cuenca de la estación H0159. Es decir, la sub-cuenca de la estación H0159 presenta una mayor recarga al acuífero en comparación con la sub-cuenca de la estación H0148.

El caudal base es un componente que se considera sumamente importante para la sostenibilidad de los ríos perennes y los acuíferos conectados hidráulicamente a estos ríos [40]. Por esta razón, los estudios relacionados a este tema han ido tomando cada vez más importancia.

En la Tabla 14 se observa que el aporte de las aguas subterráneas respecto al caudal total de los ríos es alto. Para la sub-cuenca de la estación H0148 se tiene un aporte de 75.5 %, mientras que para la sub-cuenca de la estación H0159 el aporte es de 88.9 %. Un estudio similar fue realizado en Colombia, para las cuencas del río Suratá y Río de Oro, localizados sobre la parte montañosa de la cuenca superior del río Lebrija [41] y que tiene una configuración similar a la del Valle Interandino. De este estudio se obtuvieron aportes de entre 78 y 82.2% para la sub-cuenca del río Suratá y entre 80.5 y 83.4% para el río de Oro [41].

Es importante mencionar que en la estación H0148, el año 2012 presenta datos de caudal diario cinco veces más altos que los otros años. Por tanto los datos del 2012 son considerados como datos anómalos, y por esta razón el caudal base resultante de ese año no ha sido tomado en cuenta en el resultado promedio de la estación.

Al analizar las razones por las cuales se pueden presentar estos datos anómalos, se sugiere que esto se debe posiblemente a los fenómenos de El Niño y la Niña que afectan el clima del Ecuador. El estudio de variabilidad climática realizado por Hidalgo (2017) arroja como resultado que, en presencia del fenómeno de El Niño la precipitación aumenta en la región costa, mientras que durante el fenómeno de La Niña, los eventos de precipitación tienden a aumentar notablemente en la región interandina [42].

En base a lo expuesto anteriormente, se realizó la revisión de la información de los eventos históricos de El Niño y la Niña registrados por el Servicio Nacional Meteorológico de los Estados Unidos (NWS por sus siglas en inglés) y se observó que en el año 2012 se presentó un fuerte evento de La Niña en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo [43] (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Se presume que este evento pudo desatar precipitaciones intensas en la región interandina de nuestro país. Lo cual a su vez, elevó enormemente el caudal del río monitoreado por la estación hidrológica H0148 y por ende dicha estación registró valores tan altos de caudal diario.

