



# | POSGRADOS |

## MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

### OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON  
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN  
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

### TEMA:

"ESTIMACIÓN DE LA RECARGA Y DESCARGA  
DEL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
UNA ZONA ALTOANDINA AL SUR DEL  
ECUADOR"

### AUTOR:

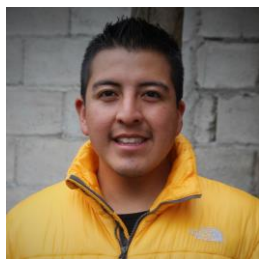
CARLOS IVÁN CRIOLLO GUALPA

### DIRECTOR:

CHRISTIAN GONZALO DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ

CUENCA – ECUADOR

2023

**Autor:****Carlos Iván Criollo Gualpa**

Ingeniero Ambiental.

Candidato a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

cicriollo@hotmail.com

**Dirigido por:****Christian Gonzalo Domínguez González**

Ingeniero Civil.

Docteur Specialite Geosciences Ressources Naturelles Et Environnement.

cdominguez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

CARLOS IVÁN CRIOLLO GUALLPA

"Estimación de la recarga y descarga del sistema de aguas subterráneas en una zona altoandina al sur del Ecuador"

## ***DEDICATORIA***

Dedico el presente trabajo a mis queridos hijos Karla Gissell y Christopher Dael, como también a mi esposa Melva Loja por todo su paciencia, comprensión y apoyo incondicional brindado durante todo este tiempo para cumplir con esta meta.

A mis queridos padres y familiares por sus consejos y por siempre estar siempre pendientes motivándome a seguir en adelante.

Carlos Criollo G.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y personas:

Al Dr. Christian Domínguez González, docente tutor de la presente investigación, por impartirme sus conocimientos y experiencias durante el desarrollo de esta tesis.

A la empresa DPMECUADOR S.A., en nombre del Ing. Alan Scott Campbell Gerente General, por el apoyo económico, por brindarme todas las facilidades y permitirme acceder a la información requerida para la elaboración del presente trabajo; además mi fraterno agradecimiento al Ing. Guillermo Salgado Director de Sostenibilidad y de manera especial al Ing. Vicente Jaramillo O., Gerente de Ambiente que con su guía constante me ha motivado cumplir con este objetivo.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) y el Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca por proporcionarme información climática requerida.

Carlos Criollo G.

# TABLA DE CONTENIDO

Resumen .....	12
Abstract .....	13
CAPITULO 1.....	14
1.1. Introducción.....	14
1.2. Antecedentes .....	15
1.3. Determinación del Problema .....	16
1.4. Objetivo general.....	19
1.5. Alcance .....	19
CAPITULO 2.....	20
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	20
3.2. Suelos .....	21
3.3. Vegetación .....	23
3.4. Geología .....	26
3.5. Geomorfología .....	27
3.6. Clima .....	29
3.7. Hidrología.....	34
3.8. Hidrogeología.....	42
CAPITULO 3.....	50
3.1. Área de estudio.....	50
3.2. Acceso a la información .....	50
3.3. Instrumentación y adquisición de datos.....	50
3.4. Tratamiento de datos .....	56
3.5. Metodología.....	59
3.6. Balance Hídrico .....	68
3.7. Implementación del modelo.....	68
CAPITULO 4.....	78
4.1. Resultados de clima .....	78
4.2. Resultados del modelo WTRF .....	83
4.3. Comparación entre los diferentes modelos de recesión.....	106
4.4. Comparación de la metodología WTRF con otros métodos.....	108

4.5. Balance hídrico.....	110
CAPITULO 5.....	118
Referencias .....	121

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros generales de la zona de estudio. ....	37
<b>Tabla 2.</b> Parámetros de forma de la zona de estudio. ....	37
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de relieve de la zona de estudio .....	38
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de drenaje de la zona de estudio.....	39
<b>Tabla 5.</b> Especificaciones de los niveles de agua de los piezómetros pocos profundos y profundos. ....	46
<b>Tabla 6.</b> Especificaciones de la ubicación (profundidad) de cada uno de los transductores por piezómetro.....	54
<b>Tabla 7.</b> Especificaciones de la ubicación (profundidad) de los transductores por piezómetro. ....	56
<b>Tabla 8.</b> Valores generales de rendimiento específico ( $S_y$ ) para diferentes texturas de suelo determinados por distintos estudios.....	71
<b>Tabla 9.</b> Parámetros calibrados y asumidos de acuerdo a la aplicación de los modelos de recesión. ....	72
<b>Tabla 10.</b> Rango de valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe. ....	74
<b>Tabla 11.</b> Rangos de evaluación de desempeño según la métrica PBIAS .....	75
<b>Tabla 12.</b> Valores promedios anuales de las diferentes variables meteorológicas.....	79
<b>Tabla 13.</b> Precipitación de los datos obtenidos de las estaciones Quimsacocha 1 y D1. ....	81
<b>Tabla 14.</b> Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS del modelo WTFR sin recesión. ....	84
<b>Tabla 15.</b> Parámetros óptimos del modelo WTFR sin recesión. ....	85
<b>Tabla 16.</b> Valores de recarga (cambio de almacenamiento de nivel de agua) en la zona de estudio.....	92

<b>Tabla 17.</b> Criterios de calibración y validación de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con Recesión Natural ( $R_N$ ).....	94
<b>Tabla 18.</b> Parámetros óptimos de calibración y validación obtenidos a partir del modelo $R_N$ . .....	95
<b>Tabla 19.</b> Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con recesión dinámica. ....	100
<b>Tabla 20.</b> Parámetros óptimos de calibración y validación obtenidos a partir del modelo $R_D$ . .....	100
<b>Tabla 21.</b> Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con recesión de Leakeance.....	104
<b>Tabla 22.</b> Parámetros óptimos de calibración y validación del sistema superior (piezómetro LLDHG-10A) e inferior (piezómetro LLDHG-008) obtenido a partir del modelo de recesión de Leakeance. ....	104
<b>Tabla 23.</b> Comparación de los valores obtenidos del criterio de Nash-Sutcliffe, RMSE y PBIAS en el periodo de calibración y validación.....	107
<b>Tabla 24.</b> Comparación de los parámetros óptimos de calibración entre los 3 modelos de recesión para los 6 piezómetros de estudio. ....	108
<b>Tabla 25.</b> Balance hídrico con el modelo WTFR (Recesión Natural y Dinámica) para los piezómetros LLDGT-005 y LLDHG-007.....	115

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación de la zona de estudio (proyecto Loma Larga), ubicado en la cordillera de los Andes al Sur del Ecuador. ....	21
<b>Figura 2.</b> Taxonomía de los suelos en la zona de estudio. ....	23
<b>Figura 3.</b> Conflicto de uso de suelo en la zona de estudio.....	25
<b>Figura 4.</b> Geología en la zona de estudio. ....	27
<b>Figura 5.</b> Geomorfología en la zona de estudio. ....	29
<b>Figura 6.</b> Temperatura diaria durante el periodo 2018-2021. ....	31
<b>Figura 7.</b> Precipitación diaria durante el periodo 2018-2021 .....	31

<b>Figura 8.</b> Velocidad y dirección de viento anual durante el periodo 2018-2021. Estación meteorológica Quimsacocha 1.....	32
<b>Figura 9.</b> Radiación solar diaria durante el periodo 2018-2021.....	33
<b>Figura 10.</b> Humedad relativa diaria durante el periodo 2018-2021. ....	34
<b>Figura 11.</b> Ubicación de la zona de estudio en la parte alta de la microcuenca del Río Irquis. La zona de estudio cubre un área de 6.88 km <sup>2</sup> y la microcuenca del Río Irquis 44.97 km <sup>2</sup> .....	36
<b>Figura 12.</b> Curva Hipsométrica y polígono de frecuencias de la zona de estudio. ....	38
<b>Figura 13.</b> Número de orden de los cursos de agua de la zona de estudio. ....	40
<b>Figura 14.</b> Precipitación y caudal diario de la estación MA2 ubicado a la salida de la zona de estudio. ....	41
<b>Figura 15.</b> Sistema conceptual de aguas subterráneas de la zona de estudio. ....	43
<b>Figura 16.</b> Curvas de isopropundidad del nivel freático en la zona de estudio. ....	45
<b>Figura 17.</b> Sistema conceptual de aguas subterráneas poco profundas (zona de Páramo) y de roca profunda de la zona de estudio. ....	49
<b>Figura 18.</b> Ubicación de estaciones meteorológicas locales. La distancia entre la Estación Quimsacocha 1 (zona de estudio) y la estación meteorológica del Observatorio Zhurucay de iDRHICA de la Universidad de Cuenca es de 2.88 Km, mientras que la estación pluviométrica D1 se encuentra dentro de la zona de estudio, misma que manejada por el PROMAS de la Universidad de Cuenca. ....	51
<b>Figura 19.</b> Detalles de los piezómetros de cuerda vibrante.....	53
<b>Figura 20.</b> Detalles de los piezómetros de tubo abierto. ....	55
<b>Figura 21.</b> La información hidrogeológica y meteorológica disponible que fue utilizada en el análisis se representan mediante barras horizontales continuas; los vacíos en las barras representan los periodos que faltan datos observados. ....	57
<b>Figura 22.</b> Información climatológica existente (periodo 2018-2021) ....	58
<b>Figura 23.</b> Esquema de interpretación del método WFR acoplado al sistema de aguas subterráneas superior (sistema poco profundo) e inferior (sistema profundo).....	61



**Figura 24.** Interpretación de los diferentes procesos que comprende desde la recarga del nivel freático (Variación del nivel de agua) y su posterior redistribución hasta llegar a la descarga (modelos de recesión). Dónde h: altura del nivel freático, P: precipitación, ETr: Evapotranspiración real,  $\beta$ : Eficiencia de infiltración, DM: módulo de descarga,  $\alpha$ : tasa de infiltración,  $S_y$ : rendimiento específico, R: recarga de aguas subterráneas,  $\Delta H$ : cambio de altura del nivel freático, RN: recesión Natural, RD: Recesión Dinámica, RL: recesión de Leakeance y Q: Caudal (descarga). Adaptado de (Bastidas, 2019)..... 69

Figura 25. Diagrama de dispersión de datos diarios de lluvia observados entre el Pluviómetro D1 y el Pluviómetro Quimsacocha 1..... 80

**Figura 26.** Hietograma diario de precipitación durante el periodo 2018-2021..... 81

**Figura 27.** Serie diaria de evapotranspiración real (ETr) y de referencia (ETo), para la zona de estudio durante el periodo 2018-2021. .... 82

**Figura 28.** Variabilidad temporal de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDGT-005 (a, a1), LLDGT-007 (b, b1), LLDHG-008 (c, c1), LLDHG-011 (d, d1) y LLDHG-012 (e, e1), durante el periodo 2018-2021, sin recesión. Los gráficos a, b, c, d y e corresponde al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1, b1, c1, d1 y e1 corresponde al periodo validado. .... 86

**Figura 29.** Coeficiente de dependencia lineal entre los datos de los niveles freáticos observados y simulados en base al ajuste del criterio de NSE sin recesión en todos los piezómetros, para los periodos de calibración y validación. a): piezómetro LLDGT-005, b): piezómetro LLDGT-007, c): piezómetro LLDHG-008, d): piezómetro LLDHG-011 y e): piezómetro LLDHG-012. .... 88

**Figura 30.** Variabilidad temporal de la precipitación y la estimación de la recarga (cambio de almacenamiento de agua) de los piezómetros LLDGT-005 (a), LLDGT-007 (b), LLDHG-008 (c), LLDHG-011 (d) y LLDHG-012 (e), durante el periodo 2018-2021..... 90

**Figura 31.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDGT-005 (a, a1), LLDGT-007 (b, b1), LLDHG-008 (c, c1), LLDHG-011 (d, d1) y LLDHG-012 (e, e1), durante el periodo 2018-2021. Los gráficos a, b, c, d y e corresponde al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1, b1, c1, d1 y e1 corresponde al periodo validado..... 96

**Figura 32.** Gráficos de dispersión entre los niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a), LLDHG-007 (b), LLDHG-008 (c), LLDHG-011 (d) y LLDHG-012 (e), durante el periodo 2018-2021. .... 98

**Figura 33.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a, a1) y LLDHG-007 (b, b1). Los gráficos a y b corresponden al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1 y b1 corresponden al periodo validado durante el periodo 2018-2021..... 101

**Figura 34.** Gráficos de dispersión entre los niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a) y LLDHG-007 (b), durante el periodo 2018-2021. .... 102

**Figura 35.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-10A (sistema superior) y LLDHG-008 (sistema inferior). El gráfico a corresponde al periodo de calibración, mientras que el gráfico a1 corresponde al periodo validado, durante el periodo 2018-2021. .... 105

**Figura 36.** Evaluación de la constante de recesión del flujo base y los resultados del filtro de flujo base, basados en las series diarias de caudales de la estación MA2 en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante 731 días (periodo 2019-2020)... 111

**Figura 37.** Resultados del filtro de subflujo para la serie diaria del caudal de la estación MA2, ubicado en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante el periodo 2019-2020. .... 113

**Figura 38.** Comparación en porcentaje del filtro de subflujo obtenido a partir de la serie diaria del caudal de la estación MA2, ubicado en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante el periodo 2019-2020. .... 114

**Figura 39.** Balance hídrico con modelo de recesión natural de los pozos piezométricos LLDGT-005 y LLDHG-007, que se encuentran ubicados dentro de la zona de estudio durante los años 2019 y 2020, donde se utiliza los siguientes parámetros: Precipitación, ETr, ES, Recesión natural y el Módulo de descarga (DM). .... 116

**Figura 40.** Comparación entre los flujos de agua obtenidos a partir del modelo WETSPRO y el WTFR (modelo de recesión natural), en el pozo piezométrico LLDGT-005, durante los años 2019 y 2020. .... 117

# ESTIMACIÓN DE LA RECARGA Y DESCARGA DEL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UNA ZONA ALTOANDINA AL SUR DEL ECUADOR

AUTOR:

CARLOS IVÁN CRIOLLO GUALLPA

## RESUMEN

Los ecosistemas de páramo de los trópicos andinos proveen servicios ecosistémicos como la alta regulación y producción de agua, en ese contexto la dinámica de las aguas subterráneas es importante para la gestión integral de los recursos hídricos. Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo estimar la recarga y descarga de los sistemas de aguas subterráneas mediante el uso de un método de Fluctuación del Nivel Freático modificado en la zona de exploración del proyecto Loma Larga, ubicado al sur-occidente del Ecuador, en la parroquia Victoria del Portete del cantón Cuenca. La recarga y descarga (balance hídrico) se determinó utilizando el método modificado WFR con diferentes modelos de recesión. El modelo fue calibrado y validado con series diarias de los niveles freáticos de 5 piezómetros. Los resultados indican un buen ajuste del modelo (Nash-Sutcliffe mayor a 0.6) mediante la implementación de una recesión natural y dinámica. Al considerar un sistema acoplado entre un acuífero superior e inferior, solamente se obtuvo un buen ajuste en el acuífero superior. Después de haber utilizado el modelo de recesión natural de WFR, se estimó que la recarga anual 2020 es de  $771.15 \text{ mm año}^{-1}$  en el sitio donde se ubica el piezómetro LLDGT-005, lo que representa el 71.26% de la precipitación anual de ese año ( $1082.1 \text{ mm año}^{-1}$ ). Como resultado de este modelo en el mismo piezómetro LLDGT-005, se obtuvo el siguiente balance hídrico en el año 2020: A partir del 100% de entrada de agua proveniente de la precipitación, el 44.69% corresponde a pérdidas de agua por recesión natural, el 27.22% a Evapotranspiración real, el 18.44% al módulo de descarga (DM), el 1.52% a la escorrentía (ES) y finalmente se obtuvo una variación anual de nivel de agua ( $\Delta H$ ) del 8.13%.

**Palabras clave:** Aguas subterráneas, recesión, nivel freático, piezómetros, recarga, descarga.

## ABSTRACT

Páramo ecosystems in the Andean tropics provide ecosystem services such as high water regulation and production; in this context, groundwater dynamics is important for the integrated management of water resources. For this reason, this work aims to estimate the recharge and discharge of groundwater systems using a modified Water Table Fluctuation method in the exploration area of the Loma Larga project, located in the south-west of Ecuador, in the Victoria del Portete parish of Cuenca canton. Recharge and discharge (water balance) were determined using the modified WFR method with different recession models. The model was calibrated and validated with daily series of water tables from 5 piezometers. The results indicate a good model fit (Nash-Sutcliffe greater than 0.6) by implementing natural and dynamic recession. When considering a coupled system between an upper and lower aquifer, a good fit was only obtained in the upper aquifer. After using the WFR natural recession model, the 2020 annual recharge was estimated to be 771.15 mm yr<sup>-1</sup> at the site where the LLDGT-005 piezometer is located, which represents 71.26% of the annual precipitation for that year (1082.1 mm yr<sup>-1</sup>). As a result of this model in the same LLDGT-005 piezometer, the following water balance was obtained in the year 2020: From the 100% of water input from precipitation, 44.69% corresponds to water losses due to natural recession, 27.22% to real evapotranspiration, 18.44% to the discharge module (DM), 1.52% to runoff (ES) and finally an annual variation of water level ( $\Delta H$ ) of 8.13% was obtained.

**Key words:** Groundwater, recession, water table, piezometers, recharge, discharge.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de la recarga y descarga de las aguas subterráneas en un área es importante para utilizar adecuadamente los recursos hídricos, tal es el caso del agua subterránea, pues constituyen un recurso estratégico en el contexto actual en el cambio climático. En el Ecuador no existe una metodología oficial para determinar las zonas de recarga y descarga hídrica, a esto se suma una reglamentación deficiente y la práctica de actividades agrícolas, ganaderas y pecuarias sin las debidas medidas de conservación de suelos, estos factores inciden negativamente en la preservación de estas zonas. Además, la escasez general de conocimiento científico limita la generación de políticas públicas orientadas a la gestión eficiente del recurso hídrico afectando la disponibilidad futura de agua en el Sur del Ecuador. La alternativa sostenible para asegurar a mediano y largo plazo el suministro de la cantidad y calidad del agua para la sociedad y el medioambiente está dado en desarrollar una política nacional y local del manejo integral del agua, encaminada al uso racional, productivo y eficiente del recurso (Lara Vásconez et al., 2021).

En tal sentido se establece el presente trabajo que consiste en el estudio de la recarga y descarga del sistema de agua subterráneas mediante la aplicación de la metodología denominado Regresión de la Fluctuación de la Tabla de Agua (WTFR), en base a información hidrogeológica disponible (niveles piezométricos) durante el periodo de 4 años con la finalidad de determinar las relaciones que estas presentan con la ocurrencia de precipitaciones como estrategia para asegurar la provisión de los servicios ecosistémicos con el fin de contribuir a la conservación y aseguramiento de la funciones ecológicas de las zonas de recarga y descarga hídrica, los resultados de este estudio pueden contribuir el desarrollo sostenible y gestión integral de los recursos de aguas subterráneas mediante la determinación de áreas de alto potencial hídrico (Lara Vásconez et al., 2021). Este trabajo se llevó a cabo en la zona de Exploración del Proyecto

Loma Larga, ubicado en la parroquia Victoria del Portete, perteneciente al cantón Cuenca, provincia del Azuay.

## 1.2. ANTECEDENTES

De acuerdo al Plan Nacional de Desarrollo Minero, en el año 2016 se estableció las políticas públicas del sector priorizando cinco proyectos estratégicos para la extracción de minerales metálicos en el Ecuador tales como: Loma Larga, San Carlos Panantza, Mirador, Río Blanco y Fruta del Norte (Almeida, 2019). DPMECUADOR S.A. es una empresa ecuatoriana legalmente conformada y existente de acuerdo con las leyes de la República del Ecuador, dedicada a la exploración y desarrollo de proyectos de extracción de metales en Ecuador. En ese contexto, actualmente se encuentra en desarrollo (exploración avanzada) el proyecto estratégico Loma Larga, ubicado al sur del Ecuador en la Cordillera Occidental de los Andes, en los flancos orientales de la Caldera de Quimsacocha entre 3.500 y 3.750 m.s.n.m., en la provincia del Azuay, a aproximadamente 480 km al sur de la capital Quito y a 30 km al suroeste de la ciudad de Cuenca.

Durante los años 2016 y 2017 como parte del trabajo de línea base hidrogeológica para el estudio de viabilidad, DPMECUADOR S.A. (Antes INV MINERALES ECUADOR S.A. INVMINEC) contrató a ITASCA Denver Inc. para la realización de estudios hidrogeológicos, incluyendo la realización de pruebas hidráulicas (Test de Lugeon 1993) para la estimación de la conductividad hidráulica (K) a partir del test de packer, así como la implementación de piezómetros que permiten tener mediciones del nivel freático en pozos establecidos. Según los resultados del estudio denominado “*Loma Larga Hydrogeologic Field Activities*”, de (Itasca Denver, 2017), indican que podrían existir dos sistemas de aguas subterráneas en el sitio: i) un sistema de aguas subterráneas superficial formado por suelo y vegetación (Páramo), de poca profundidad (1 a 3 m) y que tiene una alta porosidad y una alta capacidad de retención de agua; y ii) un sistema de aguas subterráneas de roca profunda controlado por la densidad de las fracturas y el tipo de alteración, ubicado a 50 m por debajo de la superficie del suelo

(aproximadamente). Estos dos sistemas de aguas subterráneas están separados por una zona no saturada gruesa formada por roca madre.

Finalmente, como parte de las recomendaciones en el mismo estudio hidrogeológico, hace referencia a la realización de estudios adicionales relacionados con el flujo de aguas subterráneas y por ende a la elaboración de un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas para evaluar los impactos ambientales que servirá como herramienta de predicción de los diferentes procesos y actividades durante la fase de explotación del proyecto Loma Larga (Itasca Denver, 2017).

### 1.3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Los ecosistemas de páramo de los trópicos andinos sobre los 3500 m.s.n.m., desempeñan funciones relevantes en los servicios ecosistémicos como la alta regulación y producción del agua (Lazo et al., 2019), y por ende el suministro a muchas ciudades, pueblos de los valles interandinos y de la costa (Iñiguez et al., 2016), el agua es utilizado para riego, consumo humano, generación energética, uso industrial, minería, agricultura, ganadería y desempeñan un papel importante en la mitigación y adaptación al cambio climático (P. Crespo et al., 2012), ocupan más de 30.000 Km<sup>2</sup> del norte de Sudamérica (Lazo et al., 2019). Los suelos tienden a comportarse como una esponja que captura las precipitaciones para posteriormente liberarla progresivamente aguas abajo (Ochoa-Sánchez et al., 2019), de igual forma se podría también considerar que el suelo funciona como un tanque de almacenamiento que libera lentamente el agua acumulada (Iñiguez et al., 2008). Según Crespo et al., (2014) y Crespo et al., (2011), demostró que el movimiento de agua en las cuencas altoandinas se caracteriza por la predominancia de flujo subsuperficial lateral en el sentido de la pendiente a través del suelo, generalmente, en temporadas de verano, el flujo de agua es lento debido a que fluye a través del horizonte C y las grietas de la capa superficial de roca meteorizada, por lo que, en las épocas más secas del año estas capas contribuyen a la generación de caudal denominado “flujo base”, por ende, el agua subterránea que se encuentra en los estratos rocosos no contribuye en la generación de caudal.



En tal sentido, mientras un gran número de estudios han sido realizados alrededor del mundo en diversos ecosistemas con la finalidad de determinar sus funciones hídricas, en el caso de los ecosistemas de páramo húmedo altoandino, a pesar de existir un sin número de estudios sobre hidrología superficial, como es el caso del estudio realizado por Mosquera et al., (2016), donde realiza estimaciones en base a la aplicación de diferentes metodologías de análisis como el Tiempo Medio de Transito (MTT) mediante un conjunto de datos único del  $\delta^{18}\text{O}$  de composición isotópica de muestras de agua de lluvia y flujo de quebradas en la que confirma que el sistema hidrológico del bioma tropical alpino está dominado por un flujo subterráneo poco profundo, así mismo Campozano et al., (2020), realizó una predicción de descargas mediante ondas basadas en un modelo hidrológico de Redes Neuronales Artificiales (ANN) con la finalidad de estudiar la interpretación de la descarga total fluvial a las quebradas, representando un tiempo de tránsito de flujo lento (256 días), medio (12 a 64 días) y rápido (2 a 12 días), los cuales están relacionados al MTT; otro estudio realizado por Lazo et al., (2019) en el Observatorio Ecohidrológico Zhuruca y (ZEO) a partir de datos hidrometeorológicos, isotópicos estables en agua y suelos hidrofísicos, estima que los flujos de agua subterránea profundos son mínimos, en base a lo expuesto, se da a conocer que existe muy poco conocimiento sobre aguas subterráneas (Mosquera et al., 2012), esto se debe al grado de complejidad que plantea la predicción hidrogeológica (Ochoa-Tocachi et al., 2016) y por lo tanto, todavía es un tema poco conocido que permita mejorar el entendimiento de la dinámica de los páramos y el efecto que tendría la deshidratación e intervención del sistema inferior en el flujo de agua en las quebradas contiguas a la zona de estudio.

La recarga de las aguas subterráneas es el agua que infiltra a través de la zona no saturada hasta llegar al nivel freático y, por lo tanto, aumenta el volumen de agua almacenada en la zona saturada (Marcovecchio & Varni, 2020). Por lo que se considera como un parámetro hidrológico complejo que requiere la estimación en escalas a nivel espacial y temporal (Atta-Darkwa, 2013). De acuerdo a los niveles piezométricos observados, en el nivel freático la principal fuente discontinua de recarga natural de las aguas subterráneas es la precipitación. La descarga o recesión de las aguas subterráneas es la disminución del nivel de agua debido a los desequilibrios de flujo horizontal según

lo regula la Ley de Darcy. La recesión generalmente es impulsada por varios factores como la permeabilidad, fracturas de la roca, infiltración, predominancia de drenaje del acuífero y alteración de las condiciones hidrogeológicas (Yang et al., 2018). En ese contexto, determinar los parámetros de recarga y descarga son insumos esenciales para comprender la dinámica de las aguas subterráneas y poder cuantificar mediante modelos hidrogeológicos la reserva regulatoria que esta contribuye al sistema local y regional de flujo subterráneo y superficial (Baum et al., 2018).

Como resultado de la recopilación de información (alta resolución y de buena calidad) durante varios años, que gracias al monitoreo continuo realizado por la empresa DPMECUADOR S.A. (proyecto Loma Larga), se cuenta con una sólida base histórica de datos hidrometeorológicos y por ende la existencia de varios estudios hidrológicos e hidrogeológicos como el estudio de (Itasca Denver, 2017), en el que se reporta las diferentes actividades realizadas en campo para la implementación de una red de piezómetros de cuerda vibrante (VW), con transductores que registran mediciones frecuentes (horario) y precisas de los niveles piezométricos. En tal sentido, se propone la estimación de las variaciones de recarga y descarga de las aguas subterráneas mediante un modelo de regresión de la fluctuación del nivel freático modificado (WTFR), debido a que se trata de una zona de gran importancia desde el punto de vista ambiental, por ende se considera un desafío muy importante en la comprensión de la dinámica de los ecosistemas de páramo altoandino, donde se desconoce el intercambio de los dos sistemas de aguas subterráneas en el sitio, y en base a la disponibilidad de información se puede realizar un modelo que permita cuantificar la pérdida de agua del sistema superior y determinar si el sistema inferior tiene una contribución importante en el flujo de las quebradas aledañas a la zona de estudio, con el fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos de una manera eficaz, e incitando la investigación emergente en la región andina (Ochoa-Tocachi et al., 2016), puesto a que este estudio es un paso previo para la realización de un modelo hidrogeológico que puede ser utilizado como una herramienta valiosa para formular estrategias de predicción de impactos ambientales (Ramón et al., 2021) asociado a la dinámica de las aguas subterráneas.

## 1.4. OBJETIVO GENERAL

Estimar la recarga y descarga de los sistemas de aguas subterráneas mediante el uso de un método de regresión de la fluctuación del nivel freático modificado en una zona altoandina al Sur del Ecuador (Loma Larga).

### 1.4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un modelo de fluctuación del nivel freático ajustado a dos sistemas de aguas subterráneas que permitan la estimación de la recarga y descarga.
- Calibrar los parámetros del modelo mediante la comparación de los valores observados del nivel freático y simulados por el modelo.
- Acoplar el sistema superior de aguas subterráneas con el sistema inferior que permitan comprobar la conectividad hidráulica entre los dos sistemas.
- Determinar la recesión de los niveles de los dos sistemas de aguas subterráneas a través del análisis de varios modelos conceptuales relevantes.

## 1.5. ALCANCE

La zona de estudio cubre un área de 6.88 km<sup>2</sup> (Figura 1). La investigación es de carácter Explicativo, ya que se requiere comprender a profundidad la dinámica hidrogeológica en una zona de páramo, debido a que existen varios estudios de hidrología superficial pero no existen estudios en temas relacionados a las aguas subterráneas, especialmente donde se utilice otros criterios de análisis como la variable de niveles piezométricos. Además, abarca información detallada de estudios hidrometeorológicos e hidrogeológicos realizados por consultores externos a la empresa. Y en base a esa información se da a conocer las características hidrogeológicas de la zona de estudio del proyecto minero Loma Larga.

## CAPITULO 2

### ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se da a conocer los aspectos generales de la zona de estudio, se realiza la descripción de los diferentes componentes ambientales como tipos de suelos, cobertura vegetal, geología, clima, hidrología e hidrogeología y de esta manera poder conocer las características del lugar y poder entender de mejor manera las condiciones en las que se realizó el presente trabajo.

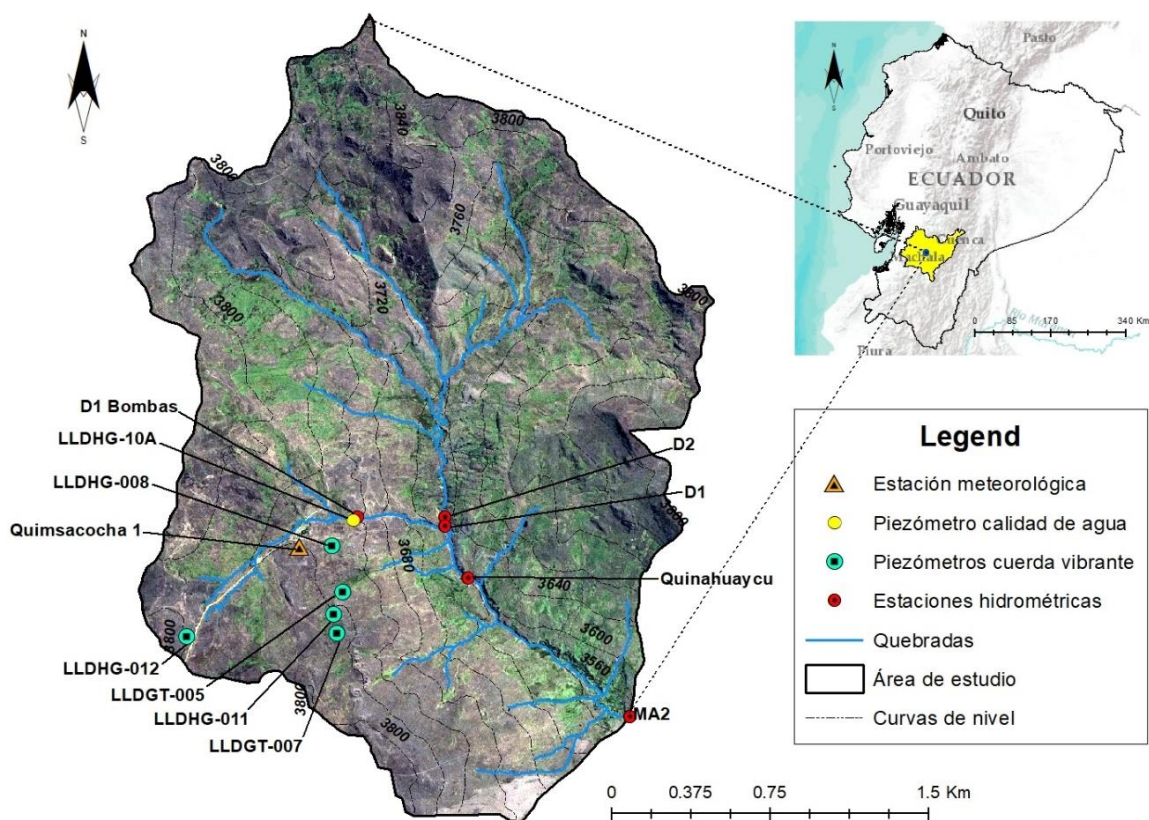
### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estudio fue realizado en la zona de exploración del proyecto Loma Larga ubicado en la zona Austral al sur-occidente del Ecuador, al Sur de la provincia del Azuay, en la parte centro occidental de la parroquia Victoria del Portete, perteneciente al cantón Cuenca, se encuentra conformado por las concesiones mineras Cerro Casco, Río Falso y Cristal (Jaramillo, 2013a). La zona donde se encuentra ubicado el yacimiento mineral corresponde al área minera Río Falso, en las coordenadas: 698293mE – 9663325mN, sistema de proyección: Universal Transversa de Mercator, Datum WGS84 17S.

La zona de estudio tiene un área de 6.88 km<sup>2</sup> (Figura 1), es una zona de páramo constituida por valles y llanuras accidentados, principalmente de formación glaciaria (PROMAS, 2009), con un gradiente altitudinal que va aproximadamente desde los 3540 m.s.n.m. hasta los 3880 m.s.n.m.

Esta zona fue seleccionada debido a que posee la disponibilidad suficiente de datos de alta resolución de niveles freáticos (información hidrogeológica), información climática de la estación Quimsacocha 1, como también información hidrológica de la Quebrada Quinahuaycu que es el cauce principal y que se extiende a lo largo de la zona de estudio, misma que se ubica en la microcuenca alta del río Irquis, y que, en condiciones naturales, drena hacia el sureste, uniéndose con el río Portete, y desde estos puntos aguas abajo recibe el nombre de Río Tarqui.

**Figura 1.** Mapa de ubicación de la zona de estudio (proyecto Loma Larga), ubicado en la cordillera de los Andes al Sur del Ecuador.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.  
**Elaboración:** El Autor

### 3.2. SUELOS

Según Buytaert (2006), en la taxonomía de los suelos, los más comunes en el páramo son los Andisoles, Leptosoles, Entisoles, Inceptisoles e Histosoles. La mayoría de los suelos de páramo son de origen volcánico. Dependiendo de la ubicación, el espesor del suelo varía desde unos pocos centímetros hasta varios metros. A pesar de la compleja geología y topografía, los suelos del páramo son bastante homogéneos. En lugares más empinados, los suelos son muy delgados y muestran poco desarrollo del horizonte.

Los Andisoles típicamente son suelos negros de paisajes volcánicos; proviene del japonés an, negro, y do, suelo. Se encuentran en regiones volcánicas en todo el mundo, tienen un alto potencial para la producción agrícola. La fuerte fijación de fósforo de los Andosoles (causada por Al y Fe libres) es un problema, las medidas de mejora para

reducir este efecto es mediante la aplicación de cal, sílice, materia orgánica y fertilizantes fosfatados. Los Andosoles son fáciles de cultivar y tienen buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua. Los Andosoles fuertemente hidratados son difíciles de labrar por su baja capacidad de carga y adhesividad. (FAO, 2008). Presenta una textura de limo arcilloso, que se vuelve ligeramente más arenosa hacia el subsuelo (Buytaert, Deckers, et al., 2006).

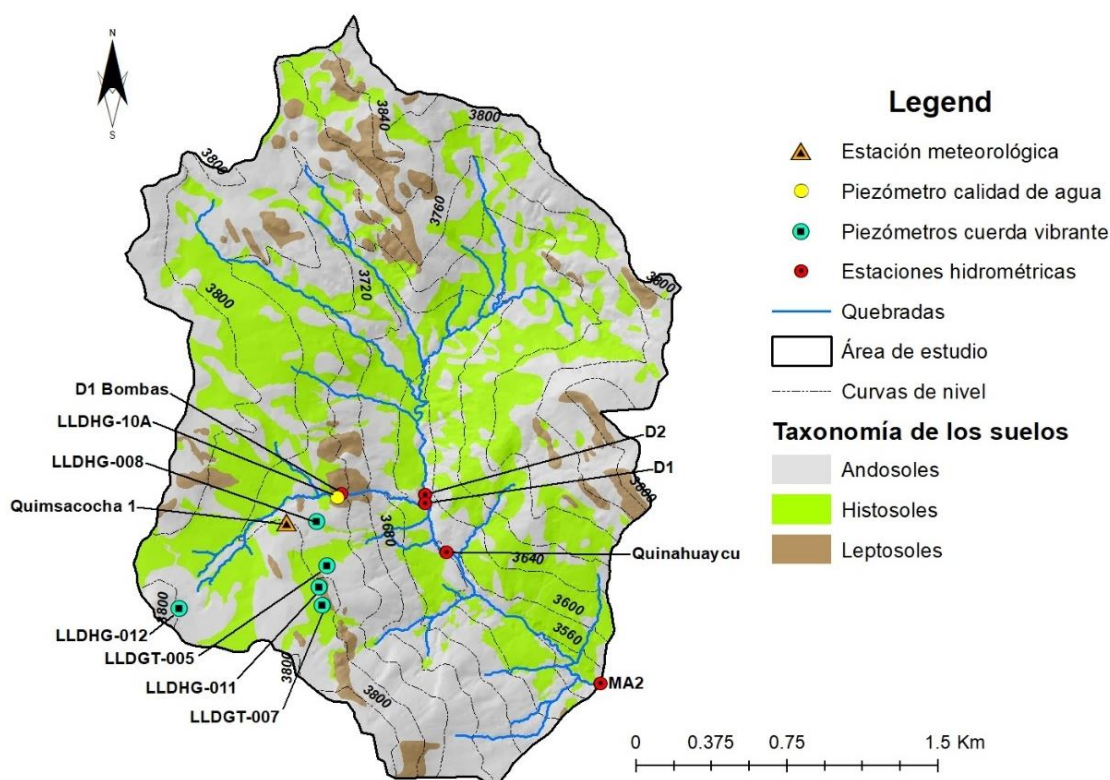
Los Histosoles son suelos de turba y pantanos; proviene del griego histos, tejido. Comprende suelos formados en materia orgánica. Las propiedades del material orgánico (composición botánica, estratificación, grado de descomposición, densidad de empaquetamiento, contenido de madera, adición de minerales, etc.) y el tipo de turba de pantano, determinan los requerimientos de manejo y posibilidades de uso de los Histosoles. Uno de los problemas comunes que se encuentra al drenar Histosoles es la oxidación de minerales sulfurosos, que se acumulan bajo condiciones anaeróbicas. (FAO, 2008). Debido a la gran acumulación de materia orgánica presenta una textura arcillosa (Nideesh et al., 2021).

Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. Proviene del griego leptos, fino. Pueden encontrarse sobre rocas que son resistentes a la meteorización o donde la erosión ha mantenido el paso con la formación de suelo, o ha removido la parte superior del perfil de suelo. Son un recurso potencial para el pastoreo en estación húmeda y tierra forestal. La erosión es la mayor amenaza en las áreas de Leptosol, particularmente en regiones montañosas de zonas templadas donde la alta presión de población (turismo), la sobreexplotación y creciente contaminación ambiental llevan al deterioro de bosques y amenazan grandes áreas de Leptosoles vulnerables. (FAO, 2008). Estos suelos se caracterizan por ser poco profundos y tienen una textura franco arcillosa (López-galindo et al., 2003).

En la Figura 2 se puede observar que la zona de estudio se encuentra asentada en 3 tipos de suelos, es así que el suelo que predomina en la mayor parte del área corresponde a los Andisoles que cubre el 54% (3.75 km<sup>2</sup>), el 38% (2.64 km<sup>2</sup>) corresponde a los Histosoles y el 7% (0.48 km<sup>2</sup>) a los Leptosoles.



**Figura 2.** Taxonomía de los suelos en la zona de estudio.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

### 3.3. VEGETACIÓN

A nivel de las zonas altas o de páramo y en particular de la parte alta de la microcuenca del Río Irquis donde se encuentra la zona de estudio, las características hidroclimáticas como el exceso de lluvia, la alta humedad atmosférica, la nubosidad constante, las bajas temperaturas y otros factores secundarios no permiten el uso de suelo en el aprovechamiento agrícola de manera extensiva e intensiva ni siquiera para subsistencia, el uso del suelo con fines de establecimiento de pastizales para producción pecuaria es mínimo (Jaramillo, 2013b). A nivel de la zona de estudio se han podido identificar los siguientes usos de suelo:

- **Bosque nativo:** Corresponde a una franja altitudinal del bosque montano alto que limita con el páramo herbazal. Es un hábitat cerrado con presencia de árboles y arbustos con crecimiento denso y cubiertos por una gran cantidad de

briofitos. Entre los géneros más representativos están *Hesperomeles*, *Vallea*, *Monticalia*, *Miconia* y *Escallonia*.

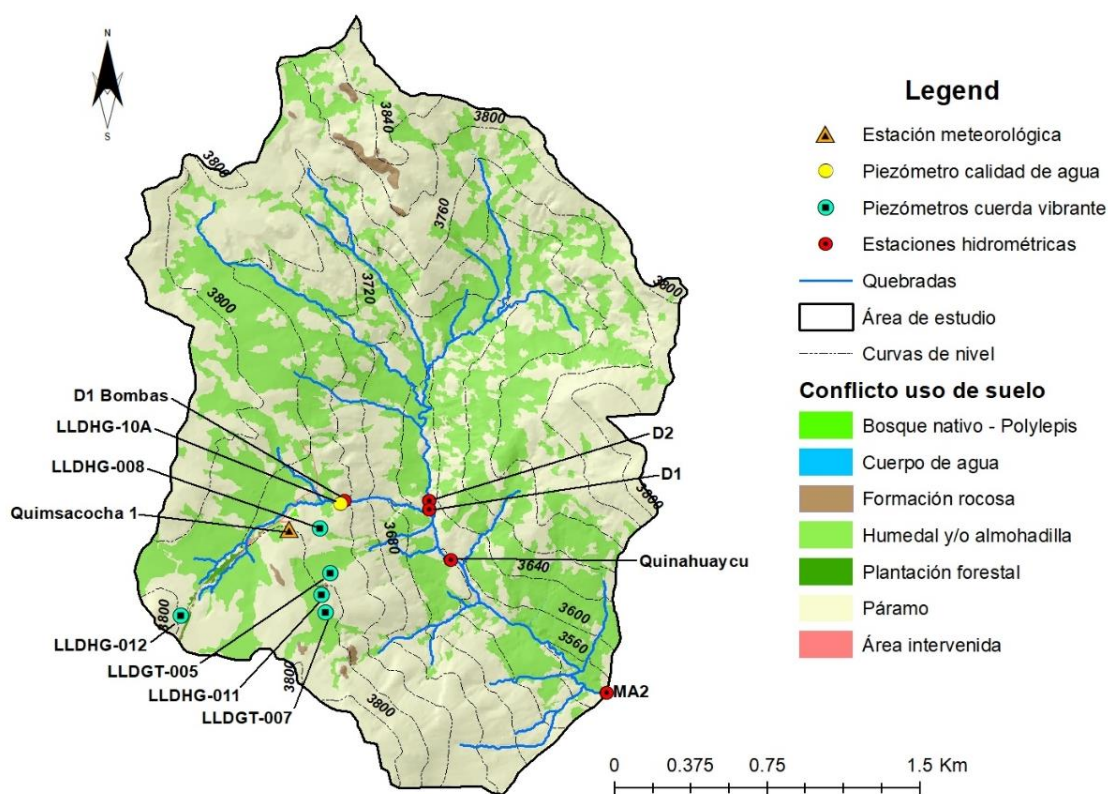
- **Cuerpo de agua:** Son extensiones de agua acumulada que varía en su tamaño, usualmente se localizan en los enclaves o depresiones del ecosistema Páramo. Son de gran importancia ecológica, ya que intervienen en la regulación hídrica y son sitios importantes para el descanso de aves migratorias. En estos cuerpos de agua están creciendo plantas del género *Isoetes*.
- **Formación rocosa:** Son afloramientos rocosos expuestos a la erosión por el viento y el agua. La vegetación que crece en este ambiente presenta adaptaciones, como tamaño pequeño, hojas coriáceas y abundante pubescencia. Entre los géneros representativos están *Draba*, *Viola* y varias especies de las familias Asteraceae y Poaceae.
- **Humedal y/o almohadilla:** Está constituida por vegetación herbácea en forma de rosetas, generalmente colmatadas de agua la mayor parte del año (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2018). Un hábitat abierto con plantas de baja altura en forma de almohadillas representadas por los géneros *Plantago* y *Oreobolus*. Usualmente, esta asociación se encuentra en áreas húmedas y juega un rol importante en la regulación hídrica, ciclo del suelo y nutrientes. Por lo general, este ambiente se localiza en enclaves de las zonas altoandinas, reteniendo gran cantidad de agua y materia vegetal.
- **Plantación forestal:** Se encuentran en un ambiente antropogénico dedicado al manejo forestal con especies de pino (*Pinus* spp.). Existen especies nativas creciendo de manera aislada en este ambiente; entre las que están: *Oreocallis grandiflora*, *Drymis granadensis* y varias especies de la familia Ericaceae.
- **Páramo:** Corresponde a un hábitat abierto dominado por hierbas, especialmente de gramíneas con el hábito de penachos o macollas de los géneros *Calamagrostis*, *Cortaderia* y *Festuca*. Arbustos leñosos de los géneros *Chuquiraga*, *Diplostephium*, *Gynoxys*, *Hesperomeles*, *Brachyotum* y *Miconia* se encuentran de manera dispersa y, en ocasiones, aglomerados. Un componente importante de este ecosistema son las plantas con hábito de roseta, tal es el caso del género *Puya*, *Valeriana* y *Viola*.



- **Área intervenida:** Se refiere a todo ambiente que evidencia un disturbio antropogénico; en el área de estudio se observó en las áreas de pajonal evidencia de actividades de 4x4 y motocross, lo que ocasiona la compactación del suelo, pérdida de nutrientes y erosión.

La vegetación en la zona de estudio está conformada principalmente por pajonales (*Calamagrostis sp.*) y almohadillas (*Plantago sp.*) (PROMAS, 2009). Es así que en los usos de suelo predominantes con el 60.64% (4.17 km<sup>2</sup>) del total del área de estudio se asienta en una zona de Páramo, posteriormente un 38.25% (2.63 km<sup>2</sup>) corresponde a humedales y/o almohadillas, y las demás categorías descritas cubren menos del 1% de la zona de estudio, tal como se puede observar en la Figura 3.

**Figura 3.** Conflicto de uso de suelo en la zona de estudio.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

## 3.4. GEOLOGÍA

### 3.4.1. REGIONAL

La zona de estudio se ubica en la parte sur del terreno continental de Chaucha, en la provincia fisiográfica de la Cordillera Occidental. La zona de Chaucha está definida por los sistemas de fallas de Bulubulu, de tendencia noreste, en el lado noroeste y el sistema de fallas de Girón en el lado sureste. Se interpreta que estas zonas de falla han estado activas durante toda la evolución de la cuenca intermedia. Durante cada fase de reactivación, los movimientos de las fallas influyeron en la ubicación de algunos cuerpos intrusivos y subvolcánicos, mientras que algunos actuaron como canales para los fluidos hidrotermales mineralizantes. La zona de Chaucha está formada por rocas volcánicas de arco continental del Terciario depositadas sobre rocas sedimentarias marinas a fluviales del Cretácico, que a su vez se depositaron sobre rocas metamórficas del Paleozoico y Mesozoico del basamento (DRA, 2020).

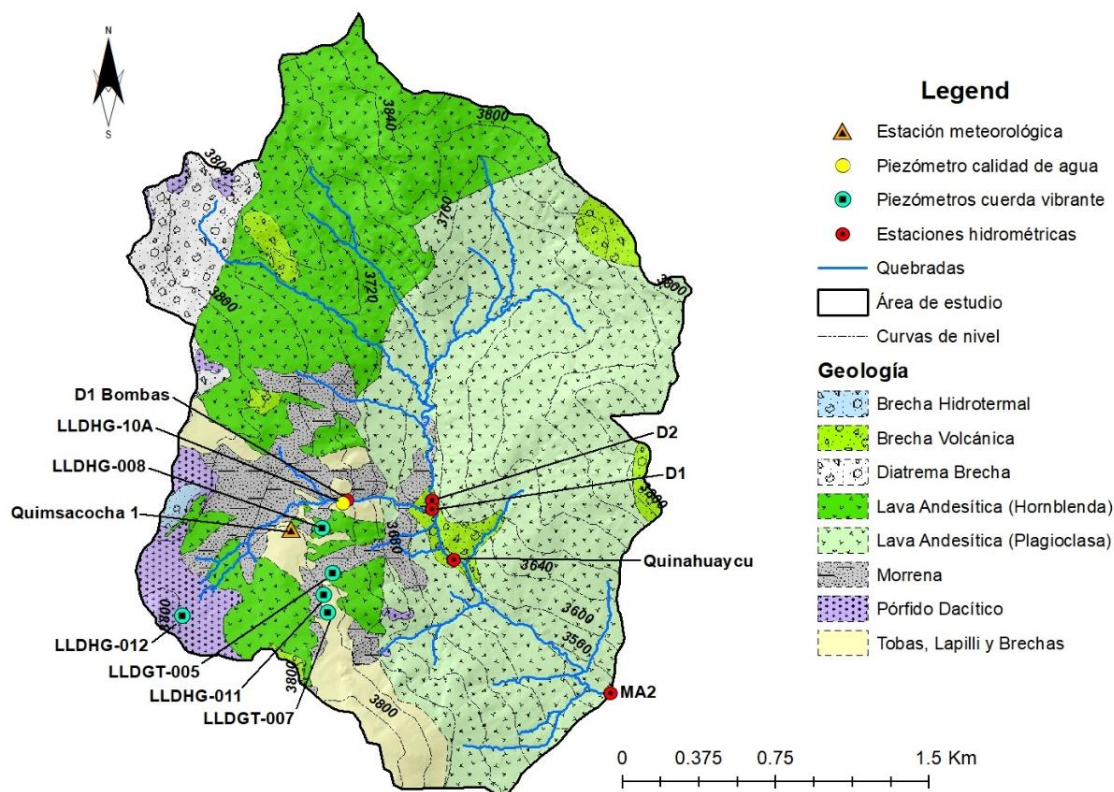
### 3.4.2. LOCAL

La zona de estudio se localiza en el borde este de la caldera de Quimsacocha, se encuentra entre la falla Gañarín, al noroeste, y la falla Girón, al sureste. Es una estructura de caldera colapsada, de cuatro kilómetros de diámetro; el remanente de un estratovolcán erosionado se encuentra a lo largo y probablemente emplazado y controlado por la falla Gañarín y 400 m al oeste del depósito mineral principal de Loma Larga. El área circundante inmediata está, en su mayoría, sobre las rocas volcánicas del Mioceno Superior, de las formaciones Turi, Turupamba, Quimsacocha y Tarqui. Está dominado por depósitos volcánicos que consisten en flujos andesíticos, brechas volcánicas, y tobas volcanoclásticas procedentes de la caldera (Itasca Denver, 2017).

El 44.66% (3.07 km<sup>2</sup>) del total del área de estudio (Figura 4) se encuentra sobre Lavas Andesíticas (Plagioclasa) que son la predominantes, donde el volumen de roca o de hielo son de la gama identificables del origen y de la edad definida por el distintivo dominante

y reconocible de petrográficos litológicos que lo caracterizan y el 28.72% (1.97 km<sup>2</sup>) del área se asientan lavas Andesíticas (Hornblenda).

**Figura 4.** Geología en la zona de estudio.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

### 3.5. GEOMORFOLOGÍA

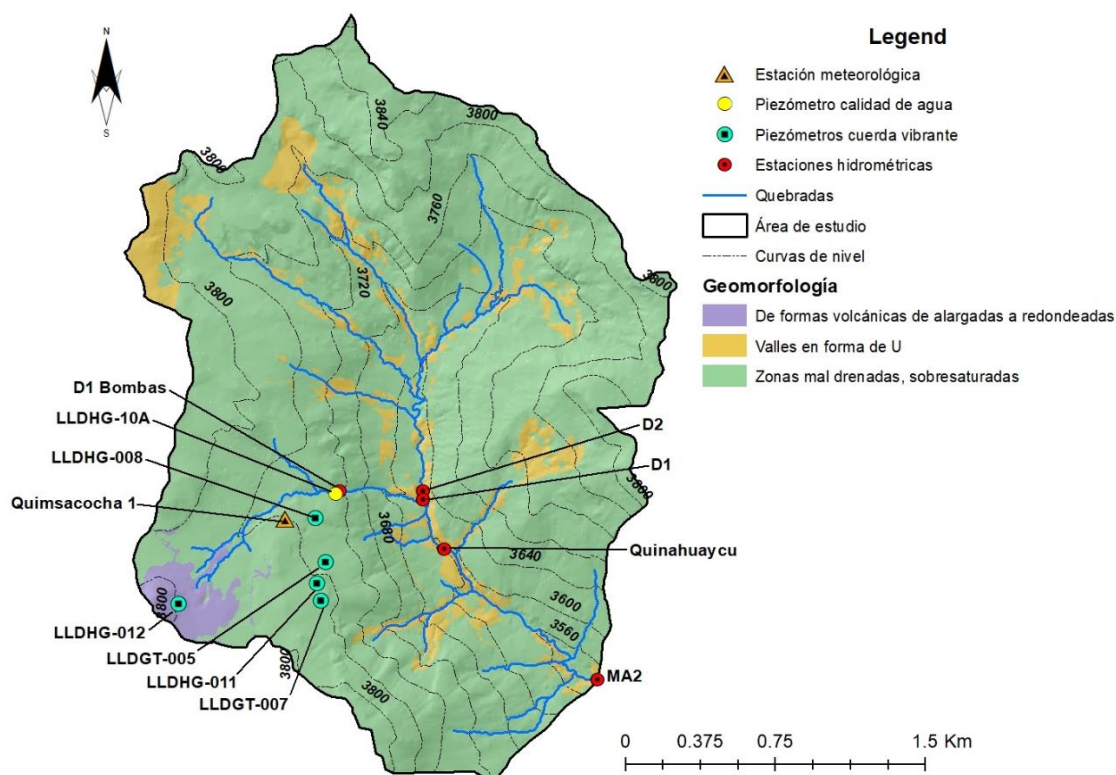
La zona de estudio se encuentra en un terreno de elevaciones que varían entre 3540 y 3880 m.s.n.m en su mayoría. Cerca del área se asienta una antigua caldera volcánica que está ubicada entre 3650 y 3850 m.s.n.m., tiene una forma circular de aproximadamente 4 Km de diámetro, es una planicie con pendientes no mayores a 5 grados, mayormente se encuentran zonas de pantanos, con pequeñas elevaciones en la parte central, no mayores a los 3770 m.s.n.m., los bordes de la caldera están constituidos por flujos de lava de forma radial y composición andesítica, de no muy pronunciada pendiente, hacía el norte se encuentra el Cerro Casco, siendo el borde norte de la caldera más alto que

el sur. Otras zonas como: el sector D1, Loma Larga, presentan una morfología regular con colinas alargadas, y zonas como: Cerro Casco, Loma Costillas, presentan una morfología con pendientes casi verticales, donde se pueden observar escarpes. En el sector abundan los depósitos tipo morrénico (Morán, 2017).

El sistema hidrográfico se encuentra formado principalmente por un conjunto de lagunas de origen glacial. El conjunto de ríos que se originan en el área forma una cuenca de drenaje radial, esta forma se caracteriza por una red circular con canales que proceden de un punto elevado y corren hacia una corriente principal que circula alrededor de la base de la elevación. Las quebradas de Quinuahuaycu (NW-SE), Calloancay (NW-SW), Cristal (N-S), Río Falso (N-S), Zhurucay (N-S) y Lluchir (N-S) pasan a formar parte de las corrientes colectoras principales conformada por los ríos Girón, Tarqui y Rircay (Morán, 2017).

Geomorfológicamente el área de estudio (Figura 5) se encuentra predominado con el 87.80% (6.04 km<sup>2</sup>) por zonas mal drenadas, sobresaturadas, algunas son intermitentes, sobre potentes y con suelos orgánicos, con un rango de pendiente que se encuentra entre 0 a 45%, con una susceptibilidad de media a moderada a la erosión y movimientos en masa, de igual manera el 10.21% (0.70 km<sup>2</sup>) está constituido por valles en forma de U, con depósitos de tills y tilitas, con pendientes suaves a abruptas (0 a 25%), finalmente, con el 1.98% (0.13 km<sup>2</sup>) presenta formas volcánicas de alargadas a redondeadas (domos) de lavas ácidas, jóvenes.

Figura 5. Geomorfología en la zona de estudio.



Fuente: DPMECUADOR S.A.

Elaboración: El Autor

### 3.6. CLIMA

El área de estudio presenta un clima típico tropical de alta montaña, la radiación solar diaria es casi constante durante todo el año. Estas variaciones típicas de temperatura determinan el papel de las heladas y la nieve. Según Buytaert (2006), la variabilidad de la temperatura en el páramo depende principalmente de dos aspectos: el gradiente altitudinal y la humedad del aire, determinada por el clima local. La tasa de caída que es considerado como el cambio en la temperatura promedio con la altitud, se encuentra entre  $0.6$  y  $0.7$   $^{\circ}\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$ . La humedad del aire no solo disminuye la tasa de caída, sino que también reduce la variación diaria de temperatura. En lugares con alta nubosidad, la radiación solar total a nivel del suelo es baja durante el día, mientras que la humedad relativa alta durante la noche por lo que reduce en gran medida el frío debido a la radiación de onda larga que proviene del suelo y la vegetación. En los días secos sobre



todo en la temporada de verano un efecto opuesto ocurre en la zona de estudio (Buytaert, Célleri, et al., 2006).

Principalmente, el clima de las cuencas aledañas a la zona de estudio, están influenciados por el régimen costero del Pacífico desde el oeste, y por las masas de aire continentales y tropicales del Atlántico desde el este. La variabilidad alta del clima se debe a la ubicación geográfica (P. Crespo et al., 2009). El clima predominante es el típico de páramo con lloviznas y lluvias frecuentes existiendo la presencia también de granizadas y heladas (Jaramillo, 2013b).

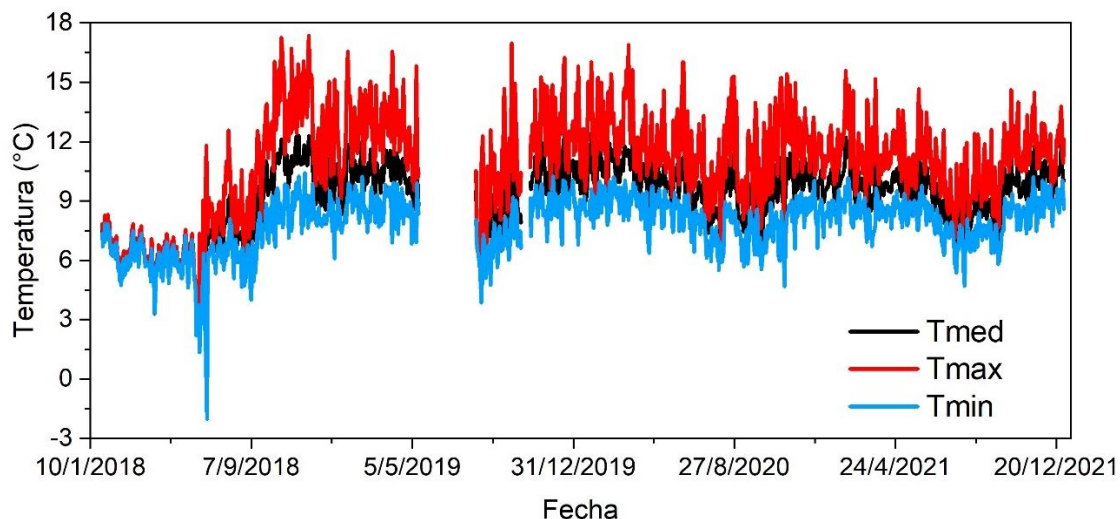
### 3.6.1. VARIABLES METEOROLÓGICAS

Para la caracterización de las condiciones climáticas de la zona de estudio, se cuenta con la estación meteorológica denominada Quimsacocha 1, que consiste en un datalogger de marca Campbell Scientific, modelo 300 series, se encuentra ubicada al lado Oeste en la zona de estudio (Figura 1), en las coordenadas UTM WGS84 (698172E – 9663417N) de cota 3771 m.s.n.m., misma que se encuentra monitoreada continuamente por la Empresa DPMECUADOR S.A., para lo cual se dispone de una base de datos meteorológicos con una resolución temporal igual a 5 minutos desde enero del año 2018, las variables de registro son: precipitación, radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa (Figura 22). Estas variables nos permiten caracterizar de manera básica las condiciones climáticas de la zona de estudio, como también nos permite estimar la evapotranspiración de referencia y real.

#### *Temperatura*

En promedio la temperatura media es de 9.19 °C, con un valor promedio de máximas de 10.89 °C y un promedio de mínimas de 7.81 °C. Hay poca estacionalidad de temperatura con valores levemente más bajos que fue en el mes de julio del 2018 con valores registrados hasta de -2.03 °C (Figura 6).

**Figura 6.** Temperatura diaria durante el periodo 2018-2021.



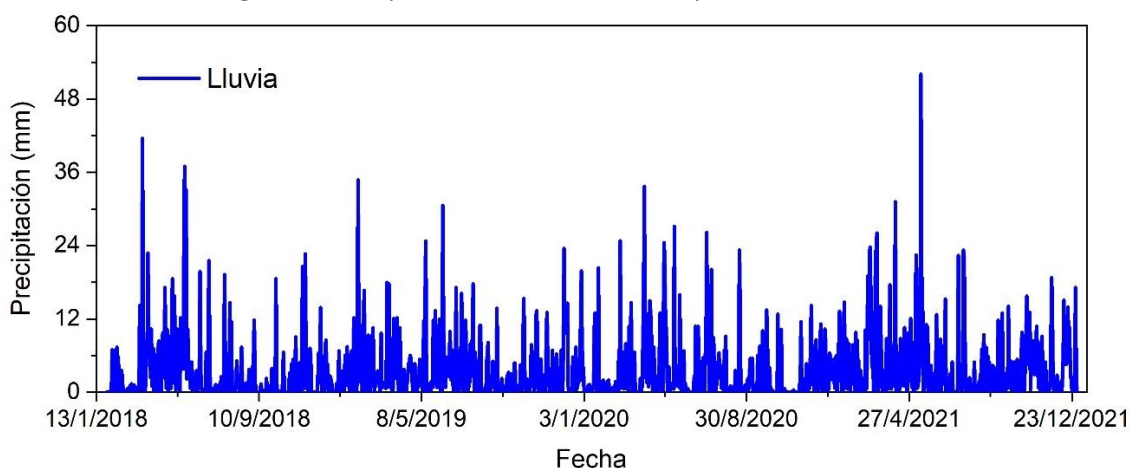
**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019.

**Elaboración:** El Autor

### Precipitación

En promedio, la precipitación anual entre el periodo 2018-2021 es de 1245.72 mm, tiene 2 picos de mayor precipitación diaria: el primero, el 23 de marzo del 2018 con 41.6 mm, y el segundo, el 15 de mayo del 2021 con 52.1 mm y una época relativamente seca en el mes de septiembre del 2019.

**Figura 7.** Precipitación diaria durante el periodo 2018-2021



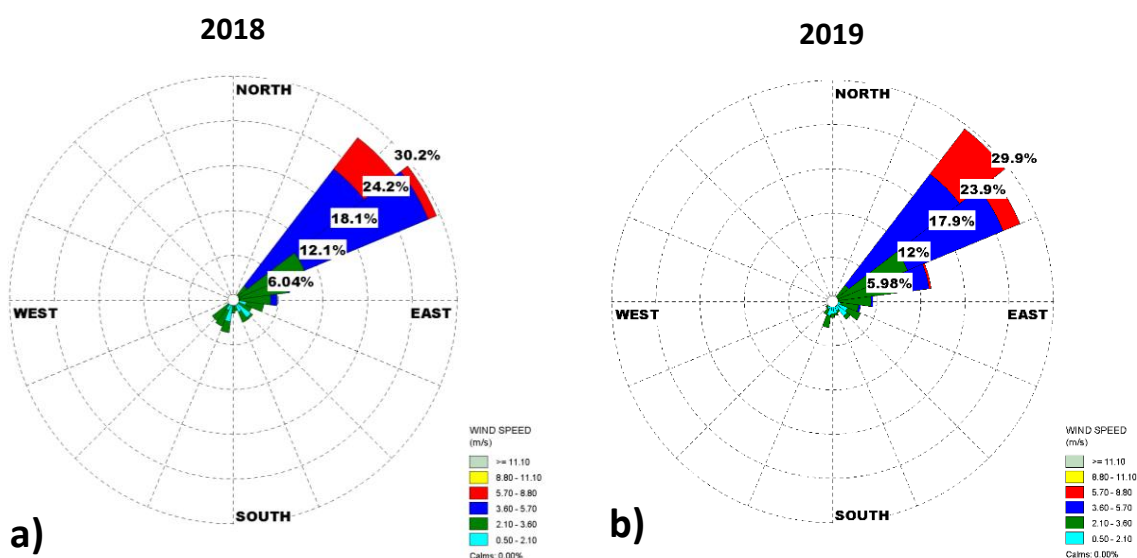
**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019. PROMAS, Base de Datos de Precipitación, 2017-2019

**Elaboración:** El Autor

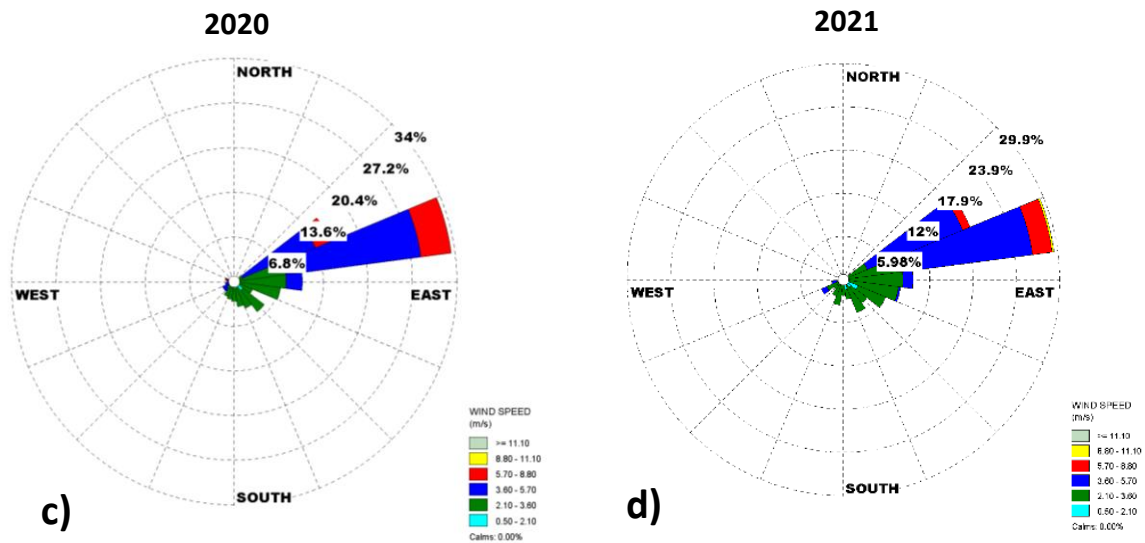
### Velocidad y dirección del viento

El promedio anual de la velocidad del viento es de  $3.57 \text{ m s}^{-1}$  con dirección predominante que proviene del noreste. Hay una estacionalidad con velocidades de viento más altas registradas en el mes de julio del 2021 que corresponde a  $9.40 \text{ m s}^{-1}$ . Existen también velocidades del viento mínimas diarias registradas el 19 mayo del 2019 con valores de  $0.81 \text{ m s}^{-1}$  y el 20 de marzo del 2019 con  $0.94 \text{ m s}^{-1}$ . Sin embargo, en la rosa de los vientos, que fue generada a partir de los datos anuales de la estación Quimsacocha 1, se puede observar en la Figura 8. a), b) y c) correspondiente a los años 2018, 2019 y 2020 que la velocidad máxima se encuentra en el rango de  $5.70$  a  $8.80 \text{ m s}^{-1}$ , con dirección predominante del noreste, finalmente en la Figura 8. d) año 2021 la velocidad máxima se encuentra en el rango de  $8.80$  a  $11.10 \text{ m s}^{-1}$ , es decir que es el periodo que presenta mayor velocidad del viento.

**Figura 8.** Velocidad y dirección de viento anual durante el periodo 2018-2021. Estación meteorológica Quimsacocha 1.





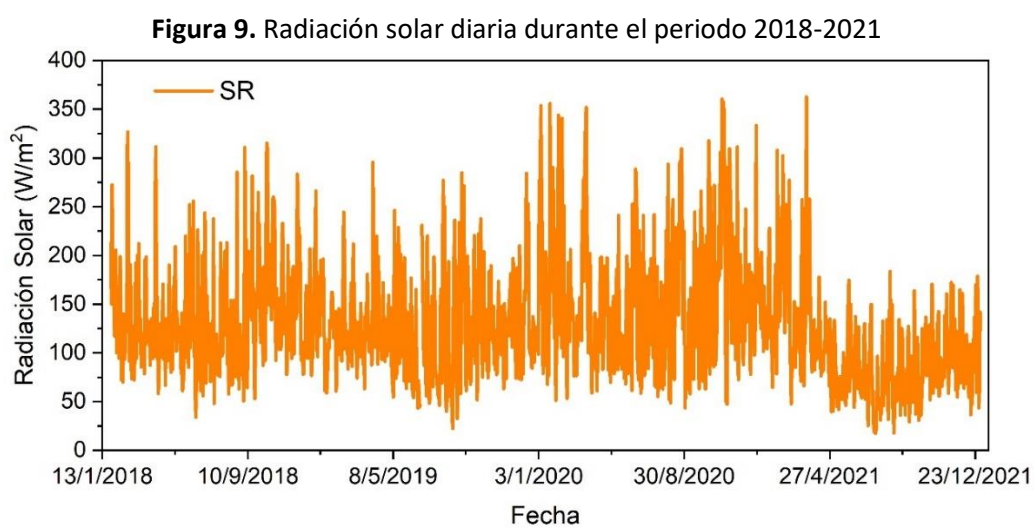


**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019.

**Elaboración:** El Autor

### Radiación solar

El valor promedio anual durante el periodo de estudio es de  $129.81 \text{ W m}^{-2}$ . No se observa una estacionalidad pronunciada en esta variable, aunque hay un mínimo diario centrado el 12 de julio del 2021 con un valor de  $17.59 \text{ W m}^{-2}$  y un máximo diario centrado el 20 de marzo del 2021 con un valor de  $362.77 \text{ W m}^{-2}$ .

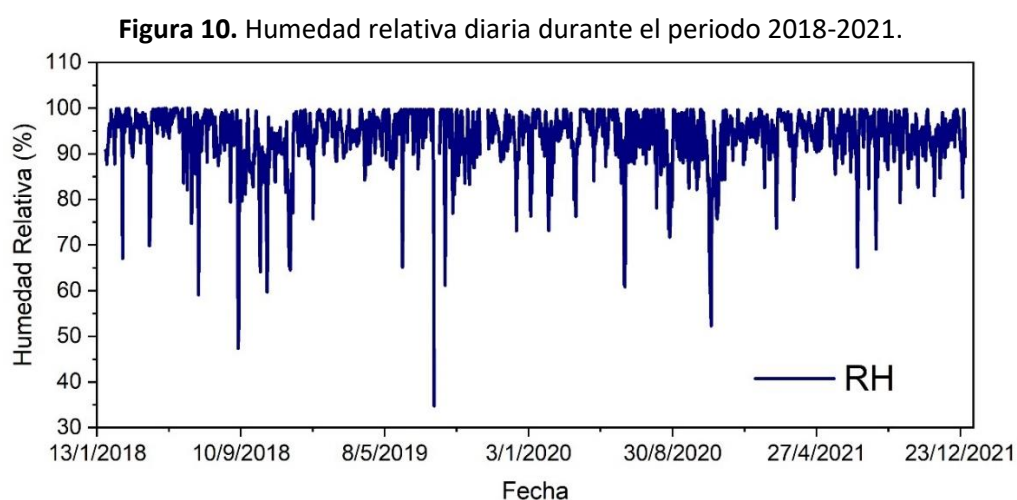


**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019

**Elaboración:** El Autor

## Humedad Relativa

En promedio anual la humedad relativa es 93.76 %. Hay muy poca variabilidad en el año, con valores de humedad promedio siempre cercanos al 90%, la humedad máxima diaria es de 100%, registrado el 7 de marzo, 6, 26, 27 de mayo y el 16, 17 de junio del año 2018, la humedad mínima diaria que muestra más variabilidad, con mínimos registrados corresponden al 6 de septiembre del 2018 con 47.4% y al 30 de julio del 2019 con 34.7%, puesto a que estas épocas son temporada de verano.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019.

**Elaboración:** El Autor

## 3.7. HIDROLOGÍA

La regulación del agua por parte de las cuencas altas está muy influida por su capacidad de almacenar y liberar agua. Por ello, en la última década ha aumentado el interés de la comunidad científica hidrológica por mejorar nuestra comprensión del almacenamiento de agua en las cuencas. Por ejemplo, el estudio del almacenamiento en las cuencas ha contribuido a mejorar nuestra comprensión general de las relaciones entre el caudal y el almacenamiento y de cómo la regulación del almacenamiento y la histéresis entre el almacenamiento y la descarga dependen de la humedad, los caudales y la escala de la cuenca. Estos hallazgos, a su vez, han sido muy útiles como base para la mejora de la estructura de los modelos hidrológicos (Lazo et al., 2019).

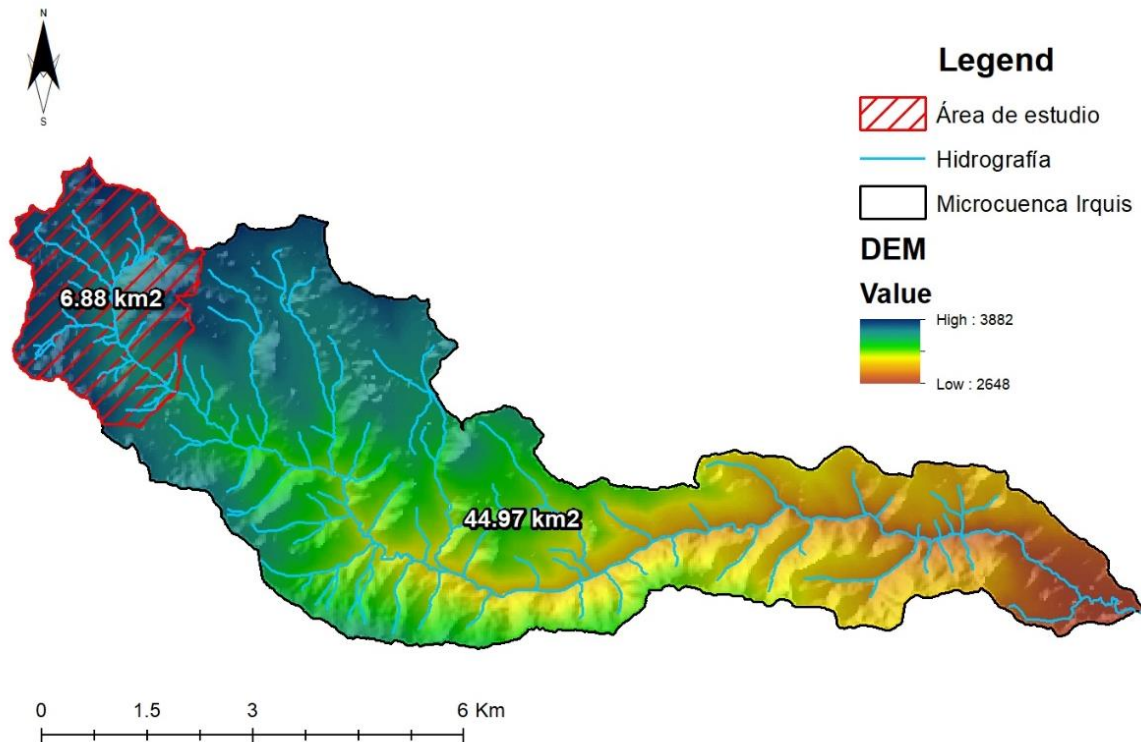
La alta producción de agua de los páramos húmedos se debe principalmente a una alta cantidad de precipitación distribuida en el tiempo de una forma bastante uniforme. En cambio, las propiedades de los suelos, topografía y la vegetación influyen en la regulación hidrológica cuando el agua se mueve dentro del suelo (P. Crespo, Céleri, Buytaert, Ochoa, et al., 2014).

