

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO DE LA SUB-CUENCA  
DEL RÍO CHAMBO BAJO UNA PERSPECTIVA DE LA  
HIDROLOGÍA FÍSICA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ING. AMALIA FRANCISCA ANDRADE VALDOSPINOS**  
ami2087@hotmail.com

**Director: ING. XAVIER ZAPATA RIOS PhD.**  
xavier.zapata@epn.edu.ec

**Co Directora: ING. CARLA MANCIATI JARAMILLO PhD.**  
carla.manciati@epn.edu.ec

**Quito, mayo 2019**

## DECLARACIÓN

Yo Amalia Francisca Andrade Valdospinos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

AMALIA FRANCISCA ANDRADE VALDOSPINOS

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Amalia Francisca Andrade Valdospinos, bajo mi supervisión.

---

Ing. Xavier Zapata Ríos PhD.

**DIRECTOR**

---

Ing. Carla Manciatí Jaramillo PhD.

**CO-DIRECTORA**

## AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento más grande es para papito Dios, por ser esa roca firme que día a día me sostiene. Siempre sujeta a tu palabra, fuiste tú dándome la victoria. “Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas. Josué 1:9

A mi esposo Javi, por el amor incondicional y el mayor apoyo hasta en las circunstancias más difíciles. Tú, mi ayuda idónea y mi amor verdadero. A mi niña adorada, el más dulce angelito, mi compañerita de tesis. Tu sonrisa es el mejor regalo día a día.

A mi familia por ser el motor que me mueve siempre. Esforzados y valientes, Dios tiene algo muy grande preparado para todos ustedes.

A mi director el Dr. Xavier Zapata Ríos, co-directora Dra. Carlita Manciatí (además de co-directora, una gran amiga), y Dra. Paola Romero por la guía brindada. Gracias por el apoyo permanente y el tiempo dedicado al proyecto. Una investigación ardua y muy provechosa la cual nos ha dado las mayores satisfacciones. Así también a Sandra Procel, una gran maestra, y Benito Mendoza. Mil gracias a todos y un Dios les pague.

A Vivi y Elvi, compañeras de batalla, amigas mías lo logramos. Gracias por todos aquellos momentos, buenos, no tan buenos, difíciles, pero todos ellos muy gratos y siempre divertidos a su lado.

A mis hermanas de la célula, gracias por sostenerme en oración, mujeres virtuosas y esforzadas, guerreras y princesas del Padre Celestial.

A todos mis amigos y allegados que de una u otra manera aportaron con el desarrollo de este proyecto de investigación. Los llevo siempre en mi corazón.

A la Escuela Politécnica Nacional, mi casa por muchos años, por acogerme y darme las mejores lecciones de vida.

## DEDICATORIA

A mi amado esposo Javi y mi hermosa niña Amaly bebé. Son la mayor bendición que Dios me ha regalado. Todo el esfuerzo y la dedicación son por ustedes, MI REGALO MAS PRECIADO

*Amalia*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA.....	VI
CONTENIDO.....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	X
INDICE DE TABLAS .....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
RESUMEN .....	XVI
ABSTRACT .....	XVIII
PRESENTACIÓN .....	XX
CAPÍTULO 1. ....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
CAPÍTULO 2. ....	6
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 BALANCE SUPERFICIAL .....	6
2.1.1 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS .....	6
2.1.2 MODELO INVEST .....	8
2.1.2.1 PRODUCCIÓN DE AGUA (WY – WATER YIELD) .....	9
2.1.3 BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL A TRAVÉS DE CRITERIOS DEL MODELO INVEST Y CURVA DE BUDYKO .....	9
2.2 SEPARACIÓN DE HIDROGRAMAS .....	12
2.3 MODELO GR2M .....	15
2.4 ESTADO DEL ARTE .....	19
2.4.1 BALANCE HÍDRICO .....	19
2.4.2 SEPARACIÓN DE CAUDAL BASE .....	21
2.4.3 MODELO GR2M .....	22
2.4.4 ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO. ...	23

CAPÍTULO 3.....	32
3 METODOLOGÍA.....	32
3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	32
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	34
3.3 SELECCIÓN DE SUB-CUENCAS PARA ANÁLISIS .....	39
3.4 DATOS .....	42
3.4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	42
3.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS .....	47
3.5 PROCEDIMIENTO .....	49
3.5.1 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL .....	49
3.5.2 SEPARACIÓN DE HIDROGRAMAS .....	51
3.5.3 MODELO GR2M .....	55
CAPÍTULO 4.....	58
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
4.1 RESULTADOS .....	58
4.1.1 BALANCE SUPERFICIAL .....	58
4.1.2 SEPARACIÓN DE CAUDAL BASE .....	81
4.1.3 MODELO GR2M .....	84
4.2 DISCUSIÓN .....	88
4.2.1 BALANCE SUPERFICIAL .....	88
4.2.2 SEPARACIÓN DE CAUDALES .....	91
4.2.3 MODELO GR2M .....	92
CAPÍTULO 5.....	93
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	93
CAPÍTULO 6.....	98
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98
CAPÍTULO 7.....	105
7 ANEXOS.....	105
7.1 VALORES DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL OBTENIDOS DE LA BASE DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS EN LA SECCIÓN METODOLOGÍA. ....	105
7.2 VALORES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMOS Y MINIMOS ANUALES PARA LAS SUB-CUENCAS DE LOS GRUPOS A Y B .....	107
7.3 CÓDIGO EN MATLAB DEL MODELO DE PRODUCCIÓN DE AGUA BASADO EN LA CURVA DE BUDYKO .....	110



7.4	MAPAS DE WY – PRODUCCIÓN DE AGUA PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS (AÑOS 2000 AL 2015) .....	165
7.5	CÓDIGO EN RSTUDIO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL MENSUAL PARA DETERMINAR OBSERVACIONES ATÍPICAS .....	174
7.6	CÓDIGO EN RSTUDIO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL DIARIO UTILIZANDO CLIMATOL .....	179

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Clasificación de los servicios de los ecosistemas propuesta por el MA – Evaluación de los ecosistemas del Milenio .....	7
Figura 2.2.	Diagrama conceptual del modelo InVEST utilizado para el balance superficial, considerando las variables de precipitación, evapotranspiración, coeficiente de cultivo (Kc), la profundidad del suelo y capacidad de agua disponible (AWC) .....	10
Figura 2.3.	Gráfica caudal vs. tiempo destacando sus componentes, la rama ascendente, descendente, la cresta y la curva de recesión, con los dos caudales que forman el caudal total, el caudal base o flujo subterráneo y el flujo superficial .....	13
Figura 2.4.	Estructura del modelo GR2M, se muestra las variables actuar en el modelo, la evapotranspiración y la precipitación. Junto a los dos reservorios que conforman el modelo: suelo y agua gravitacional .....	16
Figura 3.1.	Mapa de localización de la zona de estudio. Lado izquierdo: zona de estudio con la ubicación de las cabeceras cantonales, los volcanes, la delimitación de la cuenca del río Chambo, los límites de las sub-cuencas y las provincias aledañas a la zona de estudio. Lado derecho superior: localización de la zona de estudio respecto al Ecuador, lado derecho inferior: DEM de la zona de estudio. ....	33
Figura 3.2.	Mapa de la zona de estudio. El modelo de elevación digital (DEM), mostrando los principales ríos. El río Guamote junto con el Río Cebadas confluyen para formar el río Chambo el mismo que siguiendo su curso hacia la dirección norte se articula con el río Patate para formar el río Pastaza. ....	35
Figura 3.3.	Mapa de los ríos existentes en las sub-cuencas del Grupo A y Grupo B .....	36
Figura 3.4.	Características de la zona de estudio A) DEM, B) Temperatura media de la cuenca del río Chambo, C) Precipitación media, D) Cobertura vegetal, E) Textura, F) Taxonomía. ....	38
Figura 3.5.	Mapa donde se muestra la agrupación de las sub-cuencas seleccionadas, la delimitación de las sub-cuencas y las provincias aledañas a la zona de estudio .....	41
Figura 3.6.	Pantalla de ingreso de datos a nivel diario o mensual en RHtestsV3 .....	47
Figura 3.7.	Pantalla del cuadro de dialogo que aparece en el primer uso del GW (Toolbox) .....	52
Figura 3.8.	Ejemplo del formato para ingreso de datos al GW Toolbox. ....	53
Figura 3.9.	Cuadro de dialogo de la importación de datos en GW Toolbox ....	53

Figura 3.10. Cuadro de dialogo en GW Toolbox de selección de Separación de caudal base. ....	54
Figura 3.11. Cuadro de diálogo en GW Toolbox para la selección de métodos para la separación de caudal base. ....	54
Figura 3.12. Captura de pantalla de la hoja de cálculo utilizada para la aplicación del modelo GR2M desarrollada por IRSTEA. ....	56
Figura 4.1. Valores de precipitación máximos anuales para las sub-cuencas de los grupos A y B. ....	59
Figura 4.2. Mapa de isoyetas donde se muestra una distribución espacio temporal de la lluvia para los años del 2000 al 2007 ....	60
Figura 4.3. Mapa de isoyetas donde se muestra una distribución espacio temporal de la lluvia para los años del 2008 al 2015 ....	61
Figura 4.4. Mapa de la zona de estudio y del análisis de las series temporales de Precipitación. a) Localización de las estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio, b) Gráfica precipitación vs. tiempo - régimen de precipitación unimodal y c) Gráfica precipitación vs. tiempo – régimen de precipitación bimodal. ....	63
Figura 4.5. Mapa de evapotranspiración referencial MODIS donde se muestra una distribución espacio temporal de la evapotranspiración para los años del 2000 al 2007 ....	65
Figura 4.6. Mapa de evapotranspiración referencial MODIS donde se muestra una distribución espacio temporal de la evapotranspiración para los años del 2008 al 2015 ....	66
Figura 4.7. Mapa de a) los valores de Kc donde se muestra una distribución espacial del coeficiente de cultivo en la zona de estudio, b) profundidad del suelo en mm. ....	68
Figura 4.8. Gráfica de valores de Q observados vs. tiempo para todo el periodo de análisis. ....	71
Figura 4.9. Mapa de recarga potencial y zonas con déficit de agua considerando únicamente la precipitación y la evapotranspiración dentro del área de estudio para el periodo 2000-2007. Las zonas en color azul son zonas con la mayor recarga potencial, las zonas con color rojo, y anaranjado son las zonas con déficit de agua y las zonas en color amarillo, verde y celeste son zonas con cierta recarga potencial. ....	72
Figura 4.10. Mapa de recarga potencial y zonas con déficit de agua considerando únicamente la precipitación y la evapotranspiración dentro del área de estudio para el periodo 2008-2015. Las zonas en color azul son zonas con la mayor recarga potencial, las zonas con color rojo, y anaranjado son las zonas con déficit de agua y	

las zonas en color amarillo, verde y celeste son zonas con cierta recarga potencial. ....	73
Figura 4.11. El ajuste del modelo InVEST .....	75
Figura 4.12. a) Mapa de la distribución espacial de la producción de agua del área de estudio año 2000 y b) Producción de agua para cada sub-cuenca .....	77
Figura 4.13. Producción de agua vs. las diferentes características del área de estudio .....	80
Figura 4.14. Porcentaje de la contribución de agua subterránea .....	82
Figura 4.15. Esquema de resumen entre los valores de recarga por balance de superficie y separación de flujo base .....	84
Figura 4.16. Ajuste del modelo GR2M para la sub-cuenca H0333 .....	85
Figura 4.17. Ajuste del modelo GR2M para la sub-cuenca a) H0786, b) H0787, c) H0788, d) H0789, e) H0790 .....	86

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla de la capacidad de agua disponible de la planta – PAWC en función de la textura del suelo .....	12
Tabla 2.2. Cuadro en el que se muestran los estudios previos realizados en la zona de estudio, con el año de publicación, el autor o la institución que desarrolló el estudio y el título. ....	23
Tabla 3.1. Sub-cuencas seleccionadas para la aplicación de las metodologías planteadas. Se muestra el código de la estación del punto de cierre, el nombre de la estación hidrológica, coordenadas, áreas de drenaje, provincia .....	39
Tabla 3.2. Características de las sub-cuencas, rangos de elevación, rango de precipitación, Cobertura vegetal, taxonomía y textura del suelo. ....	40
Tabla 3.3. Información de entrada para el desarrollo del balance superficial ...	42
Tabla 3.4. Estaciones meteorológicas a utilizar para la obtención de las isoyetas. ....	43
Tabla 3.5. Estaciones hidrológicas analizadas para definir la base de datos de caudal para determinar tanto el ajuste del modelo para el balance superficial como para el método de separación del caudal base. ...	45
Tabla 3.6. Estaciones hidrológicas seleccionadas para definir la base de datos de caudal tanto para el balance superficial como para el método de separación de caudal base .....	46
Tabla 3.7. Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas para el balance superficial .....	50
Tabla 3.8. Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas por el software GW (Toolbox) para la separación de caudal base .....	51
Tabla 3.9. Valores de BFI según las características de la corriente y del acuífero .....	55
Tabla 3.10. Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas en la hoja de cálculo desarrollada por IRSTEA para el desarrollo del modelo GR2M .....	56
Tabla 4.1. Tabla de Uso del suelo / Cobertura del suelo y coeficiente de cultivo utilizado en el modelo InVEST para el desarrollo del balance superficial .....	67
Tabla 4.2. Tabla de profundidad de suelo para el desarrollo del balance superficial .....	67
Tabla 4.3. Valores observados de Q expresados en lámina de agua en mm/año m <sup>2</sup> .....	70
Tabla 4.4. Funciones objetivo para determinar la bondad de ajuste del modelo .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

AWC	Available Water Capacity
BFI	Base Flow Index
CEMAGREF	French Research Institute for Agricultural and Environmental Engineering
Chimborazo GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado de Chimborazo
DEM	Digital Elevation Model
GIRH	Gestión integrada de Recursos Hídricos.
GIS	Geographic Information System
GR	Modelos hidrológicos de Ingeniería Rural.
GR2M	Modelo hidrológico de Ingeniería Rural con dos parámetros a nivel mensual
HYSEP	Hydrograph Separation and Analysis
INAMHI	Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología
InVEST Tradeoffs	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
IRSTEA	Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Medioambiente y la Agricultura
kc	Crop coefficient
LULC	Land Use/Land Cover
MA	Grupo de evaluación de los ecosistemas del milenio
MAE	Ministerio de Ambiente del Ecuador

MAGAP	Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NAT CAP	Capital Natural Project
NRCS	Natural Resources Conservation Service
OMM	Organización Mundial de Meteorología
USGS	United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
WWF	World Wildlife Fund
WY	Water Yield

## RESUMEN

Las fuentes de agua subterránea son recursos de primordial importancia. En muchos casos las fuentes subterráneas se complementan a las superficiales; en otros casos, las aguas subterráneas son las únicas fuentes de suministro del recurso hídrico, lo cual la hace más importante aún en cuanto a cantidad y calidad (Galárraga, 2000). En el caso del Ecuador existen regiones en la zona Andina donde el uso del recurso hídrico subterráneo es fundamental y muy utilizado a pesar del escaso conocimiento hidrológico que hay sobre este recurso (Buytaert, 2006; Buytaert y Bièvre, 2012). Los estudios para determinar las fuentes de agua subterránea, la ubicación de las zonas de recarga y los valores de recarga en esta región son escasos.

Esta investigación tiene como objetivo identificar posibles regiones de recarga de agua subterránea en la cuenca del Río Chambo. Esta cuenca se encuentra en la parte central de Ecuador, en la provincia de Chimborazo, cubriendo un área de 3 500 km<sup>2</sup>. El área de estudio abarca una extensión aproximada de 12 550 km<sup>2</sup>.

Se realizó el cálculo del balance superficial para toda la cuenca y las áreas aledañas, un análisis de recarga utilizando métodos de separación de flujo base y la aplicación del modelo GR2M. La calidad y extensión de la base de datos utilizada fue un factor limitante en este estudio. Se analizaron seis sub-cuencas de las cuales se disponía información y la misma pudo ser sometida a un análisis estadístico de datos. Las sub-cuencas analizadas fueron clasificadas en dos grupos, Grupo A y Grupo B, en función de su ubicación dentro de la zona de estudio. Las sub-cuencas analizadas fueron H0333, H0786 ubicadas en la región de la Sierra, conformando el Grupo A, y H0787, H0788, H0789 y H0790 ubicadas en la frontera con la región del Amazonas, conformaron el Grupo B.



Respecto a la metodología del balance superficial, las zonas de potencial recarga se encuentran en las áreas de los volcanes Chimborazo, Altar, Igualata y Tungurahua. La mayor producción de agua (WY) se produce para el grupo B con valores entre 452,9 mm/año y 806,8 mm/año. Mientras que para el grupo A, los valores se encuentran entre 95,90 mm/año y 234,1 mm/año. Se puede observar que en áreas donde se encuentran volcanes como Chimborazo, Igualata, Tungurahua y Altar, la producción de agua tiene valores entre 750 mm/año y 1 000 mm/año.

En cuanto a la segunda metodología de separación de flujo base, existe un porcentaje de contribución de aguas subterráneas entre el 40,7% y 53,3% para las sub-cuencas del Grupo A, mientras que el porcentaje de aguas subterráneas para las sub-cuencas del Grupo B está entre 19,8% y 29,3%. Sin embargo, en cuanto a cantidad las sub-cuencas del Grupo B tienen una mayor recarga del acuífero. El aporte de aguas subterráneas para el Grupo A está en un rango entre 58,4 mm/año m<sup>2</sup> y 127,6 mm/año m<sup>2</sup>. Para las sub-cuencas del Grupo B, el aporte de aguas subterráneas está entre 187,3 mm/año m<sup>2</sup> y 553,4 mm/año m<sup>2</sup>.

Respecto a la tercera metodología sobre la aplicación del modelo GR2M, el ajuste del modelo para la sub-cuenca H0333 tiene un valor de Nash de 49,1% lo que se considera satisfactorio. Mientras que para el resto de sub-cuencas el modelo GR2M no evidencia un ajuste respecto a los valores de caudales pico ni a la tendencia de la gráfica. Por lo tanto, no se puede definir si existe o no un aporte de aguas vecinas hacia alguna de las sub-cuencas analizadas o viceversa.

## ABSTRACT

Groundwater resources are very important for many regions around the world. In many cases, the underground water resources complement the superficial sources. In some cases, groundwater is the only source of water supply. In Ecuador, there are regions in the Andean zone where the use of groundwater is fundamental, despite, the lack of hydrological knowledge about it (Buytaert, 2006, Buytaert and Bièvre, 2012). There are almost no studies in the country that the sources of groundwater, the location of the recharge zones and the recharge quality magnitude in this region.

The aim of this research is to identify possible regions of groundwater recharge in a study area that surrounds the Chambo River basin. This basin is located in the central part of Ecuador, in the province of Chimborazo, and it has an area of 3 500 km<sup>2</sup>. The selected study area covers approximately 12 550 km<sup>2</sup>.

In order to characterize groundwater recharge, three methods were applied: (i) surface water balance of this study, (ii) recharge analysis using base flow separation methods, and the implementation of the GR2M model. Six sub-basins with available information were statistically analyzed through analysis of homogeneity, quality and data filling. Quality and extension of database was a limiting factor. The sub-basins analyzed were classified in two groups according to their location in the study area: Group A and Group B. Group A was located in the western part of the study area, and encloses sub-basins H0333 and H0786. Group B was located in the eastern region border; by sub-basins H0787, H0788, H0789 and H0790.

The results from the first method (water balance) showed that the areas with potential recharge are located in the Chimborazo, Altar, Iguayata and Tungurahua volcanoes.

The sub-basins within Group B had the highest water production (WY) (452,9 to 806,8,1 mm/year), compared to those of group A (95,90 mm/year and 234,1 mm/year). In addition, water production range between 750 mm/year and 1 000 mm/year in volcanoes areas.

Results from the second method (hydrograph separation) showed that sub-basins within Group A had a groundwater contribution between 40,7% and 53,3% and Group B had a percentage between 19,8% and 29,3%. However, the sub-basins of Group B had a greater contribution of groundwater; therefore, they have a greater recharge of the aquifer. The contribution of groundwater for Group A's sub-basins was in the range of 58,4 mm/year m<sup>2</sup> to 127,6 mm/year m<sup>2</sup>. For sub-basins of Group B, the contribution of groundwater is between 187,3 mm/year m<sup>2</sup> and 553,4 mm/year m<sup>2</sup>.

Finally, the third methodology (GR2M) had a satisfactory statistical adjustment for only sub-basin H0333 (Nash value: 49,1%); meanwhile, for rest of sub-basins the model is not able to simulate properly of peak flow values or trend of the graph. For this reason, it is not possible to define whether there is a contribution from neighboring waters to any of the sub-basins analyzed or not.

## PRESENTACIÓN

Esta investigación estima la recarga potencial en la cuenca del río Chambo a través de la aplicación de varias técnicas hidrológicas físicas. Las técnicas hidrológicas físicas aplicadas son a) un balance hídrico superficial, b) separación del caudal base a partir de datos diarios de caudal y c) el modelo hidrológico GR2M con datos de caudal a nivel mensual. Este estudio se encuentra distribuido en cinco capítulos más referencias bibliográficas y anexos. El contenido de este trabajo se describe a continuación:

El **Capítulo 1** es la Introducción, sección en la cual se describen los antecedentes, la justificación y los objetivos a alcanzar.

El **Capítulo 2** abarca el marco teórico aplicado a la investigación y el estado del arte de los métodos utilizados.

El **Capítulo 3** refiere la zona de estudio, su ubicación y sus características físicas. La recopilación de la información, el tratamiento estadístico de datos, y en sí la metodología utilizada.

El **Capítulo 4** expone los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

El **Capítulo 5** detalla las conclusiones encontradas además de las recomendaciones obtenidas durante todo el desarrollo de la investigación.

Al final se encuentran las referencias bibliográficas sobre las cuales se basó la investigación y los anexos.

# **CAPÍTULO 1.**

## **1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

En el callejón interandino del Ecuador el abastecimiento de agua se realiza predominantemente de fuentes superficiales, las cuales son fuentes vitales de agua para esta región. Sin embargo, existen regiones en la zona Andina donde la utilización de las aguas subterráneas es fundamental y muy utilizada a pesar del poco conocimiento hidrológico que se tiene sobre este recurso (Buytaert, 2006; Buytaert y Bièvre, 2012). La zona de estudio comprende la cuenca hidrográfica del río Chambo y las cuencas aledañas a ésta. La cuenca del Río Chambo se encuentra en la provincia de Chimborazo, en la parte central del sistema montañoso de los Andes del Ecuador. Esta cuenca pertenece al sistema hidrográfico Pastaza, que drena a la Cuenca del Amazonas (Chimborazo, G. A. D, 2011; Naranjo, 2013). La cuenca del Chambo tiene un área de 3 500 km<sup>2</sup> (Quishpe, 2017) y el área seleccionada de estudio tiene una extensión aproximada de 12 550 km<sup>2</sup>. Según Naranjo (2013) en la cuenca hidrográfica del Río Chambo existen varios sistemas acuíferos o un solo sistema compartimentado como los de: Llío – San Pablo, Yaruquíes, Guano, Riobamba y Punín.

El agua disponible en la cuenca de estudio es de 557 millones de m<sup>3</sup> al año. Esta cuenta con un caudal medio disponible de 62 m<sup>3</sup>/s, y un caudal en época de estiaje de 40 m<sup>3</sup>/s. En un valor promedio se necesita de un caudal de 42,4 m<sup>3</sup>/s para abastecer las necesidades de la población, lo cual significaría que en época de estiaje la oferta del recurso hídrico es insuficiente (Chimborazo, G. A. D, 2011). El caudal disponible es destinado para las diferentes actividades económicas que se llevan a cabo dentro de la cuenca. Las principales actividades son agrícolas, tales como el riego o actividades pecuarias, en la que se destaca la producción de leche (Chimborazo, G. A. D, 2011).

Factores como el crecimiento poblacional, las actividades económicas realizadas, la disposición de aguas servidas (la descarga principal está dirigida hacia el río Chambo), entre otros, ejercen presión sobre los recursos hídricos (Mancheno, 2010; Chimborazo, G. A. D, 2011). La dotación de agua suministrada a la población de la provincia es de aproximadamente 260 l/hab/día. En el año 2010 la demanda de agua para la provincia fue de 1,4 m<sup>3</sup>/s, y en base a la tasa de crecimiento anual, la demanda requerida para el año 2036 sería de 1,7 m<sup>3</sup>/s (Chimborazo, G. A. D, 2011). Riobamba es donde existe la mayor demanda, pues es la principal ciudad localizada dentro de la cuenca (ubicada a 28 km al este del volcán Chimborazo). Para el año 2010, con una población de 220 919 habitantes, la demanda fue de 0,66 m<sup>3</sup>/s. Al hacer una proyección demográfica para el año 2020, el número de habitantes sería de 264 048 aproximadamente y la demanda se habrá incrementado a 0,8 m<sup>3</sup>/s (Chimborazo, G. A. D, 2011, Garcés et al., 2012). Actualmente, el suministro de agua potable disponible para la ciudad se da por captaciones de pozos y vertientes, es decir, por fuentes de agua subterráneas. Las fuentes son, San Pablo, Llío, San Gabriel y Yaruquíes. De estas fuentes, San Pablo, es un manantial que aflora a la superficie, mientras que Llío abastece de agua a la ciudad a través de siete pozos, en San Gabriel y Yaruquíes se ha captado agua de pozos y vertientes (Mancheno, 2010).

De la mano con el aumento de la población, viene uno de los graves problemas en la provincia en general, como es la insuficiencia de agua destinada para riego, y el extremo aprovechamiento de las fuentes superficiales. Estas fuentes son las mayormente explotadas a través de acequias, sin embargo, a pesar de que el agua obtenida de las fuentes subterráneas es la más extensa en cantidad en la provincia (Naranjo, 2013), su potencial no ha sido aprovechado debido a problemas económicos, a la falta de información y limitada cantidad de estudios en este campo.

El estudio del agua subterránea es de gran importancia, ya que hasta el momento en la zona no existen investigaciones enfocadas a entender este recurso,

especialmente sus zonas de recarga, la cantidad de recarga anual, etc. Un ejemplo de un estudio realizado en la zona, revela un desequilibrio en el balance hídrico en sub-cuencas de montaña dentro de la Cuenca del Río Chambo las cuales cuentan con un caudal mayor al que es explicado por la diferencia entre precipitación y evapotranspiración efectiva, lo cual podría indicar un indicio de la contribución de aguas subterráneas en la zona a través de aportes de agua entre cuencas hidrográficas vecinas (Quishpe, 2017) El desarrollo de este proyecto de investigación incluyó técnicas de la hidrología física, las cuales permitieron cuantificar la recarga del acuífero de la cuenca del Río Chambo, zonas de recarga, y los aportes de estas aguas a los cauces superficiales (Mancheno, 2010). Por tanto, es fundamental desarrollar este estudio para entender las zonas de recarga del acuífero que pueden ser utilizadas para definir estrategias de manejo en estas áreas.

Se aplicaron varias técnicas entre las cuales se contempla a) Desarrollar un balance hídrico superficial para toda la cuenca y áreas aledañas a través de los criterios del modelo InVEST, b) Realizar un análisis de la recarga por medio de métodos de separación de caudales base utilizando datos de caudal a nivel diario de microcuencas seleccionadas que dispongan de una serie de datos, y c) Aplicar el modelo hidrológico GR2M en las cuencas que cuenten con datos de caudal a nivel mensual.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El agua es un recurso imprescindible para todo ser viviente del planeta (Matus et al., 2009). Como ejemplo, las plantas y los cultivos toman los minerales disueltos en agua que tiene el suelo a través de sus raíces. La gran mayoría de alimentos tienen un elevado contenido de agua. Y sin ir muy lejos, el agua es uno de los elementos más importantes de cada uno de los seres vivos (Auge, 2007). Al nacer, el ser humano tiene un 75% de agua en su cuerpo y en la adultez este porcentaje alcanza el 60% (Iglesias et al., 2011).

Aproximadamente el 97% del agua del planeta se localiza en los océanos (Auge, 2007). El 3% remanente, es agua dulce y está a disposición para el consumo y la misma se encuentra dividida en varios componentes. De la cantidad total de agua dulce en el planeta, el 68.9% de agua pertenece a los glaciares, 29.9% de agua está contenida en acuíferos, 0,3% en ríos y lagos y 0,9% en otros reservorios (Teixeira et al., 2000; Hirata et al., 2000; Córdova et al., 2010)

La importancia del recurso hídrico para la vida del planeta, el deterioro de los suministros de este recurso y la alteración del ciclo hidrológico hace imperiosa la realización de estudios que permitan cuantificar las reservas de agua del planeta (Galárraga, 2000; Matus et al., 2009). Los sistemas subterráneos de agua y sus zonas de recarga son de gran importancia. Por lo que es relevante cuantificar sus reservas, la disponibilidad, cantidad y calidad de las mismas (Galárraga, 2000; Matus et al., 2009).

La precipitación es la principal fuente de recarga para los sistemas de agua subterráneas (Matus et al., 2009). Diferentes actividades antrópicas, como las agropecuarias, forestales, cambio de uso de suelo como la implementación de proyectos industriales, de asentamiento urbano, etc., han alterado las características de estas zonas de recarga. Estas actividades ocasionan que el suelo se compacte, se impermeabilice, quede despojado de su cobertura vegetal aumentando la escorrentía superficial lo cual mengua la recarga de los acuíferos (Matus et al., 2009; Chamorro, 2016).

El desarrollo de este proyecto de investigación se encuentra enmarcado dentro del Proyecto PIMI 15-02 "Caracterización del sistema acuífero de la cuenca alta del río Chambo utilizando un enfoque hidrodinámico y geoquímico: procesos de recarga y gestión sostenible del recurso". Los resultados de esta investigación permitirán, apoyar al entendimiento de la recarga del acuífero y a la interpretación de los análisis geoquímicos del proyecto. Se espera además que la determinación de las zonas y valores potenciales de recarga permitan a instituciones como la Empresa



Pública-Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Riobamba (EP-EMAPAR) el manejo óptimo del recurso hídrico en la cuenca, el cual es el objetivo final del proyecto de investigación, una vez identificadas las magnitudes y zonas de recarga del acuífero.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estimar la recarga potencial en la cuenca del río Chambo a través de la aplicación de varias técnicas hidrológicas físicas.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar un balance hídrico superficial para toda la cuenca y áreas aledañas a través de los criterios del modelo InVEST.
- Realizar un análisis de la recarga utilizando datos de caudal a nivel diario de sub-cuencas seleccionadas que cuenten con una serie de datos disponibles, por medio de métodos de separación de caudales base.
- Aplicar un modelo hidrológico GR2M en las cuencas que cuente con datos de caudal mensual.

## **CAPÍTULO 2.**

### **2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

Se describirá las tres metodologías que han sido utilizadas para comprender la recarga potencial en la cuenca del río Chambo.

#### **2.1 BALANCE SUPERFICIAL**

##### **2.1.1 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS**

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los ecosistemas proporcionan al ser humano. El Grupo de evaluación de los ecosistemas del milenio (MA), destaca que los servicios ecosistémicos consideran los procesos y condiciones mediante los cuales los ecosistemas y todo lo que lo constituye, satisface y sustenta a la vida del ser humano (Camacho y Ruíz, 2012; Brandizi, et al., 2014; Asorey et al., 2017).

A través de los años se han propuesto diferentes formas de clasificación de los servicios ecosistémicos (Camacho y Ruíz, 2012; Caballero 2014). Una de estas propuestas es la de clasificar a los servicios ecosistémicos en base a la función que desempeñan. Las funciones elementales de los ecosistemas se agrupan en cuatro clases que provienen de los bienes y servicios que ofrecen dichos ecosistemas y son: funciones de regulación, funciones de hábitat, funciones de producción y funciones de información. Las funciones de regulación se encuentran relacionadas con la capacidad que tienen los ecosistemas para regular diferentes procesos ecológicos y biológicos. Dichas funciones proporcionan beneficios tanto directos como indirectos al ser humano. Algunas de estas funciones son el mantenimiento de tierra que se pueda cultivar, la depuración del agua, el mantener el aire limpio, entre otros (Camacho y Ruíz, 2012).

Las funciones de hábitat, son las funciones que los ecosistemas proporcionan para dar refugio a los animales, reproducción para animales y plantas, lo cual ayuda con la conservación biológica. Los servicios que proporcionan estas funciones son las de mantenimiento de especies animales y vegetales, y de conservación genética. Las funciones de producción abarcan procesos a partir de los cuales los organismos se abastecen de una forma autónoma sus requerimientos o necesidades. Estos procesos proveen una serie de bienes y servicios para consumo del ser humano. Esto comprende alimentos, recursos energéticos, materia prima entre otros. Las funciones de información son los beneficios que los ecosistemas brindan a la salud del ser humano en el ámbito espiritual, recreación paisajística, desarrollo cognitivo, etc. (Camacho y Ruíz, 2012).

**Figura 2.1.** Clasificación de los servicios de los ecosistemas propuesta por el MA – Evaluación de los ecosistemas del Milenio

Servicios de Aprovechamiento	Servicios de Regulación	Servicios Culturales	Servicios de Soporte
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alimentos</li> <li>•Agua Dulce</li> <li>•Leña</li> <li>•Fibras</li> <li>•Bioquímicos</li> <li>•Recursos genéticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Regulación del clima</li> <li>•Regulación de enfermedades</li> <li>•Regulación de saneamiento del agua</li> <li>•Polinización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Espiritual y religioso</li> <li>•Recreativo y turístico</li> <li>•Estético</li> <li>•Inspirativo</li> <li>•Educativo</li> <li>•Herencia cultural</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Formación de suelos</li> <li>•Reciclaje de nutrientes</li> <li>•Producción primaria</li> </ul>

Elaborado por: Andrade, 2019

Fuente: (Camacho y Ruíz, 2012)

Hay una clasificación propuesta por el MA, en la cual esta agrupación de servicios se hace con el propósito de facilitar la toma de decisiones. Esta clasificación está basada en líneas funcionales. Estas líneas encierran servicios de regulación, de soporte, de aprovisionamiento y culturales (Ver Figura 2.1). Los servicios de aprovisionamiento o suministro son los productos que se consiguen de los ecosistemas (Camacho y Ruíz, 2012; Caballero, 2014), los servicios de regulación son los beneficios resultado del equilibrio en procesos de los ecosistemas son

obtenidos de forma directa de los ecosistemas sin ser necesario el paso por algún proceso de transformación (Camargo et al., 2015). Los servicios culturales son los beneficios inmateriales que proporcionan los ecosistemas y los servicios de soporte son los que se realiza para la producción de otros servicios de los ecosistemas (Camacho y Ruíz, 2012).

Existen modelos que permiten desarrollar la evaluación de los servicios ecosistémicos. Entre ellos se encuentra el modelo InVEST, el mismo que está detallado en la siguiente sección (Ver 2.1.2 MODELO INVEST)

### **2.1.2 MODELO INVEST**

El modelo Integrated Valuation of Ecosystem and Tradeoffs por sus siglas en inglés (InVEST) fue desarrollado en el 2006 por el The Natural Capital Project (Nat Cap) - junto con el World Wildlife Fund (WWF), la Universidad de Minnesota y la Universidad de Stanford, entre otras instituciones (Sharp et al., 2015; Quintero et al., 2017). InVEST es una herramienta muy útil para examinar cómo los cambios o variaciones en los ecosistemas pueden llevar a modificaciones en los beneficios que estos ecosistemas proporcionan al ser humano (Sharp et al., 2015). Este modelo es espacial, permite mapear y tiene como objetivo cuantificar y valorar los servicios ecosistémicos (Sharp et al., 2015; Asorey et al., 2017; Gidahatari, 2019). Este modelo como herramienta permite visualizar en mapas y cuantificar diferentes servicios ecosistémicos (Asorey et al., 2017).

InVEST consta de diez y siete módulos o herramientas, los cuales sirven para evaluar diversos servicios ecosistémicos (Asorey et al., 2017; Quintero et al, 2017). Entre las herramientas proporcionadas por el modelo InVEST se encuentran, almacenamiento de carbono, hidroenergía, purificación del agua, módulo de producción de agua (Reservoir Hydropower Production), entre otros (Sharp et al., 2015; Quintero et al., 2017). El modelo InVEST se fundamenta en los principios del balance hídrico, en un entorno GIS, el cual es fácil de acceder y usar (Sharp et al., 2015). Además, es un instrumento muy útil para tomar decisiones relacionadas con

el manejo de los recursos naturales (Torres, 2018). Este modelo permite evaluar la cantidad de agua en exceso de la evapotranspiración real o efectiva, además de ser un indicador del potencial máximo de recarga del acuífero y permite identificar espacialmente las regiones con potencial recarga de agua subterránea.

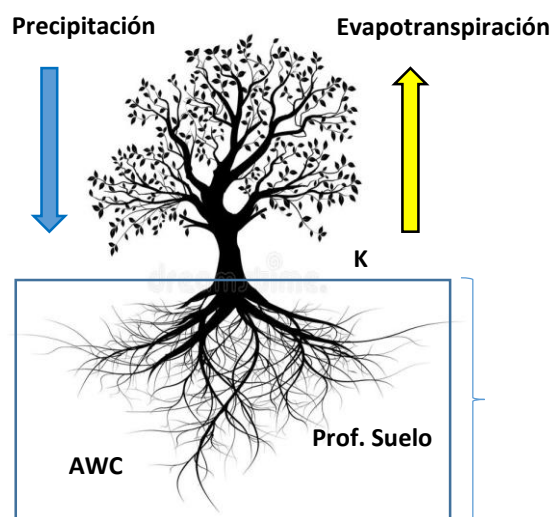
#### **2.1.2.1 Producción de Agua (WY – Water Yield)**

En la investigación realizada se utilizó el modulo o herramienta WY - Water Yield o también llamada producción de agua. La producción de agua es un servicio ecosistémico el cual se encuentra dentro de los servicios de aprovisionamiento, según lo explicado en la sección “2.1.1 Servicios Ecosistémicos”. El modelo de producción de agua está diseñado para cuantificar las producciones de agua de diferentes sub-cuencas, el cual es susceptible a cambios de uso de suelo o a cambios climáticos (Redhead et al., 2016). La producción de agua como un servicio que ofrece el ecosistema, es el resultado del balance entre la evapotranspiración efectiva o real y la precipitación de la zona de estudio, considerando la cobertura y las características del suelo (Jobbagy et al., 2008; Asorey et al., 2017).

#### **2.1.3 BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL A TRAVÉS DE CRITERIOS DEL MODELO INVEST Y CURVA DE BUDYKO**

El balance hídrico superficial se realizó determinando la producción de agua por sub-cuenca a través de criterios del modelo InVEST y la curva de Budyko. Esta curva evalúa de manera anual la evapotranspiración efectiva a partir de la información de entrada de precipitación y evapotranspiración potencial (Budyko, 1961). El modelo InVEST considera la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración efectiva teniendo en cuenta variables tales como el uso y la cobertura del suelo, las características topográficas y climáticas del área de estudio (Ver Figura 2.2). El módulo a utilizar de la metodología del modelo InVEST es la rutina del sub-modelo de Water Yield por sus siglas en inglés (WY-(producción de agua), que estima la disponibilidad de agua de una cuenca (Sharp et al., 2015).

**Figura 2.2.** Diagrama conceptual del modelo InVEST utilizado para el balance superficial, considerando las variables de precipitación, evapotranspiración, coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), la profundidad del suelo y capacidad de agua disponible (AWC)



Fuente: Sharp et al., 2015

Las zonas potenciales de recarga se definieron espacialmente con una resolución de  $1 \text{ km}^2$  a nivel de celda. Se limitaron áreas donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración efectiva. La producción anual de agua  $Y_{(x)}$  para cada celda  $x$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{(x)} = \left(1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}}\right) \cdot P_{(x)} \quad (2.1)$$

Dónde:

$Y_{(x)}$ : Producción anual de agua en cada celda (mm/año)

$AET_{(x)}$ : Evapotranspiración real anual en cada celda (mm/año)

$P_{(x)}$ : Precipitación anual en cada celda (mm/año)

La evapotranspiración real o efectiva es una función de la precipitación y la evapotranspiración potencial (Sposito, 2017). El desarrollo de cálculos a escala de celda o de píxeles permite representar la heterogeneidad de los factores que impulsan la producción de agua, como la precipitación, el tipo de vegetación, el

suelo, entre otros (Sharp et al., 2015). Para el cálculo de la evapotranspiración actual anual  $AET_{(x)}$  por celda, se definió a partir de una aproximación de la curva de Budyko (Gaspari et al., 2015). La base del modelo InVEST se basa en la ecuación de Budyko modificada por Zhang et al., (2004), que determina una relación entre la evapotranspiración real anual y la precipitación anual.

$$\frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} = 1 + \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} - \left[ 1 + \left( \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} \right)^w \right]^{1/w} \quad (2.2)$$

Dónde:

$PET_{(x)}$ : Evapotranspiración anual

$w_{(x)}$ : Parámetro no físico que caracteriza las propiedades naturales del clima-suelo

Luego, la evapotranspiración anual se definió como una función de la evapotranspiración de referencia como una función del coeficiente de cultivo.

$$PET_{(x)} = K_{c(x)} * ET_{0(x)} \quad (2.3)$$

Dónde:

$ET_{0(x)}$ : Evapotranspiración de referencia (MODIS)

$K_c$ : Coeficiente de cultivo, que ajusta los valores de  $ET_0$  al tipo de cultivo o vegetación

Un parámetro biofísico que se usa para cualificar las propiedades naturales del clima y el suelo es  $w_{(x)}$ . Este es un valor adimensional que le permite relacionar el AWC y la precipitación en un año (Donohue et al., 2012; Gaspari et al., 2015).

$$w_{(x)} = Z \frac{AWC_{(x)}}{P_{(x)}} + 1,25 \quad (2.4)$$

$AWC_{(x)}$ : Capacidad de agua disponible (mm)

Z: constante empírica, constante de Zhang o factor de estacionalidad que representa la distribución de la lluvia a lo largo del año. Adoptar valores entre 1 y 30 (Sharp et al., 2015).

$$AWC_{(x)} = PAWC * Soil\ depth \quad (2.5)$$

La capacidad de agua disponible es el resultado del producto entre la profundidad mínima de las raíces (soil depth) y el contenido de agua disponible de la planta (PAWC) (Ver Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Tabla de la capacidad de agua disponible de la planta – PAWC en función de la textura del suelo

Textures	Fraction Available Water
Sands, and loamy sands and sandy loams in which the sand is not dominated by very fine sand	Less than 0.10
Loamy sands and sandy loams in which very fine sand is the dominant sand fraction, and loams, clay loam, sandy clay loam and sandy clay	0.10 - 0.15
Silty clay, and clay	0.10-0.20
Silt, silt loam, and silty clay loam	0.15 - 0.25

Fuente: NRCS, (1998).

## 2.2 SEPARACIÓN DE HIDROGRAMAS

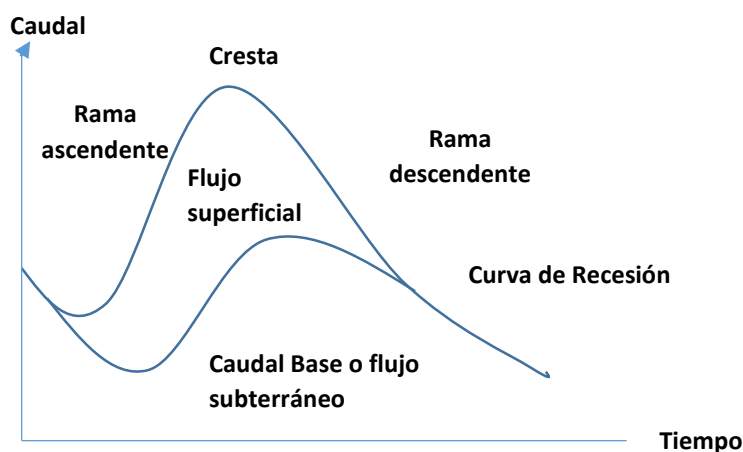
En general, el flujo de una corriente está formado por dos componentes, el caudal base y la escorrentía directa o flujo rápido. En cuanto al flujo de base, este procede del agua subterránea y la escorrentía directa viene de las lluvias generadas en la cuenca (Monsalve, 1999, Gutiérrez, 2014).

Una rama ascendente, una cresta y una rama descendente forman un hidrograma típico. La curva de la extremidad ascendente está relacionada con la precipitación que causa el aumento de la curva. En contraste, la rama descendente es independiente de la precipitación y depende de las características de la cuenca. En la curva de la extremidad descendente, hay un punto de inflexión. Desde este punto, el flujo rápido cesa y, posteriormente, el suministro de agua se almacena



dentro de la cuenca. El tramo final representa casi completamente el flujo de agua subterránea (Brodie, 2005) (Ver Figura 2.3).

**Figura 2.3.** Gráfica caudal vs. tiempo destacando sus componentes, la rama ascendente, descendente, la cresta y la curva de recesión, con los dos caudales que forman el caudal total, el caudal base o flujo subterráneo y el flujo superficial



Fuente: (Brodie, 2005)

Existen varias metodologías para cuantificar el flujo base o la recarga de acuíferos. Los métodos para la separación del flujo de base pueden ser gráficos, geoquímicos (isótopos estables de agua) y algoritmos numéricos (filtros). Entre los algoritmos numéricos se encuentran los métodos HYSEP, PULSE, RECESS, WHAT, BFI o Eckhardt con uno y dos parámetros.

En el análisis realizado se utilizaron el programa HYSEP y el método BFI. HYSEP permite la separación hidrológica en sus componentes (Risser et al, 2005; Molinero, 2008). HYSEP ofrece tres algoritmos para separación hidrológica: intervalo fijo, intervalo de deslizamiento y mínimo local (Healy, 2010). Para cualquiera de los tres algoritmos, es necesario determinar previamente el tiempo transcurrido después de la primera cresta en la descarga sobre la cual el flujo de superficie continúa contribuyendo al flujo de corriente ( $N$ ) (Sloto, 1996).

$$N = 0,83A^{0,2} \quad (2.6)$$

Dónde:

N: Duración del intervalo de tiempo (es constante para todos los flujos) (en días)

A: Superficie de drenaje (km<sup>2</sup>).

Para el método de intervalo fijo, el período de registro de datos se divide en intervalos de tiempo iguales, cuya longitud es igual a 2N (intervalo de tiempo utilizado por HYSEP para la separación hidrográfica), y el flujo base que se determinará es igual a la tasa de descarga diaria más baja dentro del intervalo.

Para el segundo método, es decir, el intervalo de deslizamiento, el flujo base para cada día del período se define como la descarga diaria más baja en un rango entre 0,5\*(2N- 1) días antes del período y 0,5\*(2N-1) después. Finalmente, para el método de mínimo local, los mínimos locales se producen en días en los que la descarga diaria es inferior a la de cualquier otro día dentro del período de análisis (Healy, 2010).

El método índice de flujo base (BFI) de uno o dos parámetros se refiere a procesos simples con resultados que son sensibles a cada parámetro. Los parámetros son valores constantes que significan las condiciones físicas de la cuenca de estudio. Para el filtro digital de dos parámetros, los parámetros son el índice de flujo base y el coeficiente de recesión (Ec. 2.7), a diferencia del filtro digital de un parámetro donde solo se considera el coeficiente de recesión (Ec. 2.8) (Eckhardt, 2005).

$$q_{b(i)} = \frac{(1-BFI_{m\acute{a}x})\alpha q_{b(i-1)} + (1-\alpha)BFI_{m\acute{a}x}q_i}{1-\alpha BFI_{m\acute{a}x}} \quad (2.7)$$

Dónde:

BFI<sub>máx</sub>: Índice de flujo base

α: coeficiente de recesión

q<sub>i</sub>: Flujo del hidrograma en el tiempo i

$q_b$ : Flujo base en el tiempo  $i$

$$U_{(i)} = Q_{i-1} + \frac{(1-\alpha)}{2}(Q_i - Q_{i-1}) \quad (2.8)$$

Dónde:

$U_{(i)}$ : flujo base a lo largo del tiempo  $i$

$Q_{(i)}$ : Flujo observado a lo largo del tiempo  $i$

$\alpha$ : coeficiente de recesión

Según Nathan y McMahon, (1990) el valor más adecuado para el coeficiente de recesión es de 0,925. De acuerdo a Eckhard, (2005), los valores de BFI máx. pueden ser definidos en base a las características de la corriente y del acuífero. Para corrientes perennes con acuíferos porosos, BFI es igual a 0,8. "Para corrientes efímeras con acuíferos porosos BFI es de 0,5. Para corrientes perennes con acuíferos de roca dura el BFI es igual a 0,25".

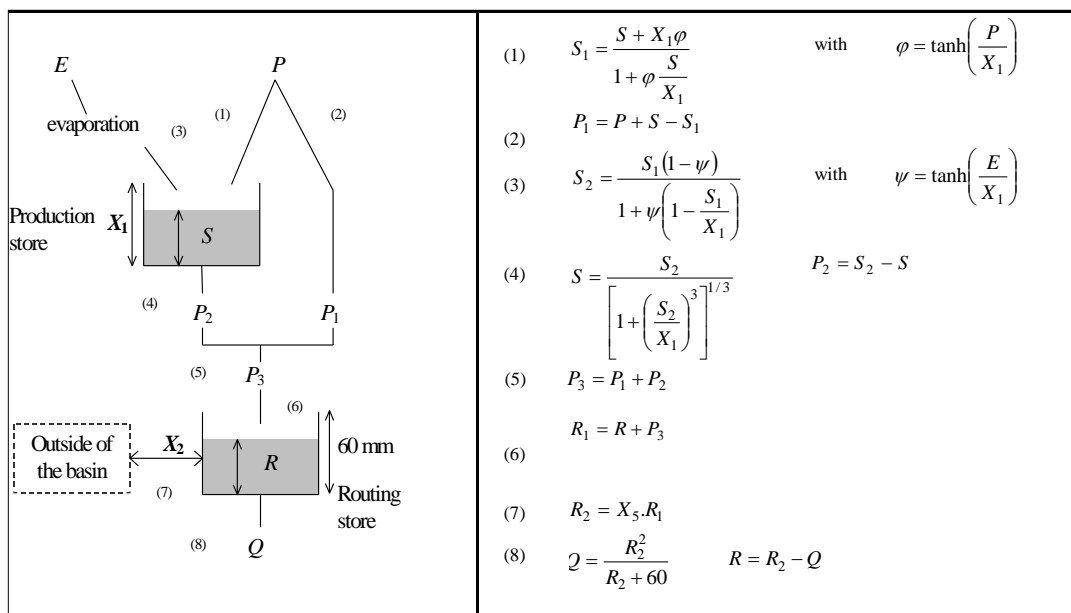
### 2.3 MODELO GR2M

Los modelos GR son modelos hidrológicos precipitación-escorrentía, los cuales fueron desarrollados en Francia por el Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Medioambiente y la Agricultura (IRSTEA) antiguamente denominada Instituto Nacional para la Investigación Agronómica (por sus siglas en inglés CEMAGREF) (Cabrera, 2013, Cruz y Romero, 2018, Irstea, 2019). A lo largo del tiempo este tipo de modelos han ido evolucionando a las siguientes versiones GR1A, GR2M, GR3J, y GR4J. La cifra significa el número de parámetros que se modelará y la última letra muestra la temporalidad, J significa diario, M mensual y A anual (Cabrera, 2013, Cruz y Romero, 2018).

El modelo usado en este trabajo de investigación fue GR2M. Este modelo simula caudales en intervalos de temporalidad mensual. GR2M convierte la precipitación en escorrentía a través de la aplicación de la función de producción la cual está

representada por el reservorio-suelo y la función de transferencia por el reservorio de agua gravitacional (Cabrera, 2013). El esquema que representa la estructura del modelo GR2M se muestra a continuación (Ver Figura 2.4). Los parámetros a modelar en GR2M son  $X_1$  y  $X_2$ . Estos parámetros representan la capacidad del reservorio del suelo en (mm) y el coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional) respectivamente. El modelo GR2M es el mejor modelo a nivel mensual debido a que no se tienen muchos requerimientos en cuanto a los datos de entrada y el buen ajuste del mismo (Cabrera, 2013). El modelo GR2M toma en cuenta base de datos conformada por los siguientes parámetros: series de lluvia total mensual, valores de temperatura media a nivel mensual y caudales medios mensuales. Los datos de entrada utilizados en el modelo son la precipitación total mensual y la temperatura media mensual. El proceso de calibración consideró la herramienta de Excel llamada Solver, la misma que permite hacer iteraciones continuas hasta encontrar los valores óptimos para los parámetros  $X_1$  y  $X_2$ .