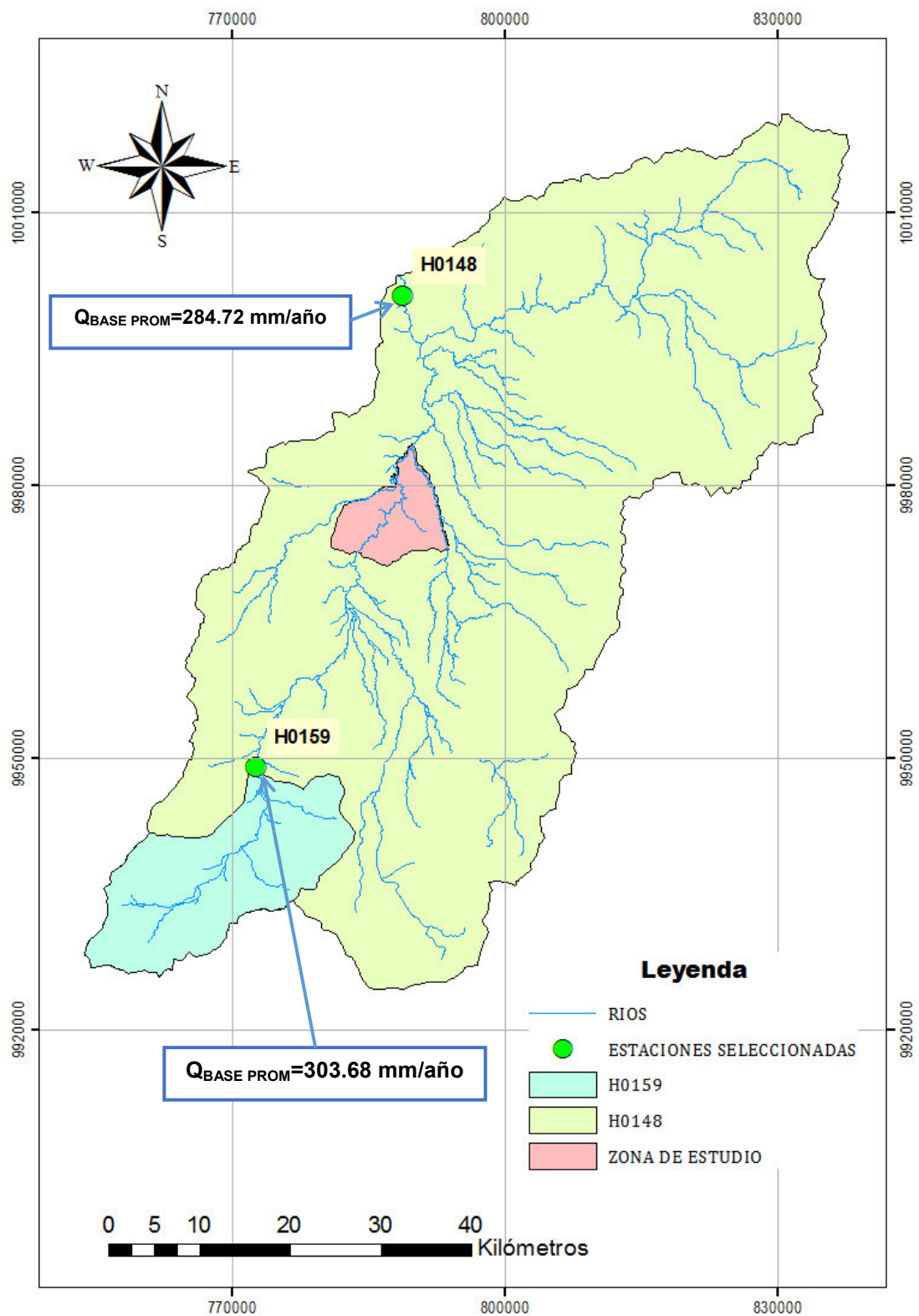


Figura 19. Resultados de caudal base obtenidos para las sub-cuencas analizadas.

3.2. Balance hídrico

Se realizó un balance hídrico superficial tomando en cuenta varios parámetros como la precipitación (variable de entrada), la evapotranspiración real, escurrimiento y la recarga del acuífero (variables de salida). Los datos analizados desde 1990 hasta 2013, corresponden a dos estaciones meteorológicas de las cuales se tenía disponibilidad de los parámetros necesarios para los cálculos.

El escurrimiento superficial, la evapotranspiración potencial y evapotranspiración real fueron calculados a partir de los datos disponibles y la aplicación de las ecuaciones presentadas en el capítulo 2 de este trabajo.

Para el cálculo del escurrimiento superficial fue necesario determinar los meses de época seca y época lluviosa. Para esto se tomó como referencia el estudio de Francou et. al [44], en el cual se determinó que los meses correspondientes a la época lluviosa son: enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. Mientras que los meses correspondientes a la época seca son junio, julio y agosto.

En los meses de septiembre y diciembre se observó un comportamiento variable. El mes de septiembre era lluvioso en algunos años y en otros se presentaba como un mes con precipitaciones bajas e incluso nulas. El mes de diciembre tiene un comportamiento similar a septiembre debido principalmente a que, al finalizar el año se presenta el denominado “veranillo”.

Para asignar coeficiente σ adecuado se realizó un análisis de precipitación de las dos estaciones tomando como referencia un mes seco y un mes lluvioso (abril y agosto respectivamente). Para la estación de La Tola (M002), en la Figura 20, se observa que en la mayoría de años del periodo de análisis, los meses de septiembre y diciembre se comportan como meses lluviosos debido a que presenta varios años con precipitaciones similares al mes de abril.

Para la estación de Iñaquito (M024), como se observa en la Figura 21, en la mayoría de años del periodo de análisis, los meses de septiembre y diciembre también se comportan como meses lluviosos al igual que en la estación La Tola (M002).

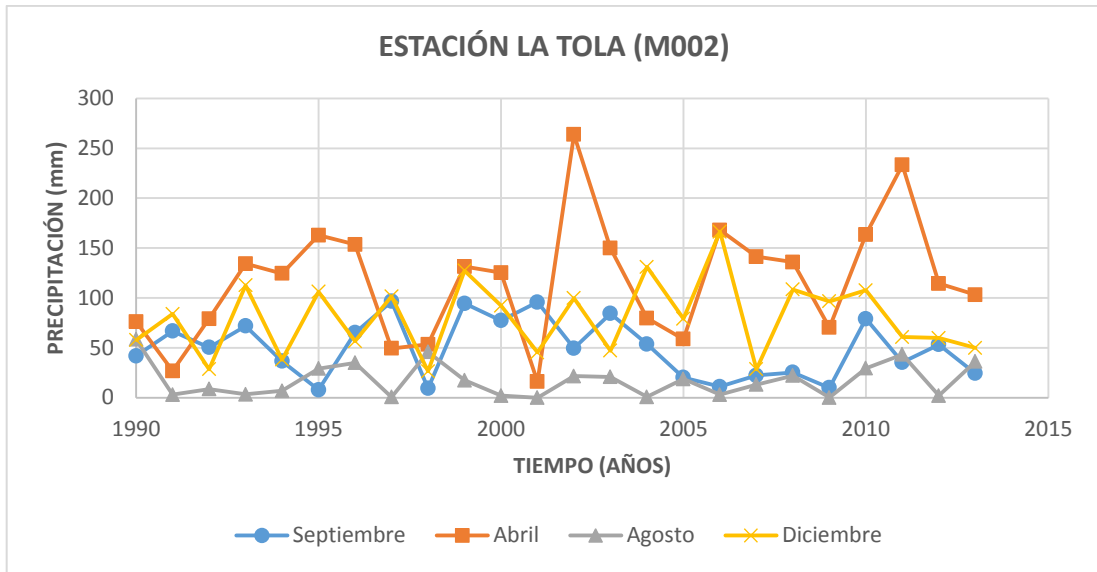


Figura 20. Análisis de precipitación de los meses de septiembre y diciembre para la estación La Tola (M002).