### 3.7.1. MICROCUENCA DEL RÍO IRQUIS

Se encuentra ubicada en la zona Austral al Sur-occidente del territorio ecuatoriano, en la parte central de la provincia del Azuay. A nivel cantonal se ubica en la parte sur del cantón Cuenca y en la parte centro occidental de la parroquia Victoria del Portete, geográficamente se ubica entre las coordenadas x:698396; y:9665964 (Parte Alta) y x:713544; y:9659449 (Parte Baja), (Jaramillo, 2013b).

La zona de estudio se localiza en la parte alta de la microcuenca del Río Irquis, mismo que es un afluente principal de la subcuenca del Río Tarqui, aguas abajo se une con los ríos Yanuncay, Tomebamba y Machángara, formando el Río Cuenca, que al unirse con los ríos Burgay, Jadán y Santa Bárbara toma el nombre del Río Paute hasta unirse con los ríos Upano y Zamora para formar el Río Santiago que en el Perú toma el nombre de Marañón, mismo que es el principal afluente del Amazonas que desemboca en la Isla de Marajá-Brasil en el océano Atlántico (Jaramillo, 2013b).

**Figura 11.** Ubicación de la zona de estudio en la parte alta de la microcuenca del Río Irquis. La zona de estudio cubre un área de 6.88 km<sup>2</sup> y la microcuenca del Río Irquis 44.97 km<sup>2</sup>.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.  
**Elaboración:** El Autor

### 3.7.2. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las características físicas de una cuenca hidrográfica (zona de estudio) son fundamentales en la descripción de la dinámica hídrica, por tal motivo se definen los principales parámetros morfométricos que permiten explicar la forma, relieve, y red de drenaje. Estos se establecieron y analizaron con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS) y planillas de cálculo (Excel).

#### *Parámetros Generales*

En la siguiente Tabla 1, se muestran los resultados de los parámetros generales de la zona de estudio.

**Tabla 1.** Parámetros generales de la zona de estudio.

Parámetros generales	Valor	Unidad
Área	6.88	Km <sup>2</sup>
Perímetro	12.02	Km

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

La zona de estudio cuenta con un área de 6.88 km<sup>2</sup>. El perímetro de la cuenca es 12.02 km.

### *Parámetros de Forma*

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius calculado fue de 1.28, lo cual indica que la cuenca tiene una forma oval redonda a oval oblonda, por lo tanto, presenta peligros torrenciales (crecidas) moderados (F. Gaspari et al., 2012). Los valores del rectángulo equivalente para el lado mayor (L) es de 4.45 km y lado menor (l) es de 1.54 km. En cuanto al factor de forma para la microcuenca es de 0.43 lo que determina un tipo de cuenca Oval, por el cual presenta tendencias de crecidas sostenidas (ANA, 2010). En la siguiente Tabla 2 se presenta los valores obtenidos.

**Tabla 2.** Parámetros de forma de la zona de estudio.

Parámetros de forma	Valor	Unidad
Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius	1.28	
Rectángulo equivalente	Lado Mayor	4.45 Km
	Lado Menor	1.54 Km
Ancho medio	1.72	Km
Factor de forma	0.43	

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

### *Parámetros de Relieve*

La zona de estudio presenta una pendiente media del 13.53 %, que de acuerdo a (Rolando Mora et al., 2006), se caracteriza por poseer una pendiente moderada, presenta deslizamientos ocasionales y peligros severos de erosión de suelos, por ende este efecto expresa que a una mayor pendiente corresponde una menor duración de

concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal en esta microcuenca, evidentemente favoreciendo a la escorrentía superficial.

**Tabla 3.** Parámetros de relieve de la zona de estudio

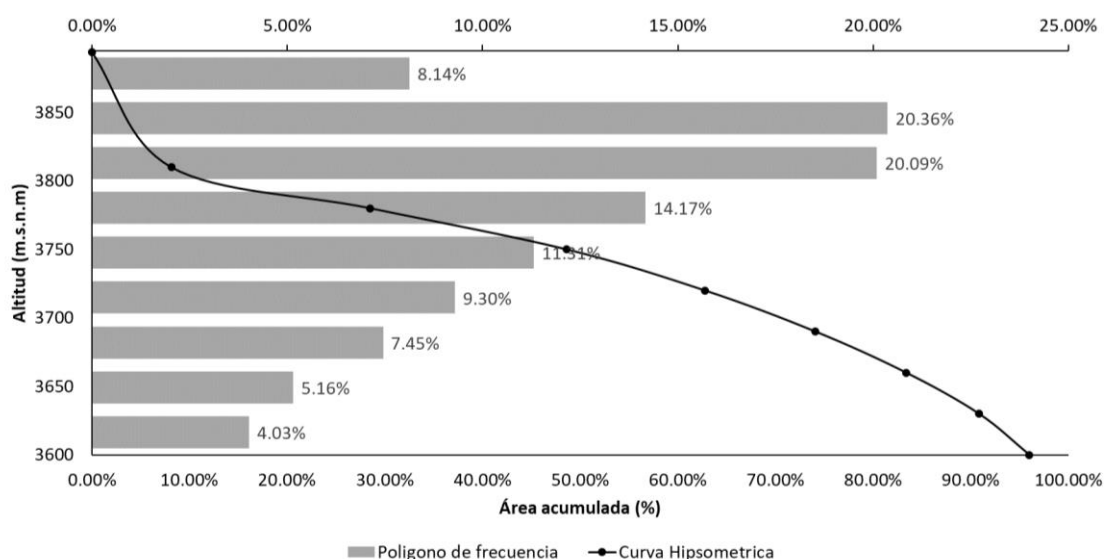
Parámetros de relieve	Valor	Unidad
Cota Mínima	3535	m.s.n.m.
Cota Máxima	3894	m.s.n.m.
Desnivel total de la Cuenca	359	m
Elevación Media de la Cuenca	3746.64	m.s.n.m.
Elevación Mediana de la Cuenca	3734.16	m.s.n.m.
Pendiente media de la Cuenca	13.53	%

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Asimismo, la curva hipsométrica nos indica el estado de equilibrio dinámico de la microcuenca de estudio (Figura 12), por lo tanto, se interpreta que corresponde a una microcuenca en fase de madurez, esta es característico de una cuenca en equilibrio. En cuanto al polígono de frecuencias (Figura 12), de acuerdo al porcentaje determinado, siendo una microcuenca madura la mayor parte del área total se encuentra a una altitud entre 3780 m.s.n.m. hasta los 3810 m.s.n.m.

**Figura 12.** Curva Hipsométrica y polígono de frecuencias de la zona de estudio.



Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

### Parámetros de Drenaje

El número de orden de los cursos de agua está relacionado con el número de ramificaciones de la red de drenaje, siendo para la zona de estudio el número máximo de orden 4 (Figura 13), lo cual, con respecto a la clasificación del tipo de corrientes se determina un grado de bifurcación alto. A mayor número de orden, es mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por lo tanto es mayor también el componente de escurrimiento directo (F. J. Gaspari et al., 2013).

La longitud total de la red hídrica es de 15.97 km, valor utilizado para el cálculo de la densidad de drenaje de la microcuenca. La microcuenca tiene una densidad de drenaje de 2.32 km de río por km<sup>2</sup>, de acuerdo a (Miguel, 2014), cuyo valor se encuentra en la categoría “Alto”, por ende, presenta alta tendencia a fluir y a las inundaciones.

**Tabla 4.** Parámetros de drenaje de la zona de estudio.

Parámetros de drenaje	Valor	Unidad
Orden de la Red Hídrica	4	
Longitud total de ríos	Orden 1	Km
	Orden 2	Km
	Orden 3	Km
	Orden 4	Km
Longitud de cauce principal	3.99	Km
Longitud de la Red Hídrica	15.97	Km
Densidad de drenaje	2.32	Km/Km <sup>2</sup>
Extensión media de Escurrimiento	0.11	Km
Pendiente media del cauce principal	19.36	%
Sinuosidad del Cauce Principal	1.29	
Coeficiente de Torrencialidad	3.48	Ríos/Km <sup>2</sup>

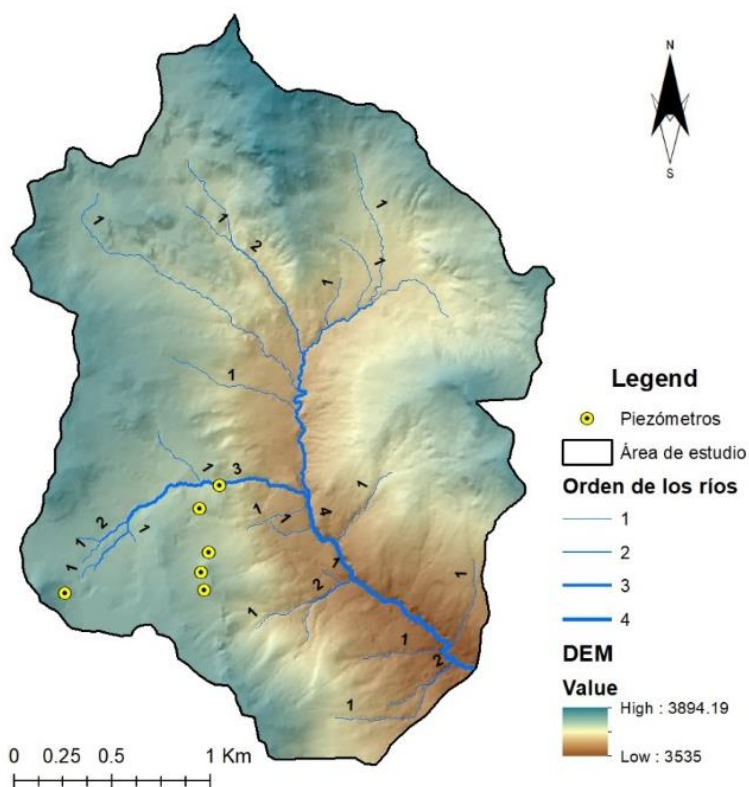
**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

La zona de estudio presenta un coeficiente de torrencialidad de 3.48 Ríos/Km<sup>2</sup>, de la misma manera el cauce principal tiene una sinuosidad de 1.29, y presenta una pendiente media del cauce principal de 19.36%.



**Figura 13.** Número de orden de los cursos de agua de la zona de estudio.



**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

### 3.7.3. CAUDALES

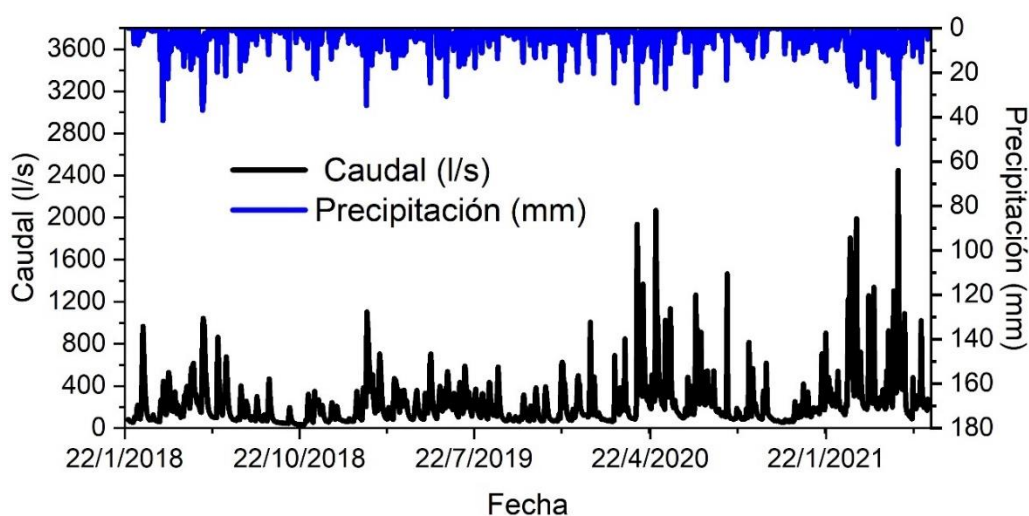
Dentro de la zona de estudio existen 4 estaciones operativas de monitoreo de caudal denominados D1 Bombas, D1, D2 y Quinahuayco (Figura 1), cuya finalidad es de caracterizar los diferentes tipos de flujo que ocurren a lo largo del año hidrológico como resultado de las variaciones temporales en el clima y precipitación. Estos son monitoreados a alta resolución temporal (15 min), y están conformadas por vertederos de concreto triangulares y rectangulares que ayudan a mejorar la precisión de las mediciones al tener una sección de control estable y sensores electrónicos (transductores de presión sumergidos) de marca Global Water, modelo WL-16-015-025, que permiten registrar automáticamente el nivel de agua que fluye sobre los vertederos a alta frecuencia temporal. La descarga de los datos de los sensores electrónicos se realizó de manera quincenal, posteriormente los datos de nivel de agua fueron sometidos a un exhaustivo control de calidad antes de ser incluido a la base de datos hidrológica de DPMECUADOR S.A., este control de calidad incluyó la revisión de la



dinámica del nivel de agua en relación a la lluvia registrada y que no existan diferencias significativas entre el nivel de agua registrados y los niveles tomados a mano con un flexómetro al momento de la descarga.

La información de caudal diaria para el presente estudio fue obtenido de la base de datos de la estación de monitoreo de control denominado MA2 de DPMECUADOR S.A., realizado para el Estudio de Impacto Ambiental para la fase de Explotación y beneficio del proyecto estratégico Loma Larga, el cual no se dispone de datos históricos pero se midieron caudales con aforos diarios a través del método velocidad superficie, con el uso de un molinete Magna Rod de marca Hyquest Solutions, el cual mide velocidad del agua y la profundidad, por alrededor de un mes, mismos que fueron usados como referencia para estimar y rellenar series de caudales diarios usando modelos hidrológicos, en este caso fue procesado con el modelo HEC-HMS (modelo desarrollado por el cuerpo de ingenieros de las fuerzas armadas de los Estados Unidos) a partir de datos de precipitación y evapotranspiración de referencia durante el periodo 2008 – 2021 y fueron correlacionados con las 4 estaciones de monitoreo de referencia antes mencionadas (D1 Bombas, D1, D2 y Quinahuayco), además cabe mencionar que este proceso incluyó el proceso de calibración y validación del modelo.

**Figura 14.** Precipitación y caudal diario de la estación MA2 ubicado a la salida de la zona de estudio.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

La Figura 14 muestra que los valores más altos de caudal se presentan en los meses de febrero a julio, mientras que los más bajos se dan de septiembre a noviembre. La Figura 14 también muestra que existen valores máximos por encima de  $2400 \text{ l s}^{-1}$ , el régimen hidrológico está dominado por caudales bajos menores a  $32 \text{ l s}^{-1}$ . El caudal promedio anual es de  $238.157 \text{ l s}^{-1}$ .

### 3.8. HIDROGEOLOGÍA

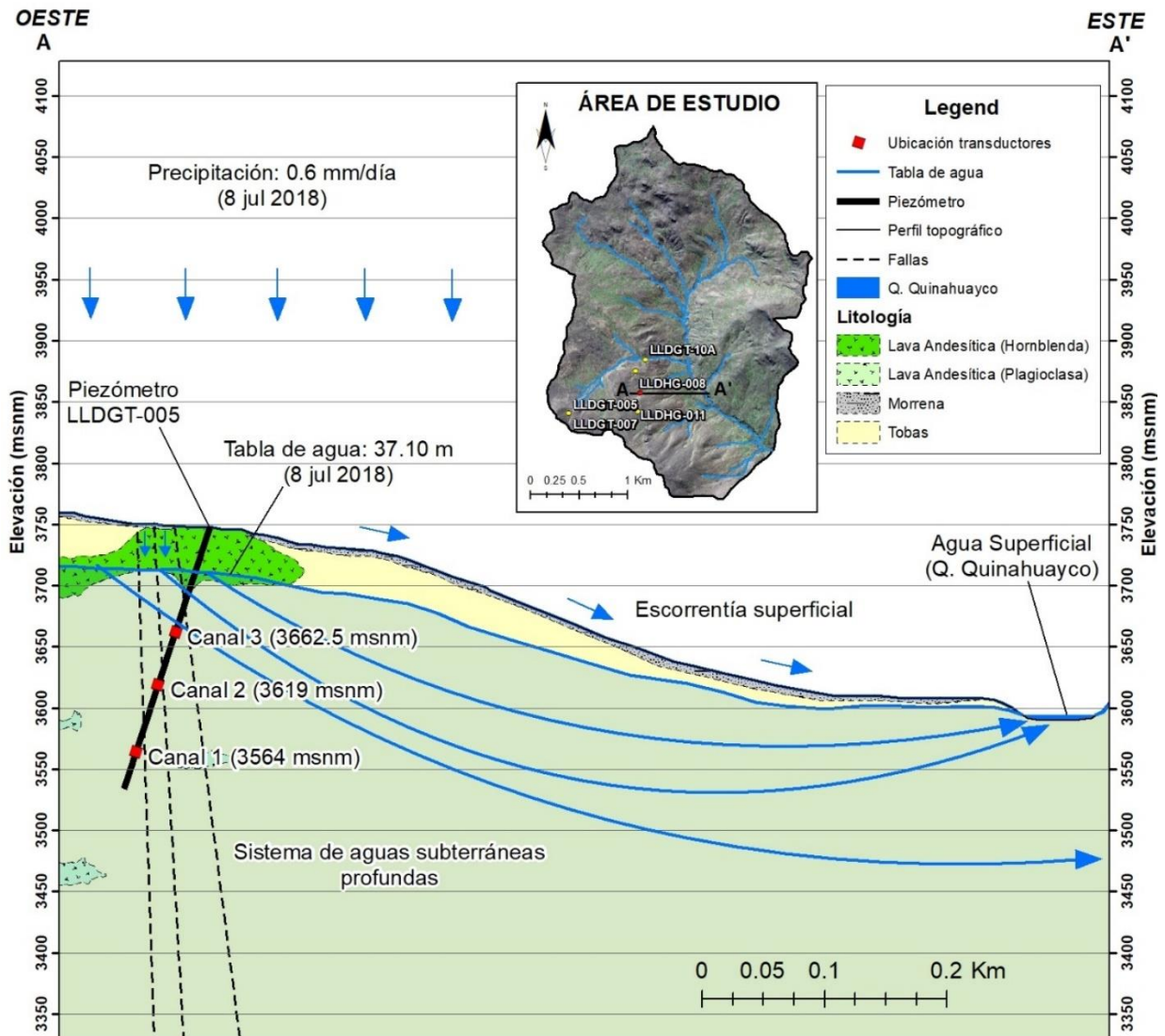
De acuerdo al informe de investigación de actividades hidrogeológicas de campo realizado por (Itasca Denver, 2017), indican que en la zona de estudio existen dos sistemas de aguas subterráneas que se presentan de forma separada, el primero corresponde al sistema de páramo poco profundo y otro al sistema de roca profunda. Estos dos sistemas de aguas subterráneas están separados por una zona gruesa no saturada formada por roca madre, por tal motivo estos dos sistemas no se encuentran conectados hidráulicamente.

Además, podrían ser diferentes entre sí en términos de química, edad y movilidad. El sistema poco profundo al estar asociado con cuerpos de agua superficial y precipitación no se denomina "acuífero". De manera similar, el sistema de aguas subterráneas de roca profunda tampoco se denominaría "acuífero" debido al pequeño volumen de agua que se encuentra presente en las zonas de fractura. De acuerdo a las pruebas hidráulicas (mediciones de test de packer) realizado, se ha determinado que en el sistema de roca profunda la conductividad hidráulica tiene un valor  $K$  medio de  $4.0 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ , este flujo de agua subterránea está controlado por la densidad de las fracturas y el tipo de alteración, es decir que se encuentra en un rango de muy bajo a bajo en comparación a los rangos globales de los valores de  $K$ . Las rocas silíceas fracturadas tienen el valor  $K$  más alto (alteración 100% silíceo) con un valor de  $1.1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ , mientras que las rocas con alteración arcillosa tienen el valor más bajo, donde los valores obtenidos fueron de  $3.3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ .

Los niveles de agua dentro del sistema de roca profunda están aproximadamente a 50 metros por debajo de la superficie del suelo, con gradientes descendentes. Como tal,

los cambios importantes en los niveles de agua del sistema de aguas subterráneas de roca profunda (por ejemplo, debido a la deshidratación de la mina) probablemente tendrán poco impacto en el sistema de Páramo poco profundo (Itasca Denver, 2017).

**Figura 15.** Sistema conceptual de aguas subterráneas de la zona de estudio.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

En el sistema conceptual de las aguas subterráneas que forma parte de la zona de estudio (Figura 15), la parte superior corresponde a páramo superficial se encuentra separado por una capa de roca impermeable donde este sistema no se encuentra conectado hidráulicamente con el sistema inferior de aguas subterráneas, entre los dos sistemas existe una capa insaturada (impermeable) con un espesor de

aproximadamente 50 metros de profundidad, en tal sentido, los niveles de agua es registrado periódicamente (cada hora) a través de 5 dataloggers que conforman la red piezométrica existente, en cuanto a la lluvia intercepta directamente en el suelo, se satura y escurre aguas abajo por gravedad de acuerdo a la topografía y en dirección a los cuerpos de agua superficiales (Quebrada Quinahuayco); el movimiento del agua que es mínima ocurre solamente a través de las zona de fractura y fallas geológicas por donde se conecta el agua desde la superficie hasta el sistema de roca profunda, como también debemos tener en cuenta que estas aguas también alimentan al sistema regional de aguas subterráneas (descargas).

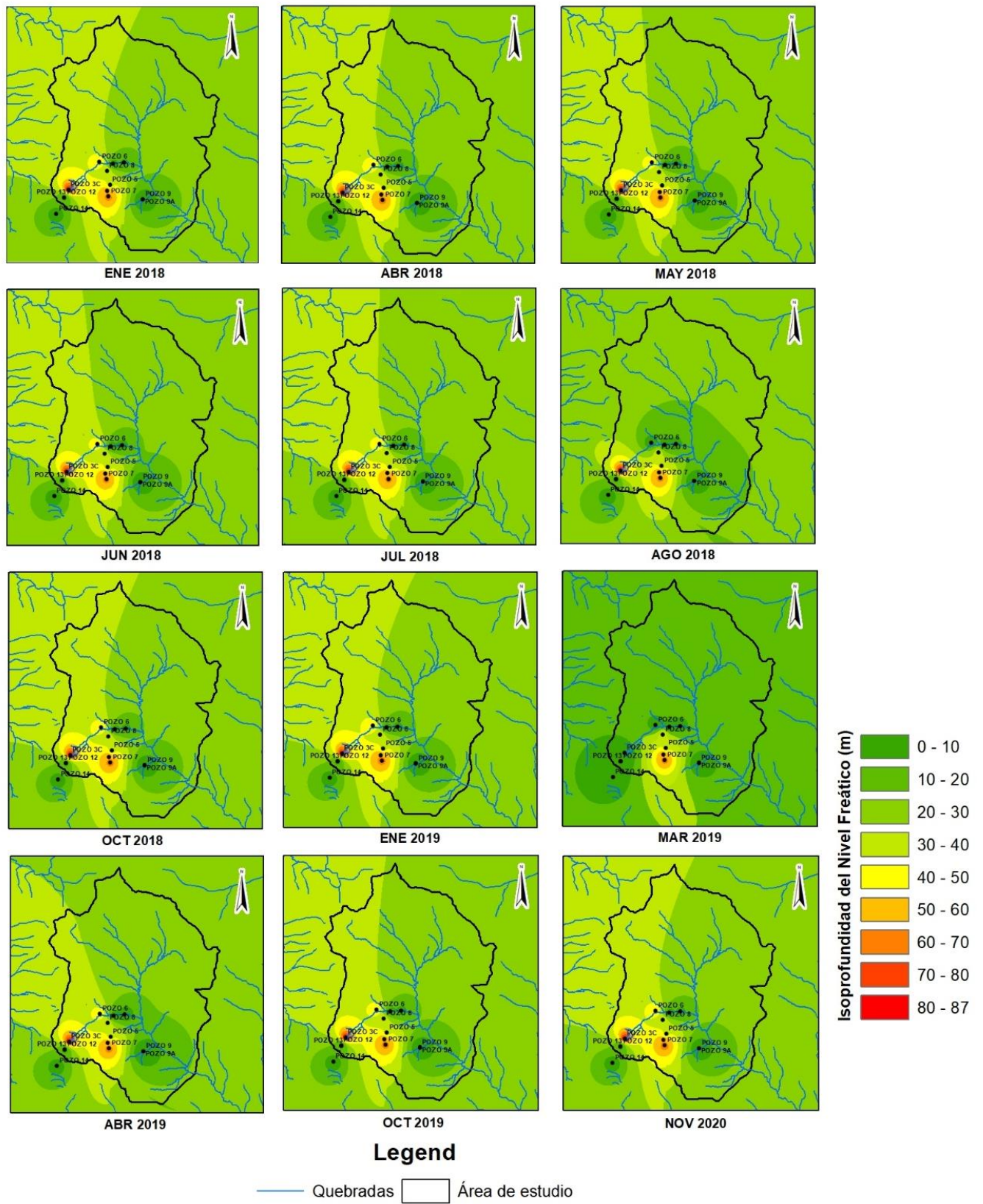
### 3.8.1. NIVELES DE AGUA

Las curvas de isoprofundidad muestra la distribución espacial de la profundidad a la que se encuentra el nivel freático bajo la superficie del suelo, las áreas que se encuentran entre colores diferentes de isoprofundidad (Figura 16) indica que el nivel freático se encuentra dentro de los mismos rangos (Salgado S, 2018), también esta diferencia de colores muestra las curvas de isoprofundidad de los dos sistemas de aguas subterráneas existentes, es decir, el sistema de Páramo poco profundo que tiene niveles de agua que están en la superficie del suelo y el sistema de roca profunda que tiene niveles de agua que están 50 metros debajo de la superficie del suelo (Itasca Denver, 2017).

De acuerdo a los siguientes mapas de isoprofundidad (Figura 16), se ha registrado una profundidad mínima de 0.56 m (nivel alto de la tabla de agua) en abril del 2018 en el piezómetro LLDHG-10A, mismo que se encuentra ubicado en el sistema de páramo poco profundo, sin embargo, se ha registrado una profundidad máxima de 88.69 m (nivel bajo de la tabla de agua) desde la superficie en el mes de abril del 2019 en el piezómetro LLDGT-03C.



Figura 16. Curvas de isopropfundidad del nivel freático en la zona de estudio.



Fuente: DPMECUADOR S.A.  
Elaboración: El Autor

En la Tabla 5, se indica los datos observados de la variación de los niveles de agua en los piezómetros poco profundos y profundos durante el periodo de estudio.

**Tabla 5.** Especificaciones de los niveles de agua de los piezómetros pocos profundos y profundos.

Piezómetro	Coordenadas WGS84		Consideración	Tipo	Nivel de agua (m)		Variación de nivel de agua (m)
	X	Y			Máximo	Mínimo	
LLDGT-03C	697702	9663122	Profundo	Tubo abierto	88.69	87.50	1.19
LLDGT-006	698202	9663573	Profundo	Tubo abierto	50.24	47.74	2.50
LLDHG-009	698902	9662959	Poco profundo	Tubo abierto	4.08	2.56	1.52
LLDHG-09A	698903	9662962	Poco Profundo	Tubo abierto	1.91	1.28	0.63
LLDHG-010	698603	9663557	Poco Profundo	Tubo abierto	7.22	4.84	2.38
LLDHG-10A	698424	9663541	Poco Profundo	Tubo abierto	1.89	0.56	1.33
LLDHG-013	697633	9662990	Profundo	Tubo abierto	8.00	6.25	1.75
LLDHG-014	697509	9662730	Profundo	Tubo abierto	2.21	1.29	0.92
LLDGT-005	698372	9663202	Profundo	Cuerda vibrante	36.75	35.50	1.25
LLDGT-007	698347	9663007	Profundo	Cuerda vibrante	65.58	64.22	1.36
LLDHG-008	698322	9663422	Profundo	Cuerda vibrante	38.67	37.41	1.26
LLDHG-011	698330	9663096	Profundo	Cuerda vibrante	61.80	60.63	1.18
LLDHG-012	697636	9662991	Profundo	Cuerda vibrante	7.54	6.20	1.34

**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

### 3.8.2. SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS POCO PROFUNDAS DE PÁRAMO

El entorno geológico del sistema de aguas subterráneas poco profundas consiste en un conjunto de suelo y vegetación denominado "Páramo", este sistema es relativamente delgado, con un promedio que va de 1 a 3 m de profundidad, pero tiene una alta porosidad y una gran capacidad de retención de agua. Se asienta sobre un lecho de roca no saturado y relativamente impermeable, lo que no permite que el Páramo drene o se desature adecuadamente. Los frecuentes eventos de precipitación asociados con el sitio del proyecto aseguran que el sistema de Páramo permanezca saturado todo el año. Este sistema de Páramo poco profundo sirve como fuente principal de suministro para los arroyos y los elementos de agua superficial, proporcionando un suministro de flujo base casi constante a los cuerpos de agua superficial durante los períodos secos. El Páramo obtiene casi todo su suministro de agua de las precipitaciones superficiales directas. La

evidencia de la compartimentación de los sistemas de agua subterránea del Páramo superficial (poco profundo) y de la roca profunda puede encontrarse examinando los niveles de agua en la red piezométrica instalados en la zona de estudio. En cada piezómetro profundo, el nivel de agua medido es significativamente más profundo que la superficie del suelo, lo que indica que el agua subterránea del sistema de roca profunda no está fluyendo hacia arriba o recargando el sistema de Páramo superficial. El modelo hidrogeológico conceptual (Figura 17) para el sistema de aguas subterráneas del Páramo poco profundo puede resumirse como sigue:

- La fuente principal y exclusiva de abastecimiento de agua del sistema de Páramo es la precipitación en forma de lluvia, niebla y neblina. Las precipitaciones son frecuentes y los efectos de la estacionalidad son bajos debido a las condiciones ecuatoriales.
- Los frecuentes aportes de precipitaciones al sistema del Páramo sustentan un exuberante y denso conjunto de vegetación que actúa como elemento de retención de agua. Como una gran proporción del sistema de Páramo consiste en vegetación viva o muerta, la porosidad general de este material es muy alta y puede retener grandes cantidades de agua.
- La superficie del lecho rocoso que subyace al sistema de Páramo es relativamente impermeable. Cualquier valor de  $K$  en esta superficie de roca madre es el resultado de fracturas y no de la porosidad efectiva.
- El sistema de Páramo está permanentemente saturado, con niveles de agua cerca o por encima de la superficie del suelo. Muchos lugares de la superficie del Páramo tienen agua visible estancada y fluyendo. Como las precipitaciones son frecuentes y el lecho rocoso subyacente no es permeable, la mayor parte del agua de las precipitaciones que entra en el sistema del Páramo se desplaza lateralmente cuesta abajo en forma de pequeños arroyos que alimentan a quebradas y ríos.
- Aunque la mayor parte del agua que entra en el sistema del Páramo se descarga lateralmente, se produce alguna recarga en el sistema inferior de roca fracturada. Esta cantidad de recarga es probablemente muy pequeña y la vía de



recarga consiste en pequeñas y estrechas fracturas que transmiten el agua 50 metros hacia abajo hasta el nivel freático de la roca profunda.

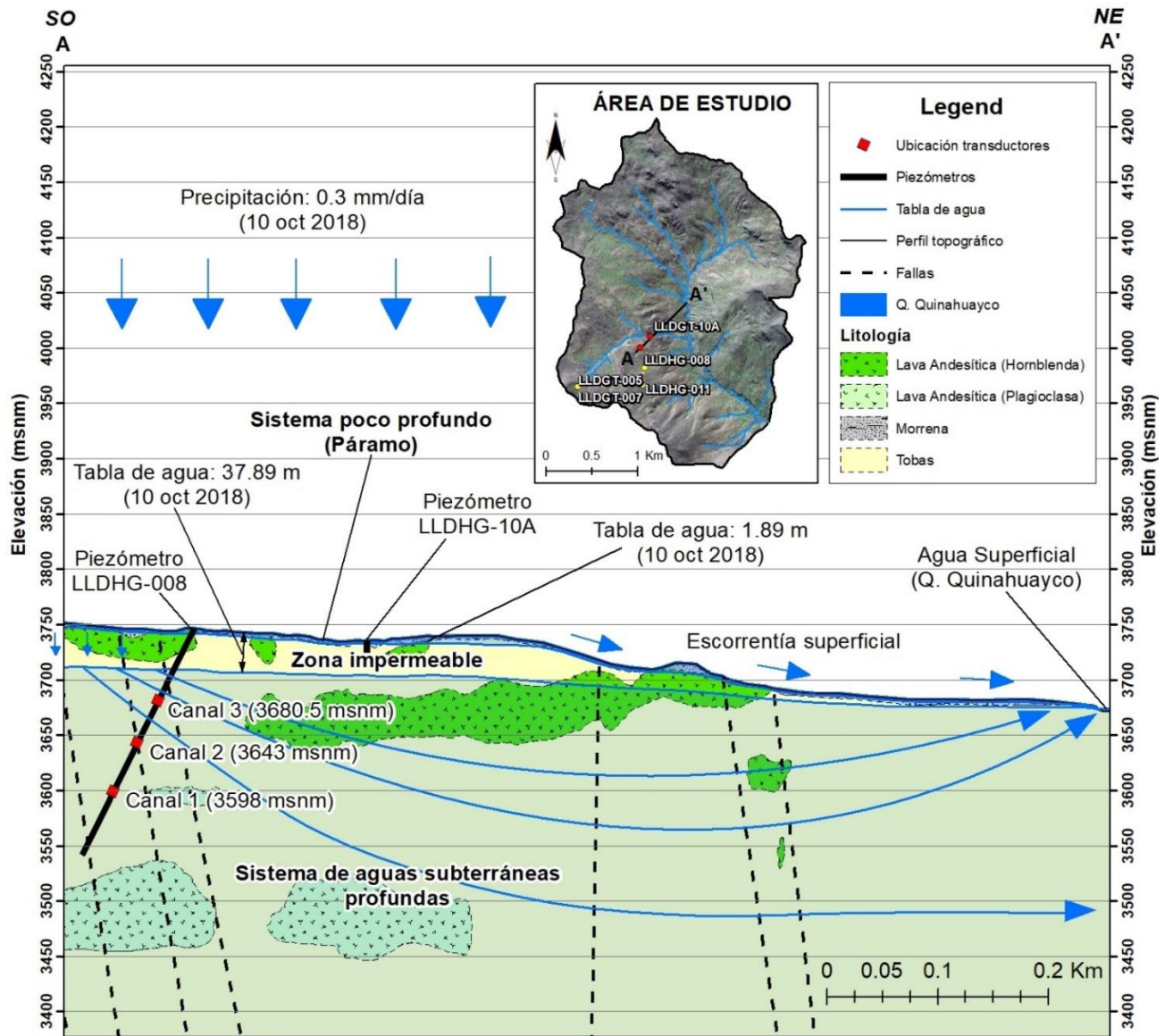
- El agua se mueve hacia abajo a través de esta zona no saturada o "vadosa" por gravedad. Como esta zona no está saturada, la velocidad a la que el agua se desplaza hacia abajo no se ve afectada por la profundidad del nivel freático. El nivel freático profundo podría fluctuar hacia arriba o hacia abajo y la velocidad a la que drena el sistema del Páramo no se vería afectada (Itasca Denver, 2017).

### 3.8.3. SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PROFUNDAS

Este sistema no es un acuífero, ya que el volumen de agua referente al volumen de roca es muy pequeño. El agua subterránea se produce en este sistema principalmente en una red de finas fracturas y zonas de fallas llenas de grietas, esta red de fracturas está generalmente interconectada, aunque es probable que algunas fracturas estén aisladas. Se puede encontrar agua secundaria en los minerales de alteración de la arcilla y en las cavidades de disolución, pero estas fuentes secundarias son limitadas y no están generalmente bien conectadas con las fuentes primarias de la red de fracturas.

El nivel freático dentro de la red de fracturas se encuentra generalmente a 50 metros bajo la superficie del suelo o más profundo, según los datos de niveles de agua observados en la red piezométrica. En general, el sistema de aguas subterráneas profundas muestra fuertes gradientes descendientes, lo que indica que el área de estudio es una zona de recarga de aguas subterráneas y que estas aguas subterráneas profundas se mueven generalmente hacia abajo y lateralmente hacia los puntos de descarga situados en los flancos de menor elevación (Itasca Denver, 2017).

**Figura 17.** Sistema conceptual de aguas subterráneas poco profundas (zona de Páramo) y de roca profunda de la zona de estudio.



Fuente: DPMECUADOR S.A.  
Elaboración: El Autor

## CAPITULO 3

### MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la zona del Proyecto Loma Larga, zona de páramo ubicado en la parte alta de la microcuenca del Río Irquis (Figura 11). Este capítulo describe los diferentes métodos utilizados para obtener la información necesaria para la aplicación en el modelo WTFR (Water Table Fluctuation Regression) en la zona de estudio del proyecto minero Loma Larga, iniciando con la descripción de la instrumentación y disponibilidad de los datos meteorológicos e hidrogeológicos, control de calidad de la información y relleno de datos con información de estaciones cercanas a la zona de estudio. Además, se describe la metodología WTFR a utilizar y su aplicación, conjuntamente con los diferentes parámetros comprendidos en cada uno de los modelos de recesión Natural, Dinámica y de Leakeance.

#### 3.2. ACCESO A LA INFORMACIÓN

La mayor parte de la información utilizada para la realización de este proyecto es de propiedad de la empresa DPMECUADOR S.A. El resultado de la presente investigación está disponible para ser utilizada como material de consulta y apoyo. Los datos procesados para la aplicación en los diferentes métodos quedan a disposición de la empresa para hacer uso en los respectivos análisis que requiera.