**Figura 2.4.** Estructura del modelo GR2M, se muestra las variables actuar en el modelo, la evapotranspiración y la precipitación. Junto a los dos reservorios que conforman el modelo: suelo y agua gravitacional



Fuente: IRSTEA (<https://www.irstea.fr/fr>)

En la primera parte de la estructura del modelo se puede observar que una fracción de la precipitación es absorbida por el primer reservorio que es el Reservorio de Producción. La otra parte de la precipitación, es decir,  $P_1$  se va al segundo reservorio, el de agua gravitacional. Por lo tanto, el volumen inicial de agua en el reservorio suelo ( $S$ ) cambia a  $S_1$  (nuevo volumen) que se calcula a través de la siguiente ecuación (2.9).

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad (2.9)$$

Donde el parámetro  $X_1$  es la capacidad del reservorio suelo y  $\varphi$  es igual a: (2.10)

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (2.10)$$

Si se asume que no existen pérdidas tenemos que la precipitación es igual a: (2.11)

$$P = P_1 + S_1 - S \quad (2.11)$$

Donde:

P: Precipitación

$P_1$ : Parte de la precipitación que se dirige al “reservorio de agua gravitacional”

$S_1$ : Nuevo volumen de agua en el reservorio suelo

S: Volumen inicial del reservorio suelo

Y despejando  $P_1$  se tiene: (2.12)

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2.12)$$

Además de la precipitación, el reservorio suelo se ve afectado por la evapotranspiración. La cual reduce el volumen a  $S_2$ . (2.13)

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \Psi)}{1 + \Psi \left(1 - \frac{S}{X_1}\right)} \quad (2.13)$$

Donde  $\Psi$  se calcula a través de:

$$\Psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (2.14)$$

Donde E es la evapotranspiración.

Una fracción de  $S_2$  será transportada al reservorio de agua gravitacional y el excedente será considerado como S que es el volumen inicial para una nueva fase de análisis.

Ese remanente o excedente, es decir el nuevo S se calcula a través de:

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.15)$$

Finalmente, la cantidad de agua que percola a través del reservorio suelo para ingresar junto a  $P_1$  al reservorio de agua gravitacional, se calcula mediante la resta entre  $S_2$  y S (2.16)

$$P_2 = S_2 - S \quad (2.16)$$

Una vez que se conoce  $P_2$  se calcula la precipitación efectiva. Esta precipitación es la que ingresa al reservorio agua gravitacional y se la denomina como  $P_3$ . (2.17)

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2.17)$$

Existe un volumen inicial en el reservorio de agua gravitacional. Si a ese volumen inicial se añade  $P_3$  se tendría un nuevo volumen  $R_1$ . (2.18)

$$R_1 = R + P_3 \quad (2.18)$$

Existe un factor de corrección  $X_2$  para el volumen del reservorio de agua gravitacional por el intercambio de volúmenes a nivel sub-superficial.

$$R_2 = X_2 R_1 \quad (2.19)$$

Donde el  $X_2$  es el coeficiente adimensional de intercambios subterráneos

Al final se calcula el caudal de salida cuando el reservorio de agua gravitacional se vacía. (2.20)

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (2.20)$$

Por lo tanto, se puede evidenciar que los volúmenes a calcular dependen de los parámetros  $X_1$  y  $X_2$ . Al comparar los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se puede definir si existe una contribución de aguas vecinas hacia la cuenca o viceversa. Si  $R_2$  es mayor a  $R_1$  existe un aporte de aguas vecinas hacia la cuenca y si  $R_1$  es mayor a  $R_2$  ocurre lo contrario, la cuenca en estudio aporta a las cuencas aledañas (Mena, 2010).

## **2.4 ESTADO DEL ARTE**

A continuación, se resumen algunos de los estudios en los cuales fueron empleadas las metodologías detalladas en este estudio.

### **2.4.1 BALANCE HÍDRICO**

Martínez et al., (2011) expresa que la cuantificación de los recursos hídricos subterráneos ha sido uno de los más importantes desafíos en el campo del conocimiento hidrológico. En su estudio realizado en la cuenca del Alto Guadiana localizada en Europa más específicamente en España define que la forma más acertada de tener un conocimiento hidrogeológico cuantitativo de un acuífero es hacer la valoración del balance hídrico de la cuenca en estudio. Acerca del balance comenta además que existe una variabilidad en cuanto a resultados al desarrollar un balance. Esto se debe a que los científicos y los tomadores de decisiones tienen diferente forma de plantear los términos a usar y la definición de balance. Inclusive son considerados de diferente manera términos como: infiltración, recarga natural, escorrentía, flujo base, aportación de agua subterránea. Por ejemplo, en su estudio Martínez et al., (2011) consideró en su balance criterios hidrogeológicos y la incidencia de la extracción de agua subterránea en su zona de estudio debido a la relación existente entre acuíferos, zonas húmedas y ríos. Esto hace que desde el

primer instante en el que se produce una extracción del recurso hídrico se reduzca la descarga de un acuífero a un río.

En el estudio realizado por Castaño y Murillo (2001) se enfatiza el “papel de los recursos hídricos subterráneos en un esquema de suministro”. En esta investigación el objetivo fundamental fue el de determinar el volumen de agua subterránea de la Marina Baja en España. De la misma manera que para el estudio de Martínez et al., (2011), la metodología utilizada fue la del desarrollo de un balance. El estudio fue realizado con una base de datos meteorológica a nivel diario. El cálculo del balance consideró los siguientes parámetros; para el conjunto de entradas de agua al embalse se tomó en cuenta las aportaciones naturales de los cauces, la precipitación directa y la cantidad de agua que es bombeada por una estación de impulsión y las salidas fueren; la evaporación desde el embalse, las salidas que proceden del sobre llenado y el agua que se utiliza para sustentar las demandas del sector agrícola, urbano, etc. (Castaño y Murillo, 2001)

La metodología del modelo InVEST ha sido aplicada en varias cuencas hidrográficas, principalmente para la valoración de servicios ecosistémicos. En la investigación realizada por Gaspari et al., (2015) en las cuencas del sudeste de Buenos Aires – Argentina, se utilizó InVEST para realizar la evaluación de la provisión hídrica. Esto se hizo en base a características del suelo como son su uso y cobertura, y las características del clima y topográficas de la cuenca en estudio, abarcando varios escenarios de variación de uso de suelo para los años 1986, 1996 y 2011. Con estos resultados se transformó la provisión hídrica y se definió patrones de distribución a nivel espacial del servicio ambiental con el objetivo de convertir esta herramienta en un soporte para la toma de decisiones.

En Argentina existe un caso de estudio similar al de Gaspari et al., (2015), desarrollado por Brandizi, et al., (2014), en el que se analizó la producción de agua en el Río Chubut el cual pertenece a la red fluvial de la Patagonia. En este estudio se mostró la producción de agua por celda, por sub-cuenca en donde se concluyó



que las zonas donde existe una importante producción de agua responde a las zonas donde existe mayor precipitación. Otro estudio fue realizado por Asorey et al., (2017), en el cual se hizo el modelado y la calibración de la producción de agua situada en la cuenca del Río Limay, el cual constituye un río importante en la Patagonia Argentina. En resumen, se empleó el modelo InVEST para simular el rendimiento hídrico. De la modelación se pudo determinar cuáles sub-cuencas son las más importantes en producción de agua.

En un estudio realizado por Torres, (2018) se aplicó criterios del modelo InVEST para ejecutar un balance superficial. El modelo InVEST se usó para hacer la valoración del servicio ecosistémico de producción de agua. La investigación fue desarrollada para un área ubicada en la región interandina al norte del Ecuador. Los valores de producción de agua encontrados estuvieron en un rango entre 1 500 mm/año y 500 mm/ año. Los valores más altos fueron encontrados en áreas montañosas, es decir, de considerable elevación (alrededor de 5 000 m.s.n.m.) como el Antisana, Cayambe y el Pichincha, mientras que los valores más bajos fueron encontrados en los sitios de menor elevación (alrededor de 600 m.s.n.m.).

#### **2.4.2 SEPARACIÓN DE CAUDAL BASE**

En un estudio en la cuenca del río Lebrija, en la parte superior de la misma, realizado por Gómez y Guzmán (2011), se hizo la separación de caudal base del hidrograma. El método utilizado fue el de algoritmos los cuales estaban basados en la curva de recesión, y además se usó la ecuación de la conservación de la masa utilizando isótopos estables en el agua. Al aplicar los algoritmos se utilizaron varios escenarios estos incluyeron uno, dos o tres parámetros, los cuales están en relación con el fenómeno de recesión y reflejan comportamientos que no son lineales en cuanto al almacenamiento de los acuíferos, los cuales permiten hacer la separación del caudal base. Al utilizar dos parámetros o más se pudo interpretar de una manera más real las condiciones del acuífero. Al incluir un parámetro el porcentaje del flujo base fue del 50%, con dos parámetros 69% y con tres 71%.

Los algoritmos numéricos fueron empleados por Gómez y Gómez (2016) para realizar el análisis de caudal base usando también curvas maestras de recesión en la cuenca del río Suratá y cuenca del río de Oro en Santander-Colombia. Para poder obtener información acerca de procesos hidrogeológicos y relacionar el almacenamiento con la descarga en acuíferos. Los algoritmos numéricos fueron aplicados a la base de datos de caudal de los ríos. Al igual que el estudio de Gómez y Guzmán (2011), se concluye que al utilizar el algoritmo de un solo parámetro ( $k$ ) al cual denominan constante de recesión a lo largo del periodo donde no se encuentra escorrentía directa, el error es mayor, mientras que, al aplicar un algoritmo de dos parámetros, incluyendo el componente de escorrentía directa, ayuda a tener resultados más reales.

#### **2.4.3 MODELO GR2M**

En el estudio de Carmona et al., (2013) se aplicó el modelo hidrológico GR2M. Se realizó además el ajuste y validación del mismo. El área de estudio considerada fue la cuenca alta del río Nazas ubicada en Durango México. Para el estudio se tomaron en cuenta datos mensuales de precipitación acumulada, el escurrimiento mensual y la evapotranspiración media mensual. Se realizó un análisis de calidad de la información disponible a fin de tener una base de datos precisa y completa. El modelo presentó un ajuste entre el escurrimiento modelado y el real del 79,7% lo cual es satisfactorio. El coeficiente de Nash fue de 78,2% arrojando parámetros de  $X_1$  y  $X_2$  de 5,9 mm y 0,35 mm respectivamente. Se concluyó que el modelo subestima el escurrimiento cuando la lluvia es alta y hay una sobreestimación del mismo cuando la precipitación es baja. Además, resalta Carmona et al., (2013) que la disponibilidad de información fue una limitante durante el desarrollo de la investigación. Es muy frecuente este tipo de complicaciones debido al reducido número de estaciones meteorológicas que registran la información. La existencia de estaciones que se encuentran inactivas, es otro de los grandes inconvenientes.

Coy, (2017) en su estudio aplicó el modelo GR2M a la sub-cuenca Nevado. Esta sub-cuenca se encuentra ubicada en Colombia. Se estimaron caudales con escasa

información de entrada a nivel mensual. La información escogida fue representativa y fiable para el modelo. Para la calibración del modelo se usó el software Excel y la herramienta de análisis de optimización Solver. Se arrojaron resultados favorables ya que el ajuste fue de un 79% aproximadamente para el coeficiente de Nash. Por lo que se concluyó que la aplicación de este modelo es aplicable para cuencas de alta montaña. El autor recomienda el uso de este modelo debido al ingreso de pocas variables en el ingreso de información al modelo.

En el estudio realizado por Cruz y Romero, (2018) se realizó un análisis en el cual se compararon algunos modelos lluvia – escorrentía. Entre estos modelos se encontró GR2M. El estudio se desarrolló en la sub-cuenca del río Callazas ubicado en Perú. Para todos los modelos puestos a prueba se realizaron pruebas de ajuste, eficiencia considerando el coeficiente de Nash. En este estudio se concluyó que el modelo que mejor se ajustó a las condiciones reales del área de estudio fue el GR2M con un valor del 84% aproximadamente.

#### 2.4.4 ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.

Algunos de los estudios previamente desarrollados en la cuenca del río Chambo, se enlistan a continuación (Ver Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Cuadro en el que se muestran los estudios previos realizados en la zona de estudio, con el año de publicación, el autor o la institución que desarrolló el estudio y el título.

Año	Autor/Institución	Título
1991	CONADE-MAG-INERHI-DIGEMA	“Proyecto de Manejo y Conservación Cuenca alta del Río Pastaza”.
2007	Consejo Nacional de Recursos Hídricos	“Estudio Hidrológico de la subcuenca del río Chambo e implementación de un modelo hidrológico”
2010	Mancheno Patiño Nelson Patricio (Tesis Escuela Politécnica del Ejercito)	“Análisis de la problemática y ampliación del sistema de agua potable en la ciudad de Riobamba”.

<b>Año</b>	<b>Autor/Institución</b>	<b>Título</b>
2011	GAD CH (Gobierno Autónomo Descentralizado de la provincia de Chimborazo)	“Plan de Desarrollo y ordenamiento territorial de Chimborazo – Documento de Soporte y Línea Base”
2013	Naranjo Gaibor Luis Felipe (Tesis Universidad Central)	“Caracterización Hidrogeológica de la subcuenca del río Chambo”
2015	Agua Chambo – Comité de Gestión	“Aportes a la planificación para la gestión integral de los recursos hídricos”.
2017	Quishpe Ana Gabriela (Tesis Escuela Politécnica Nacional)	“Caracterización hidrometeorológica y estimación del Balance Hídrico de la cuenca del Río Chambo”

Elaborado por: Andrade, 2019

En el estudio de CONADE-MAG-INERHI-DIGEMA (1991), se describe en un marco de referencia, el manejo y la conservación que han tenido dentro de un contexto nacional las cuencas hidrográficas. Además, se diagnosticó a nivel biofísico, socioeconómico, legal e institucional y, el uso de suelos de la cuenca alta del Río Pastaza. Priorizando en el aspecto biofísico parámetros como, relieve e hidrografía, sedimentos, suelos ecología, agua subterránea, recursos naturales etc. En el estudio se propone lineamientos y estrategias para conservación y manejo y finalmente un plan preliminar de conservación y manejo de la cuenca Alta del Río Pastaza.

La sub-cuenca del río Chambo pertenece al sistema hidrográfico Pastaza por lo cual dentro de este estudio se enfatizan características y problemáticas que abarcan la sub- cuenca mencionada. El área de la cuenca Alta del Río Pastaza abarca 8 257 km<sup>2</sup>. Del área total, el 23% corresponde a la sub-cuenca de los ríos Patate-Ambato. Aproximadamente el 33% corresponde a la sub-cuenca del río Cutuchi. El 43,7% corresponde a la sub-cuenca del Río Chambo. El río Chambo y el río Patate conforman la red principal de drenaje del área de estudio. “Estos ríos tienen un régimen torrencial y una densidad de drenaje de 0,5 km/km<sup>2</sup> y 0,1 km/km<sup>2</sup> respectivamente” (CONADE-MAG-INERHI-DIGEMA, 1991).

En cuanto a los programas planteados, el programa de reforestación busca determinar estrategias de producción y sobretodo protección de zonas boscosas, y conservación de recursos. En este programa se hace énfasis en las áreas de la sub-cuencas del río Cutuchi, Patate-Ambato y Chambo, en superficies mayores a 50 ha las cuales se encuentran dentro de la estrategia forestal proyectada. El programa de obras civiles reflejó que 90 440 ha de superficie tienen procesos activos de erosión. Además, expresa que dentro de las sub-cuencas más afectadas por problemas erosivos se encuentra la sub-cuenca del río Chambo.

En el estudio hidrológico de la sub-cuenca del Río Chambo desarrollado por el Consejo Nacional de Recursos Hídricos-CNRH en el año 2007, el principal objetivo fue estimar los recursos hídricos superficiales. Además de ello, se realizó una caracterización climática de la sub-cuenca, en la cual se consideraron variables como la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración potencial, etc. Se realizó una estimación del agua superficial, es decir, un balance hídrico, y finalmente, la calibración de un modelo lluvia-escorrentía. Este estudio fue realizado a manera de diagnóstico de la zona con el fin de tener los recursos necesarios para llevar a cabo una planificación.

Para la red pluviométrica, el estudio consideró 8 de las 21 estaciones, las cuales cuentan con datos de más de 30 años, mientras que las demás contaban con información de menos de 20 años. Respecto a la red hidrométrica, el INAMHI cuenta con una red básica o mínima, la cual debido a su intermitencia no pudo ser considerada en su totalidad en el estudio. Con esta disponibilidad de información, el estudio consideró emplear la metodología del modelo SMAP incluido en el software MIKE 11. Este modelo simuló valores de escorrentía a nivel mensual. Además, consideró el modelo NAM para la simulación de valores de caudal a una temporalidad diaria. Esto implicó una mayor cantidad de datos por lo que en el estudio no se garantizó la determinación de resultados aceptables. Una vez realizada la modelación de caudales, esta no resultó ser muy precisa debida a la escasez de información y a su insuficiente representatividad.

Como conclusión se expresó que la estimación de recursos superficiales no fue satisfactoria debido a la mala calidad de la información meteorológica. Es decir, periodos intermitentes de toma de datos, tiempo reducido en cuanto al funcionamiento de equipos, lo que lleva a una no representatividad de los datos recolectados. No hubo una regularidad en el registro de datos de caudal que se utilizó para actividades de riego, por lo cual, no fue posible determinar los regímenes de los ríos. Sin embargo, se puede mencionar que el error obtenido de los valores de caudal estimado tiene coherencia con la precisión con la que se realizaron los aforos.

La tesis desarrollada por Mancheno (2010), realiza un análisis de la problemática del agua potable y la ampliación de este sistema en la ciudad de Riobamba. En el trabajo se determina la cantidad de agua que no ha sido contabilizada, la cual se pierde en todo el sistema de agua potable de la ciudad. Por lo tanto, se cuantificó las pérdidas que se presentaron en el sistema y en base a ello poder proponer las respectivas soluciones. Los parámetros y aspectos analizados en esta investigación fueron, el clima, la topografía, la población, los aspectos socioeconómicos, los servicios públicos existentes como: el agua potable, la disposición de aguas servidas, el sistema eléctrico y de telecomunicaciones, entre otros.

En el diagnóstico realizado, se determinó cuáles son las fuentes de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Riobamba, las cuales son superficiales y mayormente subterráneas. En cuanto a cantidad, las fuentes superficiales proporcionan a la ciudad un caudal de 256 L/s. Las captaciones subterráneas son a través de 7 pozos los cuales proporcionan un caudal aproximado de 254 L/s. Por lo tanto, del caudal total ofertado por ambas fuentes de abastecimiento, el agua subterránea representa un 50% del total del caudal. En cuanto a calidad para parámetros de color y turbiedad, los resultados arrojaron valores menores a los establecidos en la norma. Sin embargo, en cuanto a los indicadores químicos, los

resultados expresaron que las aguas analizadas tienen dureza carbonatada, lo cual se debe a la presencia de concentraciones altas de Ca y Mg.

En el Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial de Chimborazo desarrollado por GAD CH en el año 2011, se describe la línea base de todos los componentes que interactúan en la provincia. Se realizó una caracterización general de todos los componentes del sistema ambiental, de las principales actividades que se realizan en la provincia, el sistema socio cultural, el marco institucional del GAD y, el sistema de asentamientos poblacionales. Dentro de los componentes ambientales, se definen los diferentes tipos de climas existentes en la zona, los ecosistemas como el páramo y los humedales, los sistemas hídricos importantes y las cuencas y sub-cuencas que lo conforman. Como parte de las sub-cuencas que conforman la zona de estudio, se destacan la sub-cuenca del río Chanchán y la sub-cuenca del río Chambo, entre otras.

En la información que se incluye acerca de la sub-cuenca del río Chambo, se describe la hidrografía y la hidrología de esta área. El sistema de drenaje de esta sub-cuenca está compuesto por 33 afluentes, los cuales alimentan al río Chambo. Los afluentes más representativos son los ríos Guamote y Alao. El aporte de caudal medio es de 22,5 L/s/km<sup>2</sup> por toda la sub-cuenca. Debido a actividades agrícolas, la sub-cuenca presenta problemas de erosión hídrica y diferentes factores como el incremento de población y actividades pecuarias acelera estos procesos de erosión. En cuanto a la demanda de agua potable, según proyecciones realizadas por el INEC, la dotación de agua para la provincia es de 260 L/hab/día. El caudal requerido para el año 2010 fue de 1,4m<sup>3</sup>/s, y para una proyección de 30 años se demandaría una cantidad de 1,7 m<sup>3</sup>/s.

En cuanto a las aguas subterráneas, estas son extraídas a través de 7 pozos para uso principalmente doméstico. Respecto a estudios de aguas subterráneas realizados en la provincia de Chimborazo, estos son reducidos. El par de proyectos que se llevan a cabo para el aprovechamiento de aguas subterráneas son

referentes a la sub-cuenca del Chambo. Uno de los parámetros más importantes a determinar dentro del campo de estudio de este tipo de fuentes es el nivel piezométrico. Los resultados del análisis de aguas subterráneas arrojan que la mayoría de estas aguas tienen salinidad de media a alta. El estudio expresa que la proporción de aguas subterráneas que tienen un nivel de salinidad bajo o menor al mencionado puede tener un uso para abastecimiento, sin embargo, debe ser sometida a un control bacteriológico.

El objetivo del estudio de Caracterización Hidrogeológica de la sub-cuenca del río Chambo realizado por Naranjo, (2013), fue realizar una caracterización de la zona de estudio en términos, geomorfológicos, hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos y, meteorológicos. Para realizar dicha caracterización se utilizó una base cartográfica, aerofotogrametría, información climatológica disponible de la zona de estudio, imágenes satelitales, entre otros. Se obtuvieron varios parámetros hidráulicos como el coeficiente de almacenamiento, la capacidad específica y el nivel de bombeo. El análisis físico químico del agua subterráneo fue posible tomando muestras de agua de vertientes y pozos. A su vez se determinó la vulnerabilidad de los acuíferos presentes en la zona de estudio utilizando la metodología de GOD y DRASTIC. La determinación de esta vulnerabilidad estima el riesgo existente de que el acuífero pueda ser contaminado.

Al realizar las gráficas de precipitación y evapotranspiración a nivel mensual a lo largo del tiempo se pudieron evidenciar los meses donde existe exceso y meses donde hay un déficit de agua. Entre los meses de marzo y mayo es periodo donde el autor determinó que existe exceso de agua, por lo que se concluyó que en esos meses el acuífero almacena agua, es decir, se recarga. Y en los meses de junio a febrero se nota un evidente déficit. Se expresa que esta recarga proviene principalmente de los suelos de páramo cercanos al volcán Chimborazo.

Respecto a los estudios hidrogeológicos realizados, se analizaron parámetros como la permeabilidad y la porosidad de la zona. Se determinó que el 26% de la



zona de estudio está conformada por formaciones que tienen alta permeabilidad primaria. El 6% de la sub-cuenca posee una permeabilidad media la cual comprende formaciones como las terrazas aluviales, coluviales, las cuales contienen en su composición gravas, arenas, canto rodado de diferentes tamaños. Las áreas con permeabilidad media a baja comprenden el 6% del área de la sub-cuenca. Esta área está comprendida por formaciones como la de Yaruquies, Riobamba, sedimentos encontrados en el río Chambo, entre otros. El 14% de la zona está compuesta por terrenos de permeabilidad baja, en los cuales se encuentran los depósitos glaciares y cangagua.

Finalmente, se concluyó en el estudio que las principales fuentes de recarga del acuífero son los páramos del Chimborazo y las zonas de glaciares incluyendo un aporte reducido de infiltración de aguas lluvias. Del caudal total de explotación del acuífero de Riobamba que es de aproximadamente 208 L/s, 178 L/s pertenecen a explotación de los pozos y el restante al caudal tomado de vertientes.

En el estudio de Aportes a la planificación para la gestión integral de los recursos hídricos, desarrollado en el año 2015 por Agua Chambo, se expresa que el objetivo de conformar el Comité de Gestión de la sub-cuenca del Río Chambo fue el de construir un plan de gestión del agua. Esta propuesta de gestión debió ser compatible con la normativa legal vigente en el país. Finalmente, se establecieron ejes de acción de la propuesta. Los principales ejes fueron, el mejoramiento de la gestión de información referente al agua, la implementación de una gestión cuantitativa que sea sostenible, el mantenimiento y restauración de la calidad del agua y el fomento del GIRH – Gestión integrada de recursos Hídricos.

Recientemente, en el estudio desarrollado por Quishpe, (2017), se realizó la caracterización hidrometeorológica, además de una estimación del Balance Hídrico de la cuenca del Río Chambo. El presente proyecto de investigación en conjunto con el estudio realizado por Quishpe, (2017) forman parte del proyecto macro PIMI 15-02. Este proyecto de investigación multi interdisciplinario, financiado por la

Escuela Politécnica Nacional se denomina “CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO CHAMBO UTILIZANDO UN ENFOQUE HIDRODINÁMICO Y GEOQUÍMICO: PROCESOS DE RECARGA Y GESTIÓN SOSTENIBLE DEL RECURSO”.

El proyecto desarrollado por Quishpe, (2017) fue un aporte al proyecto PIMI 15-02 en cuanto a la recopilación y tratamiento estadístico de datos climáticos con una temporalidad mensual. Al realizar el análisis de las diferentes variables climatológicas se observó su variabilidad con una fuerte influencia de la región Oriental o Amazónica sobre la zona de estudio. El balance hídrico desarrollado consideró una serie de métodos para determinar la evapotranspiración efectiva. Entre los métodos utilizados se consideró el método de Thornwaite-Budyko, MODIS, ecuación de balance y la ecuación de Penman-Monteith. Adicional, considerando aspectos como localización de vías de acceso, poblados, cobertura vegetal, etc., se propuso la instalación de una estación hidrológica y de varios pluviómetros.

En esta investigación la caracterización de la zona de estudio incluyó datos de ubicación geográfica de la zona, datos político-administrativos, características del suelo, como su textura, taxonomía, uso, datos geológicos, entre otros. La textura presente en la zona es media con aproximadamente un 54% y gruesa con un 20% aproximadamente. En cuanto a la taxonomía, la predominancia es para los Andisoles, los cuales están presentes en un porcentaje del 39%. Los diversos usos de suelo que predominan en la cuenca del río Chambo son el de conservación y protección con 44,8% y, en segundo lugar, agrícola y pecuario con 40%. Respecto a la geología, en la zona existen varios tipos de fallas. Una falla regional ubicada al Este, llamada falla Peltetec, varias fallas ubicadas al norte de la zona de estudio y una falla transcurrente ubicada al noreste y una falla inferida regional al este de la zona de estudio.

En la caracterización físico-geográfica se determinó el área de drenaje, el perímetro, la forma de la cuenca, se definieron las sub-cuencas que componen la cuenca del río Chambo, entre otros aspectos. Las áreas de drenaje varían entre 22,6 km<sup>2</sup> y 604 km<sup>2</sup>. El perímetro de las sub-cuencas oscila entre 33,6 km y 172 km. Con una pendiente media entre 7,1% y 23%. En cuanto al drenaje de las sub-cuencas, los valores se encuentran entre 1,0 y 1,7, lo cual muestra que tienen un drenaje aceptable.

En esta investigación se concluye que no existe un equilibrio entre entradas y salidas en el desarrollo del balance hídrico. El análisis fue realizado de varias maneras, sin embargo, todos los valores hallados son diferentes. Por lo que se determina que existe un aporte extra de agua, lo que da indicios de aporte de aguas subterráneas a las sub-cuencas que conforman la cuenca del río Chambo. Este aporte extra se encuentra en valores en un rango entre 500 mm/año y 2 000 mm/año. Lo que no se determinó en este estudio fue la procedencia de este aporte adicional, lo cual es el origen o inicio del presente estudio.

## **CAPÍTULO 3.**

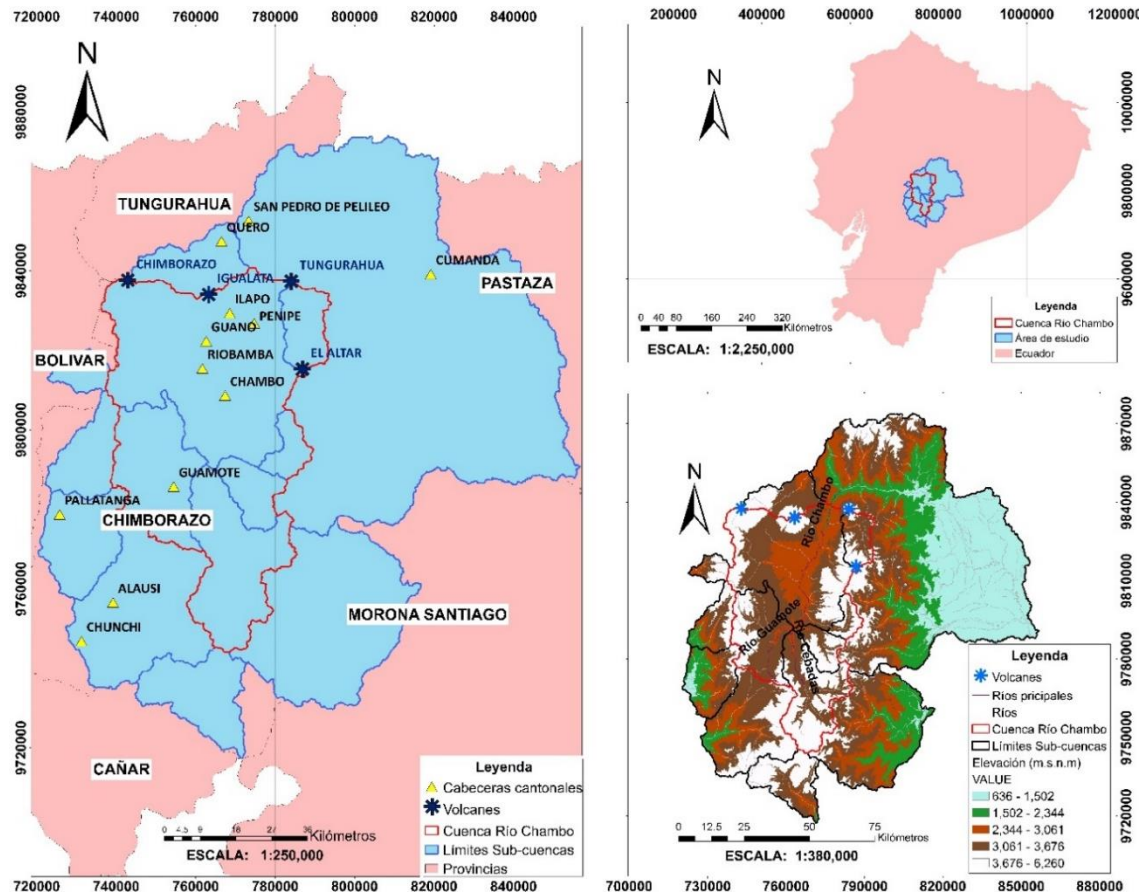
### **3 METODOLOGÍA**

El contenido de este capítulo se concentra en describir al área de estudio, su ubicación, características y, además, la metodología empleada.

#### **3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El área de estudio incluye la cuenca del río Chambo y las sub-cuencas que bordean a esta zona en todas las direcciones. Al norte, se extiende a una parte de la provincia de Tungurahua, al sur con una parte de la provincia de Cañar, la provincia de Pastaza y Morona Santiago al este y la provincia de Bolívar al oeste. La cuenca del río Chambo se encuentra en la provincia de Chimborazo, en la parte central de los Andes del Ecuador. La cuenca del Río Chambo pertenece al sistema hidrográfico Pastaza, que drena a la Cuenca del Amazonas (Chimborazo, G. A. D, 2011; Naranjo, 2013). La cuenca del río Chambo tiene un área de 3 500 km<sup>2</sup> y el área completa de estudio tiene una extensión aproximada de 12 550 km<sup>2</sup>. La zona de estudio se encuentra entre 972000 y 9880000 de latitud y 720000 y 860000 de longitud, con una elevación en un rango entre 636 m.s.n.m. y 6 268 m.s.n.m. (punto correspondiente a la cumbre del volcán Chimborazo). La cuenca del río Chambo se encuentra entre 9740000 y 9840000 de latitud; 740000 y 795000 de longitud. La elevación de la cuenca es de 2 000 m.s.n.m. y 6 280 m.s.n.m. En la Figura 3.1 se presenta la ubicación del área de estudio, cabeceras cantonales, volcanes presentes en la zona, provincias aledañas, delimitación de las sub-cuencas, etc.

**Figura 3.1.** Mapa de localización de la zona de estudio. Lado izquierdo: zona de estudio con la ubicación de las cabeceras cantonales, los volcanes, la delimitación de la cuenca del río Chambo, los límites de las sub-cuencas y las provincias aledañas a la zona de estudio. Lado derecho superior: localización de la zona de estudio respecto al Ecuador, lado derecho inferior: DEM de la zona de estudio.



Elaboración: Andrade, 2019

Fuente Cartografía Base: INAMHI

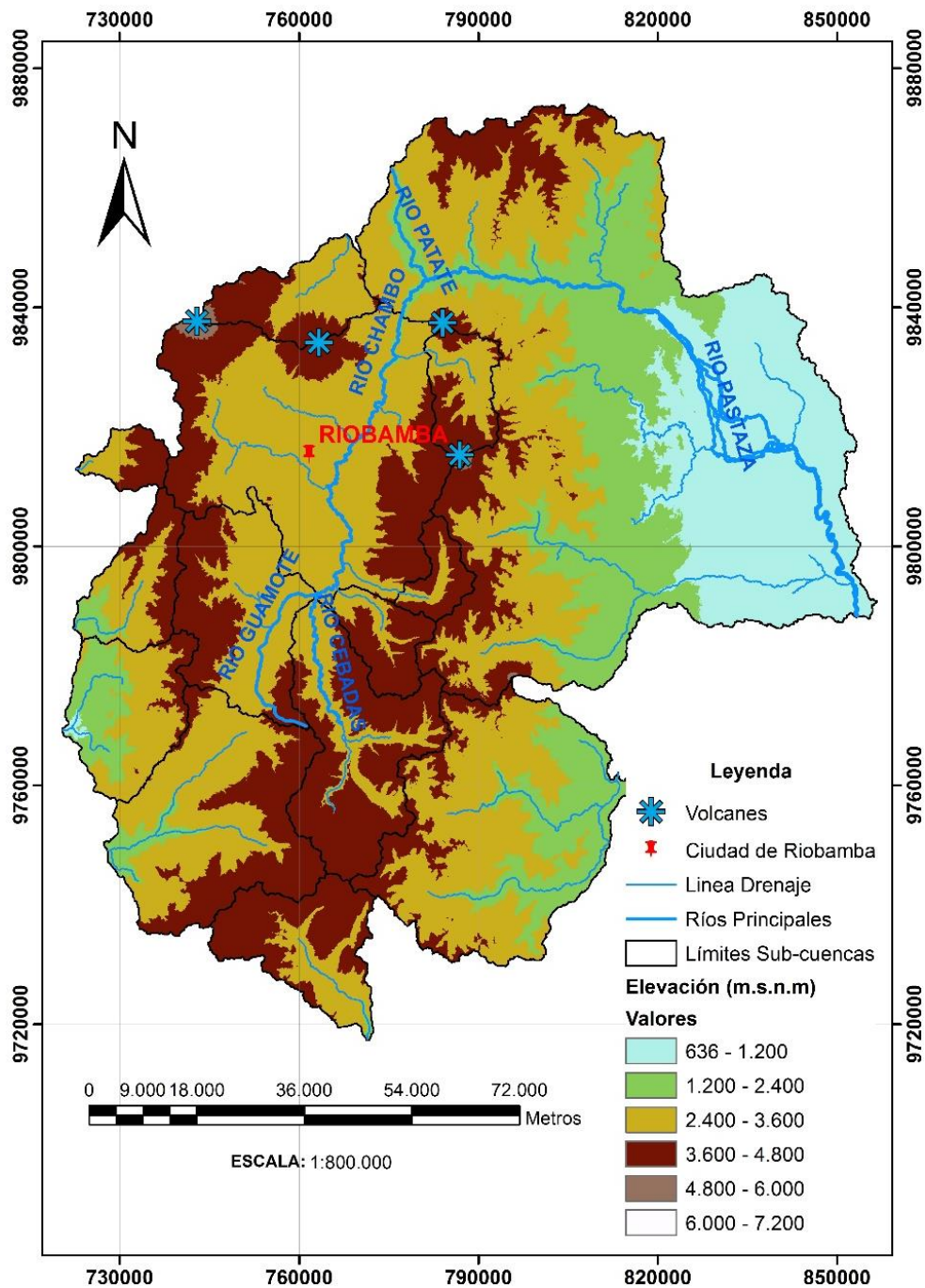
### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Chambo constituye una de las tres sub-cuencas de la provincia de Chimborazo (Chimborazo, G. A. D, 2011). En la sub-cuenca hidrográfica del Río Chambo, existen varios acuíferos como: Llío – San Pablo, Yaruquíes, Guano, Riobamba y Punín (Naranjo, 2013). Dentro de la cuenca del río Chambo se localizan los volcanes Igualata con una altitud de 4 430 m.s.n.m., el Tungurahua con una altitud de 5 023 m.s.n.m., El Altar a 5 319 m.s.n.m. y otras elevaciones menores (Ver Figura 3.1). Una de las principales ciudades que se encuentran en la cuenca del río Chambo es Riobamba. La ciudad de Riobamba es la capital de la provincia de Chimborazo y se encuentra ubicada en la región de la Sierra Central a 196 km al sur de la ciudad de Quito y 28 km al este del volcán Chimborazo (Mancheno, 2010, Chimborazo, G. A. D, 2011). Riobamba tiene un área de 979,7 km<sup>2</sup> y se encuentra a una altura de 2 720 m.s.n.m. (Mancheno, 2010). Las actividades principales son el turismo, el comercio, la agricultura, el riego y las actividades ganaderas, en las que se destaca la producción de leche (Mancheno, 2010; Chimborazo, G. A. D, 2011). Entre las cabeceras cantonales en el área de estudio se encuentran Quero, Cumandá, Ilapo, Guano, Riobamba, Chambo, Guamote, Pallatanga, Alausí y Chunchi (Chimborazo, G. A. D, 2011) (Ver Figura 3.1).

La geología y la cobertura del suelo son los dos factores que definen el diseño y la densidad de la red hidrográfica (Pourrut et al., 1995). Por otro lado, el relieve y las precipitaciones determinan la diversidad de los regímenes hidrológicos (Pourrut et al., 1995). La hidrografía de la cuenca del río Chambo está representada por treinta y tres afluentes; los cuales alimentan al río principal de la cuenca, el río Chambo. Este río tiene una longitud de 144,4 km (Naranjo, 2013; Quishpe, 2017). Entre los principales afluentes que alimentan el río Chambo se encuentran el río Cebadas y el río Guamote.

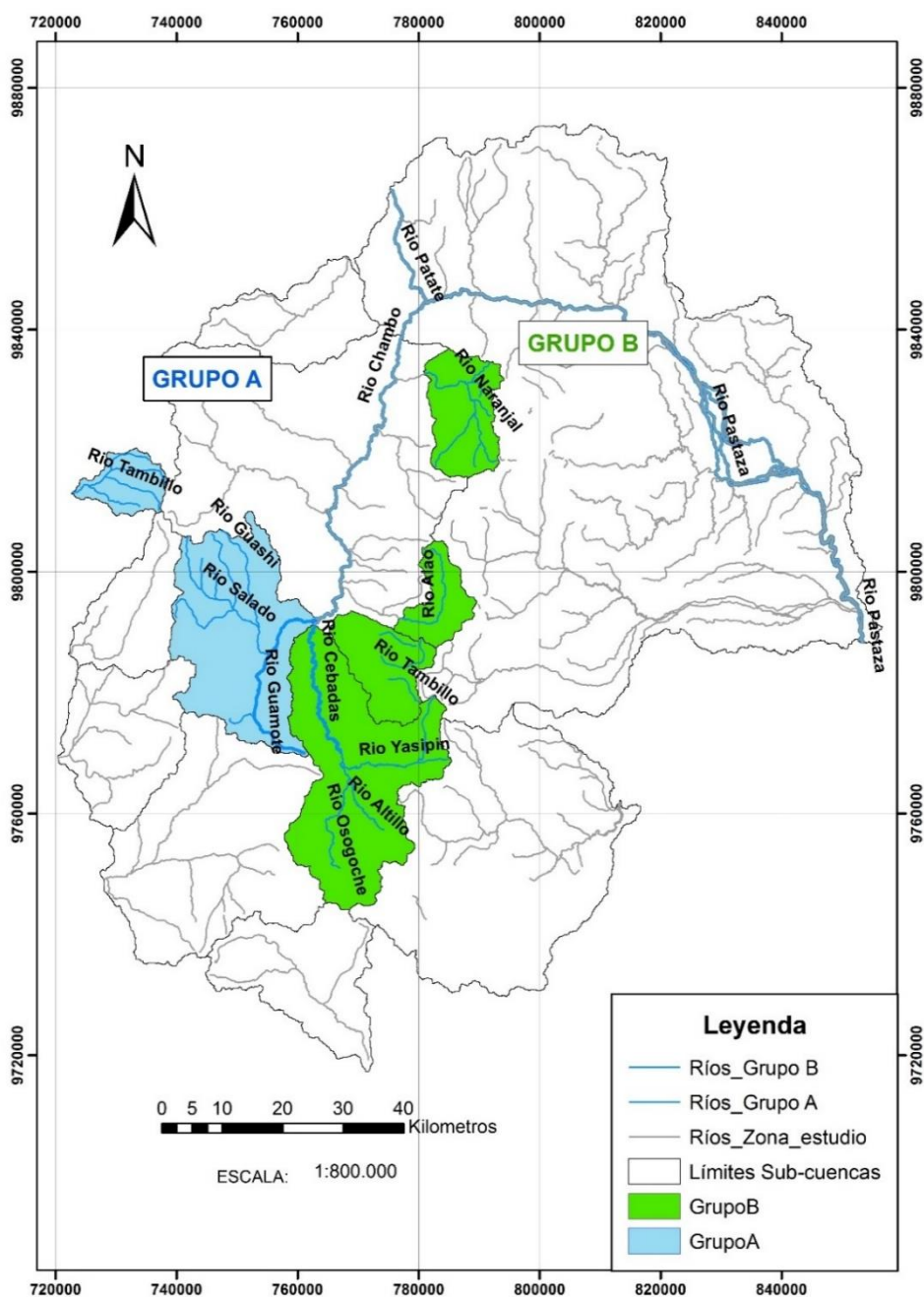
El curso del río Chambo se dirige hacia la dirección norte y se articula con el río Patate para formar el río Pastaza. (Ver Figura 3.2 y Figura 3.3).

**Figura 3.2.** Mapa de la zona de estudio. El modelo de elevación digital (DEM), mostrando los principales ríos. El río Guamote junto con el Río Cebadas confluyen para formar el río Chambo el mismo que siguiendo su curso hacia la dirección norte se articula con el río Patate para formar el río Pastaza.



Elaboración: Andrade, 2019  
Fuente Cartografía Base: INAMHI

**Figura 3.3.** Mapa de los ríos existentes en las sub-cuencas del Grupo A y Grupo B



Elaborado por: Andrade, 2019

En cuanto al clima, en la cuenca del río Chambo predomina el clima de alta montaña en un 62,6% del área de la cuenca, seguido por un clima semi-húmedo en un 16,40% del área y un clima seco en un 13% del área (Chimborazo, G. A. D, 2011). La temperatura media anual según los mapas isotérmicos desarrollados por Naranjo (2013) y Quishpe, (2017), está en un rango entre 6°C y 16°C (Ver Figura

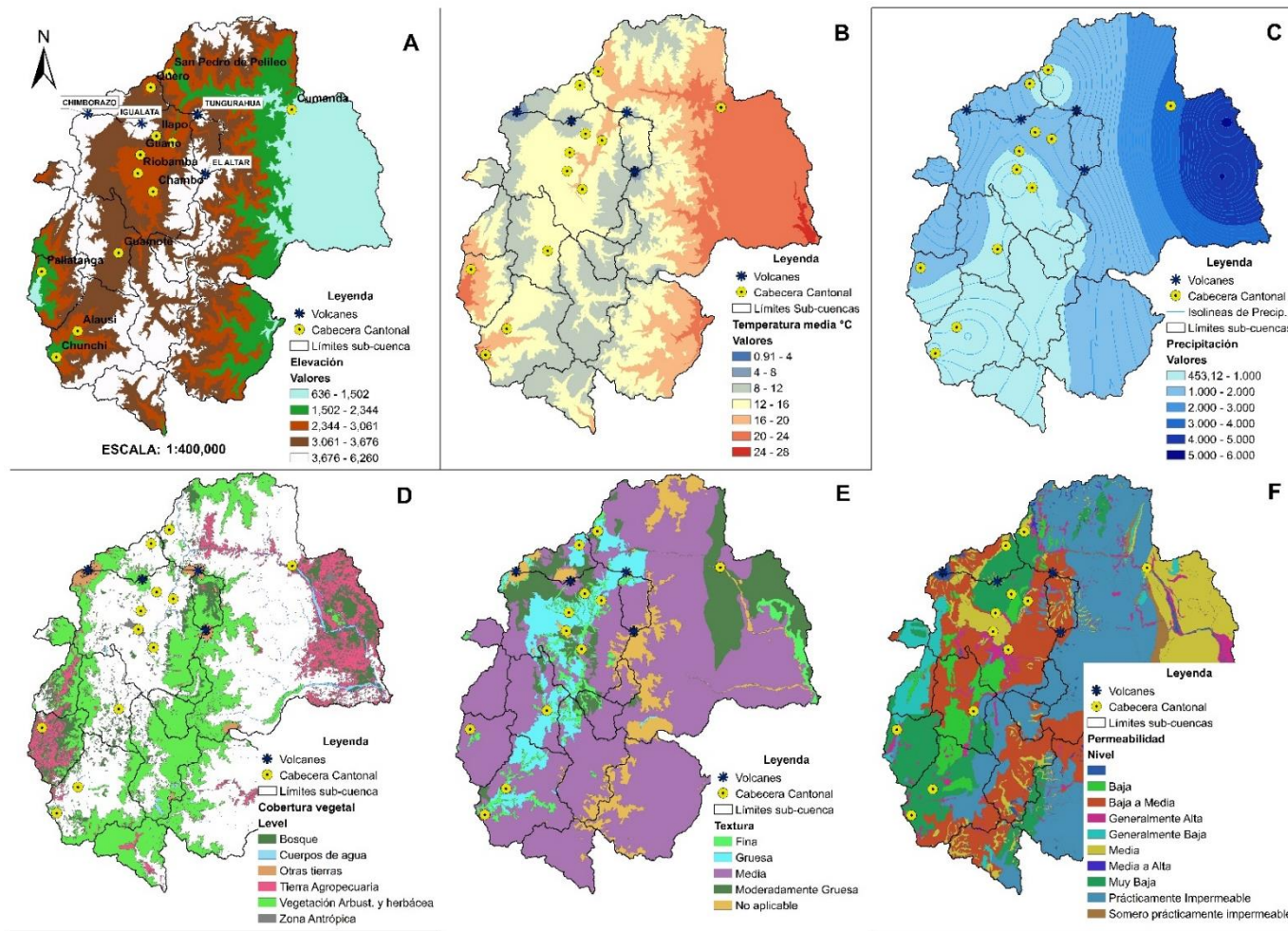


3.4). Según los valores registrados por el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI), el área de estudio tiene un rango de precipitación media anual entre 450 mm/año y 5 000 mm/año. Las precipitaciones más bajas se registran cerca de las siguientes cabeceras cantonales, Chunchi al suroeste del área de estudio, en la parte central del área de estudio cerca de Chambo y al noroeste cerca de Quero, registrando valores entre 450 mm/año y 500 mm/año. Los valores más altos de precipitación media anual se encuentran en la zona noreste en la provincia de Pastaza, cerca del cantón de Cumandá, con valores de 5 000 mm/año aproximadamente (Ver Figura 3.4).

Entre los parámetros que influyen en la escorrentía e infiltración está la cobertura de suelo y la textura del mismo. La presencia de cobertura vegetal disminuye la escorrentía y ayuda a la infiltración (Quishpe, 2017). El tipo de cobertura del suelo es una función de la elevación, el suelo, el clima, entre otros parámetros (Naranjo, 2013). Al mismo tiempo, desempeña un papel fundamental en términos de protección de taludes y balance hídrico, especialmente para escorrentía y evapotranspiración de superficie (Pourrut et al., 1995; Quishpe, 2017). En el estudio realizado por Quishpe (2017) y Chimborazo, G. A. D (2011), indican que la cuenca del río Chambo está ocupado por el páramo en un porcentaje de 45,61%. Los cultivos como acelgas, guisantes, brócoli, lupino, etc., ocupan un 14,2%, en tercer lugar pastizal con un 12,4% y, bosque siempreverde montano alto (9,4%). (Ver Figura 3.4).

La textura del suelo influye en la escorrentía y en la infiltración. Para la cuenca del río Chambo, la textura media es la que predomina con aproximadamente el 54% de los suelos de la cuenca, lo que sugiere que un alto porcentaje de lluvia se infiltra en el suelo, seguido de una textura gruesa con aproximadamente el 20%. Alrededor de la cuenca del río Chambo, hay varios tipos de suelo. La mayoría de los suelos son Andisoles en 38,7%, que tienen las siguientes características, la presencia de cenizas volcánicas que son fáciles de cultivar. Le sigue, con 15,2% los entisoles, 15,9% inceptisoles y 21,7% de molisoles (Ver Figura 3.4).

**Figura 3.4.** Características de la zona de estudio A) DEM, B) Temperatura media de la cuenca del río Chambo, C) Precipitación media, D) Cobertura vegetal, E) Textura, F) Taxonomía.



Elaboración: Andrade, 2019  
Fuente Cartografía Base - INAMHI

### 3.3 SELECCIÓN DE SUB-CUENCAS PARA ANÁLISIS

Se eligieron seis sub-cuencas para la aplicación de las metodologías planteadas. La selección surgió del análisis de disponibilidad de datos. Se consideró la información de series históricas de aproximadamente 60 estaciones hidrológicas y 89 estaciones meteorológicas. Los nombres de las sub-cuencas fueron puestos según la estación hidrológica ubicada en el punto de cierre de cada sub-cuenca. Estas fueron H0333, H0786 ubicadas en la región de la Sierra, y H0787, H0788, H0789 y H0790 ubicadas en la frontera con la región Amazónica (Ver Figura 3.5). Las seis sub-cuencas fueron agrupadas según su ubicación geoespacial dentro de la zona de estudio (Ver Tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Sub-cuencas seleccionadas para la aplicación de las metodologías planteadas. Se muestra el código de la estación del punto de cierre, el nombre de la estación hidrológica, coordenadas, áreas de drenaje, provincia

No.	GRUPO	CÓDIGO DE LA ESTACIÓN – PUNTO DE CIERRE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA	COORDENADAS		ÁREAS DE DRENAJE	PROVINCIA
				X	Y	km <sup>2</sup>	
1	A	H0786	Guamote aj Cebadas	763003,00	9792069,00	605,26	Chimborazo
2		H0333	San Lorenzo en san Lorenzo	722749,00	9813081,00	107,45	Bolívar
3	B	H0787	Alao en hda. Alao	776829,03	9792312,78	118,85	Chimborazo
4		H0788	Puela aj Chambo	780994,45	9832690,12	210,12	Chimborazo
5		H0789	Guargualla aj Cebadas	766422,56	9792692,09	189,43	Chimborazo
6		H0790	Cebadas aj Guamote	762724,56	9791230,10	707,61	Chimborazo

Elaboración: Andrade, 2019

Fuente: INAMHI

En la Tabla 3.2 se observan las principales características de las sub-cuencas seleccionadas para análisis.