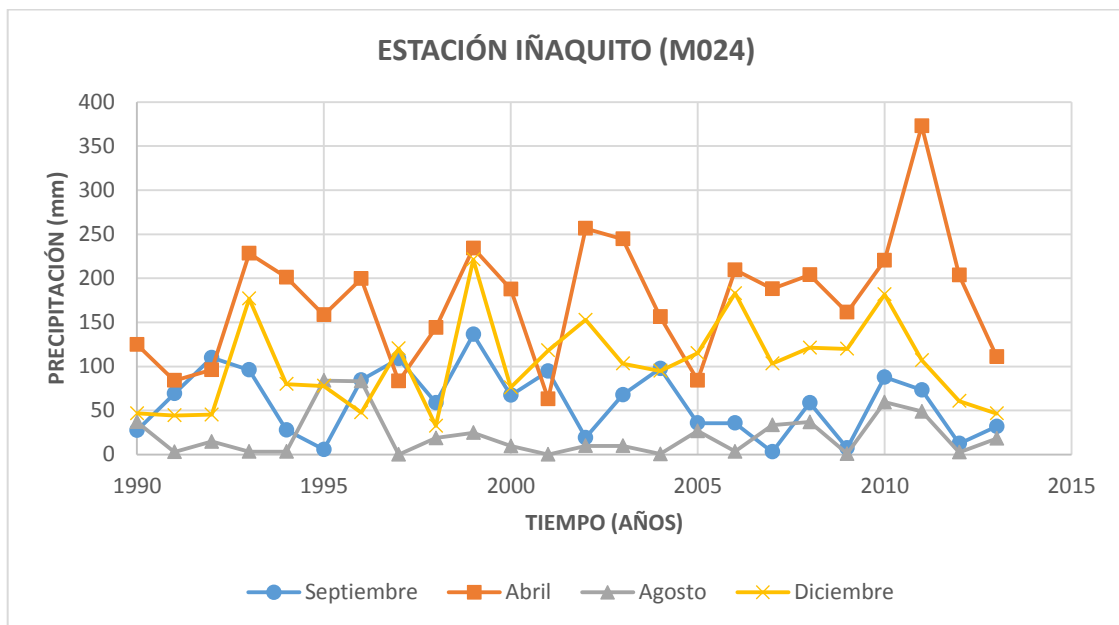


Figura 21. Análisis de precipitación de los meses de septiembre y diciembre para la estación Iñaquito (M024).

Las tablas de resultados obtenidos de escurrimiento superficial, evapotranspiración potencial y real de las dos estaciones meteorológicas analizadas, se pueden observar en los anexos del presente trabajo.

Tabla 15. Resultados de recarga obtenidos a partir del balance hídrico.

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	RECARGA (mm)
M002	LA TOLA	707.2
M024	IÑAQUITO	926.6

En la Tabla 15 se observan los resultados del balance hídrico realizado, obteniendo un valor de recarga de 707.2 mm en la estación La Tola (M002) y 926.6 mm en la estación de Iñaquito (M024). El volumen de agua que se presenta en los resultados corresponde al volumen de agua máximo disponible para recargar el acuífero, es decir, el agua que se puede infiltrar en el suelo y llegar a formar parte de los depósitos subterráneos. Sin embargo, no todo percolará.

La estación Iñaquito (M024) presenta una recarga mayor a la estación La Tola (M002), lo cual genera interés en los resultados debido a que esta estación se encuentra en una zona urbana. Es decir, el suelo se encuentra impermeabilizado a pesar de ello se obtuvo un valor de volumen de agua máximo disponible para la infiltración muy alto.

Una explicación a este resultado puede ser la existencia de otras fuentes extra que están aportando agua y de la cual no se tiene conocimiento. Además, se debe tomar en cuenta que en esta zona se tiene la presencia de parques y otras áreas verdes que pueden favorecer la entrada directa del recurso hídrico. Se tienen otras posibles fuentes como las pérdidas que se pueden generar en sistemas de agua potable y alcantarillado que también pueden aportar un volumen de agua para la recarga.

Por otro lado, el volumen máximo disponible obtenido con los datos de la estación La Tola (M002) puede estar relacionado a las actividades de riego de la zona. Como se observa en la Figura 16, la estación La Tola (M002) se encuentra ubicada exactamente en una zona agropecuaria, lo que también facilita la entrada del agua de precipitación al tener grandes áreas de suelo cubiertas por vegetación que facilita la infiltración. Además, existen otras fuentes antrópicas que también pueden aportar cantidades importantes de agua en la zona como por ejemplo, lavadoras de autos, riego de jardines, e incluso fugas de agua de sistemas de agua potable y alcantarillado.

Al realizar una comparación de los resultados del balance hídrico con los de caudal base obtenidos mediante HYSEP, se tiene un volumen de recarga mayor por parte del balance hídrico. Es muy importante resaltar que en el balance hídrico se toman en cuenta variables superficiales y como se observaron en los resultados obtenidos, pueden existir

fuentes antrópicas que aportan agua y de las cuales no se tiene conocimiento y por ende, aumentar el volumen de agua.

Mientras que por el método de separación de caudales se obtiene directamente el caudal base, que en un sistema en equilibrio, se considera que este corresponde a la recarga del acuífero de la zona de estudio. Además es importante mencionar que por este método se obtuvo un valor de recarga bastante aproximado a los resultados obtenidos en la investigación realizada por Manciatí [45] en la misma zona de estudio, con valores de recarga que oscilan entre 300 y 400 mm/año [32].