#### 3.3. INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

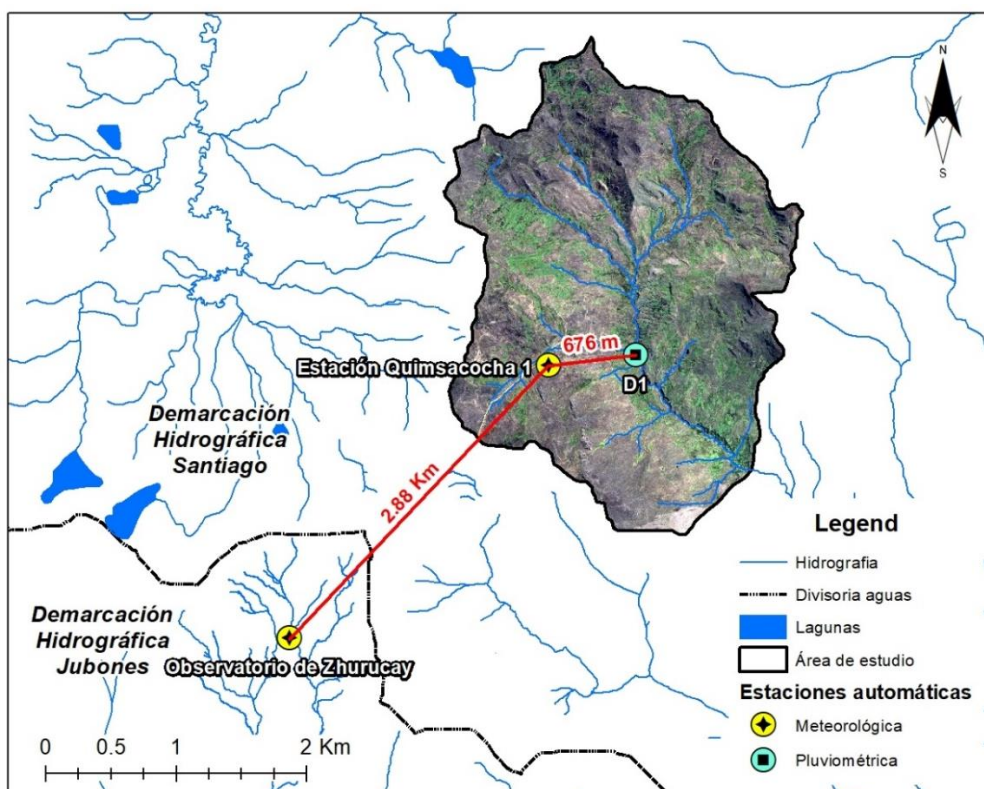
##### 3.3.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Para la realización del presente trabajo, los datos climáticos utilizados fueron obtenidos de 3 estaciones locales, como estación principal se encuentra la Estación Quimsacocha 1 que se ubica dentro de la zona del proyecto Loma Larga (zona de estudio), sin embargo, un periodo corto de datos climáticos fue obtenida del Observatorio de

Zhurucay de propiedad del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA), que se encuentra a 2.88 Km al Suroeste; de igual manera de la estación denominada D1 del Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS), que se localiza a 676 m al Este, estas distancias son en relación a la estación principal Quimsacocha 1 y pertenecen a la Universidad de Cuenca. La ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas se puede observar en la Figura 18 y la disponibilidad de información en la Tabla 21.

En el presente trabajo no se utilizó información de las estaciones del INAMHI más cercanas al área de estudio como la de Girón y Santa Isabel, puesto a que se encuentran en rangos altitudinales y geográficos muy diversos a las características del lugar y por lo tanto no permite su aplicabilidad en esta zona.

**Figura 18.** Ubicación de estaciones meteorológicas locales. La distancia entre la Estación Quimsacocha 1 (zona de estudio) y la estación meteorológica del Observatorio Zhurucay de iDRHICA de la Universidad de Cuenca es de 2.88 Km, mientras que la estación pluviométrica D1 se encuentra dentro de la zona de estudio, misma que manejada por el PROMAS de la Universidad de Cuenca.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019. PROMAS, Base de Datos de Precipitación, 2017-2019

**Elaboración:** El Autor

### *Equipos meteorológicos*

La empresa DPMECUADOR S.A. cuenta con una estación meteorológica de marca Campbell Scientific, modelo 300 series, colocado a 1.50 metros sobre el nivel del suelo. La estación está equipada con un pluviómetro TR525mm - Texas Electronics, un piranómetro CS320 – Campbell Scientific, un anemómetro y veleta C0348 - Met One, un sensor combinado de humedad relativa y temperatura del aire EE181-L – Campbell Scientific, cuya resolución de registro de datos es de 5 minutos, sin embargo, debido a que al inicio del periodo establecido para el estudio aún no se disponía de dicha estación se procedió a solicitar un periodo corto de información faltante al Observatorio científico Zhurucay perteneciente al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca, donde cuyos sensores de medición son: pluviómetro TE525MM de Texas Electronics, un piranómetro CS300 - Campbell Scientific, un anemómetro y veleta Met One 34B - Windset Campbell Scientific, un sensor combinado de humedad relativa y temperatura del aire CS2150 - Temperature and Relative Humidity probe, Campbell Scientific y se encuentran asociados a un datalogger CR1000 – Measurement and Control Datalogger, Campbell Scientific (Córdova et al., 2013), finalmente los datos de lluvia para completar el periodo establecido se obtuvo de un pluviómetro denominado D1, de marca Davis, de cubeta basculante con una precisión de 0.2mm, utiliza un datalogger de marca Onset-Hobo modelo UA-003-64 perteneciente al Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca (Tabla 22).

Considerando que para el análisis climatológico, especialmente para la aplicación de la metodología WTRF se requiere de datos completos durante el periodo Enero 2018 – Junio 2021, y de las demás variables requeridas para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia ETo, como temperatura (media, máxima y mínima), humedad relativa, velocidad y dirección del viento, en la Tabla 22 se muestra la disponibilidad de información de las variables registradas en la estación Quimsacocha 1 y los datos que fueron rellenados con las estaciones locales citadas anteriormente.



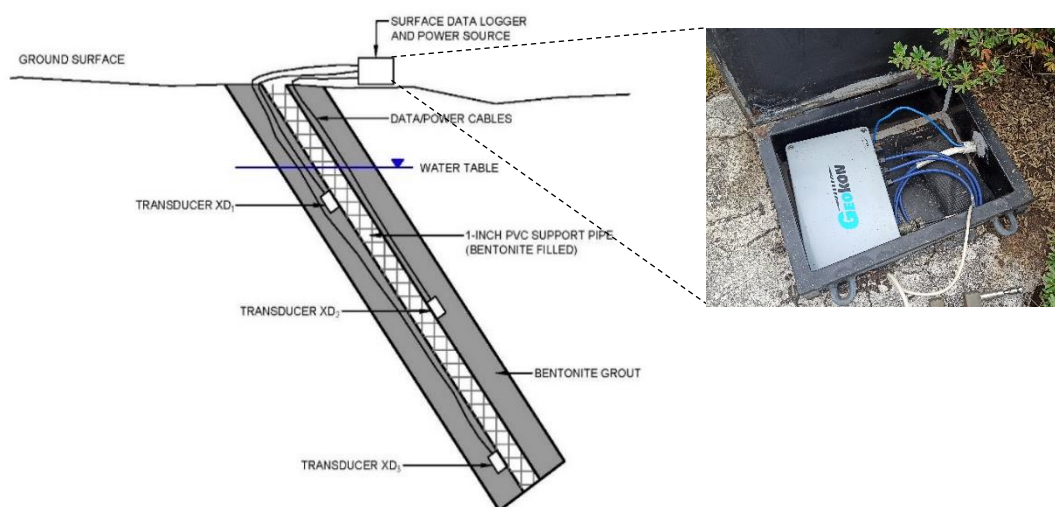
### 3.3.2. RED PIEZOMÉTRICA

En la zona de estudio, para el registro continuo de información de nivel de agua en los pozos, se utilizan 2 tipos de piezómetros que son los siguientes:

#### *Piezómetros de cuerda vibrante*

Un piezómetro de cuerda vibrante (VW) es un tipo de sensor o transductor electrónico, que se emplea para monitorear los niveles piezométricos de agua en suelos y rocas, así como en pozos de observación, e incluso para conocer el nivel de agua de un río o de un embalse. Registran los cambios en la presión del agua convirtiendo en frecuencia natural de vibración de una cuerda conectada (Sánchez, 2017). Estos piezómetros registran datos de nivel piezométrico (m H<sub>2</sub>O) y la temperatura (°C) de los pozos de monitoreo, se cuenta con una red de cinco piezómetros instalados a nivel de toda la zona de estudio (Tabla 6), los datos son registrados mediante transductores que se encuentran ubicados a diferentes profundidades de los pozos (Figura 19), generalmente están asociados a zonas con movimiento de agua, fallas y fracturas; esta información es almacenada temporalmente en Dataloggers de cuerda vibrante (VW) de 4 canales, de marca Geokon, modelo 8002-4-1 (LC-2x4).

**Figura 19.** Detalles de los piezómetros de cuerda vibrante.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** (Itasca Denver, 2017).

Estos datos de frecuencia generalmente sirven para determinar flujos de agua y la variación de la tabla de agua de cada piezómetro, se dispone de datos diarios durante el periodo 2018-2021. La profundidad donde se encuentran ubicados los transductores se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Especificaciones de la ubicación (profundidad) de cada uno de los transductores por piezómetro.

PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE (VW)							
Código Piezómetro	Coordenadas WGS84		Profundidad del pozo (m)	Inclinación (°)	Profundidad transductores (m)		
	X	Y			Canal 1	Canal 2	Canal 3
LLDGT-005	698372	9663202	220.70	-70	183.00	128.00	84.50
LLDGT-007	698347	9663007	213.30	-70	185.00	150.00	-
LLDHG-008	698322	9663422	231.30	-60	150.00	105.00	67.50
LLDHG-011	698330	9663096	208.79	-74	-	-	110.00
LLDHG-012	697636	9662991	109.73	-80	106.00	97.00	79.00

- : No hay instalado transductor

**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

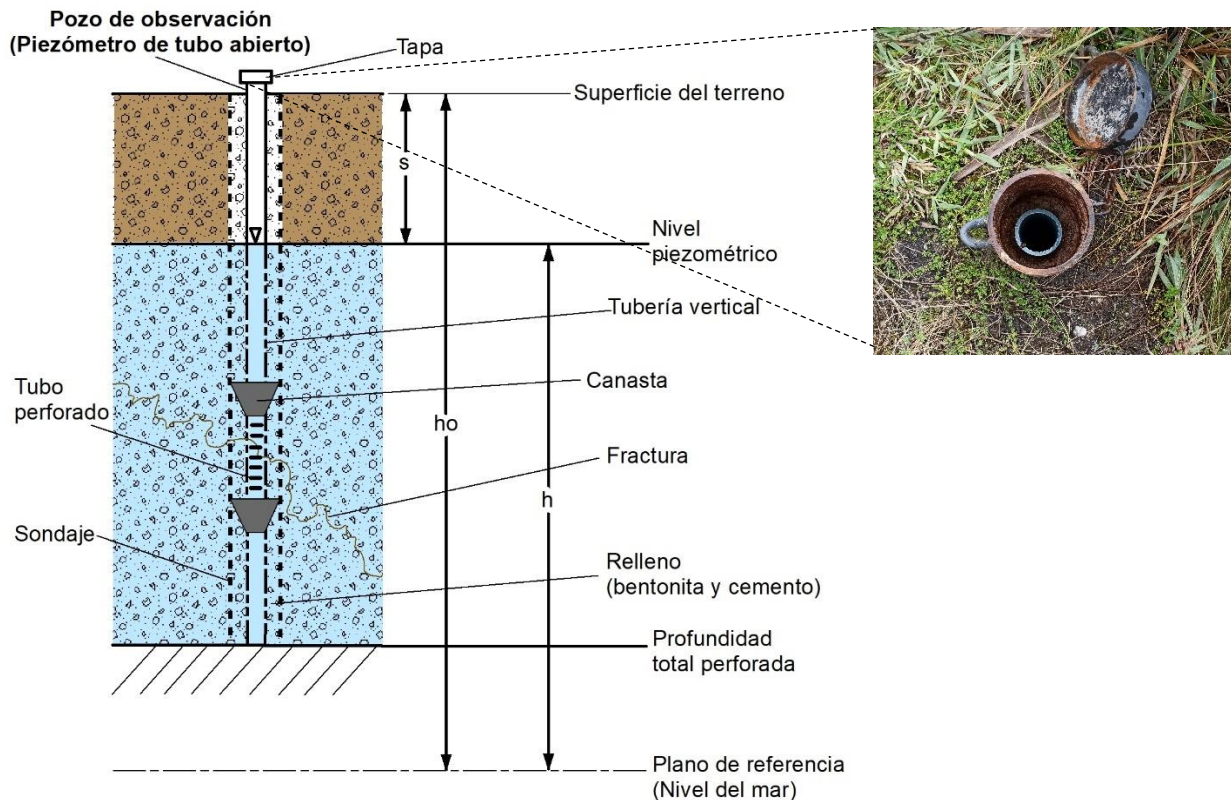
**Elaboración:** DPMECUADOR S.A.

### *Piezómetros de tubo abierto*

Consisten en perforaciones o sondeos que atraviesan el nivel freático seguido por la inserción de tubería vertical de tubo PVC hidráulico de 2" de diámetro, conectada a un elemento poroso en su parte ranurada para que pueda ingresar el agua subterránea que se requiere medir (Figura 20), son sellados con bentonita y asilado con canastas por encima de esa zona para separar de otras capas y evitar flujos verticales provenientes de otros estratos que pudieran generar mediciones erróneas. El agua que ingresa a través de su parte ranurada forma una columna de agua en su interior, que se eleva hasta la altura equivalente a la presión en los poros en la zona de admisión (Sánchez, 2017).



Figura 20. Detalles de los piezómetros de tubo abierto.



Fuente: DPMECUADOR S.A.

Elaboración: El Autor

En la zona de estudio se cuenta con 8 piezómetros de este tipo, cuya finalidad de estos es para monitorear los niveles de agua (metros) a través de una sonda hidronivel desde la superficie del suelo hasta el espejo de agua, como también los parámetros físicos mediante un multiparámetro como: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Sólidos disueltos (ppm) y pH. En ese contexto, se dispone de información durante el periodo 2018-2021, con una frecuencia de monitoreo trimestral. En la Tabla 7 se detalla la profundidad de la red piezométrica existente.

**Tabla 7.** Especificaciones de la ubicación (profundidad) de los transductores por piezómetro.

PIEZÓMETROS DE CALIDAD DE AGUA (WQ)						
Piezómetro	Coordenadas WGS84		Profundidad (m)	Inclinación (°)	Canasta (m)	Consideración
	X	Y				
LLDGT-03C	697702	9663122	134.20	-90	60.00	Profundo
LLDGT-006	698202	9663573	231.04	-60	60.00	Profundo
LLDHG-009	698902	9662959	22.86	-90	18.00	Poco profundo
LLDHG-09A	698903	9662962	12.50	-90	12.00	Poco profundo
LLDHG-010	698603	9663557	15.24	-90	16.00	Poco profundo
LLDHG-10A	698424	9663541	2.20	-90	1.00	Poco profundo
LLDHG-013	697633	9662990	156.98	-75	90.00	Profundo
LLDHG-014	697509	9662730	60.85	-90	35.00	Profundo

**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** DPMECUADOR S.A. y El Autor.

Para el presente estudio solamente se utilizó datos de nivel freático del piezómetro LLDHG-10A durante el periodo 2018-2021, mismo que fue requerido para poder acoplar el sistema superior (poco profundo) de aguas subterráneas con el sistema inferior (profundo).

### 3.3.3. RED HIDROLÓGICA

Para el registro y medición de caudal se cuenta con una red de vertederos de cresta delgada de sección triangular y rectangular que se encuentran contruidos sobre muros de hormigón ciclópeo, estas 4 estaciones de monitoreo son denominados D1 Bombas, D1, D2 y Quinuahuaycu, a través de sensores automáticos de presión de marca Global Water, modelo WL16U-015-025, registran datos de nivel de agua, por ende se cuenta con una base de datos de caudal en  $l\ s^{-1}$  con una resolución temporal igual a 15 minutos durante el periodo 2018-2021.

## 3.4. TRATAMIENTO DE DATOS

### 3.4.1. ESCALA DE TIEMPO

Para poder realizar los distintos análisis, ha sido necesario establecer una escala de tiempo para todas las variables registradas, por tal motivo, se estableció los datos a

escala diaria de tiempo desde las 0:00 de un día hasta las 23:00 del mismo día, de esta forma se pudo ver las variaciones diarias del comportamiento de los datos.

### 3.4.2. BASE DE DATOS

La base de datos hidrogeológica y meteorológica con la que cuenta la empresa DPMECUADOR S.A. a nivel del proyecto Loma Larga (zona de estudio) para el levantamiento constante de información de línea base en los páramos, corresponde a datos diarios durante el periodo 2018-2021. En la Figura 21 se detalla la disponibilidad de la información con respecto a cada estación de monitoreo.

**Figura 21.** La información hidrogeológica y meteorológica disponible que fue utilizada en el análisis se representan mediante barras horizontales continuas; los vacíos en las barras representan los periodos que faltan datos observados.

ESTACIÓN DE MONITOREO	2018												2019												2020												2021												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
NIVELES DE AGUA	LLDGT-005	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	LLDGT-007	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	LLDHG-008	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	LLDHG-011	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	LLDHG-012	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	LLDHG-10A*																																																
LLUVIA	QUIMSACocha 1	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	D1	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
CLIMA	QUIMSACocha 1	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											
	ZHURUCAY	[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]												[Barra continua]											

\*: Piezómetro de tubo abierto (convencional).

Fuente: DPMECUADOR S.A.

Elaboración: El Autor

La información climatológica que se detalla en la Figura 22, hace referencia a los datos disponibles de las diferentes variables meteorológicas de las estaciones Quimsacocha 1,

Observatorio de Zhurucay, y D1 (solamente de precipitación), durante el periodo 2018-2021.

**Figura 22.** Información climatológica existente (periodo 2018-2021)

PARÁMETRO	2018												2019												2020												2021											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temperatura	[Red]												[Black]												[Black]												[Black]											
Humedad Relativa	[Red]												[Black]												[Black]												[Black]											
Precipitación	[Blue]												[Black]												[Black]												[Black]											
Radiación Solar	[Red]												[Red]												[Black]												[Black]											
Velocidad del viento	[Red]												[Red]												[Black]												[Black]											
Dirección del viento	[Red]												[Red]												[Black]												[Black]											

- Zhurucay
- Quimsacocha 1
- D1

**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. IDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019. PROMAS, Base de Datos de Precipitación, 2017-2019.

**Elaboración:** El Autor

### 3.4.3. CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

Para el control de la información se ha usado dos tipos de análisis: el primero fue a partir de un control visual de datos levantados y el segundo que exista coherencia en la información, es decir que haya cierta relación en los datos, esto debido a que en las diferentes estaciones de monitoreo se puede dar lugar a un cierto número de errores de observación, errores de transcripción, cálculo, entre otros, por tal motivo fue necesario realizar un análisis de consistencia de toda la información disponible para la realización de este estudio.

Durante este proceso también se verificó la existencia de valores extraños que pueden ocurrir por el mal funcionamiento de los equipos. En el caso de que durante la revisión se hayan encontrado valores extraños, el periodo donde ocurrieron no se los tomó en cuenta en ningún calculo relacionado con la variable revisada.

### 3.4.4. RELLENO DE LA INFORMACIÓN

Se ha rellenado los periodos de vacíos de información, usando datos de las estaciones locales más cercanas, aparte de la Estación Quimsacocha 1, como ya se mencionó anteriormente se decidió elegir las 2 estaciones de referencia, la una que se encuentra dentro de la zona de estudio y la otra muy cercana (Figura 18), debido a que ésta cuenta con un periodo más largo de monitoreo. Se rellenó datos de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento en el periodo enero 2018 - diciembre 2018 con la información disponible de la estación meteorológica Zhurucay.

Previo al uso de la información de precipitación se realizó el análisis visual con la ayuda de histogramas y con el coeficiente de correlación, durante el periodo 19 de junio del 2018 – 21 de noviembre del 2019 (Figura 21), entre los medidores TR525mm - Texas Electronics con resolución de 0.1 mm (Estación Quimsacocha 1) y pluviómetro de marca Davis, de cubeta basculante con una precisión de 0.2mm, utiliza un datalogger de marca Onset-Hobo modelo UA-003-64 (Pluviómetro D1-PROMAS), el cual permitió evaluar la consistencia de los datos y cantidad en espacio y tiempo de las mismas.

En el caso de la variable temperatura, luego de un análisis visual con histogramas durante los periodos 15/05/2019 – 07/08/2019 y 15/10/2019 – 27/10/2019 no se pudo rellenar los datos debido a que la estación Zhurucay no dispone de esta información, de igual manera en la humedad relativa en los periodos 31/07/2019 - 07/08/2019 y 14/10/2019 – 27/10/2019 tampoco se pudo rellenar con datos de la estación del Observatorio de Zhurucay.

## 3.5. METODOLOGÍA

En este apartado se trata de dar a conocer sobre la metodología usada para cumplir con los objetivos establecidos para el presente estudio. Primero se realiza una descripción detallada del modelo WTF (Fluctuación del Nivel Freático) y WTFR (Regresión de la Fluctuación del Nivel Freático), este último, se lo acopló a los 2 sistemas de agua subterráneas existentes (poco profundo y profundo). Posteriormente se ahonda en

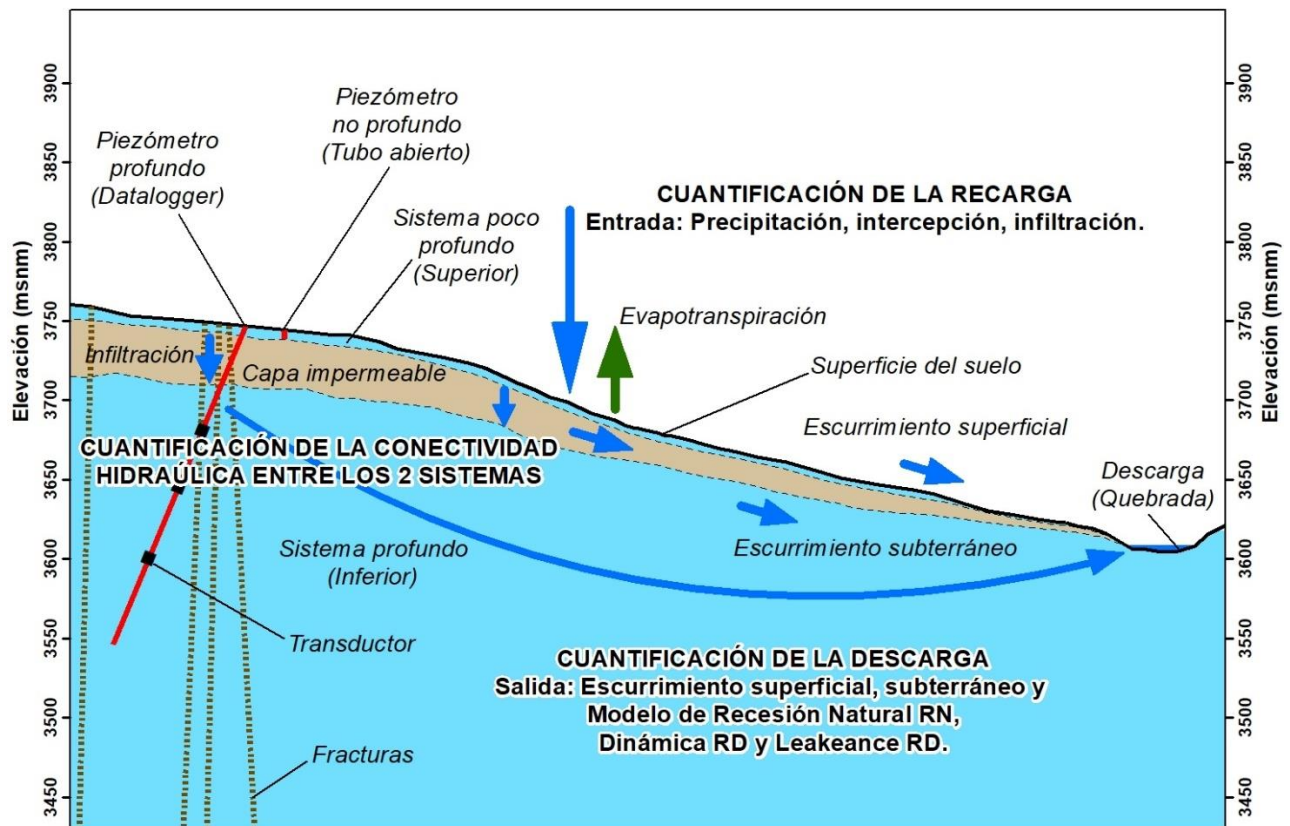
detallar todos los parámetros requeridos para la aplicación en las diferentes ecuaciones. Finalmente se va describir los tres componentes que comprende la recesión, mismos que han sido separados en dos partes: modelos simples con recesión para la parte inferior (Recesión Natural y Recesión Dinámica), y modelo acoplado de recesión para el sistema de aguas subterráneas superior e inferior.

### 3.5.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO WTFR

El método WTF (Fluctuación del Nivel Freático) comprende una de las técnicas más utilizadas para estimar la recarga mediante la evaluación de las fluctuaciones temporales y comportamientos espaciales de los niveles de agua subterránea, considerando que el agua proveniente de la precipitación, tras filtrarse a través del suelo alcanza el nivel de las agua subterráneas, el método presenta mejores resultados cuando se aplica en acuíferos libres debido a la rápida respuesta a los eventos de precipitación (BAUM et al., 2018), está diseñado principalmente para sistemas naturales y no tienen en cuenta las fluctuaciones del nivel del agua de la descarga a escala regional. Para que la aplicación del método WTF sea posible se requiere conocer el rendimiento específico ( $S_y$ ) que se determinará adecuadamente de antemano y las variaciones del nivel freático en el tiempo ( $\Delta H$ ).

El método WTFR, denominado Regresión de la Fluctuación del Nivel Freático acoplado para la descarga en los 2 sistemas de aguas subterráneas (Figura 23), en respuesta a los 2 problemas con los métodos WTF generales mencionados anteriormente, conceptualiza las influencias de pérdidas de agua en periodos mensuales recurrentes, con componentes de la estimación de la recesión. El WTFR es una herramienta eficaz de gestión para las aguas subterráneas y tiene aplicaciones potenciales en múltiples frentes como: a) generación de distribuciones de recarga para modelos de flujo; b) localización de anomalías hidrogeológicas; c) comprensión de las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas; d) localización de zonas hidrogeológicas desconocidas; e) calibración de la descarga agrícola regional; f) sirve como mecanismo de retroalimentación para la asimilación de modelos de aguas subterráneas. (*Water Table Fluctuation Regression (WTFR) User 's Manual Abstract*, 2012).

**Figura 23.** Esquema de interpretación del método WTFR acoplado al sistema de aguas subterráneas superior (sistema poco profundo) e inferior (sistema profundo).



Fuente: DPMECUADOR S.A.

Elaboración: El Autor

En primer lugar, como base del método WTFR, el hidrograma del nivel freático a largo plazo de un solo pozo se define mediante 2 parámetros que son  $\beta$  (eficiencia de infiltración) y  $MD$  (módulo de descarga). El primero es una relación adimensional entre la cantidad de precipitación a lo largo del tiempo y el incremento de la altura de las aguas subterráneas. El segundo corresponde a una matriz de 12 elementos que representa el patrón estacional de la descarga neta de agua, en los doce meses del año.

El método WTFR está diseñado para caracterizar sistemas que son impulsados por procesos de recarga de precipitación y descarga neta de agua (Yang et al., 2018). Los procesos de descarga se conceptualizan en dos componentes, como se muestra en la ecuación (1):

$$S_y \times \Delta H = P \times \alpha - ND - RV \quad (1)$$



Dónde  $S_y$  (*rendimiento específico*), es un parámetro usado en hidrología y gestión del agua para cuantificar los recursos hídricos disponibles en los acuíferos no confinados,  $\Delta H$  es el aumento del nivel de las aguas subterráneas,  $P$  es la precipitación en la zona de estudio,  $\alpha$  es la tasa de infiltración definida con la porción de agua aplicada en la superficie del suelo que llega al acuífero saturado (Pendiuk et al., 2020),  $ND$  es el volumen neto de descarga de agua subterránea por unidad de área, expresado como altura de la columna de agua, representa el efecto combinado del retorno de agua y  $RV$  es el volumen de recesión del agua subterránea por unidad de área, expresado como altura de la columna de agua, también se define como una disminución de la carga debido a los desequilibrios de flujo horizontal según lo regula la Ley de Darcy (Yang et al., 2018b).

En este caso a pesar de que la variable  $ND$  corresponde al volumen de descarga de agua subterránea, actualmente en la zona de estudio no existe un retorno considerable de agua por lo que no se ha considerado este parámetro para el análisis.

Reorganizando la ecuación (1), la ecuación rectora del método WTFR se expresa como:

$$\Delta H = P_i \times \beta - DM_j - R_i \quad (2)$$

Dónde  $\Delta H$  es el cambio del nivel del agua subterránea durante el día,  $P_i$  es la precipitación durante el día,  $\beta$  es la eficiencia de infiltración, definida como la relación del aumento de la carga dividida por la altura de precipitación,  $DM_j$  es el módulo de descarga y  $R_i$  es la recesión del nivel del agua subterránea durante el día.

### 3.5.2. PARÁMETROS DEL MODELO

#### *Beta ( $\beta$ )*

Este parámetro regula la precipitación y cuya estimación de  $\beta$  se lo realiza a partir de la siguiente ecuación (3):

$$\beta = \frac{\alpha}{S_y} \quad (3)$$

Dónde  $\alpha$  es la tasa de infiltración definida como porción de agua en la superficie del suelo que llega al acuífero saturado y  $S_y$  es el rendimiento específico.

### *Módulo de descarga (DM)*

Es definido como la disminución de la carga debido a la descarga neta del acuífero, por lo tanto, dado que actualmente en la zona de estudio no existe la presencia de actividades que representen una pérdida considerable de agua, por tal motivo se consideró valores mínimos del módulo de descarga (DM), referente a un periodo de análisis anual con medias mensuales, sin embargo, al momento de realizar el cálculo multianual asignado a un valor de DM para cada mes nos daría lugar a muchos valores arbitrarios, por lo tanto, asumimos que la estacionalidad de la descarga es consistente, es decir, las cantidades de descarga mensual tienen el mismo patrón cada año. Esta suposición es razonable ya que las probabilidades de situaciones extremas, que alteran en gran medida los patrones de descarga, son mucho más bajas que las condiciones generales en un sistema hidrológico dado. Como resultado, definimos una matriz DM que contiene 12 elementos y cada uno de estos elementos representa un valor mensual recurrente. Estos valores calculados a su vez se utilizan para completar los datos constantes diarios para todo el mes. Este enfoque fortalece en gran medida el patrón estacional y reduce la incertidumbre introducida al definir y resolver los valores de DM individual para cada mes.

### *Rendimiento específico ( $S_y$ )*

El rendimiento específico  $S_y$ , es la fracción de agua que se drenará por gravedad de un volumen de suelo o roca. Se define como la diferencia entre la porosidad total y el contenido de agua a capacidad de campo. La alta variabilidad del rendimiento específico incluso dentro de la misma clase de textura provoca la principal incertidumbre en la determinación de las tasas de recarga mediante el método de fluctuación del nivel freático (Atta-Darkwa, 2013), para lo cual se va usar la siguiente ecuación (4):

$$S_y \times \Delta H = P \times \alpha \quad (4)$$

Dónde  $S_y$  es el rendimiento específico,  $\Delta H$  es el aumento del nivel del agua subterránea,  $P$  es la precipitación acumulada durante el período de aumento del nivel del agua y  $\alpha$  es la tasa de infiltración definida como porción de agua en la superficie del suelo que llega al acuífero saturado (Yang et al., 2018).

### *Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>)*

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), es la tasa de evaporación desde una superficie extensa cubierta por pasto verde (ó cultivo de referencia) de altura uniforme que crece en forma normal, cubre completamente el suelo con su sombra y no carece de agua. Por lo tanto, la ET<sub>o</sub> está determinada únicamente por las condiciones del clima del área de estudio. El método de cálculo utilizado para la determinación de la evapotranspiración de referencia o ET<sub>o</sub> es el de Penman Monteith, los conceptos, ecuaciones y parámetros climáticos que permiten llegar a desarrollar la fórmula del método fueron obtenidos de (Villegas & Torres, 1977), misma que se puede ver en la ecuación (5).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

Dónde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>),  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),  $R_a$  es la radiación extraterrestre (mm día<sup>-1</sup>),  $G$  es el flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),  $T$  es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C),  $U_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>),  $e_s$  es la presión de vapor de saturación (kPa),  $e_a$  es la presión real de vapor (kPa),  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor (kPa),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>) y  $\gamma$  es la constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

Para el cálculo de la recesión de Leakeance, se requiere de la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), mismo que se obtuvo del cálculo de la relación que integra el comportamiento climático, las características de la vegetación y las limitaciones debido a la disponibilidad de agua en la zona de estudio (Torres & Proaño, 2018). La evapotranspiración real ET se expresa de la siguiente manera:

$$ET_r = ET_o \times K_c \times K_s \quad (6)$$

Dónde  $E_{Tr}$  es la evapotranspiración real ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $E_{To}$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $K_c$  es el coeficiente de cultivo y  $K_s$  es el factor de estrés hídrico.

Los valores del coeficiente de cultivo  $K_c$  varían en un rango aproximado de  $0.2 \leq K_c \leq 1.3$ . De acuerdo a las investigaciones realizadas en el páramo por (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006) determinaron valores de  $K_c$  de 0.42 para representar condiciones naturales del ecosistema, con vegetación homogénea y con intervención relativamente por agricultura y ganadería. De igual manera dadas las condiciones de los suelos de páramo, su elevada capacidad de retención de agua, el coeficiente  $K_s$  asumido en los cálculos de evapotranspiración es igual 1 (Torres & Proaño, 2018) . Esto representa un suelo bien humedecido, es decir:

$$E_{Tr} = K_c \cdot E_{To} \quad (7)$$

### 3.5.3. RECARGA Y RECESIÓN DEL SISTEMA DE AGUA SUBTERRÁNEAS

#### *Recarga (Cambio de almacenamiento de agua)*

Es la cantidad de agua que llega al reservorio, es decir gana agua y aumenta de nivel, la identificación de estas zonas es más complicada debido a que el agua se infiltra y no se tiene evidencia superficial como en la descarga; no obstante, un primer indicador está asociado con la conductividad hidráulica de la roca, la cual puede permitir la infiltración del agua de lluvia (Peñuela & Carrillo, 2013), sin embargo, para el presente estudio se ha realizado la estimación de la recarga de aguas subterráneas mediante el método WTF, basado en el aumento del nivel de aguas subterráneas debido al volumen de agua que llega a la capa freática, el intervalo de tiempo de la información que se dispone, en este caso es diaria y el rendimiento específico de cada uno de los pozos de observación (Yang et al., 2018b), mismo que se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación (8):

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (8)$$

Dónde  $R$  es la recarga o el cambio de almacenamiento de agua ( $\text{m día}^{-1}$ ),  $S_y$  es el rendimiento específico,  $dh$  o  $\Delta h$  es el cambio en la altura del nivel freático (m) y  $dt$  o  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo (día).

### Recesión

La descarga es la evidencia más viable para poder identificar el funcionamiento del sistema de aguas subterráneas, es el lugar dónde el agua aflora en la superficie y representa la fase final del recorrido del flujo subterráneo. Entre mayor ha sido el recorrido (tiempo de residencia) del agua subterránea en el subsuelo, se han originado diversos procesos, entre ellos el intercambio físico-químico y agua-roca, que otorgan al agua propiedades fisicoquímicas que dependen principalmente del tipo de roca, profundidad y distancia de recorrido. La descarga de aguas subterráneas ocurre a una elevación topográfica más baja que donde se origina la recarga (Peñuela & Carrillo, 2013).

Principalmente el método WFR se fundamenta en la disminución de los niveles de agua subterránea que generalmente responden al comportamiento relacionado a la precipitación y descarga debido a múltiples causas, pero cuando este planteamiento no es aplicable se puede emplear tres modelos de recesión relevantes; en este caso se ha establecido dos modelos para los pozos profundos del sistema inferior (sistema profundo) y un modelo que se ha acoplado tanto para el sistema superior (sistema poco profundo) e inferior (sistema profundo), mismos que se abordan a continuación:

#### Modelo simple con recesión en la parte inferior

- **Recesión Natural  $R_N$**

Esta unidad recibe la infiltración proveniente de la precipitación en la superficie del área de estudio y descarga agua subterránea en una determinada profundidad.

$$R_N = \frac{Q_{dn} - Q_{up}}{A \times S_y} \Delta t = \frac{M}{S_y} \Delta t \quad (9)$$

Dónde  $R_N$  es la recesión natural,  $M$  es el módulo de descarga,  $S_y$  es el rendimiento específico y  $\Delta t$  corresponde al periodo de tiempo.

- **Recesión Dinámica  $R_D$**

Inicialmente, el nivel del agua del acuífero es igual al límite, supongamos que en un evento de precipitación aumenta de manera uniforme e instantánea el nivel del agua en el acuífero en  $\Delta H_j$ , por tal motivo para determinar los valores de pérdida de agua se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_{Dt} = erf \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2 S_y}{tmK}} \right) x \Delta H_j \quad (10)$$

Dónde  $R_{dt}$  es la recesión dinámica,  $erf$  es la función error,  $x$  la distancia perpendicular desde el límite,  $S_y$  es el coeficiente de rendimiento,  $t$  el tiempo,  $m$  el espesor del acuífero,  $K$  es la conductividad hidráulica y  $\Delta H_j$  es el cambio de altura durante el día.

#### Modelo acoplado al sistema de aguas subterráneas superior e inferior

- **Recesión de Leakeance  $R_L$**

En este tipo de recesión se determina las fugas de agua del acuífero superior que pueden tener hacia el acuífero inferior o recibir fugas del acuífero inferior, mismo que se determina mediante la siguiente ecuación (11):

$$R_{Li} = \frac{Q_{leak}}{AS_y} x \Delta t = \frac{\sigma}{S_y} (H_i - H_L) x \Delta t \quad (11)$$

Dónde  $R_{Li}$  es la recesión de Leakeance,  $\sigma$  es la tasa de Leakeance,  $S_y$  es el rendimiento específico,  $H_i$  es la altura de agua del acuífero superior,  $H_L$  es la altura constante de agua en el acuífero inferior y  $\Delta t$  es el periodo de tiempo.