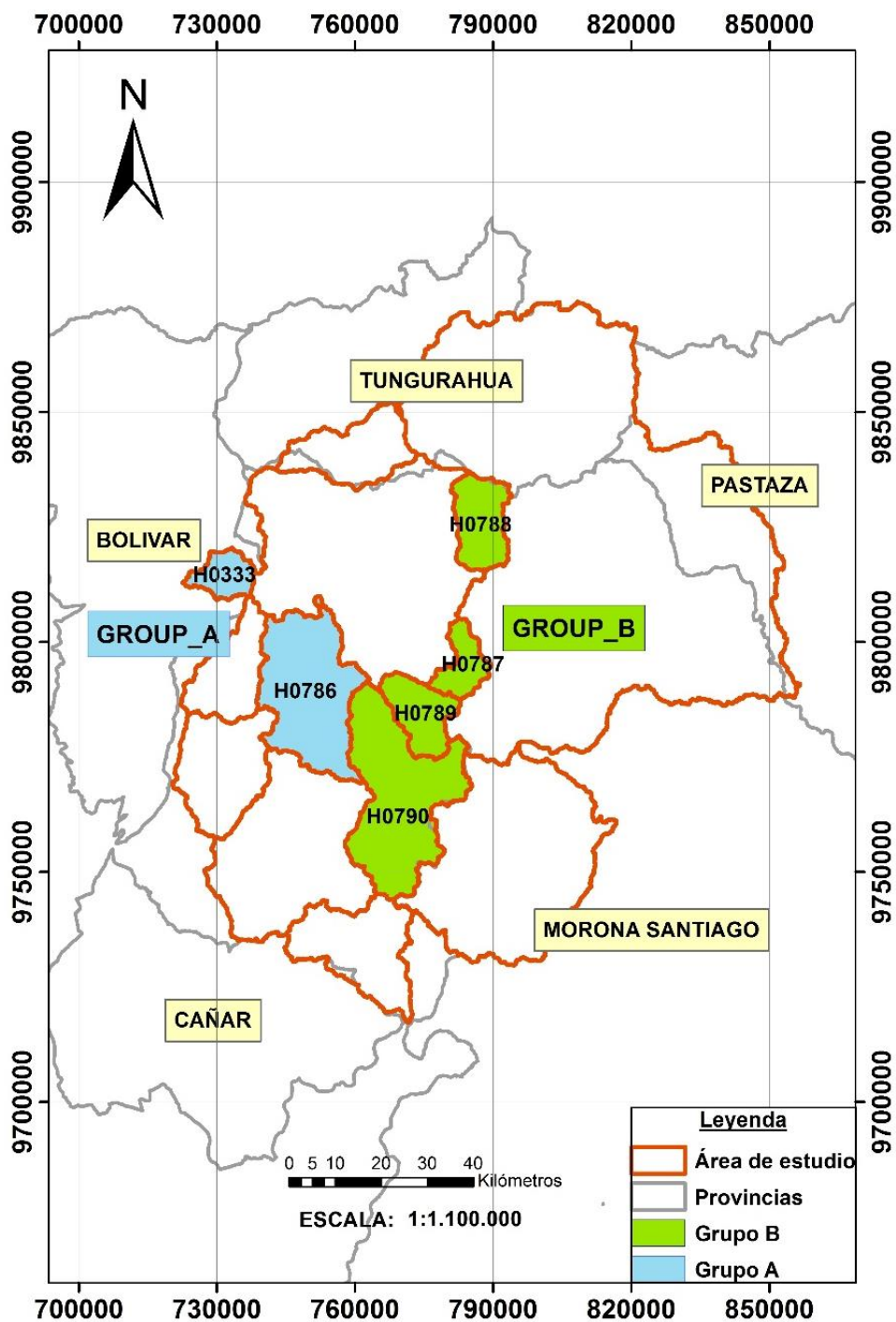
**Tabla 3.2.** Características de las sub-cuencas, rangos de elevación, rango de precipitación, Cobertura vegetal, taxonomía y textura del suelo.

No.	CÓDIGO DE LA ESTACIÓN – PUNTO DE CIERRE	RANGO DE ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	RANGO DE PRECIPITACIÓN MULTI ANUAL (mm)	COBERTURA VEGETAL	TAXONOMÍA	TEXTURA DEL SUELO
1	H0786	2 856 – 4 337	625,2 – 1 121,1	-Bosque -Cuerpos de agua -Tierra Agropecuaria. -Páramo y arbusto -Zona antrópica	-15% Entisol -57% Inceptisol -29% Mollisol -0% No det.	51% Media 38% Fina 10% Moderadamente. Gruesa 2% Gruesa
2	H0333	2 429 – 4 352	998,0 – 1 327,9	-Bosque -Tierra Agropecuaria. -Páramo y arbusto	-4% Entisol -88% Inceptisol -8% Mollisol -0% No det..	57% Media 43% Fina
3	H0787	3 132 – 4 605	832,5 – 1 026,3	-Bosque -Cuerpo de agua -Tierra agropecuaria -Páramo y arbusto	-3% Entisol -60% Inceptisol -13% Mollisol -23% No det	80% Media 20% Moderadamente Gruesa
4	H0788	2 440 – 5 102	964,4 – 1 494,5	-Bosque -Cuerpo de agua -Tierra Agropecuaria. -Páramo	-14% Entisol -68% Inceptisol -0% Mollisol -19% No det	54% Media 41% Fina 5% Gruesa
5	H0789	2 833 – 4 514	744,3 – 926,2	-Bosque -Tierra Agropecuaria -Páramo	-10% Entisol -78% Inceptisol -12% Mollisol -0% No det	51% Media 38% Fina 10% Moderadamente. Gruesa 2% Gruesa
6	H0790	2 862 – 4 591	623,5 – 911,9	-Bosque -Cuerpo de agua -Tierra Agropecuaria. -Páramo y arbusto -Zona Antrópica	-10% Entisol -68% Inceptisol -11% Mollisol -11% No det	49% Media 37% Fina 9% Moderadamente Gruesa 5% Gruesa

Elaboración: Andrade, 2019

Fuente: INAMHI

**Figura 3.5.** Mapa donde se muestra la agrupación de las sub-cuencas seleccionadas, la delimitación de las sub-cuencas y las provincias aledañas a la zona de estudio



Elaboración: Andrade, 2019

### 3.4 DATOS

#### 3.4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Los parámetros necesarios para desarrollar un balance hídrico superficial considerando los criterios del modelo InVEST son, la precipitación total anual, evapotranspiración de referencia anual, profundidad del suelo, coeficiente de cultivo y el Available Water Capacity (awc – capacidad de agua disponible).

**Tabla 3.3.** Información de entrada para el desarrollo del balance superficial

PARÁMETROS	VARIABLE/CONSTANTE	FUENTE
Precipitación	Variable/anual	INAMHI
Evapotranspiración de referencia	Variable/anual	Información satelital MODIS 16A3 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)
AWC (Available Water Capacity)	Constante	MAGAP-MAE Natural resources conservation service
Prof. Suelo	Constante	MAGAP-MAE
Kc	Constante	MAGAP-MAE

Elaboración: Andrade, 2019

En la Tabla 3.3 se observan los parámetros requeridos para el desarrollo del balance, si el parámetro fue variable o constante a lo largo del periodo analizado y la fuente.

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la base de datos de series históricas proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Entre las estaciones meteorológicas de la base de datos, se tiene estaciones activas e inactivas limitando así el uso de la información. La base de datos histórica comprendió un intervalo de tiempo de alrededor 55 años para una parte de las estaciones. Este periodo utilizado desde 1960 hasta 2015 aproximadamente.

**Tabla 3.4.** Estaciones meteorológicas a utilizar para la obtención de las isoyetas.

No.	CODIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN METEOROLÓGICA	COORDENADAS		PROVINCIA
			X	Y	
1	M0008	PUYO	839877	9832769	PASTAZA
2	M0029	BAÑOS	787081	9845684	TUNGURAHUA
3	M0031	CAÑAR	728467	9717724	CAÑAR
4	M0041	SANGAY(P.SANTA ANA)	838207	9812755	MORONA SANTIAGO
5	M0128	PEDRO FERMIN CEVALLOS(COLEGIO)	765155	9850010	TUNGURAHUA
6	M0133	GUASLAN	759976	9809268	CHIMBORAZO
7	M0136	CHUNCHI	730679	9747978	CHIMBORAZO
8	M0258	QUEROCHACA(UTA)	766205	9848380	TUNGURAHUA
9	M0377	TISALEO	759001	9850477	TUNGURAHUA
10	M0378	RIO VERDE	800753	9844593	TUNGURAHUA
11	M0380	HUAMBALO	774894	9846158	TUNGURAHUA
12	M0385	SALINAS-BOLIVAR	720248	9844397	BOLIVAR
13	M0390	URBINA	757532	9835544	TUNGURAHUA
14	M0391	PALLATANGA	725218	9778370	CHIMBORAZO
15	M0392	HUIGRA	724342	9746543	CHIMBORAZO
16	M0393	SAN JUAN-CHIMBORAZO	746383	9819731	CHIMBORAZO
17	M0395	CEBADAS	762207	9788585	CHIMBORAZO
18	M0396	ALAO	779743	9791264	CHIMBORAZO
19	M0397	COMPUD	729185	9740791	CHIMBORAZO
20	M0399	ACHUPALLAS-CHIMBORAZO	747956	9747399	CHIMBORAZO
21	M0402	CHIMBO DJ PANGOR	721733	9785072	CHIMBORAZO
22	M0403	ALAUSI	739284	9756353	CHIMBORAZO
23	M0404	CAÑI-LIMBE	723331	9803688	CHIMBORAZO
24	M0405	GUASUNTOS	743267	9753060	CHIMBORAZO
25	M0407	LICTO	766767	9799887	CHIMBORAZO
26	M0408	GUANO	762867	9821618	CHIMBORAZO
27	M0409	PANGOR-J.DE VELASCO(H.TEPEYAC)	735412	9797407	CHIMBORAZO
28	M0411	INGAPIRCA	736073	9718782	CAÑAR
29	M0535	LAS HERRERIAS	728792	9822024	BOLIVAR
30	M0540	MULTITUD	719360	9765290	CHIMBORAZO
31	M1040	MACAS SAN ISIDRO-PNS	815525	9755027	MORONA SANTIAGO
32	M1107	LAGUACOTO	722452	9821077	BOLIVAR
33	M1209	TOTORILLAS	753131	9776736	CHIMBORAZO
34	M0030	SAN SIMON	722511	9817606	BOLIVAR
35	M0134	GUAMOTE	753762	9785769	CHIMBORAZO
36	M0135	PACHAMAMA-TIXAN	746487	9756834	CHIMBORAZO
37	M0243	PUNGALES	770509	9824467	CHIMBORAZO
38	M0394	CAJABAMBA	748633	9813276	CHIMBORAZO
39	M1130	SHIRY XII	750064	9794992	CHIMBORAZO
40	M1036	RIOBAMBA POLITECNICA	761223	9817103	CHIMBORAZO
41	M1155	LAS MONJAS (CEDEGE)	728795	9825249	BOLIVAR
42	M1260	QUIMIAG	770429	9816691	CHIMBORAZO
43	M1261	ILAPO	769764	9829538	CHIMBORAZO

Elaboración: Andrade, 2019 Fuente: INAMHI

De las 89 estaciones meteorológicas localizadas en la zona de estudio, se utilizó la información de precipitación de 43 de ellas. En la Tabla 3.4 se observan los códigos, nombres de estaciones, coordenadas y provincia en la cual se encuentran ubicadas cada una de las estaciones. Con la información de las estaciones meteorológicas seleccionadas a través del método de interpolación Inverse Distance Weighting por sus siglas en inglés IDW se elaboraron 16 mapas de isoyetas de precipitación anual para un periodo comprendido entre el año 2000 y 2015.

Respecto a los datos de evapotranspiración se utilizaron imágenes MODIS16A3 con una resolución temporal anual y espacial de 500m. Dichas imágenes se descargaron gratuitamente de la Universidad de Montana a través del siguiente link: ([http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG\\_Products/MOD16/](http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/)). Estas imágenes descargadas representan la evapotranspiración de referencia calculada a partir la ecuación de Penman-Monteith la cual recopila datos diarios meteorológicos que combinan con información de sensores remotos de parámetros de las propiedades de la cobertura del suelo, de la vegetación y el albedo (MODIS-NASA, 2019). Estas imágenes cubren un periodo de tiempo entre el año 2000 y 2010.

En cuanto a los atributos biofísicos del suelo, el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), fue determinado en base al uso de suelo, con ayuda de la Biophysical Table (Sharp et al., 2015). Para la profundidad del suelo se utilizó un documento de “Generación de información georreferenciada para el desarrollo Sustentable del Sector Agropecuario - atributos morfo-edafológicos” y la capa de uso del suelo del Ministerio de Agricultura, ganadería, acuicultura y pesca (MAGAP). Respecto a la capacidad de agua disponible, los valores se obtuvieron según la textura del suelo (NRCS, 1998). Para revisar el ajuste del modelo, fueron requeridos datos de caudal anual. Los mismos que se obtuvieron de la base de datos de INAMHI.

En cuanto al desarrollo de la segunda metodología la cual corresponde a la separación del Caudal Base, fue necesario una base de datos de caudal a nivel diario para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2015. Y al igual que para la



obtención de la base de datos de caudal para el balance superficial, para esta segunda metodología, los datos se obtuvieron del INAMHI. Fueron analizadas aproximadamente 60 estaciones hidrológicas (Ver Tabla 3.5) de las cuales se pudo disponer de una serie de datos de 6 estaciones las cuales conforman las estaciones del grupo A y B (Ver Tabla 3.1, Tabla 3.6 y Figura 3.5).

**Tabla 3.5.** Estaciones hidrológicas analizadas para definir la base de datos de caudal para determinar tanto el ajuste del modelo para el balance superficial como para el método de separación del caudal base.

No.	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACION HIDROLÓGICA	COORDENADAS		PROVINCIA
			x	y	
1	H0331	CHIMBO EN SAN LORENZO	721788,00	9815271,00	BOLIVAR
2	H0332	CANAL CHIMBO EN SAN LORENZO	722038,03	9815608,78	BOLIVAR
3	H0333	SAN LORENZO EN SAN LORENZO	722749,00	9813081,00	BOLIVAR
4	H0336	CHIMBO AJ SAN JUAN	720346,24	9794596,94	CHIMBORAZO
5	H0337	PANGOR AJ CHIMBO	722161,00	9786331,00	CHIMBORAZO
6	H0338	CHIMBO DJ PANGOR	721635,00	9786301,00	BOLIVAR
7	H0339	COCO AJ CHIMBO	720362,07	9769219,37	CHIMBORAZO
8	H0375	CHANCHAN DJ HUATAXI	727934,00	9749178,00	CHIMBORAZO
9	H0376	ALAUSSI AJ GUASUNTOS	736241,75	9752424,56	CHIMBORAZO
10	H0377	GUASUNTOS AJ ALAUSSI	736303,12	9752117,22	CHIMBORAZO
11	H0380	SALINAS EN EL PUENTE	720659,75	9828912,61	BOLIVAR
12	H0386	ALAUSSI EN ALAUSSI	739246,95	9757336,18	CHIMBORAZO
13	H0466	SILANTE EN INGAPIRCA	737443,00	9720109,00	CAÑAR
14	H0469	QDA.YURACYACU AJ S.ANTONIO	737509,03	9732082,91	CAÑAR
15	H0470	SAN ANTONIO DJ QDA.YURACYACU	736766,62	9731623,20	CAÑAR
16	H0474	SAN ANTONIO AJ CAÑAR	726526,91	9724480,54	CAÑAR
17	H0475	YANACACHI AJ CAÑAR	720661,37	9728114,67	CAÑAR
18	H0476	CELEL AJ CAÑAR	719418,74	9723661,87	CAÑAR
19	H0781	VERDE AJ PASTAZA	800629,00	9844869,00	TUNGURAHUA
20	H0783	OZOGOCHÉ EN LOS LAGOS	766933,55	9750963,61	CHIMBORAZO
21	H0784	MAHUAZO AJ ALAO	774419,64	9794129,38	CHIMBORAZO
22	H0785	CHIBUNGA EN CALPI	750052,35	9817852,37	CHIMBORAZO
23	H0786	GUAMOTE AJ CEBADAS	763003,00	9792069,00	CHIMBORAZO
24	H0787	ALAO EN HDA.ALAO	776829,03	9792312,78	CHIMBORAZO
25	H0788	PUELA AJ CHAMBO	780994,45	9832690,12	CHIMBORAZO
26	H0789	GUARGUALLA AJ CEBADAS	766422,56	9792692,09	CHIMBORAZO
27	H0790	CEBADAS AJ GUAMOTE	762724,56	9791230,10	CHIMBORAZO
28	H0791	BALSACON EN SAN ANDRES	754673,27	9823993,88	CHIMBORAZO
29	H0798	PASTAZA AJ ENCANTO	814011,51	9841554,63	TUNGURAHUA
30	H0800	PASTAZA EN BAÑOS	786700,48	9845776,21	TUNGURAHUA
31	H0804	CANAL CISNEROS BAJA	769694,08	9850957,02	TUNGURAHUA
32	H0806	CANAL CISNEROS ALTA	769911,65	9852032,38	TUNGURAHUA
33	H0809	CANAL MOCHA HUACHI	761304,53	9842883,52	TUNGURAHUA
34	H0812	ULBA AJ PASTAZA	789420,00	9845678,00	TUNGURAHUA

No.	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACION HIDROLÓGICA	COORDENADAS		PROVINCIA
			x	y	
35	H0813	QDA.CHAHUARYACU	793041,63	9845707,72	TUNGURAHUA
36	H0814	QDA.STA.ROSA AJ PASTAZA	792732,30	9845708,07	TUNGURAHUA
37	H0815	QDA.CHAHUARPATA AJ PASTAZA	795207,03	9845736,02	TUNGURAHUA
38	H0816	CHAMBO DJ GUANO	772751,77	9819300,71	CHIMBORAZO
39	H0825	CHAMBO EN PENIPE	774616,67	9827073,56	CHIMBORAZO
40	H0826	CHAMBO EN HDA.CAHUAJI	777221,38	9838623,72	CHIMBORAZO
41	H0830	CANAL MOCHA-QER-PEL(YANAYACU)	762666,12	9843681,10	TUNGURAHUA
42	H0839	MUYO AJ PASTAZA	789890,16	9849092,07	TUNGURAHUA
43	H0861	MOCHA EN CACAHUANGO	762449,63	9843681,32	TUNGURAHUA
44	H0862	BLANCO AJ COLLANES	778314,95	9816466,46	CHIMBORAZO
45	H0864	COLLANES AJ BLANCO	778594,11	9817111,49	CHIMBORAZO
46	H0867	MOCHA-ATILLO	759509,91	9841994,21	TUNGURAHUA
47	H0869	YANAYACU AJ MOCHA	759390,91	9841370,79	TUNGURAHUA
48	H0870	MOCHA EN MOCHAPATA	758891,08	9841687,56	TUNGURAHUA
49	H0883	TUTANANGOZA EN SUCUA	814029,00	9727254,00	MORONA SANTIAGO
50	H0898	PAUTE DJ PALMIRA	771509,09	9716598,29	AZUAY
51	H0906	JUVAL AJ PAUTE	771543,42	9735221,48	CHIMBORAZO
52	H0910	UPANO DJ SANGAY	813455,86	9762131,42	MORONA SANTIAGO
53	H0911	ABANICO EN PTE.ANGOSTURA	811340,00	9750986,00	MORONA SANTIAGO
54	H0913	PALMIRA AJ PAUTE	773069,38	9724493,38	CHIMBORAZO
55	H1036	AC.OLALLA #2	759480,04	9843039,02	TUNGURAHUA
56	H1037	AC.PINGUILI	759480,38	9843377,03	TUNGURAHUA
57	H1039	AC.OLALLA #1	757223,86	9844454,78	TUNGURAHUA
58	H1040	AC.MOCHA TISALEO CEVALLOS	757779,98	9843901,12	TUNGURAHUA
59	H1057	AC.PACHANLICA	768334,39	9852156,85	TUNGURAHUA
60	H1137	LA UNION	853222,02	9788129,93	PASTAZA

Elaboración: Andrade, 2019

Fuente: INAMHI

**Tabla 3.6.** Estaciones hidrológicas seleccionadas para definir la base de datos de caudal tanto para el balance superficial como para el método de separación de caudal base

No.	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN HIDROLÓGICA	COORDENADAS		PROVINCIA
			X	Y	
1	H0786	Guamote aj Cebadas	763003,00	9792069,00	Chimborazo
2	H0333	San Lorenzo en san Lorenzo	722749,00	9813081,00	Bolívar
3	H0787	Alao en hda. Alao	776829,03	9792312,78	Chimborazo
4	H0788	Puela aj Chambo	780994,45	9832690,12	Chimborazo
5	H0789	Guargualla aj Cebadas	766422,56	9792692,09	Chimborazo
6	H0790	Cebadas aj Guamote	762724,56	9791230,10	Chimborazo

Elaboración: Andrade, 2019

Fuente: INAMHI

### 3.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS

Previo a la utilización de los datos en las metodologías a aplicar fue necesario realizar un análisis estadístico de datos que comprendió, análisis de homogeneidad, calidad y relleno de datos. El objetivo de este análisis fue tener bases de datos homogéneas, de calidad y completas.

Para los parámetros analizados a nivel anual, el análisis de homogeneidad, calidad y relleno de datos fue realizado primero a nivel mensual y posteriormente fueron obtenidos los datos anuales. Para los parámetros analizados a nivel mensual, el análisis de homogeneidad fue realizado a través del software RStudio mediante su paquete RHTestsV3 (Ver Figura 3.6). Este paquete permite el ingreso de datos a nivel diario y mensual. En este caso se realizó el ingreso de la información mensual. RHTestsV3 permite detectar múltiples puntos de cambio (change points) que pueden existir en la serie de datos que representan errores en la serie (Wang y Feng, 2010).

**Figura 3.6.** Pantalla de ingreso de datos a nivel diario o mensual en RHTestsV3

To adjust daily Gaussian data:	
Current Missing Value Code:	-99.9
Current nominal level of confidence (p.lev):	0.95
Segment to which to adjust the series (Iadj):	10000
Current Mq (# of points for evaluating PDF):	10
Current Ny4a (max # of years of data for estimating PDF):	0
Current input Base series filename:	NA
Current input Reference series filename:	NA
Current data directory:	NA
Current output directory:	NA

Fuente: Wang y Feng, 2010.

El análisis de calidad se lo realizó utilizando un script (desarrollado como parte de la investigación) en el software RStudio. En la sección 7 en “Anexos ítem 7.5” se

encuentra el script desarrollado en RStudio para determinar las observaciones atípicas en las series de datos. Este script permitió identificar los outliers o también llamados datos atípicos en las series de datos y el porcentaje de datos faltantes. La guía de prácticas climatológicas de la organización meteorológica mundial - OMM, (2011) recomienda un máximo de datos faltantes del 20% para poder continuar con el análisis. A través de las ecuaciones mostradas a continuación se permite encontrar los outliers a manera de rango. Se determinan los rangos superior e inferior de los cuartiles 75 y 25 respectivamente y el rango intercuartil: (Ver ecuaciones 3.1 y 3.2)

$$P_{out} \geq Q_{75} + 3Q_{IQR} \quad 3.1$$

$$P_{out} \leq Q_{25} + 3Q_{IQR} \quad 3.2$$

Donde:

$P_{out}$ : Punto outlier

$Q_{75}$ : Cuartil 75

$Q_{25}$ : Cuartil 25

$Q_{IQR}$ : Rango intercuartil

Una vez hecho el análisis de calidad de datos se procedió a realizar el relleno de datos faltantes. Este procedimiento se lo realizó a través de una correlación lineal entre datos de dos estaciones meteorológicas con un coeficiente de correlación mayor a 0,7 (OMM, 2011). En donde una de las dos estaciones fue utilizada como estación base la cual tuvo su base de datos completa y la segunda estación es la estación a rellenar su base de datos.

A nivel diario, se procedió a realizar el análisis estadístico de homogeneización utilizando el paquete CLIMATOL del software RStudio. Este permite remover perturbaciones producidas por cambios en las condiciones de observación de los datos (Guijarro, 2016). Además, este paquete permite identificar y eliminar los valores atípicos, es decir, realizar un control de calidad de los datos diarios y realizar un relleno de datos faltantes (Guijarro, 2016). El script desarrollado en el software

RStudio utilizando el paquete CLIMATOL se encuentra detallado en la sección 7 en “Anexos ítem 7.6”.

### **3.5 PROCEDIMIENTO**

A continuación, se detalla el procedimiento que se aplicó para realizar cada una de las metodologías.

#### **3.5.1 ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL**

Se desarrolló un script en el software Rstudio, que, junto con las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2, simula el modelo InVEST para realizar el balance superficial (sección 7 en “Anexos ítem 7.1”). El primer paso fue colocar los datos de entrada en este script. Por lo que es necesario tener toda la información de entrada a manera de matrices. Cada matriz representó un parámetro y con la misma dimensión.

Se ingresaron las matrices de los datos de precipitación, evapotranspiración de referencia, profundidad del suelo, contenido de agua disponible de la planta (PAWC) y uso de la tierra (según el uso del suelo, se estableció la matriz coeficiente de cultivo ( $K_c$ )). Una vez que se ingresaron los datos, se calculó el AWC (capacidad de agua disponible) utilizando la ecuación 2.5 con los datos PAWC y la profundidad del suelo. A través de la ecuación 2.3 se determina la evapotranspiración potencial, multiplicando los valores de evapotranspiración de referencia y  $K_c$ .

A continuación, se asignó el valor del parámetro  $Z$ , de acuerdo con la estacionalidad de datos de precipitación. Con el valor  $Z$  asignado, utilizando la ecuación 2.4 se determinó el valor de  $w$ , que es un valor adimensional que relaciona el agua disponible para la planta y la precipitación en un año. Luego, el valor del índice de aridez, que es la relación entre la evapotranspiración real anual en cada celda (mm/año) (AET) y precipitación, se determinó con la ecuación 2.2. Finalmente, la producción de agua se determinó con la ayuda del índice de aridez y la precipitación utilizando la ecuación 2.1.

En el proceso de calibración, el parámetro más sensible del modelo fue el parámetro Z. Este parámetro se eligió en función de la estacionalidad de las precipitaciones (Gaspari et al., 2015, Sharp et al., 2015). Para las sub-cuencas que pertenecen al Grupo A, se aplicó un valor de Z de 1, mientras que para las sub-cuencas del Grupo B, el valor del parámetro Z fue igual a 30. A continuación se muestra una tabla a manera de resumen de las ecuaciones antes mencionadas (Ver Tabla 3.7).

**Tabla 3.7.** Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas para el balance superficial

No. Ecuación	Ecuaciones a Utilizar	Donde:
2.1	$Y_{(x)} = \left(1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}}\right) \cdot P_{(x)}$	<b>Y<sub>(x)</sub></b> : Producción anual de agua en cada celda (mm / año) <b>AET<sub>(x)</sub></b> : Evapotranspiración real anual en cada celda (mm / año) <b>P<sub>(x)</sub></b> : Precipitación anual en cada celda (mm / año)
2.2	$\frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} = 1 + \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} - \left[1 + \left(\frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}}\right)^w\right]^{1/w}$	<b>PET<sub>(x)</sub></b> : Evapotranspiración anual <b>w<sub>(x)</sub></b> : Parámetro no físico que caracteriza las propiedades naturales del clima-suelo
2.3	$PET_{(x)} = K_{c(x)} * ET_{0(x)}$	<b>ET<sub>0(x)</sub></b> : Evapotranspiración de referencia (MODIS) <b>K<sub>c</sub></b> : Coeficiente de cultivo, que ajusta los valores de ET <sub>0</sub> al tipo de cultivo o vegetación
2.4	$w_{(x)} = Z \frac{AWC_{(x)}}{P_{(x)}} + 1,25$	<b>AWC<sub>(x)</sub></b> : Capacidad de agua disponible (mm) <b>Z</b> : constante empírica, constante de Zhang o factor de estacionalidad que representa la distribución de las precipitaciones a lo largo del año.
2.5	$AWC_{(x)} = PAWC * Soil\ depth$	La capacidad de agua disponible es el resultado del producto entre la profundidad mínima de las raíces (soil depth) y el contenido de agua disponible de la planta (PAWC).

Elaboración: Andrade, 2019

### 3.5.2 SEPARACIÓN DE HIDROGRAMAS

El software utilizado para el desarrollo de esta metodología fue el Ground Water Toolbox (GW [toolbox] por sus siglas en inglés). GW (Toolbox) fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S Geological Survey (USGS)) para la estimación de caudal base. Este software utiliza las ecuaciones expresadas en la sección de Marco Teórico y resumidas en la Tabla 3.8.

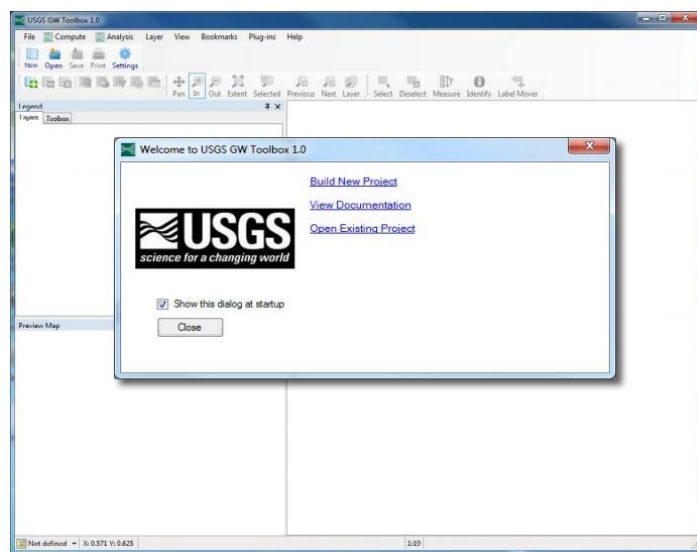
**Tabla 3.8.** Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas por el software GW (Toolbox) para la separación de caudal base

No. Ecuación	Ecuación	Donde:
(2.6)	$N = 0,83A^{0,2}$	N: Duración del intervalo de tiempo (es constante para todos los flujos) (en días) A: Superficie de drenaje (km <sup>2</sup> ).
(2.7)	$q_{b(i)} = \frac{(1 - BFI_{máx})\alpha q_{b(i-1)} + (1 - \alpha)BFI_{máx}q_i}{1 - \alpha BFI_{máx}}$	BFI máx.: Índice de flujo base $\alpha$ : coeficiente de recesión $q_i$ : Flujo del hidrograma en el tiempo i $q_b$ : Flujo base en el tiempo i
(2.8)	$U_{(i)} = Q_{i-1} + \frac{(1 - \alpha)}{2}(Q_i - Q_{i-1})$	$U_{(i)}$ : flujo base en el tiempo i $Q_{(i)}$ : Flujo observado en el tiempo i $\alpha$ : coeficiente de recesión

Elaboración: Andrade, 2019

En la Figura 3.7 se puede apreciar la bienvenida a los cuadros de diálogo de la caja de herramientas de USGS que aparecen en el primer uso de la caja de herramientas de aguas subterráneas.

**Figura 3.7.** Pantalla del cuadro de dialogo que aparece en el primer uso del GW (Toolbox)



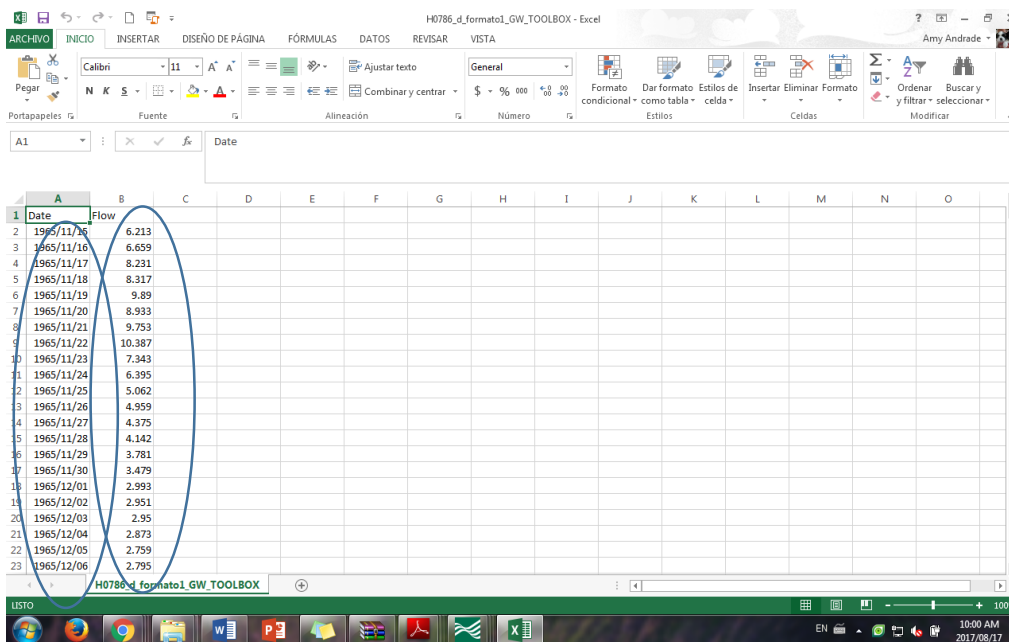
Fuente: Barlow et al., 2015

Los datos necesarios para la aplicación de los métodos son, los caudales observados para cada sub-cuenca para el periodo requerido, es decir, del año 2000 al 2015, áreas de drenaje superficial en km<sup>2</sup> para cada sub-cuenca, el valor del coeficiente de recesión, y el índice de caudal base (por sus siglas en inglés (BFI)) según las condiciones de la corriente y el acuífero. A continuación, se hace una breve descripción del uso del software GW Toolbox. Sin embargo, si se desea un conocimiento más amplio acerca el uso de esta herramienta, se puede acudir a la guía de usuario en la siguiente fuente: Barlow et al., (2015), en el siguiente link: <https://pubs.usgs.gov/tm/03/b10/pdf/tm3-b10.pdf>

En un archivo de .csv se prepara la información para el ingreso de datos. Esta información se encuentra a manera de tabla. La misma está compuesta de dos columnas. En la primera columna debe constar la fecha como año, mes, día (aaaa/mm/dd) y en la segunda columna el valor del parámetro que en este caso son los valores diarios de caudal. El formato para el ingreso de datos al software es el que se muestra a continuación (Figura 3.8):



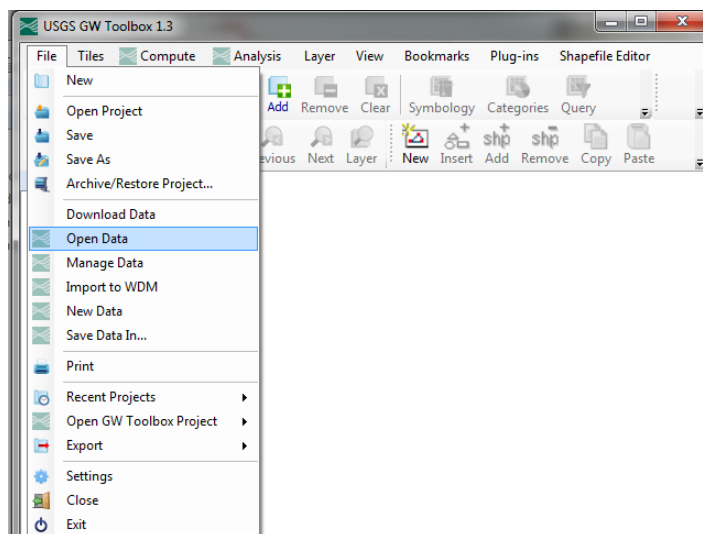
**Figura 3.8.** Ejemplo del formato para ingreso de datos al GW Toolbox.



Elaboración: Andrade, 2019

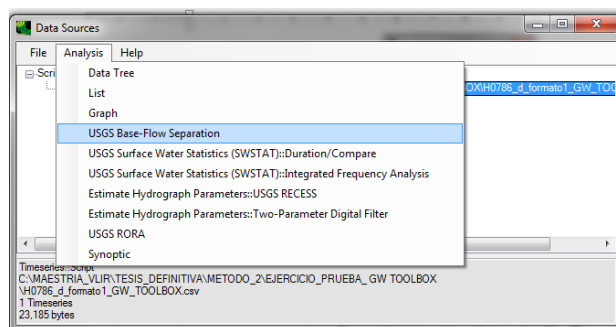
Una vez preparado este archivo en formato .csv, se debe realizar la importación del mismo a GW Toolbox (Ver Figura 3.9). Una vez importados los datos al software, el mismo reconocerá la información y se procederá a realizar la separación de caudal base. En el programa GW Toolbox se selecciona la opción USGS Base Flow Separation (Ver Figura 3.10).

**Figura 3.9.** Cuadro de dialogo de la importación de datos en GW Toolbox



Fuente: Barlow et al., 2015

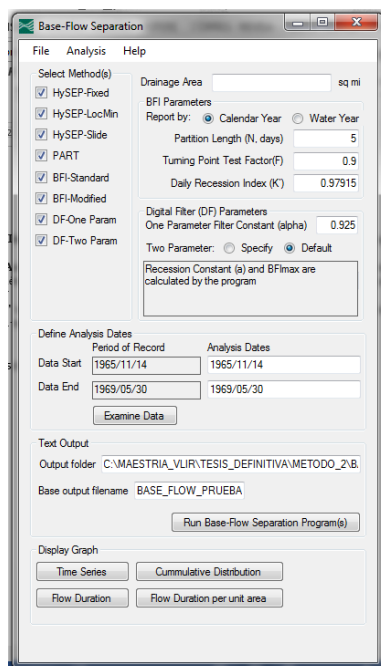
**Figura 3.10.** Cuadro de diálogo en GW Toolbox de selección de Separación de caudal base.



Fuente: Barlow et al., 2015

El cuadro de diálogo mostrado en la Figura 3.11 se puede seleccionar los métodos por los cuales el programa realizará la separación de los hidrogramas, el área de drenaje, para el bloque de BFI PARAMETERS, la constante N, el factor F, el índice diario de recesión  $K'$ , para el bloque de DIGITAL FILTER (DF) PARAMETERS,  $\alpha$  la constante de recesión y el índice BFI Máx., para el bloque de DEFINICION DE LAS FECHAS DE ANALISIS, el periodo de análisis y la carpeta donde se almacenarán los resultados. Por ejemplo: "EJERCICIO\_PRUEBA\_GW TOOLBOX".

**Figura 3.11.** Cuadro de diálogo en GW Toolbox para la selección de métodos para la separación de caudal base.



Fuente: Barlow et al., 2015

En cuanto al índice BFI se tienen los siguientes valores tanto para un parámetro como para dos parámetros. Para  $\alpha$  el cual es el parámetro de filtro o también denominado coeficiente de recesión, según Nathan y McMahon, (1990) el valor más adecuado es de 0,925.

De acuerdo a las características de la corriente y el acuífero, los valores de BFI son los siguientes (Ver Tabla 3.9):

**Tabla 3.9.** Valores de BFI según las características de la corriente y del acuífero

BFI máx.	Características	
	Corriente	Acuífero
0.8	Perenne	Poroso
0.5	Efímera	Poroso
0.25	Perenne	Roca dura

Fuente: Eckhardt, K. (2005).

Elaboración: Andrade, 2019

### 3.5.3 MODELO GR2M

El propósito del modelo GR2M es reconstruir valores de caudales a partir de ciertos parámetros como la precipitación y la evapotranspiración. Para la aplicación de esta metodología se utilizó la hoja de cálculo desarrollada en Excel por Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Antony, ahora denominada Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Medioambiente y la Agricultura (IRSTEA). A continuación se muestra en la Figura 3.12 una captura de pantalla de la hoja de cálculo.

**Figura 3.12.** Captura de pantalla de la hoja de cálculo utilizada para la aplicación del modelo GR2M desarrollada por IRSTEA.

Paramètre	Valeur
Nom du bassin (Nombre de la cuenca)	H0333
Superficie du bassin (km²) (Superficie de la cuenca)	107.45
Paramètres modèle (Parametros del modelo)	Transf.
x1 Capacité rés. production (mm) Capacité del reservorio de producción	3.88
x2 Paramètre d'échange (mm) Paramètre de intercambio subterráneo	9.01
Valores initiales (Valores iniciales)	
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm) (Nivel de almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis)	24.11
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm) (Nivel de almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de analisis)	60
Période (Periodo)	
Longueur de la période de mise en route (mois) Duración del periodo (meses)	12
Durée de la période test (mois) Duración del periodo de prueba (meses)	119
Date de départ (Fecha de Salida)	01/2001
Date de fin (Fecha final)	12/2010
Moyenne des pluies observées (mm/mois) (Precipitación media observada) (mm/mes)	70.2
Moyenne des ETP observées (mm/mois) (Evapotranspiration media observada) (mm/mes)	129.5
Moyenne des débits observés (mm/mois) (Caudales promedio Observados) (mm/mes)	613.9

Fuente: Perrin et al., 2003; Mouelhi et al., 2006

**Tabla 3.10.** Tabla resumen de las ecuaciones planteadas en el Capítulo 2 utilizadas en la hoja de cálculo desarrollada por IRSTEA para el desarrollo del modelo GR2M

No. Ecuación	Ecuación	Donde:
(2.9)	$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}$	S: Volumen inicial de agua en el reservorio suelo S <sub>1</sub> : Nuevo volumen de agua en el reservorio suelo X <sub>1</sub> : Capacidad de reservorio suelo
(2.10)	$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$	P: Precipitación X <sub>1</sub> : Capacidad del reservorio suelo
(2.11)	$P = P_1 + S_1 - S$	P: Precipitación P <sub>1</sub> : Parte de la precipitación que se dirige al reservorio de agua gravitacional S <sub>1</sub> : Nuevo volumen de agua en el reservorio suelo S: Volumen inicial del reservorio suelo
(2.12)	$P_1 = P + S - S_1$	P: Precipitación P <sub>1</sub> : Parte de la precipitación que se dirige al reservorio de agua gravitacional S <sub>1</sub> : Nuevo volumen de agua en el reservorio suelo S: Volumen inicial del reservorio suelo
(2.13)	$S_2 = \frac{S_1(1 - \Psi)}{1 + \Psi\left(1 - \frac{S}{X_1}\right)}$	S <sub>2</sub> : Nuevo volumen de agua en el reservorio suelo, afectado por la evapotranspiración.

No. Ecuación	Ecuación	Donde:
(2.14)	$\Psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$	E es la evapotranspiración
(2.15)	$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}}$	S: Volumen inicial para una nueva fase de análisis
(2.16)	$P_2 = S_2 - S$	P <sub>2</sub> : Cantidad de agua que percola a través del reservorio suelo
(2.17)	$P_3 = P_1 + P_2$	P <sub>3</sub> : Precipitación efectiva
(2.18)	$R_1 = R + P_3$	R <sub>1</sub> : Nuevo volumen del reservorio de agua gravitacional R: Volumen inicial del reservorio de agua gravitacional
(2.19)	$R_2 = X_2 R_1$	X <sub>2</sub> es el coeficiente adimensional de intercambios subterráneos. Factor de corrección el cual corrige el volumen del reservorio de agua gravitacional debido al intercambio de volúmenes a nivel sub-superficial R <sub>2</sub> : Volumen corregido del reservorio de agua gravitacional
(2.20)	$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$	Q: Caudal de salida cuando el reservorio de agua gravitacional se vacía

Elaboración: Andrade, 2019

Los datos de entrada en la hoja de cálculo son los siguientes: nombre de la cuenca, superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>, los valores de los parámetros del modelo, es decir, X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>, los valores iniciales de los niveles de almacenamiento, tanto del reservorio suelo como del reservorio de agua gravitacional. Para ambos casos la hoja de cálculo recomienda usar valores máximos. A continuación, se especifica la duración del periodo de análisis en meses, la fecha de inicio y la fecha final.

El modelo GR2M se desarrolló utilizando las ecuaciones planteadas en la sección de Marco Teórico y resumidas en la Tabla 3.10. La hoja de cálculo evalúa además el valor de Nash como criterio de eficacia. En cuanto a la base de datos a ingresar en la hoja, los datos se ordenan en cuatro columnas. En la primera columna se coloca la fecha, en la segunda columna la precipitación en mm, en la tercera columna la evapotranspiración en mm y en la cuarta columna los valores de caudal en mm los cuales son de utilidad para determinar el ajuste del modelo.

## **CAPÍTULO 4.**

### **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

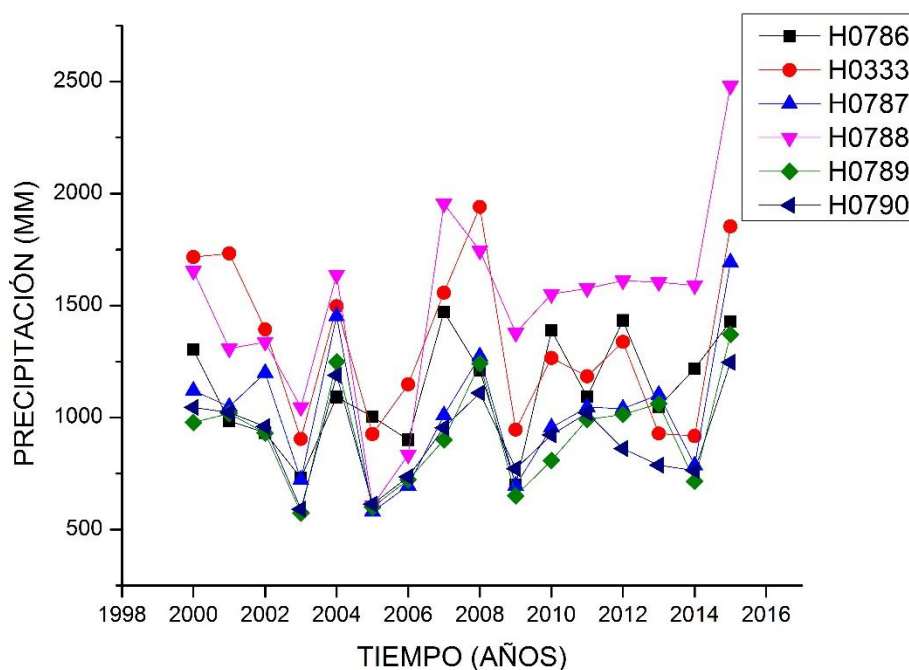
#### **4.1 RESULTADOS**

##### **4.1.1 BALANCE SUPERFICIAL**

Se analizaron los parámetros de ingreso al modelo, como la precipitación, evapotranspiración, coeficiente de cultivo, profundidad del suelo, y la capacidad disponible del agua. En la Figura 4.1 se evidencian los valores máximos de precipitación anuales para las sub-cuencas de los grupos A y B. En la Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestra la distribución espacio temporal de la precipitación para los años 2000 al 2007 y 2008 al 2015 respectivamente. Para todo el periodo de análisis, es decir, del año 2000 al 2015 la precipitación media anual está distribuida entre 300 mm/año y 5 000 mm/año aproximadamente. A excepción del periodo comprendido entre el año 2005 y 2009 en el que la precipitación disminuye a un rango entre 399 mm/año y 3 500 mm/año. Los picos de precipitación se produjeron en los años 2004, 2008 y 2015.

En todo el periodo de análisis (desde el año 2000-2015) se evidenció que las zonas donde la precipitación es mayor son las que se ubican al oriente de la zona de estudio, más específicamente al nororiente de la zona de estudio, es decir, hacia la zona de la provincia de Pastaza. Los valores de precipitación para esta zona están entre 2 000 mm/año y 5 000 mm/año desde el año 2000 al 2004 y del año 2010 al año 2015. Desde el año 2005 al 2009 se evidencia una disminución de la precipitación hasta alcanzar valores de hasta 3 000 mm/año. Las zonas con menor precipitación se encuentran en Alausí con valores entre 300 mm/año y 500 mm/año. En Riobamba y Guano los valores de precipitaciones oscilan entre 500 mm/año y 700 mm/año para los años 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, y 2014. Para los años faltantes en el periodo estudiado, es decir, 2004 y 2015 la precipitación alcanza valores de 1 200 mm/año y 1 500 mm/año.

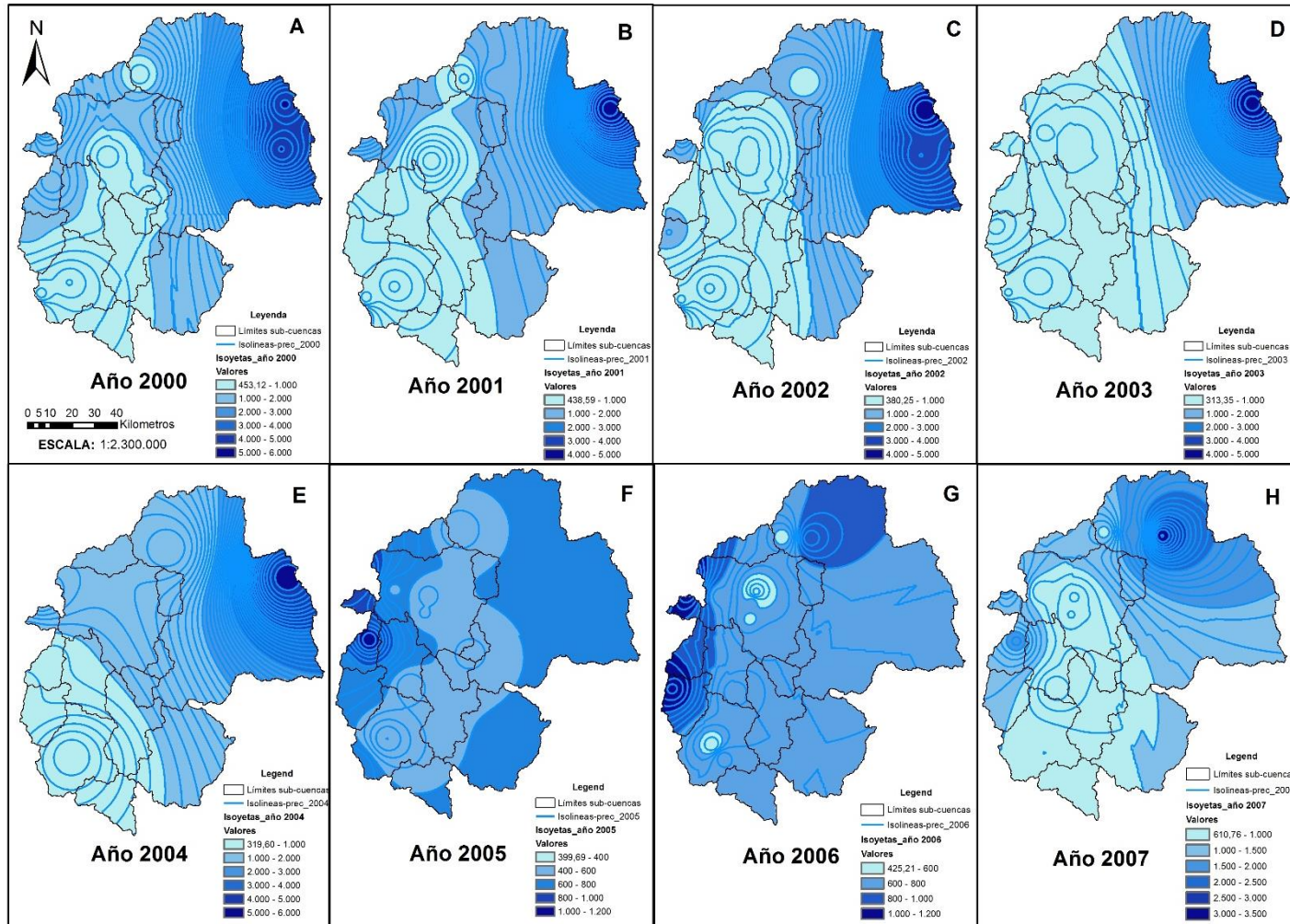
**Figura 4.1.** Valores de precipitación máximos anuales para las sub-cuencas de los grupos A y B.