3.2 Conclusiones

La evapotranspiración calculada a partir de los datos disponibles en las estaciones meteorológicas seleccionadas, reflejaron que la zona correspondiente a la estación de La Tola (M002) presenta una ETP mayor a la zona de Ñaquito (M024). Estos resultados son coherentes debido a que el uso de suelo de La Tola (M002) es agropecuario y por tanto, la presencia de cultivos favorece la evapotranspiración. A diferencia de Ñaquito (M024), que corresponde a una zona impermeabilizada y sin vegetación, por tanto la evapotranspiración es inferior.

Con el método de separación de hidrogramas se logró obtener valores de recarga para las sub-cuencas de las dos estaciones hidrológicas analizadas. Para la sub-cuenca de la estación Guayllabamba DJ Pisque (H0148) se obtuvo una recarga de 284.72 mm/año mientras que para la sub-cuenca de la estación San Pedro en Machachi (H0159) la recarga obtenida fue de 303.68 mm/año. Por lo tanto, la sub-cuenca de la estación H0159 presenta una recarga mayor en comparación a la sub-cuenca de la estación H0148.

En cuanto al aporte de aguas subterráneas, se obtuvo que el río de la estación H0159 aporta con un 88.9% de agua, que resulta mayor en comparación al 75.5% de aporte obtenido para el río de la estación H0148.

Para la estimación del balance hídrico se calcularon algunos parámetros. En el caso del cálculo del escurrimiento superficial, se obtuvo que la zona correspondiente a la estación de Ñaquito (M024), presenta altos niveles de escurrimiento lo cual resulta coherente debido a la impermeabilización asfáltica de la ciudad. Por otro lado, la zona correspondiente a la estación de La Tola (M002) presenta un escurrimiento menor. Al ser un suelo agropecuario reduce el escurrimiento superficial debido a que el agua tiende a percolar a través del suelo.

A partir de la información de precipitación y los resultados de evapotranspiración y escurrimiento superficial se logró obtener un balance hídrico con la finalidad de determinar el volumen máximo de agua disponible para la recarga del acuífero de Tumbaco. La recarga obtenida con los datos correspondientes a la estación de Ñaquito (M024) resultó mayor a la obtenida con los datos de la estación de La Tola (M002). Estos resultados llamaron la atención y generaron preguntas sobre factores adicionales que pudieran intervenir en el balance hídrico. De esta manera se analizó la causa de estos resultados y se sugiere la existencia de fuentes de agua de origen antrópico u otras fuentes que posiblemente aumentan el nivel máximo de agua disponible que puede percolar hacia el acuífero.

3.3 Recomendaciones

Para la aplicación del método de separación de hidrogramas, es importante disponer de una base de datos de caudal diario, completa, y de un periodo histórico de datos mayor, incluyendo años recientes. De esta manera se pueden obtener resultados más precisos y actuales que favorecerán a la correcta gestión de los recursos hídricos subterráneos. Además, el análisis de fenómenos meteorológicos es importante para estudios de este tipo. De esta manera se puede explicar la existencia de datos anómalos que pueden generar resultados bastante alejados de la realidad.

Para la estimación de la recarga a través del balance hídrico se sugiere analizar a profundidad los factores externos que pueden alterar los resultados. Estos pueden ser: períodos con eventos de precipitación extrema, presencia de fuentes de agua desconocidas y áreas verdes que favorecen la entrada de agua al sistema.

La evapotranspiración y el escurrimiento superficial pueden ser calculados con métodos distintos a los que se aplicaron en este trabajo. Con esta variación se puede verificar si los resultados obtenidos son precisos o si presentan un alto grado de variabilidad. De esta manera, se podría analizar las posibles causas que interfieren en los cálculos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. C. Amanambu *et al.*, “Groundwater system and climate change: Present status and future considerations,” *J. Hydrol.*, vol. 589, p. 125163, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2020.125163.
- [2] L. M. Cerón *et al.*, “Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico,” *Inf. tecnológica*, vol. 32, no. 1, pp. 47–56, 2021, doi: 10.4067/S0718-07642021000100047.
- [3] M. Bruckmann, “La centralidad del agua en la disputa global por recursos estratégicos,” *América Lat. en Mov.*, vol. 473, no. 1, pp. 9–13, 2012, Accessed: Dec. 12, 2021. [Online]. Available: <http://alainet.org/active/39769>.
- [4] O. Quiroz, D. Martínez, and H. Massone, “Estimación de recarga de acuíferos en ambientes de llanura con base en variaciones de nivel freático,” *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 3, no. 2, pp. 123–130, 2012, Accessed: Nov. 23, 2021. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [5] M. V. Vélez and L. M. Vásquez, “Métodos para determinar la recarga en acuíferos,” *Av. en Recur. Hidráulicos*, no. 11, pp. 51–62, 2004, [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/93044>.
- [6] R. A. Sloto and M. Y. Crouse, “HYSEP: A COMPUTER PROGRAM FOR STREAMFLOW HYDROGRAPH SEPARATION AND ANALYSIS,” Lemoyne, Pennsylvania, pp. 54, 1996.
- [7] M. Saeteros, “Estimación de la tarifa del Agua de los acuíferos costeros para la gestión sostenible del recurso. Caso de estudio: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador,” Tesis previa a la obtención del título de Economista, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, pp. 200, 2014.
- [8] A. F. Andrade, “Recarga potencial del acuífero de la sub-cuenca del río Chambo bajo una perspectiva de la hidrología física,” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 200, 2020.
- [9] D. F. Campos, *Procesos del ciclo hidrológico*, 3rd ed., vol. 1. San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina, 1998.
- [10] L. E. Maderey and A. Jiménez, *Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo*

hidrológico, 1st ed. México: Editorial D.R., 2005.