Finalmente, con el modelo planteado se busca calibrar la mayoría de los parámetros detallados anteriormente, entre los principales se encuentran DM módulo de descarga, ( $S_y$ ) rendimiento específico, y ( $\beta$ ) eficiencia de infiltración y a partir de ellos obtendremos los datos simulados de los niveles freáticos para posteriormente

determinar la recarga y descarga a través de los diferentes modelos de recesión antes citados.

### 3.6. BALANCE HÍDRICO

Para el cálculo del balance hídrico anual se utilizó la siguiente ecuación:

$$P - ETr - ES - REC - DM = NF_i - NF_f \quad (12)$$

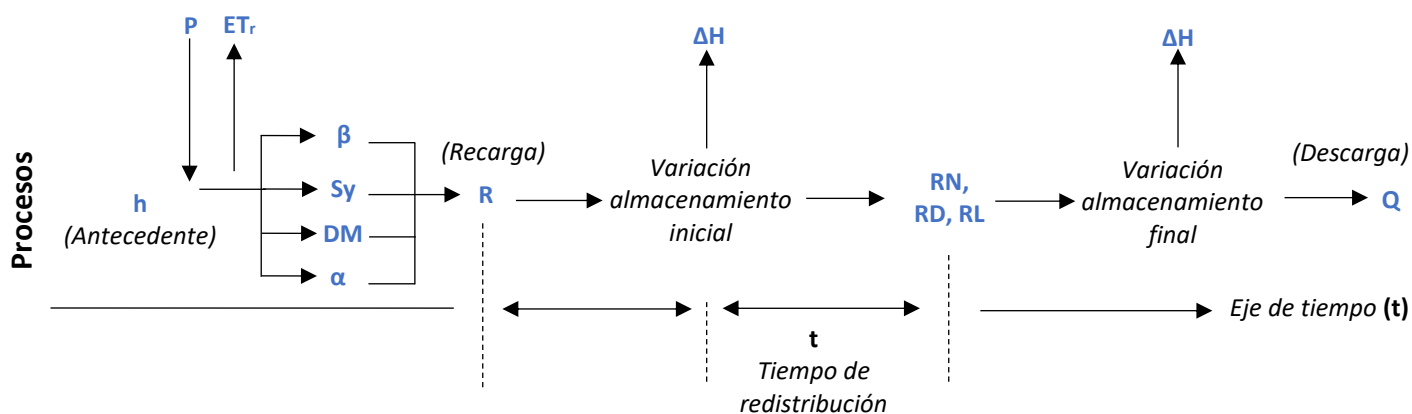
Donde  $P$ , es la lámina de precipitación en mm,  $ETr$  es la evapotranspiración real en mm,  $ES$  representa la escorrentía superficial (caudal) de la unidad hidrográfica en mm,  $REC$  es la recesión ya sea Natural, Dinámica o de Leakeance,  $DM$  es el módulo de descarga,  $NF_i$  es el Nivel freático inicial y  $NF_f$  se refiere al nivel freático final.

### 3.7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El método WTFR es un modelo de regresión del nivel freático que se basa en datos de precipitación, niveles de agua, evapotranspiración real y diferentes parámetros de acuerdo con la ecuación a utilizar. Los diferentes parámetros son ajustables y se encuentran en función del análisis de bondad y ajuste, como el indicador NSE (Nash-Sutcliffe), mismo que fue realizado en los procesos de calibración y validación para los 6 pozos de estudio, sobre todo en los tres modelos de recesión (recesión natural, recesión dinámica y recesión de Leakeance). Para un mejor entendimiento del modelo, en la Figura 24 se sintetiza la interpretación del proceso durante la aplicación de WTFR y su importancia para la estimación de la recarga y descarga.



**Figura 24.** Interpretación de los diferentes procesos que comprende desde la recarga del nivel freático (Variación del nivel de agua) y su posterior redistribución hasta llegar a la descarga (modelos de recesión). Donde  $h$ : altura del nivel freático,  $P$ : precipitación,  $ET_r$ : Evapotranspiración real,  $\beta$ : Eficiencia de infiltración,  $DM$ : módulo de descarga,  $\alpha$ : tasa de infiltración,  $S_y$ : rendimiento específico,  $R$ : recarga de aguas subterráneas,  $\Delta H$ : cambio de altura del nivel freático,  $RN$ : recesión Natural,  $RD$ : Recesión Dinámica,  $RL$ : recesión de Leakeance y  $Q$ : Caudal (descarga). Adaptado de (Bastidas, 2019).



**Fuente:** (Bastidas, 2019).

**Elaboración:** El Autor

De acuerdo a la Figura 24, el método WFR, inicialmente parte de los niveles de agua observados durante el periodo 2018-2021 ( $h$ ), la única variable de entrada que usamos es la precipitación ( $P$ ), como variable de salida se considera la evapotranspiración real ( $ET_r$ ), posteriormente para el proceso de calibración y validación de modelo sin recesión se utilizan las variables  $\beta$ ,  $DM$ ,  $\alpha$  y  $S_y$ , y a partir de estos se obtiene el nivel freático simulado y por ende la recarga del pozo, debemos tener en cuenta que durante este proceso inicialmente va existir una variación en la altura o nivel de agua ( $\Delta H$ ), luego mediante la aplicación de los modelos de recesión ( $RN$ ,  $RD$  y  $RL$ ) obtenemos la variación final del nivel de agua ( $\Delta H$ ) y finalmente las descargas por flujo vertical u horizontal hacia los cuerpos de agua que correspondería al caudal de salida ( $Q$ ). Hay que tener en cuenta que el tiempo de redistribución debe ser notablemente mayor que el tiempo de arribo de la recarga.

### 3.7.1. IMPLEMENTACIÓN EN EL SITIO DE ESTUDIO

El modelo fue implementado de la siguiente manera: En primer lugar, para el proceso de calibración y validación del modelo se escogió y se estableció los datos diarios observados de nivel freático de los pozos profundos LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008,

LLDHG-011 y LLDHG-012, durante el periodo enero 2018 - junio 2021. Esta información ha sido recolectada con la ayuda de dataloggers automáticos, de marca Geokon, cuya ubicación y descripción de estos equipos se puede observar en la Figura 1 y Tabla 6. La única variable de entrada utilizada en el modelo fueron los datos de precipitación provenientes de la estación meteorológica Quimsacocha 1 y estación del observatorio de Zhuruca y del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (iDRHICA). En esta etapa se consideró los parámetros  $\beta$  (eficiencia de infiltración) y DM (módulo de descarga para 12 meses), cuyos valores fueron asumidos y determinados con la ayuda de Solver.

Posteriormente, para el cálculo de los diferentes componentes de recesión se consideró de acuerdo con la profundidad de los pozos piezométricos de la siguiente manera: Modelos simple con Recesión Natural y Dinámica en la parte inferior para los pozos profundos (LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012) y modelo de recesión de Leakeance acoplado al sistema de aguas subterráneas en la parte superior (piezómetro LLDHG-10A) e inferior (piezómetro LLDHG-008).

Los valores del parámetro de coeficiente de rendimiento específico ( $S_y$ ), para los cálculos de los tres modelos de recesión, fueron tomados del estudio realizado por (Lv et al., 2021a), denominado valores generales de rendimiento específico para diferentes texturas de suelo determinados por distintos estudios, misma que se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Valores generales de rendimiento específico ( $S_y$ ) para diferentes texturas de suelo determinados por distintos estudios.

Soil texture	Øs-Ør (Carsel & Parrish, 1988; Loheide II et al., 2005; van Genuchten, 1980)	Apparent $S_y$ equation of Loheide II et al. (2005)	From 17 studies compiled by Johnson (1967)	Trilinear graph of Johnson (1967) (Loheide II et al., 2005)	Reverse educing method based on evapotranspiration from groundwater (Loheide II et al., 2005)	Todd (1959)	Brooks and Corey (1964)	Corey et al. (1965)	Buckman and Brady (1960)	Type-curve method (Prickett, 1965)	Boelter (1968)
Sand	0.385	0.38	-	0.34	0.32	-	-	-	-	-	-
Loamy sand	0.353	0.34	-	0.26	0.26	-	-	-	-	-	-
Sandy loam	0.345	0.29	-	0.19	0.17	-	-	-	0.361	-	-
Loam	0.352	0.19	-	0.095	0.075	-	-	-	-	-	-
Silt	0.426	0.11	0.08	0.06	0.026	-	-	-	-	-	-
Silty loam	0.383	0.12	-	0.07	0.037	-	-	-	0.172	-	-
Sandy clay loam	0.29	0.17	-	0.05	0.072	-	-	-	-	-	-
Clay loam	0.315	0.078	-	0.038	0.021	-	-	-	-	-	-
Silty clay loam	0.341	0.041	-	0.029	0.012	-	-	-	-	-	-
Sandy clay	0.28	0.068	0.07	0.025	0.015	0.08	-	-	-	-	-
Coarse sand	0.385	0.38	0.27	-	0.38	0.32	-	-	-	-	-
Medium sand	0.385	0.38	0.26	-	0.36	-	-	-	-	0.161-0.181	-
Fine sand	0.385	0.38	0.21	-	0.33	0.21	0.314	-	-	0.09-0.113	-
Very fine sand	0.385	0.38	-	-	0.31	-	-	-	-	-	-
Clay	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
Gravelly sand	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-
Fine gravel	-	-	0.25	-	-	0.27	-	-	-	-	-
Medium gravel	-	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-
Coarse gravel	-	-	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-
Berea	-	-	-	-	-	-	0.144	-	-	-	-
Sandstone	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hygiene sandstone	-	-	-	-	-	-	0.106	-	-	-	-
Touchet silt loam	-	-	-	-	-	-	0.349	-	-	-	-
Volcanic sand	-	-	-	-	-	-	0.296	-	-	-	-
Poudre sand	-	-	-	-	-	-	-	0.347	-	-	-
Dickinson	-	-	-	-	-	-	-	-	0.324	-	-
fine sand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wabash silty clay	-	-	-	-	-	-	-	-	0.146	-	-
Sand, medium to coarse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20-0.25	-
Sand, fine to medium	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005-0.192	-
Sand, medium, silty	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.051	-
Sand, silty to medium	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.014	-
Sand, fine to coarse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.014	-
Sand, fine with clay	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.021-0.206	-
Sand, fine with silt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.018	-
Clay, silt, fine sand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.039	-
Fibric peat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.66
Hemic peat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26
Sapric peat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13

Fuente: (Lv et al., 2021a).

Elaboración: (Lv et al., 2021a).

### 3.7.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

El proceso de calibración es esencial en la modelación hidrológica e hidrogeológica, el cual nos permite ajustar los diferentes parámetros para que la simulación de la salida del modelo WTRF reproduzca satisfactoriamente los registrados observados en la zona de estudio. Primeramente, se calibró el modelo sin considerar los diferentes componentes de recesión, como la eficiencia de infiltración ( $\beta$ ) y el módulo de descarga (DM), esto se lo hizo a través de la estimación del rendimiento y evaluación del modelo con el Error cuadrático medio (RMSE) y Nash Soutcliffe (NSE), sin embargo, en el momento de considerar las recesiones los parámetros calibrados fueron módulo de descarga (DM), tasa de infiltración ( $\alpha$ ), tasa de Leakeance ( $\sigma$ ) y los parámetros que se asumieron de acuerdo a la literatura de varios estudios realizados y de la información disponible fueron el factor de cultivo ( $K_c$ ), coeficiente de rendimiento ( $S_y$ ), distancia perpendicular ( $x$ ), espesor del acuífero ( $m$ ) y conductividad hidráulica ( $K$ ).

**Tabla 9.** Parámetros calibrados y asumidos de acuerdo a la aplicación de los modelos de recesión.

Recesión	Parámetro	Unidad	Calibrado/Asumido	
Natural	Módulo de descarga (M)	M día <sup>-1</sup>	Calibrado	
	Rendimiento específico ( $S_y$ )	-	Calibrado	
	Tasa de infiltración ( $\alpha$ )	-	Calibrado	
	Eficiencia de infiltración ( $\beta$ )	-	Calibrado	
Dinámica	Rendimiento específico ( $S_y$ )	-	Asumido	
	Conductividad hidráulica ( $k$ )	m día <sup>-1</sup>	Asumido	
	Tiempo ( $t$ )	días	Asumido	
	Espesor del acuífero ( $m$ )	m	Calibrado	
	Distancia perpendicular ( $x$ )	m	Calibrado	
	Eficiencia de infiltración ( $\beta$ )	-	Calibrado	
Leakeance	Factor de cultivo ( $K_c$ )	-	Asumido	
	Sistema superior	Altura de agua del sistema superior ( $H_i$ )	m.s.n.m	Asumido
		Rendimiento específico ( $S_y$ )	-	Asumido
	Sistema inferior	Tasa de Leakeance ( $\sigma$ )	-	Calibrado
		Altura de agua del sistema inferior	msnm	Asumido
		Rendimiento específico ( $S_y$ )	-	Asumido
		Altura constante en el sistema inferior (HL)	m	Asumido
	Módulo de descarga (M)	m día <sup>-1</sup>	Calibrado	
Tasa de infiltración ( $\alpha$ )	-	Calibrado		

Fuente: (Yang et al., 2018a)

Elaboración: El Autor

Una vez que se haya calibrado el modelo de nivel de agua se procede a la validación, empleando un período de datos no usado en la calibración (Juan Cabrera, 2019). En este caso el período establecido para la calibración fue desde el 28 de enero del 2018 hasta el 27 de enero del 2020, mientras que para el periodo de validación se lo realizó durante el periodo 28 de enero del 2020 hasta el 30 de junio del 2021 de las variables de niveles freáticos y precipitación, este periodo de tiempo para la calibración y validación fue también realizado en los modelos de recesión como se detalla en la Tabla 9, y como variable de entrada en este caso se utilizó datos diarios de la precipitación.

En el caso del modelo acoplado al sistema de aguas subterráneas superior e inferior se estableció realizar la calibración solamente en el piezómetro LLDHG-008 (sistema inferior), y el piezómetro LLDHG-10A (sistema superior), las estimaciones del nivel freático simulado estuvieron en función de la recesión de Leakeance, basado en la aplicación de la ecuación (8), los parámetros calibrados y asumidos se puede ver en la Tabla 9.

En la parte superior (piezómetro LLDHG-10A), la salida de agua de este sistema y la entrada al sistema inferior (piezómetro LLDHG-008) es la recesión que se utiliza para acoplar estos dos sistemas en el modelo. Estos datos simulados obtenidos contrastan con los niveles observados que provienen de los datos piezométricos.

### *Nash Soutcliffe (NSE)*

En el presente estudio la calibración de los parámetros se realizó utilizando el criterio de Eficiencia de Nash-Soutcliffe (NSE), misma que se define en la ecuación 14.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad (14)$$

Donde  $y_i$  es el nivel freático observado en el día  $i$  y  $\hat{y}_i$  es el nivel freático simulado para el día  $i$ .

Este puede estar dentro del rango entre 0 y 1, mientras más cercano a 1 mejor es el ajuste del modelo a las observaciones, en el caso de que el valor sea negativo significa que es mejor usar la media.

Este coeficiente muestra el nivel de ajuste entre los niveles freáticos observados y los simulados. Cuando  $NSE=1$  la simulación es perfecta, esto significa que la varianza de errores es igual a cero; cuando  $NSE=0$ , la simulación da como resultados valores semejantes al promedio de los niveles (Cabrera-Balarezo et al., 2019). Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla.

**Tabla 10.** Rango de valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

Rango NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

**Fuente:** (Cabrera, 2009)

**Elaboración:** (Cabrera, 2009)

Este criterio ha sido aplicado en los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012, con la finalidad de evaluar la habilidad predictiva del modelo a aplicar, sin embargo, este ha demostrado ser uno de los más adecuados y ha sido utilizado en varias aplicaciones. Además es considerado como el criterio que más se adapta a este tipo de casos, puesto a que reduce el efecto de flujos de pico, que no se observa con frecuencia y cuya incertidumbre en su estimación es relativamente grande (Dominguez et al., 2017).

### *Solver*

Solver es un programa complementario de Microsoft Excel, usado para el análisis y para poder encontrar un valor óptimo ya sea máximo o mínimo basado en una determinada fórmula que se encuentra establecida en una celda objetivo, esta se encuentra sujeta a restricciones y limitaciones en base a lo indicado por el criterio de eficiencia. Es así que para este caso la calibración de los diferentes parámetros establecidos en los modelos

descritos anteriormente en la Tabla 9, se usó la herramienta Solver, con la finalidad de optimizar los parámetros establecidos en función del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, permitiendo una mejor representación entre los niveles freáticos simulados y observados, de la misma manera para los diferentes modelos de recesión (Per et al., 2017).

### Sesgo PBIAS

El PBIAS permite conocer el sesgo porcentual de los datos simulados con relación a las observaciones (Salas et al., 2021). Es una medida que indica la tendencia promedio de los datos simulados o ser mayores o menores que los datos observados, un valor de 0 indica un ajuste perfecto (Albuja & Tenelanda, 2014). Un BIAS positivo indica sobre estimación y un BIAS negativo indica subestimación de los niveles de agua y se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación 15:

$$PBIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{NF_S - NF_O}{NF_O} * 100 \quad (15)$$

Donde,  $NF_s$  es el promedio de los niveles freáticos simulados,  $NF_o$  es el promedio de los niveles freáticos observados y  $n$  es el número de días (Córdova et al., 2015).

Para evaluar el desempeño de PBIAS se tomó como referencia los rangos establecidos por (Salas et al., 2021), quienes clasifican el desempeño como: Muy bueno, Bueno, Satisfactorio e Insatisfactorio.

**Tabla 11.** Rangos de evaluación de desempeño según la métrica PBIAS

Rango PBIAS (%)	Desempeño
$PBIAS < \pm 10$	Muy Bueno
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	Bueno
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	Satisfactorio
$PBIAS \geq \pm 25$	Insatisfactorio

**Fuente:** (Salas et al., 2021)

**Elaboración:** (Salas et al., 2021)



### 3.7.3. RECARGA Y RECESIÓN DEL SISTEMA DE AGUA SUBTERRÁNEAS

La recarga o cambio de almacenamiento de agua proviene de los resultados obtenidos a partir de la ecuación 8, mismos que son calculados en base a los valores del coeficiente de rendimiento específico ( $S_y$ ) y la variación de altura de los datos de nivel freático observados de los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012 y con un intervalo de tiempo de 1 día. La recarga ha sido determinada sin la estimación de las diferentes recesiones de agua. En cuanto a la recesión se obtiene a partir de los cálculos de la estimación de los diferentes componentes o modelos de recesión. Este proceso se realizó para cada uno de los piezómetros de estudio.

### 3.7.4. ACOPLAMIENTO ENTRE EL SISTEMA SUPERIOR E INFERIOR

El método WTFR entre sus modelos de recesión para determinar la disminución de los niveles de agua debido a múltiples causas comprende el cálculo de la recesión de Leakeance (ecuación 11), que corresponde a un modelo acoplado al sistema de aguas subterráneas tanto de la parte superior e inferior, para ello el piezómetro LLDHG-10A que tiene una profundidad de 2.20 metros (Tabla 7) fue considerado como piezómetro superior “poco profundo” y el piezómetro LLDHG-008 que tiene una profundidad de 231.30 metros fue considerado como piezómetro inferior “profundo”, la distancia entre estos dos piezómetros es de 157 metros. El objetivo es acoplar las dos sistemas poco profundo y profundo para estimar el agua que ingresa del sistema superior al sistema inferior y el proceso de calibración y validación fue considerado el mismo periodo que los modelos de recesión natural y dinámica. Inicialmente se lo realizó en dos partes, la primera para el piezómetro que se ubica en la parte superior (LLDHG-10A), se realizó mediante las variables de Factor de cultivo ( $K_c$ ), rendimiento específico ( $S_y$ ), Altura de agua en el sistema superior ( $H_i$ ) y Tasa de Leakeance ( $\sigma$ ), para la segunda parte se usó los niveles de agua del sistema inferior del piezómetro LLDHG-008, el rendimiento específico ( $S_y$ ), Altura constante en el sistema inferior ( $H_L$ ), módulo de descarga ( $DM$ ) y tasa de infiltración ( $\alpha$ ), mediante el acoplamiento de estos dos sistemas se realizó la

evaluación del modelo a través del Error Cuadrático Medio (RMSE), coeficiente de Nash Sutcliffe y sesgo de PBIAS.

# CAPITULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se da a conocer los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología WTFR, mismo que inicialmente permitió la simulación de los niveles de agua (niveles freáticos) en la zona de estudio, para lo cual se logró calibrar y validar el modelo, calcular la recarga o cambio de almacenamiento de agua y la aplicación de los diferentes modelos de recesión planteados, que para un mejor entendimiento se muestran a través de tablas y figuras.

### 4.1. RESULTADOS DE CLIMA

#### 4.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y CLIMÁTICA

De acuerdo al análisis referente a la caracterización física, la zona de estudio en su mayoría está conformado por el tipo de suelo Andosoles que cubre el 54% del área total, es característico por la presencia de páramo que cubre el 60.64% del área, geológicamente se encuentra formado por lavas Andesíticas (Hornblenda) que cubre el 4.66%, geomorfológicamente el 87.80% se encuentra constituido por zonas mal drenadas, sobresaturadas, algunos son intermitentes, sobre potentes y con suelos orgánicos, estos se encuentran en un rango de pendiente entre 0 a 45%, con una susceptibilidad de media a moderada a la erosión y con movimientos en masa, hidrológicamente la cuenca de estudio corresponde a una microcuenca en fase de madurez, el cual es característico de una cuenca en equilibrio.

En la Tabla 12 se resume los valores promedios anuales obtenidos de los diferentes parámetros meteorológicos determinados en el presente estudio.

**Tabla 12.** Valores promedios anuales de las diferentes variables meteorológicas.

VARIABLE	VALOR PROMEDIO ANUAL				VARIANZA	PROMEDIO GENERAL
	2018	2019	2020	2021		
Temperatura media (°C)	7.73	9.81	9.78	9.5	0.99	9.19
Temperatura máxima (°C)	9.01	11.94	11.73	11.03	1.79	10.89
Temperatura mínima (°C)	6.67	8.22	8.19	8.19	0.58	7.81
Precipitación (mm)	1053.6	1298.4	1082.1	1548.8	52771.42	1245.73
Velocidad del viento (m/s)	3.54	3.62	3.67	3.47	0.01	3.58
Dirección del viento (°)	NE	NE	NE	NE	-	NE
Radiación Solar (w/m <sup>2</sup> )	136.52	125.37	155.39	102.35	491.08	129.81
Humedad Relativa (%)	92.96	94.46	93.16	94.47	0.66	93.77

**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

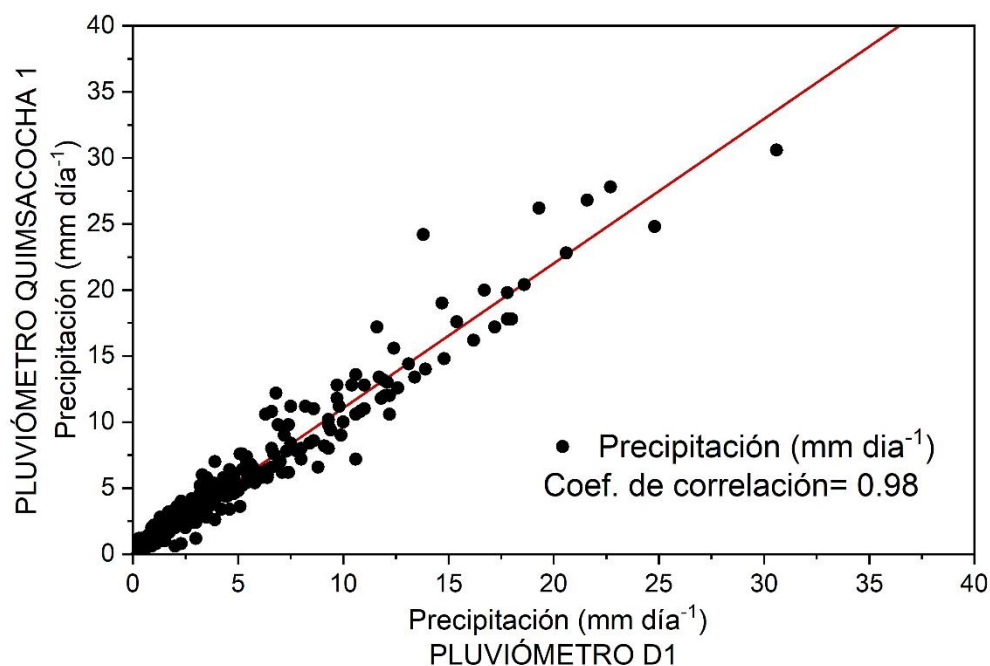
**Elaboración:** El Autor

Los valores máximos y mínimos de la temperatura tienen relación con la circulación atmosférica, precipitaciones, nubosidad y vientos, también varían en función de las características topográficas de la zona, altitud, época del año y hora del día, entre el año 2018 y el 2019 existe una variación de 2.08 °C en la temperatura media, para los demás años son parecidos, la misma variación en estos años se puede ver en la temperatura máxima y mínima (Tabla 12); respecto a la precipitación durante el periodo 28/01/2018 a 30/06/2021 indica que ha existido una variación en la precipitación anual dentro de la zona de estudio entre 250.40 mm y 495.20 mm, teniendo así una precipitación media anual de 1245.73 mm año<sup>-1</sup>; en cuanto a los valores promedios anuales de velocidad del viento (Tabla 12), la mayor velocidad se ha registrado en el año 2020 con 3.67 m s<sup>-1</sup>, existen una variación de 0.2 m s<sup>-1</sup> entre el 2020 y 2021, es decir que los valores durante los 4 años son parecidos, de igual manera sucede con la dirección de viento que predomina al noreste, así mismo en la zona de estudio entre el 2020 y 2021 existe una diferencia de 53.04 w/m<sup>2</sup> y los demás valores son parecidos, finalmente, el área se caracteriza por tener una elevada humedad relativa, misma que corresponde a la media anual del 93.76%, por lo tanto, año con mayor humedad relativa fue el año 2021 con el 94.47% por lo que los 4 años presentan valores muy parecidos.

## Precipitación

De acuerdo con el cálculo del coeficiente de correlación ( $r$ ) se pudo observar y analizar el comportamiento de las variables de lluvia tanto del pluviómetro D1 con respecto al pluviómetro Quimsacocha 1 (Figura 25). El coeficiente de correlación ( $r$ ) obtenido es de 0.98, de acuerdo al estudio realizado por (Ayala et al., 2018) se encuentra dentro del rango  $0.5 < r < 1$ , mismo que se encuentra categorizado con una intensidad de correlación positiva intensa, esto nos da a conocer que si podría usar los datos del pluviógrafo D1 en los datos faltantes de pluviómetro Quimsacocha 1, además teniendo en cuenta que la distancia entre los 2 pluviógrafos se encuentra a una distancia de 676 metros, que de acuerdo a la escala del mismo autor (Ayala et al., 2018), se encuentra en el rango  $<100$  km considerado como pequeña escala.

**Figura 25.** Diagrama de dispersión de datos diarios de lluvia observados entre el Pluviómetro D1 y el Pluviómetro Quimsacocha 1.



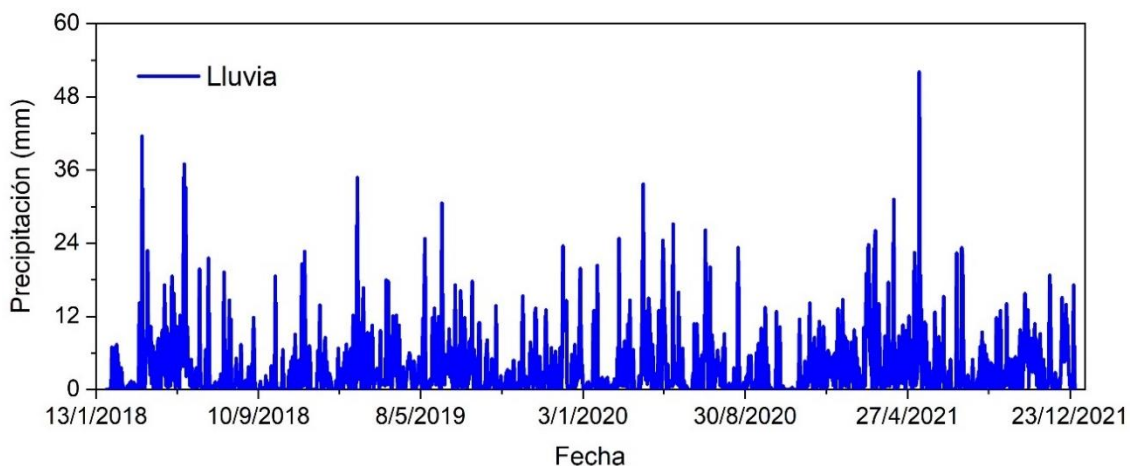
**Fuente:** DPMECUADOR S.A.

**Elaboración:** El Autor

Al analizar los registros de información existente de los pluviógrafos Quimsacocha 1 y D1 que se muestra en la Figura 26, se observa ausencia de lluvia entre los meses de octubre

y noviembre del año 2020. Sin embargo, la entrada de agua en el páramo es constante, por lo que se ha registrado todo el tiempo eventos de lluvia.

**Figura 26.** Hietograma diario de precipitación durante el periodo 2018-2021.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019. PROMAS, Base de Datos de Precipitación, 2017-2019

**Elaboración:** El Autor

En la Tabla 13 se observa que la precipitación máxima diaria es  $52.1 \text{ mm día}^{-1}$ , la mínima  $0 \text{ mm día}^{-1}$  y la promedio  $3.47 \text{ mm día}^{-1}$ , en cuanto a la precipitación promedio mensual es  $105.62 \text{ mm mes}^{-1}$ .

**Tabla 13.** Precipitación de los datos obtenidos de las estaciones Quimsacocha 1 y D1.

Pluviógrafo	Precipitaciones	Precipitación (mm)	
		Diario	Mensual
Quimsacocha 1/D1	Máxima	52.1	259
	Mínima	0	28.1
	Promedio	3.47	105.62

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

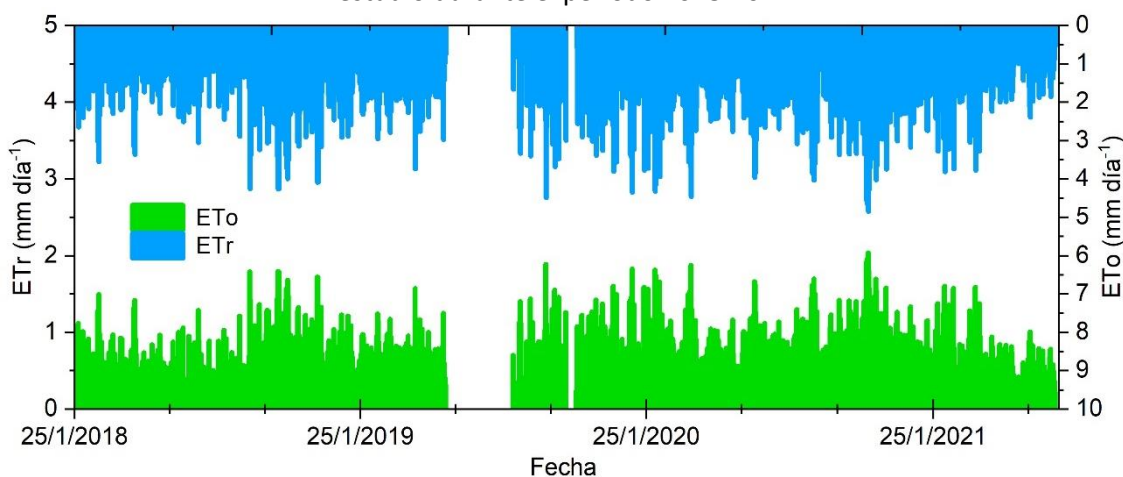
### Evapotranspiración

Con los datos de los parámetros de temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento que engloba la ecuación 5, referente al método de la FAO de Penman-Monteith que es el más recomendado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Villegas & Torres, 1977), se determinó la evaporación

en este caso en una zona de páramo y a una escala diaria durante el periodo 2018-2021 (Figura 27).

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mensual calculada para la zona de estudio varía entre 19.1 mm mes<sup>-1</sup> a 78.02 mm mes<sup>-1</sup>. La estacionalidad de esta variable está caracterizada por un mínimo centrado en el mes de mayo del 2019, aunque este corresponde a un valor muy bajo en comparación a los valores obtenidos por (Cabrera-Balarezo et al., 2019), el cual la ET<sub>o</sub> varía entre 41.6 mm mes<sup>-1</sup> a 81.2 mm mes<sup>-1</sup>, cuya zona de estudio también se encuentra en una zona de páramo a un gradiente altitudinal entre 3612 y 4400 m.s.n.m, de igual manera en el estudio realizado por (Córdova et al., 2015) estima la ET<sub>o</sub> anual un valor de 723 mm año<sup>-1</sup>, y en nuestro caso tenemos 577 mm año<sup>-1</sup>.

**Figura 27.** Serie diaria de evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) y de referencia (ET<sub>o</sub>), para la zona de estudio durante el periodo 2018-2021.



**Fuente:** DPMECUADOR S.A., Base de Datos de Clima, 2018-2021. iDRHICA Base de Datos de Clima, 2018-2019.

**Elaboración:** El Autor

Posteriormente se procedió a determinar la Evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), según (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006), en la zona de estudio la vegetación natural es homogénea y con intervención relativamente baja por ganadería, por lo tanto, acuerdo a las investigaciones realizadas determinaron valores del Coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) de 0.42 y registros del factor de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) de 1 que indican contenidos de humedad en el suelo sobre capacidad de campo cercanos al punto de saturación, particularidad encontrada en los páramos de la región.



La ETr media anual calculada para la zona de estudio es de 242 mm año<sup>-1</sup>, con un promedio diario de 0.73 mm día<sup>-1</sup> y con registros entre 0.177 mm día<sup>-1</sup> a 2.03 mm día<sup>-1</sup>, mismo que corresponden al valor mínimo y máximo registrados a mediados del mes de junio y los primeros días del mes de noviembre del 2020 respectivamente. Los valores diarios obtenidos en el presente estudio de la evapotranspiración real (ETr) (Figura 27), concuerda con la investigación realizada por (Torres & Proaño, 2018), con variaciones entre 0.103 mm día<sup>-1</sup> a 0.99 mm día<sup>-1</sup>, donde su comportamiento se debe a las condiciones meteorológicas, características morfofisiológicas de la vegetación y al contenido de agua en el suelo (Torres & Proaño, 2018).

La ETr dentro de la zona de estudio muestra una marcada diferencia durante todo el periodo establecido, existiendo valores pico de 2.03 mm día<sup>-1</sup> a valores relativamente bajos en el orden de 0.177 mm día<sup>-1</sup>, tal como se muestra en la Figura 27.

## 4.2. RESULTADOS DEL MODELO WTFR

### 4.2.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO SIN RECESIÓN

Para la calibración y validación del modelo WTF sin recesión (ecuación 2), se usaron datos a escala diaria de lluvia y niveles piezométricos (nivel freático), en cuyo ajuste general del hidrograma observado (máximos y mínimos) del periodo total establecido (4 años) se procedió a dividir en 2 periodos, el primero fue considerado para la calibración, desde el 28 de enero del 2018 al 27 de enero del 2020, y el segundo periodo para la respectiva validación que fue desde el 28 de enero del 2020 al 30 de junio del 2021. Los parámetros calibrados y validados estuvieron en base a los criterios de bondad ajuste como la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Raíz del error cuadrático medio (RMSE); sin embargo, en la simulación para el periodo de calibración se tuvo mejor ajuste en los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008 y LLDHG-011 con valores muy parecidos del NSE de 0.71 a 0.73, de acuerdo con (Cabrera-Balarezo et al., 2019) corresponde a un ajuste “Muy Bueno”; en cuanto a la calibración del piezómetro LLDHG-

012, no se obtuvo una buena simulación, ya que se obtuvo un valor de 0.48, este de acuerdo al mismo autor (Cabrera-Balarezo et al., 2019) es considerado como ajuste "Bueno". En la Tabla 14, se muestra que los valores de NSE durante el periodo de calibración y validación existe una variación de 0.10 a 0.12 en los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008 y LLDHG-011, es decir que los valores más altos se obtuvieron en la calibración y solamente en el piezómetro LLDHG-012 hay una variación de 0.08 y es el único que en la validación nos da un valor de 0.56 que es mayor al valor de calibración de 0.48 en el ajuste de NSE. En cuanto a la evaluación métrica con PBIAS en todos los piezómetros se ha determinado un porcentaje positivo el cual indica sobre estimación (Velásquez L & León K, 2022), por lo tanto, se encuentra dentro de los rangos de evaluación de desempeño de "Muy Bueno" a "Insatisfactorio" entre los datos observados y simulados en el periodo de calibración y validación.

**Tabla 14.** Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS del modelo WFR sin recesión.

Piezómetro		Nivel Freático medio (msnm)		RMSE (m)	NSE (m)	PBIAS (%)
		Observado	Simulado			
LLDGT-005	Calibración	3710.92	3710.98	0.18	0.72	8.957
	Validación	3710.69	3710.75	0.24	0.6	0.001
LLDGT-007	Calibración	3705.19	3705.22	0.19	0.71	12.136
	Validación	3704.74	3704.79	0.24	0.61	12.070
LLDHG-008	Calibración	3710.12	3710.15	0.22	0.71	7.670
	Validación	3710.01	3710.07	0.26	0.6	2.565
LLDHG-011	Calibración	3706.95	3706.96	0.19	0.73	10.106
	Validación	3706.8	3707.87	0.24	0.62	12.070
LLDHG-012	Calibración	3790.2	3790.23	0.29	0.48	0.413
	Validación	3790.13	3790.14	0.27	0.56	28.079

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

En cuanto a las variables que se obtuvieron en la etapa de calibración y validación para este caso solamente fue la eficiencia de infiltración ( $\beta$ ), y el módulo de descarga (DM) para los 12 meses del año (Tabla 15), tal cual se indica en la ecuación (2), mismos que son considerados como base del método WFR sin recesión, para la variable  $\beta$  en los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012 se obtuvo valores muy parecidos que oscilan entre 0.999 y 1, con una media de 0.9995, estos

valores de acuerdo a (Yang et al., 2018b) son bajos ya que es ese estudio se obtiene una media de  $\beta$  igual a 5.2 m.