Elaboración: Andrade, 2019

En base a la información de precipitación de las estaciones meteorológicas seleccionadas, en la sección “7.1 Anexos” se muestran los datos anuales de precipitación en mm para el periodo de análisis, es decir, del año 2000 al 2015. Esta tabla se muestran los valores de precipitación resultado del tratamiento estadístico de datos (el análisis se encuentra en la sección 3.4.2 Tratamiento de datos) aplicado a la información de las estaciones meteorológicas proporcionadas por el INAMHI. Existen estaciones como la M0133, M0396, M0395, M0380, M0385, M1155, M0409, M0402, M0391, M1107, M0405, M0136, M0397, M0041 y M0008 para las cuales se logró tener valores de precipitación para el periodo de análisis completo, sin embargo, para las estaciones M0134, M0135, M0243, M0394, M1260 y M1261 la información disponible entregada permitió tener datos para dos o tres años máximo. En base a los datos de esta tabla fueron elaborados mapas de isoyetas (Ver Figura 4.2), que luego se usaron como datos de entrada para la aplicación del balance superficial.

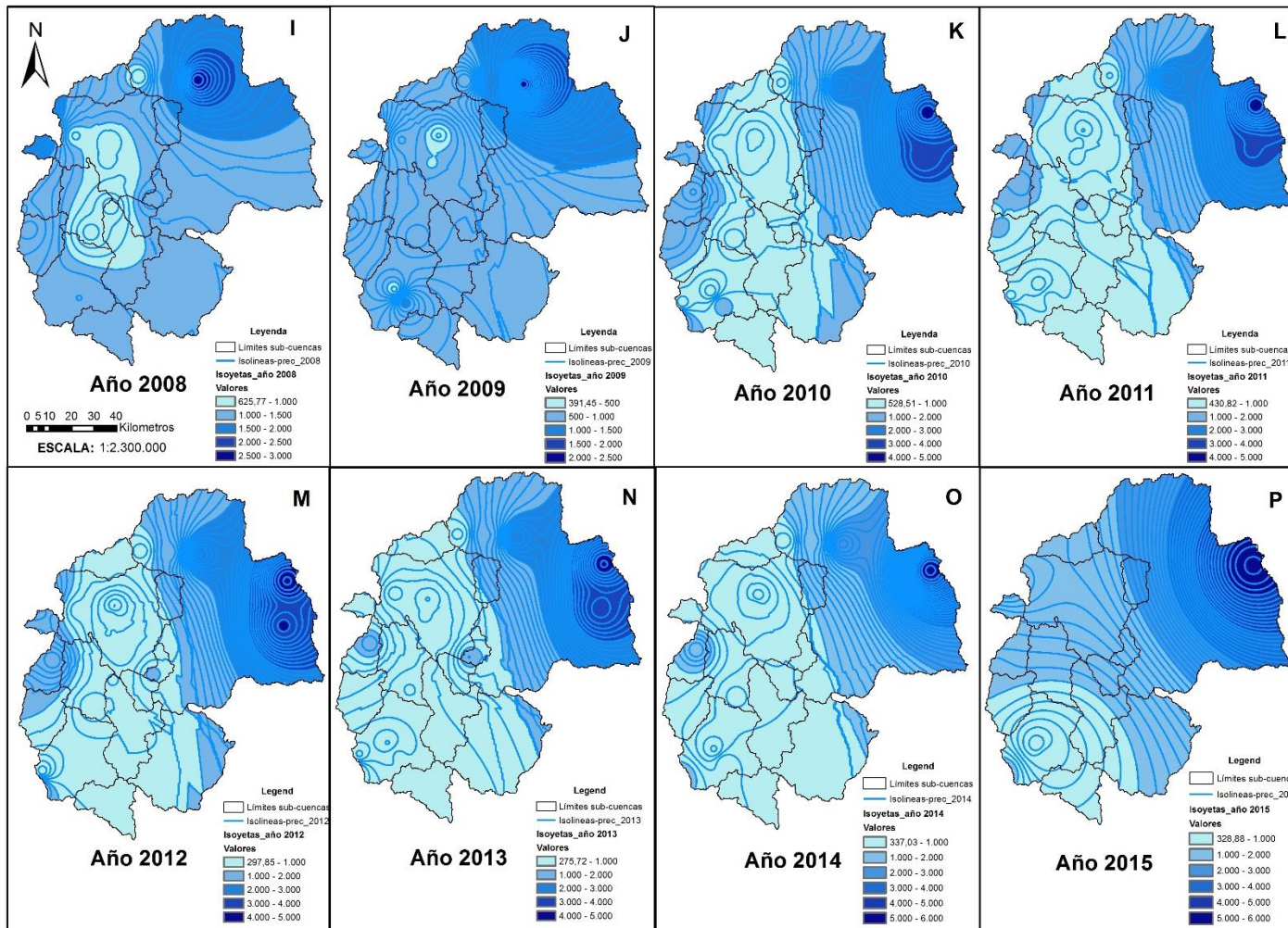
**Figura 4.2.** Mapa de isoyetas donde se muestra una distribución espacio temporal de la lluvia para los años del 2000 al 2007



Elaboración: Andrade, 2019



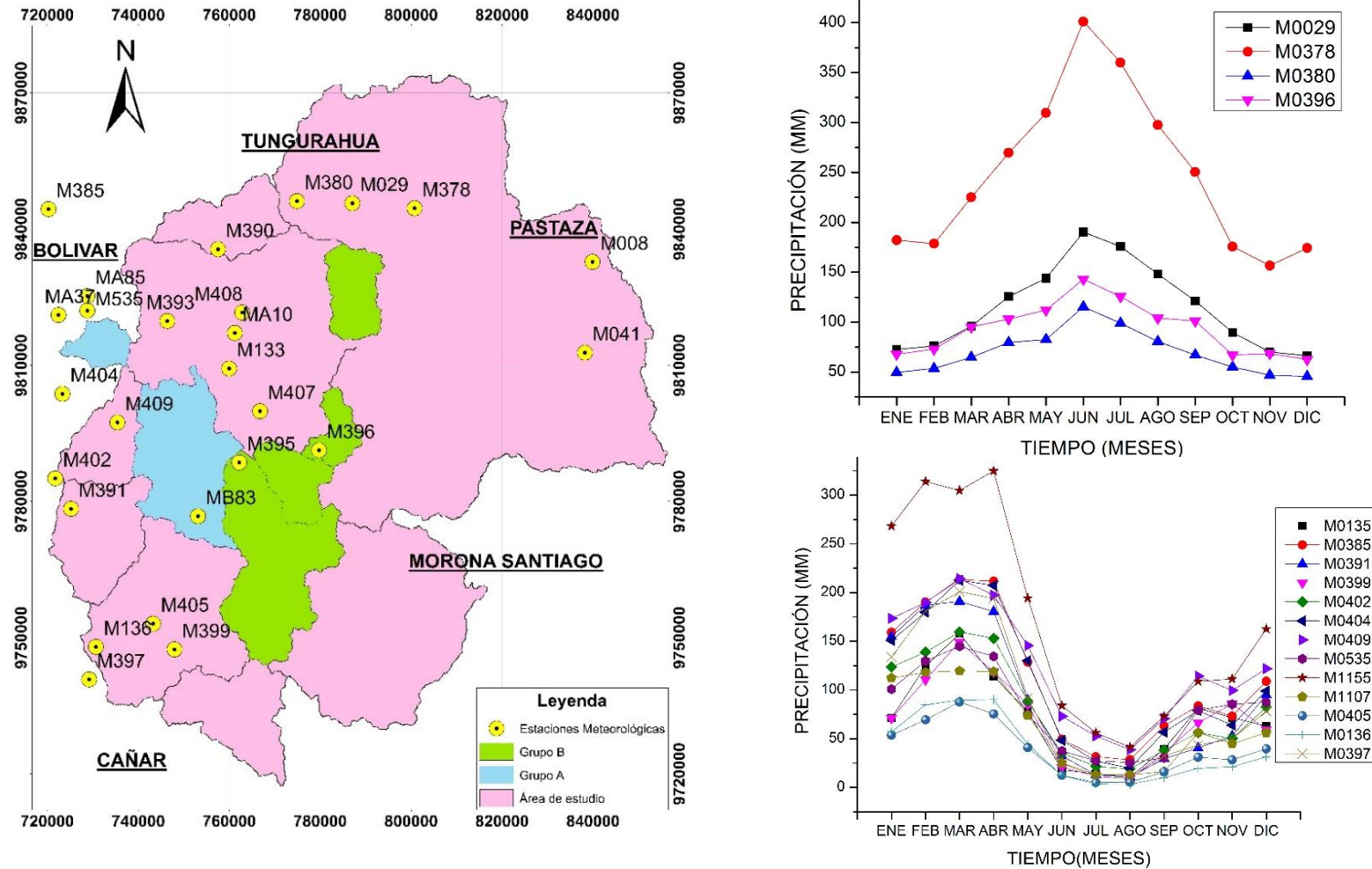
**Figura 4.3.** Mapa de isoyetas donde se muestra una distribución espacio temporal de la lluvia para los años del 2008 al 2015



Elaboración: Andrade, 2019

Se procedió a realizar un análisis de precipitación a través de gráficas precipitación vs tiempo con series de datos promedios mensuales de precipitación multianual de enero a diciembre. Al graficar los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas, se observaron regímenes de precipitación unimodal y bimodal. En la Figura 4.4a) se puede observar la ubicación de las estaciones meteorológicas en toda el área de estudio, en la Figura 4.4b) y Figura 4.4c) se muestra la precipitación mensual para cada estación meteorológica existente en el área de estudio. En la Figura 4.4b) se observa el régimen unimodal de precipitación el cual es propio de la región Oriental o Amazónica el que presenta un pico máximo de precipitación entre junio y agosto y un periodo de mínimas precipitaciones entre los meses de noviembre y febrero. Mientras que en la Figura 4.4c) se observa el régimen bimodal es propio de la región Sierra presentando dos picos máximos de precipitación, la época lluviosa se presenta entre los meses de febrero - mayo y octubre – diciembre y uno mínimo o época seca de junio a septiembre. Todas las estaciones meteorológicas de la Figura 4.4c) se encuentran ubicadas al lado occidental del área de estudio, mientras que para la Figura 4.4b) las estaciones M380, M029, M378 ubicadas en la provincia de Pastaza (Región Oriental o Amazónica) y la estación M396 está ubicada en la provincia de Chimborazo (Región Sierra).

**Figura 4.4.** Mapa de la zona de estudio y del análisis de las series temporales de Precipitación. a) Localización de las estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio, b) Gráfica precipitación vs. tiempo - régimen de precipitación unimodal y c) Gráfica precipitación vs. tiempo – régimen de precipitación bimodal.

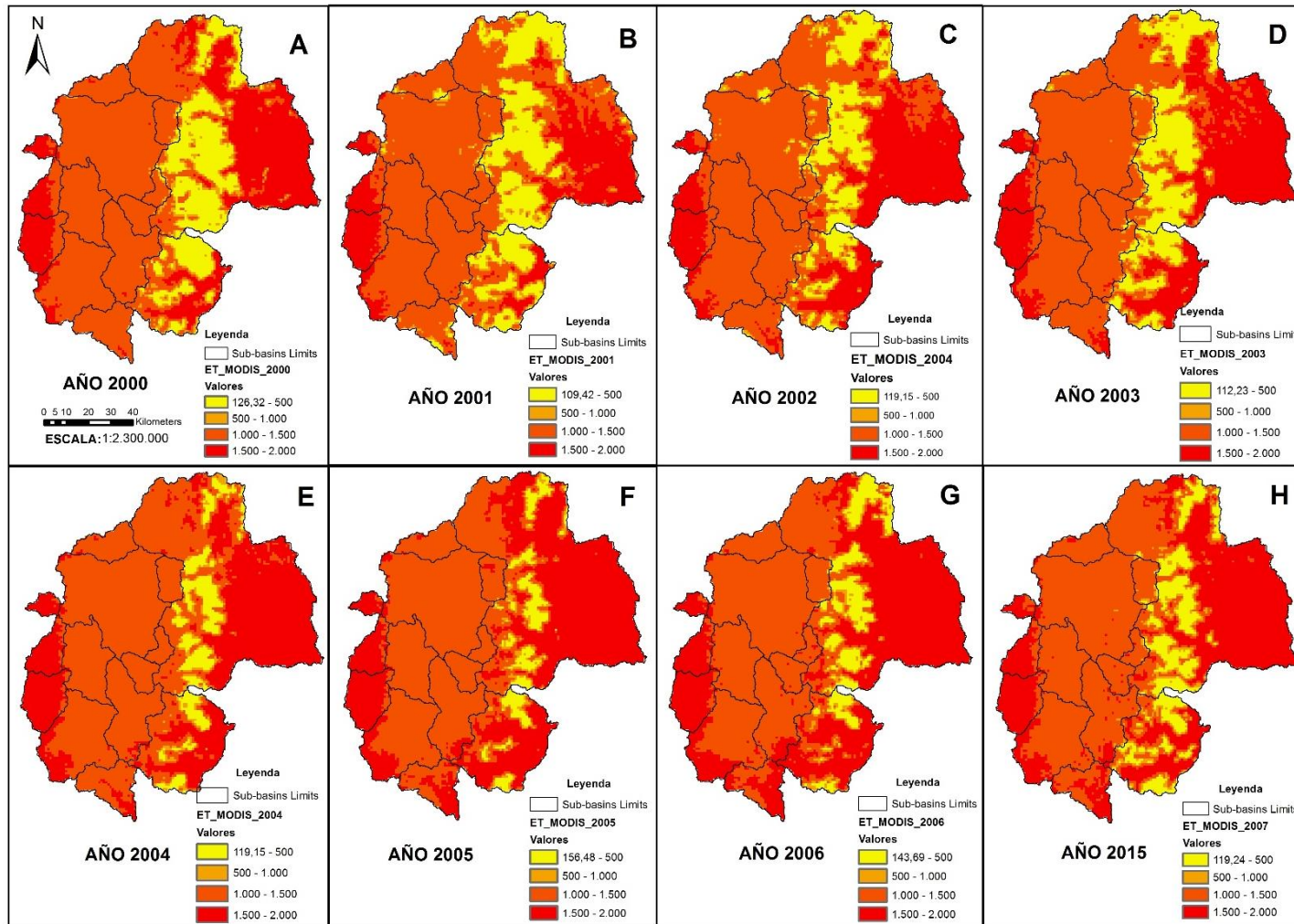


Elaboración: Andrade, 2019

Para las estaciones con régimen unimodal (Figura 4.4b) para la estación M0378 que es la más alejada, ubicada hacia la parte oriental, la precipitación multianual para el mes de junio alcanza aproximadamente los 401 mm/mes y valores mínimos de 46 mm para el mes de diciembre. En el periodo lluvioso, para las estaciones con régimen bimodal (Figura 4.4c) la precipitación multianual para el mes de abril alcanza valores hasta aproximadamente los 325 mm/mes. En cuanto a los valores mínimos para la misma figura la precipitación se encuentra en 3,2 mm en el mes de agosto. De acuerdo a la distribución de la precipitación el año más seco fue el 2005(Figura 4.2F) y el más húmedo el año 2000 (Figura 4.2A). En el año más seco los valores de precipitación son menores a 1 000 mm/año en más de 90% del área de estudio hasta 2 000 mm/año presentes en el 10% del área restante, registrándose las precipitaciones más bajas en la zona sur oeste con valores en un rango entre 300 mm/año y 500 mm/año centro norte con valores de precipitación entre 500 mm/año y 700 mm/año. Y finalmente para el año húmedo las precipitaciones anuales superan los 5 000 mm/año en la parte oriental del área de estudio.

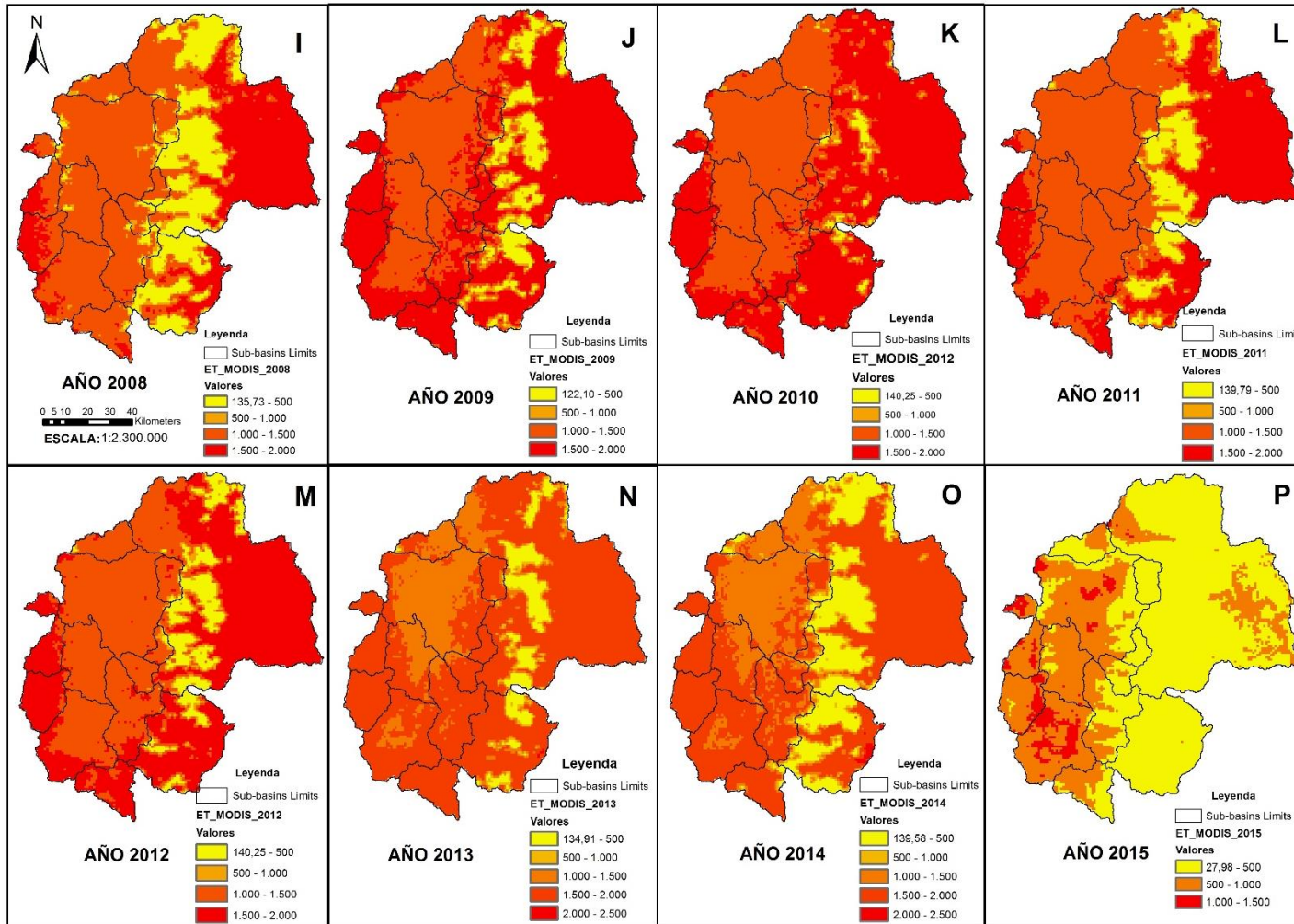
La evapotranspiración media anual tomada de las imágenes MODIS considera valores entre 100 mm/año y 2 000 mm/año para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2012 (Ver Figura 4.5 y Figura 4.6). Mientras que para los años 2013 y 2014 la evapotranspiración aumenta hasta alcanzar valores de 2 500 mm/año. Y finalmente para el año 2015 la evapotranspiración disminuye hasta 1 500 mm/año. Para todo este periodo la mayor evapotranspiración se produce en los extremos de la zona oriental y occidental del área de estudio, alcanzando valores entre 1 500 mm/año y 2 000 mm/año. En la zona de la cuenca del río Chambo, la evapotranspiración se encuentra mayormente entre 1 000 mm/año y 1 500 mm/año. En la franja centro oriental ubicada entre 780000 y 820000 de longitud, ubicada a lo largo de todo el límite entre la cuenca del Río Chambo y la provincias orientales de la zona de estudio, es decir, Pastaza y Morona Santiago, los valores de evapotranspiración se encuentran entre 100 mm/año y 500 mm/año.

**Figura 4.5.** Mapa de evapotranspiración referencial MODIS donde se muestra una distribución espacio temporal de la evapotranspiración para los años del 2000 al 2007



Elaboración: Andrade, 2019

**Figura 4.6.** Mapa de evapotranspiración referencial MODIS donde se muestra una distribución espacio temporal de la evapotranspiración para los años del 2008 al 2015



Elaboración: Andrade, 2019

En cuanto a los atributos biofísicos del suelo, los valores usados de Kc, fueron determinados en base al uso de suelo, usando la Biophysical Table (Buytaert, 2006; González, 2016.). Los valores usados se muestran en la Tabla 4.1 y espacialmente se visualizan en la Figura 4.7. Para la profundidad del suelo se utilizó un documento creado en el año 2010 de “Generación de información georreferenciada para el desarrollo Sustentable del Sector Agropecuario - atributos morfo-edafológicos” y la capa de uso del suelo del Ministerio de Agricultura, ganadería, acuicultura y pesca (MAGAP) (Ver Figura 4.7 y Tabla 4.2). Según esto, la profundidad de suelo está entre 100 mm y 1 000 mm.

**Tabla 4.1.** Tabla de Uso del suelo / Cobertura del suelo y coeficiente de cultivo utilizado en el modelo InVEST para el desarrollo del balance superficial

Uso del suelo/Cobertura de suelo	Código Uso de suelo	Kc – coeficiente de cultivo
Residencial	10	0,7
Fuentes de Agua	33	1,05
Nieve	40	0,7
Bosque mixto	54	1
Granos	71	1,1
Doble cultivo – mosaico agropecuario	74	1,1
Cultivos de campo	82	1,1
Pasto	85	1,0
Arbusto Natural	87	0,42
Sin cobertura vegetal	88	0,8

Elaborado por: Andrade, 2019

Fuente: Sharp et al., 2015

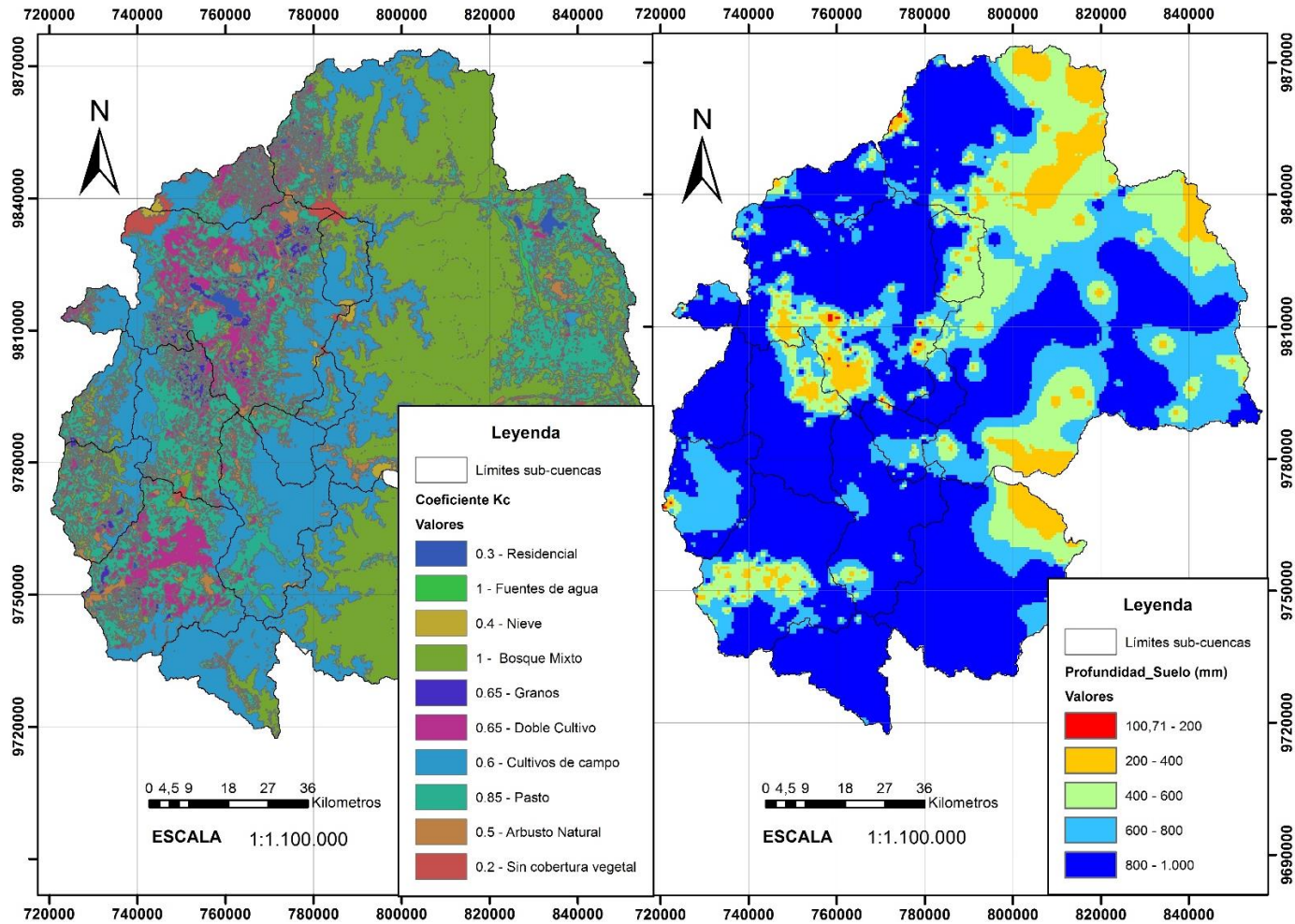
La capacidad de agua disponible, los valores se obtuvieron determinando en primera instancia el PAWC según la textura del suelo (NRCS, 1998) (Ver Tabla 2.1). Con los valores de PAWC, se determina el AWC al ser multiplicados por la profundidad del suelo (Sharp et al., 2015) (Ver Tabla 4.2).

**Tabla 4.2.** Tabla de profundidad de suelo para el desarrollo del balance superficial

PROFUNDIDAD (mm)			
1	s	superficial	0 – 200
2	pp	poco profundo	200 – 500
3	m	moderadamente profundo	500 – 1000
4	p	profundo	> 1000

Fuente y Elaboración: Ministerio de Agricultura, ganadería, acuicultura y pesca, (2010).

**Figura 4.7.** Mapa de a) los valores de Kc donde se muestra una distribución espacial del coeficiente de cultivo en la zona de estudio, b) profundidad del suelo en mm.



a) Coeficiente de cultivo – Kc

b) Profundidad del suelo (mm)

Elaboración: Andrade, 2019



De una forma preliminar, las zonas potenciales de recarga y de déficit hídrico fueron determinadas a partir de la comparación entre dos variables como fueron la precipitación y la evapotranspiración potencial. En la Figura 4.9 y Figura 4.10 se muestran los mapas donde se indican estas zonas potenciales para los años 2000 al 2007 y 2008 al 2015 respectivamente. Las zonas potenciales de recarga son aquellas donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial y se encuentran representados por los valores positivos en los mapas. Mientras que, las zonas de déficit de agua son aquellas donde la precipitación es menor que la evapotranspiración y se encuentran representadas en los mapas mediante los valores negativos.

Las zonas potenciales de recarga se ubicaron al noreste de la zona de estudio, en la provincia de Pastaza. En esta provincia la precipitación anual alcanza valores de 5 000 mm/año aproximadamente (Ver Figura 4.2) y la evapotranspiración valores entre 126 mm/año y 2 000 mm/año (Ver Figura 4.5). Las zonas de déficit están hacia la parte sur oeste del área de estudio, cerca de Alausí en donde los valores de precipitación están entre 438 mm/año aprox. y 500 mm/año (Ver Figura 4.2) y valores de evapotranspiración para la misma zona entre 1 000mm/año y 1 500 mm/año. En la parte central de la zona, en las áreas cercanas a los volcanes, los valores de precipitación bordean los 1 000 mm/año y 1 200 mm/año. Por lo que se puede concluir que, las zonas potenciales de recarga se encuentran en las subcuencas de la parte oriental y en ciertas áreas de la parte central de la zona de estudio (en las cercanías de los volcanes Tungurahua, Altar, Chimborazo e Iguazata). En la Figura 4.9 se evidencia que a diferencia del año 2000 para el año 2001 las zonas potenciales de recarga aumentaron en la parte central de la zona de estudio, ubicada entre 780000 y 800000 de longitud, pasando de valores negativos es decir, de déficit, a valores positivos comprendidos en un rango entre 0 mm/año y 1 000 mm/año. Sin embargo, en el área que comprende la región amazónica, las zonas de potencial recarga disminuyeron.

Al analizar las zonas de potencial recarga y las zonas de déficit para los años 2002 al 2015 se puede apreciar que, al igual que para los años 2000 y 2001, las zonas de mayor recarga se encuentran en la parte oriental de la zona de estudio. Esta zona se encuentra el nororiente de la zona de estudio en la provincia de Pastaza. Mientras que las zonas de déficit se ubicaron generalmente en la cuenca del río Chambo a excepción de ciertas zonas muy específicas como son las elevaciones montañosas más representativas de la zona de estudio, como el volcán Chimborazo, Igualata, Tungurahua y Altar. Una vez aplicado el modelo InVEST y las ecuaciones de Budyko, se revisó el ajuste del modelo (Ver Figura 4.11) a través de los valores de Q observados expresados en unidades de lámina de agua (mm/año) (Tabla 4.3). Los valores de caudal mostrados en la Tabla 4.3 fueron obtenidos de la base de datos del INAMHI. Esta información fue sometida a un tratamiento estadístico con el objetivo de contar con una base de datos confiables. Los datos fueron tratados a nivel mensual con la metodología planteada en la sección “3.4.2 Tratamiento de datos” y posterior a ello se determinaron los valores con una temporalidad anual.

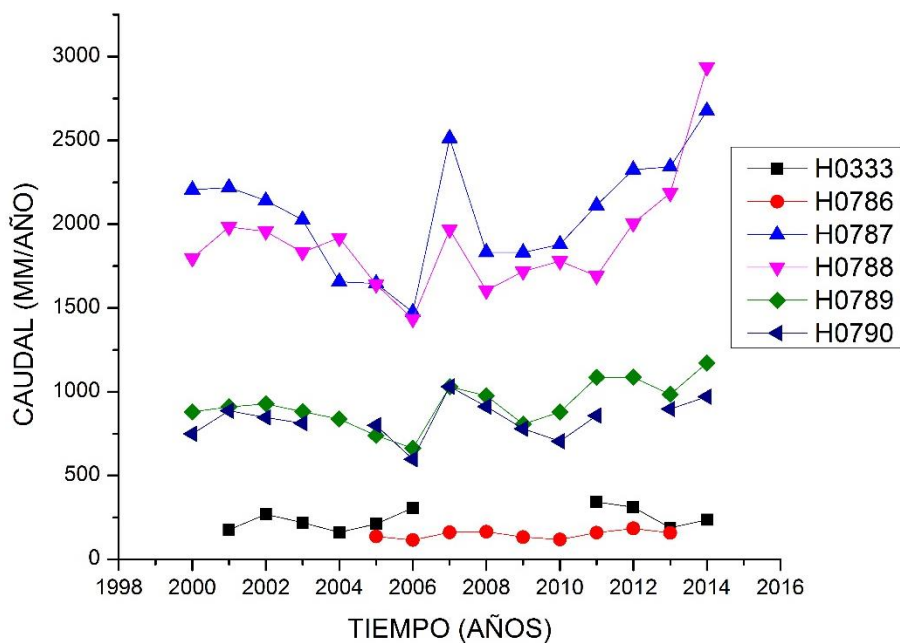
**Tabla 4.3.** Valores observados de Q expresados en lámina de agua en mm/año  $m^2$

Q EXPRESADO EN LAMINA DE AGUA EN (mm/año $m^2$ )						
AÑO	H0333	H0786	H0787	H0788	H0789	H0790
2000			2205,80	1796,37	880,23	748,37
2001	175,87		2218,88	1983,30	909,64	886,37
2002	267,66		2140,84	1956,51	927,07	846,35
2003	218,58		2026,28	1831,85	881,17	811,82
2004	161,61		1656,89	1919,24	836,37	
2005	210,33	136,05	1645,86	1639,70	738,97	798,91
2006	306,81	114,40	1473,31	1434,07	662,73	597,35
2007		160,22	2512,49	1967,85	1029,45	1030,43
2008		164,09	1831,84	1604,11	976,54	911,15
2009		132,29	1831,54	1717,46	806,52	778,97
2010		117,70	1879,27	1779,35	878,54	704,13
2011	342,51	158,34	2112,47	1690,90	1084,74	857,80
2012	310,04	184,02	2325,67	2005,16	1085,82	
2013	187,84	157,83	2342,42	2185,95	983,70	896,33
2014	235,82		2676,51	2935,85	1172,12	971,17

Fuente: Base de datos INAMHI  
Tratamiento estadístico de Datos: Andrade, 2019

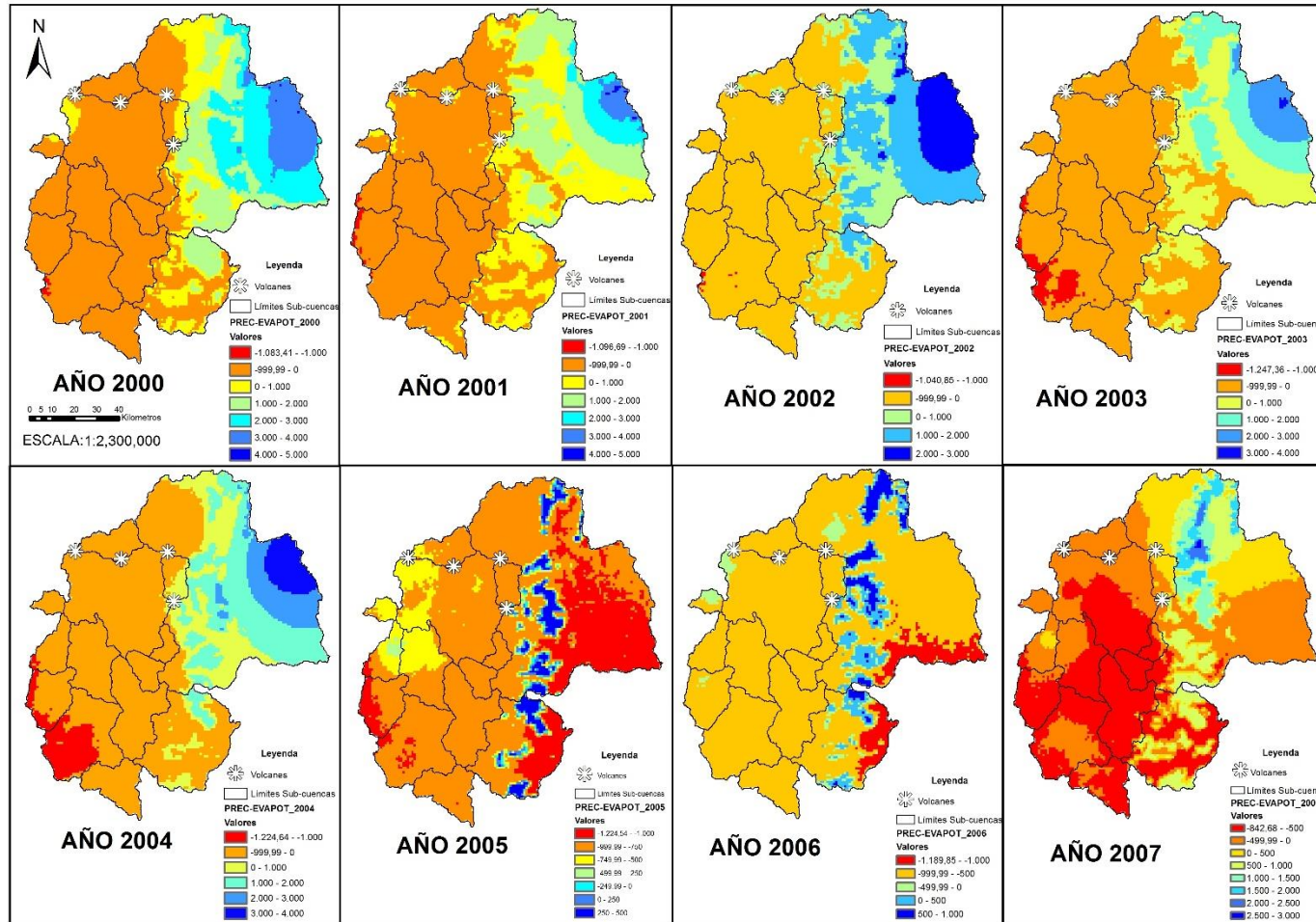
En la Figura 4.8 se muestra una gráfica de los valores de caudal observados vs. tiempo, en el cual se muestra la variabilidad de este parámetro en el periodo analizado. En la gráfica se puede observar el mismo patrón de comportamiento del caudal para todas las sub-cuencas en análisis. Los picos más altos se ubican en los años 2007, 2012 y 2014. La similitud de los valores de caudales es evidente entre las sub-cuencas H0787, H0788, H0789 y H0790; H0333 y H0786, geográficamente cerca.

**Figura 4.8.** Gráfica de valores de Q observados vs. tiempo para todo el periodo de análisis.



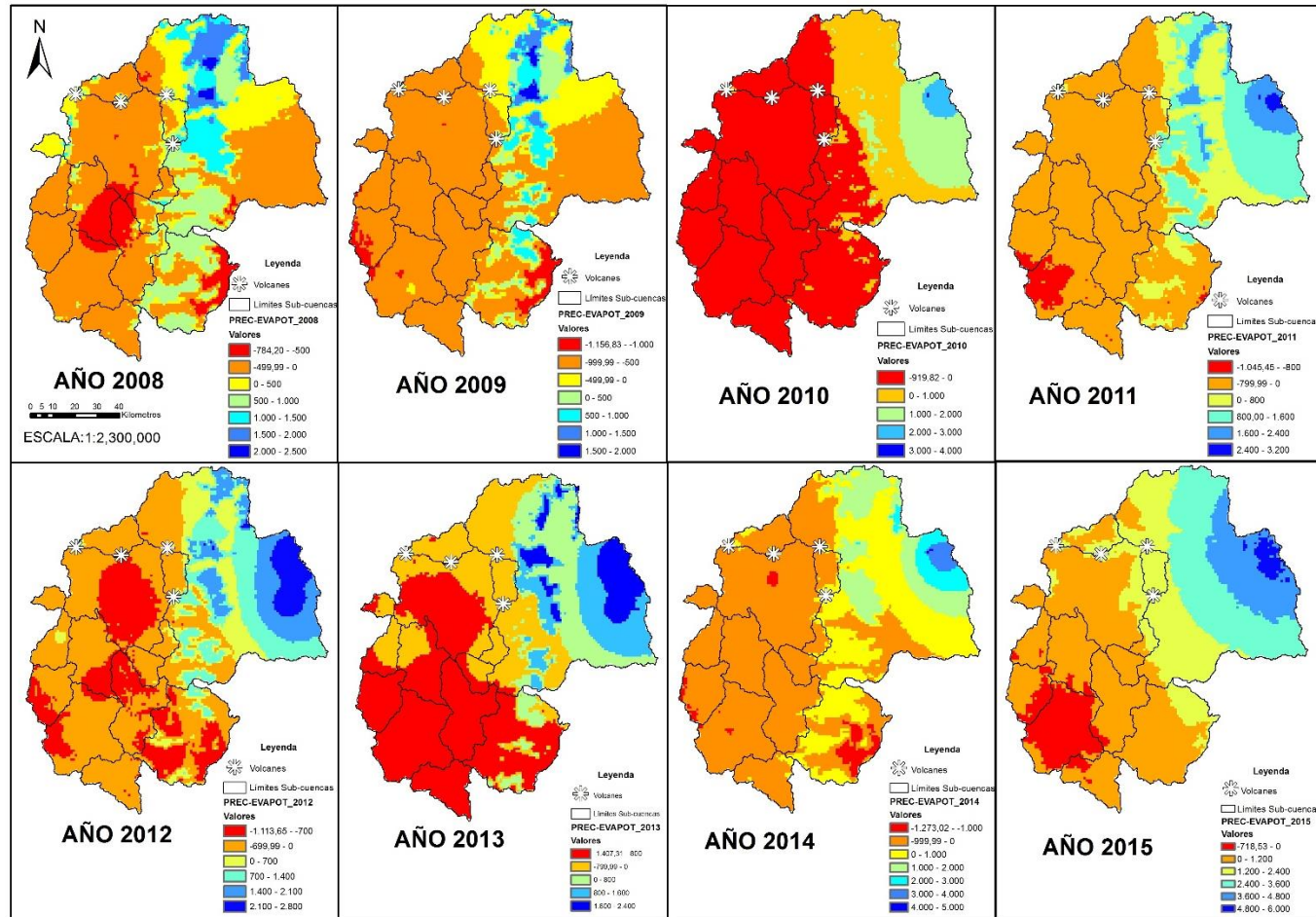
Elaborado por: Andrade, 2019

**Figura 4.9.** Mapa de recarga potencial y zonas con déficit de agua considerando únicamente la precipitación y la evapotranspiración dentro del área de estudio para el periodo 2000-2007. Las zonas en color azul son zonas con la mayor recarga potencial, las zonas con color rojo, y anaranjado son las zonas con déficit de agua y las zonas en color amarillo, verde y celeste son zonas con cierta recarga potencial.



Elaborado por: Andrade, 2019

**Figura 4.10.** Mapa de recarga potencial y zonas con déficit de agua considerando únicamente la precipitación y la evapotranspiración dentro del área de estudio para el periodo 2008-2015. Las zonas en color azul son zonas con la mayor recarga potencial, las zonas con color rojo, y anaranjado son las zonas con déficit de agua y las zonas en color amarillo, verde y celeste son zonas con cierta recarga potencial.



Elaborado por: Andrade, 2019

En el proceso de ajuste del modelo, se realizaron diferentes corridas del modelo, con el objetivo de analizar la sensibilidad del mismo, comprobando que el parámetro más sensible fue Z o también llamado factor de estacionalidad de precipitación. Fue colocado un valor de Z igual a 30 para para las sub-cuencas del Grupo A y un Z igual a 1 para las sub-cuencas del Grupo B. Lo cual se consideró de esa forma debido a la ubicación de las sub-cuencas y a la magnitud de las estaciones, es decir, el promedio multianual de lluvia para las sub-cuencas del Grupo A se encuentran en un rango aproximado entre 70 mm/año y 150 mm/año, mientras que para las sub-cuencas del Grupo B, el rango aproximado está entre 430 mm/año y 845 mm/año.

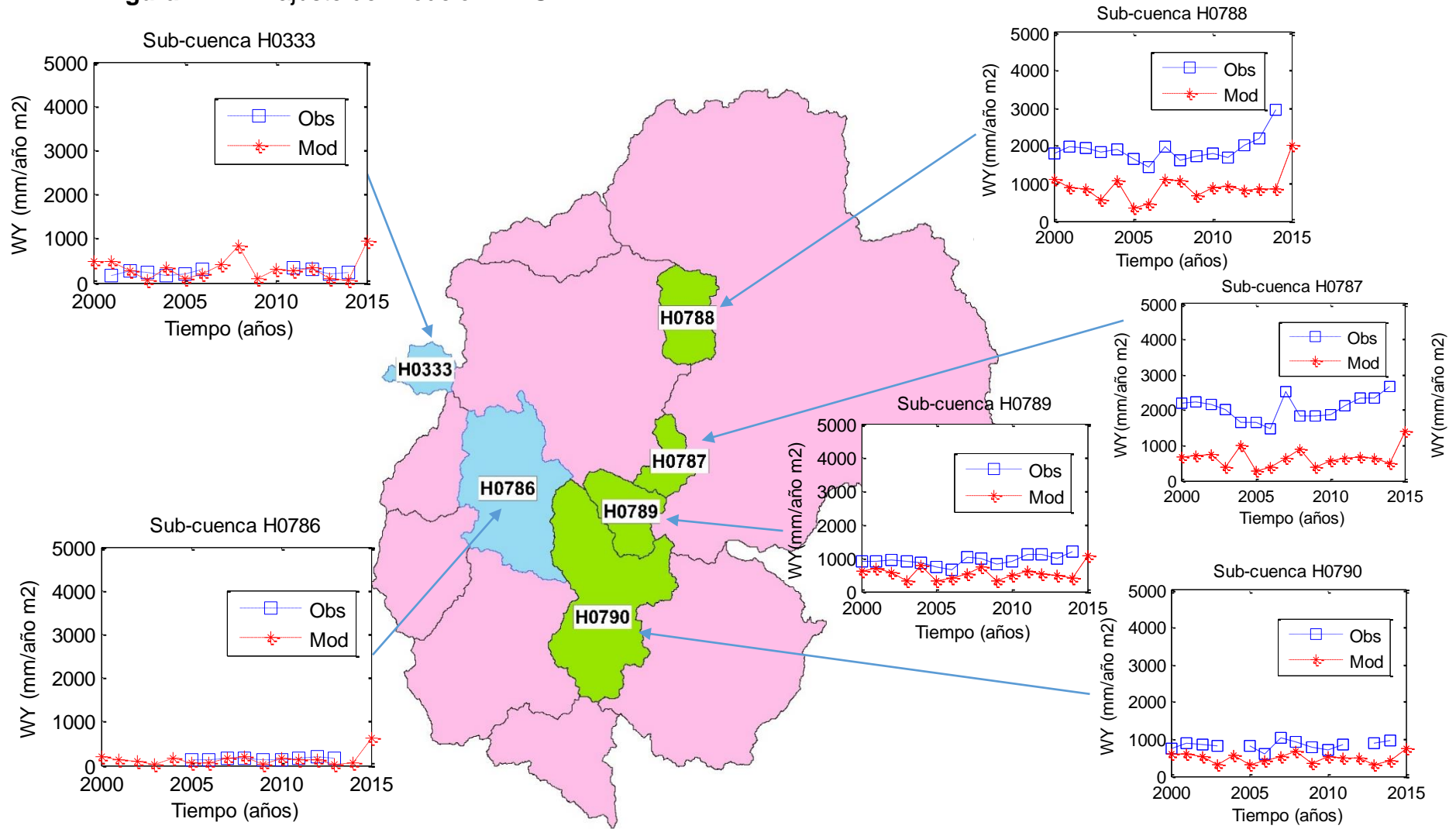
En la Tabla 4.4 se puede observar los valores de caudal observados, el water yield, y las funciones objetivo seleccionadas para determinar la bondad de ajuste del modelo como fueron, error medio absoluto (Mean Absolute Error - MAE), el porcentaje del error medio absoluto (Mean Absolute Percentage Error - MAPE), y el porcentaje de sesgo relativo (Relative Bias Percentage - PBIAS). Para datos de las sub-cuencas del Grupo A, ubicadas en la región Sierra, tienen un MAE aproximado entre 108 mm/año y 178 mm/año, y para las sub-cuencas del Grupo B un MAE entre 430 mm/año y 1 500 mm/año. El rango de MAPE oscila entre el 47% y 70%. En cuanto al PBIAS, este valor evalúa la tendencia de los valores simulados en el modelo. Este valor se encuentra entre aproximadamente 50% y 74% para las sub-cuencas del Grupo A alrededor del 73%.

**Tabla 4.4.** Funciones objetivo para determinar la bondad de ajuste del modelo

Sub-cuencas	Valores de Q (mm/año)	WY (mm/año)	MAE (mm/año)	MAPE (%)	PBIAS (%)
H0333	241,7	147,4	178,0	65,1%	73,6%
H0786	147,2	70,2	107,8	66,3%	73,2%
H0787	2058,7	578,6	1531,8	69,4%	74,4%
H0788	1896,5	844,6	1127,40	55,3%	59,5%
H0789	923,6	478,9	479,0	48,3%	51,9%
H0790	833,8	426,9	431,75	47,5%	51,8%

Elaboración: Andrade, 2019

**Figura 4.11. El ajuste del modelo InVEST**



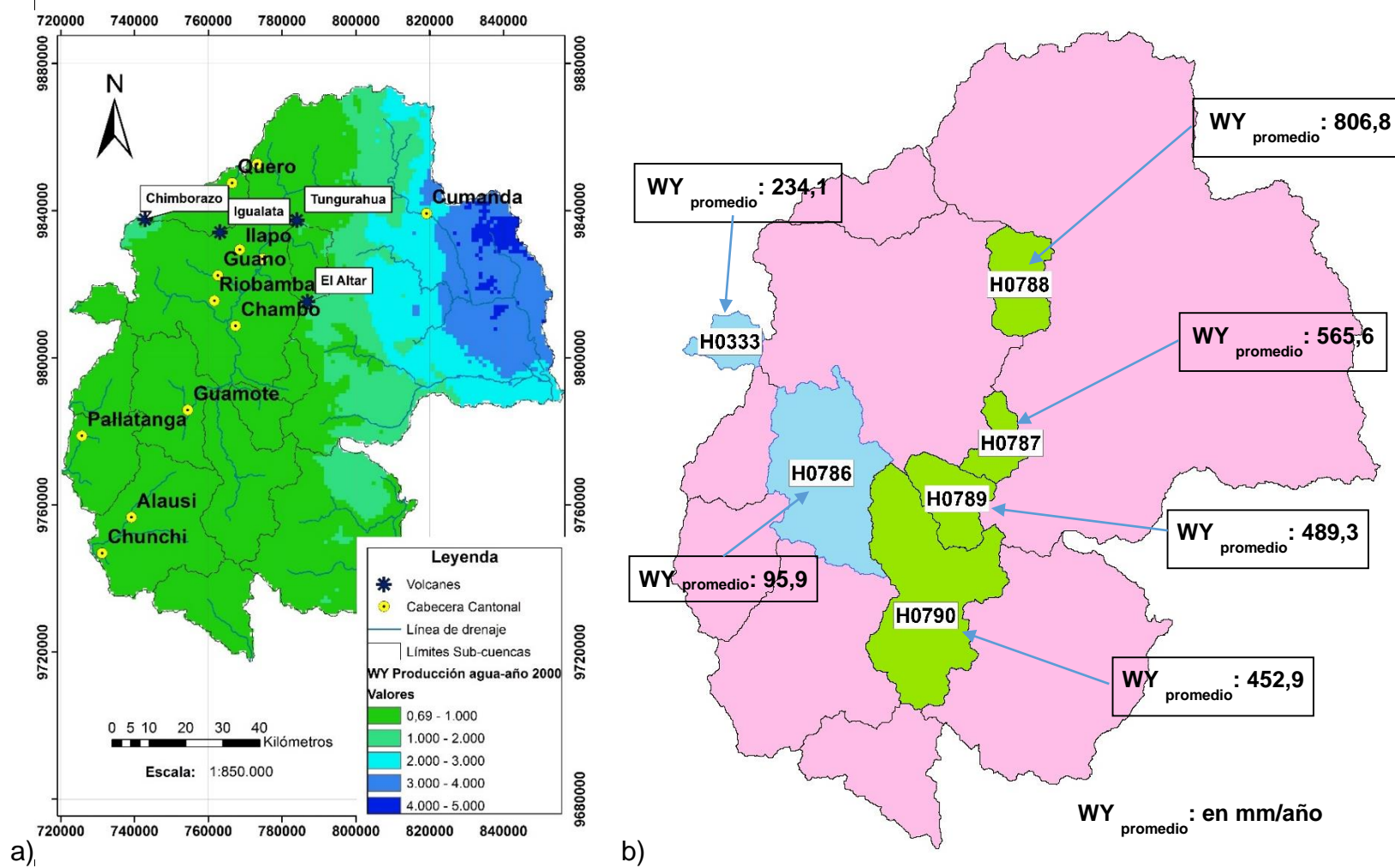
Elaborado por: Andrade, 2019

El modelado con InVEST permitió identificar la distribución geoespacial de la producción de agua en el área de estudio. Figura 4.12a muestra un mapa con una producción anual de agua para cada celda simulada a través del modelo InVEST. Los resultados obtenidos indican que la mayor producción de agua se encuentra en la región Amazónica, parte nororiental y disminuye hacia la dirección oeste. En general, se puede evidenciar que existe una mayor posible recarga de aguas subterránea en la zona nororiental del área de estudio, con valores de hasta 4 500 mm/año. La producción anual de agua por sub-cuenca se muestra en la Figura 4.12b. En esta figura se observa una mayor producción hídrica en las sub-cuencas ubicadas en la región oriental, es decir, las que pertenecen al Grupo B.