- [11] J. J. Ordoñez, *Ciclo Hidrológico*, 1st ed. Lima, Perú: Fondo Peruano para el Agua, 2011.
- [12] J. Barco *et al.*, “Estimación de la evaporación en Colombia,” *Av. en Recur. Hidráulicos*, vol. 1, no. 07, pp. 43–51, Jan. 2000, [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/92231>.
- [13] F. Marini, M. Santamaría, P. Oricchio, C. M. Di Bella, and A. Basualdo, “Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS,” *Rev. Teledetec.*, vol. 2017, no. 48, pp. 29–41, 2017, doi: 10.4995/RAET.2017.6743.
- [14] A. I. Della Maggiora, ; J M Gardiol, ; A I Irigoyen, and L. Echarte, “ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA CON EL MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH EN BALCARCE,” *Rev. la Fac. Agron.*, vol. 17, no. 1, pp. 123–126, 1997, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/313835969_ESTIMACION_DE_LA_EVAPOTRANSPIRACION_DE_REFERENCIA_CON_EL_METODO_DE_PENMAN-MONTEITH_EN_BALCARCE.
- [15] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Evapotranspiración del cultivo*, vol. 1. Roma, Italia, 2006.
- [16] F. Jiménez and R. Hernández, “ESTUDIO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL EN HONDURAS,” Turrialba, Honduras, pp. 60, 1990.
- [17] C. B. Isikwue, O. M. Audu, and O. M. Isikwue, “Evaluation of Evapotranspiration using FAO Penman-Monteith Method in Kano Nigeria,” *Int. J. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 11, pp. 698–703, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/313904239_Estimacion_de_la_evapotranspiracion_de_referencia_por_el_metodo_de_Penman-Monteith_en_Balcarce.
- [18] J. Cai, Y. Liu, T. Lei, and L. S. Pereira, “Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 145, no. 1–2, pp. 22–35, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2007.04.012.
- [19] R. Healy, *Estimating Groundwater Recharge*. Reino Unido: Cambridge University Press, pp. 204, 2010.

- [20] I. Touhami, "Estimación del balance hídrico y de la recarga del acuífero Ventós-Castellar (SE, España). Efectos del cambio climático," Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, España, pp. 238, 2014.
- [21] J. Samper, L. Huguet, J. Ares, and M. A. García, "Modelos interactivos de balance hidrológico," in *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, R. Muñoz, A. Ritter, and C. Tascón, Eds. Tenerife: ICIA, 1999, pp. 187–193.
- [22] A. Freeze and J. Cherry, *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 604: Prentice-Hall, 1979.
- [23] M. P. Collazo and J. Montaña, *Manual de Agua Subterránea*, 1st ed. Montevideo, Uruguay, pp. 121: Denad Internacional S.A., 2012.
- [24] L. Guerrero, "Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación," Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México, pp. 181, 2016.
- [25] M. Sophocleous, "Groundwater," in *Groundwater*, vol. 1, L. Silveira and E. Usunoff, Eds. Lawrence, USA: Eolss Publishers/UNESCO, 2009.
- [26] J. J. De Vries and I. Simmers, "Groundwater recharge: an overview of processes and challenges," *Hydrogeol. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–17, 2002, doi: 10.1007/S10040-001-0171-7.
- [27] L. Del Moral, P. Arrojo, and T. Herrera, *El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada*. Zaragoza, España: Fundación Nueva Cultura del Agua, pp. 444, 2015.
- [28] R. Méndez, "Implementación de nuevas ecuaciones de separación de flujo base para la modelación del volumen de escorrentía al método de estimación de crecientes desarrollado por Coronado – Triana," Tesis de Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia, pp. 34, 2014.
- [29] K. R. Rushton and C. Ward, "The estimation of groundwater recharge," *J. Hydrol.*, vol. 41, no. 3, pp. 345–361, 1979, doi: 10.1016/0022-1694(79)90070-2.
- [30] P. Meyboom, "Estimating ground-water recharge from stream hydrographs," *J. Geophys. Res.*, vol. 66, no. 4, pp. 1203–1214, 1961, doi: 10.1029/JZ066I004P01203.
- [31] M. D. Melati, F. M. Fan, and G. B. Athayde, "Groundwater recharge study based on