Los valores calculados de DM varían entre 0 m y 0.22 m en los 5 piezómetros, con una media de 0.003 m, esto indica que la variabilidad temporal y espacial es relativamente alta en la zona de estudio, estos valores comparados con la investigación realizada por (Yang et al., 2018b) son muy parecidos.

**Tabla 15.** Parámetros óptimos del modelo WTFR sin recesión.

Parámetros calibrados	Piezómetro				
	LLDGT-005	LLDGT-007	LLDHG-008	LLDHG-011	LLDHG-012
Beta ( $\beta$ )	1	0.999999	0.99999979	1	1
DM1	0	0	0	0	0
DM2	0.007763	0.009777	0.007822	0.007719	0.004857
DM3	0	0	0	0.000004	0
DM4	0	0	0	0	0
DM5	0	0	0	0	0.001889
DM6	0	0	0	0	0.010213
DM7	0	0	0.008232	0.007980	0
DM8	0	0.000602	0.001323	0.003421	0.022722
DM9	0.008599	0.010524	0.014721	0.010504	0
DM10	0.014394	0.013539	0.007988	0.007680	0.002342
DM11	0.010112	0.010768	0.004335	0.008349	0.004860
DM12	0	0.000234	0	0	0

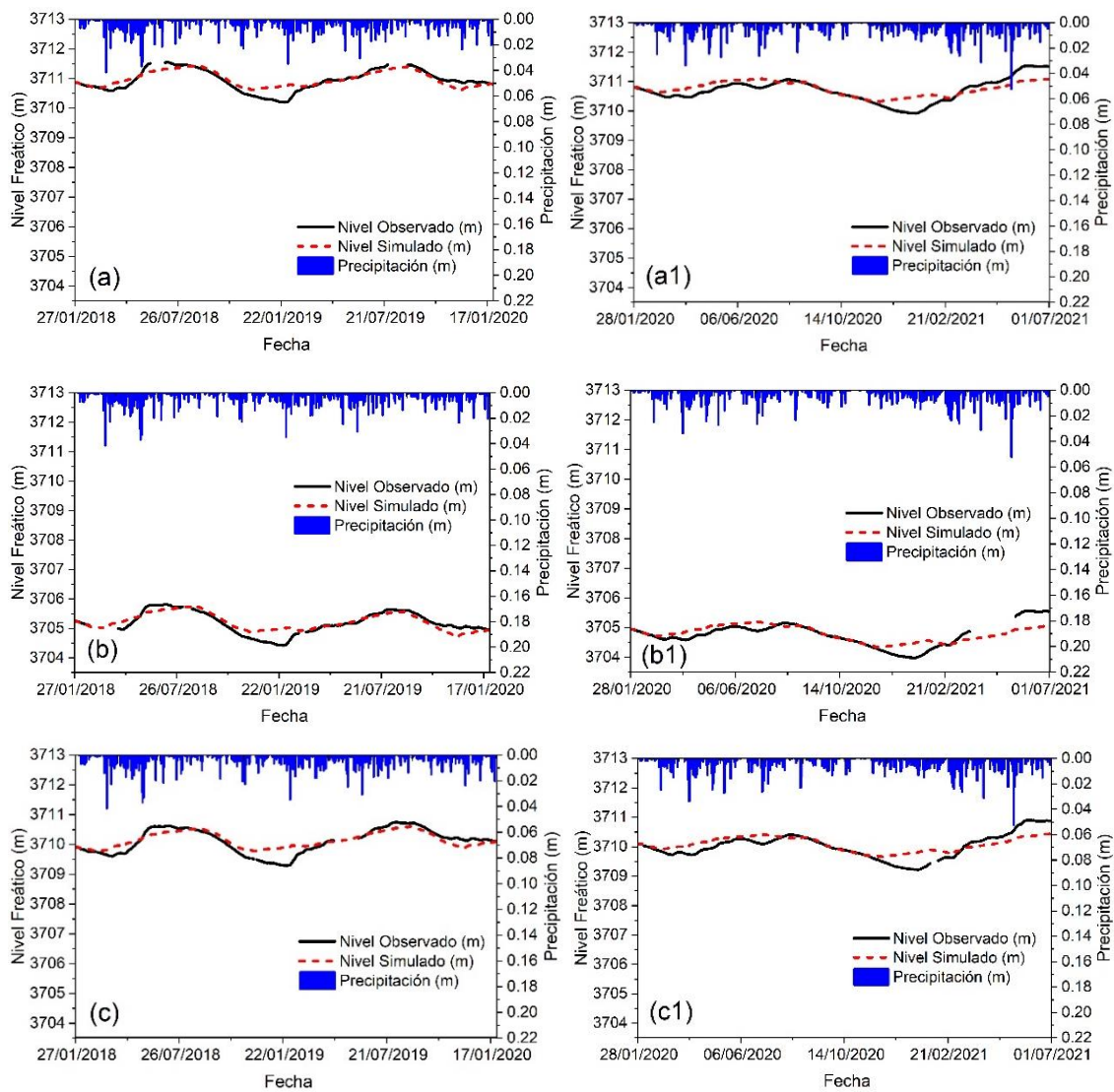
**Fuente:** El Autor

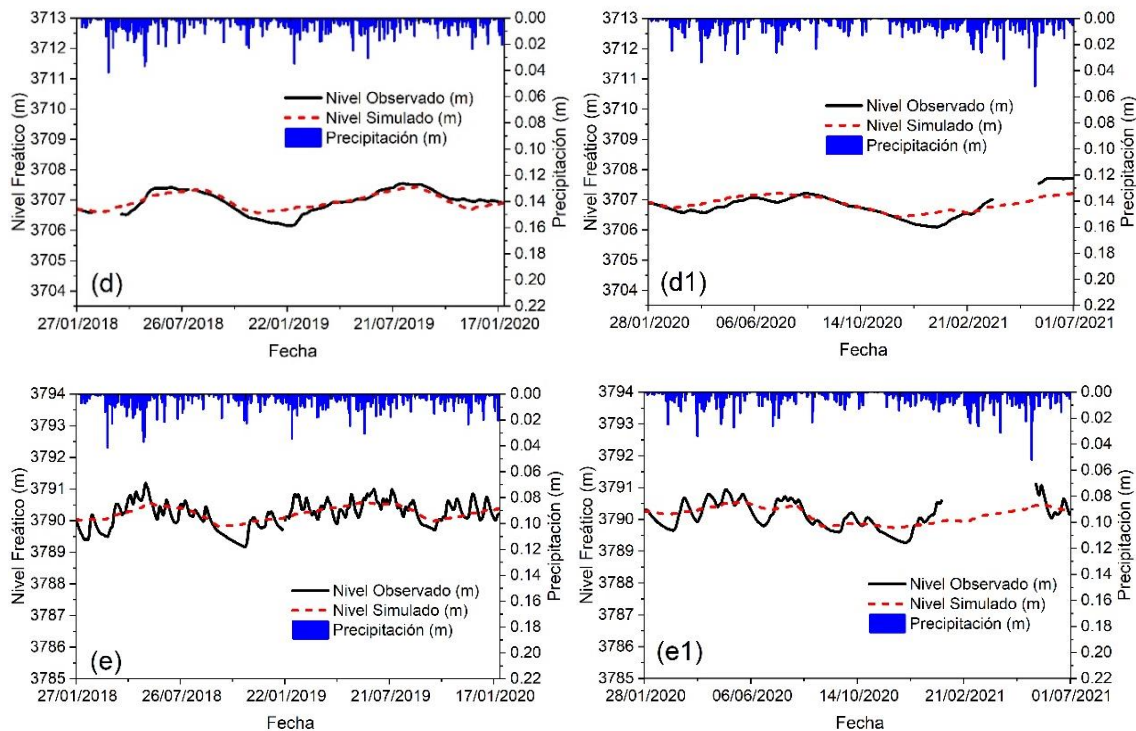
**Elaboración:** El Autor

En la Figura 28 se muestra la correspondencia entre los hidrogramas observados y simulados, lo que indican que, de manera general, las fluctuaciones del nivel de las aguas subterráneas pueden ser explicadas por el método WTFR, del mismo modo en la Figura 29 se muestra buena concordancia entre los datos obtenidos de las simulaciones, sin embargo, no se ajusta en su totalidad a los picos bajos de los datos observados. En los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008 y LLDHG-011 es mejor la simulación en los picos altos, puesto a que durante el periodo de estudio entre los datos observados y simulados no hay mucha variación de los niveles de agua, es decir que el coeficiente de NSE estuvo en el rango de 0.71 y 0.73. En el caso del piezómetro LLDHG-012, no simula bien, puesto que en los datos observados existe mucha variación de agua en poco

tiempo, además se obtuvo el coeficiente de NSE para el periodo de calibración de 0.48 y en el periodo de validación de 0.56. El modelo no se ajusta bien con los datos observados, puesto a que requiere de muchos parámetros más de calibración.

**Figura 28.** Variabilidad temporal de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDGT-005 (a, a1), LLDGT-007 (b, b1), LLDHG-008 (c, c1), LLDHG-011 (d, d1) y LLDHG-012 (e, e1), durante el periodo 2018-2021, sin recesión. Los gráficos a, b, c, d y e corresponde al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1, b1, c1, d1 y e1 corresponde al periodo validado.





Fuente: El Autor

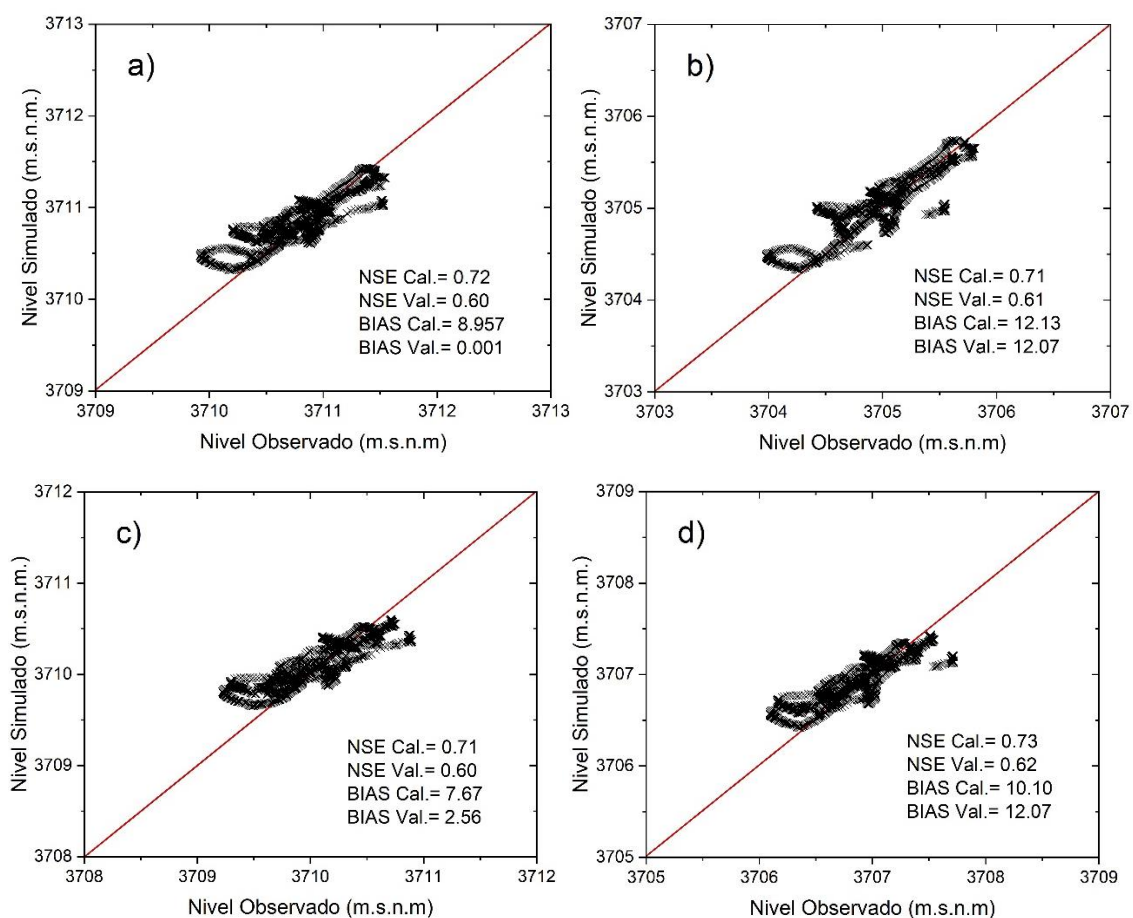
Elaboración: El Autor

El mejor ajuste del modelo tanto en la calibración como en la validación en la mayoría de los piezómetros fue en base a los criterios establecidos por Nash-Sutcliffe, excepto en el piezómetro LLDHG-012 se obtuvo los valores más bajos, sin embargo, en el caso de la aplicación del ajuste con el RMSE todos los valores estuvieron por debajo de 0.29. En la Figura 29 se puede observar los gráficos de dependencia lineal entre los datos simulados y observados de todos los piezómetros y para los periodos de calibración y validación, de acuerdo a la tabla establecida por (Cabrera, 2009), los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE) de los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 son muy parecidos y se encuentran dentro del rango entre 0.6-0.8, que se encuentra considerado con “Muy bueno” por lo que fue aceptable el modelo WTF sin recesión, sin embargo para el piezómetro LLDHG-012, los valores de calibración y validación no fue parecido a los demás piezómetros, por ende, estuvo dentro del rango 0.4-0.6, que es considerado como bueno.

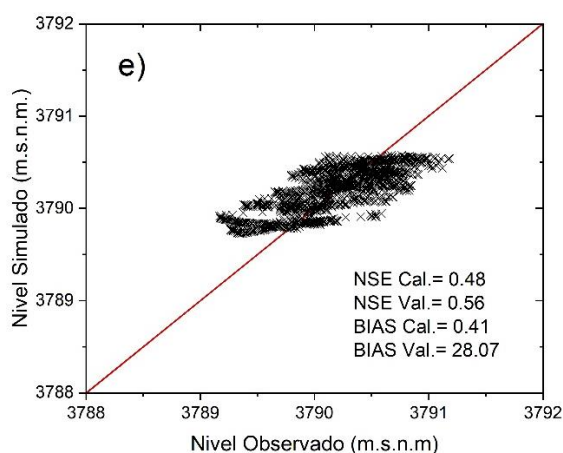
En los análisis realizados en el indicador de rendimiento sesgo de PBIAS se reflejó una clara diferencia entre los valores obtenidos de los periodos de calibración y validación (Tabla 14), todos los valores obtenidos tienen un PBIAS positivo por lo que están sobre

estimados. En el piezómetro LLDHG-012 se obtuvo el valor más bajo de PBIAS de 0.48% en el periodo de calibración, como también en el piezómetro LLDGT-005 en el periodo de validación se obtuvo un valor de 0.001%; según el rango de evaluación de desempeño establecido por (Salas et al., 2021), se considera como “Muy Bueno” en el desempeño, presentan una buena correspondencia y una correlación confiable entre los datos observados y simulados de los niveles de agua. Es así que en el piezómetro LLDGT-007 en el periodo de calibración se obtuvo un valor de 12.13%, mismo que se considera como desempeño “Bueno”, de la misma manera en el piezómetro LLDHG-012 se obtuvo el valor de 28.07%, considerado el más alto en el periodo de validación, con desempeño “Insatisfactorio” y con una correlación no muy confiable entre los datos observados y simulados.

**Figura 29.** Coeficiente de dependencia lineal entre los datos de los niveles freáticos observados y simulados en base al ajuste del criterio de NSE sin recesión en todos los piezómetros, para los periodos de calibración y validación. a): piezómetro LLDGT-005, b): piezómetro LLDGT-007, c): piezómetro LLDHG-008, d): piezómetro LLDHG-011 y e): piezómetro LLDHG-012.







**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

Finalmente se pudo determinar que el parámetro  $\beta$  es el más sensible en el proceso de simulación, en general es más sensible que los demás parámetros individuales de DM, en unos o más órdenes de magnitud, esto es coherente debido a que  $\beta$  es un parámetro global como se puede ver en los parámetros óptimos obtenidos de la Tabla 15 durante el proceso de calibración del modelo WFR sin recesión y mientras que DM solo controla una doceava parte del periodo simulado (Yang et al., 2018b).

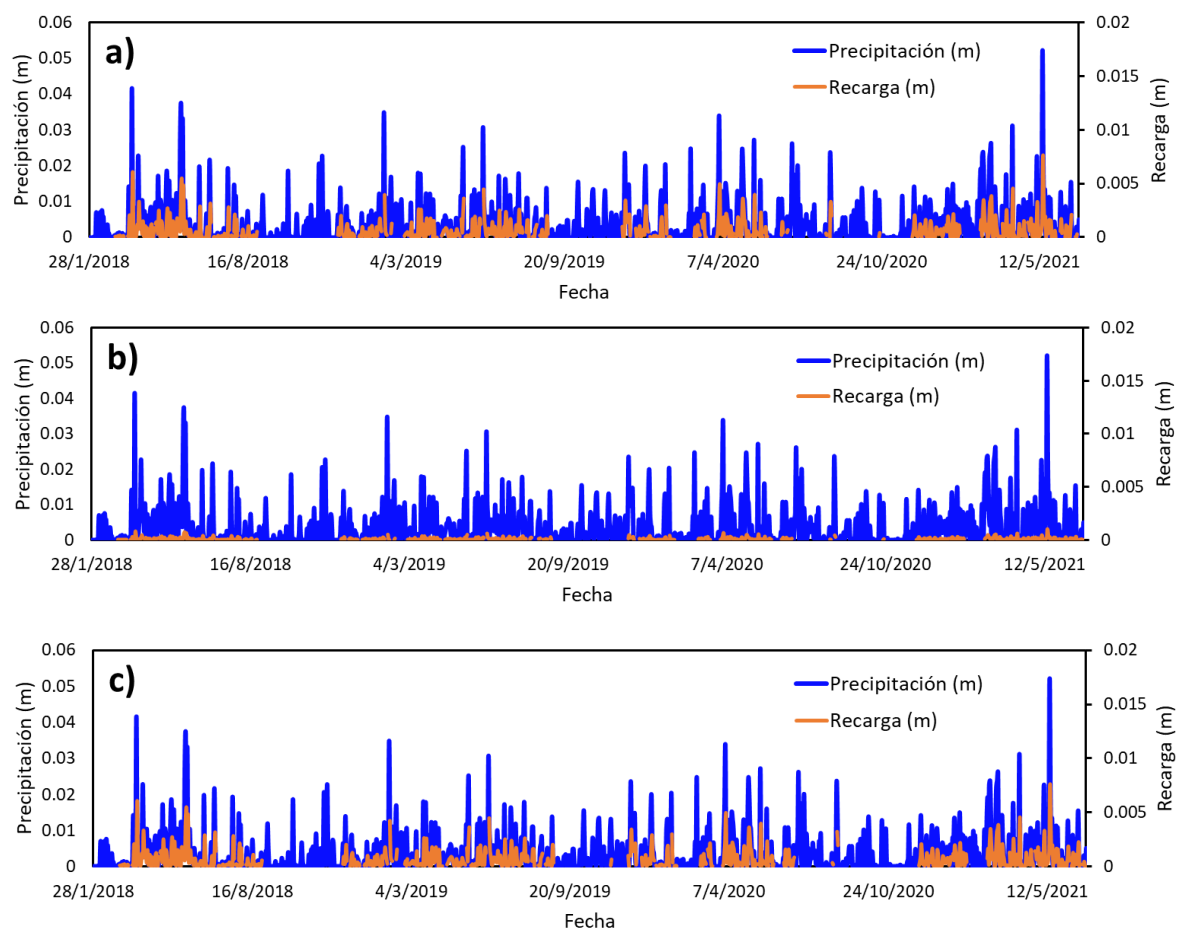
#### 4.2.2. RECARGA (CAMBIO DE ALMACENAMIENTO DEL NIVEL DE AGUA)

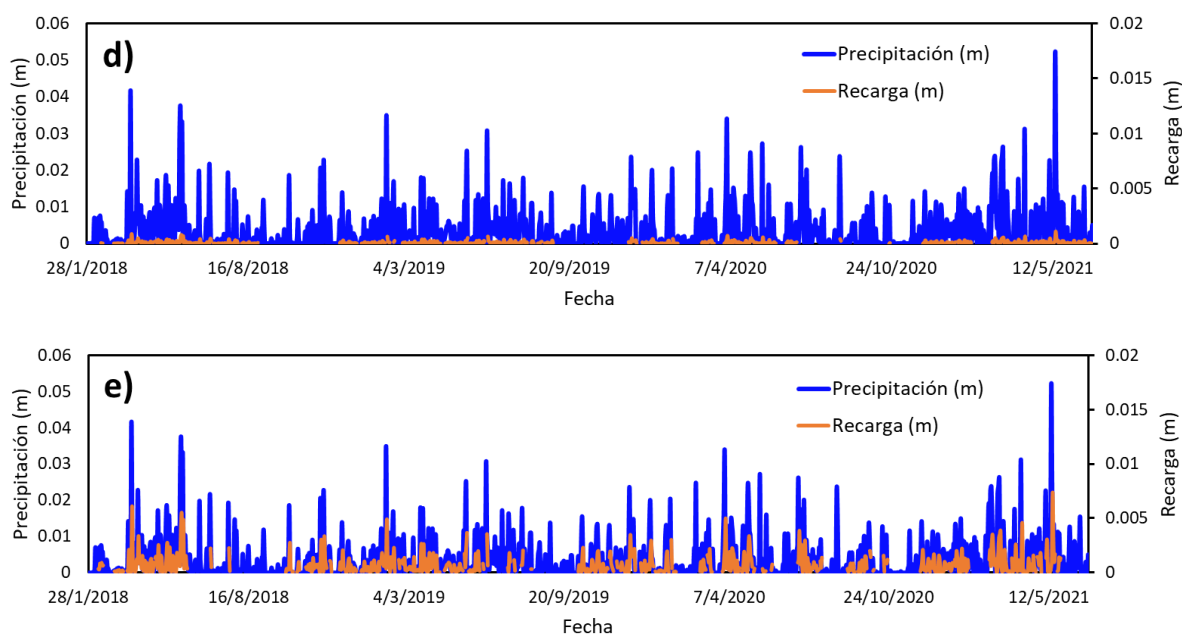
Los suelos de páramo como los Andosoles, Histosoles y Leptosoles presentan una altísima retención de agua, por lo que se atribuye principalmente a la presencia de minerales arcillosos amorfos como el Alofano y la Imogolita (Buytaert, Célleri, et al., 2006), por lo tanto las variaciones de nivel de agua no fueron bastante elevadas, sobre todo al encontrarse ubicados los sensores de nivel de agua (transductores) a diferentes profundidades, entre 67.50 m (menos profundo) a 185 m (más profundo), la subida de nivel de agua en los 5 piezómetros de cuerda vibrante osciló entre 4.0131E-08 m el 20 de mayo del 2020 en el piezómetro LLDGT-005 (Figura 30a), a 0.00760 m el 16 de mayo del 2021 en los piezómetros LLDGT-005 (Figura 30a) y LLDHG-008 (Figura 30c). En promedio la recarga (cambio de almacenamiento de agua) de agua diaria fue menor en el piezómetro LLDGT-007 con un valor de 9.76E-05 m y mayor en el piezómetro LLDHG-012 con un valor de 0.00073 m. La variabilidad en la recarga del nivel de agua que se



pueden ver en los histogramas de la Figura 30 depende principalmente de la ubicación de los piezómetros, puesto a que los piezómetros que mayor aumento del nivel de agua que se ha registrado son el LLDGT-005, LLDHG-008 y LLDHG-012 y se ubican en suelos Andosoles, el piezómetro LLDGT-007 se ubica en suelos Histosol, los dos tipos de suelos son dominantes en la zona de estudio, formados por cenizas volcánicas, ricos en materia orgánica, extremadamente porosos con alta capacidad de infiltración y retención de agua. Los Histosoles se encuentran saturados casi todo el año, la conductividad hidráulica saturada es mayor en los Histosoles que en los Andosoles (Correa et al., 2019), finalmente el piezómetro LLDHG-011 se ubica en suelo Leptosol que son suelos orgánicos poco profundos y se ubican en pendientes pronunciadas (Correa et al., 2019).

**Figura 30.** Variabilidad temporal de la precipitación y la estimación de la recarga (cambio de almacenamiento de agua) de los piezómetros LLDGT-005 (a), LLDGT-007 (b), LLDHG-008 (c), LLDHG-011 (d) y LLDHG-012 (e), durante el periodo 2018-2021.





**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

La tasa de recarga de las aguas subterráneas (cambio de almacenamiento de agua) para cada uno de los pozos de observación se calculó multiplicando el rendimiento específico ( $S_y$ ) como se muestra en la Tabla 16, con el cambio de altura en el nivel freático entre el intervalo de tiempo. El cambio de almacenamiento de agua anual estimada para la zona de estudio osciló entre 0.016 m y 0.132 m para los 5 piezómetros, lo que representa el 1.326 % y el 10.606 % de la precipitación anual (Tabla 13) que corresponde a 1.245 m.

La diferencia en los valores de nivel de agua anual para el periodo de estudio podría atribuirse a la variabilidad en la distribución e intensidad de las precipitaciones anuales, de igual forma como ya se mencionó en el párrafo anterior a los tipos de suelo de la zona de páramo. La recarga obtenida en este estudio no es parecido a las estimaciones de aguas subterráneas realizados en otras partes del mundo, (Atta-Darkwa, 2013) estimó el cambio de nivel de agua en el valle de Besease del distrito municipal de Ejisu, en la región de Ashanti (Ghana), mismo que oscilaba entre 0.133 m a 0.467 m, lo que representa el 9% y el 31% de la precipitación media anual y con un rango de coeficiente específico ( $S_y$ ) de 0.10 a 0.18, en base a esto se podría decir que las aguas subterráneas en la zona de estudio tiene una baja tasa de recarga.

El 16 de mayo del 2021, la tasa de recarga más alta fue en los en los piezómetros LLDGT-005 (Figura 30a) y LLDHG-008 (Figura 30c) con el 0.00760 m en toda la red piezométrica de observación, otra posible razón para este aumento en la tasa de recarga en el piezómetro LLDGT-005 puede ser por la presencia de finas fracturas en la litología (4 fracturas) y zonas de fallas llenas de grietas que cruzan a diferentes profundidades (16 fallas), por ende, el agua se mueve por esas zonas, en cuanto al piezómetro LLDHG-008 puede estar influenciado por el flujo lateral debido a su proximidad de aproximadamente 120 metros al Norte a la Quebrada denominada D1.

**Tabla 16.** Valores de recarga (cambio de almacenamiento de nivel de agua) en la zona de estudio.

Piezómetro	Suelo	Textura del Suelo	Rendimiento específico (Sy)	Periodo de estudio	Recarga Total (m)	Recarga Anual (m)	% de Precipitación Anual
LLDGT-005	Andosol	Limo arcilloso	0.146	28/01/2018-30/06/2021	0.485	0.123	9.907
LLDGT-007	Histosol	Arcilloso	0.02	28/01/2018-30/06/2021	0.065	0.016	1.326
LLDHG-008	Andosol	Limo arcilloso	0.146	28/01/2018-30/06/2021	0.492	0.125	10.055
LLDHG-011	Leptosol	Franco arcilloso	0.021	28/01/2018-30/06/2021	0.071	0.018	1.455
LLDHG-012	Andosol	Limo arcilloso	0.146	28/01/2018-30/06/2021	0.501	0.132	10.606

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

### 4.2.3. MODELO SIMPLE CON RECESIÓN EN LA PARTE INFERIOR

En esta parte de la metodología que corresponde a los modelos simples con recesión natural ( $R_N$ ) y dinámica ( $R_D$ ) de los 5 piezómetros profundos, se detalla los resultados obtenidos de la calibración y validación del nivel freático a través de la aplicación del modelo WFR, mismo que se encuentra en función de la precipitación, donde cada par de datos genera un conjunto de parámetros, algunos de ellos fueron asumidos de acuerdo a la revisión bibliográfica y otros calibrados con el uso de la herramienta Solver para el cálculo de las diferentes ecuaciones, de igual manera se muestra los respectivos

hidrogramas a partir de una serie de datos diarios de cada piezómetro durante el periodo 2018-2021.

### *Recesión Natural RN*

El primer modelo con recesión de WFR aplicado en la zona de estudio fue eficaz en la estimación de los niveles freáticos a partir de los datos observados en los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012, es así que para el periodo establecido para la calibración del modelos en base a los criterios de bondad ajuste, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue más representativo para todo los piezómetros, cuyos valores obtenidos oscilan de 0.57 (piezómetro LLDHG-012) a 0.88 (piezómetro LLDGT-007), es decir de 0.0187 m a 0.0159 m con una media de 0.0173 m. Según (Cabrera, 2009), acerca de los valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE), los piezómetros LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008 y LLHG-011, los valores obtenidos se encuentran en el rango  $> 0.8$  que se encuentra considerado como de “Excelente” ajuste y por ende aceptable para el modelo WFR con recesión natural; en cuanto al piezómetro LLDHG-012, el valor fue el más bajo por lo que se encuentra dentro del rango de 0.4 – 0.6, considerado como de ajuste Bueno. La buena concordancia entre los niveles de agua observados y simulados indica que la precipitación y los diferentes parámetros utilizados en la calibración explican la mayor parte de la dinámica adyacente de las fluctuaciones de las aguas subterráneas. En cuanto a la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) se obtuvo valores muy bajo que oscilan entre 0.08 y 0.26 por lo que se consideró utilizar el criterio de NSE. En cuanto a la evaluación métrica con el Porcentaje de BIAS, al igual que en el modelo WFR sin recesión en los 5 piezómetros se ha determinado valores con un porcentaje positivo, que indica sobre estimación (Velásquez L & León K, 2022), por lo tanto, se encuentra dentro de los rangos de evaluación de desempeño de “Muy Bueno” a “Insatisfactorio” entre los datos observados y simulados en el periodo de calibración y validación de los niveles de agua.

**Tabla 17.** Criterios de calibración y validación de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con Recesión Natural ( $R_N$ )

Piezómetro		Nivel Freático medio (msnm)		RMSE (m)	NSE (m)	PBIAS (%)
		Observado	Simulado			
LLDGT-005	Calibración	3710.9188	3710.9858	0.14	0.83	8.957
	Validación	3710.6923	3710.7111	0.11	0.91	0.001
LLDGT-007	Calibración	3705.1870	3705.1710	0.12	0.88	12.135
	Validación	3704.7408	3704.7524	0.08	0.95	12.069
LLDHG-008	Calibración	3710.1181	3710.1412	0.17	0.82	7.670
	Validación	3710.0140	3710.0234	0.11	0.92	2.564
LLDHG-011	Calibración	3706.9451	3706.9724	0.16	0.82	10.106
	Validación	3706.8040	3706.8561	0.11	0.91	12.071
LLDHG-012	Calibración	3790.2016	3790.2203	0.27	0.57	0.413
	Validación	3790.1258	3790.1164	0.26	0.59	28.078

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

Los valores mensuales calculados de la variable M varían entre 0 m y 0.0311 m en los 5 piezómetros, con una media de 0.00581mm y una desviación estándar de 0.0052 m. Este resultado implica que la descarga de aguas subterráneas en la zona de estudio es relativamente baja. De acuerdo con el análisis de sensibilidad, el parámetro  $\beta$  es el más sensible de la simulación de hecho a que es un parámetro global que está vinculado también con el rendimiento específico, es así que los valores bajos de  $\beta$  indican que el agua que se encuentra estancada amortigua el ascenso y descenso del nivel freático. En este caso los valores de la eficiencia de infiltración  $\beta$  calculado para los 5 piezómetros oscilan entre 3 y 4.939, con una media de 3.885 (Tabla 18), mismos que se consideran bajos en comparación al estudio realizado por (Yang et al., 2018b) donde sugiere que el valor de  $\beta$  sea constante ya que es un factor importante para la eficacia de la infiltración.

En los valores obtenidos del presente trabajo se muestra que la distribución de la eficiencia de infiltración está controlada por las características intrínsecas de las aguas superficiales y depende también de la intensidad y frecuencia de la precipitación. El rendimiento específico ( $S_y$ ) se encuentra en el rango de 0.0039 y 0.0403, con una media de 0.021, los valores más bajos se ha determinado en los piezómetros LLDGT-005 (0.0039) y LLDHG-008 (0.0065), puesto a que estos se ubican en un suelo Andosol con textura Limo arcilloso, sin embargo, en el piezómetro LLDHG-012 al contar con el mismo

tipo de suelo y textura se obtuvo un valor de 0.0403, estos valores se consideran bajos en comparación al  $S_y$  de (Lv et al., 2021b), que sugiere un valor de 0.146. en el caso del piezómetro LLDGT-007 se obtuvo un valor de 0.021, mismo que se ubica en un suelo Histosol con textura Arcillosa, y finalmente en el caso del piezómetro LDHG-011, se obtuvo un valor de 0.023, ubicado en un suelo Leptosol con textura Franco Arcillosa, estos dos últimos piezómetros son parecidos a los valores de  $S_y$  recomendados por (Lv et al., 2021b) que son de 0.02 y 0.021 respectivamente.

En el caso de la tasa de infiltración ( $\alpha$ ), los resultados muestran que tiene una variación máxima de 0.1159 m día<sup>-1</sup> en el piezómetro LLDHG-012 a una mínima de 0.0152 m día<sup>-1</sup> en el piezómetro LLDGT-005, lo que a nivel de los 5 piezómetros se tiene una media de 0.0892 m día<sup>-1</sup>, lo que es considerado un valor muy bajo en relación al estudio realizado por (Tu et al., 2011) que obtuvo un valor mínimo de 5.5 m día<sup>-1</sup>, cuyo estudio fue realizado en un ecosistema diferente al presente estudio, en la llanura de Pingtung, región agrícola que tiene limitadas condiciones hidrológicas por lo que se considera como una zona óptima para la recargar artificialmente las de aguas subterráneas.

**Tabla 18.** Parámetros óptimos de calibración y validación obtenidos a partir del modelo  $R_N$ .

Piezómetro	$S_y$	M (m)	$\alpha$ (m día <sup>-1</sup> )	$\beta$
LLDGT-005	0.0039	3.530E-05	0.0152	3.885
LLDGT-007	0.0210	3.201E-05	0.1038	4.939
LLDHG-008	0.0065	5.832E-05	0.0261	4.026
LLDHG-011	0.0230	2.565E-04	0.0892	3.881
LLDHG-012	0.0403	1.659E-04	0.1159	3.000

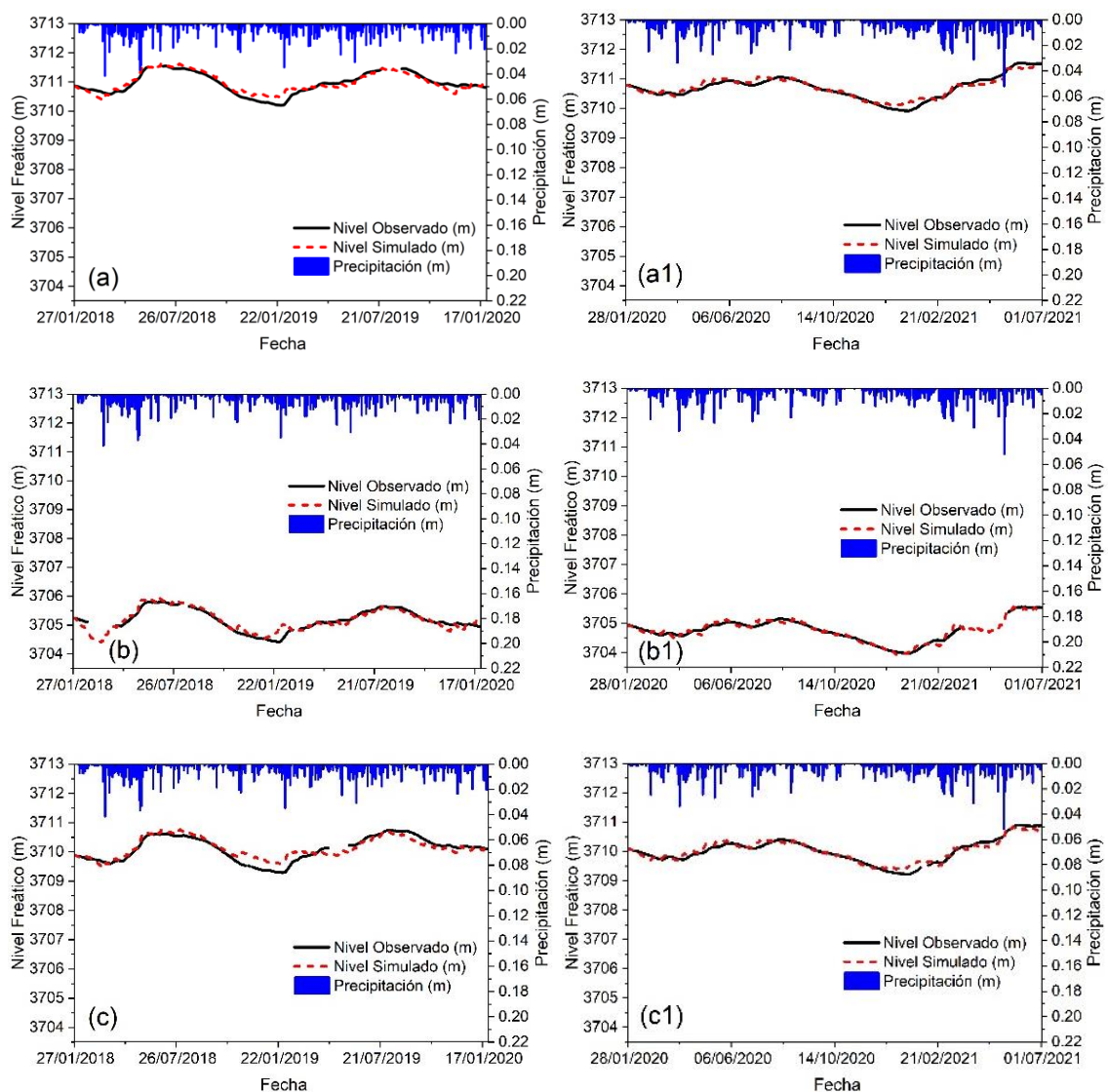
**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

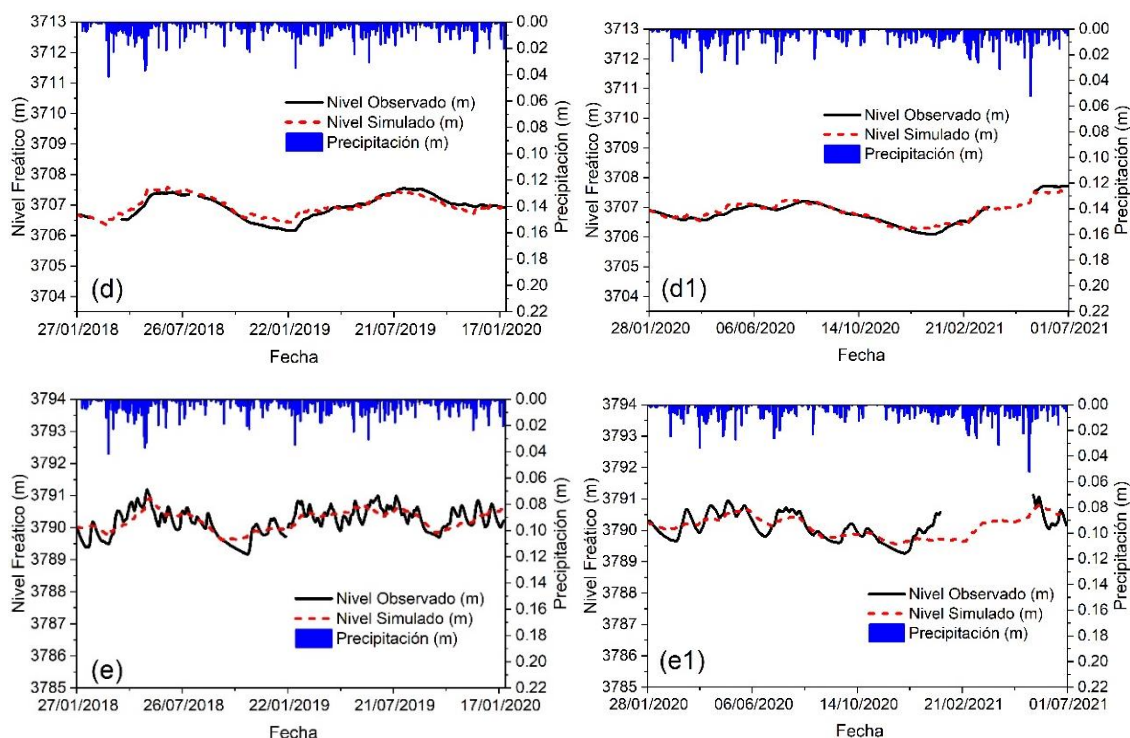
En la Figura 31 se puede ver los hidrogramas de la variabilidad de la precipitación, niveles freáticos a partir de datos observados y simulados, lo que indica que la mayoría de las fluctuaciones del nivel de aguas subterráneas se encuentran en función de los parámetros optimizados por el modelo de recesión natural ( $R_N$ ) de la ecuación 9 y en la Tabla 18 se encuentran los valores obtenidos. También se puede observar que el modelo no logra simular valores con picos muy bajos ni altos, de igual manera, el modelo si reacciona a los eventos de precipitación como se puede ver en las observaciones. Sin

embargo, en el piezómetro LLDHG-012, es el que menos se ajusta el modelo, esto es debido a que en los niveles observados se presenta mayor variabilidad y por tal motivo el comportamiento es menos significativo.