La mayor producción de agua (WY) se observa en el grupo B con valores entre 452,90 mm/año y 806,8 mm/año. Mientras que para el grupo A, los valores se encuentran entre 95,9 mm/año y 234,1 mm/año. Se puede observar que en áreas donde se encuentran volcanes como Chimborazo, Igualata, Tungurahua y Altar, la producción de agua tiene valores entre 750 mm/año y 1 000 mm/año m<sup>2</sup>. Estos valores de producción de agua se encuentran en un rango medio con respecto al rendimiento de agua de toda el área de estudio.



**Figura 4.12.** a) Mapa de la distribución espacial de la producción de agua del área de estudio año 2000 y b) Producción de agua para cada sub-cuenca



Elaborado por: Andrade, 2019

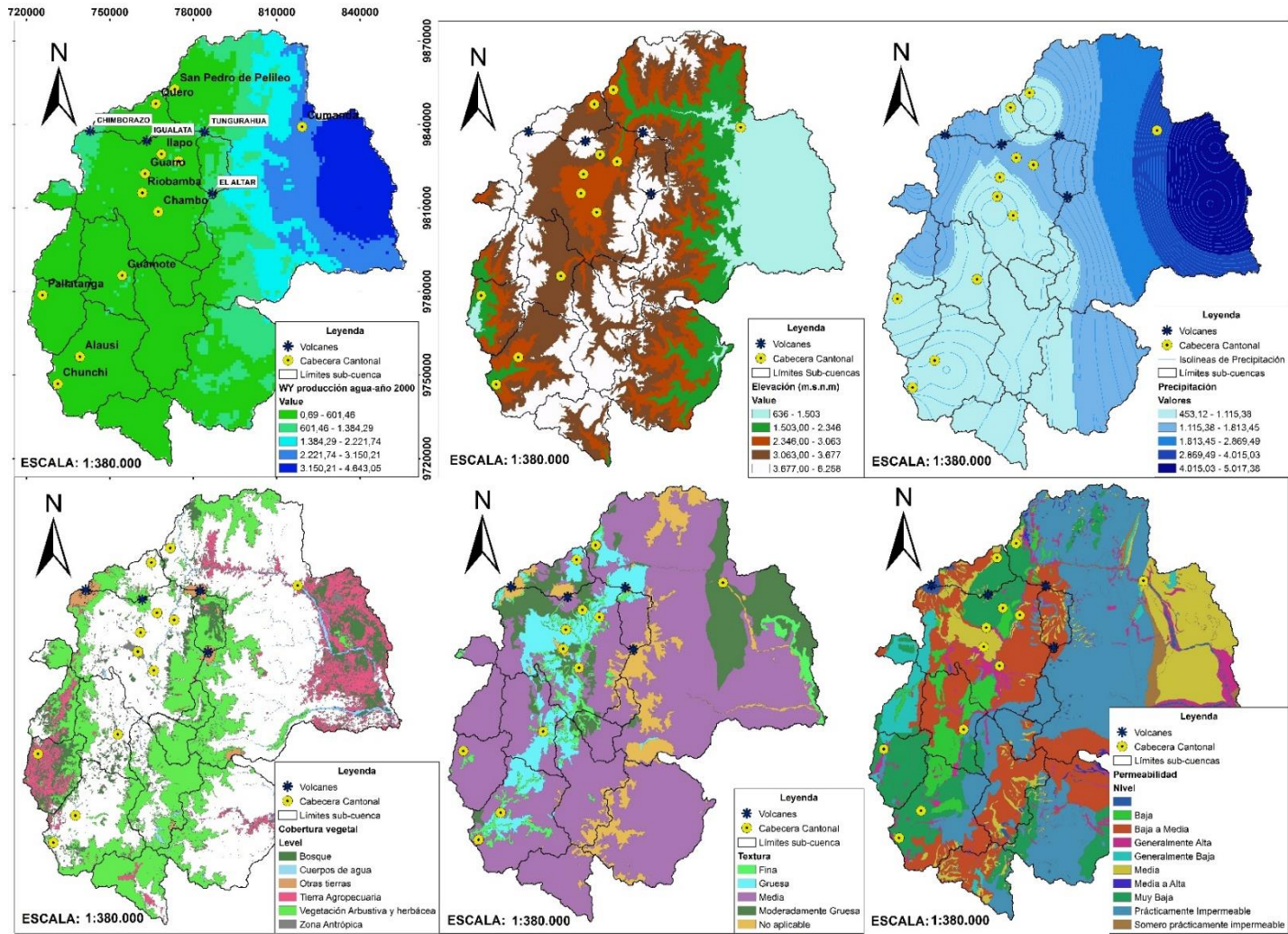
Se realizó un análisis entre la producción y las diferentes características del área de estudio. Las características fueron: elevación (Modelo de elevación digital (DEM)), precipitación, cobertura del suelo, textura y permeabilidad del suelo (Ver Figura 4.13). Todas estas características fueron consideradas con una distribución espacial. Al analizar la producción de agua y la elevación, se observó que los valores más altos de producción hídrica (rango entre 3 150,21 mm/año m<sup>2</sup> y 4 643,05 mm/año m<sup>2</sup>) se encuentran en la región Amazónica, en la provincia de Pastaza al noreste de la zona de estudio. En esta provincia, la elevación está entre 636 m.s.n.m. y 1 503 m.s.n.m. Para valores de producción de agua entre 2 221,74 mm/año m<sup>2</sup> y 3 150,21 mm/año m<sup>2</sup>, se ubican en una elevación entre 1 503 m.s.n.m. y 2 346 m.s.n.m. En primera instancia, se puede demostrar que existe una fuerte relación entre la elevación y el rendimiento del agua. Esta relación es inversa, es decir, a una elevación más baja, una producción de agua más alto. Sin embargo, en los puntos donde se encuentran las elevaciones más importantes en la zona de estudio como son los volcanes Tungurahua, Altar, Chimborazo e Iguazata los valores de producción de agua se encuentran en un rango entre 1 000 mm/año m<sup>2</sup> y 2 000 mm/año m<sup>2</sup>. Estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Torres, (2018), en el que los valores de producción de agua encontrados estuvieron en un rango entre 1 500 mm/año m<sup>2</sup> y 500 mm/año m<sup>2</sup> y estaban ubicados en áreas montañosas como el Antisana, Cayambe y el Pichincha.

Al analizar la producción de agua y la precipitación, se observó que en los sitios donde se encuentran los valores más altos de producción de agua entre 2 000 y 5 000 mm/año m<sup>2</sup> aproximadamente, se encuentran las mayores precipitaciones de alrededor de 4 015,03 mm/año y 5 017,38 mm/año, lo cual concuerda con el estudio de Brandizi, et al., (2014). Es decir, la relación entre la producción de agua y la precipitación es directa. A mayor precipitación, mayores valores de producción. Brandizi, et al., (2014) en su estudio muestra datos de precipitación en un rango entre 50 mm y 800 mm, donde los valores más altos se encuentran en la parte occidental de la zona de estudio y van disminuyendo hacia el lado oriental. En la misma zona donde la precipitación es mayor, es decir, de 800 mm, la producción de agua también es mayor y alcanza valores de 670 mm/año m<sup>2</sup>.

Al comparar la producción y la cobertura de la tierra, es evidente que los valores más altos de producción de agua se encuentran en las tierras agrícolas, los bosques y algunos cuerpos de agua. Para valores más bajos de producción ubicados en la zona central occidental del área de estudio, la cobertura del suelo es una mezcla de varias coberturas, vegetación arbustiva y herbácea, zona antrópica y otras tierras. A comparación con el estudio de Brandizi, et al., (2014) los valores más altos de producción de agua se encuentran en zonas donde la cobertura vegetal es de arbustales cerrados, bosques cerrados y pastizales. Y para los valores más bajos de producción hídrica, la cobertura vegetal es de arbustales abiertos.

Con respecto a la textura de los suelos, en los sitios donde se encuentran los valores más altos de producción hídrica, hay suelos de textura moderadamente gruesa y textura media. Con respecto a la permeabilidad, en el área donde se encuentran valores altos de producción de agua, existe una permeabilidad media y generalmente alta.

Figura 4.13. Producción de agua vs. las diferentes características del área de estudio



Elaboración: Andrade, 2019  
 Fuente: Cartografía Base – MAGAP - SIGAPRO

#### 4.1.2 SEPARACIÓN DE CAUDAL BASE

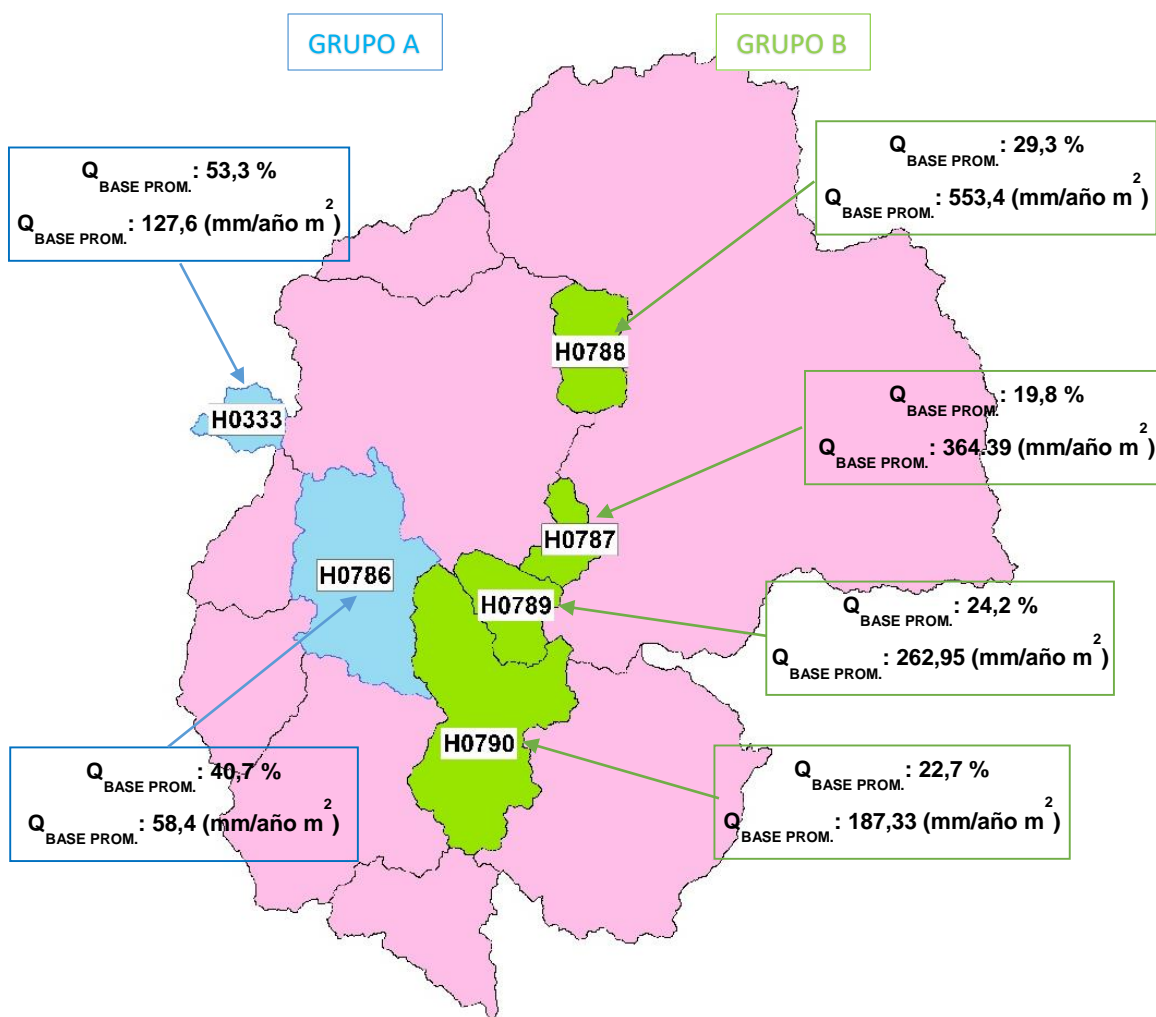
La revisión y tratamiento estadístico de datos de caudal a nivel diario obtenidos de las estaciones hidrológicas de la zona de estudio permitió aplicar la metodología de separación de caudal base para las sub-cuencas del Grupo A y Grupo B. Previo a la aplicación de la metodología fue necesario tener además de la base de datos de caudal a nivel diario, los valores de las áreas de drenaje de cada una de las sub-cuencas a analizar (Ver Tabla 3.1). La separación de flujo base se realizó aplicando el programa HYSEP y el método BFI. La temporalidad de los resultados mostrados en la Figura 4.14 es de mm/año con el propósito de poder establecer parámetros de comparación con los resultados arrojados en la primera metodología la cual fue el desarrollo de un balance superficial.

En cuanto a la aplicación de los algoritmos en HYSEP se utilizaron intervalo fijo, intervalo de desplazamiento y mínimo local. Y para el método del índice de caudal base (BFI) o filtro digital se utilizó de uno y dos parámetros. Para el filtro digital de un parámetro, se utilizó el coeficiente de recesión. De acuerdo a Nathan y McMahon, (1990), el valor más apropiado para el coeficiente de recesión es 0,925. Para el filtro digital de dos parámetros, se usó el coeficiente de recesión y el valor de BFI. Se modeló con el mismo valor del coeficiente de recesión para los métodos del filtro digital. El valor de BFI fue considerado en función del tipo de corriente y acuífero. Para este estudio se tomó el valor de 0,80 para corrientes perennes con acuíferos con porosidad primaria.

Los resultados expuestos en la Figura 4.14, muestran que en porcentaje existe mayor cantidad de aporte de aguas subterráneas respecto al caudal total de los ríos presentes en las sub-cuencas del Grupo A. Existe un porcentaje de aporte de aguas subterráneas entre el 40,7% y 53,3% del caudal total de los ríos para las sub-cuencas del Grupo A. El porcentaje de aporte de aguas subterráneas para las sub-cuencas del Grupo B está entre 19,8% y 29,3%. Gómez y Gómez (2016) manifiestan que la parte de flujo base o aporte de aguas subterráneas respecto al caudal total existente en el río representa un indicador de la sostenibilidad de la

reserva de agua en las cuencas de análisis. Además, de que el caudal o flujo base se constituye en una reserva de agua importante para el desarrollo de planes de gestión integrada del recurso hídrico (Gómez y Gómez, 2016). El de estudio realizado por Gómez y Gómez (2016), arrojó valores de porcentaje de aporte aguas subterráneas entre el 78 y 82,2% para los ríos Suratá y 80,5% y 83,4% para el río de Oro.

**Figura 4.14.** Porcentaje de la contribución de agua subterránea



Elaborado por: Andrade, 2019

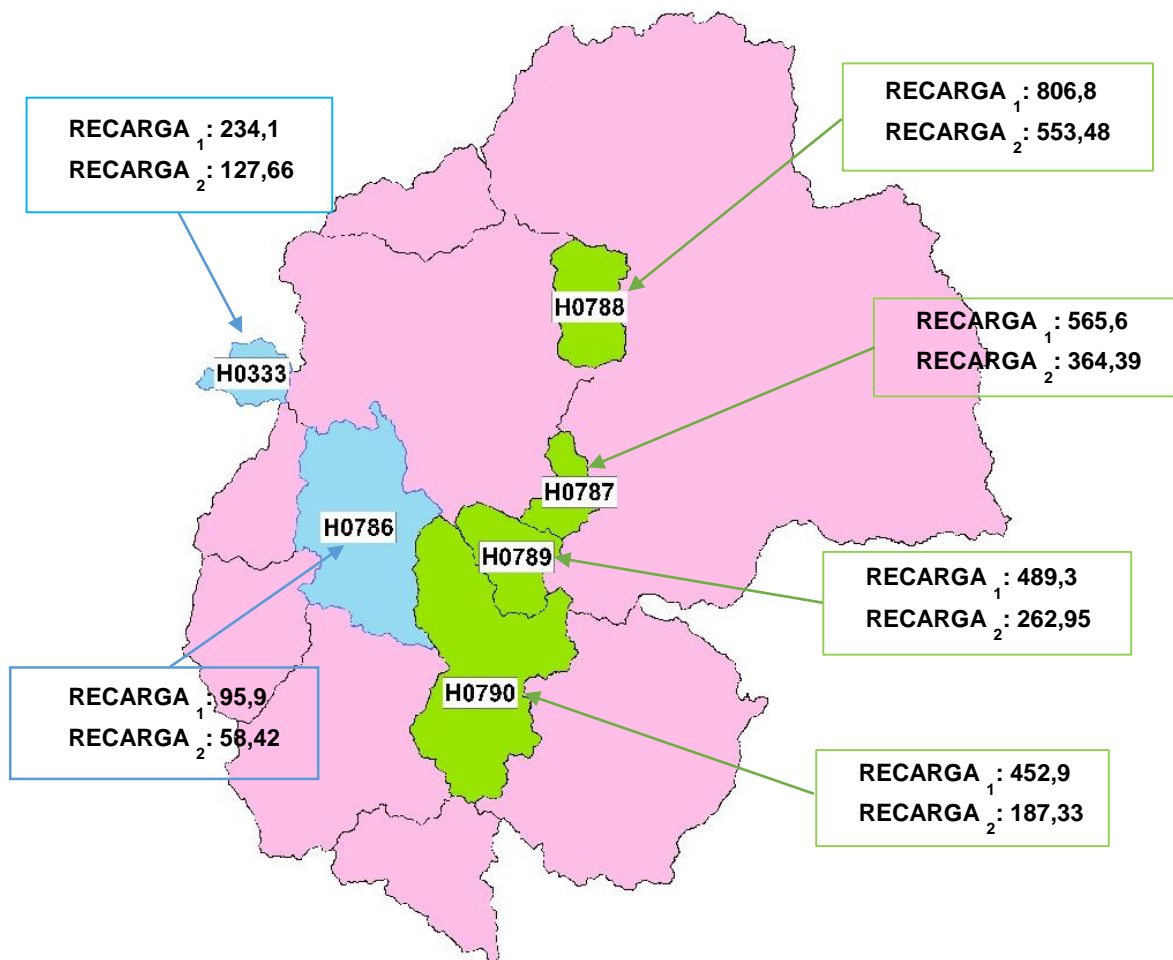
En cuanto a cantidad las sub-cuencas del Grupo B tienen un mayor aporte de aguas subterráneas, es decir, una mayor recarga al acuífero. El aporte de aguas subterráneas para el Grupo A está en un rango entre 58,4 mm/año y 127,6 mm/año.

Para las sub-cuencas del Grupo B, el aporte de aguas subterráneas está entre 187,3 mm/año m<sup>2</sup> y 553,4 mm/año m<sup>2</sup>. Lo cual tiene concordancia respecto a la información pluviométrica para las sub-cuencas de análisis, existiendo una relación entre la precipitación con la respuesta de los caudales mostrados. Los valores de precipitación para las sub-cuencas del Grupo A fueron menores que en las sub-cuencas del Grupo B.

Al igual que en esta investigación, Gómez y Guzmán (2011) realizaron un estudio en la cuenca superior del río Lebrija - Colombia, realizando la separación de caudal base del hidrograma. El método utilizado fue el de algoritmos los cuales estaban basados en la curva de recesión. Al aplicar los algoritmos se utilizaron varios escenarios estos incluyeron uno, dos o tres parámetros, los cuales están en relación con el fenómeno de recesión y reflejan comportamientos que no son lineales en cuanto al almacenamiento de los acuíferos, los cuales permiten hacer la separación del caudal base. Al utilizar dos parámetros o más se pudo interpretar de una manera más real las condiciones del acuífero. Al incluir un parámetro el porcentaje del flujo base fue del 50%, con dos parámetros 69% y con tres 71%. Los porcentajes hallados son elevados, lo cual quiere decir que el aporte de aguas subterráneas al total del caudal del río fue alto.

En la Figura 4.15 se observa un esquema resumen entre los valores de recarga obtenidos a través del balance superficial y la separación de caudal base. En este esquema se evidencia que los valores de recarga obtenidos a través del balance superficial son mayores a los obtenidos por el método de separación de caudal base. Lo cual es razonable ya que a través del balance superficial se determina la producción de agua la cual es un indicador de la máxima recarga potencial del acuífero. La recarga registrada en las sub-cuencas ubicadas en la zona oriental es mayor tanto para el método del balance superficial como el método de separación de caudales.

**Figura 4.15.** Esquema de resumen entre los valores de recarga por balance de superficie y separación de flujo base



**NOTAS:** RECARGA<sub>1</sub> y RECARGA<sub>2</sub> en (mm/año)  
 RECARGA<sub>1</sub>: Recarga por Balance superficial  
 RECARGA<sub>2</sub>: Recarga por separación de hidrogramas

Elaborado por: Andrade, 2019

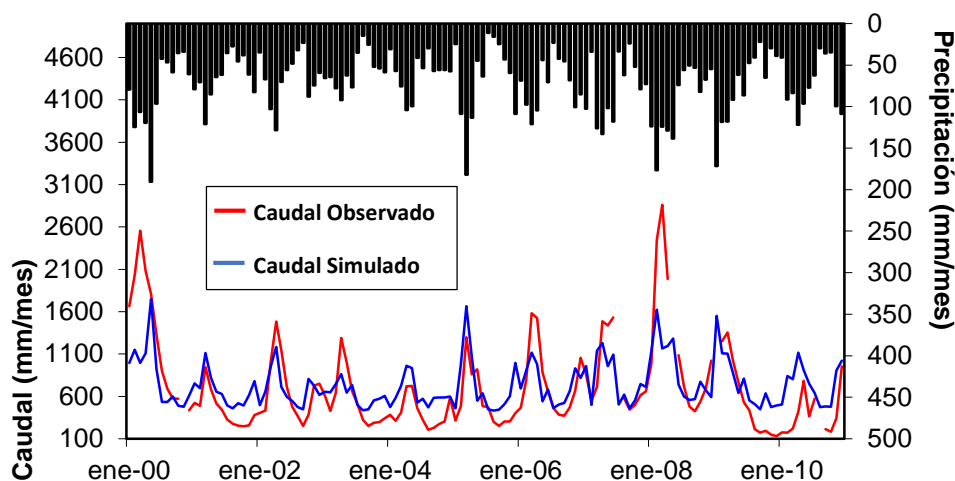
#### 4.1.3 MODELO GR2M

El modelo GR2M permite determinar la existencia del aporte de aguas subterráneas de cuencas vecinas hacia la sub-cuenca de análisis a través de la evaluación de los parámetros  $R_1$  y  $R_2$  determinados en el desarrollo del modelo. El modelo fue aplicado para las seis sub-cuencas que conforman los Grupos A y B. Para la aplicación del modelo GR2M fue necesario contar con la base de datos de caudal y además, con las áreas de drenaje (Ver Tabla 3.1). A continuación, se presentan



los ajustes del modelo para cada una de las sub-cuencas analizadas. En las gráficas se puede observar el caudal simulado, el caudal observado y los datos de precipitación para todo el periodo de análisis.

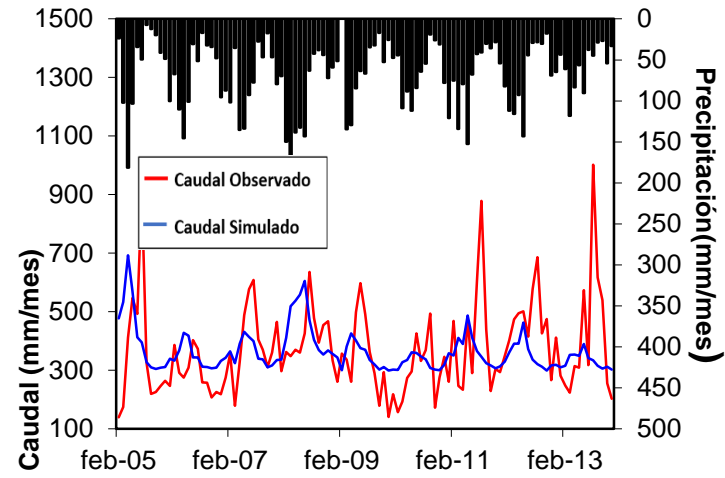
**Figura 4.16.** Ajuste del modelo GR2M para la sub-cuenca H0333



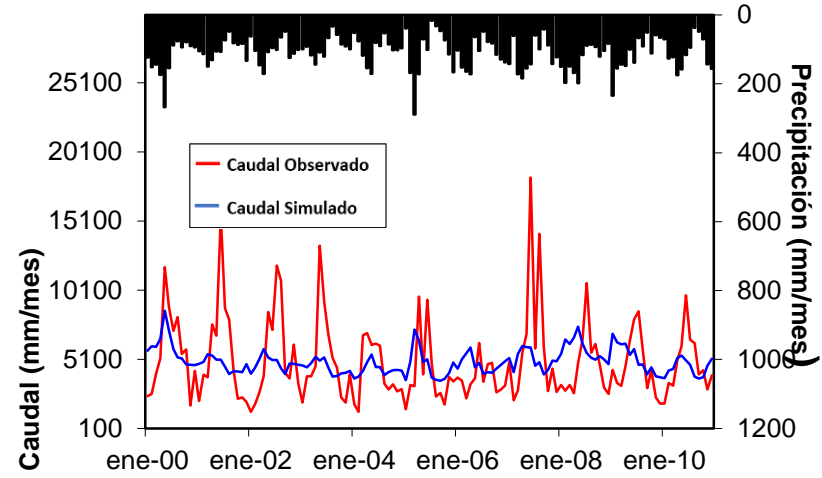
Elaboración: Andrade, 2019

Según lo expresado por Coy, (2017), el parámetro de Nash es uno de los más usados en el desarrollo de modelos hidrológicos ya que evalúa el ajuste o poder reproductivo de los mismos en función a una base de datos referenciales. En este caso se evalúan los datos modelados vs. los datos observados los cuales se adquirieron de la base de datos del INAMHI. Por lo tanto, para evaluar el ajuste del modelo para las diferentes sub-cuencas se determinó el valor del criterio de Nash para cada uno de ellos. Para la sub-cuenca H0333 se puede observar un ajuste bueno, donde el valor de Nash es de 49,1% (Ver Figura 4.16). Como se puede evidenciar para la Figura 4.17a), b), c), d) y e), los valores del criterio de Nash obtenidos para el resto de sub-cuencas fueron menores al 20% por lo tanto, el modelo GR2M no muestra un ajuste satisfactorio respecto a los valores de caudales pico ni a la tendencia de la gráfica. Por lo cual el modelo no es capaz de reproducir los caudales observados.

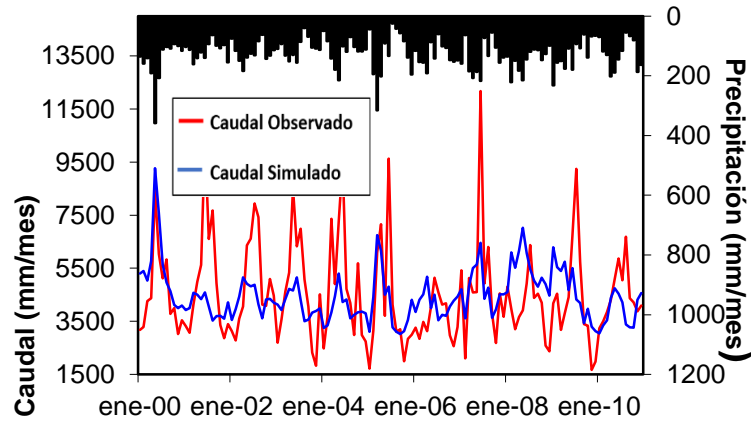
Figura 4.17. Ajuste del modelo GR2M para la sub-cuenca a) H0786, b) H0787, c) H0788, d) H0789, e) H0790



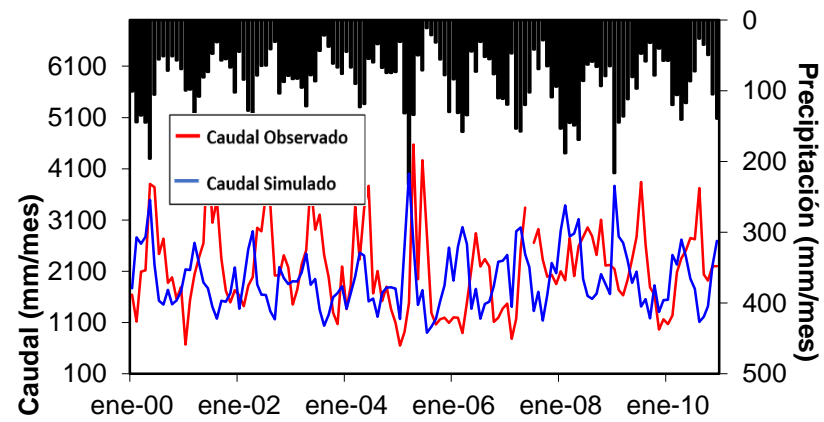
a)



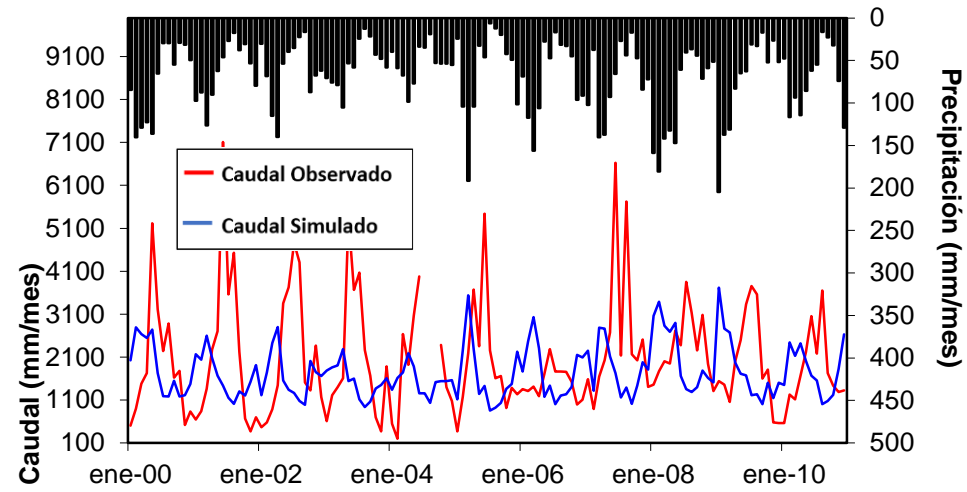
b)



c)



d)



e)

Elaboración: Andrade, 2019

## 4.2 DISCUSIÓN

### 4.2.1 BALANCE SUPERFICIAL

Analizando los datos de entrada, la precipitación en la región Sierra tiene un comportamiento bimodal, mientras que en la región Amazónica el régimen de precipitación es unimodal (Pourrut, 1983). A pesar de que la estación M0396 se encuentra localizada en la región Sierra, el régimen de precipitación en esa zona es unimodal, lo cual indica una influencia del clima amazónico sobre la zona de estudio. Evaluando la evapotranspiración potencial en el páramo, Torres y Proaño, (2018) en su estudio realizado en la microcuenca de Jatunsacha en las cercanías del páramo de Antisana, determinaron que la evapotranspiración potencial está aproximadamente en 300mm/año. En este estudio se utilizó un coeficiente de cultivo para cobertura páramo igual a 0,42, el cual fue determinado para esta cobertura en varias investigaciones realizadas en el páramo (Buytaert, et al., 2006; González, 2016); y en base a esto, el producto satelital MODIS para la cobertura vegetal de páramo presenta valores aproximadamente entre 370 mm/año y 420 mm/año.

En general, la cobertura vegetal, tiene efectos directos sobre el suelo. La importancia de la presencia de cobertura vegetal, radica en que ésta atenúa la caída de la precipitación impidiendo así la compactación y desintegración de los agregados del suelo, facilitando así la infiltración del agua. (FAO, 2013). La cobertura vegetal más abundante en la cuenca del río Chambo pertenece a la tierra agrícola y vegetación de páramo como arbustos y vegetación herbácea. Mientras que en la parte oriental una gran parte está cubierta por bosque, cuerpos de agua y en menos cantidad, tierra agrícola. Se observa que la cobertura vegetal propia de los ecosistemas de páramo como, vegetación herbácea, pajonales, matorrales y arbustos (Andrade y Yépez, 2014) se encuentran presentes en elevaciones entre 3 200 m.s.n.m. y 4 200 m.s.n.m. (Mena et al., 2001; Ochoa et al., 2016) y los bosques, tierra agrícola y cuerpos de agua entre 636 m.s.n.m. y 2 000 m.s.n.m.

En canto a la textura del suelo, esta permite comprender el comportamiento del suelo y su relación con la composición mineral del mismo, el espacio de poros del suelo y la cobertura vegetal, es decir con los factores que controlan el crecimiento de las plantas (Thompson and Troeh, 1988; FAO, 2000). Estos factores son la humedad del suelo (cantidad de agua que puede retener el suelo), la disponibilidad de nutrientes, la resistencia a la penetración de las raíces en el suelo, etc., influyendo también en parámetros como la escorrentía y la infiltración, es decir, el movimiento del agua en el suelo (por lo menos en la zona no saturada) (Thompson and Troeh, 1988; FAO, 2000). En el área de estudio predomina la textura media, sobretudo en la parte oriental de la zona de estudio, lo que muestra que gran parte de la precipitación puede infiltrarse en el suelo y es precisamente en esa zona donde se tiene la mayor posible recarga (recarga entre 1 000mm/año y 3 000mm/año). En la parte centro norte de la cuenca del Río Chambo está presente suelo de textura gruesa y moderadamente gruesa lo cual según Thompson and Troeh, (1988) dificulta la retención del agua, coincidiendo con una menor recarga de aguas subterráneas en esa zona (recarga entre 0 mm/año y 750 mm/año). El coeficiente de cultivo representa varias características, las cuales diferencian al tipo de cultivo. Estas características son la altura del cultivo, el albedo o la reflectancia, la resistencia del cultivo y la evaporación (FAO, 2000). El valor de este coeficiente permite determinar el valor de la evapotranspiración potencial bajo ciertas condiciones, las mismas que son estándar, como por ejemplo, que no existan limitaciones de agua que limiten el crecimiento del cultivo, la densidad del cultivo, no existencia de plagas o insectos, entre otros (FAO, 2000). La profundidad de las raíces y el agua disponible para las plantas (que es la diferencia entre la capacidad de campo y punto de marchitez) son parámetros que determinan la capacidad de almacenamiento del agua (Sharp et al., 2015; Asorey et al., 2017).

Sobrino, (2017); Rosero, (2018), Brandizi, et al., (2014), entre otros, tomaron en sus estudios a Z o factor de estacionalidad de la precipitación como parámetro sensible. Tomando en cuenta esta consideración, el parámetro de ajuste escogido fue el factor de estacionalidad Z, el cual fue variando entre 1 y 30 comparando el ajuste del modelo en cada variación. Se logró el mejor ajuste colocando un valor de Z igual

a 30 para las sub-cuencas del Grupo A ubicadas en la parte occidental del área de estudio y un valor de 1 para las sub-cuencas ubicadas en el lado oriental del mismo (Rosero, 2018), existiendo en éstas sub-cuencas mayores precipitaciones. Siendo esto lo recomendado por Sánchez-Canales (2012) y Brandizi, et al., (2014) en su estudio, sugiriendo colocar un valor de Z igual a 1 para regiones húmedas y un valor alto en zonas más secas.

Analizando la bondad del ajuste del modelo, los parámetros de MAE y MAPE muestran que los errores son mayores en las sub-cuencas del grupo B que en las sub-cuencas del grupo A, es decir, no se cierra el balance hídrico superficial no existiendo un equilibrio en el mismo. Junto al análisis de errores, se visualiza la evaluación de la tendencia de los valores simulados en el modelo a través de los valores de PBIAS, dando a entender que existe una sub-estimación de caudales simulados. Por lo tanto, se confirma lo manifestado por Quishpe, (2017) que existe un caudal de ingreso a las sub-cuencas analizadas, el mismo que no proviene de la precipitación. Analizando los valores de máxima posible recarga, la mayor recarga se da en la parte oriental del área de estudio, es decir, en las sub-cuencas del Grupo B, donde los valores oscilan entre 450 mm/año y 800 mm/año aproximadamente. Rosero (2018) desarrolló su estudio para la cuenca alta y media del río Coca, zona ubicada al nororiente del Ecuador, determinando un valor aproximado de 2700mm/año. En cambio, en la parte occidental el rango de valores de máxima recarga posible está entre 96 mm/año y 234 mm/año, valores que se asemejan a los obtenidos por Torres, (2018). Su área de estudio se localizó en las provincias de Pichincha y Napo ubicadas al norte de la cuenca del Río Chambo. Doll y Fiedler (2008) determinaron recarga de aguas subterráneas a nivel mundial, espacialmente. Utilizaron el modelo WGHM Water Cap Global Hydrology model por sus siglas en inglés, incluyendo en el algoritmo factores de textura del suelo, hidrogeología y glaciares, además de parámetros como la temperatura del aire, nubosidad, número de días lluviosos y precipitación. Los valores de recarga determinados para el Ecuador oscilan en un rango entre 3 mm/año y 200 mm/año, lo cual se encuentra en el rango de valores determinados para este estudio.

#### 4.2.2 SEPARACIÓN DE CAUDALES

Gómez y Gómez (2016) manifiestan que la parte de flujo base o aporte de aguas subterráneas respecto al caudal total existente en el río representa un indicador de la sostenibilidad de la reserva de agua en las cuencas de análisis. Además, de que el componente de caudal base constituye en una reserva de agua importante para el desarrollo de planes de gestión integrada del recurso hídrico (Gómez y Gómez, 2016). Al analizar los parámetros requeridos para el empleo de la metodología se realizó el cálculo de N con el objetivo de comprobar la validez de la metodología para las sub-cuencas analizadas. El autor Chapman (1999) demostró que "para el caso común de recesión de duración de hasta aproximadamente 10 días, el modelo lineal sigue siendo una muy buena aproximación". El rango de valores de N estuvo entre 2,1 y 3,1 días, por lo tanto, el modelo es aplicable a las sub-cuencas en estudio. En base a las características de la corriente y el acuífero, Eckhardt, K, (2005) determinó un valor para BFI igual a 0,8.

Al observar el comportamiento de los hidrogramas, los hidrogramas pertenecientes a las sub-cuencas del Grupo A muestran un comportamiento bimodal igual que la precipitación, sin embargo, los hidrogramas de las sub-cuencas del grupo B muestran un comportamiento del régimen de precipitación de la región Amazónica, es decir, unimodal. Por lo tanto, esto muestra una clara influencia de la región Amazónica sobre la zona de estudio, demostrando además, que a pesar de ser sub-cuencas que se encuentran en la región Sierra, sus ríos tienen un comportamiento como el de los ríos amazónicos.

Los valores de caudal base están en un rango aproximado entre 58 mm/año y 127 mm/año para las sub-cuencas del Grupo A y rango aproximado entre 180 mm/año y 550 mm/año para las sub-cuencas del Grupo B. Estos valores concuerdan con los valores de MAE determinados en la primera metodología de balance hídrico superficial, para las sub-cuencas del Grupo A en un rango aproximado entre 60 mm/año y 138 mm/año. Lo cual no ocurre para las sub-cuencas del grupo B, los cuales tienen valores de MAE en un rango aproximado

entre 389 mm/año y 1500 mm/año. Estos valores de recarga coinciden con los determinados por Menezes, et al., (2017). En su estudio determinó la recarga de aguas subterráneas para el sistema acuífero Paraná en Brasil a través de la separación de caudal base usando el método de filtros de Eckhardt, arrojando valores de caudal base entre aproximadamente 160 mm/año y 300 mm/año. En el caso de Arnold et al., (2000) concluye en su estudio realizado en la cuenca alta del Rio Misisipi que el rango de valores de recarga está entre 1 mm/año y 400 mm/año. Quishpe, (2017) en su estudio determina un régimen unimodal para los caudales de las sub-cuencas que se localizan en la zona oriental del área de estudio en el límite entre la región sierra y la amazónica del Ecuador, lo cual se evidencia en la figura 12, que al tener el caudal una distribución bimodal se puede demostrar la influencia de la región amazónica sobre la zona de estudio.

#### **4.2.3 MODELO GR2M**

Al considerar varios estudios y evaluar la eficiencia de varios modelos, el modelo desarrollado por Coy, (2017), y Makhlouf (1994), obtuvieron valores de parámetro de Nash igual a 78,8% y 82,7% lo cual es evaluado como muy favorable. En el caso de Coy, (2017), él recomienda la aplicación del modelo para cuencas de alta montaña. Para el caso de los valores encontrados del criterio de Nash estuvieron en un rango menor al 20% lo cual se evalúa como insuficiente, como no satisfactorio y las sub-cuencas modeladas son de alta montaña. Sin embargo, no se puede concluir que el modelo no es aplicable a este tipo de sub-cuencas, ya que las características de cada zona de estudio y la base de datos a utilizar son particulares para cada sitio. Al analizar los valores de  $R_1$  y  $R_2$  para la sub-cuenca H0333, la cual fue la única con un criterio de Nash satisfactorio, se puede observar que  $R_2$  es mayor a  $R_1$ , lo cual según Mena (2010) significa que existe un aporte de aguas subterráneas de cuencas vecinas.



## **CAPÍTULO 5.**

### **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Al realizar el balance superficial en la zona de estudio se determinó que la mayor producción de agua (WY) se observa para las sub-cuencas del Grupo B con valores entre 452,9 mm/año y 806,8 mm/año. Mientras que para las sub-cuencas del grupo A, los valores se encuentran entre 95,9 mm/año y 234,1 mm/año. Lo que implica que se requiere acciones de manejo y conservación para las sub-cuencas del grupo B. Además, se puede observar que en áreas donde se encuentran volcanes como Chimborazo, Igualata, Tungurahua y Altar, la producción de agua tiene valores entre 750 mm/año y 1 000 mm/año (estos valores de producción de agua se encuentran en un rango promedio con respecto al rendimiento de agua de toda el área de estudio), lo cual concuerda con el estudio realizado por Procel (2018) en la cuenca del Río Chambo. Procel (2018) manifiesta que las zonas de recarga de la cordillera Occidental son el Chimborazo y el Igualata y que las zonas de recarga de la cordillera Oriental son el Tungurahua y el Altar.

Las zonas potenciales de recarga se ubicaron al noreste de la zona de estudio, en la provincia de Pastaza. En esta provincia la precipitación anual alcanza valores de 5 000 mm/año aproximadamente. En la región amazónica las estaciones meteorológicas son escasas y al tener precipitaciones tan altas se hace necesario un monitoreo más regular de la precipitación en esta zona. Las zonas de déficit están hacia la parte sur oeste del área de estudio, cerca de Alausí en donde los valores de precipitación están entre 300 mm y 500 mm al año. Por lo que se puede concluir que, las zonas potenciales de recarga se encuentran en la parte central de la zona de estudio (en las cercanías de los volcanes Tungurahua, Altar, Chimborazo e Igualata) y en la Amazonía.

Al analizar el comportamiento de la precipitación para varias estaciones meteorológicas, estas tienen un comportamiento unimodal lo que implica la influencia del clima de la región amazónica en la zona de estudio.

Se comprobó que el modelo del balance superficial tiene mejor ajuste para datos de las sub-cuencas del Grupo A, ubicadas en la región Sierra, con un MAE aproximado entre 107,8 mm/año y 178 mm/año. Para las estaciones del Grupo B, ubicadas en el borde con la región Amazónica se demostró que el modelo está subestimado, es decir, que los valores modelados son menores a los observados. El MAE está entre 431,75 y 1 531,8 mm/año. Por lo tanto, el balance hidrológico está en equilibrio para las sub-cuencas ubicadas en la parte occidental mientras que las ubicadas en la parte oriental no. Lo que implica que muy probablemente hay agua que proviene de la parte oriental de la zona de estudio como trasvase de agua subterránea.

El parámetro más sensible del modelo de balance superficial fue el parámetro Z. Este parámetro corresponde a la constante de Zhang o al factor de estacionalidad. Lo cual es acertado ya que el parámetro precipitación es uno de los más representativos en este estudio y su rango de precipitaciones en la zona de estudio es muy marcado, oscilando entre 300 y 5 000 mm/año. Para las sub-cuencas del Grupo A, se aplicó un valor de Z igual a 30, que corresponde a las sub-cuencas más secas, mientras que para las sub-cuencas del Grupo B, el valor de Z fue igual a 1, que corresponde a las sub-cuencas donde se produce más precipitación.

Al analizar la producción de agua y la elevación, se observó que los valores más altos de producción hídrica (rango entre 2 500 mm/año y 4 500 mm/año) se encuentran en la región Amazónica, en la provincia de Pastaza al noreste de la zona de estudio. En esta provincia, la elevación está entre 636 m.s.n.m. y 1 503 m.s.n.m. Para valores de producción de agua entre 750 mm/año y 1 000 mm/año, que también son altos, se ubican en una elevación entre

1 503 m.s.n.m. y 2 346 m.s.n.m., encontrándose estos valores en Chimborazo, Igualata, Tungurahua y Altar.

Al analizar la producción de agua y la precipitación, se observó que en los sitios donde se encuentran los valores más altos de producción de agua se encuentran las mayores precipitaciones de alrededor de 4 015,0 mm/año y 5 017,3 mm/año. Es decir, la relación entre la producción de agua y la precipitación es directa. Lo que implica que, a mayor precipitación mayores valores de producción. Al comparar la producción y la cobertura de la tierra, es evidente que los valores más altos de producción de agua se encuentran en las tierras agrícolas, los bosques, páramos y algunos cuerpos de agua. Para valores más bajos de producción ubicados en la zona central occidental del área de estudio, la cobertura del suelo es la combinación de varias coberturas, vegetación arbustiva y herbácea, zona antrópica y otras tierras. Con ello se evidencia la importancia de la presencia de cobertura vegetal en la zona de estudio. Con respecto a la textura de los suelos, en los sitios donde se encuentran los valores más altos de producción hídrica, hay suelos de textura moderadamente gruesa y textura media. Con respecto a la permeabilidad, en el área donde se encuentran valores altos de producción de agua, existe una permeabilidad media y generalmente alta.

En cuanto al método de separación de caudales se muestran que en porcentaje existe mayor cantidad de aporte de aguas subterráneas respecto al caudal total para las sub-cuencas del Grupo A. Existe un aporte de aguas subterráneas entre el 40,7% y 53,3% para las sub-cuencas del Grupo A. El aporte de aguas subterráneas para las sub-cuencas del Grupo B está entre 19,8% y 29,3%. Sin embargo, en cuanto a cantidad las sub-cuencas del Grupo B tienen un mayor aporte de aguas subterráneas, es decir, una mayor recarga del acuífero. El aporte de aguas subterráneas para el Grupo A está en un rango entre 58,4 mm/año m<sup>2</sup> y 127,6 mm/año m<sup>2</sup>. Para las sub-cuencas del Grupo B, el aporte de aguas subterráneas está entre 187,3 mm/año m<sup>2</sup> y 553,4 mm/año m<sup>2</sup>. Lo que implica que la mayor cantidad de agua subterránea aportante viene de la zona oriental.

Para la metodología de la separación de caudal base el coeficiente de recesión más apropiado según Nathan y McMahon, (1990) utilizado fue de 0,925. El valor de BFI fue considerado en función del tipo de corriente y acuífero. Para este estudio se tomó el valor de 0,80 para corrientes perennes con acuíferos porosos.

Los valores de recarga evaluados según el balance hídrico superficial son mayores a los determinados a través de la separación de hidrogramas. Lo cual concuerda con la teoría planteada, la misma que explica que a través del primer método se obtiene una estimación de la máxima recarga potencial del acuífero.

La recarga registrada en las sub-cuencas ubicadas en la zona oriental es mayor tanto para el método del balance superficial como el método de separación de caudales. Lo que ratifica que existe una mayor recarga en las sub-cuencas ubicadas en la zona oriental.

Los algoritmos numéricos o filtros utilizados incorporan características del acuífero y la corriente, además de parámetros que representan las condiciones físicas de la cuenca en estudio. Lo que implica que el algoritmo usado vincula variables superficiales y subterráneas acercándonos mejor a las condiciones reales del sistema.

En cuanto a los resultados obtenidos en el tercer método, aplicación del modelo GR2M, se puede observar que se obtuvo un ajuste satisfactorio solo para el análisis de los datos de la sub-cuenca H033. Para el resto de sub-cuencas analizadas no se mostró un ajuste respecto a la tendencia de los datos ni a los valores de los caudales pico.

Los procedimientos presentados en esta investigación son herramientas de gran utilidad para la determinación de la recarga de acuíferos lo cual constituye en un importante aporte.

El factor limitante para el desarrollo de este estudio ha sido definitivamente la base de datos empleada ya que esta se encontraba en gran parte incompleta. Se realizó un análisis estadístico a la base de datos con el propósito de que la misma sea de calidad, se encuentre homogénea y esté completa. Sin embargo, este procedimiento no fue suficiente para la aplicación de la base de datos en todas las metodologías. Lo cual concuerda con las conclusiones expuestas por Torres (2018) en las cuales expresa que la obtención de información de datos es crítica.

Para mejorar los resultados del modelo GR2M se recomienda tener una base de datos de caudal más completa e incluir un análisis de curvas de recesión en el estudio de separación del caudal base. Lo cual corroboraría los resultados obtenidos a través de la utilización de los métodos de filtros numéricos.

## CAPÍTULO 6.

### 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asorey, G., Castiñeira, L., Solman, S., y Pascual, M. (2017) *PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO LIMAY: MODELADO Y CALIBRACIÓN*  
Artículo en edición. pp 39
- Auge, M. (2007). Agua fuente de vida. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.  
pp 31. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas.
- Barlow, P. M., Cunningham, W. L., Zhai, T., & Gray, M. (2015). US Geological Survey groundwater toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0): user guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data. US Department of the Interior, US Geological Survey, 40pp.
- Brodie, R. S., y Hostetler, S. (2005, November). *A review of techniques for analyzing baseflow from stream hydrographs*. In *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference* (Vol. 28). Auckland New Zealand.
- Budyko, M. (1961) *The Heat Balance of the Earth's Surface*, US Department of Commer., Washington, D.C., USA, 259 pp
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., y Wyseure, G. (2006). *Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes*. *Journal of Hydrology*, 329(3), 413-421.
- Buytaert, W., B. De Bievre (2012) *Water for cities: the impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes*. *Water Resources Research*, Vol 48, W08503, doi:10.1029/2011WR011755, 13pp
- Brandizi, L., Flaherty, S., Pessacg, N., Liberoff, A., García Azorey, M., y Pascual, M. (2014). Valoración de servicios ecosistémicos en el Río Chubut. Red

- Ecofluvial de la Patagonia. 2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, septiembre 2014, Santa Fé, Argentina, 9pp.
- Caballero, N. (2014). Revisión del marco conceptual sobre Servicios Ecosistémicos. *Servicios Ecosistémicos*, 3. 94pp
- Cabrera, J. (2013). Modelos Agregados: GR2m. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_6.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_6.pdf) [Consulta: 30 de mayo de 2016].
- Camargo, E, Carreño, J., y Barón, E. (2015). Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, 3(1), 77-83.
- Camacho-Valdez, V., y Ruiz-Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4), 13pp.
- Carmona, D., Ramírez, G., González, M., Cacicano, R., y Avalos, J. (2013). Ajuste y validación del modelo hidrológico GR2M en la cuenca alta del río Nazas. *Agrofaz*, 13(2), 9pp.
- Castaño, S., y Murillo, J. (2001). Papel de los recursos hídricos subterráneos en el esquema general del suministro conjunto de agua a la comarca de la Marina Baja (Alicante). *Boletín geológico y minero*, 112(1), 77-94.
- Chamorro, K. (2016). Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha Y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra. Tesis -Universidad Técnica del Norte, Ibarra, pp 149
- Chimborazo, G. A. D. (2011). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Chimborazo. Dirección de Planificación, Riobamba. Ecuador, 229pp.
- Córdoba, M., Del Coco, V., & Basualdo, J. (2010). Agua y salud humana. *Química Viva*, 9.