- hydrological data and hydrological modelling in a South American volcanic aquifer,” *Comptes Rendus Geosci.*, vol. 351, no. 6, pp. 441–450, 2019, doi: 10.1016/J.CRTE.2019.06.001.
- [32] C. Manciatì, “Estudio de la Interacción Superficie-Subterránea del Sistema Acuífero Tumbaco Cumbayá en Ecuador, con un Enfoque Hidrodinámico y Geoquímico,” Tesis de Doctorado, Escuela de doctorado Sistemas Integrados en Biología, Agronomía, Geociencias, Hidrociencias y Medio Ambiente, Universidad Montpellier, Montpellier, Francia, pp. 385, 2014.
- [33] C. Valdospinos, F. Barragán, M. Martínez, C. Barragán, and V. Lucas, “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Gobierno Autónomo Descentralizado de Tumbaco,” Quito, Ecuador, pp. 326, 2020.
- [34] R. Villagómez, “EVOLUCIÓN GEOLÓGICA PLIO-CUATERNARIA DEL VALLE INTERANDINO CENTRAL EN ECUADOR (ZONA DE QUITOGUAYLLABAMBA-SAN ANTONIO),” Tesis de Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería en Geología, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pp. 111, 2003.
- [35] P. Pourrut, *Los climas del Ecuador*, 1st ed. Quito, Ecuador: Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica (CEDIG), pp. 41, 1983.
- [36] J. Pouget (2007), “AguAndes,” *IRD - G-EAU*. [Online]. Available: <http://www.aguandes.org/>.
- [37] R. J. Nathan and T. A. McMahon, “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses,” *Water Resour. Res.*, vol. 26, no. 7, pp. 1465–1473, Jul. 1990, doi: 10.1029/WR026I007P01465.
- [38] K. Eckhardt, “How to construct recursive digital filters for baseflow separation,” *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 2, pp. 507–515, Feb. 2005, doi: 10.1002/HYP.5675.
- [39] A. Mamani, “ESTIMACIÓN DE CAUDAL BASE EN RÍOS MEDIANTE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO, CASO ESTUDIO MICROCUENCA DEL RÍO CHUMPE YAULI-JUNIN,” Tesis de Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, pp. 90, 2017.
- [40] IAEA, “Groundwater and baseflow studies in the Quequen River Basin, Argentina, applying isotopic and hydrogeochemical techniques.” [Online]. Available: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/working_materials/Working mat CRP F33015 Baseflow 2013.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/working_materials/Working_mat_CRP_F33015_Baseflow_2013.pdf).

- [41] S. Gómez-Isidro and V. L. Gómez-Ríos, “Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá’s river and Oro’s river (Santander, Colombia),” *DYNA*, vol. 83, no. 196, pp. 213–222, Apr. 2016, doi: 10.15446/DYNA.V83N196.53222.
- [42] M. Hidalgo-Proaño, “Variabilidad Climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS,” *CienciAmérica*, vol. 6, no. 2, pp. 42–47, Jul. 2017, [Online]. Available: <http://201.159.222.118/openjournal/index.php/uti/article/view/82>.
- [43] National Weather Service, “Cold & Warm Episodes by Season.” [Online]. Available: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- [44] B. Francou, M. Vuille, V. Favier, and B. Cáceres, “New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28’S,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 109, no. D18, pp. 1–17, Sep. 2004, doi: 10.1029/2003JD004484.
- [45] C. Manciatì, J. D. Taupin, N. Patris, C. Leduc, and C. Casiot, “Diverging Water Ages Inferred From Hydrodynamics, Hydrochemical and Isotopic Tracers in a Tropical Andean Volcano-Sedimentary Confined Aquifer System,” *Front. Water*, vol. 3, Jul. 2021, doi: 10.3389/FRWA.2021.597641.

5 ANEXOS

ANEXO I. Resultados de Escurrimiento Superficial

Tabla. Resultados de escurrimiento superficial obtenidos para la estación La Tola (M002)

ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (mm)													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
1990	4.68	10.32	11.37	11.43	6.45	2.16	0.92	5.96	4.27	33.18	2.64	8.67	102.05
1991	12.54	2.90	17.15	4.01	16.88	4.22	3.29	0.31	6.81	11.00	23.51	12.59	115.18
1992	5.39	9.86	10.98	11.87	6.06	0.52	0.35	0.88	5.14	10.89	13.55	4.29	79.76
1993	12.66	23.30	19.65	20.13	10.59	0.60	0.53	0.34	7.32	11.82	20.81	16.89	144.63
1994	20.97	19.53	24.60	18.66	8.21	0.10	0.10	0.69	3.73	7.92	17.94	5.73	128.19
1995	0.74	4.77	24.20	24.42	15.00	2.82	2.21	2.97	0.80	22.77	30.11	15.93	146.72
1996	11.60	15.87	21.95	23.03	19.67	10.09	2.05	3.57	6.64	23.93	7.04	8.49	153.90
1997	20.25	1.64	26.12	7.41	12.12	4.02	0.56	0.06	9.84	19.08	21.06	15.24	137.39
1998	11.58	7.73	12.96	8.01	15.80	1.55	2.15	4.67	0.95	16.07	17.00	3.98	102.43
1999	8.57	13.52	19.85	19.70	5.06	1.81	0.06	1.77	9.64	15.89	9.51	19.10	124.45
2000	19.43	21.83	19.25	18.80	21.71	5.69	3.61	0.21	7.88	10.11	8.90	13.85	151.25
2001	8.33	9.09	15.00	2.42	5.27	1.38	2.55	0.00	9.76	5.19	16.49	6.81	82.27
2002	6.71	5.54	19.44	39.57	7.46	3.73	1.18	2.21	5.06	11.99	14.70	14.96	132.53
2003	6.02	10.34	8.75	22.47	2.25	3.26	1.05	2.12	8.60	12.80	21.95	7.07	106.65
2004	12.35	4.10	12.93	11.96	7.11	0.35	0.45	0.07	5.49	15.81	26.69	19.65	116.93
2005	7.92	14.66	11.39	8.81	6.60	2.97	0.93	1.92	2.06	13.05	12.60	11.85	94.74
2006	6.36	11.22	31.77	25.20	4.64	4.65	0.47	0.31	1.12	15.20	22.95	24.96	148.84
2007	10.38	6.38	23.34	21.20	7.61	2.01	0.37	1.34	2.27	21.51	27.77	4.29	128.45
2008	12.96	22.23	29.79	20.39	19.76	6.14	0.24	2.25	2.59	28.01	11.07	16.26	171.69
2009	15.21	7.28	22.94	10.55	6.93	3.03	1.52	0.01	1.01	18.23	8.25	14.49	109.43
2010	2.39	12.45	1.82	24.51	15.06	4.15	7.10	3.01	8.07	9.96	25.56	16.14	130.21
2011	5.22	23.84	17.51	34.98	9.21	1.99	4.75	4.42	3.62	11.67	7.97	9.12	134.28
2012	11.54	8.97	14.27	17.16	2.45	0.84	0.15	0.20	5.44	10.53	35.39	8.97	115.89
2013	2.67	23.97	10.97	15.47	14.28	0.03	0.46	3.70	2.49	11.69	7.74	7.47	100.93