**Figura 31.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDGT-005 (a, a1), LLDGT-007 (b, b1), LLDHG-008 (c, c1), LLDHG-011 (d, d1) y LLDHG-012 (e, e1), durante el periodo 2018-2021. Los gráficos a, b, c, d y e corresponde al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1, b1, c1, d1 y e1 corresponde al periodo validado.







**Fuente:** El Autor

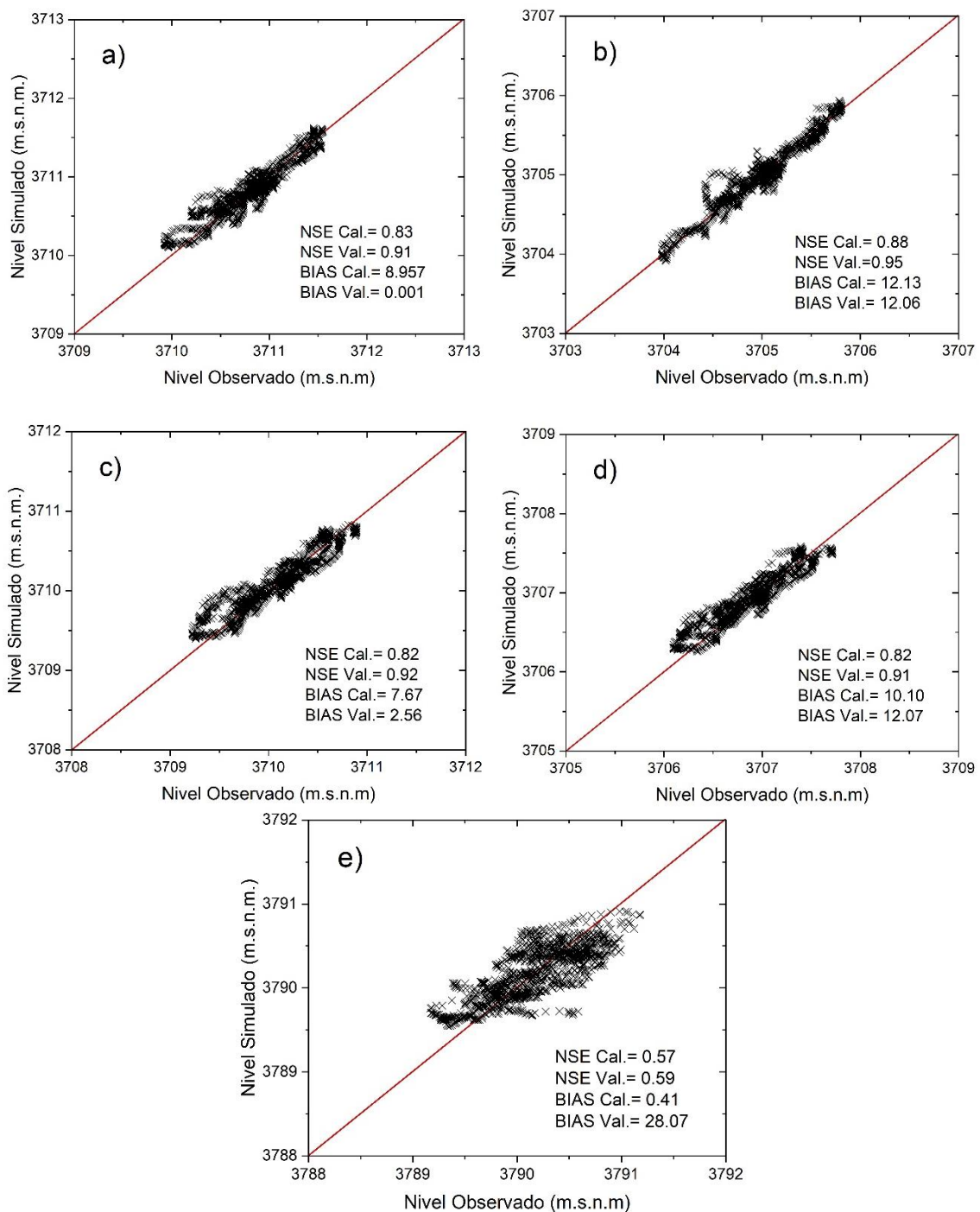
**Elaboración:** El Autor

En los gráficos de dispersión de la Figura 32, se puede ver que los datos observados y simulados del piezómetro LLDHG-012 existe una dispersión muy alejada de la línea de tendencia, es así que no existe un buen ajuste con los valores observados, sin embargo, los datos de los demás piezómetros su comportamiento de dispersión en relación a la línea de tendencia es similar.

Además, en la Figura 32 se puede observar que el sesgo de PBIAS reflejó una clara diferencia entre los valores obtenidos de los periodos de calibración y validación (Tabla 17), todos los valores determinados tienen un PBIAS positivo por lo que se consideran sobre estimados, es así que solamente en el piezómetro LLDHG-012 se obtuvo el valor más bajo de PBIAS de 0.41% en el periodo de calibración, como también en el piezómetro LLDGT-005 en el periodo de validación se obtuvo un valor de 0.001%; de acuerdo a (Salas et al., 2021) referente al rango de evaluación de desempeño se considera como “Muy Bueno”, presentan buena correspondencia y una correlación confiable entre los datos observados y simulados de los niveles de agua, sin embargo, en el piezómetro LLDGT-007 en el periodo de calibración se determinó un valor de 12.13%, mismo que se considera como desempeño “Bueno”, finalmente en el

piezómetro LLDHG-012 se obtuvo el valor de 28.07%, que corresponde al más alto en el periodo de validación, con desempeño “Insatisfactorio” y con una correlación no muy confiable entre los datos observados y simulados de los niveles de agua.

**Figura 32.** Gráficos de dispersión entre los niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a), LLDHG-007 (b), LLDHG-008 (c), LLDHG-011 (d) y LLDHG-012 (e), durante el periodo 2018-2021.



**Fuente:** El Autor  
**Elaboración:** El Autor

### *Recesión Dinámica RD*

El segundo modelo con recesión de WTFR aplicado en la zona de estudio para la estimación de los niveles freáticos a partir de los datos observados de niveles freáticos y precipitación, en este caso solamente se consideró los piezómetros LLDGT-005 y LLDGT-007 debido a que los dos son los más representativos ya que se encuentran ubicados el primero en tipo de suelo Andosol y el segundo en Histosol, es así que para el periodo establecido para la calibración de modelos en base a los criterios de bondad ajuste, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue más representativo para los piezómetros establecidos, cuyos valores obtenidos corresponden a 0.71 (piezómetro LLDGT-007) y 0.72 (piezómetro LLDGT-005), es decir de 0.0288m y 0.0630m con una media de 0.0459 m. De acuerdo con los valores referenciales determinados por (Cabrera, 2009) del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE), los piezómetros mencionado se encuentran dentro del rango de 0.6-0.8, el cual tienen un ajuste Muy bueno y por ende es aceptable para la aplicación del modelo WTFR con recesión dinámica ( $R_D$ ). Al igual que el método anterior, la buena concordancia entre los niveles freáticos observados y simulación nos dan a conocer que la dinámica de las fluctuaciones de las aguas subterráneas se encuentra relacionados con la precipitación y los diferentes parámetros utilizados en el proceso de calibración. De igual forma la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), también se obtuvo valores muy bajos que oscilan entre 0.18 y 0.19 respectivamente, por lo tanto, se optó por utilizar el método NSE. Finalmente para la evaluación métrica del Porcentaje de BIAS en los 2 piezómetros se ha determinado valores con un porcentaje positivo tanto en el periodo de calibración como en la validación, el cual indica sobre estimación en los valores obtenidos (Velásquez L & León K, 2022), por lo tanto, se encuentra dentro de los rangos de evaluación de desempeño de “Muy Bueno” a “Bueno” entre los datos observados y simulados en el periodo de calibración y validación de los niveles de agua como se indica en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con recesión dinámica.

Piezómetro		Nivel Freático medio (msnm)		RMSE (m)	NSE (m)	BIAS (%)
		Observado	Simulado			
LLDGT-005	Calibración	3710.9188	3710.9818	0.18	0.72	8.957
	Validación	3710.6922	3710.7494	0.24	0.6	0.002
LLDGT-007	Calibración	3705.1870	3705.2159	0.19	0.71	12.136
	Validación	3704.7407	3704.7897	0.24	0.61	0.121

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

El procedimiento de calibración realizado en el presente estudio, permitió restablecer los mejores parámetros para representar el comportamiento del modelo (Tabla 19), es así que los valores obtenidos de  $S_y$  son similares en los dos piezómetros (Tabla 20), según (Lv et al., 2021b) recomienda un valor más alto de 0.146 en el piezómetro LLDGT-005 puesto a que se encuentra en un suelo de tipo Andosol con textura limo arcilloso, sin embargo, el valor de 0.02 obtenido para el piezómetro LLDGT-007, es similar al valor recomendado por el mismo autor, puesto que se encuentra en un tipo de suelo Histosol con textura arcillosa. El valor de  $K$  obtenido de  $4 \times 10^{-7}$  es similar al valor determinados en estudio realizado por (Itasca Denver, 2017) en las pruebas hidráulicas (test de packer) realizados en el sistema de roca profunda (sistema inferior), por ende dicho autor determina dentro de un rango de bajo a najo en comparación a los rangos globales de  $k$ .

La eficiencia de infiltración  $\beta$  ha sido asimilado en los dos piezómetros con el valor de uno, que corresponde a un valor que mejor se ajustó en el proceso de calibración del modelo, sin embargo, (Yang et al., 2018b) determinó un valor medio de 5.2 para 82 piezómetros.

**Tabla 20.** Parámetros óptimos de calibración y validación obtenidos a partir del modelo  $R_D$ .

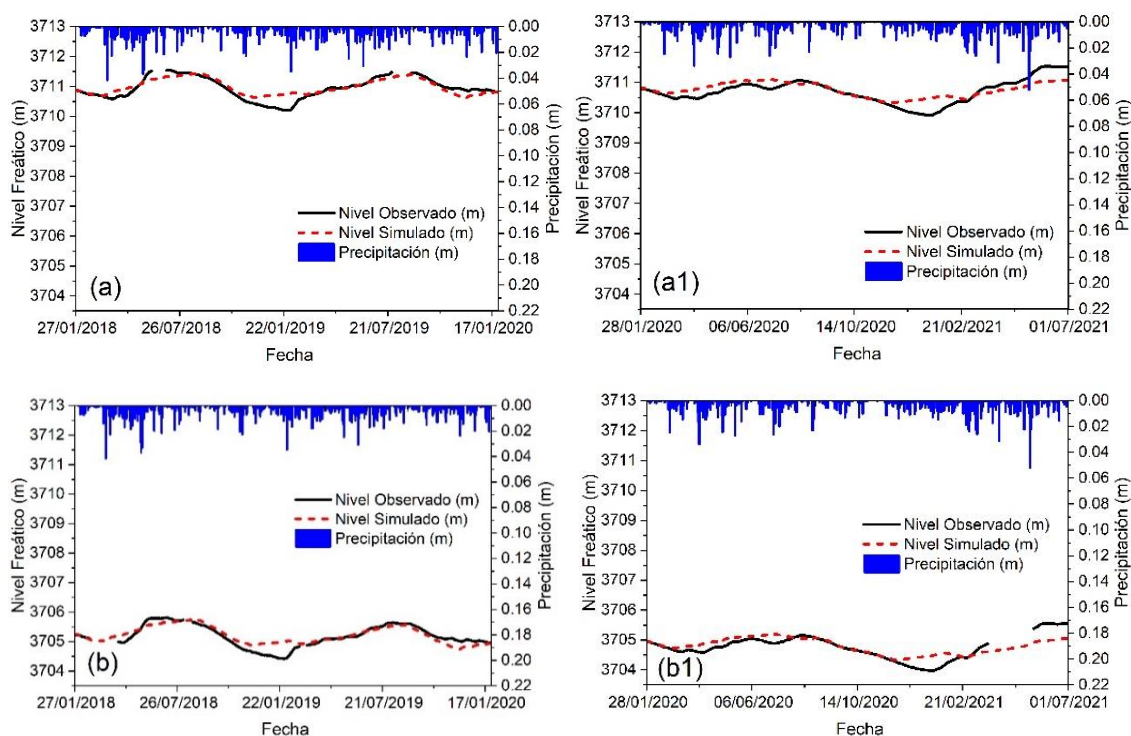
Piezómetro	$S_y$	$K (m.s^{-1})$	$\frac{t.m}{(día)(m)}$	$X (m)$	$\beta$
LLDHG-005	0.02	0.0000004	99.601	0	1
LLDGT-007	0.02	0.0000004	92.089	0.00037	1

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

Los hidrogramas de la variabilidad de la precipitación, niveles freáticos observados y simulados de la Figura 33, indica que la fluctuación de los niveles de agua depende de la intensidad y frecuencia de la precipitación y también de los parámetros simulados y calibrados en el modelo de recesión dinámica ( $R_D$ ) de la ecuación 10, tal como se resume en la Tabla 20, sin embargo, al igual que el modelo de recesión anterior ( $R_N$ ), en el proceso de simulación tampoco logra ajustarse bien a los valores picos altos y bajos, reacciona a los eventos de precipitación, por lo que si muestra una buena aproximación entre ellos.

**Figura 33.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a, a1) y LLDHG-007 (b, b1). Los gráficos a y b corresponden al periodo de calibración, mientras que los gráficos a1 y b1 corresponden al periodo validado durante el periodo 2018-2021.



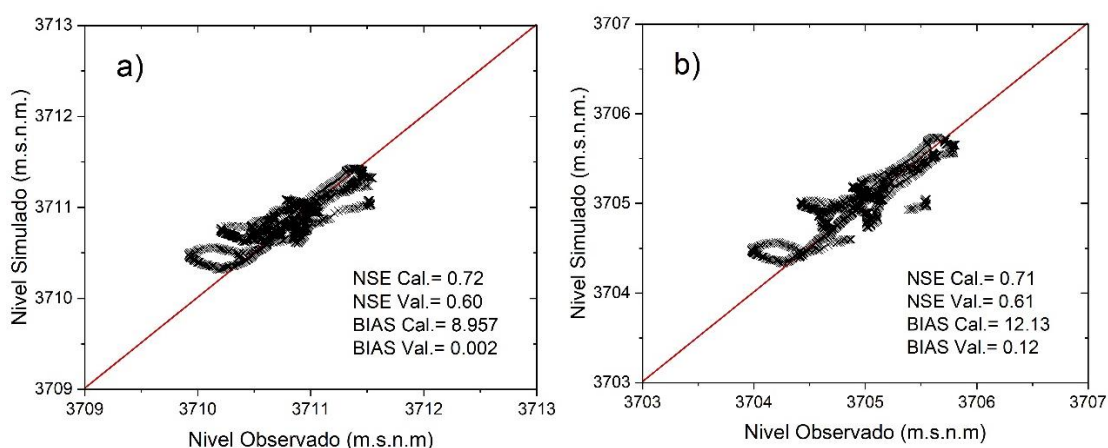
**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

En la Figura 34 se puede ver los gráficos de dispersión entre los niveles simulados y observados de los piezómetros LLDGT-005 y LLDGT 007, donde se puede ver puede ver que el comportamiento de dispersión de los datos en relación a la línea de tendencia presenta buena relación. Además, en la Figura 34 se puede observar que el sesgo de

PBIAS en los 2 piezómetros reflejó una clara diferencia entre los valores obtenidos de los periodos de calibración y validación (Tabla 19). Todos los valores del Porcentaje de BIAS son positivos por lo que se consideran sobre estimados, es así que tanto en el piezómetro LLDGT-005 y LLDGT-007 se obtuvieron los valores más altos en el periodo de calibración de 8.95% y 12.13%, de acuerdo a (Salas et al., 2021) son considerandos dentro del rango de evaluación de desempeño de “Muy Bueno” y “Bueno” respectivamente, sin embargo, en los mismos piezómetros LLDGT-005 y LLDGT-007 en el periodo de validación se obtuvo se obtuvieron valores bajos de 0.002% y 0.121% considerados con desempeño "Muy Bueno" por lo que son aceptables y presentan correlación confiable entre los niveles freáticos observados y simulados.

**Figura 34.** Gráficos de dispersión entre los niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-005 (a) y LLDGT-007 (b), durante el periodo 2018-2021.



**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

#### 4.2.4. MODELO ACOPLADO AL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS SUPERIOR E INFERIOR

Para la aplicación de este modelo se procedió aplicar el modelo WFR a partir de los datos observados del nivel freático, precipitación y un conjunto de parámetros asumidos y calibrados de acuerdo con la ecuación 11. Este modelo consiste en acoplar tanto el sistema poco profundo (sistema superior) que para este caso se usó los datos del piezómetro LLDHG10A, con el sistema profundo (sistema inferior) se consideró el piezómetro LLDHG-008, cuya finalidad es determinar la conectividad hidráulica entre



estos dos sistemas y el aporte a la quebrada Quinahuayco que es la más cercana a nivel de la zona de estudio.

### *Recesión de Leakeance RL*

Se utilizó los niveles freáticos del piezómetro LLDHG-10A para el sistema superior y el piezómetro LLDHG-008 para el sistema inferior debido a que entre estos se encuentra a una distancia de 157 metros, donde el piezómetro LLDHG-10A es de tubo abierto, cuya profundidad es de 2.2 metros y menos profundo de toda la red, se ubica en un tipo de suelo Leptosol y con textura franco arcilloso y el piezómetro LLDHG-008 de cuerda vibrante, con una profundidad de 231.30 metros que corresponde a uno de los más profundos en la zona de estudio, ubicado en un tipo de suelo Andosol, con textura Limo arcilloso. Posteriormente, se realizó la calibración durante el periodo 05/04/2018 al 09/10/2019 y la validación durante el periodo 10/10/2019 al 30/06/2019. En el periodo de calibración del modelo estuvo en base a los criterios de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) para lo cual este último fue el más representativo con un valor obtenido de 0.36, esto nos da a conocer que de acuerdo con los valores referenciales determinados por (Cabrera, 2009) del criterio de Nash-Sutcliffe (NSE), los piezómetros mencionado se encuentran dentro del rango de 0.2-0.4, el cual tienen un ajuste Satisfactorio y por ende es aceptable para la aplicación del modelo WTRF con recesión de Leakeance (RL). A diferencia de los métodos anteriores, es el método que menos concordancia existe entre los niveles freáticos observados y simulados. Finalmente, en el periodo de validación en la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) se obtuvo un valor más alto de 0.52 que el NSE que se obtuvo un valor negativo de -2.98.

En la Tabla 21 se puede observar que el sesgo de PBIAS en los piezómetros LLDHG-10A y LLDHG-008 reflejó una clara diferencia entre los valores obtenidos de los periodos de calibración y validación, el Porcentaje de BIAS es positivo por lo que se consideran sobre estimados, es así que en el periodo de calibración se obtuvo el valor más alto de 8.64%, según (Salas et al., 2021) es considerado dentro del rango de evaluación de desempeño de "Muy Bueno", pero para el periodo de validación se obtuvo un valor mucho más bajo



de 0.21% que también se considera como desempeño "Muy Bueno", siendo aceptables con correlación confiable entre los niveles freáticos observados y simulados.

**Tabla 21.** Criterios de calibración de Nash-Sutcliffe (NSE), Error cuadrático medio (RMSE) y PBIAS con recesión de Leakeance.

Piezómetros	Nivel Freático medio (msnm)		RMSE (m)	NSE (m)	PBIAS (%)	
	Observado	Simulado				
LLDHG-10A- 008	Calibración	3726.9488	3726.7019	0.32	0.36	8.645
	Validación	3726.817	3726.6731	0.52	-2.98	0.021

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

El grupo de parámetros optimizados a partir del modelo de recesión de Leakeance se puede ver en la Tabla 22. El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) fue tomado del estudio realizado por (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006), el cual nos recomienda un valor de 0.42; en cuanto al rendimiento específico ( $S_y$ ), los valores determinados de 0.133 (piezómetro LLDHG10A) y 0.341 (piezómetro LLDHG-008) se encuentran altos en comparación a lo recomendado por (Lv et al., 2021b) que es de 0.021 para el poco profundo y de 0.146 para el profundo, estos fueron determinados a partir de la textura del suelo. La eficiencia de infiltración ( $\beta$ ), se ha determinado de 2.93 en los dos sistemas de aguas subterráneas.

**Tabla 22.** Parámetros óptimos de calibración y validación del sistema superior (piezómetro LLDHG-10A) e inferior (piezómetro LLDHG-008) obtenido a partir del modelo de recesión de Leakeance.

Piezómetro	$K_c$	$H_i$ (m)	$H_L$ (m)	Fondo pozo	$S_y$	$\sigma$	$\alpha$	$\beta$	M
LLDHG-10A (Sist. Superior)	0.42	3725.8	-	-	0.133	0.0033	-	2.93	0
LLDHG-008 (Sist. Inferior)	-	-	0	3547.68	0.341	-	1	2.93	-

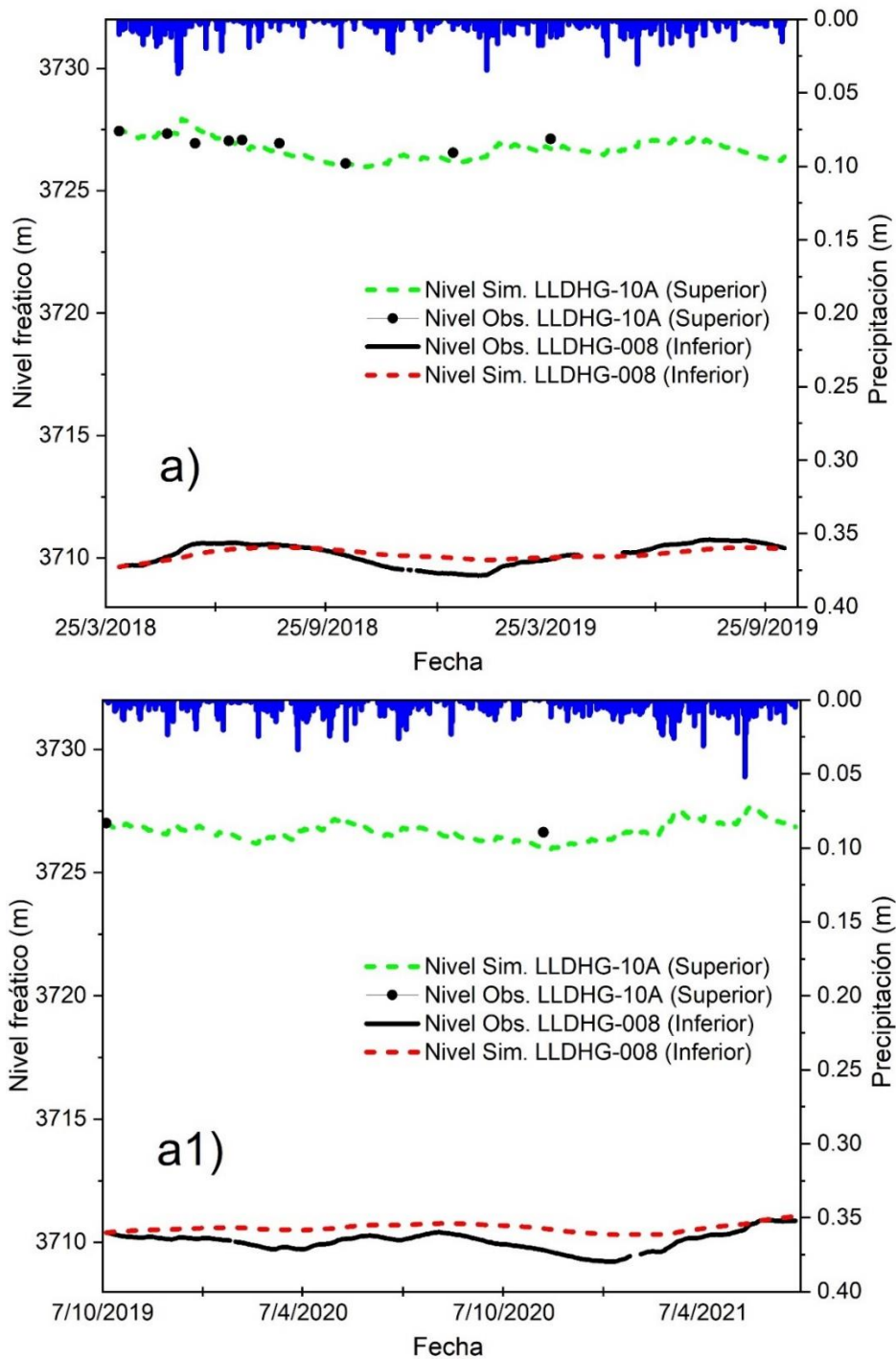
**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

En la Figura 35 se muestra que en los datos observados del piezómetro de sistema superior poco profundo LLDHG-010A, tanto en el periodo de calibración y validación, los datos simulados no logran ajustarse bien a los observados, esto es debido a la poca

cantidad de información que se dispone de nivel de agua en este pozo (11 datos); en cuanto al piezómetro LLDHG-008 de sistema inferior profundo, el ajuste es mejor.

**Figura 35.** Variabilidad de la precipitación y niveles freáticos observados y simulados de los piezómetros LLDHG-10A (sistema superior) y LLDHG-008 (sistema inferior). El gráfico a corresponde al periodo de calibración, mientras que el gráfico a1 corresponde al periodo validado, durante el periodo 2018-2021.



Fuente: El Autor  
Elaboración: El Autor

### 4.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES MODELOS DE RECESIÓN

Con la aplicación de los 3 modelos de recesión, en la Tabla 23, se muestra que el mejor ajuste se tuvo en el modelo de Recesión Natural, con un valor promedio en el periodo de calibración en los 5 piezómetros de 0.78, a pesar que el valor más bajo se obtuvo en el piezómetro LLDHG-012, de acuerdo a los rangos establecidos por (Cabrera, 2009), se considera un ajuste “Muy bueno”, en cuanto al periodo de validación se obtuvo un valor más alto de 0.85, considerado como “Excelente” ajuste. El valor más bajo obtenido es en el modelo de Recesión de Leakeance con el 0.52 referente al sistema acoplado superior e inferior, como también la validación tenemos un valor negativo de -2.98 que corresponderían a “Satisfactorio” e “Insuficiente”.

De acuerdo al análisis realizado con el indicador de rendimiento sesgo del Porcentaje de BIAS, en la Tabla 23 se puede observar una diferencia considerable entre los valores obtenidos, tienen un PBIAS positivo por lo que están sobre estimados para los periodos de calibración y validación durante la aplicación de los 3 modelos de recesión. En el piezómetro LLDHG-012 del modelo de recesión natural se obtuvo el valor más bajo de PBIAS de 0.41% en el periodo de calibración, como también en el piezómetro LLDGT-005 del mismo modelo de recesión en el periodo de validación se obtuvo un valor de 0.001%; según (Salas et al., 2021) establece el rango de evaluación de desempeño como “Muy Bueno”, presentan buena correspondencia y una correlación confiable entre los datos observados y simulados de los niveles de agua. En el piezómetro LLDGT-007 para el modelo de recesión natural y dinámica en la calibración los valores obtenidos son similares de 12.13%, mismo que se considera como desempeño “Bueno”, de la misma manera en el piezómetro LLDHG-012 del modelo de recesión natural se obtuvo el valor de 28.07%, considerado el más alto en el periodo de validación, con desempeño “Insatisfactorio”.

**Tabla 23.** Comparación de los valores obtenidos del criterio de Nash-Sutcliffe, RMSE y PBIAS en el periodo de calibración y validación.

Recesión	Piezómetro		Nivel Freático medio (msnm)		RMSE (m)	NSE (m)	PBIAS (%)	
			Observado	Simulado				
Natural	LLDGT-005	Calibración	3710.9188	3710.9858	0.14	0.83	8.957	
		Validación	3710.6923	3710.7111	0.11	0.91	0.001	
	LLDGT-007	Calibración	3705.187	3705.171	0.12	0.88	12.135	
		Validación	3704.7408	3704.7524	0.08	0.95	12.069	
	LLDHG-008	Calibración	3710.1181	3710.1412	0.17	0.82	7.670	
		Validación	3710.014	3710.0234	0.11	0.92	2.564	
	LLDHG-011	Calibración	3706.9451	3706.9724	0.16	0.82	10.106	
		Validación	3706.804	3706.8561	0.11	0.91	12.071	
	LLDHG-012	Calibración	3790.2016	3790.2203	0.27	0.57	0.413	
		Validación	3790.1258	3790.1164	0.26	0.59	28.078	
	Dinámica	LLDGT-005	Calibración	3710.9188	3710.9818	0.18	0.72	8.957
			Validación	3710.6922	3710.7494	0.24	0.6	0.002
LLDGT-007		Calibración	3705.187	3705.2159	0.19	0.71	12.136	
		Validación	3704.7407	3704.7897	0.24	0.61	0.121	
Leakeance	LLDHG-10A-008	Calibración	3726.9488	3726.7019	0.32	0.52	8.645	
		Validación	3726.817	3726.6731	0.36	-2.98	0.021	

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

Los diferentes parámetros calibrados y estimados se muestran en la Tabla 24, en la aplicación del modelo de Recesión Natural se consideraron los 5 piezómetros establecidos, para la Recesión Dinámica se consideraron 2 piezómetros profundos y para la Recesión de Leakeance se consideró un piezómetro profundo y uno superficial. Entre la recesión Natural y Dinámica, en el parámetro del rendimiento específico ( $S_y$ ) para el piezómetro LLDGT-007 se obtuvo un valor optimizado casi similar, esto es debido a que de manera particular se ubica en un suelo Histosol, donde la retención de agua es mayor que en los demás piezómetros, en cuanto a la eficiencia de infiltración ( $\beta$ ) que es el parámetro más sensible de todos considerado dentro de las variables de calibración y validación de todos los modelos se obtuvo un valor promedio de 3.94, mientras que en la recesión de Leakeance de 2.93 y en la recesión dinámica de 1.

**Tabla 24.** Comparación de los parámetros óptimos de calibración entre los 3 modelos de recesión para los 6 piezómetros de estudio.

Recesión	Parámetros	Unidad	Piezómetro					
			LLDGT-005	LLDGT-007	LLDHG-008	LLDHG-011	LLDHG-012	LLDHG-10A
Natural	Sy		0.0039	0.021	0.0065	0.023	0.0403	
	M	m	3.53E-05	3.20E-05	5.83E-05	2.57E-04	1.66E-04	
	$\alpha$	m.día <sup>-1</sup>	0.0152	0.1038	0.0261	0.0892	0.1159	
	$\beta$		3.885	4.939	4.026	3.881	3	
Dinámica	Sy		0.02	0.02				
	K	m.s <sup>-1</sup>	0.0000004	0.0000004				
	t.m	día.m	99.601	92.089				
	X	m	0	0.00037				
	$\beta$		1	1				
Leakeance	Kc				-		0.42	
	Hi	m			-		3725.8	
	HL	m			0		-	
	Fondo pozo	m			3547.68		-	
	Sy				0.341		0.133	
	$\sigma$				-		0.0033	
	$\alpha$	m.día <sup>-1</sup>			1		-	
	$\beta$				2.93		2.93	
	M				-		0	

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

## 4.4. COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA WTFR CON OTROS MÉTODOS

Según el estudio realizado por (BAUM et al., 2018) utilizó el método WTF para estimar la recarga de fuentes discontinuas en acuíferos libres ubicados en áreas urbanas, estimó mensualmente considerando el Sy de 0.09 del suelo en el área de estudio, también se afirma que este método tiene ciertas limitaciones como la variación del nivel de agua en un punto dado es solo representativo dentro de la cuenca hidrográfica donde se ubica. La recarga total estimada en la zona fue de aproximadamente 283.58 mm año<sup>-1</sup>, correspondiente al 11,57% de la precipitación total (2450 mm), observándose que, a mayor espesor de la capa insaturada, mayor es la tasa cuantificada.

El método WTF para la determinación de la recarga y descarga fue utilizado en la zona de estudio de la Pampa Húmeda argentina que se encuentra entre 240 y 70 msnm, zona con excelente aptitud para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas, se utilizaron datos diarios, recomienda que este es un método muy útil para determinar variaciones de recarga y es aplicable en acuíferos freáticos. Aproximaron un  $S_y$  de 0.08, valor coincidente de arcilla arenosa y limo arenoso. Finalmente, con este método determinaron las descargas por evaporación y evapotranspiración desde el nivel freático, representando una pérdida importante de la recarga total que corresponde al 42%. La recarga total anual promedio estimada en un periodo de 11 años fue de 252 mm y la pérdida anual promedio de la recarga a la atmosfera fue de 105 mm (Marcovecchio & Varni, 2020).

En la investigación realizada por (Gonçalves et al., 2020), también utiliza el método WTF en la zona de estudio ubicado en el Valle semiárido de aguas calientes, en el centro de México, que involucra el  $S_y$ , nivel freático y drenaje subsuperficial de aguas subterráneas, como resultado se obtuvo una variación de 0.86 a 525 mm año<sup>-1</sup>. Los resultados del estudio presentan similitud en volumen y espacio con estudio previos. De acuerdo a trabajo realizado por (Effect et al., 2005) en la estimación de la recarga directa del acuífero en la zona de una cantera denominada el Arenal utilizando datos de precipitación y nivel del acuífero y mediante el método WTF, da a conocer que la zona estudiada la porosidad eficaz o rendimiento específico es menor al 1%, por lo que la recarga directa estimada fue de 150 mm/anales representando el 12% de la precipitación.

De acuerdo con los estudios mencionados y que se ha utilizado el método WTF se centran en estimar principalmente la recarga de las aguas subterráneas, sin embargo, el método utilizado en el presente estudio corresponde a un modelo de fluctuación del nivel freático modificado (WTFR), que tiene como ventaja la estimación de la recarga y descarga de manera simultánea, mismo que utiliza parámetro estimado y calibrados para cuantificar de mejor manera la descarga. Para el cálculo de la recarga en comparación con los otros estudios se ha utilizado el  $S_y$  de acuerdo con la textura del tipo suelo, siendo así para el suelo Andosol un valor de 0.146, suelo Histosol de 0.02 y

Leptosol de 0.21 y para la descarga los valores de  $S_y$  fueron estimados. Revisando bibliografía acerca del método de Regresión de fluctuación del nivel freático, hasta el momento no se han realizado muchos estudios a excepción de la investigación realizada por (Yang et al., 2018b).