- Coy, L. Ajuste y validación del modelo precipitación–escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca nevado, 11pp.
- Cruz, E, y Romero, J. (2018). Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: gr2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas, 120pp.
- Eckhardt, K. (2005). *How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes: An International Journal*, 19(2), 507-515.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., y McVicar, T. R. (2012). *Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. Journal of Hydrology*, 35-50 pp.
- Galárraga-Sánchez, R., & South American Technical Advisory Committee. (2000). Informe nacional sobre la gestión del agua en el Ecuador. In Informe nacional sobre la gestión del agua en el Ecuador. Global Water Partnership, 120 pp.
- Gaspari, F., Díaz, A, Delgado, M, y Senisterra, G. (2015). *Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía*, Vol. 114 (Núm. Esp.1) Agricultura Familiar, Agroecología y Territorio 214-221, 8pp.
- Gidahatari, 2019. Gestión Sostenible del agua. Conjunto de Modelos InVEST para la valoración y análisis espacial de los servicios ecosistémicos. Recuperado de: <http://gidahatari.com/ih-es/conjunto-de-modelos-invest-para-la-valoracion-y-analisis-espacial-de-los-servicios-ecosistemicos>
- Gómez-Isidro, S., y Gómez-Ríos, V. L. (2016). *Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). Dyna*, 83(196), 213-222.
- Gómez, S., y Guzmán, J. (2011). *Separation of base flow in upper part of the Lebrija river basin. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 61, 41-52, 13pp.



- Guijarro J. (2016) *User's guide to climatol*. An R contributed package for homogenization of climatological series (and functions for drawing wind-rose and Walter&Lieth diagrams) Version 2.2, distributed under the GPL license, version 2 r newer, 40pp.
- Gutiérrez, C. (2014). *Hidrología básica y aplicada*, ISBN UPS: 978-9978-10-169-8, Editorial Universitaria Abya-Yala, Quito, Ecuador, 370pp.
- Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press ISBN 978-0-521-86396-4, Printed in the United Kingdom at the University Press, Cambridge, United Kingdom, 238pp.
- Hirata, R. Recursos Hídricos. In: Teixeira, W; Toledo, M. Motta C et all(org.). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. cap. 20, p. 421- 444.
- Iglesias C., Villarino, A. L., Martinez, J, Cabrerizo, L., Gargallo, M., Lorenzo, H., & Russolillo, J. (2011). Importancia del agua en la hidratación de la población española: documento FESNAD 2010. *Nutrición Hospitalaria*, 26(1), 27-36.
- Irstea (2019) Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. Equipe Hydrologie des bassins versants – Catchment hydrology research group <https://webgr.irstea.fr/modeles/mensuel-gr2m/fonctionnement-gr2m/>
- Jobbagy, E, Noretto, M, Santoni, C, y Baldi, G. (2008). El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología austral*, 18(3), 305-322.
- Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162(3-4), 299-318.
- Mancheno, N. (2010). *Análisis de la problemática y ampliación del sistema de agua potable en la ciudad de Riobamba*, (Bachelor's thesis, Ingeniero Civil, Quito, 2010) Escuela Politécnica del Ejército, 126pp, Sangolquí, Ecuador.
- Martínez, L, Moreno, M, Muñoz, J, García, R, y Hernández, J (2011). Cuantificación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana.

Consideraciones respecto a las definiciones de recursos renovables y disponibles. Boletín geológico y minero, 122(1), 17-36.

Matus, O., Faustino, J., & Jimenez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba (Costa Rica), 9pp.

Mena, S. (2010). Evolución de la dinámica de los escurrimientos en zonas de alta montaña: caso del Volcán Antisana (Bachelor's thesis-Ingeniería Civil, QUITO/EPN Escuela Politécnica Nacional /2010).pp 247

MODIS-NASA(2019) Moderate resolution imaging spectroradiometer Recuperado de: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>

Molinero, J. (2008). *Las Aguas Subterráneas En España Antes Las Directivas Europeas: Retos Y Perspectivas* (No. 26). IGME.

Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Ed. Alfaomega. Bogotá. Colombia. (F, C, D), 383pp.

Mouelhi, S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier (Doctoral dissertation, ENGREF (AgroParisTech)), 324pp.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. y Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. J. Hydrol. 318(1-4), 200-214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405003033?via%3Dihub>

Nathan, R. J., y McMahon, T. A. (1990). *Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses*. Water resources research, 26(7), 1465-1473.

Naranjo Gaibor, L. F. (2013). *Caracterización hidrogeológica de la Subcuenca del río Chambo*. (Bachelor's thesis, Ingeniero Geólogo, Quito, 2013) Universidad Central del Ecuador, 282pp, Quito, Ecuador.

- NRCS (January, 1998) Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Resource Concerns: Available Water Capacity. 2pp.
- OMM (2011) *Guía de prácticas climatológicas*. Organización Meteorológica Mundial. Tiempo-Clima-Agua. OMM-N°100, 128 pp.
- Perrin, C., Michel, C., y Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Pourrut, P., Gdmez, G., Bermeo, A., y Segovia, A. (1995). FACTORES CONDICIONANTES DE LOS REGÍMENES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS, 6pp.
- Procel, S. (2018) Ferramentas de gestão dos recursos hídricos: estudo de caso na bacia do baixo Rio Chambo (Equador) (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).pp 211
- Quintero, J. C. V., Castro, C. A. C., Garcés, H. P., y Escobar, J. F. (2017). Procesos de geoprocesamiento en la espacialización de servicios ecosistémicos en áreas de interés local. *Revista Ingenierías USBMed*, 8(1), 19-28.
- Quishpe, A. (2017). Caracterización Hidrometeorológica y estimación del balance hídrico en la cuenca del río Chambo (Bachelor's thesis, Ingeniero Civil, Quito, 2017), Escuela Politécnica Nacional, 206pp, Quito, Ecuador.
- Redhead, J. W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., ... y Bullock, J. M. (2016). Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 569 1418-1426.
- Risser, D, Gburek, W., y Folmar, G. (2005). *Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States* (Vol. 5038) Geological Survey (US), Scientific Investigations Report 2005-5038, 31 p, Virginia, United States.

- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., and Bierbower, W. (2015). *InVEST +VERSION+ User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 384pp, Minnesota, United States.
- Sloto, R, y Crouse, M. (1996). *HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis*. pp 51. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/wri/1996/4040/wri19964040.pdf>
- Sposito, G. (2017). *Understanding the budyko equation*. *Water*, 9(4):236.
- Teixeira, W; Toledo, M Motta de C.; FairchildAIRCHILD, Thomas R.; Taioli, Fabio. Decifrando a . (2010). São Paulo: Oficina de Textos. NLM. Teixeira W, ToledoMCM de, Fairchild TR, Taioli F. Decifrando a terra
- Torres Paguay, S. J. (2018). *Evaluación del servicio ecosistémico correspondiente a la producción de agua en la cuenca alta del Río Guayllabamba utilizando el modelo computacional InVEST* (Bachelor's thesis, Ingeniera Ambiental, Quito, 2018.), Escuela Politécnica Nacional, 111pp, Quito, Ecuador.
- Vegas, F., & Álvarez, C (2011). Estimación de las propiedades hidráulicas del acuífero superficial e cuencas húmedas de montaña mediante el análisis de caudales de recesión. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol. X. pp275 – 280, I.S.B.N.: 978-84-694-6642-1
- Wang Xiolan and Feng Yang (2010). *RHtestsV3 User Manual* Climate Research Division Atmospheric Science and Technology Directorate Science and Technology Branch, Environment Canada. Toronto, Ontario, Canadá. Recuperado de: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>. pp 27

## **CAPÍTULO 7.**

### **7 ANEXOS**

#### **7.1 VALORES DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL OBTENIDOS DE LA BASE DE DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS EN LA SECCIÓN METODOLOGÍA.**

PRECIPITACIÓN (mm/año)																
ESTACION/AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
M0008	4881	4621,3	4340,7	4609,7	4983,4	2530,2	4780,8	4881,3	4507	4734,1	4031,2	4158,8	4470,3	5120,2	4792,2	5054,5
M0029	168,7	1857,5	1136,1	912,9	1428,9	59,5	1139,7	1729,2	1531,5	1189,3	1304,6	1215,2	1206,8	1380,1	1310,8	1699,5
M0030		91	815	350	144,1	203,8	792,4	824,1	1469,7	718,4	810,5	714,7	237,8	562,5	489,2	
M0031	422,6	448	373,5	295	454,9	551,3	388,8	542,7	739,5	407	509,2	643,1	560,4	450,3	413,4	426,8
M0041	4872	3886,2	3830,6	3562,9	3194,5	2209,2	4056	4077	3281,5	3793,8	3234,5	3097,4	4031,6	3557,1	1142,7	
M0128	636,2		504,7	372,9	504,5	497,9	542,5	677,1	648,3	394,3	605,8	803,8	536,5	528,4	424,9	431,8
M0133	504,4	227,5	431,4	160,6	143,2		549,1	688,7	785	414,3	241,6	621,7	520,6	396,2	555,2	421
M0134	342,6	423,8		30			104,8	20,3								
M0135	468,8						75,3									
M0136	475,8	547,4	462,5	369,3	309,1		399	459,8	804,1	605,3	609,4	453,8	493,2	216,9	481,5	518,1
M0243	452,5	9,9														
M0258	820,4	521,5	593,7	437,9	568,3	536,4	566,1	753,9	761,3	485,8	698,7	741,9	549,5	571,2	570,8	609
M0377	927,6	596,3	632,1	656,7	758,1	2201,5	744,5	647		337,6	756,7	756,3	631,6	613,4	623,4	639
M0378	2103,3	2711,5	468,6	266,5	170,7		1595,1	3252,3	2872,9	2671,7	2615,1	2550,3	3025,9	3009,3	2751,8	3752,7
M0380	1044,3	779,3	800,3	983,6	1261,5	673,7	643,8	899,6	806,9	538,9	657,6	790	750	809	707,6	954,2
M0385	1379,1	1003,4	1496,3	574,8	564,8	358,1	812,5	1241,7	1135,7	426,8	1876,5	1250	1095,2	1114	1001,7	666,6
M0390			315,4	1048,4	918,5	814,8	399,5	1245,3	1262,7	541,3	119,9	517,9	826,3	738	972,6	696,3
M0391	936,2	828,7	932,9	943,9	618,3	316,3	1072,1	998,3	1477,6	1058,8	1130,9	956,7	1092,8	620	1006,8	783
M0392			393	343	333,3	247,8	434,3	340,1	692,3	30,3	536,6	456,6	484,6	322,3	622,5	455,5
M0393	867,3	361,6	628,7	450,1	540,3	556,2	718,5	800,9	875,6	527,9	752,5	703,8	729,7	402,9	658,4	534,6
M0394	140,5	78,2														
M0395	868,4	578,4	448,7	399,8	615,7	542	599,5	731,2	625,7	367,2	503,3	1020,4	575,7	579	686,9	595,9
M0396	1066,4	898,2	661,8	732,3	953,1	877,6	325,4	883,6	1450,5	1018,3	1625,7	2329,1	1502,3	1101,7	1363	613
M0397	1011,9	1085,2	963,8	844,4	648,2	715,1	1015	815,9	1356,2	979,2	1355,4	1052	1360,5	944,6	1131,6	1136,3
M0402	1489,4	700,7	1594,7	778,2	679,3	118,4	1349,6	1171,2	1210,2	810,7	946,8	915,6	1649,5	1294,1	1463	1357,7
M0403	604,2	292,6	301,9	460	381,8	513	614,7	712,7	1156,3	987,3	481,5	491,2	450,6	214,8	547,6	293,2
M0404	1352,4	1087,9	1214	964,6	905,6	782,6	1233,3	1173,5	1704,3	789	1459,3	1176,9	1698,9	1080,5	1041,8	1267,5
M0405	494,1	480,8	456,5	313,2	304,1	399,6	504,2	377,3	607,2	473,5	521,7	441,8	488,8	286,6	482,3	328,5
M0407	135,1		256	520,4	594,6	664,9	697,8	846,2	896,1	593	766,8	925,4	656,2	536,2	765	749,2
M0408	560,4	355,5	470,4	233	355,3	405,6	424,4	488,2	690,5	309,9	528	591,3	296,6	263,4	336	232,1
M0409	1083,4	581,4	514,1	260,8	870,1	1090	1152,7	1633,4	1918	1655,7	1506,5	947,7	822,2	671,1	765,5	563,1
M0411	505,7	485,4	463,8	289,5	493,5	536,1	569,5	719,7	851,1	445,2	543,6	903,7	614,1	500,1	420,9	441,8
M0535				159	586,5	1040,7	1674,6	1852,8	748,3	857,9	1046,2	790,7	643,6	804,7	432,3	
M0540			136,1	764,2	687,3	582,5	979,3	773,4	1068,6			183				
M1036							554,1	563,3	756,3	266,5	559,9	665,3	431,7	284,5	494	474,6
M1040									883,9	3217,7	2515,1	3147,6	2255	2537,2	2435,3	2316,6
M1107								638,8	1117,1	609,3	754,5	843,2	902,5	483,3	919,6	419,9
M1130		74,4	601,9						274,9	425,4		924,9	517	607,1	564,6	225,1
M1155	2561,2	963,3	273,3	1382,9	1593,3	1169,4	1602,4	1282	2345	1702,1	2170,9	1844,5	2019,5			1254,9
M1209						280,6	609,8	421,8	703,5	287,7	224,3	572,8	684,4	389,3	720,6	725,6
M1260														34,5	764,1	301,2
M1261														36,2	929,6	677,9
M0399	710,9	655,9	611,2	315,8	609	737,9	847,7	746	1171,1	745,4	961,2	659,7	565,1	409,7	698,9	476,7

Elaboración: Andrade, 2019

## **7.2 VALORES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMOS Y MINIMOS ANUALES PARA LAS SUB-CUENCAS DE LOS GRUPOS A Y B**

**VALORES MÍNIMOS DE PRECIPITACIÓN (mm) POR SUBCUENCA Y POR AÑO**

No	Sub-cuenca	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio (Min)
1	H0786	851,051	590,123	622,029	486,366	735,43	511,45	617,071	610,763	649,384	521,45	645,107	729,396	602,268	487,283	552,574	791,481	625,201625
2	H0333	1107,88	1099,87	936,091	683,527	1024,8	791,171	924,097	1153,5	1369,83	758,369	1076,8	1036,6	1057,05	786,533	776,035	1386,97	998,0701875
3	H0787	869,95	992,929	848,911	539,921	1173,08	528,623	667,437	835,082	1076,69	581,677	764,116	868,245	781,43	786,089	692,881	1314,04	832,5688125
4	H0788	1181,5	1056,06	991,24	668,716	1221,69	575,368	677,236	1119,95	1148,15	728,39	878,695	942,894	791,594	813,945	800,591	1834,43	964,4030625
5	H0789	874,276	901,499	722,336	528,864	999,683	532,539	674,778	754,905	703,248	580,658	771,377	834,531	707,39	595,367	686,466	1042,24	744,3848125
6	H0790	724,262	716,69	624,214	493,312	538,912	536,768	651,097	694,462	625,772	551,103	708,974	705,903	667,754	514,971	610,931	611,948	623,5670625

Elaboración: Andrade, 2019

**VALORES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN (mm) POR SUBCUENCA Y POR AÑO**

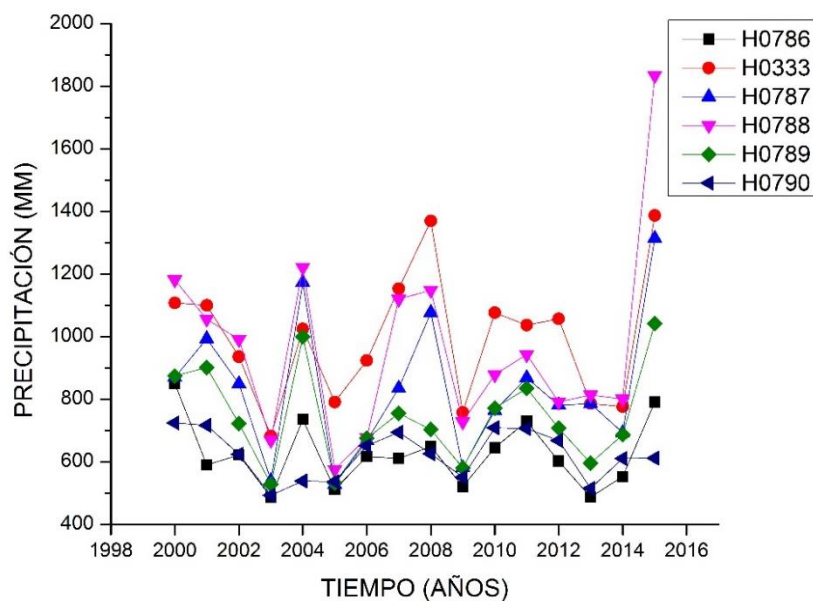
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio (Max)
1	H0786	1302,62	985,197	931,832	730,036	1091,21	1003,61	900,866	1471,81	1210,44	698,95	1389,55	1092,22	1433,7	1048,05	1219,11	1429,52	1121,170063
2	H0333	1716,93	1732,59	1393,85	903,572	1496,52	926,658	1147,94	1557,17	1940,23	945,631	1265,69	1184,1	1337,96	928,231	917,578	1852,97	1327,97625
3	H0787	1119,9	1047,92	1199,44	722,278	1452,95	580,325	695,901	1010,87	1273,61	695,299	955,396	1046,21	1040,52	1101,64	786,65	1693,36	1026,391813
4	H0788	1654,46	1307,74	1337,3	1045,35	1635,9	606,563	833,837	1954,56	1745,15	1377,64	1551,5	1576,63	1611,57	1604,05	1589,55	2480,86	1494,54125
5	H0789	977,942	1017,57	931,338	573,839	1248,21	599,552	721,546	900,035	1241,54	650,34	807,947	990,764	1013,13	1061,11	714,824	1370,87	926,2848125
6	H0790	1045,45	1021,97	959,809	590,357	1188,78	613,318	735,352	954,699	1109,82	771,5	921,985	1020,37	861,78	787,139	762,901	1246,18	911,963125

Elaboración: Andrade, 2019

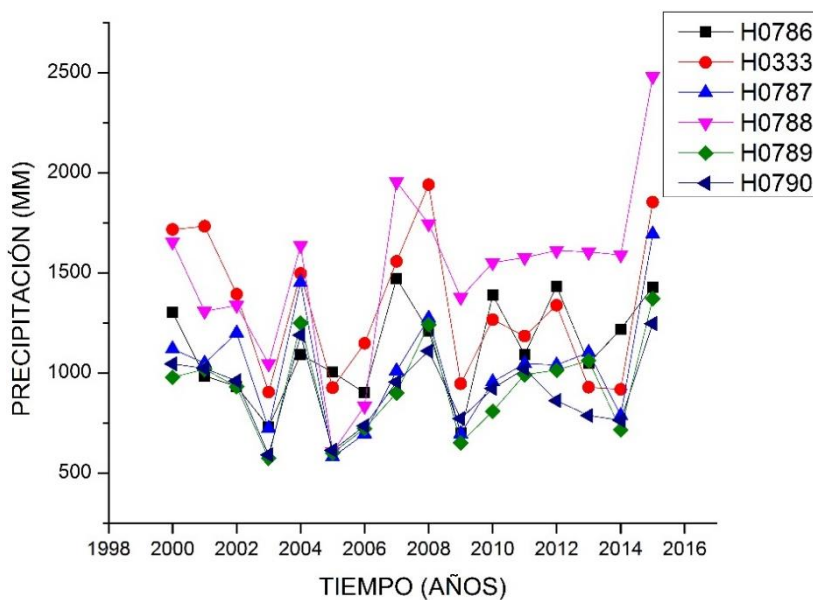


**Gráficas** Precipitación vs. Tiempo para valores mínimos y máximos para cada una de las Sub-cuencas analizadas

Precipitaciones mínimas



Precipitaciones máximas



### **7.3 CÓDIGO EN MATLAB DEL MODELO DE PRODUCCIÓN DE AGUA BASADO EN LA CURVA DE BUDYKO**

```

%%-----
%%WATER YIELD MODEL BASED ON BUDYKO CURVE
%%Ing. Amalia Andrade e Ing. Xavier Zapata-Rios, PhD
%%-----
% applied at the catchment scale

clc

clear all

%%%USO DE IMAGENES MODIS PARA%
%%EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA%

%%-----

%INGRESO DE DATOS

%Input data Precipitation and Reference Evapotranspiration data

%año 2000

P0=dlmread(sprintf('prec_2000_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
P0_1=dlmread(sprintf('prec_2000_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
ETO0=dlmread(sprintf('evap_pot_2000_136_157.txt'),",6,0");%reference evapotranspiration
P0(P0==-9999)=0;
P0_1(P0_1==-9999)=NaN;
ETO0(ETO0==-9999)=NaN;

%año 2001

P1=dlmread(sprintf('prec_2001_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
P1_1=dlmread(sprintf('prec_2001_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
ETO1=dlmread(sprintf('evap_pot_2001_136_157.txt'),",6,0");%reference evapotranspiration
P1(P1==-9999)=0;
P1_1(P1_1==-9999)=NaN;
ETO1(ETO1==-9999)=NaN;

%año 2002

P2=dlmread(sprintf('prec_2002_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
P2_1=dlmread(sprintf('prec_2002_136_157.txt'),",6,0");%precipitation
ETO2=dlmread(sprintf('evap_pot_2002_136_157.txt'),",6,0");%reference evapotranspiration
P2(P2==-9999)=0;
P2_1(P2_1==-9999)=NaN;
ETO2(ETO2==-9999)=NaN;

%año 2003

```

```

P3=dlmread(sprintf('prec_2003_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P3_1=dlmread(sprintf('prec_2003_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO3=dlmread(sprintf('evap_pot_2003_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P3(P3==-9999)=0;
P3_1(P3_1==-9999)=NaN;
ETO3(ETO3==-9999)=NaN;
%año 2004
P4=dlmread(sprintf('prec_2004_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P4_1=dlmread(sprintf('prec_2004_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO4=dlmread(sprintf('evap_pot_2004_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P4(P4==-9999)=0;
P4_1(P4_1==-9999)=NaN;
ETO4(ETO4==-9999)=NaN;
%año 2005
P5=dlmread(sprintf('prec_2005_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P5_1=dlmread(sprintf('prec_2005_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO5=dlmread(sprintf('evap_pot_2005_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P5(P5==-9999)=0;
P5_1(P5_1==-9999)=NaN;
ETO5(ETO5==-9999)=NaN;
%año 2006
P6=dlmread(sprintf('prec_2006_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P6_1=dlmread(sprintf('prec_2006_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO6=dlmread(sprintf('evap_pot_2006_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P6(P6==-9999)=0;
P6_1(P6_1==-9999)=NaN;
ETO6(ETO6==-9999)=NaN;
%año 2007
P7=dlmread(sprintf('prec_2007_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P7_1=dlmread(sprintf('prec_2007_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO7=dlmread(sprintf('evap_pot_2007_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P7(P7==-9999)=0;
P7_1(P7_1==-9999)=NaN;
ETO7(ETO7==-9999)=NaN;

```

**%año 2008**

```

P8=dlmread(sprintf('prec_2008_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P8_1=dlmread(sprintf('prec_2008_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO8=dlmread(sprintf('evap_pot_2008_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P8(P8===-9999)=0;
P8_1(P8_1===-9999)=NaN;
ETO8(ETO8===-9999)=NaN;

```

**%año 2009**

```

P9=dlmread(sprintf('prec_2009_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P9_1=dlmread(sprintf('prec_2009_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO9=dlmread(sprintf('evap_pot_2009_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P9(P9===-9999)=0;
P9_1(P9_1===-9999)=NaN;
ETO9(ETO9===-9999)=NaN;

```

**%año 2010**

```

P10=dlmread(sprintf('prec_2010_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P10_1=dlmread(sprintf('prec_2010_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO10=dlmread(sprintf('evap_pot_2010_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P10(P10===-9999)=0;
P10_1(P10_1===-9999)=NaN;
ETO10(ETO10===-9999)=NaN;

```

**%año 2011**

```

P11=dlmread(sprintf('prec_2011_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P11_1=dlmread(sprintf('prec_2011_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO11=dlmread(sprintf('evap_pot_2011_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P11(P11===-9999)=0;
P11_1(P11_1===-9999)=NaN;
ETO11(ETO11===-9999)=NaN;

```

**%año 2012**

```

P12=dlmread(sprintf('prec_2012_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
P12_1=dlmread(sprintf('prec_2012_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
ETO12=dlmread(sprintf('evap_pot_2012_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
P12(P12===-9999)=0;
P12_1(P12_1===-9999)=NaN;

```

```
ETO12(ETO12==-9999)=NaN;
```

**%año 2013**

```
P13=dlmread(sprintf('prec_2013_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
P13_1=dlmread(sprintf('prec_2013_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
ETO13=dlmread(sprintf('evap_pot_2013_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
```

```
P13(P13==-9999)=0;
```

```
P13_1(P13_1==-9999)=NaN;
```

```
ETO13(ETO13==-9999)=NaN;
```

**%año 2014**

```
P14=dlmread(sprintf('prec_2014_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
P14_1=dlmread(sprintf('prec_2014_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
ETO14=dlmread(sprintf('evap_pot_2014_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
```

```
P14(P14==-9999)=0;
```

```
P14_1(P14_1==-9999)=NaN;
```

```
ETO14(ETO14==-9999)=NaN;
```

**%año 2015**

```
P15=dlmread(sprintf('prec_2015_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
P15_1=dlmread(sprintf('prec_2015_136_157.txt'),",6,0);%precipitation
```

```
ETO15=dlmread(sprintf('evap_pot_2015_136_157.txt'),",6,0);%reference evapotranspiration
```

```
P15(P15==-9999)=0;
```

```
P15_1(P15_1==-9999)=NaN;
```

```
ETO15(ETO15==-9999)=NaN;
```

```
%Building a cell array for Precipitation and Reference ETo
```

```
P={P0,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14,P15};
```

```
P_1={P0_1,P1_1,P2_1,P3_1,P4_1,P5_1,P6_1,P7_1,P8_1,P9_1,P10_1,P11_1,P12_1,P13_1,P14_1,P15_1};
```

```
ETO={ETO0,ETO1,ETO2,ETO3,ETO4,ETO5,ETO6,ETO7,ETO8,ETO9,ETO10,ETO11,ETO12,ETO13,ETO14,ETO15};
```

```
%%----- %Input
```

**Catchment characteristics soil and land use**

```
Soildep=dlmread(sprintf('prof_suelo_136_157.txt'),",6,0);%soil depth
```

```
Soildep(Soildep==-9999)=NaN;
```

```
PAWC=dlmread(sprintf('pawc136_157.txt'),",6,0);%plant-available water capacity
```

```

PAWC(PAWC===-9999)=NaN;
LUSE=dlmread(sprintf('kc_lucode_136_157.txt'),' ',6,0);%land use
AWC=PAWC.*Soildep; %available water capacity
AWC(AWC===-9999)=NaN;
LUSE(LUSE===-9999)=NaN;
%%-----
%For Potential Evapotranspiration KC values according to biophysical
%table from the InVEST model manual
%change land use codes into KC values
KC=LUSE;
KC(KC==10)=0.3; %Residential & Comm.
KC(KC==33)=1;%Permanent and lentic water
KC(KC==40)=0.4;%Snow
KC(KC==54)=1;%Forest Closed mixed.
KC(KC==71)=0.65;%Grains (GRANOS)
KC(KC==74)=0.65;%Double cropping?
KC(KC==82)=0.6;%Field crops
KC(KC==85)=0.85;%Pasture
KC(KC==87)=0.5;%Natural Shrub
KC(KC==88)=0.2;%Bare/fallow
%%-----
%CALCULATION PET EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA POR PÍXEL EN LA CUENCA.
for m=1:16
    PET{m}=KC.*ETO{m};
end
%%-----%Input of
watersheds extension (1 is a cell within the catchment, -9999
%%-----
catestudio=dlmread(sprintf('area_estudio136_157.txt'),' ',6,0
cat_H0333=dlmread(sprintf('cat_H0333.txt'),' ',6,0
cat_H0337=dlmread(sprintf('cat_H0337.txt'),' ',6,0
cat_H0339=dlmread(sprintf('cat_H0339.txt'),' ',6,0
cat_H0375=dlmread(sprintf('cat_H0375.txt'),' ',6,0
cat_H0787=dlmread(sprintf('cat_H0787.txt'),' ',6,0

```

```
cat_H0898=dlmread(sprintf('cat_H0898.txt'),",6,0
cat_H0910=dlmread(sprintf('cat_H0910.txt'),",6,0
cat_H1057=dlmread(sprintf('cat_H1057.txt'),",6,0
cat_H1137=dlmread(sprintf('cat_H1137.txt'),",6,0
cat_H0788=dlmread(sprintf('cat_H0788.txt'),",6,0
cat_H0790=dlmread(sprintf('cat_H0790.txt'),",6,0
cat_H0789=dlmread(sprintf('cat_H0789.txt'),",6,0
cat_H0786=dlmread(sprintf('cat_H0786.txt'),",6,0
cat_H0826=dlmread(sprintf('cat_H0826.txt'),",6,0
```

```
catestudio_1=dlmread(sprintf('area_estudio136_157.txt'),",6,0);
catestudio_1(catestudio_1==-9999)=NaN;
catestudio_1(catestudio_1==0)=NaN;
```

```
cat_H0333_1=dlmread(sprintf('cat_H0333.txt'),",6,0);
cat_H0333_1(cat_H0333_1==-9999)=NaN;
cat_H0333_1(cat_H0333_1==0)=NaN;
```

```
cat_H0337_1=dlmread(sprintf('cat_H0337.txt'),",6,0);
cat_H0337_1(cat_H0337_1==-9999)=NaN;
cat_H0337_1(cat_H0337_1==0)=NaN;
```

```
cat_H0339_1=dlmread(sprintf('cat_H0339.txt'),",6,0);
cat_H0339_1(cat_H0339_1==-9999)=NaN;
cat_H0339_1(cat_H0339_1==0)=NaN;
```

```
cat_H0375_1=dlmread(sprintf('cat_H0375.txt'),",6,0);
cat_H0375_1(cat_H0375_1==-9999)=NaN;
cat_H0375_1(cat_H0375_1==0)=NaN;
```

```
cat_H0787_1=dlmread(sprintf('cat_H0787.txt'),",6,0);
cat_H0787_1(cat_H0787_1==-9999)=NaN;
cat_H0787_1(cat_H0787_1==0)=NaN;
```



```
cat_H0898_1=dlmread(sprintf('cat_H0898.txt'),",6,0);
cat_H0898_1(cat_H0898_1===-9999)=NaN;
cat_H0898_1(cat_H0898_1==0)=NaN;
cat_H0910_1=dlmread(sprintf('cat_H0910.txt'),",6,0);
cat_H0910_1(cat_H0910_1===-9999)=NaN;
cat_H0910_1(cat_H0910_1==0)=NaN;

cat_H1057_1=dlmread(sprintf('cat_H1057.txt'),",6,0);
cat_H1057_1(cat_H1057_1===-9999)=NaN;
cat_H1057_1(cat_H1057_1==0)=NaN;

cat_H1137_1=dlmread(sprintf('cat_H1137.txt'),",6,0);
cat_H1137_1(cat_H1137_1===-9999)=NaN;
cat_H1137_1(cat_H1137_1==0)=NaN;

cat_H0788_1=dlmread(sprintf('cat_H0788.txt'),",6,0);
cat_H0788_1(cat_H0788_1===-9999)=NaN;
cat_H0788_1(cat_H0788_1==0)=NaN;

cat_H0790_1=dlmread(sprintf('cat_H0790.txt'),",6,0);
cat_H0790_1(cat_H0790_1===-9999)=NaN;
cat_H0790_1(cat_H0790_1==0)=NaN;

cat_H0789_1=dlmread(sprintf('cat_H0789.txt'),",6,0);
cat_H0789_1(cat_H0789_1===-9999)=NaN;
cat_H0789_1(cat_H0789_1==0)=NaN;

cat_H0786_1=dlmread(sprintf('cat_H0786.txt'),",6,0);
cat_H0786_1(cat_H0786_1===-9999)=NaN;
cat_H0786_1(cat_H0786_1==0)=NaN;

cat_H0826_1=dlmread(sprintf('cat_H0826.txt'),",6,0);
cat_H0826_1(cat_H0826_1===-9999)=NaN;
cat_H0826_1(cat_H0826_1==0)=NaN;
```

```

%%-----
%%Summary of data per watershed or sub-basin
%%-----%catestudio
Entire study Basin
catestudio(catestudio==-9999)=0;
AWC_estudio=AWC.*catestudio;%AWC at catestudio
AAWC_estudio=mean2(nonzeros(AWC_estudio));
Areacatestudio=sum(sum(catestudio));%Area catestudio en Km2
for m=1:16
P_estudio{m}=P{m}.*catestudio;% Precipitation at catestudio entire study basin
P_estudio_1{m}=P_1{m}.*catestudio_1;% Precipitation at catestudio entire study basin
PP_estudio{m}=mean2(nonzeros(P_estudio{m}));%Average Precipitation at catestudio
ETO_estudio {m}=ETO{m}.*catestudio;
EETO_estudio {m}=mean2(nonzeros(ETO_estudio {m}));%Average ETP from MODIS at catestudio
PET_estudio{m}=PET{m}.*catestudio_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_estudio{m}=mean2(nonzeros(PET_estudio{m}));%Average Potential evapotranspiration at
catestudio
end
%%----- %cat_H0333
cat_H0333(cat_H0333==-9999)=0;
AWC_H0333=AWC.*cat_H0333;%AWC
AAWC_H0333=mean2(nonzeros(AWC_H0333));
Areacat_H0333=sum(sum(cat_H0333));%Area cat_H0333 en Km2
for m=1:16
P_H0333{m}=P{m}.*cat_H0333;% Precipitation at cat_H0333
P_H0333_1{m}=P_1{m}.*cat_H0333_1;% Precipitation at cat_H0333
PP_H0333{m}=mean2(nonzeros(P_H0333{m}));%Average Precipitation at cat_H0333
ETO_H0333{m}=ETO{m}.*cat_H0333;
EETO_H0333{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0333{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0333
PET_H0333{m}=PET{m}.*cat_H0333_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0333{m}=mean2(nonzeros(PET_H0333{m}));
end
%%----- %cat_H0337
cat_H0337(cat_H0337==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros

```

```

AWC_H0337=AWC.*cat_H0337;%AWC
AAWC_H0337=mean2(nonzeros(AWC_H0337));
Areacat_H0337=sum(sum(cat_H0337)); %Area cat_H0337 en Km2
for m=1:16
P_H0337{m}=P{m}.*cat_H0337;% Precipitation at cat_H0337
P_H0337_1{m}=P_1{m}.*cat_H0337_1;% Precipitation at cat_H0337
PP_H0337{m}=mean2(nonzeros(P_H0337{m}));%Average Precipitation at cat_H0337
ETO_H0337{m}=ETO{m}.*cat_H0337;%Reference evapotranspiration from MODIS considerado
evapotranspiración de referencia
EETO_H0337{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0337{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0337
PET_H0337{m}=PET{m}.*cat_H0337_1;
PPET_H0337{m}=mean2(nonzeros(PET_H0337{m}));
end
%%----- %cat_H0339
cat_H0339(cat_H0339==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0339=AWC.*cat_H0339;%AWC
AAWC_H0339=mean2(nonzeros(AWC_H0339));
Areacat_H0339=sum(sum(cat_H0339));%Area cat_H0339 en Km2
for m=1:16
P_H0339{m}=P{m}.*cat_H0339;% Precipitation at cat_H0339
P_H0339_1{m}=P_1{m}.*cat_H0339_1;% Precipitation at cat_H0339
PP_H0339{m}=mean2(nonzeros(P_H0339{m}));%Average Precipitation at cat_H0339
ETO_H0339{m}=ETO{m}.*cat_H0339;%Reference evapotranspiration from MODIS considerado
evapotranspiración de referencia
EETO_H0339{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0339{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0339
PET_H0339{m}=PET{m}.*cat_H0339_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0339{m}=mean2(nonzeros(PET_H0339{m}));
end
%%----- %cat_H0375
cat_H0375(cat_H0375==-9999)=0;
AWC_H0375=AWC.*cat_H0375;%AWC
AAWC_H0375=mean2(nonzeros(AWC_H0375));
Areacat_H0375=sum(sum(cat_H0375));%Area cat_H0375 en Km2
for m=1:16
P_H0375{m}=P{m}.*cat_H0375;% Precipitation at cat_H0375

```

```

P_H0375_1{m}=P_1{m}.*cat_H0375_1;% Precipitation at cat_H0375
PP_H0375{m}=mean2(nonzeros(P_H0375{m}));%Average Precipitation at cat_H0375
ETO_H0375{m}=ETO{m}.*cat_H0375;%Reference evapotranspiration from MODIS considerado
evapotranspiración de referencia
EETO_H0375{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0375{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0375
PET_H0375{m}=PET{m}.*cat_H0375_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0375{m}=mean2(nonzeros(PET_H0375{m}));
end

%%-----%cat_H0787
cat_H0787(cat_H0787==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0787=AWC.*cat_H0787;%AWC
AAWC_H0787=mean2(nonzeros(AWC_H0787));
Areacat_H0787=sum(sum(cat_H0787));%Area cat_H0787 en Km2
for m=1:16
P_H0787{m}=P{m}.*cat_H0787;% Precipitation at cat_H0375
P_H0787_1{m}=P_1{m}.*cat_H0787_1;% Precipitation at cat_H0375
PP_H0787{m}=mean2(nonzeros(P_H0787{m}));%Average Precipitation at cat_H0787
ETO_H0787{m}=ETO{m}.*cat_H0787;
EETO_H0787{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0787{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0787
PET_H0787{m}=PET{m}.*cat_H0787_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0787{m}=mean2(nonzeros(PET_H0787{m}));%Average Potential evapotranspiration at
cat_H0787
end

%%-----%cat_H0898
cat_H0898(cat_H0898==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0898=AWC.*cat_H0898;%AWC
AAWC_H0898=mean2(nonzeros(AWC_H0898));
Areacat_H0898=sum(sum(cat_H0898));%Area cat_H0898 en Km2
for m=1:16
P_H0898{m}=P{m}.*cat_H0898;% Precipitation at cat_H0898
P_H0898_1{m}=P_1{m}.*cat_H0898_1;% Precipitation at cat_H0898
PP_H0898{m}=mean2(nonzeros(P_H0898{m}));%Average Precipitation at cat_H0898

```

```
ETO_H0898{m}=ETO{m}.*cat_H0898;%Reference evapotranspiration from MODIS considerado
evapotranspiración de referencia
```

```
EETO_H0898{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0898{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0898
```

```
PET_H0898{m}=PET{m}.*cat_H0898_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
```

```
PPET_H0898{m}=mean2(nonzeros(PET_H0898{m}));%Average Potential evapotranspiration at
cat_H0898
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0910
```

```
cat_H0910(cat_H0910==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
```

```
AWC_H0910=AWC.*cat_H0910;%AWC
```

```
AAWC_H0910=mean2(nonzeros(AWC_H0910));
```

```
Areacat_H0910=sum(sum(cat_H0910));%Area cat_H0910 en Km2
```

```
for m=1:16
```

```
P_H0910{m}=P{m}.*cat_H0910;% Precipitation at cat_H0910
```

```
P_H0910_1{m}=P_1{m}.*cat_H0910_1;% Precipitation at cat_H0910
```

```
PP_H0910{m}=mean2(nonzeros(P_H0910{m}));%Average Precipitation at cat_H0910
```

```
ETO_H0910{m}=ETO{m}.*cat_H0910;
```

```
EETO_H0910{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0910{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0910
```

```
PET_H0910{m}=PET{m}.*cat_H0910_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
```

```
PPET_H0910{m}=mean2(nonzeros(PET_H0910{m}));
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H1057
```

```
cat_H1057(cat_H1057==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
```

```
AWC_H1057=AWC.*cat_H1057;%AWC
```

```
AAWC_H1057=mean2(nonzeros(AWC_H1057));
```

```
Areacat_H1057=sum(sum(cat_H1057));%Area cat_H1057 en Km2
```

```
for m=1:16
```

```
P_H1057{m}=P{m}.*cat_H1057;% Precipitation at cat_H1057
```

```
P_H1057_1{m}=P_1{m}.*cat_H1057_1;% Precipitation at cat_H1057
```

```
PP_H1057{m}=mean2(nonzeros(P_H1057{m}));%Average Precipitation at cat_H1057
```

```
ETO_H1057{m}=ETO{m}.*cat_H1057
```

```
EETO_H1057{m}=mean2(nonzeros(ETO_H1057{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H1057
```

```
PET_H1057{m}=PET{m}.*cat_H1057_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
```

```
PPET_H1057{m}=mean2(nonzeros(PET_H1057{m}));
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H1137
```

```
cat_H1137(cat_H1137==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
```

```
AWC_H1137=AWC.*cat_H1137;%AWC
```

```
AAWC_H1137=mean2(nonzeros(AWC_H1137));
```

```
Areacat_H1137=sum(sum(cat_H1137));%Area cat_H1137 en Km2
```

```
for m=1:16
```

```
P_H1137{m}=P{m}.*cat_H1137;% Precipitation at cat_H1137
```

```
P_H1137_1{m}=P_1{m}.*cat_H1137_1;% Precipitation at cat_H1137
```

```
PP_H1137{m}=mean2(nonzeros(P_H1137{m}));%Average Precipitation at cat_H1137
```

```
ETO_H1137{m}=ETO{m}.*cat_H1137;%Reference evapotranspiration from MODIS considerado evapotranspiración de referencia
```

```
EETO_H1137{m}=mean2(nonzeros(ETO_H1137{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H1137
```

```
PET_H1137{m}=PET{m}.*cat_H1137_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
```

```
PPET_H1137{m}=mean2(nonzeros(PET_H1137{m}));
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0788
```

```
cat_H0788(cat_H0788==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
```

```
AWC_H0788=AWC.*cat_H0788;%AWC
```

```
AAWC_H0788=mean2(nonzeros(AWC_H0788));
```

```
Areacat_H0788=sum(sum(cat_H0788));%Area cat_H0788 en Km2
```

```
for m=1:16
```

```
P_H0788{m}=P{m}.*cat_H0788;% Precipitation at cat_H0788
```

```
P_H0788_1{m}=P_1{m}.*cat_H0788_1;% Precipitation at cat_H0788
```

```
PP_H0788{m}=mean2(nonzeros(P_H0788{m}));%Average Precipitation at cat_H0788
```

```
ETO_H0788{m}=ETO{m}.*cat_H0788;
```

```
EETO_H0788{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0788{m}));%Average ETP from MODIS at cat_H0788
```

```
PET_H0788{m}=PET{m}.*cat_H0788_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
```

```
PPET_H0788{m}=mean2(nonzeros(PET_H0788{m}));
```

```
end
```

```

%%-----%cat_H0790
cat_H0790(cat_H0790==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0790=AWC.*cat_H0790;%AWC
AAWC_H0790=mean2(nonzeros(AWC_H0790));
Areacat_H0790=sum(sum(cat_H0790));%Area cat_H0790 en Km2
for m=1:16
P_H0790{m}=P{m}.*cat_H0790;% Precipitation at cat_H0790
P_H0790_1{m}=P_1{m}.*cat_H0790_1;% Precipitation at cat_H0790
PP_H0790{m}=mean2(nonzeros(P_H0790{m}));%Average Precipitation at cat_H0790
ETO_H0790{m}=ETO{m}.*cat_H0790;
EETO_H0790{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0790{m}));
PET_H0790{m}=PET{m}.*cat_H0790_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0790{m}=mean2(nonzeros(PET_H0790{m}));
end

%%-----%cat_H0789
cat_H0789(cat_H0789==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0789=AWC.*cat_H0789;%AWC
AAWC_H0789=mean2(nonzeros(AWC_H0789));
Areacat_H0789=sum(sum(cat_H0789));%Area cat_H0789 en Km2
for m=1:16
P_H0789{m}=P{m}.*cat_H0789;% Precipitation at cat_H0789
P_H0789_1{m}=P_1{m}.*cat_H0789_1;% Precipitation at cat_H0789
PP_H0789{m}=mean2(nonzeros(P_H0789{m}));%Average Precipitation at cat_H0789
ETO_H0789{m}=ETO{m}.*cat_H0789;
EETO_H0789{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0789{m}));
PET_H0789{m}=PET{m}.*cat_H0789_1;
PPET_H0789{m}=mean2(nonzeros(PET_H0789{m}));
end

%%-----
%cat_H0786
cat_H0786(cat_H0786==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0786=AWC.*cat_H0786;%AWC

```

```

AAWC_H0786=mean2(nonzeros(AWC_H0786));
Areacat_H0786=sum(sum(cat_H0786));%Area cat_H0786 en Km2
for m=1:16
P_H0786{m}=P{m}.*cat_H0786;% Precipitation at cat_H0786
P_H0786_1{m}=P_1{m}.*cat_H0786_1;% Precipitation at cat_H0786
PP_H0786{m}=mean2(nonzeros(P_H0786{m}));%Average Precipitation at cat_H0786
ETO_H0786{m}=ETO{m}.*cat_H0786;
EETO_H0786{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0786{m}));
PET_H0786{m}=PET{m}.*cat_H0786_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0786{m}=mean2(nonzeros(PET_H0786{m}));
end

%%-----%cat_H0826
cat_H0826(cat_H0826==-9999)=0;%convert no data -9999 to zeros
AWC_H0826=AWC.*cat_H0826;%AWC
AAWC_H0826=mean2(nonzeros(AWC_H0826));
Areacat_H0826=sum(sum(cat_H0826));%Area cat_H0826 en Km2
for m=1:16
P_H0826{m}=P{m}.*cat_H0826;% Precipitation at cat_H0826
P_H0826_1{m}=P_1{m}.*cat_H0826_1;% Precipitation at cat_H0826
PP_H0826{m}=mean2(nonzeros(P_H0826{m}));%Average Precipitation at cat_H0826
ETO_H0826{m}=ETO{m}.*cat_H0826;
EETO_H0826{m}=mean2(nonzeros(ETO_H0826{m}));
PET_H0826{m}=PET{m}.*cat_H0826_1;%Potential evapotranspiration ETO=KC*PET
PPET_H0826{m}=mean2(nonzeros(PET_H0826{m}));
end

%%-----%InVEST
DISTRIBUTED MODEL
%%-----
Z=30; %
%Calculating the parameter W for each basin
for m=1:16
Wi_estudio{m}=Z*(AWC_estudio./P_estudio_1{m})+1.25;

```



```

Wi_H0333{m}=Z*(AWC_H0333./P_H0333_1{m})+1.25;
Wi_H0337{m}=Z*(AWC_H0337./P_H0337_1{m})+1.25;
Wi_H0339{m}=Z*(AWC_H0339./P_H0339_1{m})+1.25;
Wi_H0375{m}=Z*(AWC_H0375./P_H0375_1{m})+1.25;
Wi_H0787{m}=Z*(AWC_H0787./P_H0787_1{m})+1.25;
Wi_H0898{m}=Z*(AWC_H0898./P_H0898_1{m})+1.25;
Wi_H0910{m}=Z*(AWC_H0910./P_H0910_1{m})+1.25;
Wi_H1057{m}=Z*(AWC_H1057./P_H1057_1{m})+1.25;
Wi_H1137{m}=Z*(AWC_H1137./P_H1137_1{m})+1.25;
Wi_H0788{m}=Z*(AWC_H0788./P_H0788_1{m})+1.25;
Wi_H0790{m}=Z*(AWC_H0790./P_H0790_1{m})+1.25;
Wi_H0789{m}=Z*(AWC_H0789./P_H0789_1{m})+1.25;
Wi_H0786{m}=Z*(AWC_H0786./P_H0786_1{m})+1.25;
Wi_H0826{m}=Z*(AWC_H0826./P_H0826_1{m})+1.25;
end
% Calculating Aridity Index (AI) PET/P (Potential evapotranspiration /
% precipitation)
for m=1:16
AI_estudio{m}=PET_estudio{m}./P_estudio_1{m};
AI_H0333{m}=PET_H0333{m}./P_H0333_1{m};
AI_H0337{m}=PET_H0337{m}./P_H0337_1{m};
AI_H0339{m}=PET_H0339{m}./P_H0339_1{m};
AI_H0375{m}=PET_H0375{m}./P_H0375_1{m};
AI_H0787{m}=PET_H0787{m}./P_H0787_1{m};
AI_H0898{m}=PET_H0898{m}./P_H0898_1{m};
AI_H0910{m}=PET_H0910{m}./P_H0910_1{m};
AI_H1057{m}=PET_H1057{m}./P_H1057_1{m};
AI_H1137{m}=PET_H1137{m}./P_H1137_1{m};
AI_H0788{m}=PET_H0788{m}./P_H0788_1{m};
AI_H0790{m}=PET_H0790{m}./P_H0790_1{m};
AI_H0789{m}=PET_H0789{m}./P_H0789_1{m};
AI_H0786{m}=PET_H0786{m}./P_H0786_1{m};
AI_H0826{m}=PET_H0826{m}./P_H0826_1{m};
end

```

%Calculating (AET/precipitation)= AI1

for m=1:16

AI1\_estudio{m}=1+(PET\_estudio{m}./P\_estudio\_1{m})-  
(1+(PET\_estudio{m}./P\_estudio\_1{m}).^Wi\_estudio{m}).^(1./Wi\_estudio{m});

AI1\_H0333{m}=1+(PET\_H0333{m}./P\_H0333\_1{m})-  
(1+(PET\_H0333{m}./P\_H0333\_1{m}).^Wi\_H0333{m}).^(1./Wi\_H0333{m});

AI1\_H0337{m}=1+(PET\_H0337{m}./P\_H0337\_1{m})-  
(1+(PET\_H0337{m}./P\_H0337\_1{m}).^Wi\_H0337{m}).^(1./Wi\_H0337{m});

AI1\_H0339{m}=1+(PET\_H0339{m}./P\_H0339\_1{m})-  
(1+(PET\_H0339{m}./P\_H0339\_1{m}).^Wi\_H0339{m}).^(1./Wi\_H0339{m});

AI1\_H0375{m}=1+(PET\_H0375{m}./P\_H0375\_1{m})-  
(1+(PET\_H0375{m}./P\_H0375\_1{m}).^Wi\_H0375{m}).^(1./Wi\_H0375{m});

AI1\_H0787{m}=1+(PET\_H0787{m}./P\_H0787\_1{m})-  
(1+(PET\_H0787{m}./P\_H0787\_1{m}).^Wi\_H0787{m}).^(1./Wi\_H0787{m});

AI1\_H0898{m}=1+(PET\_H0898{m}./P\_H0898\_1{m})-  
(1+(PET\_H0898{m}./P\_H0898\_1{m}).^Wi\_H0898{m}).^(1./Wi\_H0898{m});

AI1\_H0910{m}=1+(PET\_H0910{m}./P\_H0910\_1{m})-  
(1+(PET\_H0910{m}./P\_H0910\_1{m}).^Wi\_H0910{m}).^(1./Wi\_H0910{m});

AI1\_H1057{m}=1+(PET\_H1057{m}./P\_H1057\_1{m})-  
(1+(PET\_H1057{m}./P\_H1057\_1{m}).^Wi\_H1057{m}).^(1./Wi\_H1057{m});

AI1\_H1137{m}=1+(PET\_H1137{m}./P\_H1137\_1{m})-  
(1+(PET\_H1137{m}./P\_H1137\_1{m}).^Wi\_H1137{m}).^(1./Wi\_H1137{m});

AI1\_H0788{m}=1+(PET\_H0788{m}./P\_H0788\_1{m})-  
(1+(PET\_H0788{m}./P\_H0788\_1{m}).^Wi\_H0788{m}).^(1./Wi\_H0788{m});

AI1\_H0790{m}=1+(PET\_H0790{m}./P\_H0790\_1{m})-  
(1+(PET\_H0790{m}./P\_H0790\_1{m}).^Wi\_H0790{m}).^(1./Wi\_H0790{m});

AI1\_H0789{m}=1+(PET\_H0789{m}./P\_H0789\_1{m})-  
(1+(PET\_H0789{m}./P\_H0789\_1{m}).^Wi\_H0789{m}).^(1./Wi\_H0789{m});