Tabla. Resultados de escurrimiento superficial obtenidos para la estación Iñaquito (M024)

ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL (mm)													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
1990	6.99	22.53	11.96	18.72	2.96	2.15	1.57	3.78	2.78	37.02	5.99	7.02	123.47
1991	14.51	7.29	34.94	12.60	15.74	3.06	1.64	0.30	7.04	5.58	20.24	6.65	129.56
1992	7.70	10.31	15.75	14.42	8.81	1.46	1.83	1.50	11.21	11.75	16.11	6.78	107.60
1993	16.71	32.90	35.28	34.22	14.19	1.30	0.84	0.34	9.79	10.80	19.28	26.55	202.18
1994	29.01	16.83	36.66	30.17	15.48	0.09	0.30	0.35	2.85	13.53	28.02	11.99	185.26
1995	2.24	12.78	17.81	23.76	23.31	9.95	4.34	8.56	0.58	22.91	34.86	11.67	172.74
1996	21.98	20.75	27.27	29.91	28.41	3.79	2.96	8.49	8.62	25.41	2.16	7.16	186.89
1997	21.14	1.98	25.16	12.48	9.89	6.00	0.00	0.00	11.08	22.91	32.88	18.05	161.54
1998	8.72	12.98	19.13	21.59	29.09	1.48	3.28	1.92	6.00	15.54	20.79	4.89	145.38
1999	12.24	35.58	27.80	35.12	10.52	12.91	2.56	2.53	13.90	13.07	15.15	33.18	214.55
2000	26.60	24.87	22.43	28.14	18.57	6.77	2.25	0.99	6.86	6.57	2.51	11.42	157.97
2001	12.62	9.59	27.96	9.47	13.32	0.87	3.57	0.00	9.65	1.40	17.04	17.72	123.18
2002	5.49	8.87	18.47	38.49	19.97	3.80	0.84	1.00	1.96	21.69	14.25	22.94	157.75
2003	3.81	11.87	15.14	36.69	4.31	5.52	1.60	1.00	6.92	17.66	23.91	15.48	143.88
2004	8.40	5.16	11.28	23.45	17.07	1.12	0.68	0.06	9.96	14.82	18.83	14.22	125.04
2005	5.69	22.59	20.15	12.63	5.66	3.24	5.45	2.73	3.63	17.40	8.76	17.27	125.19
2006	7.85	15.78	30.38	31.43	17.04	5.12	0.32	0.36	3.63	16.43	27.36	27.45	183.12
2007	9.93	10.13	26.58	28.22	15.15	2.26	1.28	3.41	0.31	24.02	29.21	15.48	165.95
2008	23.48	32.76	28.32	30.57	25.70	5.76	1.25	3.77	5.99	35.30	10.86	18.18	221.93
2009	24.87	21.23	26.07	24.20	9.41	3.57	0.27	0.10	0.75	10.41	10.70	18.00	149.56
2010	0.69	6.90	3.98	33.06	9.41	3.52	9.55	6.06	8.96	7.77	25.14	27.26	142.28
2011	12.36	27.38	21.87	55.94	8.28	2.91	11.95	4.99	7.48	8.22	9.86	16.05	187.27
2012	23.84	18.80	21.57	30.51	6.03	2.18	0.18	0.27	1.28	20.07	26.55	9.12	160.39
2013	6.45	29.46	12.47	16.65	17.31	0.03	0.01	1.86	3.24	21.26	7.20	6.99	122.92

ANEXO II. Resultados de Evapotranspiración Real

Tabla. Resultados de evapotranspiración real obtenidos para la estación La Tola (M002)