## 4.5. PROCESAMIENTO DE SERIES DE CAUDAL

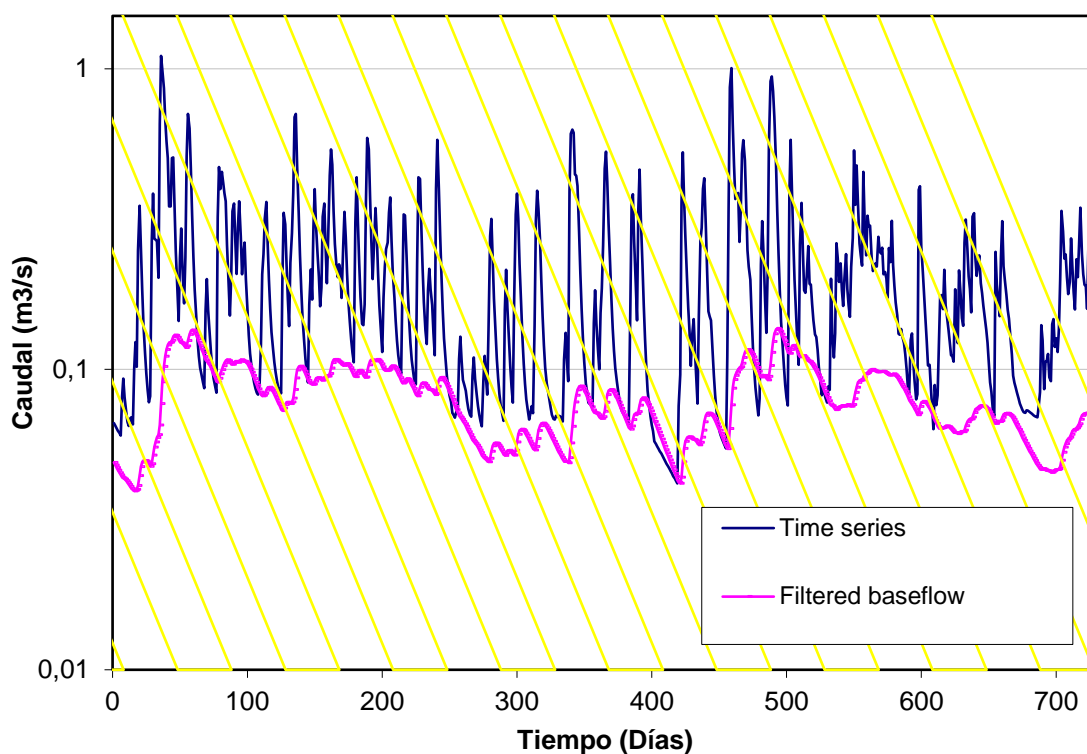
### 4.5.1. SEPARACIÓN Y FILTRADO DE SUBFLUJOS

El procesamiento de series temporales de caudales ha sido realizado a través de la herramienta WETSPRO, según (Willems, 2009) principalmente ha sido creado tratar series de caudal y separar los flujos en 3 componentes: flujo superficial (Overland flow), interflujo (Interflow) y flujo base (Baseflow) para determinar la cantidad de agua subterránea que contribuye al caudal, de igual manera también nos ayuda para realizar el filtrado de subflujos, selección de flujos máximos, períodos de flujo rápido, flujo lento y selección de caudales mínimos; las fracciones de esorrentía lenta y rápida varían mucho entre cuencas dependiendo de sus características (topográficas, tipo de suelo, etc.). La herramienta utiliza como entrada una serie temporal continua de cualquier variable hidrológica (caudal, nivel de agua, intensidad de lluvia, concentración de contaminantes, etc.) (Willems, 2009). WETSPRO utiliza una constante de recesión o tiempo de recesión denominada  $k$  de cada subflujo, este se puede cuantificar como el valor promedio de la inversa de la pendiente de la trayectoria lineal en los períodos de recesión del subflujo. Mediante una inspección visual de esta pendiente durante varios períodos de recesión, se puede estimar un valor promedio para la constante de recesión. El segundo parámetro  $w$  se puede calibrar optimizando la altura del subflujo durante los períodos de recesión (el subflujo debe ser idéntico al flujo total durante los períodos de recesión del subflujo y debe ser menor que el flujo total). Además, esta calibración se realiza a través de una prueba y error mediante una inspección visual en la serie temporal de datos. Dada la fuerte diferencia en el orden de magnitud de las constantes de recesión para las tres clases de subflujos, la separación de los subflujos se puede realizar de forma gradual. En un primer paso, el componente de flujo lento se divide del flujo total y, en un segundo paso, el flujo intermedio se divide del flujo restante (flujo



total menos flujo lento filtrado), la fracción restante representa entonces el componente de flujo más rápido (Willems, 2009).

**Figura 36.** Evaluación de la constante de recesión del flujo base y los resultados del filtro de flujo base, basados en las series diarias de caudales de la estación MA2 en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante 731 días (periodo 2019-2020).



Fuente: (Willems, 2009)

Elaboración: El Autor

A partir de la calibración manual (Figura 36), se ha determinado que la constante de recesión para el flujo base es de 40 días, para el interflujo de 20 días y finalmente para el flujo superficial de 10 días.

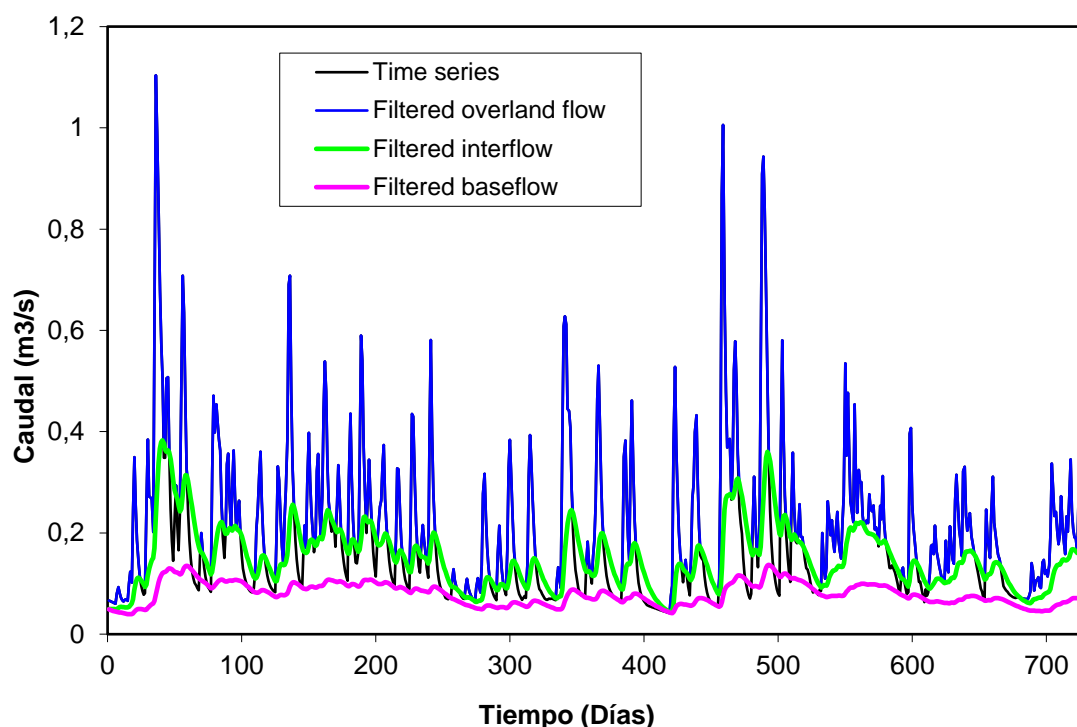
#### 4.5.2. EXTRACCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y SEPARACIÓN DE HIDROGRAMAS

En una serie dada de datos de caudal de un río o quebrada, se pueden definir caudales picos independientes (o filtradas de la serie de caudal) utilizando criterios de independencia. La dependencia entre los flujos máximos posteriores depende de la autocorrelación en la serie de flujo, que está determinada principalmente por la recesión de la zona de estudio. Los picos de lluvia-escorrentía posteriores pueden

considerarse en gran medida independientes si el tiempo entre eventos excede el tiempo de recesión y si el caudal más bajo entre eventos desciende por debajo de un nivel de flujo bajo específico. Dos eventos máximos posteriores se consideran casi independientes cuando cumplen con las tres condiciones siguientes: a) la duración del tiempo del flanco decreciente del primer evento que excede un tiempo  $k$ , b) el caudal desciende entre los dos eventos a una fracción inferior  $f$  del caudal máximo y c) el incremento del caudal  $Q_{\text{máximo}} - Q_{\text{mínimo}}$  tienen una altura mínima de  $Q_{\text{lim}}$ . Además, se basa en el concepto de que un evento de caudal máximo puede considerarse en gran medida independiente de acuerdo a lo siguiente: cuando el caudal entre eventos descienda a una condición de flujo bajo o casi a el nivel de flujo base, bajo esta condición, los componentes de flujo rápido atribuidos a los eventos de flujo máximo son de hecho casi independientes (Willems, 2009).

Está claro que sólo se puede alcanzar una condición cercana al flujo base cuando el tiempo transcurrido es más largo que las constantes de recesión de los componentes de flujo rápido. El parámetro  $k$  se puede tomar igual a la constante de recesión del flujo rápido, o mayor (por ejemplo, dos o tres veces la constante de recesión) dependiendo de qué tan fuerte se quiera tener la independencia entre eventos de flujo rápido posteriores. Cuando el período seco entre eventos es más largo que la constante de recesión, el flujo rápido efectivamente disminuye hasta una fracción inferior (Willems, 2009).

**Figura 37.** Resultados del filtro de subflujo para la serie diaria del caudal de la estación MA2, ubicado en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante el periodo 2019-2020.

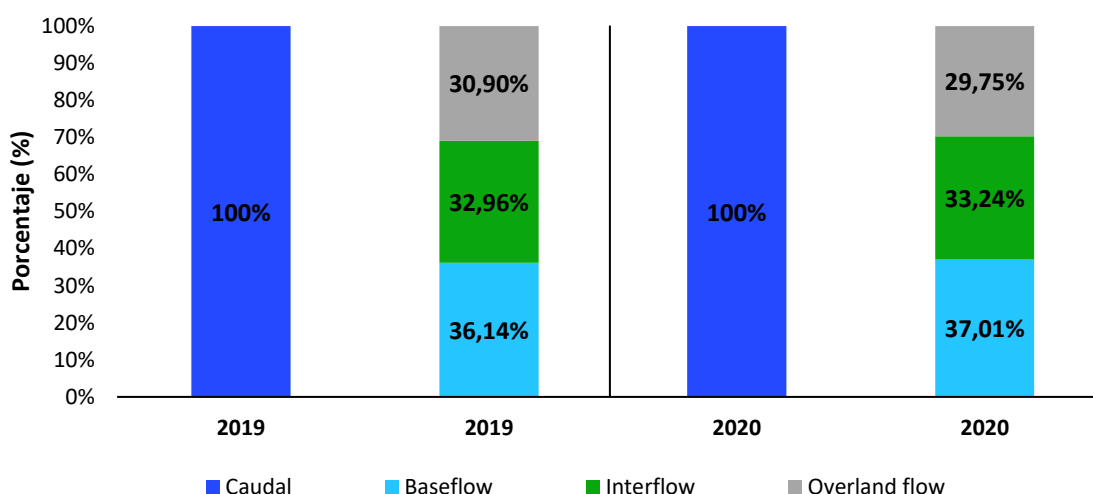


Fuente: (Willems, 2009)

Elaboración: El Autor

En la Figura 37 se puede apreciar los resultados obtenidos de la separación de los tres flujos de agua: Overland flow, Interflow y Baseflow, a partir de los caudales diarios de la estación limnigráfica MA2, sin embargo, en la Figura 38 se muestra un gráfico comparativo de los flujos que han sido separados para el año 2019 y 2020, por lo tanto, a partir del 100% que representa el caudal total, existen muy poca diferencia entre estos dos años, es decir que son muy parecidos o casi proporcional; en el caso del flujo base en el año 2020 fue más representativo con el 37.01%, de igual manera en el interflujo con el 33.24% pero en la escorrentía superficial en el año 2019 fue mayor con el 30.90%.

**Figura 38.** Comparación en porcentaje del filtro de subflujo obtenido a partir de la serie diaria del caudal de la estación MA2, ubicado en la Quebrada Quinahuayco (Zona de estudio), durante el periodo 2019-2020.



Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

## 4.6. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se aplicó para evaluar las entradas, salidas y variación del nivel de agua en la zona de estudio para los años 2019 y 2020, para lo cual se incluye la aplicación del método WTRF con el respectivo modelo de recesión natural (Tabla 25), como parámetro de entrada se consideró la precipitación y los parámetros de salida la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), Escorrentía (ES), recesión natural (REC), módulo de descarga (DM), lo que nos da igual a la variación de nivel ( $\Delta H$ ), todos estos valores estuvieron en mm de agua. El balance hídrico fue realizado solamente con los datos del pozo piezométrico LLDGT-005, por ser el más representativo que se encuentran dentro de la zona de estudio.

**Tabla 25.** Balance hídrico con el modelo WTFR (Recesión Natural) para el piezómetro LLDGT-005.

RECESIÓN	PIEZÓMETRO	PARÁMETROS	2019		2020	
			ENTRADAS	SALIDAS	ENTRADAS	SALIDAS
		Precipitación (mm año <sup>-1</sup> )	1298.4		1082.1	
		ETr (mm año <sup>-1</sup> )		237.39		294.55
		ES (mm año <sup>-1</sup> )		19.68		16.4
Natural	LLDGT-005	REC LLDGT-005 (mm año <sup>-1</sup> )		482.32		483.64
		DM LLDGT-005 (mm año <sup>-1</sup> )		198.45		199.49
		ΔH LLDGT-005 (mm año <sup>-1</sup> )		360.56		88.03

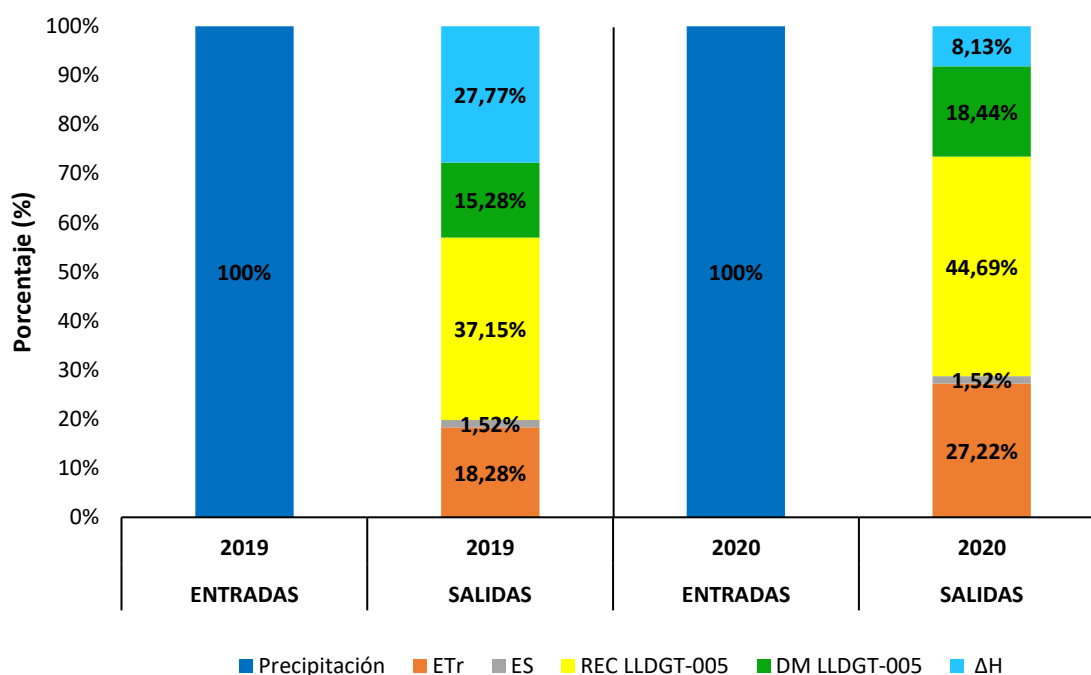
ETr: Evapotranspiración real, ES: Escorrentía, REC: Recesión natural, DM: Módulo de descarga y ΔH: Variación de nivel.

**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

Los resultados del balance hídrico en el punto donde se ubica el pozo piezométrico LLDGT-005, año 2020, se ha determinado pérdidas representativas (Tabla 25, Figura 39) que están relacionadas con el modelo de Recesión Natural, es decir que del 100% (1082.1 mm año<sup>-1</sup>), el 44.69% (483.64 mm año<sup>-1</sup>) recibe agua a través de la infiltración que es proveniente de la precipitación y este a su vez descarga agua subterránea en una determinada profundidad, este alto porcentaje de salida de agua puede estar moviéndose a través de las 16 fallas geológicas que cruzan por el punto donde se encuentra el pozo piezométrico, además este se ubica en un suelo Andosol que son considerados altamente porosos y por ende son permeables, que se podría decir que el agua está en tránsito; en cuanto a la Evapotranspiración real también ha presentado un considerable porcentaje del 27.22% (294.55 mm año<sup>-1</sup>); lo que esto indica que los suelos de páramo se encuentran bien húmedos, por lo que el porcentajes antes mencionados se convierten en ETr. En lo referente al módulo de descarga (DM) se ha determinado que el 18.44% (199.49 mm año<sup>-1</sup>) de agua proveniente de las aguas subterráneas descarga netamente a las quebradas aledañas, en lo que respecta a la escorrentía (ES), se ha determinado un valor muy bajo de 1.52% (16.40 mm año<sup>-1</sup>) lo que nos da a conocer que en su mayoría el agua se mueve de manera subsuperficial, finalmente con lo mencionado se obtuvo una variación de nivel de agua (ΔH) en este mismo año y piezómetro del 8.13% (88.03 mm año<sup>-1</sup>).

**Figura 39.** Balance hídrico con modelo de recesión natural en el pozo piezométrico LLDGT-005 que se encuentra ubicado dentro de la zona de estudio durante los años 2019 y 2020, donde se utiliza los siguientes parámetros: Precipitación, ETr, ES, Recesión natural y el Módulo de descarga (DM).



**Fuente:** El Autor

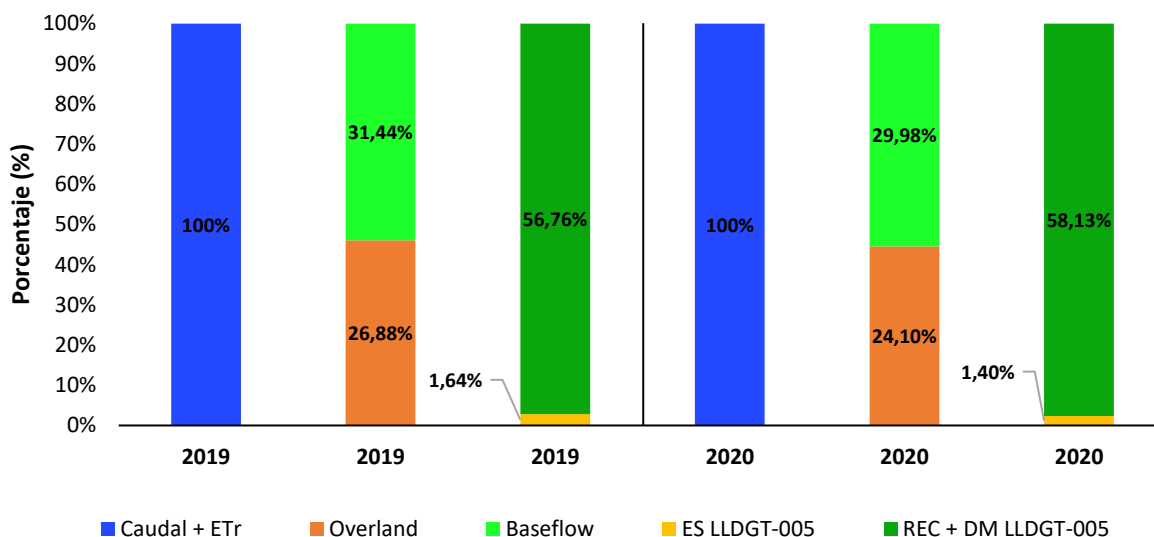
**Elaboración:** El Autor

#### 4.6.1. COMPARACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CON EL MODELO WETSPRO

En la Figura 40 se hace una comparación entre el flujo base de agua y el flujo superficial de los datos obtenidos del modelo realizado con WETSPRO y el modelo de recesión natural de WTRF, esta comparación en porcentaje se lo hace en relación a los caudales obtenidos de la estación MA2, donde la escorrentía (ES) obtenida a partir del modelo WTRF en el piezómetro LLDGT-005 que es el más representativo en el año 2019 se tuvo el 1.64% ( $19.68 \text{ mm año}^{-1}$ ) de escurrimiento de agua en el pozo, en comparación con los valores de WETSPRO a nivel de la cuenca y en el mismo año 2019 se obtuvo un valor del flujo superficial del 26.88% ( $322.43 \text{ mm año}^{-1}$ ), por lo tanto, se ha determinado que la escorrentía de estos dos modelos son bastante diferentes, mismo que podría ser a causa

de que el modelo WTFR no está representado para toda la cuenca de estudio, es decir que es específico para el sitio donde se encuentra ubicado el piezómetro.

**Figura 40.** Comparación entre los flujos de agua obtenidos a partir del modelo WETSPRO y el WTFR (modelo de recesión natural), en el pozo piezométrico LLDGT-005, durante los años 2019 y 2020.



**Fuente:** El Autor

**Elaboración:** El Autor

De igual manera y como se muestra en la figura 40, se procedió a comparar los valores de flujo de agua obtenidos en los años 2019 y 2020 a partir de los modelos WTFR con recesión natural y WETSPRO en el piezómetro LLDGT-005; en este caso se hace referencia a los valores obtenidos en el año 2020 siendo el más representativo, donde para la descarga con WTFR se utilizó los parámetros Recesión Natural (REC) sumado el módulo de descarga (DM), obteniendo el 58.13% ( $683.13 \text{ mm año}^{-1}$ ), y con el modelo WETSPRO se determinó un porcentaje del 29.98% ( $352.29 \text{ mm año}^{-1}$ ). Al observar estos valores nos da a conocer que tampoco existe relación entre estas dos metodologías realizadas, es decir que son diferentes.



## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la aplicación del método de Regresión de la Fluctuación del Nivel Freático (WTFR) con sus respectivos modelos de recesión natural, dinámica y de Leakeance en la zona de estudio del proyecto Loma Larga, y con la disponibilidad de información existente para la aplicación del modelo de recesión de Leakeance nos ha permitido cuantificar la pérdida de agua del sistema superior (sistema poco profundo) y determinar la contribución al sistema inferior (sistema profundo de aguas subterráneas), por ende, la contribución de estos flujos a la quebrada Quinahuayco que cruza por la parte central de la zona de estudio.

La mayor parte de zona de estudio se encuentra dominada por suelos de origen volcánico como los Andosoles que cubren el 54% del área total, la vegetación natural es homogénea y con intervención relativamente baja por ganadería, presenta una alta precipitación anual que es característico de las zonas de páramo, con  $1245.7 \text{ mm año}^{-1}$ , el área se caracteriza por tener una elevada humedad relativa de 93.76%, y este valor es muy parecido durante los 4 años de estudio, es así que presenta un valor de evapotranspiración real de  $242 \text{ mm año}^{-1}$ , con un promedio diario de  $0.73 \text{ mm día}^{-1}$ , su comportamiento se debe a las condiciones meteorológicas, características morfofisiológicas de la vegetación y contenido de agua en el suelo. Además, la ETr muestra una marcada diferencia durante el periodo de estudio, existiendo valores muy altos de  $2.03 \text{ mm día}^{-1}$  a valores relativamente bajos de  $0.177 \text{ mm día}^{-1}$ .

Se desarrolló el método de Regresión de la Fluctuación del Nivel Freático (WTFR) para simular los cambios en los niveles de agua a escala diaria y caracterizar los parámetros de descarga de las aguas subterráneas. Para el cálculo de la recesión se consideró la profundidad de los pozos piezométricos de la siguiente manera: Modelos simple con Recesión Natural y Dinámica en la parte inferior para los pozos profundos (LLDGT-005, LLDGT-007, LLDHG-008, LLDHG-011 y LLDHG-012) y modelo de recesión de Leakeance acoplado al sistema de aguas subterráneas en la parte superior (piezómetro LLDHG-10A) e inferior (piezómetro LLDHG-008). Los criterios de eficiencia NSE estuvieron entre los

valores del 60% al 73% para la mayoría de piezómetros, excepto para el piezómetro LLDHG-012 que estuvo entre los valores de 48% al 56% y de esta forma se pudo obtener la pérdida de agua a través de los modelos de recesión establecidos. Se pudo confirmar que las fluctuaciones del nivel freático son causadas por la infiltración de la lluvia y el tiempo de retraso en la respuesta del nivel freático a tales estímulos es bajo. Los dos parámetros más utilizados en el método WTFR son la eficiencia de infiltración (sensibilidad del nivel freático a la recarga) y DM (módulo de descarga) que corresponde a la pérdida de agua debido a la descarga del pozo. El método WTFR cuenta con un procedimiento automatizable para estimar estos 2 parámetros en función de los niveles de agua diarios observados.

A partir de los datos de precipitación, evapotranspiración real y niveles de agua se ha logrado obtener las diferentes variables de los modelos de recesión, logrando de esta manera tener una mejor aproximación entre los niveles freáticos simulados y observados. La calibración del modelo WTFR sin recesión muestran buena concordancia entre los datos simulados, pero no hubo un buen ajuste en los valores más bajos y altos, según el criterio de Nash Sutcliffe se consideró como Muy bueno por lo que fue aceptado por el modelo. El modelo con recesión Natural, de acuerdo con el estadístico de Nash-Sutcliffe presenta la más alta eficiencia tanto en la calibración con un valor de 0.78, y en la validación con un valor de 0.85, por lo que existe buena concordancia entre los niveles de agua observados y simulados.

La calibración de las diferentes variables específicas que considera cada modelo como el rendimiento específico en los piezómetros LLDGT-005 y LLDHG-008 se obtuvo los valores más bajos de 0.0039 y 0.0065 respectivamente, sin embargo, en el piezómetro LLDGT-007 se obtuvo un valor más alto de 0.021. La variable eficiencia de infiltración ( $\beta$ ) es considerado como el más sensible del modelo WTFR, ya que tiene la capacidad de percibir los estímulos hacia el nivel freático desde la precipitación, esto sucede en todas las recesiones aplicadas en el presente estudio. Usando las series de tiempo diarios de precipitación y los parámetros estimados de niveles de agua, se realizaron hidrogramas de nivel freático de 5 pozos piezométricos considerados dentro de la zona de estudio.

Se ha determinado la existencia de conectividad hidráulica entre el sistema superior (poco profundo) con el sistema inferior (profundo), obteniendo una entrada de agua mensual de  $2.69 \text{ mm mes}^{-1}$  y  $32.30 \text{ mm año}^{-1}$  entre el 2019 y 2020, esto concuerda con la conductividad hidráulica en el sistema de roca profunda determinado por (Itasca Denver, 2017) de  $4.0 \times 10^{-7}$  mismo que se encuentra controlado por la densidad de las fracturas (9 fracturas) que cruzan por el piezómetro LLDHG-008 considerado como piezómetro profundo y por el tipo de alteración existente, sin embargo, a partir de este sistema profundo posiblemente exista un mínimo aporte de agua a la quebrada Quinahuaycu que es el cuerpo de agua más relevante en esta área, puesto a que la falla más profunda que cruza por este piezómetro LLDHG-008 y es por donde se mueve el agua se encuentra casi a la misma cota que el punto de salida de la zona de estudio.

El balance hídrico de las aguas subterráneas fue calculado a partir de los datos obtenidos del modelo de recesión natural del método WTRF, mismo en el que nos da a conocer que existen salidas representativas de agua, principalmente en el año 2020, en el punto donde se encuentra ubicado el piezómetro LLDGT-005, donde se determinó pérdidas relevantes, es decir que del 100% del agua que ingresa al sistema de aguas subterráneas, el 44.69% recibe agua a través de la infiltración que es proveniente de la precipitación y este a su vez descarga agua subterránea en una determinada profundidad, este alto porcentaje de salida de agua puede estar moviéndose a través de las 16 fallas geológicas que cruzan por el punto donde se encuentra el referido pozo piezométrico, también se debe a que en este punto el tipo de suelo es Andosol que son considerados altamente porosos y por ende son permeables, por lo tanto, en base a lo mencionado se podría decir que el agua subterránea se encuentra en constante movimiento.

## REFERENCIAS

- Albuja, E., & Tenelanda, D. (2014). *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la Cuenca altoandina del río Zhuruca* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/19863>
- Almeida, M. D. (2019). Estudio de caso sobre la gobernanza del sector minero en el Ecuador. *Actualidad Jurídica Ambiental*, 1(3), 117. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44876/1/S1900582\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44876/1/S1900582_es.pdf)
- ANA. (2010). *El agua en cifras | ANA web - Autoridad Nacional del Agua*. <https://www.ana.gob.pe/contenido/el-agua-en-cifras>
- Atta-Darkwa, T. (2013). Quantification of groundwater recharge in the River Oda catchment using the watertable fluctuation method. 1. *Global Journal of Engineering, Design and Technology*, 2, 96–103.
- Ayala, M. F., D., C.-V., & Tierra, A. (2018). Relación espacio-temporal entre estaciones utilizadas para el relleno de datos de precipitación en Chone, Ecuador. *Revista Geografica Venezolana*, 59(2), 298–313. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347760473005%0ACómo>
- Bastidas, B. (2019). *Modelo conceptual de la recarga de aguas subterráneas en el nivel somero del sistema hidrogeológico golfo de Urabá, evaluando su magnitud y variabilidad espacio – temporal*. 205.
- Baum, C. A., Mancuso, M. A., & Fritzen, R. R. (2018). Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. *Geosciences = Geociências*, 37(1), 85–98. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i1.11903>
- BAUM, C. A., MANCUSO, M. A., & FRITZEN, R. R. (2018). Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. *Geosciences = Geociências*, 37(1), 85–98. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i1.11903>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006).

*Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador.* 271–281. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0\\_24](https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24)

Cabrera-Balarezo, J. J., Timbe-Castro, L. M., & Crespo-Sánchez, P. J. (2019). Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin. *DYNA (Colombia)*, 86(210), 338–344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>

Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, 1, 1–7. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)

Campozano, L., Mendoza, D., Mosquera, G., Palacio-Baus, K., Célleri, R., & Crespo, P. (2020). Wavelet analyses of neural networks based river discharge decomposition. *Hydrological Processes*, 34(11), hyp.13726. <https://doi.org/10.1002/hyp.13726>

Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Célleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230–239. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-0024.1>

Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). ERRORES EN LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DE UNA ZONA DE PÁRAMO ANDINO DEBIDOS AL USO DE DATOS MENSUALES, DIARIOS Y HORARIOS ERRORS IN THE ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION OF AN ANDEAN PÁRAMO REGION DUE TO THE USE OF MONTHL. In *Aqua-LAC* (Vol. 5, Issue 2).

Correa, A., Breuer, L., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., Birkel, C., Silva, C., & Windhorst, D. (2019). Spatially distributed hydro-chemical data with temporally high-resolution is needed to adequately assess the hydrological functioning of headwater catchments. *Science of the Total Environment*, 651, 1613–1626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.189>

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., & Feyen, J. (2009). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *Proceedings of the International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins, April 2009*, 71–76. <https://doi.org/10.13140/2.1.5137.6320>

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2014). *Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos.*

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos*, CONDESAN, 287–304. <https://www.researchgate.net/publication/264416399>

Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H.-G., Ramírez, M., & Breuer, L.

- (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(2), 2475–2510. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-2475-2012>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Dominguez, C., Dominguez, C., Cristobal, S., Galapagos, I., & Dom, P. C. G. (2017). *Integrated hydrogeological study of San Cristobal Island ( Galapagos ) To cite this version : HAL Id : tel-01431034 Universit ´ e Pierre et Marie Curie Integrated hydrogeological study of San Cristobal Island ( Galapagos )*.
- DRA, A. I. (2020). Feasibility Study-Loma Larga Project. In *INV Metals Inc.-Technical Report* (Issue April). [www.invmetals.com](http://www.invmetals.com)
- Effect, M., Elastic, O. N., & Of, P. (2005). 刘文辉<sup>1</sup>, 张新明<sup>1</sup>, 张淳源<sup>2</sup> (1. 4750, 16–20).
- FAO. (2008). *Enciclopedia Inafed. Base refencial mundial del recurso suelo* (Vol. 03). <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30044a.htm> <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., & Senisterra, E. G. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas Libros de Cátedra*. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/5798>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *7mo Congreso de Medio Ambiente*, 1–25.
- Gonçalves, R. D., Teramoto, E. H., Engelbrecht, B. Z., Alfaro Soto, M. A., Chang, H. K., & van Genuchten, M. T. (2020). Quasi-Saturated Layer: Implications for Estimating Recharge and Groundwater Modeling. *Ground Water*, 58(3), 432–440. <https://doi.org/10.1111/gwat.12916>
- Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., & Cisneros, F. (2008). Importancia de la Hidropedología en la determinación de Procesos Hidrológicos a escala de ladera en zonas de Páramo. *XI Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo*, 1–10. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Ing.-Vicente-Iñiguez.-Hidropedologia.pdf>
- Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., & Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2421–2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20->

2421-2016

- Itasca Denver, I. (2017). *Loma Larga Hydrogeologic Field Activities*.
- Jaramillo, V. (2013a). *Caracterización preliminar de la Geomorfología e Hidrología de la microcuenca del río Irquis, parroquia Victoria del Portete, cantón Cuenca-provincia del Azuay*. 17. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7070>
- Jaramillo, V. (2013b). *Caracterización preliminar de la geomorfología e hidrología de la microcuenca del río Irquis, parroquia Victoria del Portete, cantón Cuenca - provincia del Azuay* [Escuela Politécnica del Ejército]. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/7071>
- Lara Vásconez, N. X., Cushquicullma-colcha, D. F., Guiña - Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati-cutiupala, G. M. (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo Del Conocimiento*, 6(6), 122–148. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2745>
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572(March), 805–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- López-galindo, F., Muñoz-iniestra, D., Hernández-moreno, M., Soler-aburto, A., & Castillo-lópez, C. (2003). *Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla*. 19–41.
- Lv, M., Xu, Z., Yang, Z. L., Lu, H., & Lv, M. (2021a). A Comprehensive Review of Specific Yield in Land Surface and Groundwater Studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(2), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>
- Lv, M., Xu, Z., Yang, Z. L., Lu, H., & Lv, M. (2021b). A Comprehensive Review of Specific Yield in Land Surface and Groundwater Studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(2). <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>
- Marcovecchio, R., & Varni, M. (2020). Una aproximación a las descargas por evapotranspiración del acuífero freático pampeano en la cuenca del Arroyo del Azul (llanura pampeana). *Cuadernos Del Curiham*, 26, 13–19. <https://doi.org/10.35305/curiham.v26i0.149>
- Miguel, S. (2014). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales importancia del matorral no apetecido*. 174, 167–174.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, (MAE). (2018). *Plan De Manejo Area Nacional De Recreación Quimsacocha*. 106. <http://www.ambiente.gob.ec/wp->



content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-002-ANEXO-AREA-NACIONAL-DE-RECREACION-QUIMSACOAHA.pdf

- Morán, D. (2017). *Análisis de continuidad de extensión de la mineralización alrededor del sistema de alta sulfuración Loma Larga* (Issue Figura 1) [Universidad Central de Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/10566>
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2012). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ). *Maskana*, 3, 87–105. <https://doi.org/10.18537/mskn.03.02.07>
- Mosquera, G., Segura, C., Vaché, K. B., Windhorst, D., Breuer, L., & Crespo, P. (2016). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2987–3004. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2987-2016>
- Nideesh, P., Sreelatha, A. K., & K S, A. (2021). Sub-soil organic carbon sequestration and USDA Soil Taxonomy of coastal acid sulphate soils; constraints and their solution learned from a pedon study in the Kole land ecosystem of Kerala, India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(10), 1089–1099. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1872604>
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2019). Actual Evapotranspiration in the High Andean Grasslands: A Comparison of Measurement and Estimation Methods. *Frontiers in Earth Science*, 7, 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00055>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Pendiuk, J. E., Guarracino, L., Reich, M., Brunini, C., & Güntner, A. (2020). Estimating the specific yield of the Pampeano aquifer, Argentina, using superconducting gravimeter data. *Hydrogeology Journal*, 28(7), 2303–2313. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02212-z>
- Peñuela, A. L., & Carrillo, R. J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 18–32. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/30518/41962>
- Per, D. E., Protecci, M. D. E., Hidrogr, E. N. C., Modelaci, F. M., Conceptual, G., La, C. D. E., Jatunhuaycu, C., Las, E. N., & Volc, A. S. D. E. L. (2017). *Escuela politécnica nacional*.

- PROMAS. (2009). *Elaboración de la línea base en hidrología de los páramos de Quimsacocha y su área de influencia.*
- Ramón, J., Correa, A., Timbe, E., Mosquera, G. M., Mora, E., & Crespo, P. (2021). Do mixing models with different input requirement yield similar streamflow source contributions? Case study: A tropical montane catchment. *Hydrological Processes*, 35(6). <https://doi.org/10.1002/hyp.14209>
- Rolando Mora, Gamboa, J. C., & Fernández, M. V. (2006). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la península de papagayo mediante la modificación del Método Mora-Vahrson. In *III Curso Internacional sobre microzonificación y su Aplicación en la mitigación de desastres* (pp. 38–43).
- Salas, D., Florian-vergara, C., & Builes-jaramillo, A. (2021). *Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE.* 24.
- Salgado S, L. (2018). *Estudio De Niveles Freaticos Y Piezometricos.* 1–48.
- Sánchez, E. (2017). *Consideraciones hidrogeológicas para el desarrollo de un sistema múltiple de sensores de presión de poros.*
- Torres, S. F., & Proaño, C. O. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28(2), 52–66.
- Tu, Y. C., Ting, C. S., Tsai, H. T., Chen, J. W., & Lee, C. H. (2011). Dynamic analysis of the infiltration rate of artificial recharge of groundwater: A case study of Wanglong Lake, Pingtung, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, 63(1), 77–85. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0670-8>
- Velásquez L, M., & León K, V. (2022). *Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir.* 7.
- Villegas, J. A., & Torres, B. E. (1977). Evapotranspiracion. *Serie Didactica, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucuman*, 45.
- Water - Table Fluctuation Regression ( WTFR ) User ' s Manual Abstract.* (2012).
- Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling and Software*, 24(3), 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Yang, L., Qi, Y., Zheng, C., Andrews, C. B., Yue, S., Lin, S., Li, Y., Wang, C., Xu, Y., & Li, H. (2018a). A modified water-table fluctuation method to characterize regional groundwater discharge. *Water (Switzerland)*, 10(4), 1–16.

<https://doi.org/10.3390/w10040503>

Yang, L., Qi, Y., Zheng, C., Andrews, C., Yue, S., Lin, S., Li, Y., Wang, C., Xu, Y., & Li, H. (2018b). A Modified Water-Table Fluctuation Method to Characterize Regional Groundwater Discharge. *Water*, 10(4), 503. <https://doi.org/10.3390/w10040503>