AI1\_H0786{m}=1+(PET\_H0786{m}./P\_H0786\_1{m})-  
(1+(PET\_H0786{m}./P\_H0786\_1{m}).^Wi\_H0786{m}).^(1./Wi\_H0786{m});

AI1\_H0826{m}=1+(PET\_H0826{m}./P\_H0826\_1{m})-  
(1+(PET\_H0826{m}./P\_H0826\_1{m}).^Wi\_H0826{m}).^(1./Wi\_H0826{m});

end

%Calculating Water Yield (WY)

for m=1:16

WY\_estudio{m}=(1-AI1\_estudio{m}).\*P\_estudio\_1{m};

WY\_H0333{m}=(1-AI1\_H0333{m}).\*P\_H0333\_1{m};

WY\_H0337{m}=(1-AI1\_H0337{m}).\*P\_H0337\_1{m};

```

WY_H0339{m}=(1-AI1_H0339{m})*P_H0339_1{m};
WY_H0375{m}=(1-AI1_H0375{m})*P_H0375_1{m};
WY_H0787{m}=(1-AI1_H0787{m})*P_H0787_1{m};
WY_H0898{m}=(1-AI1_H0898{m})*P_H0898_1{m};
WY_H0910{m}=(1-AI1_H0910{m})*P_H0910_1{m};
WY_H1057{m}=(1-AI1_H1057{m})*P_H1057_1{m};
WY_H1137{m}=(1-AI1_H1137{m})*P_H1137_1{m};
WY_H0788{m}=(1-AI1_H0788{m})*P_H0788_1{m};
WY_H0790{m}=(1-AI1_H0790{m})*P_H0790_1{m};
WY_H0789{m}=(1-AI1_H0789{m})*P_H0789_1{m};
WY_H0786{m}=(1-AI1_H0786{m})*P_H0786_1{m};
WY_H0826{m}=(1-AI1_H0826{m})*P_H0826_1{m};
end

```

%Calculating real o effective evapotranspiration AET (model)

for m=1:16

```

AET_estudio{m}=AI1_estudio{m}*P_estudio_1{m};
AET_H0333{m}=AI1_H0333{m}*P_H0333_1{m};
AET_H0337{m}=AI1_H0337{m}*P_H0337_1{m};
AET_H0339{m}=AI1_H0339{m}*P_H0339_1{m};
AET_H0375{m}=AI1_H0375{m}*P_H0375_1{m};
AET_H0787{m}=AI1_H0787{m}*P_H0787_1{m};
AET_H0898{m}=AI1_H0898{m}*P_H0898_1{m};
AET_H0910{m}=AI1_H0910{m}*P_H0910_1{m};
AET_H1057{m}=AI1_H1057{m}*P_H1057_1{m};
AET_H1137{m}=AI1_H1137{m}*P_H1137_1{m};
AET_H0788{m}=AI1_H0788{m}*P_H0788_1{m};
AET_H0790{m}=AI1_H0790{m}*P_H0790_1{m};
AET_H0789{m}=AI1_H0789{m}*P_H0789_1{m};
AET_H0786{m}=AI1_H0786{m}*P_H0786_1{m};
AET_H0826{m}=AI1_H0826{m}*P_H0826_1{m};

```

end

%%-----

**%Summary of Water Yield data per watershed or sub-basin**

```

%%-----
%catstudio Entire study Basin Entire Estudio
for m=1:16
WWY_estudio{m}=nansum(nansum(WY_estudio{m}));%Water yield at the outlet cat_estudio
cWWY_estudio{m}=WWY_estudio{m}/Areacatstudio%Aggregated water yield per catchment
(mm/year)
end
%-----
%cat_H0333
for m=1:16
WWY_H0333{m}=nansum(nansum(WY_H0333{m}));%Water yield at the outlet
cWWY_H0333{m}=WWY_H0333{m}/Areacat_H0333%Aggregated water yield per catchment
(mm/year)
end
%%-----
%cat_H0337
for m=1:16
WWY_H0337{m}=nansum(nansum(WY_H0337{m}));%Water yield at the outlet
cWWY_H0337{m}=WWY_H0337{m}/Areacat_H0337%Aggregated water yield per catchment
(mm/year)
end
%%-----
%cat_H0339
for m=1:16
WWY_H0339{m}=nansum(nansum(WY_H0339{m}));%Water yield at the outlet
cWWY_H0339{m}=WWY_H0339{m}/Areacat_H0339%Aggregated water yield per catchment
(mm/year)
end
%%----- %cat_H0375
for m=1:16
WWY_H0375{m}=nansum(nansum(WY_H0375{m}));%Water yield at the outlet
cWWY_H0375{m}=WWY_H0375{m}/Areacat_H0375%Aggregated water yield per catchment
(mm/year)
end
%%----- %cat_H0787

```

for m=1:16

WWY\_H0787{m}=nansum(nansum(WY\_H0787{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0787{m}=WWY\_H0787{m}/Areacat\_H0787%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0898

for m=1:16

WWY\_H0898{m}=nansum(nansum(WY\_H0898{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0898{m}=WWY\_H0898{m}/Areacat\_H0898%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0910

for m=1:16

WWY\_H0910{m}=nansum(nansum(WY\_H0910{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0910{m}=WWY\_H0910{m}/Areacat\_H0910%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H1057

for m=1:16

WWY\_H1057{m}=nansum(nansum(WY\_H1057{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H1057{m}=WWY\_H1057{m}/Areacat\_H1057%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H1137

for m=1:16

WWY\_H1137{m}=nansum(nansum(WY\_H1137{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H1137{m}=WWY\_H1137{m}/Areacat\_H1137%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0788

for m=1:16

WWY\_H0788{m}=nansum(nansum(WY\_H0788{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0788{m}=WWY\_H0788{m}/Areacat\_H0788%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0790

for m=1:16

WWY\_H0790{m}=nansum(nansum(WY\_H0790{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0790{m}=WWY\_H0790{m}/Areacat\_H0790%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0897

for m=1:16

WWY\_H0789{m}=nansum(nansum(WY\_H0789{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0789{m}=WWY\_H0789{m}/Areacat\_H0789%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0786

for m=1:16

WWY\_H0786{m}=nansum(nansum(WY\_H0786{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0786{m}=WWY\_H0786{m}/Areacat\_H0786%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%cat\_H0826

for m=1:16

WWY\_H0826{m}=nansum(nansum(WY\_H0826{m}));%Water yield at the outlet

cWWY\_H0826{m}=WWY\_H0826{m}/Areacat\_H0826%Aggregated water yield per catchment (mm/year)

end

%%-----%Observed

water yield = hybam discharge/area

QQ\_estudio=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN];

QQ\_H0333=[NaN 175.87 267.66 218.58 161.61 210.33 306.81 NaN NaN NaN  
NaN 342.51 310.04 187.84 235.82 NaN];

QQ\_H0337=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];

QQ\_H0339=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];

QQ\_H0375=[NaN NaN NaN NaN 362.35 NaN NaN NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];

QQ\_H0787=[2205.80 2218.88 2140.84 2026.28 1656.89 1645.86  
1473.31 2512.49 1831.84 1831.54 1879.27 2112.47  
2325.67 2342.42 2676.51 NaN];

```

QQ_H0898=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];
QQ_H0910=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];
QQ_H1057=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];
QQ_H1137=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];
QQ_H0788=[1796.37 1983.30 1956.51 1831.85 1919.24 1639.70
1434.07 1967.85 1604.11 1717.46 1779.35 1690.90
2005.16 2185.95 2935.85 NaN];
QQ_H0790=[748.37 886.37 846.35 811.82 NaN 798.91 597.35 1030.43 911.15
778.97 704.13 857.80 NaN 896.33 971.17 NaN];
QQ_H0789=[880.23 909.64 927.07 881.17 836.37 738.97 662.73 1029.45 976.54
806.52 878.54 1084.74 1085.82 983.70 1172.12 NaN];
QQ_H0786=[NaN NaN NaN NaN NaN 136.05 114.40 160.22 164.09 132.29
117.70 158.34 184.02 157.83 NaN NaN];
QQ_H0826=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN
NaN NaN NaN NaN NaN NaN];
QQ={QQ_estudio,QQ_H0333,QQ_H0337,QQ_H0339,QQ_H0375,QQ_H0787,QQ_H0898,QQ_H0
910,QQ_H1057,QQ_H1137,QQ_H0788,QQ_H0790,QQ_H0789,QQ_H0786,QQ_H0826};

```

```

%%-----%PLOT
OBSERVED DISCHARGE VS CALCULATED (MODEL)
year=[2000,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008,2009,2010,2011,2012,2013,2014,2015];
%%-----
figure(1)
%%-----subplot(2,2,1)
% SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0333,':bs')
ylim([0, 1500])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0333),'-.r*')
title('Catchment H0333')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0786,':bs')
ylim([0, 800])

```

```

hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0786),'-.r*')
title('Catchment H0786')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----figure(2)
%%-----
subplot(2,2,1)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0787,':bs')
ylim([0, 5000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0787),'-.r*')
title('Catchment H0787')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0788,':bs')
ylim([0, 4000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0788),'-.r*')
title('Catchment H0788')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,3)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0789,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0789),'-.r*')
title('Catchment H0789')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,4)% SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0790,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0790),'-.r*')

```



```

title('Catchment H0790')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----figure(3)
%%-----
subplot(2,2,1)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0337,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0337),'-.r*')
title('Catchment H0337')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0339,':bs')
ylim([0, 1500])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0339),'-.r*')
title('Catchment H0339')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,3)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0375,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0375),'-.r*')
title('Catchment H0375')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,4)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0898,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0898),'-.r*')
title('Catchment H0898')
legend('Obs','Mod','location','southeast')

```

```

%%-----figure(4)
%%-----
subplot(2,2,1)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0910,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0910),'-.r*')
title('Catchment H0910')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H1057,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H1057),'-.r*')
title('Catchment H1057')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,3)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H1137,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H1137),'-.r*')
title('Catchment H1137')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,4)%NO HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0826,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0826),'-.r*')
title('Catchment H0826')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
%%CALIBRACIÓN DEL MODELO
%%-----

```

**Z\_1=30;**

%Calculating the parameter W for each basin

for m=1:16

Wi\_estudio\_1{m}=Z\_1\*(AWC\_estudio./P\_estudio\_1{m})+1.25;

Wi\_H0333\_1{m}=Z\_1\*(AWC\_H0333./P\_H0333\_1{m})+1.25;

Wi\_H0786\_1{m}=Z\_1\*(AWC\_H0786./P\_H0786\_1{m})+1.25;

end

**Z\_2=1;**

for m=1:16

Wi\_estudio\_2{m}=Z\_2\*(AWC\_estudio./P\_estudio\_1{m})+1.25;

Wi\_H0787\_2{m}=Z\_2\*(AWC\_H0787./P\_H0787\_1{m})+1.25;

Wi\_H0788\_2{m}=Z\_2\*(AWC\_H0788./P\_H0788\_1{m})+1.25;

Wi\_H0789\_2{m}=Z\_2\*(AWC\_H0789./P\_H0789\_1{m})+1.25;

Wi\_H0790\_2{m}=Z\_2\*(AWC\_H0790./P\_H0790\_1{m})+1.25;

end

% Calculating Aridity Index (AI) PET/P (Potential evapotranspiration /  
% precipitation)

for m=1:16

AI\_estudio{m}=PET\_estudio{m}./P\_estudio\_1{m};

AI\_H0333{m}=PET\_H0333{m}./P\_H0333\_1{m};

AI\_H0337{m}=PET\_H0337{m}./P\_H0337\_1{m};

AI\_H0339{m}=PET\_H0339{m}./P\_H0339\_1{m};

AI\_H0375{m}=PET\_H0375{m}./P\_H0375\_1{m};

AI\_H0787{m}=PET\_H0787{m}./P\_H0787\_1{m};

AI\_H0898{m}=PET\_H0898{m}./P\_H0898\_1{m};

AI\_H0910{m}=PET\_H0910{m}./P\_H0910\_1{m};

AI\_H1057{m}=PET\_H1057{m}./P\_H1057\_1{m};

AI\_H1137{m}=PET\_H1137{m}./P\_H1137\_1{m};

AI\_H0788{m}=PET\_H0788{m}./P\_H0788\_1{m};

AI\_H0790{m}=PET\_H0790{m}./P\_H0790\_1{m};

AI\_H0789{m}=PET\_H0789{m}./P\_H0789\_1{m};

AI\_H0786{m}=PET\_H0786{m}./P\_H0786\_1{m};

```
AI_H0826{m}=PET_H0826{m}./P_H0826_1{m};
```

```
end
```

```
%Calculating (AET/precipitation)= AI1
```

```
for m=1:16
```

```
AI1_estudio_1{m}=1+(PET_estudio{m}./P_estudio_1{m})-  
(1+(PET_estudio{m}./P_estudio_1{m}).^Wi_estudio_1{m}).^(1./Wi_estudio_1{m});
```

```
AI1_estudio_2{m}=1+(PET_estudio{m}./P_estudio_1{m})-  
(1+(PET_estudio{m}./P_estudio_1{m}).^Wi_estudio_2{m}).^(1./Wi_estudio_2{m});
```

```
AI1_H0333_1{m}=1+(PET_H0333{m}./P_H0333_1{m})-  
(1+(PET_H0333{m}./P_H0333_1{m}).^Wi_H0333_1{m}).^(1./Wi_H0333_1{m});
```

```
AI1_H0786_1{m}=1+(PET_H0786{m}./P_H0786_1{m})-  
(1+(PET_H0786{m}./P_H0786_1{m}).^Wi_H0786_1{m}).^(1./Wi_H0786_1{m});
```

```
AI1_H0787_2{m}=1+(PET_H0787{m}./P_H0787_1{m})-  
(1+(PET_H0787{m}./P_H0787_1{m}).^Wi_H0787_2{m}).^(1./Wi_H0787_2{m});
```

```
AI1_H0788_2{m}=1+(PET_H0788{m}./P_H0788_1{m})-  
(1+(PET_H0788{m}./P_H0788_1{m}).^Wi_H0788_2{m}).^(1./Wi_H0788_2{m});
```

```
AI1_H0789_2{m}=1+(PET_H0789{m}./P_H0789_1{m})-  
(1+(PET_H0789{m}./P_H0789_1{m}).^Wi_H0789_2{m}).^(1./Wi_H0789_2{m});
```

```
AI1_H0790_2{m}=1+(PET_H0790{m}./P_H0790_1{m})-  
(1+(PET_H0790{m}./P_H0790_1{m}).^Wi_H0790_2{m}).^(1./Wi_H0790_2{m});
```

```
end
```

```
%Calculating Water Yield (WY)
```

```
for m=1:16
```

```
WY_estudio_1{m}=(1-AI1_estudio_1{m}).*P_estudio_1{m};
```

```
WY_estudio_2{m}=(1-AI1_estudio_2{m}).*P_estudio_1{m};
```

```
WY_H0333_1{m}=(1-AI1_H0333_1{m}).*P_H0333_1{m};
```

```
WY_H0786_1{m}=(1-AI1_H0786_1{m}).*P_H0786_1{m};
```

```
WY_H0787_2{m}=(1-AI1_H0787_2{m}).*P_H0787_1{m};
```

```
WY_H0788_2{m}=(1-AI1_H0788_2{m}).*P_H0788_1{m};
```

```
WY_H0789_2{m}=(1-AI1_H0789_2{m}).*P_H0789_1{m};
```

```
WY_H0790_2{m}=(1-AI1_H0790_2{m}).*P_H0790_1{m};
```

```
end
```

```
%Calculating real o effective evapotranspiration AET (model)
```

```
for m=1:16
```

```
    AET_estudio_1{m}=AI1_estudio_1{m}.*P_estudio_1{m};
```

```
    AET_estudio_2{m}=AI1_estudio_2{m}.*P_estudio_1{m};
```

```
    AET_H0333_1{m}=AI1_H0333_1{m}.*P_H0333_1{m};
```

```
    AET_H0786_1{m}=AI1_H0786_1{m}.*P_H0786_1{m};
```

```
    AET_H0787_2{m}=AI1_H0787_2{m}.*P_H0787_1{m};
```

```
    AET_H0788_2{m}=AI1_H0788_2{m}.*P_H0788_1{m};
```

```
    AET_H0789_2{m}=AI1_H0789_2{m}.*P_H0789_1{m};
```

```
    AET_H0790_2{m}=AI1_H0790_2{m}.*P_H0790_1{m};
```

```
end
```

```
%%-----%Summary  
of Water Yield data per watershed
```

```
%%-----%catestudio  
Entire study Basin Entire Estudio
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_estudio_1{m}=nansum(nansum(WY_estudio_1{m}));%Water yield at the outlet cat_estudio
```

```
cWWY_estudio_1{m}=WWY_estudio_1{m}/Areacatestudio%Aggregated water yield per catchment  
(mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0333
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0333_1{m}=nansum(nansum(WY_H0333_1{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0333_1{m}=WWY_H0333_1{m}/Areacat_H0333%Aggregated water yield per catchment  
(mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0786
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0786_1{m}=nansum(nansum(WY_H0786_1{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0786_1{m}=WWY_H0786_1{m}/Areacat_H0786%Aggregated water yield per catchment  
(mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0787
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0787_2{m}=nansum(nansum(WY_H0787_2{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0787_2{m}=WWY_H0787_2{m}/Areacat_H0787%Aggregated water yield per catchment (mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0788
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0788_2{m}=nansum(nansum(WY_H0788_2{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0788_2{m}=WWY_H0788_2{m}/Areacat_H0788%Aggregated water yield per catchment (mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0789
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0789_2{m}=nansum(nansum(WY_H0789_2{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0789_2{m}=WWY_H0789_2{m}/Areacat_H0789%Aggregated water yield per catchment (mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----%cat_H0790
```

```
for m=1:16
```

```
WWY_H0790_2{m}=nansum(nansum(WY_H0790_2{m}));%Water yield at the outlet
```

```
cWWY_H0790_2{m}=WWY_H0790_2{m}/Areacat_H0790%Aggregated water yield per catchment (mm/year)
```

```
end
```

```
%%-----
```

```
%Observed water yield = hybam discharge/area
```

```
QQ_estudio=[NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN  
NaN NaN NaN NaN NaN];
```

```
QQ_H0333=[NaN 175.87 267.66 218.58 161.61 210.33 306.81 NaN NaN NaN  
NaN 342.51 310.04 187.84 235.82 NaN];
```

```
QQ_H0786=[NaN NaN NaN NaN NaN 136.05 114.40 160.22 164.09 132.29  
117.70 158.34 184.02 157.83 NaN NaN];
```

```
QQ_H0787=[2205.80 2218.88 2140.84 2026.28 1656.89 1645.86  
1473.31 2512.49 1831.84 1831.54 1879.27 2112.47  
2325.67 2342.42 2676.51 NaN];
```

```
QQ_H0788=[1796.37 1983.30 1956.51 1831.85 1919.24 1639.70  
1434.07 1967.85 1604.11 1717.46 1779.35 1690.90  
2005.16 2185.95 2935.85 NaN];
```

```
QQ_H0789=[880.23 909.64 927.07 881.17 836.37 738.97 662.73 1029.45 976.54  
806.52 878.54 1084.74 1085.82 983.70 1172.12 NaN];
```

```
QQ_H0790=[748.37 886.37 846.35 811.82 NaN 798.91 597.35 1030.43 911.15  
778.97 704.13 857.80 NaN 896.33 971.17 NaN];
```

```
QQ={QQ_estudio,QQ_H0333,QQ_H0786,QQ_H0787,QQ_H0788,QQ_H0789,QQ_H0790};
```

```
%%-----%PLOT
OBSERVED DISCHARGE VS CALCULATED (MODEL)
year=[2000,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008,2009,2010,2011,2012,2013,2014,2015];
%%-----figure(5)
%%-----subplot(2,2,1)
% SI HAY DATOS DE Qobservado

plot (year,QQ_H0333,':bs')
ylim([0, 1500])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0333_1),'-.r*')
title('Catchment H0333_1')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0786,':bs')
ylim([0, 800])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0786_1),'-.r*')
title('Catchment H0786_1')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
figure(6)
%%-----
subplot(2,2,1)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0787,':bs')
ylim([0, 5000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0787_2),'-.r*')
title('Catchment H0787_2')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,2)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0788,':bs')
ylim([0, 4000])
```

```

hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0788_2),'-r*')
title('Catchment H0788_2')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,3)%SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0789,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0789_2),'-r*')
title('Catchment H0789_2')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----
subplot(2,2,4)% SI HAY DATOS DE Qobservado
plot (year,QQ_H0790,':bs')
ylim([0, 2000])
hold on
plot(year,cell2mat(cWWY_H0790_2),'-r*')
title('Catchment H0790_2')
legend('Obs','Mod','location','southeast')
%%-----

```

#### **%CALCULOS REALIZADOS EN BASE A LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA MODIS**

```

%%-----
%EVAPOTRANSPIRACION (PET)VALORES DE Evapotranspiración potencial media con
%VALORES DE EVAPOT REFERENCIAL DE IMAGENES MODIS
PET_estudio_2000=(PET_estudio{1});
PET_estudio_2000(isnan(PET_estudio_2000))=-9999;
PET_estudio_2001=(PET_estudio{2});
PET_estudio_2001(isnan(PET_estudio_2001))=-9999;
PET_estudio_2002=(PET_estudio{3});
PET_estudio_2002(isnan(PET_estudio_2002))=-9999;
PET_estudio_2003=(PET_estudio{4});

```



```

PET_estudio_2003(isnan(PET_estudio_2003))=-9999;
PET_estudio_2004=(PET_estudio{5});
PET_estudio_2004(isnan(PET_estudio_2004))=-9999;
PET_estudio_2005=(PET_estudio{6});
PET_estudio_2005(isnan(PET_estudio_2005))=-9999;
PET_estudio_2006=(PET_estudio{7});
PET_estudio_2006(isnan(PET_estudio_2006))=-9999;
PET_estudio_2007=(PET_estudio{8});
PET_estudio_2007(isnan(PET_estudio_2007))=-9999;
PET_estudio_2008=(PET_estudio{9});
PET_estudio_2008(isnan(PET_estudio_2008))=-9999;
PET_estudio_2009=(PET_estudio{10});
PET_estudio_2009(isnan(PET_estudio_2009))=-9999;
PET_estudio_2010=(PET_estudio{11});
PET_estudio_2010(isnan(PET_estudio_2010))=-9999;
PET_estudio_2011=(PET_estudio{12});
PET_estudio_2011(isnan(PET_estudio_2011))=-9999;
PET_estudio_2012=(PET_estudio{13});
PET_estudio_2012(isnan(PET_estudio_2012))=-9999;
PET_estudio_2013=(PET_estudio{14});
PET_estudio_2013(isnan(PET_estudio_2013))=-9999;
PET_estudio_2014=(PET_estudio{15});
PET_estudio_2014(isnan(PET_estudio_2014))=-9999;
PET_estudio_2015=(PET_estudio{16});
PET_estudio_2015(isnan(PET_estudio_2015))=-9999;

```

```
%%-----
```

#### **%WATER YIELD**

```

WY_estudio_2000=(WY_estudio{1});
WY_estudio_2000(isnan(WY_estudio_2000))=-9999;
WY_estudio_2001=(WY_estudio{2});
WY_estudio_2001(isnan(WY_estudio_2001))=-9999;
WY_estudio_2002=(WY_estudio{3});
WY_estudio_2002(isnan(WY_estudio_2002))=-9999;
WY_estudio_2003=(WY_estudio{4});

```

WY\_estudio\_2003(isnan(WY\_estudio\_2003))=-9999;  
WY\_estudio\_2004=(WY\_estudio{5});  
WY\_estudio\_2004(isnan(WY\_estudio\_2004))=-9999;  
WY\_estudio\_2005=(WY\_estudio{6});  
WY\_estudio\_2005(isnan(WY\_estudio\_2005))=-9999;  
WY\_estudio\_2006=(WY\_estudio{7});  
WY\_estudio\_2006(isnan(WY\_estudio\_2006))=-9999;  
WY\_estudio\_2007=(WY\_estudio{8});  
WY\_estudio\_2007(isnan(WY\_estudio\_2007))=-9999;  
WY\_estudio\_2008=(WY\_estudio{9});  
WY\_estudio\_2008(isnan(WY\_estudio\_2008))=-9999;  
WY\_estudio\_2009=(WY\_estudio{10});  
WY\_estudio\_2009(isnan(WY\_estudio\_2009))=-9999;  
WY\_estudio\_2010=(WY\_estudio{11});  
WY\_estudio\_2010(isnan(WY\_estudio\_2010))=-9999;  
WY\_estudio\_2011=(WY\_estudio{12});  
WY\_estudio\_2011(isnan(WY\_estudio\_2011))=-9999;  
WY\_estudio\_2012=(WY\_estudio{13});  
WY\_estudio\_2012(isnan(WY\_estudio\_2012))=-9999;  
WY\_estudio\_2013=(WY\_estudio{14});  
WY\_estudio\_2013(isnan(WY\_estudio\_2013))=-9999;  
WY\_estudio\_2014=(WY\_estudio{15});  
WY\_estudio\_2014(isnan(WY\_estudio\_2014))=-9999;  
WY\_estudio\_2015=(WY\_estudio{16});  
WY\_estudio\_2015(isnan(WY\_estudio\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0333 / 2000-2015

WY\_H0333\_2000=(WY\_H0333{1});  
WY\_H0333\_2000(isnan(WY\_H0333\_2000))=-9999;  
WY\_H0333\_2001=(WY\_H0333{2});  
WY\_H0333\_2001(isnan(WY\_H0333\_2001))=-9999;  
WY\_H0333\_2002=(WY\_H0333{3});  
WY\_H0333\_2002(isnan(WY\_H0333\_2002))=-9999;  
WY\_H0333\_2003=(WY\_H0333{4});

WY\_H0333\_2003(isnan(WY\_H0333\_2003))=-9999;  
WY\_H0333\_2004=(WY\_H0333{5});  
WY\_H0333\_2004(isnan(WY\_H0333\_2004))=-9999;  
WY\_H0333\_2005=(WY\_H0333{6});  
WY\_H0333\_2005(isnan(WY\_H0333\_2005))=-9999;  
WY\_H0333\_2006=(WY\_H0333{7});  
WY\_H0333\_2006(isnan(WY\_H0333\_2006))=-9999;  
WY\_H0333\_2007=(WY\_H0333{8});  
WY\_H0333\_2007(isnan(WY\_H0333\_2007))=-9999;  
WY\_H0333\_2008=(WY\_H0333{9});  
WY\_H0333\_2008(isnan(WY\_H0333\_2008))=-9999;  
WY\_H0333\_2009=(WY\_H0333{10});  
WY\_H0333\_2009(isnan(WY\_H0333\_2009))=-9999;  
WY\_H0333\_2010=(WY\_H0333{11});  
WY\_H0333\_2010(isnan(WY\_H0333\_2010))=-9999;  
WY\_H0333\_2011=(WY\_H0333{12});  
WY\_H0333\_2011(isnan(WY\_H0333\_2011))=-9999;  
WY\_H0333\_2012=(WY\_H0333{13});  
WY\_H0333\_2012(isnan(WY\_H0333\_2012))=-9999;  
WY\_H0333\_2013=(WY\_H0333{14});  
WY\_H0333\_2013(isnan(WY\_H0333\_2013))=-9999;  
WY\_H0333\_2014=(WY\_H0333{15});  
WY\_H0333\_2014(isnan(WY\_H0333\_2014))=-9999;  
WY\_H0333\_2015=(WY\_H0333{16});  
WY\_H0333\_2015(isnan(WY\_H0333\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0337 / 2000-2015

WY\_H0337\_2000=(WY\_H0337{1});  
WY\_H0337\_2000(isnan(WY\_H0337\_2000))=-9999;  
WY\_H0337\_2001=(WY\_H0337{2});  
WY\_H0337\_2001(isnan(WY\_H0337\_2001))=-9999;  
WY\_H0337\_2002=(WY\_H0337{3});  
WY\_H0337\_2002(isnan(WY\_H0337\_2002))=-9999;  
WY\_H0337\_2003=(WY\_H0337{4});

WY\_H0337\_2003(isnan(WY\_H0337\_2003))=-9999;  
WY\_H0337\_2004=(WY\_H0337{5});  
WY\_H0337\_2004(isnan(WY\_H0337\_2004))=-9999;  
WY\_H0337\_2005=(WY\_H0337{6});  
WY\_H0337\_2005(isnan(WY\_H0337\_2005))=-9999;  
WY\_H0337\_2006=(WY\_H0337{7});  
WY\_H0337\_2006(isnan(WY\_H0337\_2006))=-9999;  
WY\_H0337\_2007=(WY\_H0337{8});  
WY\_H0337\_2007(isnan(WY\_H0337\_2007))=-9999;  
WY\_H0337\_2008=(WY\_H0337{9});  
WY\_H0337\_2008(isnan(WY\_H0337\_2008))=-9999;  
WY\_H0337\_2009=(WY\_H0337{10});  
WY\_H0337\_2009(isnan(WY\_H0337\_2009))=-9999;  
WY\_H0337\_2010=(WY\_H0337{11});  
WY\_H0337\_2010(isnan(WY\_H0337\_2010))=-9999;  
WY\_H0337\_2011=(WY\_H0337{12});  
WY\_H0337\_2011(isnan(WY\_H0337\_2011))=-9999;  
WY\_H0337\_2012=(WY\_H0337{13});  
WY\_H0337\_2012(isnan(WY\_H0337\_2012))=-9999;  
WY\_H0337\_2013=(WY\_H0337{14});  
WY\_H0337\_2013(isnan(WY\_H0337\_2013))=-9999;  
WY\_H0337\_2014=(WY\_H0337{15});  
WY\_H0337\_2014(isnan(WY\_H0337\_2014))=-9999;  
WY\_H0337\_2015=(WY\_H0337{16});  
WY\_H0337\_2015(isnan(WY\_H0337\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0339 / 2000-2015

WY\_H0339\_2000=(WY\_H0339{1});  
WY\_H0339\_2000(isnan(WY\_H0339\_2000))=-9999;  
WY\_H0339\_2001=(WY\_H0339{2});  
WY\_H0339\_2001(isnan(WY\_H0339\_2001))=-9999;  
WY\_H0339\_2002=(WY\_H0339{3});  
WY\_H0339\_2002(isnan(WY\_H0339\_2002))=-9999;  
WY\_H0339\_2003=(WY\_H0339{4});

WY\_H0339\_2003(isnan(WY\_H0339\_2003))=-9999;  
WY\_H0339\_2004=(WY\_H0339{5});  
WY\_H0339\_2004(isnan(WY\_H0339\_2004))=-9999;  
WY\_H0339\_2005=(WY\_H0339{6});  
WY\_H0339\_2005(isnan(WY\_H0339\_2005))=-9999;  
WY\_H0339\_2006=(WY\_H0339{7});  
WY\_H0339\_2006(isnan(WY\_H0339\_2006))=-9999;  
WY\_H0339\_2007=(WY\_H0339{8});  
WY\_H0339\_2007(isnan(WY\_H0339\_2007))=-9999;  
WY\_H0339\_2008=(WY\_H0339{9});  
WY\_H0339\_2008(isnan(WY\_H0339\_2008))=-9999;  
WY\_H0339\_2009=(WY\_H0339{10});  
WY\_H0339\_2009(isnan(WY\_H0339\_2009))=-9999;  
WY\_H0339\_2010=(WY\_H0339{11});  
WY\_H0339\_2010(isnan(WY\_H0339\_2010))=-9999;  
WY\_H0339\_2011=(WY\_H0339{12});  
WY\_H0339\_2011(isnan(WY\_H0339\_2011))=-9999;  
WY\_H0339\_2012=(WY\_H0339{13});  
WY\_H0339\_2012(isnan(WY\_H0339\_2012))=-9999;  
WY\_H0339\_2013=(WY\_H0339{14});  
WY\_H0339\_2013(isnan(WY\_H0339\_2013))=-9999;  
WY\_H0339\_2014=(WY\_H0339{15});  
WY\_H0339\_2014(isnan(WY\_H0339\_2014))=-9999;  
WY\_H0339\_2015=(WY\_H0339{16});  
WY\_H0339\_2015(isnan(WY\_H0339\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0375 / 2000-2015

WY\_H0375\_2000=(WY\_H0375{1});  
WY\_H0375\_2000(isnan(WY\_H0375\_2000))=-9999;  
WY\_H0375\_2001=(WY\_H0375{2});  
WY\_H0375\_2001(isnan(WY\_H0375\_2001))=-9999;  
WY\_H0375\_2002=(WY\_H0375{3});  
WY\_H0375\_2002(isnan(WY\_H0375\_2002))=-9999;  
WY\_H0375\_2003=(WY\_H0375{4});

WY\_H0375\_2003(isnan(WY\_H0375\_2003))=-9999;  
WY\_H0375\_2004=(WY\_H0375{5});  
WY\_H0375\_2004(isnan(WY\_H0375\_2004))=-9999;  
WY\_H0375\_2005=(WY\_H0375{6});  
WY\_H0375\_2005(isnan(WY\_H0375\_2005))=-9999;  
WY\_H0375\_2006=(WY\_H0375{7});  
WY\_H0375\_2006(isnan(WY\_H0375\_2006))=-9999;  
WY\_H0375\_2007=(WY\_H0375{8});  
WY\_H0375\_2007(isnan(WY\_H0375\_2007))=-9999;  
WY\_H0375\_2008=(WY\_H0375{9});  
WY\_H0375\_2008(isnan(WY\_H0375\_2008))=-9999;  
WY\_H0375\_2009=(WY\_H0375{10});  
WY\_H0375\_2009(isnan(WY\_H0375\_2009))=-9999;  
WY\_H0375\_2010=(WY\_H0375{11});  
WY\_H0375\_2010(isnan(WY\_H0375\_2010))=-9999;  
WY\_H0375\_2011=(WY\_H0375{12});  
WY\_H0375\_2011(isnan(WY\_H0375\_2011))=-9999;  
WY\_H0375\_2012=(WY\_H0375{13});  
WY\_H0375\_2012(isnan(WY\_H0375\_2012))=-9999;  
WY\_H0375\_2013=(WY\_H0375{14});  
WY\_H0375\_2013(isnan(WY\_H0375\_2013))=-9999;  
WY\_H0375\_2014=(WY\_H0375{15});  
WY\_H0375\_2014(isnan(WY\_H0375\_2014))=-9999;  
WY\_H0375\_2015=(WY\_H0375{16});  
WY\_H0375\_2015(isnan(WY\_H0375\_2015))=-9999;  
%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0787 / 2000-2015  
WY\_H0787\_2000=(WY\_H0787{1});  
WY\_H0787\_2000(isnan(WY\_H0787\_2000))=-9999;  
WY\_H0787\_2001=(WY\_H0787{2});  
WY\_H0787\_2001(isnan(WY\_H0787\_2001))=-9999;  
WY\_H0787\_2002=(WY\_H0787{3});  
WY\_H0787\_2002(isnan(WY\_H0787\_2002))=-9999;  
WY\_H0787\_2003=(WY\_H0787{4});  
WY\_H0787\_2003(isnan(WY\_H0787\_2003))=-9999;

WY\_H0787\_2004=(WY\_H0787{5});  
WY\_H0787\_2004(isnan(WY\_H0787\_2004))=-9999;  
WY\_H0787\_2005=(WY\_H0787{6});  
WY\_H0787\_2005(isnan(WY\_H0787\_2005))=-9999;  
WY\_H0787\_2006=(WY\_H0787{7});  
WY\_H0787\_2006(isnan(WY\_H0787\_2006))=-9999;  
WY\_H0787\_2007=(WY\_H0787{8});  
WY\_H0787\_2007(isnan(WY\_H0787\_2007))=-9999;  
WY\_H0787\_2008=(WY\_H0787{9});  
WY\_H0787\_2008(isnan(WY\_H0787\_2008))=-9999;  
WY\_H0787\_2009=(WY\_H0787{10});  
WY\_H0787\_2009(isnan(WY\_H0787\_2009))=-9999;  
WY\_H0787\_2010=(WY\_H0787{11});  
WY\_H0787\_2010(isnan(WY\_H0787\_2010))=-9999;  
WY\_H0787\_2011=(WY\_H0787{12});  
WY\_H0787\_2011(isnan(WY\_H0787\_2011))=-9999;  
WY\_H0787\_2012=(WY\_H0787{13});  
WY\_H0787\_2012(isnan(WY\_H0787\_2012))=-9999;  
WY\_H0787\_2013=(WY\_H0787{14});  
WY\_H0787\_2013(isnan(WY\_H0787\_2013))=-9999;  
WY\_H0787\_2014=(WY\_H0787{15});  
WY\_H0787\_2014(isnan(WY\_H0787\_2014))=-9999;  
WY\_H0787\_2015=(WY\_H0787{16});  
WY\_H0787\_2015(isnan(WY\_H0787\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0898 / 2000-2015

WY\_H0898\_2000=(WY\_H0898{1});  
WY\_H0898\_2000(isnan(WY\_H0898\_2000))=-9999;  
WY\_H0898\_2001=(WY\_H0898{2});  
WY\_H0898\_2001(isnan(WY\_H0898\_2001))=-9999;  
WY\_H0898\_2002=(WY\_H0898{3});  
WY\_H0898\_2002(isnan(WY\_H0898\_2002))=-9999;  
WY\_H0898\_2003=(WY\_H0898{4});  
WY\_H0898\_2003(isnan(WY\_H0898\_2003))=-9999;

WY\_H0898\_2004=(WY\_H0898{5});  
WY\_H0898\_2004(isnan(WY\_H0898\_2004))=-9999;  
WY\_H0898\_2005=(WY\_H0898{6});  
WY\_H0898\_2005(isnan(WY\_H0898\_2005))=-9999;  
WY\_H0898\_2006=(WY\_H0898{7});  
WY\_H0898\_2006(isnan(WY\_H0898\_2006))=-9999;  
WY\_H0898\_2007=(WY\_H0898{8});  
WY\_H0898\_2007(isnan(WY\_H0898\_2007))=-9999;  
WY\_H0898\_2008=(WY\_H0898{9});  
WY\_H0898\_2008(isnan(WY\_H0898\_2008))=-9999;  
WY\_H0898\_2009=(WY\_H0898{10});  
WY\_H0898\_2009(isnan(WY\_H0898\_2009))=-9999;  
WY\_H0898\_2010=(WY\_H0898{11});  
WY\_H0898\_2010(isnan(WY\_H0898\_2010))=-9999;  
WY\_H0898\_2011=(WY\_H0898{12});  
WY\_H0898\_2011(isnan(WY\_H0898\_2011))=-9999;  
WY\_H0898\_2012=(WY\_H0898{13});  
WY\_H0898\_2012(isnan(WY\_H0898\_2012))=-9999;  
WY\_H0898\_2013=(WY\_H0898{14});  
WY\_H0898\_2013(isnan(WY\_H0898\_2013))=-9999;  
WY\_H0898\_2014=(WY\_H0898{15});  
WY\_H0898\_2014(isnan(WY\_H0898\_2014))=-9999;  
WY\_H0898\_2015=(WY\_H0898{16});  
WY\_H0898\_2015(isnan(WY\_H0898\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0910 / 2000-2015

WY\_H0910\_2000=(WY\_H0910{1});  
WY\_H0910\_2000(isnan(WY\_H0910\_2000))=-9999;  
WY\_H0910\_2001=(WY\_H0910{2});  
WY\_H0910\_2001(isnan(WY\_H0910\_2001))=-9999;  
WY\_H0910\_2002=(WY\_H0910{3});  
WY\_H0910\_2002(isnan(WY\_H0910\_2002))=-9999;  
WY\_H0910\_2003=(WY\_H0910{4});  
WY\_H0910\_2003(isnan(WY\_H0910\_2003))=-9999;



WY\_H0910\_2004=(WY\_H0910{5});  
WY\_H0910\_2004(isnan(WY\_H0910\_2004))=-9999;  
WY\_H0910\_2005=(WY\_H0910{6});  
WY\_H0910\_2005(isnan(WY\_H0910\_2005))=-9999;  
WY\_H0910\_2006=(WY\_H0910{7});  
WY\_H0910\_2006(isnan(WY\_H0910\_2006))=-9999;  
WY\_H0910\_2007=(WY\_H0910{8});  
WY\_H0910\_2007(isnan(WY\_H0910\_2007))=-9999;  
WY\_H0910\_2008=(WY\_H0910{9});  
WY\_H0910\_2008(isnan(WY\_H0910\_2008))=-9999;  
WY\_H0910\_2009=(WY\_H0910{10});  
WY\_H0910\_2009(isnan(WY\_H0910\_2009))=-9999;  
WY\_H0910\_2010=(WY\_H0910{11});  
WY\_H0910\_2010(isnan(WY\_H0910\_2010))=-9999;  
WY\_H0910\_2011=(WY\_H0910{12});  
WY\_H0910\_2011(isnan(WY\_H0910\_2011))=-9999;  
WY\_H0910\_2012=(WY\_H0910{13});  
WY\_H0910\_2012(isnan(WY\_H0910\_2012))=-9999;  
WY\_H0910\_2013=(WY\_H0910{14});  
WY\_H0910\_2013(isnan(WY\_H0910\_2013))=-9999;  
WY\_H0910\_2014=(WY\_H0910{15});  
WY\_H0910\_2014(isnan(WY\_H0910\_2014))=-9999;  
WY\_H0910\_2015=(WY\_H0910{16});  
WY\_H0910\_2015(isnan(WY\_H0910\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H1057 / 2000-2015

WY\_H1057\_2000=(WY\_H1057{1});  
WY\_H1057\_2000(isnan(WY\_H1057\_2000))=-9999;  
WY\_H1057\_2001=(WY\_H1057{2});  
WY\_H1057\_2001(isnan(WY\_H1057\_2001))=-9999;  
WY\_H1057\_2002=(WY\_H1057{3});  
WY\_H1057\_2002(isnan(WY\_H1057\_2002))=-9999;  
WY\_H1057\_2003=(WY\_H1057{4});  
WY\_H1057\_2003(isnan(WY\_H1057\_2003))=-9999;

WY\_H1057\_2004=(WY\_H1057{5});  
WY\_H1057\_2004(isnan(WY\_H1057\_2004))=-9999;  
WY\_H1057\_2005=(WY\_H1057{6});  
WY\_H1057\_2005(isnan(WY\_H1057\_2005))=-9999;  
WY\_H1057\_2006=(WY\_H1057{7});  
WY\_H1057\_2006(isnan(WY\_H1057\_2006))=-9999;  
WY\_H1057\_2007=(WY\_H1057{8});  
WY\_H1057\_2007(isnan(WY\_H1057\_2007))=-9999;  
WY\_H1057\_2008=(WY\_H1057{9});  
WY\_H1057\_2008(isnan(WY\_H1057\_2008))=-9999;  
WY\_H1057\_2009=(WY\_H1057{10});  
WY\_H1057\_2009(isnan(WY\_H1057\_2009))=-9999;  
WY\_H1057\_2010=(WY\_H1057{11});  
WY\_H1057\_2010(isnan(WY\_H1057\_2010))=-9999;  
WY\_H1057\_2011=(WY\_H1057{12});  
WY\_H1057\_2011(isnan(WY\_H1057\_2011))=-9999;  
WY\_H1057\_2012=(WY\_H1057{13});  
WY\_H1057\_2012(isnan(WY\_H1057\_2012))=-9999;  
WY\_H1057\_2013=(WY\_H1057{14});  
WY\_H1057\_2013(isnan(WY\_H1057\_2013))=-9999;  
WY\_H1057\_2014=(WY\_H1057{15});  
WY\_H1057\_2014(isnan(WY\_H1057\_2014))=-9999;  
WY\_H1057\_2015=(WY\_H1057{16});  
WY\_H1057\_2015(isnan(WY\_H1057\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H1137 / 2000-2015

WY\_H1137\_2000=(WY\_H1137{1});  
WY\_H1137\_2000(isnan(WY\_H1137\_2000))=-9999;  
WY\_H1137\_2001=(WY\_H1137{2});  
WY\_H1137\_2001(isnan(WY\_H1137\_2001))=-9999;  
WY\_H1137\_2002=(WY\_H1137{3});  
WY\_H1137\_2002(isnan(WY\_H1137\_2002))=-9999;  
WY\_H1137\_2003=(WY\_H1137{4});  
WY\_H1137\_2003(isnan(WY\_H1137\_2003))=-9999;

WY\_H1137\_2004=(WY\_H1137{5});  
WY\_H1137\_2004(isnan(WY\_H1137\_2004))=-9999;  
WY\_H1137\_2005=(WY\_H1137{6});  
WY\_H1137\_2005(isnan(WY\_H1137\_2005))=-9999;  
WY\_H1137\_2006=(WY\_H1137{7});  
WY\_H1137\_2006(isnan(WY\_H1137\_2006))=-9999;  
WY\_H1137\_2007=(WY\_H1137{8});  
WY\_H1137\_2007(isnan(WY\_H1137\_2007))=-9999;  
WY\_H1137\_2008=(WY\_H1137{9});  
WY\_H1137\_2008(isnan(WY\_H1137\_2008))=-9999;  
WY\_H1137\_2009=(WY\_H1137{10});  
WY\_H1137\_2009(isnan(WY\_H1137\_2009))=-9999;  
WY\_H1137\_2010=(WY\_H1137{11});  
WY\_H1137\_2010(isnan(WY\_H1137\_2010))=-9999;  
WY\_H1137\_2011=(WY\_H1137{12});  
WY\_H1137\_2011(isnan(WY\_H1137\_2011))=-9999;  
WY\_H1137\_2012=(WY\_H1137{13});  
WY\_H1137\_2012(isnan(WY\_H1137\_2012))=-9999;  
WY\_H1137\_2013=(WY\_H1137{14});  
WY\_H1137\_2013(isnan(WY\_H1137\_2013))=-9999;  
WY\_H1137\_2014=(WY\_H1137{15});  
WY\_H1137\_2014(isnan(WY\_H1137\_2014))=-9999;  
WY\_H1137\_2015=(WY\_H1137{16});  
WY\_H1137\_2015(isnan(WY\_H1137\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0788 / 2000-2015

WY\_H0788\_2000=(WY\_H0788{1});  
WY\_H0788\_2000(isnan(WY\_H0788\_2000))=-9999;  
WY\_H0788\_2001=(WY\_H0788{2});  
WY\_H0788\_2001(isnan(WY\_H0788\_2001))=-9999;  
WY\_H0788\_2002=(WY\_H0788{3});  
WY\_H0788\_2002(isnan(WY\_H0788\_2002))=-9999;  
WY\_H0788\_2003=(WY\_H0788{4});  
WY\_H0788\_2003(isnan(WY\_H0788\_2003))=-9999;

WY\_H0788\_2004=(WY\_H0788{5});  
WY\_H0788\_2004(isnan(WY\_H0788\_2004))=-9999;  
WY\_H0788\_2005=(WY\_H0788{6});  
WY\_H0788\_2005(isnan(WY\_H0788\_2005))=-9999;  
WY\_H0788\_2006=(WY\_H0788{7});  
WY\_H0788\_2006(isnan(WY\_H0788\_2006))=-9999;  
WY\_H0788\_2007=(WY\_H0788{8});  
WY\_H0788\_2007(isnan(WY\_H0788\_2007))=-9999;  
WY\_H0788\_2008=(WY\_H0788{9});  
WY\_H0788\_2008(isnan(WY\_H0788\_2008))=-9999;  
WY\_H0788\_2009=(WY\_H0788{10});  
WY\_H0788\_2009(isnan(WY\_H0788\_2009))=-9999;  
WY\_H0788\_2010=(WY\_H0788{11});  
WY\_H0788\_2010(isnan(WY\_H0788\_2010))=-9999;  
WY\_H0788\_2011=(WY\_H0788{12});  
WY\_H0788\_2011(isnan(WY\_H0788\_2011))=-9999;  
WY\_H0788\_2012=(WY\_H0788{13});  
WY\_H0788\_2012(isnan(WY\_H0788\_2012))=-9999;  
WY\_H0788\_2013=(WY\_H0788{14});  
WY\_H0788\_2013(isnan(WY\_H0788\_2013))=-9999;  
WY\_H0788\_2014=(WY\_H0788{15});  
WY\_H0788\_2014(isnan(WY\_H0788\_2014))=-9999;  
WY\_H0788\_2015=(WY\_H0788{16});  
WY\_H0788\_2015(isnan(WY\_H0788\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0790 / 2000-2015

WY\_H0790\_2000=(WY\_H0790{1});  
WY\_H0790\_2000(isnan(WY\_H0790\_2000))=-9999;  
WY\_H0790\_2001=(WY\_H0790{2});  
WY\_H0790\_2001(isnan(WY\_H0790\_2001))=-9999;  
WY\_H0790\_2002=(WY\_H0790{3});  
WY\_H0790\_2002(isnan(WY\_H0790\_2002))=-9999;  
WY\_H0790\_2003=(WY\_H0790{4});  
WY\_H0790\_2003(isnan(WY\_H0790\_2003))=-9999;

WY\_H0790\_2004=(WY\_H0790{5});  
WY\_H0790\_2004(isnan(WY\_H0790\_2004))=-9999;  
WY\_H0790\_2005=(WY\_H0790{6});  
WY\_H0790\_2005(isnan(WY\_H0790\_2005))=-9999;  
WY\_H0790\_2006=(WY\_H0790{7});  
WY\_H0790\_2006(isnan(WY\_H0790\_2006))=-9999;  
WY\_H0790\_2007=(WY\_H0790{8});  
WY\_H0790\_2007(isnan(WY\_H0790\_2007))=-9999;  
WY\_H0790\_2008=(WY\_H0790{9});  
WY\_H0790\_2008(isnan(WY\_H0790\_2008))=-9999;  
WY\_H0790\_2009=(WY\_H0790{10});  
WY\_H0790\_2009(isnan(WY\_H0790\_2009))=-9999;  
WY\_H0790\_2010=(WY\_H0790{11});  
WY\_H0790\_2010(isnan(WY\_H0790\_2010))=-9999;  
WY\_H0790\_2011=(WY\_H0790{12});  
WY\_H0790\_2011(isnan(WY\_H0790\_2011))=-9999;  
WY\_H0790\_2012=(WY\_H0790{13});  
WY\_H0790\_2012(isnan(WY\_H0790\_2012))=-9999;  
WY\_H0790\_2013=(WY\_H0790{14});  
WY\_H0790\_2013(isnan(WY\_H0790\_2013))=-9999;  
WY\_H0790\_2014=(WY\_H0790{15});  
WY\_H0790\_2014(isnan(WY\_H0790\_2014))=-9999;  
WY\_H0790\_2015=(WY\_H0790{16});  
WY\_H0790\_2015(isnan(WY\_H0790\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0789 / 2000-2015

WY\_H0789\_2000=(WY\_H0789{1});  
WY\_H0789\_2000(isnan(WY\_H0789\_2000))=-9999;  
WY\_H0789\_2001=(WY\_H0789{2});  
WY\_H0789\_2001(isnan(WY\_H0789\_2001))=-9999;  
WY\_H0789\_2002=(WY\_H0789{3});  
WY\_H0789\_2002(isnan(WY\_H0789\_2002))=-9999;  
WY\_H0789\_2003=(WY\_H0789{4});  
WY\_H0789\_2003(isnan(WY\_H0789\_2003))=-9999;

WY\_H0789\_2004=(WY\_H0789{5});  
WY\_H0789\_2004(isnan(WY\_H0789\_2004))=-9999;  
WY\_H0789\_2005=(WY\_H0789{6});  
WY\_H0789\_2005(isnan(WY\_H0789\_2005))=-9999;  
WY\_H0789\_2006=(WY\_H0789{7});  
WY\_H0789\_2006(isnan(WY\_H0789\_2006))=-9999;  
WY\_H0789\_2007=(WY\_H0789{8});  
WY\_H0789\_2007(isnan(WY\_H0789\_2007))=-9999;  
WY\_H0789\_2008=(WY\_H0789{9});  
WY\_H0789\_2008(isnan(WY\_H0789\_2008))=-9999;  
WY\_H0789\_2009=(WY\_H0789{10});  
WY\_H0789\_2009(isnan(WY\_H0789\_2009))=-9999;  
WY\_H0789\_2010=(WY\_H0789{11});  
WY\_H0789\_2010(isnan(WY\_H0789\_2010))=-9999;  
WY\_H0789\_2011=(WY\_H0789{12});  
WY\_H0789\_2011(isnan(WY\_H0789\_2011))=-9999;  
WY\_H0789\_2012=(WY\_H0789{13});  
WY\_H0789\_2012(isnan(WY\_H0789\_2012))=-9999;  
WY\_H0789\_2013=(WY\_H0789{14});  
WY\_H0789\_2013(isnan(WY\_H0789\_2013))=-9999;  
WY\_H0789\_2014=(WY\_H0789{15});  
WY\_H0789\_2014(isnan(WY\_H0789\_2014))=-9999;  
WY\_H0789\_2015=(WY\_H0789{16});  
WY\_H0789\_2015(isnan(WY\_H0789\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0786 / 2000-2015