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)												
AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1990	2.249	1.9305	2.1125	2.015	2.037	2.696	2.704	3.272	2.681	2.0085	2.21	2.1515
1991	2.249	2.353	2.0605	2.015	2.023	2.512	2.672	3.304	2.541	2.327	1.911	2.145
1992	2.3465	2.3335	2.1255	1.9565	1.946	2.744	3.224	3.088	2.345	2.2555	2.1905	2.1515
1993	2.093	2.0085	1.8265	1.9045	2.03	2.816	2.72	3.192	2.268	2.2425	1.9695	1.95
1994	2.0475	2.015	1.8525	1.8395	1.925	2.48	2.984	2.936	2.681	2.275	1.963	1.976
1995	2.2295	2.4505	2.093	1.9825	2.107	2.344	2.448	2.68	2.569	2.0865	1.8525	1.9175
1996	1.794	1.755	1.846	1.9045	1.967	2.224	2.68	2.8	2.541	2.0215	2.3205	2.275
1997	1.9695	1.989	2.015	1.9435	2.044	2.344	3.208	3.352	2.464	2.197	1.807	2.054
1998	2.184	2.015	1.8785	1.807	2.016	2.328	2.488	2.672	2.471	2.1515	2.093	2.145
1999	1.8005	1.768	1.911	1.8525	1.911	2.056	2.784	2.752	1.953	2.002	1.963	1.6575
2000	1.82	1.8525	1.8005	1.7485	1.722	2.184	2.528	2.664	2.023	2.3465	2.0865	1.9955
2001	1.8265	2.184	1.8395	1.9695	1.89	2.784	2.576	3.256	2.233	2.4765	1.9435	1.9695
2002	2.1775	2.0085	1.8915	1.8525	2.191	2.664	2.736	3.088	2.611	2.0345	1.8785	1.9175
2003	2.2425	2.21	1.9825	1.9955	2.058	2.24	2.912	3.216	2.569	2.0475	2.0085	1.95
2004	2.34	2.028	2.145	1.911	2.093	2.984	2.456	3.384	2.359	2.0085	1.9825	1.9695
2005	2.041	2.106	1.651	1.872	2.1	2.52	2.92	2.984	2.702	1.859	2.0085	1.716
2006	1.8265	1.989	1.872	1.8655	2.1	2.6	3.008	3.056	2.478	2.158	1.859	1.9045
2007	2.171	2.314	1.898	1.6965	1.96	2.408	2.92	2.808	2.744	1.9565	1.9565	1.7095
2008	1.885	1.794	1.703	1.755	1.855	2.288	2.4	2.264	2.261	1.8915	1.8525	1.8915
2009	1.651	1.8005	2.002	1.9045	2.009	2.432	2.784	2.88	2.947	2.197	2.1255	2.0345
2010	2.288	2.1645	2.0215	1.859	2.016	2.232	2.216	2.64	2.142	2.132	1.703	1.6835
2011	1.9825	1.8395	1.859	1.69	1.897	2.064	2.36	2.816	2.359	1.9305	1.9825	1.807
2012	1.677	1.69	1.9175	1.729	2.044	2.6	2.864	3.072	2.919	2.028	1.8915	1.9695
2013	2.2685	1.7875	1.9955	1.9695	1.778	2.52	2.704	2.696	2.387	2.0995	2.0605	2.0605

Tabla. Resultados de evapotranspiración real obtenidos para la estación Iñaquito (M024)

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)												
AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1990	1.416	1.148	1.316	1.24	1.18	1.304	1.344	1.576	1.576	1.228	1.304	1.272
1991	1.32	1.4	1.204	1.256	1.144	1.26	1.26	1.484	1.388	1.356	1.152	1.256
1992	1.36	1.524	1.272	1.204	1.1	1.32	1.448	1.456	1.348	1.396	1.296	1.28
1993	1.256	1.172	1.136	1.204	1.108	1.368	1.348	1.54	1.36	1.336	1.132	1.192
1994	1.16	1.188	1.14	1.132	1.088	1.268	1.388	1.492	1.488	1.264	1.148	1.152
1995	1.312	1.42	1.28	1.176	1.108	1.196	1.24	1.388	1.432	1.28	1.16	1.212
1996	1.064	1.116	1.112	1.12	1.144	1.084	1.284	1.58	1.444	1.252	1.428	1.296
1997	1.192	1.28	1.132	1.2	1.172	1.096	1.508	1.552	1.328	1.32	1.056	1.28
1998	1.276	1.248	1.22	1.156	1.112	1.212	1.18	1.296	1.344	1.276	1.24	1.304
1999	1.088	1.024	0.904	1.16	1.048	0.98	1.248	1.368	1.16	1.212	1.236	1.06
2000	1.144	1.136	1.112	1.068	0.952	1.108	1.192	1.252	1.172	1.432	1.296	1.188
2001	1.176	1.276	1.1	1.156	1.02	1.184	1.208	1.324	1.228	1.508	1.192	1.22
2002	1.308	1.224	1.152	1.108	1.108	1.18	1.352	1.544	1.436	1.288	1.188	1.168
2003	1.336	1.332	1.2	1.256	1.212	1.08	1.32	1.428	1.396	1.26	1.216	1.128
2004	1.38	1.288	1.288	1.148	1.172	1.336	1.192	1.572	1.384	1.276	1.172	1.216
2005	1.248	1.272	1.112	1.172	1.244	1.232	1.44	1.476	1.536	1.16	1.244	1.056
2006	1.072	1.16	1.12	1.084	1.22	1.168	1.352	1.408	1.432	1.336	1.1	1.14
2007	1.324	1.384	1.248	1.088	1.132	1.144	1.304	1.248	1.436	1.184	1.228	1.028
2008	1.144	1.076	1.032	1.236	1.048	1.16	1.172	1.192	1.328	1.22	1.128	1.144
2009	1.072	1.108	1.212	1.204	1.196	1.176	1.336	1.392	1.632	1.316	1.304	1.292
2010	1.436	1.36	1.344	1.144	1.196	1.052	1.12	1.248	1.264	1.26	0.956	0.9
2011	1.188	1.08	1.104	0.988	1.128	1.092	1.124	1.376	1.344	1.204	1.224	1.12
2012	1.012	0.992	1.188	1	1.104	1.252	1.348	1.432	1.596	1.256	0.984	0.964
2013	1.328	1.076	1.232	1.176	1.028	1.232	1.276	1.316	1.392	1.2	1.148	1.212