WY\_H0786\_2000=(WY\_H0786{1});  
WY\_H0786\_2000(isnan(WY\_H0786\_2000))=-9999;  
WY\_H0786\_2001=(WY\_H0786{2});  
WY\_H0786\_2001(isnan(WY\_H0786\_2001))=-9999;  
WY\_H0786\_2002=(WY\_H0786{3});  
WY\_H0786\_2002(isnan(WY\_H0786\_2002))=-9999;  
WY\_H0786\_2003=(WY\_H0786{4});  
WY\_H0786\_2003(isnan(WY\_H0786\_2003))=-9999;

WY\_H0786\_2004=(WY\_H0786{5});  
WY\_H0786\_2004(isnan(WY\_H0786\_2004))=-9999;  
WY\_H0786\_2005=(WY\_H0786{6});  
WY\_H0786\_2005(isnan(WY\_H0786\_2005))=-9999;  
WY\_H0786\_2006=(WY\_H0786{7});  
WY\_H0786\_2006(isnan(WY\_H0786\_2006))=-9999;  
WY\_H0786\_2007=(WY\_H0786{8});  
WY\_H0786\_2007(isnan(WY\_H0786\_2007))=-9999;  
WY\_H0786\_2008=(WY\_H0786{9});  
WY\_H0786\_2008(isnan(WY\_H0786\_2008))=-9999;  
WY\_H0786\_2009=(WY\_H0786{10});  
WY\_H0786\_2009(isnan(WY\_H0786\_2009))=-9999;  
WY\_H0786\_2010=(WY\_H0786{11});  
WY\_H0786\_2010(isnan(WY\_H0786\_2010))=-9999;  
WY\_H0786\_2011=(WY\_H0786{12});  
WY\_H0786\_2011(isnan(WY\_H0786\_2011))=-9999;  
WY\_H0786\_2012=(WY\_H0786{13});  
WY\_H0786\_2012(isnan(WY\_H0786\_2012))=-9999;  
WY\_H0786\_2013=(WY\_H0786{14});  
WY\_H0786\_2013(isnan(WY\_H0786\_2013))=-9999;  
WY\_H0786\_2014=(WY\_H0786{15});  
WY\_H0786\_2014(isnan(WY\_H0786\_2014))=-9999;  
WY\_H0786\_2015=(WY\_H0786{16});  
WY\_H0786\_2015(isnan(WY\_H0786\_2015))=-9999;

%PARA LA SUBCUENCA CON PUNTO DE CIERRE H0826 / 2000-2015

WY\_H0826\_2000=(WY\_H0826{1});  
WY\_H0826\_2000(isnan(WY\_H0826\_2000))=-9999;  
WY\_H0826\_2001=(WY\_H0826{2});  
WY\_H0826\_2001(isnan(WY\_H0826\_2001))=-9999;  
WY\_H0826\_2002=(WY\_H0826{3});  
WY\_H0826\_2002(isnan(WY\_H0826\_2002))=-9999;  
WY\_H0826\_2003=(WY\_H0826{4});  
WY\_H0826\_2003(isnan(WY\_H0826\_2003))=-9999;

```

WY_H0826_2004=(WY_H0826{5});
WY_H0826_2004(isnan(WY_H0826_2004))=-9999;
WY_H0826_2005=(WY_H0826{6});
WY_H0826_2005(isnan(WY_H0826_2005))=-9999;
WY_H0826_2006=(WY_H0826{7});
WY_H0826_2006(isnan(WY_H0826_2006))=-9999;
WY_H0826_2007=(WY_H0826{8});
WY_H0826_2007(isnan(WY_H0826_2007))=-9999;
WY_H0826_2008=(WY_H0826{9});
WY_H0826_2008(isnan(WY_H0826_2008))=-9999;
WY_H0826_2009=(WY_H0826{10});
WY_H0826_2009(isnan(WY_H0826_2009))=-9999;
WY_H0826_2010=(WY_H0826{11});
WY_H0826_2010(isnan(WY_H0826_2010))=-9999;
WY_H0826_2011=(WY_H0826{12});
WY_H0826_2011(isnan(WY_H0826_2011))=-9999;
WY_H0826_2012=(WY_H0826{13});
WY_H0826_2012(isnan(WY_H0826_2012))=-9999;
WY_H0826_2013=(WY_H0826{14});
WY_H0826_2013(isnan(WY_H0826_2013))=-9999;
WY_H0826_2014=(WY_H0826{15});
WY_H0826_2014(isnan(WY_H0826_2014))=-9999;
WY_H0826_2015=(WY_H0826{16});
WY_H0826_2015(isnan(WY_H0826_2015))=-9999;

```

**% SE PROCEDE A GUARDAR EN ARCHIVO .TXT CADA MATRIZ**

```

%%-----
save('PET_estudio_2000.txt','PET_estudio_2000','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2001.txt','PET_estudio_2001','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2002.txt','PET_estudio_2002','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2003.txt','PET_estudio_2003','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2004.txt','PET_estudio_2004','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2005.txt','PET_estudio_2005','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2006.txt','PET_estudio_2006','-ASCII','-append');

```



```
save('PET_estudio_2007.txt','PET_estudio_2007','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2008.txt','PET_estudio_2008','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2009.txt','PET_estudio_2009','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2010.txt','PET_estudio_2010','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2011.txt','PET_estudio_2011','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2012.txt','PET_estudio_2012','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2013.txt','PET_estudio_2013','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2014.txt','PET_estudio_2014','-ASCII','-append');
save('PET_estudio_2015.txt','PET_estudio_2015','-ASCII','-append');
```

```
%%-----
save('WY_estudio_2000.txt','WY_estudio_2000','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2001.txt','WY_estudio_2001','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2002.txt','WY_estudio_2002','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2003.txt','WY_estudio_2003','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2004.txt','WY_estudio_2004','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2005.txt','WY_estudio_2005','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2006.txt','WY_estudio_2006','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2007.txt','WY_estudio_2007','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2008.txt','WY_estudio_2008','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2009.txt','WY_estudio_2009','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2010.txt','WY_estudio_2010','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2011.txt','WY_estudio_2011','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2012.txt','WY_estudio_2012','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2013.txt','WY_estudio_2013','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2014.txt','WY_estudio_2014','-ASCII','-append');
save('WY_estudio_2015.txt','WY_estudio_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0333_2000.txt','WY_H0333_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2001.txt','WY_H0333_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2002.txt','WY_H0333_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2003.txt','WY_H0333_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2004.txt','WY_H0333_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2005.txt','WY_H0333_2005','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0333_2006.txt','WY_H0333_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2007.txt','WY_H0333_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2008.txt','WY_H0333_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2009.txt','WY_H0333_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2010.txt','WY_H0333_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2011.txt','WY_H0333_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2012.txt','WY_H0333_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2013.txt','WY_H0333_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2014.txt','WY_H0333_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0333_2015.txt','WY_H0333_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0337_2000.txt','WY_H0337_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2001.txt','WY_H0337_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2002.txt','WY_H0337_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2003.txt','WY_H0337_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2004.txt','WY_H0337_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2005.txt','WY_H0337_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2006.txt','WY_H0337_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2007.txt','WY_H0337_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2008.txt','WY_H0337_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2009.txt','WY_H0337_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2010.txt','WY_H0337_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2011.txt','WY_H0337_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2012.txt','WY_H0337_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2013.txt','WY_H0337_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2014.txt','WY_H0337_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0337_2015.txt','WY_H0337_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0339_2000.txt','WY_H0339_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2001.txt','WY_H0339_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2002.txt','WY_H0339_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2003.txt','WY_H0339_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2004.txt','WY_H0339_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2005.txt','WY_H0339_2005','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0339_2006.txt','WY_H0339_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2007.txt','WY_H0339_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2008.txt','WY_H0339_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2009.txt','WY_H0339_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2010.txt','WY_H0339_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2011.txt','WY_H0339_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2012.txt','WY_H0339_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2013.txt','WY_H0339_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2014.txt','WY_H0339_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0339_2015.txt','WY_H0339_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0375_2000.txt','WY_H0375_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2001.txt','WY_H0375_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2002.txt','WY_H0375_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2003.txt','WY_H0375_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2004.txt','WY_H0375_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2005.txt','WY_H0375_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2006.txt','WY_H0375_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2007.txt','WY_H0375_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2008.txt','WY_H0375_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2009.txt','WY_H0375_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2010.txt','WY_H0375_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2011.txt','WY_H0375_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2012.txt','WY_H0375_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2013.txt','WY_H0375_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2014.txt','WY_H0375_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0375_2015.txt','WY_H0375_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0787_2000.txt','WY_H0787_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2001.txt','WY_H0787_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2002.txt','WY_H0787_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2003.txt','WY_H0787_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2004.txt','WY_H0787_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2005.txt','WY_H0787_2005','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0787_2006.txt','WY_H0787_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2007.txt','WY_H0787_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2008.txt','WY_H0787_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2009.txt','WY_H0787_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2010.txt','WY_H0787_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2011.txt','WY_H0787_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2012.txt','WY_H0787_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2013.txt','WY_H0787_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2014.txt','WY_H0787_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0787_2015.txt','WY_H0787_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0898_2000.txt','WY_H0898_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2001.txt','WY_H0898_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2002.txt','WY_H0898_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2003.txt','WY_H0898_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2004.txt','WY_H0898_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2005.txt','WY_H0898_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2006.txt','WY_H0898_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2007.txt','WY_H0898_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2008.txt','WY_H0898_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2009.txt','WY_H0898_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2010.txt','WY_H0898_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2011.txt','WY_H0898_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2012.txt','WY_H0898_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2013.txt','WY_H0898_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2014.txt','WY_H0898_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0898_2015.txt','WY_H0898_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0910_2000.txt','WY_H0910_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2001.txt','WY_H0910_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2002.txt','WY_H0910_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2003.txt','WY_H0910_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2004.txt','WY_H0910_2004','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0910_2005.txt','WY_H0910_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2006.txt','WY_H0910_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2007.txt','WY_H0910_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2008.txt','WY_H0910_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2009.txt','WY_H0910_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2010.txt','WY_H0910_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2011.txt','WY_H0910_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2012.txt','WY_H0910_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2013.txt','WY_H0910_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2014.txt','WY_H0910_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0910_2015.txt','WY_H0910_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H1057_2000.txt','WY_H1057_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2001.txt','WY_H1057_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2002.txt','WY_H1057_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2003.txt','WY_H1057_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2004.txt','WY_H1057_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2005.txt','WY_H1057_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2006.txt','WY_H1057_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2007.txt','WY_H1057_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2008.txt','WY_H1057_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2009.txt','WY_H1057_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2010.txt','WY_H1057_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2011.txt','WY_H1057_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2012.txt','WY_H1057_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2013.txt','WY_H1057_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2014.txt','WY_H1057_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H1057_2015.txt','WY_H1057_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H1137_2000.txt','WY_H1137_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2001.txt','WY_H1137_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2002.txt','WY_H1137_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2003.txt','WY_H1137_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2004.txt','WY_H1137_2004','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H1137_2005.txt','WY_H1137_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2006.txt','WY_H1137_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2007.txt','WY_H1137_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2008.txt','WY_H1137_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2009.txt','WY_H1137_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2010.txt','WY_H1137_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2011.txt','WY_H1137_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2012.txt','WY_H1137_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2013.txt','WY_H1137_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2014.txt','WY_H1137_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H1137_2015.txt','WY_H1137_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0788_2000.txt','WY_H0788_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2001.txt','WY_H0788_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2002.txt','WY_H0788_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2003.txt','WY_H0788_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2004.txt','WY_H0788_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2005.txt','WY_H0788_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2006.txt','WY_H0788_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2007.txt','WY_H0788_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2008.txt','WY_H0788_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2009.txt','WY_H0788_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2010.txt','WY_H0788_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2011.txt','WY_H0788_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2012.txt','WY_H0788_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2013.txt','WY_H0788_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2014.txt','WY_H0788_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0788_2015.txt','WY_H0788_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0790_2000.txt','WY_H0790_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2001.txt','WY_H0790_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2002.txt','WY_H0790_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2003.txt','WY_H0790_2003','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0790_2004.txt','WY_H0790_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2005.txt','WY_H0790_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2006.txt','WY_H0790_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2007.txt','WY_H0790_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2008.txt','WY_H0790_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2009.txt','WY_H0790_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2010.txt','WY_H0790_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2011.txt','WY_H0790_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2012.txt','WY_H0790_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2013.txt','WY_H0790_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2014.txt','WY_H0790_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0790_2015.txt','WY_H0790_2015','-ASCII','-append');
```

```
save('WY_H0789_2000.txt','WY_H0789_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2001.txt','WY_H0789_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2002.txt','WY_H0789_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2003.txt','WY_H0789_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2004.txt','WY_H0789_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2005.txt','WY_H0789_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2006.txt','WY_H0789_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2007.txt','WY_H0789_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2008.txt','WY_H0789_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2009.txt','WY_H0789_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2010.txt','WY_H0789_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2011.txt','WY_H0789_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2012.txt','WY_H0789_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2013.txt','WY_H0789_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2014.txt','WY_H0789_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0789_2015.txt','WY_H0789_2015','-ASCII','-append');
```

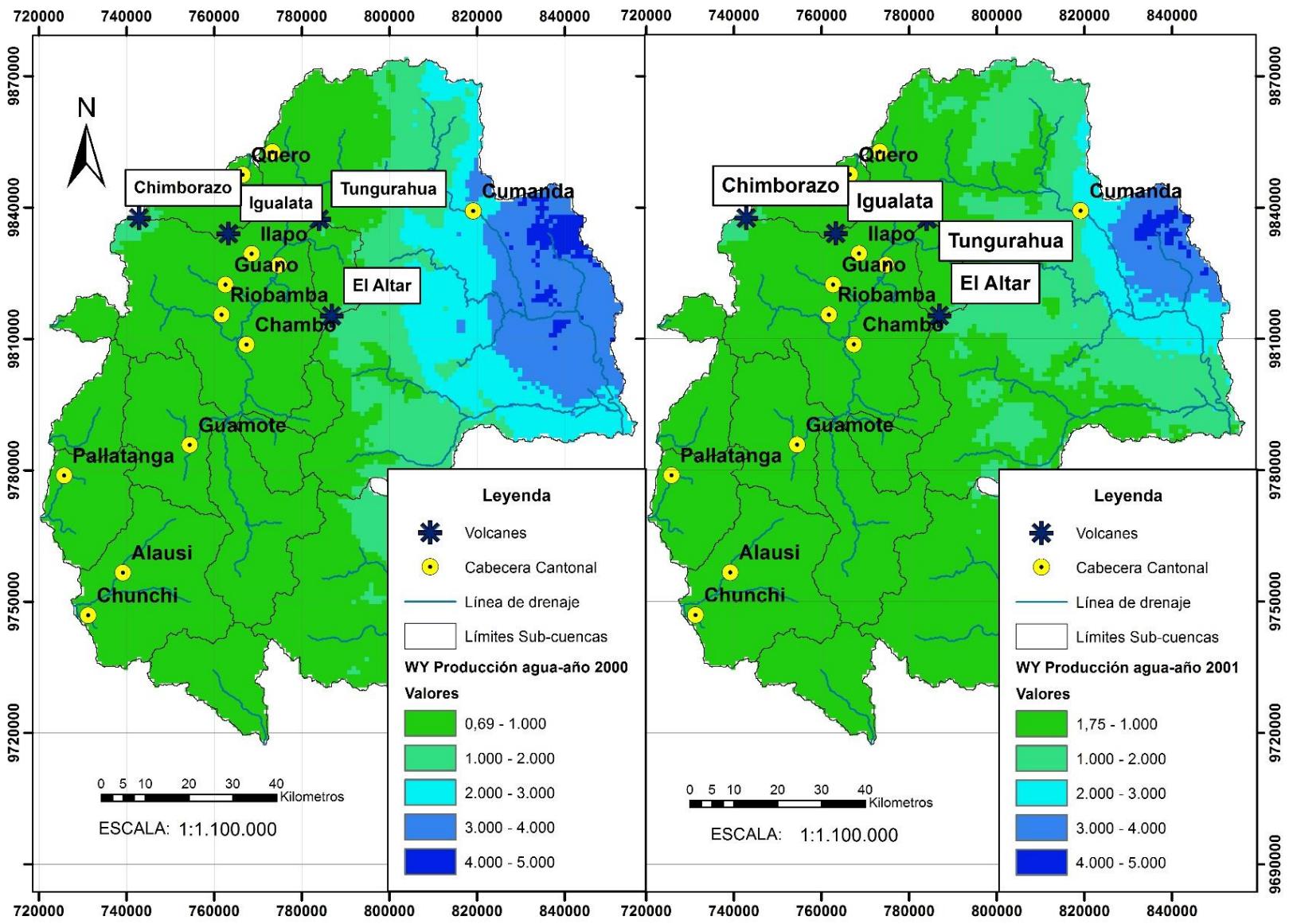
```
save('WY_H0786_2000.txt','WY_H0786_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2001.txt','WY_H0786_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2002.txt','WY_H0786_2002','-ASCII','-append');
```

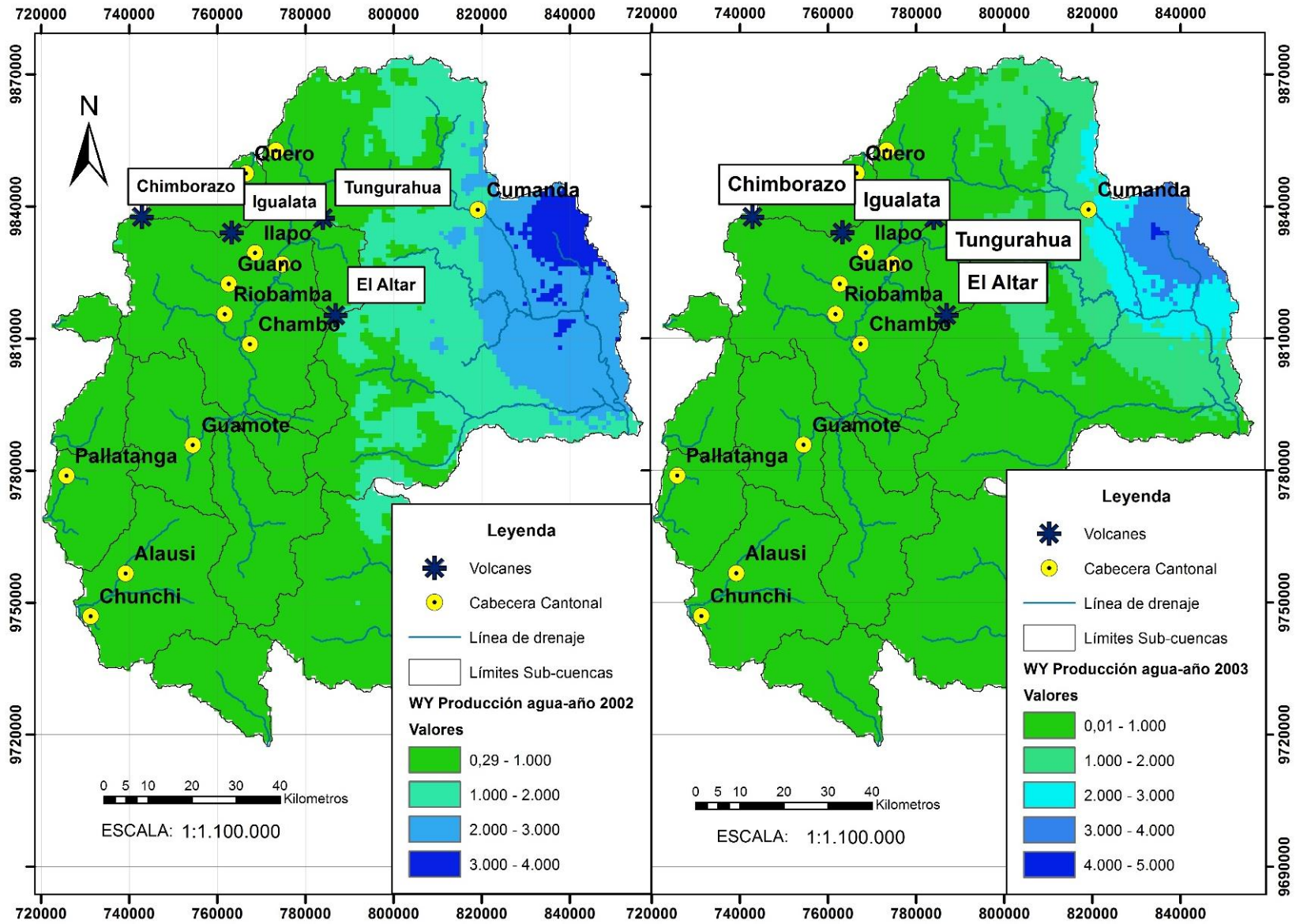
```
save('WY_H0786_2003.txt','WY_H0786_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2004.txt','WY_H0786_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2005.txt','WY_H0786_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2006.txt','WY_H0786_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2007.txt','WY_H0786_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2008.txt','WY_H0786_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2009.txt','WY_H0786_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2010.txt','WY_H0786_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2011.txt','WY_H0786_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2012.txt','WY_H0786_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2013.txt','WY_H0786_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2014.txt','WY_H0786_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0786_2015.txt','WY_H0786_2015','-ASCII','-append');
```

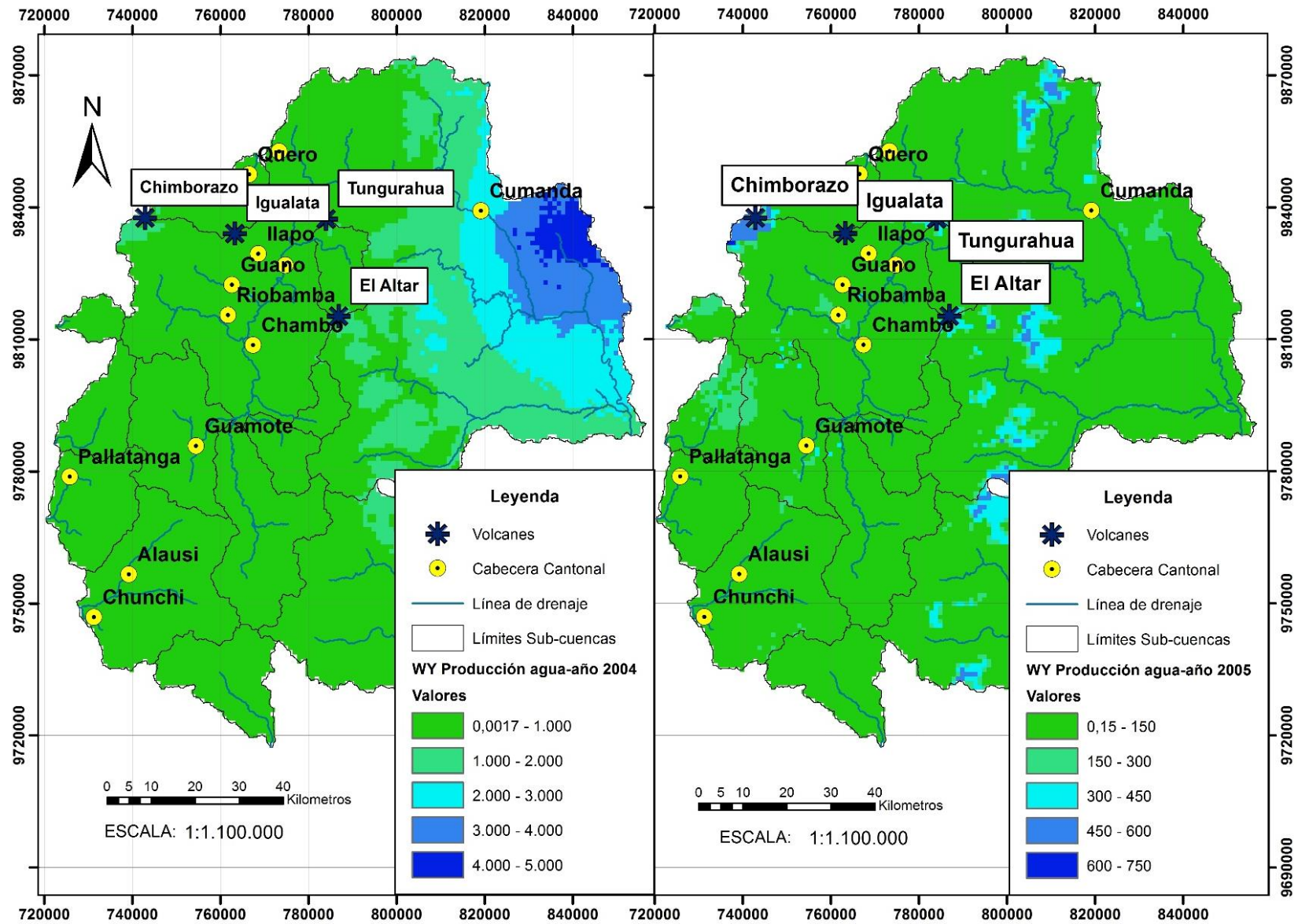
```
save('WY_H0826_2000.txt','WY_H0826_2000','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2001.txt','WY_H0826_2001','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2002.txt','WY_H0826_2002','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2003.txt','WY_H0826_2003','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2004.txt','WY_H0826_2004','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2005.txt','WY_H0826_2005','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2006.txt','WY_H0826_2006','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2007.txt','WY_H0826_2007','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2008.txt','WY_H0826_2008','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2009.txt','WY_H0826_2009','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2010.txt','WY_H0826_2010','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2011.txt','WY_H0826_2011','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2012.txt','WY_H0826_2012','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2013.txt','WY_H0826_2013','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2014.txt','WY_H0826_2014','-ASCII','-append');
save('WY_H0826_2015.txt','WY_H0826_2015','-ASCII','-append');
```

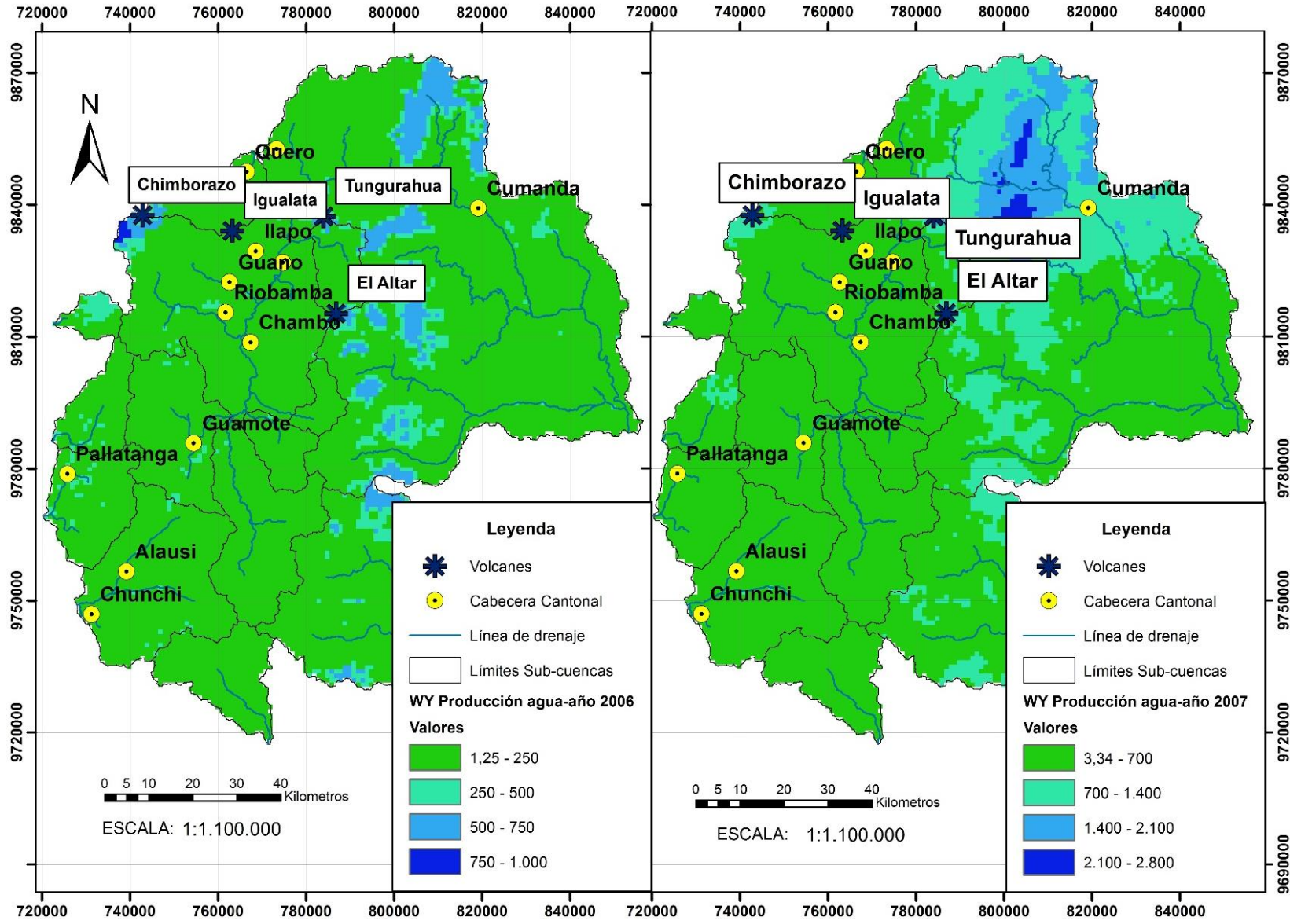


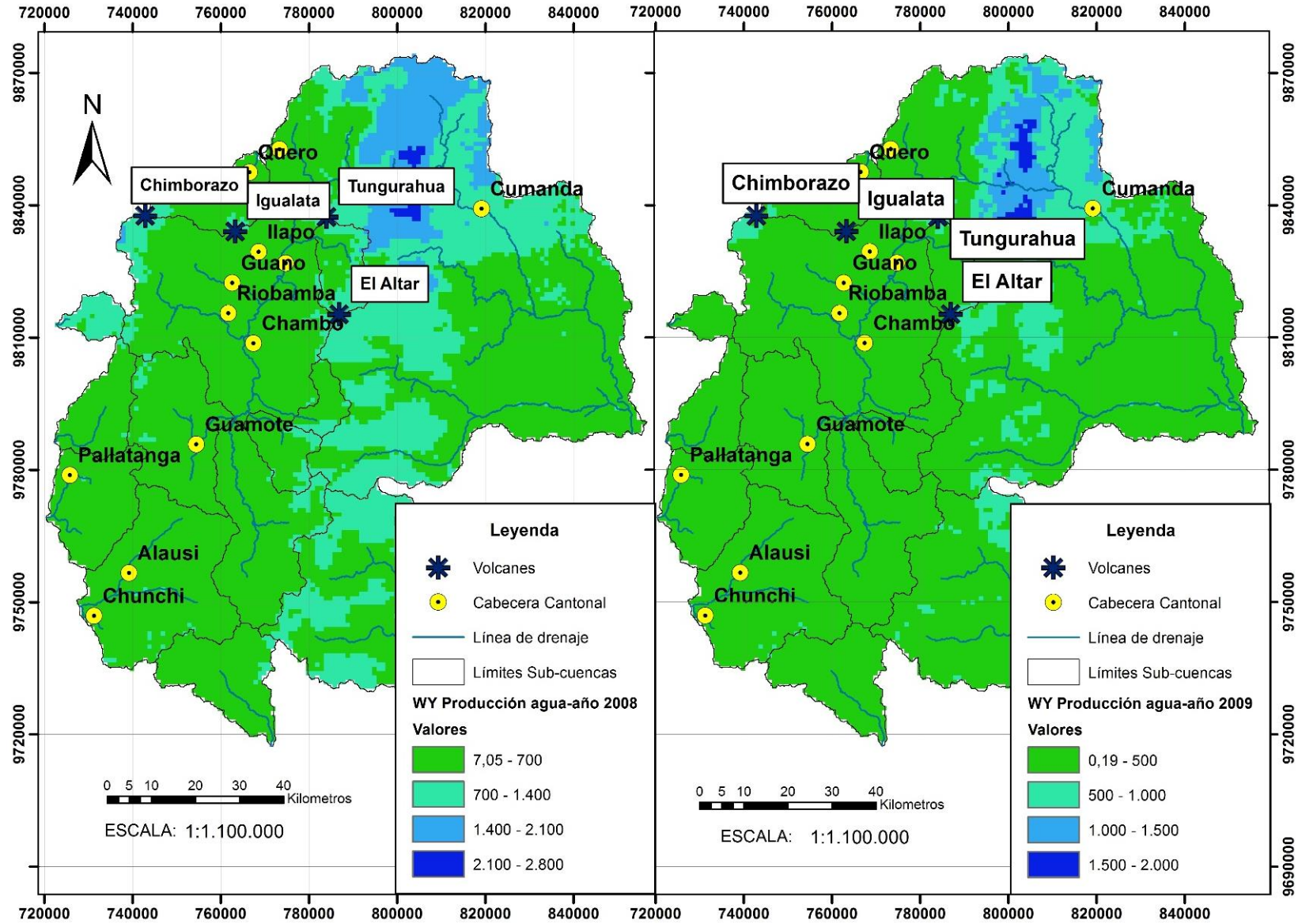
#### **7.4 MAPAS DE WY – PRODUCCIÓN DE AGUA PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS (AÑOS 2000 AL 2015)**

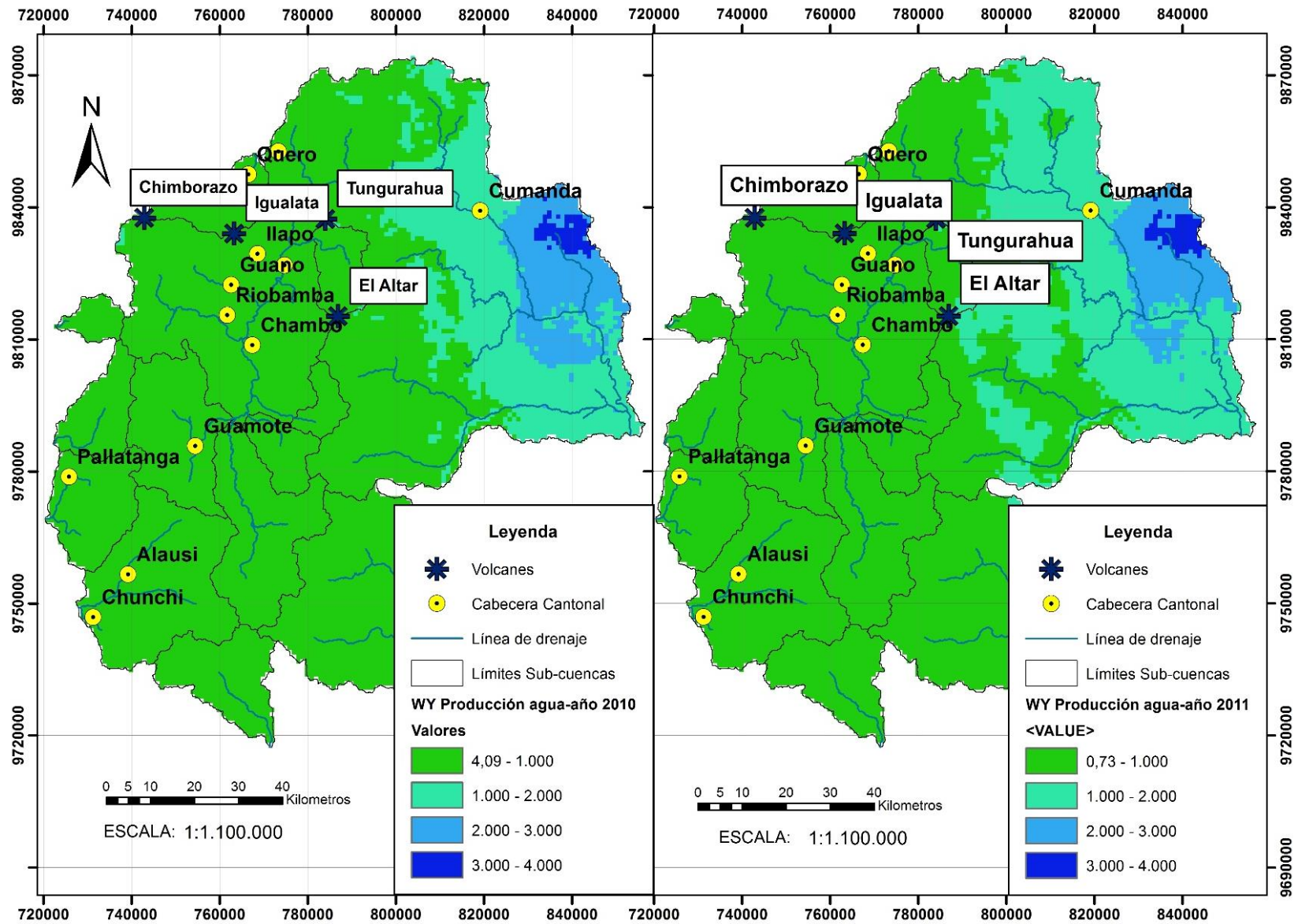


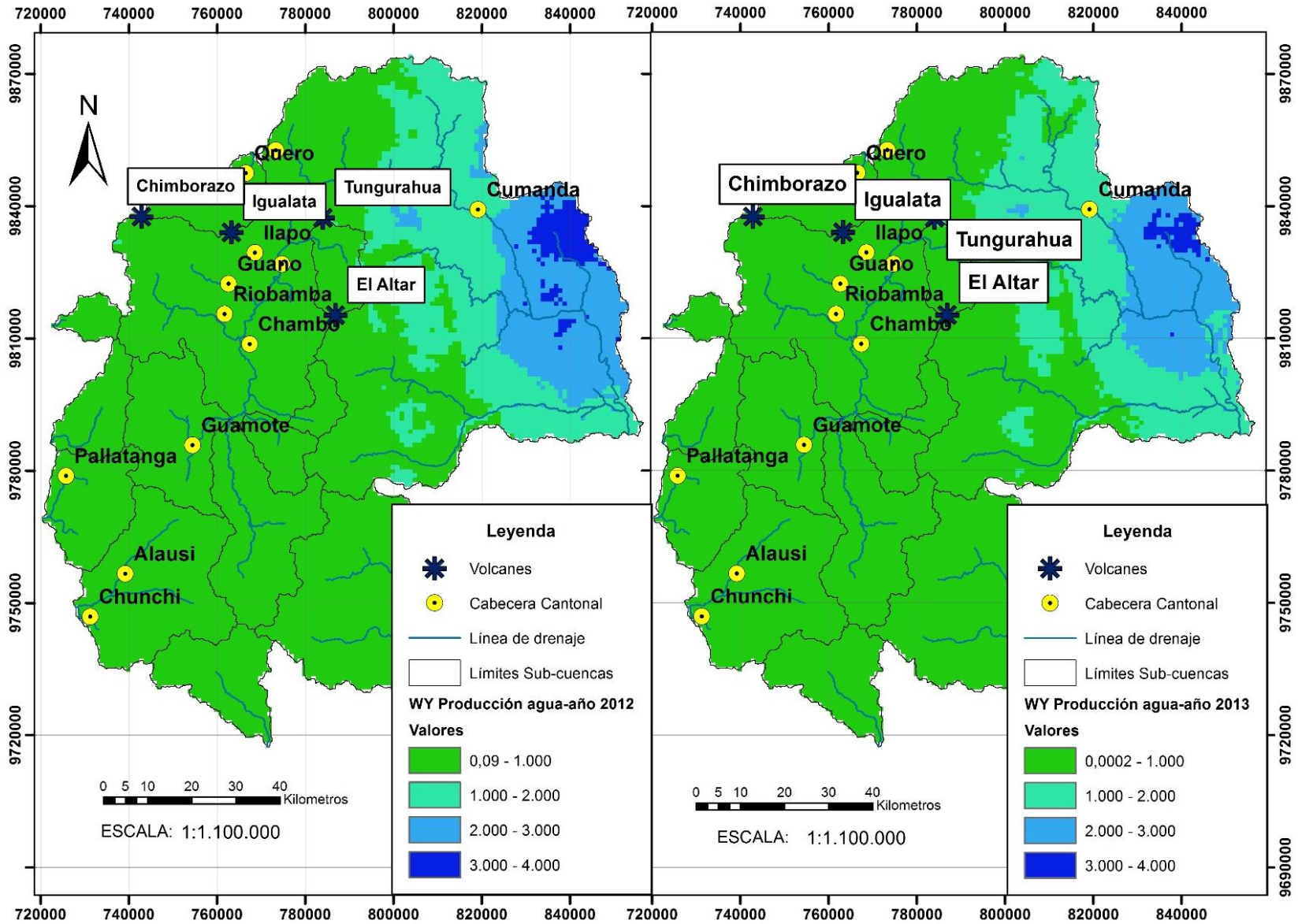




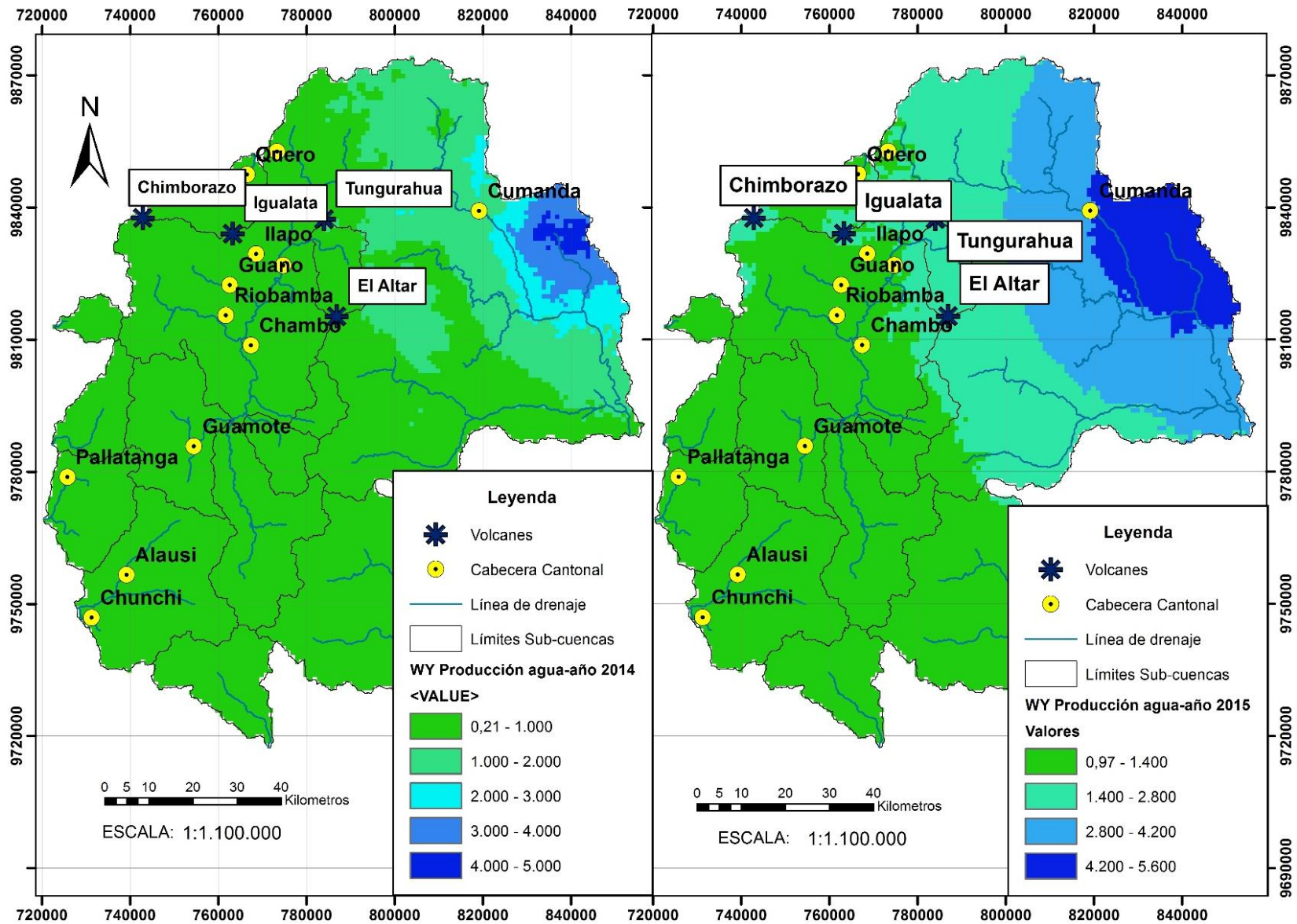












## **7.5 CÓDIGO EN RSTUDIO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL MENSUAL PARA DETERMINAR OBSERVACIONES ATÍPICAS**

## ## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL MENSUAL PARA DETERMINAR OBSERVACIONES ATÍPICAS

## Los conjuntos de datos meteorológicos

#1.0 Análisis inicial

### Datos de precipitación mensual Estación: "M0041"

#Base de datos "M0008\_ROUTLIERS" = data\_M0041

```
data_M<-
read.table("C:/MAESTRIA_VLIR/TESIS_DEFINITIVA/METODO_1/PRECIPITACION_INAMHI/M0041_ROUTLIERS.txt",header=T, dec = ".")
```

```
attach(data_M)
```

```
data_M
```

```
class(data_M)
```

```
View(data_M)
```

```
count.fields("C:/MAESTRIA_VLIR/TESIS_DEFINITIVA/METODO_1/PRECIPITACION_INAMHI/M0041_ROUTLIERS.txt")
```

#Dimensión de la base de datos

```
dim(data_M)
```

# % global de los datos perdidos faltantes (NA)

```
porc_datos_perd1<-((sum(is.na.data.frame(data_M)))*100)/(12*51)
```

```
porc_datos_perd1 #El NA (%) = 17 % aprox.
```

### #RESUMEN

```
resumen1<-summary(data_M)
```

```
resumen1
```

## Convert the data frame to list, select the data columns

```
list.months <- as.list(data_M[1:nrow(data_M),3:ncol(data_M)]) ##[rows:cols], cols without code and year
```

```
list.months
```

### ## CUARTILES 25 Y 75

```
cuartil75.resumen1<-lapply(list.months, quantile,.75, na.rm=TRUE)
```

```
View(cuartil75.resumen1)
```

```
class(cuartil75.resumen1)
```

```
cuartil75.resumen1.1<-as.numeric(cuartil75.resumen1)
```

```
cuartil75.resumen1.1
```

```
View(cuartil75.resumen1.1)
```

```
cuartil75.resumen1.1+1 ##para comprobar que los datos sean numericos y se pueda realizar una operaci3n matem3tica
```

```
cuartil25.resumen1<-lapply(list.months, quantile,.25, na.rm=TRUE)
```

```
cuartil25.resumen1
```

```
View(cuartil25.resumen1)
```

```
class(cuartil25.resumen1)
```

```
cuartil25.resumen1.1<-as.numeric(cuartil25.resumen1)
```

```
cuartil25.resumen1.1
```

```
View(cuartil25.resumen1.1)
```

### **##RANGO INTERCUARTIL**

```
IRQ.resumen1 <- lapply(list.months, IQR, na.rm=TRUE)
```

```
IRQ.resumen1
```

```
class(IRQ.resumen1)
```

```
IRQ.resumen1.1<-as.numeric(IRQ.resumen1)
```

```
IRQ.resumen1.1
```

```
View(IRQ.resumen1.1)
```

```
class(IRQ.resumen1.1)
```

```
3*IRQ.resumen1.1
```

### **#Outliers - Datos at3picos**

#### **#Valores At3picos leves**

#### **#Rango Superior**

```
Pout.mensualsup1_lev<-(cuartil75.resumen1.1+(1.5*IRQ.resumen1.1))
```

```
Pout.mensualsup1_lev
```

```
Pout.resumensup1_lev <- as.data.frame(Pout.mensualsup1_lev)
```

```
Pout.resumensup1_lev
```

```
tPout.resumensup1_lev<-t(Pout.resumensup1_lev)
```

```
View(tPout.resumensup1_lev)
```

**# Rango Inferior**

```
Pout.mensualinf1_lev<-(cuartil25.resumen1.1-(1.5*IRQ.resumen1.1))
Pout.mensualinf1_lev
Pout.resumeninf1_lev <- as.data.frame(Pout.mensualinf1_lev)
Pout.resumeninf1_lev
tPout.resumeninf1_lev<-t(Pout.resumeninf1_lev)
View(tPout.resumeninf1_lev)
```

**#Valores Atípicos extremos****#Rango Superior**

```
Pout.mensualsup1_ext<-(cuartil75.resumen1.1+3*IRQ.resumen1.1)
Pout.mensualsup1_ext
Pout.resumensup1_ext <- as.data.frame(Pout.mensualsup1_ext)
Pout.resumensup1_ext
tPout.resumensup1_ext<-t(Pout.resumensup1_ext)
View(tPout.resumensup1_ext)
```

**#Rango Inferior**

```
Pout.mensualinf1_ext<-(cuartil25.resumen1.1-(3*IRQ.resumen1.1))
Pout.mensualinf1_ext
Pout.resumeninf1_ext <- as.data.frame(Pout.mensualinf1_ext)
Pout.resumeninf1_ext
tPout.resumeninf1_ext<-t(Pout.resumeninf1_ext)
View(tPout.resumeninf1_ext)
```

**#Diagrama de Caja**

```
boxplot(data_M[,3:ncol(data_M)], col="blue", main="Boxplot, Prec. Mensual, Estacion-M0041")
boxplot(data_M$ene, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Enero")
boxplot(data_M$feb, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Febrero")
boxplot(data_M$mar, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Marzo")
boxplot(data_M$abr, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Abril")
boxplot(data_M$may, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Mayo")
boxplot(data_M$jun, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Junio")
boxplot(data_M$jul, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Julio")
```

```
boxplot(data_M$ago, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Agosto")  
boxplot(data_M$sep, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Septiembre")  
boxplot(data_M$oct, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Octubre")  
boxplot(data_M$nov, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Noviembre")  
boxplot(data_M$dic, col="green", main="Boxplot, Estacion M0041, Mes: Diciembre")
```

## **7.6 CÓDIGO EN RSTUDIO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL DIARIO UTILIZANDO CLIMATOL**

**## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS A NIVEL DIARIO UTILIZANDO CLIMATOL****## Preparation of the input files:**

```
library(climatol)
setwd("H:/MAESTRIA_VLIR/METODO_2/CLIMATOL")
library(readr)
datp<-read.csv("Ttest_1993_2014.dat",header = F,sep = ";",fill=F)
#datp <- read_delim("Ttest_1993-2014.dat",";", escape_double = FALSE, trim_ws = TRUE)
#estp_c <- read_delim("Ttest_1993-2014.est",";", escape_double = FALSE, trim_ws = TRUE)
datp1<-datp[,1]
View(datp1)
datp2<-datp[,2]
datp3<-datp[,3]
datp4<-datp[,4]
datp5<-datp[,5]
datp6<-datp[,6]
datp7<-datp[,7]

datpf <- matrix(c(datp1,datp2,datp3,datp4,datp5,datp6,datp7),nrow=length(datp7))
datp<-datpf
estp_c<-read.csv("Ttest_1993_2014.est",sep = ";")
write(datp,'Ttest1_1993-2014.dat',sep = " ")
dd2m('Ttest1',1993,2014)# Calcule datos mensuales de series diarias
homogen('Ttest1-m',1993,2014)# Homogeneización automática de series climatológicas
homogen('Ttest1',1993,2014,dz.max=7,metad=TRUE)
load('Ttest1_1993-2014.rda')
```